



# CIÊNCIAS DO MAR:

dos oceanos  
do mundo ao  
Nordeste do Brasil

**Volume** **1**

Oceano, Clima,  
Ambientes e  
Conservação

Danielle de Lima Viana  
Jorge Eduardo Lins Oliveira  
Fábio Hissa Vieira Hazin  
Marco Antonio Carvalho de Souza

The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial data. This includes not only sales and purchases but also expenses, income, and any other financial activities. The text explains that proper record-keeping is essential for identifying trends, managing cash flow, and preparing for tax obligations.

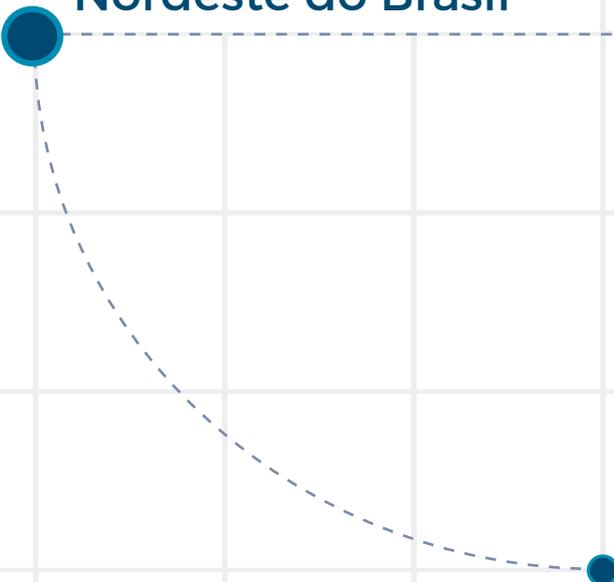
The second section focuses on the classification of expenses. It provides a detailed breakdown of various cost categories, such as direct materials, labor, and overheads. The author explains how these costs are allocated to different products or services, which is crucial for determining their true profitability. This section also touches upon the importance of using consistent accounting methods to ensure comparability over time and across different periods.

In the third part, the document addresses the issue of asset valuation. It discusses how the value of assets can change over time due to depreciation, amortization, or market fluctuations. The text provides guidelines on how to accurately measure and report these changes, ensuring that the balance sheet reflects the current value of the company's resources. It also mentions the importance of regular audits to verify the accuracy of these valuations.

The final section of the document deals with the preparation of financial statements. It outlines the steps involved in compiling the data from the various accounts into a coherent set of reports, including the income statement, balance sheet, and cash flow statement. The author stresses the need for transparency and accuracy in these statements, as they are often used by stakeholders to make informed decisions about the company's financial health and future prospects.

# CIÊNCIAS DO MAR:

dos oceanos  
do mundo ao  
Nordeste do Brasil



**Volume 1**  
Oceano, Clima,  
Ambientes e  
Conservação

Danielle de Lima Viana  
Jorge Eduardo Lins Oliveira  
Fábio Hissa Vieira Hazin  
Marco Antonio Carvalho de Souza

Recife, 2021  
Via Design Publicações

## Editores

### Danielle de Lima Viana

Doutora em Oceanografia na  
Universidade Federal de Pernambuco

Pesquisadora do Departamento de Pesca  
e Aquicultura da Universidade Federal  
Rural de Pernambuco

vianadl@yahoo.com

### Jorge Eduardo Lins Oliveira

Doutor em Biologia Marinha na  
Université Marie et Pierre Curie  
-Paris 6-França

Professor Titular do Departamento  
de Oceanografia e Limnologia da  
Universidade Federal do Rio Grande  
do Norte

jorgelins@me.com

### Fábio Hissa Vieira Hazin

Doutor em em Marine Science and  
Technology/Fisheries Oceanography, na  
Tokyo University of Marine Science and  
Technology

Professor Titular do Departamento de  
Pesca e Aquicultura da Universidade  
Federal Rural de Pernambuco

fabio.hazin@ufrpe.br

### Marco Antonio Carvalho de Souza

Capitão de Fragata da Marinha do Brasil

Secretaria da Comissão Interministerial  
para os Recursos do Mar-SECIRM

Coordenador do Programa PROILHAS

marco.carvalho@secirm.mar.mil.br

## Parecer e revisão por pares

Os textos que compõem essa obra foram  
submetidos à avaliação de um Conselho Revisor,  
bem como revisados por pares, sendo indicados  
para publicação.

## Conselho revisor

Danielle de Lima Viana  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

David Mendes  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Fábio Hissa Vieira Hazin  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Fabrcio Berton Zanchi  
Universidade Federal do Sul da Bahia

Fernando Manuel Raposo Morgado  
Universidade de Aveiro- Portugal

Francisco Sekiguchi Buchmann  
Universidade Estadual Paulista

Fúlvio Aurélio de Morais Freire  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

George Satander Sá Freire  
Universidade Federal do Ceará

Helena Lopes Galasso  
Université de Montpellier, Ecole Doctorale GAIA

Igor da Mata Oliveira  
Universidade Federal de Alagoas

João Paulo Machado Torres  
Universidade Federal do Rio de Janeiro

Jorge Eduardo Lins Oliveira  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Luis Henrique Poersch  
Universidade Federal do Rio Grande

Marcelo Roberto Souto de Melo  
Universidade de São Paulo

Paulo Guilherme Vasconcelos de Oliveira  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Pollyana Christine Gomes Roque  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Roberto Fioravanti Carelli Fontes  
Universidade Estadual Paulista

Ronaldo Olivera Cavalli  
Universidade Federal do Rio Grande

Sérgio de Magalhães Rezende  
Centro Nacional de Pesquisa e Conservação  
da Biodiversidade  
Marinha do Nordeste-CEPENE

Teodoro Vaske Junior  
Universidade Estadual Paulista Julio de  
Mesquita Filho

Vanildo Souza de Oliveira  
Universidade Federal Rural de Pernambuco

## Projeto gráfico e diagramação

Via Design Publicações

## Foto capa

Renato Albuquerque

Todo o conteúdo científico apresentado  
nos capítulos dessa obra são de exclusiva  
responsabilidade dos respectivos autores,  
incluindo as informações referentes aos  
créditos das fotos e imagens, excetuando-se  
as imagens que abrem os capítulos.

## Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) (Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Ciências do mar : dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil : oceano, clima, ambientes e  
conservação / [editores] Danielle de Lima Viana  
... [et al.].-- 1. ed.-- Olinda, PE : Via Design Publicações, 2021.

Outros editores : Jorge Eduardo Lins Oliveira, Fábio Hissa Vieira Hazin, Marco Antonio  
Carvalho de Souza.

ISBN 978-65-995372-1-9

1. Aquicultura 2. Ciências 3. Ecologia 4. Mares 5. Oceanos 6. Pesca I. Oliveira, Jorge  
Eduardo Lins. II. Hazin, Fábio Hissa Vieira. III. Souza, Marco Antonio Carvalho de.

21-70616

CDD-551.46

## Índices para catálogo sistemático:

1. Mares e oceanos : Oceanografia 551.46  
Aline Grazielle Benitez- Bibliotecária- CRB-1/3129

----- ● Prefácio **4**

Apresentação **6**

A Amazônia Azul: a nova fronteira Brasileira **8**

**1** Ciências do mar: origem, conceitos e fundamentos **22**

Jorge Eduardo LINS OLIVEIRA

José GARCIA JUNIOR

Pollyana Christine Gomes ROQUE

Danielle de Lima VIANA

**2** Introdução à oceanografia química **52**

Manuel de Jesus FLORES MONTES

Eliete ZANARDI-LAMARDO

Gilvan Takeshi YOGUI

**3** Oceanografia física do Atlântico tropical: processos hidrotermodinâmicos **74**

Carlos Alexandre Domingos LENTINI

Marcus André SILVA

Dóris Regina Aires VELEDA

Moacyr Cunha de ARAÚJO Filho

Marcio Machado CINTRA

Humberto Lázaro Varona GONZÁLEZ

Carlos Eduardo Peres TEIXEIRA

Leonardo Vieira Bruto da COSTA

Luís Felipe Ferreira de MENDONÇA

Júlia Martins de ARAÚJO

**4** Interações energéticas oceano-atmosfera **96**

David MENDES

Monica Cristina Damião MENDES

Marcio Machado CINTRA

**5** Elementos de meteorologia física e fenômenos atmosféricos **118**

Igor DA MATA-OLIVEIRA

Fabício Berton ZANCHI

Natalia Pereira de CAMPOS

**6** Princípios básicos do sensoriamento remoto e suas aplicações na oceanografia e na pesca **150**

Antônio Geraldo FERREIRA

Paulo TRAVASSOS

**7** Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos **188**

Helenice VITAL

**8** Salinas: ambientes extremos no Nordeste do Brasil **218**

Marcos Rogério CAMARA

**9** Delta do Parnaíba: ecologia e conservação **230**

Cezar A. F. FERNANDES

Francisca Edna de Andrade CUNHA

**10** Ambientes recifais da região Nordeste: um olhar para a influência da atividade humana **240**

Daniel Brandt GALVÃO

Sara de Castro LOEBENS

Daniele VILA-NOVA

Daniele Laura Bridi MALLMANN

Ananda Marieta Silva TELES

Beatrice Padovani FERREIRA

**11** Mar profundo: registro da história e organismos do Nordeste do Brasil **268**

Pollyana Christine Gomes ROQUE

Alessandra Maria Advíncula PIRES

Rômulo Costa Pires FERREIRA

Diogo Martins NUNES

Ralf Tarciso Silva CORDEIRO

Jorge Eduardo LINS OLIVEIRA

**12** Gestão de áreas costeiras e marinhas protegidas no Nordeste do Brasil **298**

Ilka Branco NUNES

Natalia Alves BEZERRA

Carolina Neves SOUZA

Diogo Martins NUNES

Fábio Hissa Vieira HAZIN

**13** O panorama da arqueologia subaquática no Nordeste do Brasil **326**

Carlos Celestino RIOS E SOUZA

Marília Perazzo Valadares do AMARAL

**14** Poluição aquática **340**

Maria Christina B. de ARAÚJO

Monica Ferreira da COSTA

Jacqueline S. SILVA-CAVALCANTI

Nilson SANT'ANNA JR



# PREFÁCIO



## CIÊNCIAS DO MAR: BELEZA DE SABER

Significa especial privilégio para o Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte apresentar um livro como este “*Ciências do Mar: dos oceanos do mundo ao Nordeste do Brasil*”.

Concebido como material didático para pesquisadores e estudantes das áreas das Ciências Biológicas, Engenharia de Pesca e de Aquicultura, Ecologia, Oceanografia e Geologia, dentre outras, reflete um notável esforço acadêmico, ao reunir mais de 50 pesquisadores de 17 universidades e institutos de pesquisa.

Para torná-lo realidade, houve decisivo apoio do Programa de Pesquisas Científicas nas Ilhas Oceânicas (PROILHAS), por meio da integração SECIRM – UFRN – FUNPEC.

O resultado é esse: dois belos volumes disponibilizando informações preciosas da realidade da região Nordeste do Brasil, advindas de pesquisadores que atuam na área das Ciências do Mar, incluindo o Programa de Pesquisas Científicas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPELAGO), coordenado pela SECIRM / MARINHA DO BRASIL.

Não posso deixar de registrar meu entusiasmo diante da riqueza do conteúdo e da beleza da obra, tão rica que exigiu uma edição em dois volumes para conforto e deleite do leitor. Por ela é possível comprovar que ciência e beleza, longe de se excluírem, podem e devem convergir no esforço de difundir conhecimento com inspiração.

É o que comprova este manual com seguras orientações para iniciar uma bela viagem científica.

Natal, julho de 2021.

**José Daniel Diniz Melo**

Reitor da Universidade Federal do Rio Grande do Norte

# APRESENTAÇÃO



Após a realização de várias conferências e fóruns internacionais realizados na busca de se alcançar o Desenvolvimento Sustentável, foi implementado em 2005 pela ONU, o Plano Internacional denominado “Década da Educação para o Desenvolvimento Sustentável - EDS” (2005 a 2014). Este Plano tinha como objetivo maior o desenvolvimento da educação como vetor para a promoção de valores, atitudes, capacidades e comportamentos, tendo o combate à degradação ambiental como um dos seus principais alvos. Concluída a EDS em 2014 sem que resultados significativos tenham sido alcançados e no intuito de dar continuidade às ações já iniciadas, a ONU estabeleceu em 2015, a “Agenda para o Desenvolvimento Sustentável”, na qual estão previstos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que devem ser alcançados por todos os países até 2030.

Nesta agenda, destaca-se o Objetivo 14 - "Vida na Água", que tem o intuito de promover a conservação dos ecossistemas marinhos e costeiros, através do uso sustentável de seus recursos naturais. Neste contexto, a ONU em 2017, considerando a urgência na promoção de ações efetivas e buscando cumprir os compromissos da Agenda 2030, proclamou a "Década da Ciência Oceânica

para o Desenvolvimento Sustentável", a ser implementada no período de 2021 a 2030.

O Brasil, com sua extensa área marítima, denominada Amazônia Azul, que equivale a 67% de todo o território terrestre e que desempenha um papel fundamental no desenvolvimento do país, por ser a principal via de transporte marítimo, por seus recursos naturais, sua imensa biodiversidade e suas riquezas minerais, se insere na Agenda 2030 por meio do X Plano Setorial para os Recursos do Mar (X PSRM), desenvolvido no âmbito da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), cuja aprovação foi publicada no Decreto nº 10.544, de 16 de novembro de 2020. O referido Plano tem como propósito sistematizar as atividades de pesquisa para atender à demanda de informações sobre os recursos naturais e energéticos das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), ilhas oceânicas e áreas marítimas internacionais de interesse, propiciando condições para a exploração sustentável e o monitoramento efetivo da Amazônia Azul, o que contribui para o enfrentamento de situações emergenciais, como alterações climáticas significativas, e para o desenvolvimento e implementação da Economia Azul. O X PSRM enfoca a contribuição para a implementação dos aspectos da Agenda 2030

ligados aos oceanos e a Zona Costeira, bem como dos compromissos assumidos relacionados aos ODS, uma vez que cada uma das ações previstas no mesmo, guarda estreita relação com as metas do ODS 14.

Além disso, o Ministério da Ciência e Tecnologia (MCTI), que é um dos membros da CIRM e tem por função promover e coordenar a participação do País em atividades da Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI/UNESCO) relativas às Ciências Oceânicas, também lançou, em 2020, a "Década da Ciência Oceânica no Brasil". Através de seu Programa Ciência no Mar, cujo objetivo principal é a promoção do conhecimento que permita a exploração sustentável dos recursos naturais marinhos, o MCTI busca envolver instituições de ensino e pesquisa nacionais, promovendo as Ciências do Mar, integrando cientistas, instituições governamentais e sociedade como um todo, no intuito de assegurar a conservação e o uso sustentável da nossa Amazônia Azul.

Neste esforço nacional para a "Década da Ciência Oceânica no Brasil", consideramos oportuno o lançamento desta obra, que visa contribuir para que se promova o conhecimento e o uso racional e sustentável dos recursos marinhos, equilibrando

as demandas para o desenvolvimento, com a proteção do meio ambiente. A colaboração e dedicação de mais de 50 autores de diversas instituições de ensino e pesquisa nacionais, nos permitiu reunir informações sobre as diversas áreas do conhecimento inseridas nas Ciências do Mar, apresentadas em dois volumes e 32 capítulos. O volume 1, com 14 capítulos, aborda os temas relacionados ao Oceano, Clima, Ambientes e a Conservação, enquanto o volume 2, com 18 capítulos, trata sobre a Bioecologia Marinha, a Pesca e a Aquicultura.

Esperamos que esta obra contribua para atender as necessidades dos professores e estudantes dos diversos cursos de graduação e programas de pós-graduação associados ao ensino das Ciências do Mar no Brasil, fornecendo subsídios teóricos e científicos para melhor contextualizar a compreensão dos nossos mares e oceanos. Foi para todos nós uma grande honra termos tido o privilégio de participar da construção desse trabalho, que dedicamos a todos os estudantes que direcionam sua formação para um conhecimento mais aprofundado da nossa Amazônia Azul.

# AMAZÔNIA AZUL: A NOVA FRONTEIRA BRASILEIRA

Marco Antonio CARVALHO DE SOUZA<sup>1</sup>

Flávio Luiz GIACOMAZZI<sup>1</sup>

Carlos Roberto LEITE<sup>1</sup>

Marcio Renato LEITE<sup>1</sup>

Christiano Alves F. dos SANTOS<sup>1</sup>

Marzone Affonso Rêgo GAVINO<sup>1</sup>

Ana Lúcia Oliveira COSTALUNGA<sup>1</sup>

Rodrigo de Campos CARVALHO<sup>1</sup>

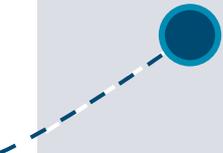
Maria Fernanda Rezende ARENTZ<sup>1</sup>

Vitória Régia Coelho COSTA<sup>1</sup>

Jorge Eduardo LINS OLIVEIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Secretaria da Comissão Interministerial para os  
Recurso do Mar - SECIRM - Marinha do Brasil

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN



Os Oceanos, ambientes que ocupam 71% da superfície do planeta estão intrinsecamente ligados à manutenção da vida na Terra, oferecendo alternativas para grandes desafios globais, tais como: erradicação da fome; adaptação às alterações climáticas; diversificação das matrizes energéticas com amplo espectro de aplicação, desde energia limpa ao desenvolvimento de fármacos e aplicação de inovações tecnológicas provenientes da bioprospecção. Para se ter uma ideia da atual relevância do oceano para a sobrevivência humana, estima-se que 3 bilhões de pessoas em todo o planeta, ou seja, aproximadamente 40% da população mundial, dependa diretamente da biodiversidade costeira e marinha para o seu sustento. Entretanto, apesar do Oceano cobrir mais de dois terços do nosso planeta, muito pouco se conhece sobre os mesmos, e não é possível proteger aquilo que não se conhece e que não se enxerga por estar submerso. Mesmo contribuindo com inúmeros benefícios para a sociedade, tanto econômicos, como sociais e ambientais, o oceano está enfrentando múltiplas ameaças, regionais e globais, como a poluição, a redução da biodiversidade pela remoção em massa da biodiversidade marinha na forma de sobrepesca e biodiversidade marinha descartada pela pesca (*by catch*), além da acidificação, a degradação de ecossistemas como a erosão costeira, perda de ambientes recifais e também desequilíbrio físico como aumento da temperatura superficial dos oceanos.

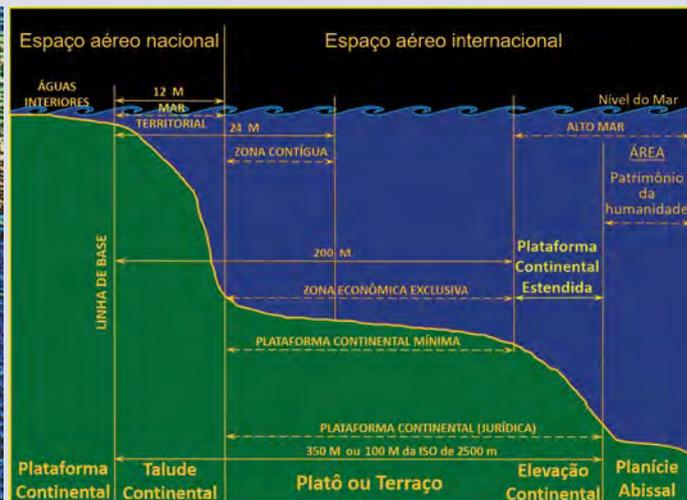
Com o recente aumento populacional/demográfico significativo as demandas sobre os recursos marinhos e o uso do mar em geral aumentaram substancialmente nas últimas décadas. De acordo com o relatório da Organização para a Cooperação e Desenvolvimento Econômico (OCDE) de 2016, os recursos marinhos vivos e não vivos representam a sétima maior economia do mundo, e estima-se que o valor gerado pela indústria oceânica (pesca, transporte, óleo e gás, mineração, turismo, composto bioativos e fármacos) globalmente em bases sustentáveis poderia dobrar de 1,5 trilhão de dólares em valor agregado global em 2010 para 3 trilhões de dólares em 2030. Em particular, a maricultura, a pesca, o processamento de pescado, as atividades marítimas portuárias e eólicas *offshore* foram apontadas como as de maior potencial de crescimento.

Neste sentido, a Assembleia Geral das Nações Unidas aprovou, em 2015, a Agenda 2030 para o desenvolvimento sustentável. Nela foram estabelecidos 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), que devem ser alcançados por todos os países até 2030. O Objetivo 14 da Agenda 2030, Vida na Água, visa conservar e promover o uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos. Na sequência, as Nações Unidas instituíram o período de 2021 a 2030 como a “Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável”, também conhecida como a “Década dos Oceanos”, com a intenção de promover a ciência e a difusão de tecnologias

oceânicas, integrando cientistas, empresários, organizações da sociedade civil e governos. Portanto, a saúde dos Oceanos vem, muito oportunamente, ganhando prioridade nos fóruns internacionais que tratam do tema.

Em 2021, então, iniciou-se a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, conforme promulgado pela Organização das Nações Unidas (ONU), fruto da necessidade de se atuar em prol da saúde daqueles que confere o principal suporte para manutenção da vida no planeta: Os Oceanos. Nesse contexto, o Brasil ganha destaque, uma vez que possui uma imensa área marítima do oceano Atlântico sob sua jurisdição:

uma área equivalente a 67% do nosso território terrestre, com extensão de cerca de 5,7 milhões de km<sup>2</sup>, convencionalmente chamada de Amazônia Azul. Sua importância é inquestionável, por ser a principal via de transporte do comércio exterior do país, por sua diversidade de recursos naturais como a pesca, por suas reservas de petróleo e gás e outros recursos minerais, além de sua influência sobre o clima do Brasil e da América do Norte. O efetivo conhecimento e o uso compartilhado do ambiente marinho, de forma planejada, organizada e sustentável, é, portanto, um grande desafio para o estado brasileiro, uma vez que pressupõe o envolvimento e participação de diferentes setores atuantes nas áreas costeiras e marinhas.



Plataforma Continental, Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e Zona Contígua, que compõem a Amazônia Azul Brasileira.

Fonte: Acervo da SECIRM- Marinha do Brasil.

O Brasil, possuidor de uma das maiores biodiversidades terrestres e marinhas do planeta, encontra-se alinhado à comunidade internacional na preocupação com as “novas ameaças”, destacadamente o combate ao terrorismo, ao narcotráfico, ao tráfico ilícito de armas, ao contrabando e descaminho, à poluição marinha, à pesca ilegal, ao tráfico de pessoas, às pesquisas não autorizadas e à pirataria. No intuito de contrapor ao avanço de tais ameaças, em grande parte transfronteiriças, torna-se primordial o incremento da Segurança Marítima no país, a qual se sustenta em quatro relevantes pilares, a saber: a segurança nacional, a segurança da vida humana, o meio ambiente e o uso econômico sustentável do mar. Estatísticas apontam que 19% do PIB brasileiro têm origem no mar (pesca, gás e óleo e turismo). Além disso, dentre as principais atividades econômicas diretamente influenciadas pelo mar no Brasil destacam-se: Petróleo e Gás, Extração Mineral, Defesa, Portos e Transporte Marítimo (são 175 instalações portuárias de carga, incluindo portos, terminais marítimos e instalações aquaviárias), Indústria Naval, Turismo e Esportes Náuticos, Pesca e Aquicultura, e Biotecnologia.

O Oceano Atlântico Sul e Tropical e a Zona Costeira brasileira são, de fato, estratégicos para o desenvolvimento e a Segurança Nacional, em razão da sua extensão e da vocação econômica marítima do país. No que se refere à dimensão da integridade do patrimônio nacional, são imprescindíveis a preservação e a vigilância desse Mar Territorial, Zona Contígua, Zona Econômica Exclusiva e Plataforma Continental Brasileira que compõem a nossa Amazônia Azul.

## PLANEJAMENTO E ESTRATÉGIA

O trato das questões relacionadas ao ambiente marinho em linhas gerais, requer o envolvimento de inúmeras pastas na esfera do governo federal.

Nesse sentido, foi criada em 1974, a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM). Em termos executivos, a CIRM, coordenada pelo Comandante da Marinha, na condição de Autoridade Marítima, que é integrada por representantes de quinze Ministérios e pela Marinha do Brasil (MB), constitui-se no fórum adequado para conduzir a complexa missão de cuidar da Amazônia Azul, integrando, por meio do Plano Setorial para os Recursos do Mar (PSRM), o planejamento, a coordenação e a condução das atividades dos diferentes atores que possuem legítimos interesses ligados ao mar. Convém, portanto, destacar o importante papel da CIRM, à qual compete coordenar os assuntos relativos à consecução da Política Nacional para os Recursos do Mar (PNRM), monitorar os programas e as ações decorrentes, assim como acompanhar os seus resultados.

A execução do citado PSRM se dá pelo desenvolvimento de diversas ações voltadas para a conservação e a exploração sustentável dos recursos marinhos. Essas Ações são conduzidas e coordenadas pelos diversos Ministérios e pela MB. O PSRM é, na verdade, desdobramento da PNRM, uma vez que visa à integração do Mar Territorial (MT), da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) e da Plataforma Continental (PC) ao espaço brasileiro, por intermédio de atividades de pesquisa, de monitoramento oceanográfico e estudos do clima, bem como de exploração sustentável e conservação dos seus recursos naturais.

Nesse contexto, a assinatura em 2020 do X PSRM, reforça a relevância para o país da Política Nacional para os Recursos do Mar, na medida em que promove a integração do Mar Territorial, da ZEE e da Plataforma Continental ao espaço brasileiro, reafirmando seus 14,2 milhões de km<sup>2</sup>, dos quais 8,5 milhões de km<sup>2</sup> em terra e 5,7 milhões de km<sup>2</sup> no ambiente marinho, por intermédio do fomento e da execução de atividades de pesquisa, de monitoramento oceanográfico e estudos do clima, bem como de exploração e conservação dos valiosos recursos naturais da nossa Amazônia Azul.



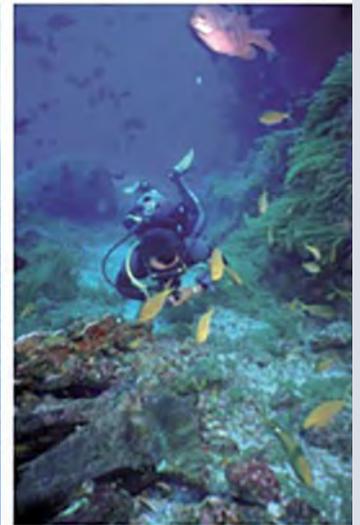
X Plano Setorial para os Recursos do Mar (X PSRM), aprovado pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM - Marinha do Brasil) em junho de 2020, e pela Presidência da República através do Decreto Nº10.444, em novembro de 2020.

**Fonte** Acervo da SECIRM - Marinha do Brasil.

O PSRM mantém o modelo de gestão participativa integrada por Ministérios, órgãos de fomento, comunidades acadêmica e científica representados, tanto na sua elaboração, quanto na execução de ações conjuntas, de acordo com as respectivas competências, em consonância com as diretrizes estabelecidas na PNRM e com as demais políticas e planos afins. O PSRM assume, também, um compromisso explícito com apoio ao desenvolvimento da ciência, da tecnologia e da inovação nesse campo do conhecimento, através do monitoramento ambiental, sedimentológico, meteoceanográfico, pesqueiro e da biodiversidade associada disponibilizando dados e informações para a sociedade, além de conferir um olhar

para os recursos presentes nas áreas marinhas de interesse nacional. Traz, ainda, o firme compromisso de fomentar a capacitação e meios para que os profissionais da educação do ensino fundamental e médio, líderes comunitários e outros formadores de opinião desenvolvam programas de educação sobre o papel dos oceanos para a economia nacional, manter e melhorar a qualidade de vida e saúde de todos, de forma a aprimorar a mentalidade marítima das futuras gerações e ampliar sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento sustentável da Economia Azul. O planejamento, a execução e a gestão das atividades relacionadas com os recursos do mar, nos diversos órgãos e instituições envolvidos, devem guardar conformidade com as ações previstas no PSRM.

O PSRM firma, ainda, o compromisso de apoiar o desenvolvimento da ciência oceânica para o desenvolvimento sustentável, além de contribuir para a consecução das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 (ODS 14). Adicionalmente, estabelece o objetivo de fomentar a capacitação e os meios para que os profissionais de educação do ensino fundamental e médio, líderes comunitários e outros formadores de opinião desenvolvam programas de educação sobre o papel do Oceano para a economia, para a qualidade de vida e a saúde de todos, de forma a aprimorar a mentalidade marítima das futuras gerações de brasileiros e ampliar sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento da Economia Azul no país. Tem, ainda, o propósito de sistematizar as atividades de pesquisa para atender à demanda de informações sobre os recursos naturais e energéticos das Águas Jurisdicionais Brasileiras (AJB), bancos e ilhas oceânicas e áreas marítimas internacionais de interesse, propiciando condições para a exploração sustentável e o monitoramento efetivo da Amazônia Azul, que permita contribuir para o enfrentamento de situações emergenciais, como alterações climáticas significativas, e para o desenvolvimento e implementação da Economia Azul, gerando inúmeros benefícios para toda a sociedade brasileira.



Atividades prevista pelo X PSRM, destacando a pesquisa oceanográfica, o monitoramento ambiental dos oceanos e a formação continuada de recursos humanos em Ciências do Mar. **Fonte** Acervo da SECIRM - Marinha do Brasil.

Os objetivos do PSRM são estabelecidos de modo a atender aos interesses políticos e estratégicos do Brasil no mar, tanto em âmbito nacional quanto internacional, com vistas a ampliar a presença brasileira na Amazônia Azul e em suas ilhas oceânicas, bem como em águas internacionais de interesse. À luz desses princípios, são objetivos do PSRM:

**a)** contribuir para a consecução dos objetivos brasileiros estabelecidos pela PNRM;

**b)** promover a pesquisa científica, o desenvolvimento tecnológico, a conservação e o uso sustentável dos recursos vivos e não vivos e os sistemas de observação e monitoramento dos oceanos, ampliando a presença brasileira na Amazônia Azul e em áreas internacionais de interesse;

**c)** estabelecer as bases científicas e as ações integradas capazes de subsidiar políticas, ações e estratégias de conservação e uso sustentável da biodiversidade;

- d)** promover o desenvolvimento sustentável da pesca e da aquicultura como fonte de alimentação, emprego, renda e lazer, garantindo o uso sustentável dos recursos pesqueiros, bem como a otimização dos benefícios econômicos decorrentes, em harmonia com a preservação e a conservação do meio ambiente e da biodiversidade;
- e)** contribuir para a redução das vulnerabilidades ambientais, sociais e econômicas da Zona Costeira;
- f)** ampliar, consolidar e integrar sistemas de monitoramento da estatística pesqueira e aquícola marinha, incluindo dados de captura e esforço de pesca por frotas e espécies, além de monitorar a condição de exploração dos principais estoques;
- g)** promover estudos e pesquisas para ampliar o conhecimento e a avaliação dos recursos vivos, visando ao desenvolvimento do uso sustentável do potencial biotecnológico e energético desses recursos;
- h)** promover estudos e pesquisas do potencial mineral da Plataforma Continental e dos fundos marinhos internacionais, para ampliar o conhecimento, avaliação e desenvolvimento do uso sustentável dos recursos minerais marinhos, visando, também, à aquisição do direito de exploração mineral em áreas internacionais de interesse;
- i)** ampliar e consolidar sistemas de monitoramento dos oceanos, da Zona Costeira e da atmosfera adjacente, incluindo a instalação de observatórios meteoceanográficos, a fim de aprimorar o conhecimento científico e contribuir para reduzir vulnerabilidades e riscos decorrentes de eventos extremos, de forma a propiciar respostas às situações emergenciais;
- j)** fomentar a criação de bancos de dados e aprimorar os sistemas integrados e existentes para disponibilização dos dados meteoceanográficos e dos recursos naturais marinhos coletados e produzidos no âmbito do PSRM para acesso público, promovendo a inclusão de sistemas destinados à coleta de dados biogeoquímicos, biológicos e dos ecossistemas oceânicos;
- k)** estimular o aprimoramento dos sistemas existentes para disponibilização de dados sobre os ambientes marinhos para acesso público;
- l)** incentivar as instituições ligadas às Ciências do Mar a fornecerem os dados e metadados coletados em expedições realizadas pela comunidade científica nacional ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO) e ao Sistema de Informação sobre a Biodiversidade Brasileira (SiBBr);
- m)** estimular a formação continuada de recursos humanos em Ciências do Mar e em atividades ligadas aos oceanos;
- n)** fomentar o desenvolvimento de tecnologias e a produção nacional de materiais e equipamentos necessários às atividades de pesquisa, monitoramento e exploração no mar;
- o)** contribuir para a atualização da legislação brasileira, visando à sua aplicação em todos os aspectos concernentes aos recursos do mar, à gestão integrada das zonas costeiras e oceânicas e aos interesses marítimos nacionais;
- p)** promover o estabelecimento do uso compartilhado do ambiente marinho no país, por meio da implementação do Planejamento Espacial Marinho (PEM);
- q)** contribuir para o desenvolvimento e a consolidação de uma Economia Azul no Brasil, com bases sustentáveis;

- r) incentivar as instituições componentes da CIRM, bem como seus órgãos subordinados e pares nas demais esferas de governo, a que armazenem e/ou compartilhem seus dados geoespaciais e metadados na Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE), em cumprimento ao Decreto nº 6.666/2008, em proveito do desenvolvimento do país (INDE, 2008);
- s) contribuir para a implementação, no Brasil, das metas do Objetivo do Desenvolvimento Sustentável 14 (Vida na Água), da Agenda 2030;
- t) contribuir com as políticas voltadas para a redução da poluição de resíduos sólidos nos oceanos;
- u) estimular e fortalecer a consolidação de uma mentalidade marítima junto à sociedade brasileira e contribuir para o desenvolvimento no país de uma Cultura Oceânica e;
- v) estimular o estabelecimento de parcerias, nacionais e internacionais, para desenvolver pesquisas, qualificação de pessoal e transferência de tecnologia, assim como possibilitar o aporte de recursos extra orçamentários, como, por exemplo, os provenientes de Projetos de Pesquisa, Desenvolvimento e Inovação Tecnológica (PD&I).

Para alcançar esses objetivos, são desenvolvidas ações específicas no âmbito da CIRM, com destaque para:

- > Pesquisas Científicas nas Ilhas Oceânicas – **PROILHAS** – com o propósito de desenvolver pesquisa científica nas ilhas oceânicas, assegurando a conservação dos seus ecossistemas terrestres e marinhos e os direitos de soberania sobre suas ZEE e PC associadas. Esta Ação, importa ressaltar, se desdobra em Programas voltados para garantir a habitabilidade e o desenvolvimento de pesquisas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e na Ilha da Trindade (PROTRINDADE);
- > Avaliação, Monitoramento e Conservação da Biodiversidade Marinha – **REVIMAR** – com o propósito de estabelecer as bases científicas e as ações integradas capazes de subsidiar políticas, ações e estratégias de conservação e uso sustentável da biodiversidade;
- > Aquicultura e Pesca – **AQUIPESCA** – com o propósito de articular, em ambiente cooperativo interministerial, a elaboração e a execução do Plano de Desenvolvimento Sustentável da Pesca e Aquicultura, a fim de propor políticas, programas e ações para o desenvolvimento sustentável da pesca e da aquicultura;
- > Biotecnologia Marinha – **BIOTECMARINHA** – com o propósito de promover e fomentar o estudo e a exploração sustentável do potencial biotecnológico da biodiversidade marinha existente nas águas jurisdicionais brasileiras e em outras áreas de interesse nacional, visando ao desenvolvimento científico, tecnológico e econômico do país;
- > Avaliação da Potencialidade Mineral da PC Jurídica Brasileira – **REMLAC** – com o propósito de avaliar a potencialidade mineral da mesma, a fim de possibilitar a utilização sustentável dos recursos não vivos, sua contribuição para o PIB nacional e o desenvolvimento e consolidação da Economia Azul;
- > Prospecção e Exploração de Recursos Minerais da Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial – **PROAREA** – com o propósito de identificar e avaliar o potencial mineral de regiões com importância econômica localizadas na “Área”, com vistas à elaboração de proposta para exploração de recursos minerais, a ser apresentada à ISBA, e realização de pesquisas em águas profundas;

- > Sistema Brasileiro de Observação dos Oceanos e Estudos do Clima – **GOOS-BRASIL** – com o propósito de ampliar e consolidar um sistema de observação permanente dos oceanos, ZC e atmosfera, para apoiar a elaboração de previsões meteoceanográficas e ações, contribuindo para redução de riscos e vulnerabilidades decorrentes desses eventos extremos que afetem o país; e disponibilizar os dados coletados para acesso público, a fim de subsidiar estudos e aprimorar o conhecimento científico;
- > Formação de Recursos Humanos em Ciências do Mar – **PPG-Mar** – com o propósito de ampliar e consolidar a formação de recursos humanos em Ciências do Mar e em atividades ligadas aos oceanos, para a produção e disseminação de conhecimentos sobre os componentes, processos e recursos dos ambientes marinho e zonas de transição;
- > Planejamento Espacial Marinho – **PEM** – com o propósito de estabelecer as bases institucional, normativa e regulatória que possam ser utilizadas em apoio ao processo de tomada de decisão relacionado ao uso do mar e ao seu ordenamento, tanto em nível governamental, quanto privado;
- > Desenvolvimento e Aproveitamento Sustentável da Amazônia Azul – **PRO AMAZÔNIA AZUL** – com o propósito de desenvolver pesquisa oceanográfica diversificada e de alta qualidade na Amazônia Azul, em temas que afetam ou possam vir a afetar a sociedade, o território brasileiro e os acordos internacionais firmados pelo Brasil e
- > Promoção da Mentalidade Marítima – **PROMAR** – com o propósito de ampliar o desenvolvimento de uma mentalidade marítima e Cultura Oceânica na população brasileira.



Programas de pesquisas A) e B) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPELAGO) e C) e D) na Ilha de Trindade (PROTRINDADE). **Fonte** Acervo da SECIRM - Marinha do Brasil.

O caráter transversal do PSRM propõe a integração do mesmo com outras políticas, planos e ações, por meio do envolvimento governamental, da iniciativa privada, da sociedade civil organizada e das comunidades acadêmica e científica. Nesse processo de integração, tem destaque o Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR), o Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), o Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro (PNGC) e o Plano Nacional de Combate ao Lixo no Mar (PNCLM).

A adesão brasileira ao Tratado da Antártica se deu em 1975 e a criação do Programa Antártico Brasileiro (PROANTAR) em 1982. No ano seguinte, em 1983, o Brasil foi elevado à condição de membro consultivo do Tratado, com direito a voto e veto nas decisões e no destino da Antártica. Aquele continente, cujos interesses internacionais têm aumentado substancialmente com o incremento do número de bases científicas, possui 14 milhões de km<sup>2</sup>, detém 70% de toda a água doce do planeta, além de diversos outros recursos minerais de elevado valor e de uma biodiversidade ímpar, capaz de sobreviver em condições extremamente adversas e de prover insumos preciosos para vacinas e síntese de novos medicamentos para humanidade.

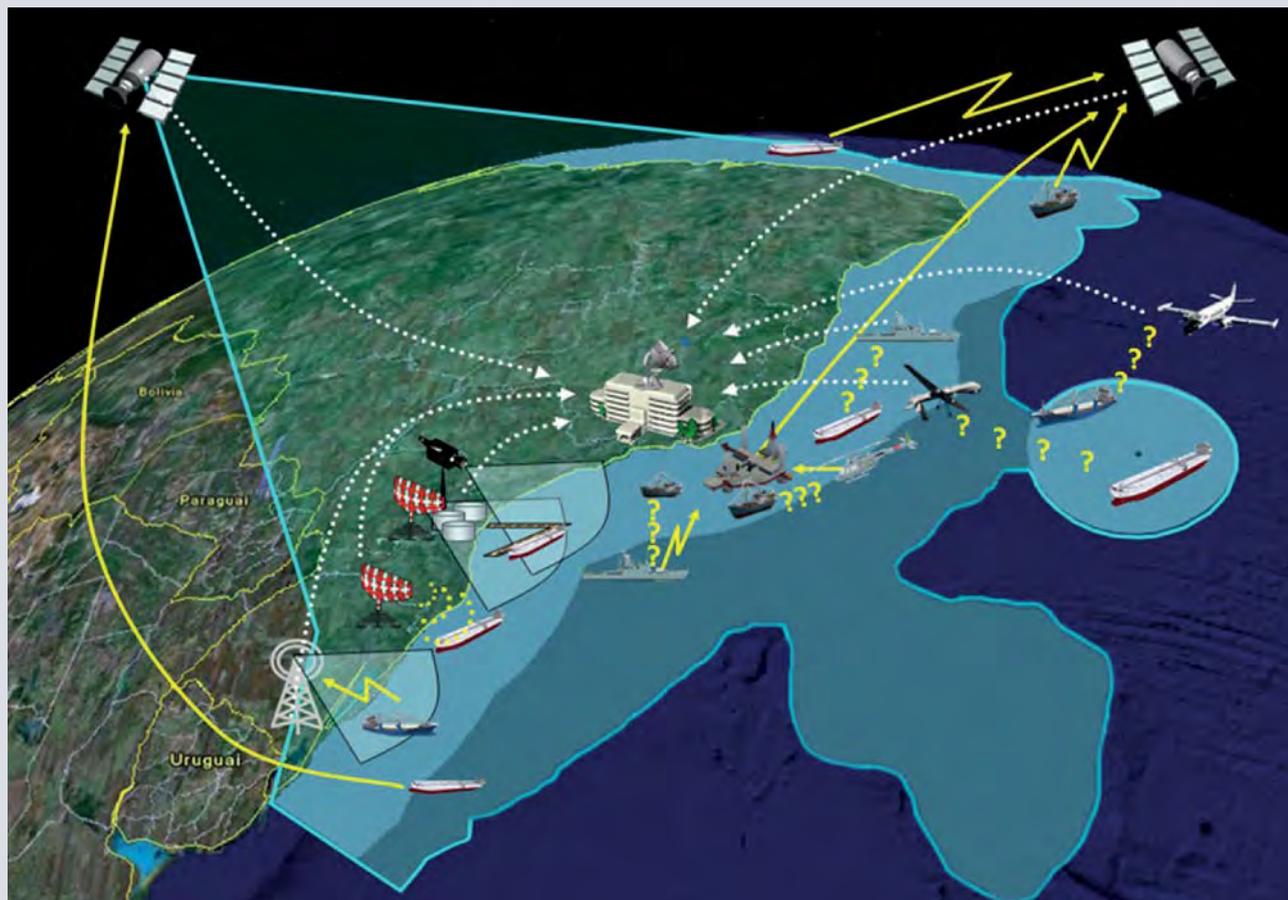
O Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), constituído em 1989, é um programa de Estado com o propósito de estabelecer e de consolidar o limite exterior da nossa Plataforma Continental, ou seja, a fronteira leste do Brasil. Também denominado “Bandeirante das longitudes salgadas”, o LEPLAC é o programa responsável por garantir ao país a ampliação do acesso a recursos vivos e energéticos de inestimável valor para a manutenção e o sustento da nossa sociedade atual e das futuras gerações de brasileiros.

Com relação especificamente ao PNCLM, vislumbra-se o grande potencial para a implementação de ações no âmbito do PSRM, envolvendo os setores público, privado e acadêmico, voltadas para a conscientização da sociedade em geral sobre as diferentes origens dos resíduos sólidos que chegam ao mar e a complexidade desse problema. Outras iniciativas, no

entanto, podem e devem ser adotadas, desde que em harmonia com o PSRM, para que os recursos da Amazônia Azul sejam explorados de forma sustentável, contribuindo para o fortalecimento da Economia Azul em prol do desenvolvimento do país, respeitando-se sempre o meio ambiente, em benefício da sociedade.

Ainda no escopo do planejamento e estratégia, vale ressaltar que, no decorrer do segundo semestre de 2019, o país foi vítima de um derrame de óleo sem precedentes em nossa história, causando um desastre ambiental inédito, que afetou severamente a costa Nordeste e com menor intensidade a costa Sudeste do Brasil. Milhões de brasileiros foram impactados direta ou indiretamente pela poluição, mais de 1.000 localidades foram atingidas, afetando significativamente a pesca, o turismo, as reservas biológicas e a vida marinha, com consequências socioeconômicas e ambientais que perdurarão por décadas para as populações litorâneas. Detentor de uma costa com quase 11 mil km de extensão, com um trânsito mensal médio de 1.500 embarcações em nossas águas, o Brasil, atualmente, encontra-se vulnerável a outra ação criminosa de igual ou maiores proporções que essa ocorrida em 2019, razão pela qual é importante que seja implementado, na íntegra, um sistema eficaz de monitoramento e de vigilância dessa riquíssima e tão cobiçada Amazônia Azul.

Motivada por essa preocupação a Marinha concebeu o Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul (SisGAAz), que prevê o desenvolvimento e a instalação gradual de sítios de monitoramento com sensores passivos (que recebem informações voluntárias de navios e de embarcações) e ativos (que detectam contatos em qualquer condição). No cerne desse Programa, está o Sistema de Consciência Situacional Unificada (SCUA), desenvolvido no âmbito da própria Marinha, que recebe as informações de diversas fontes (satélites, radares, sistemas colaborativos, hidrofones, estações radiogonômicas, aeronaves e navios), integrando e apresentando graficamente uma situação instantânea do tráfego marítimo em nossas águas jurisdicionais.

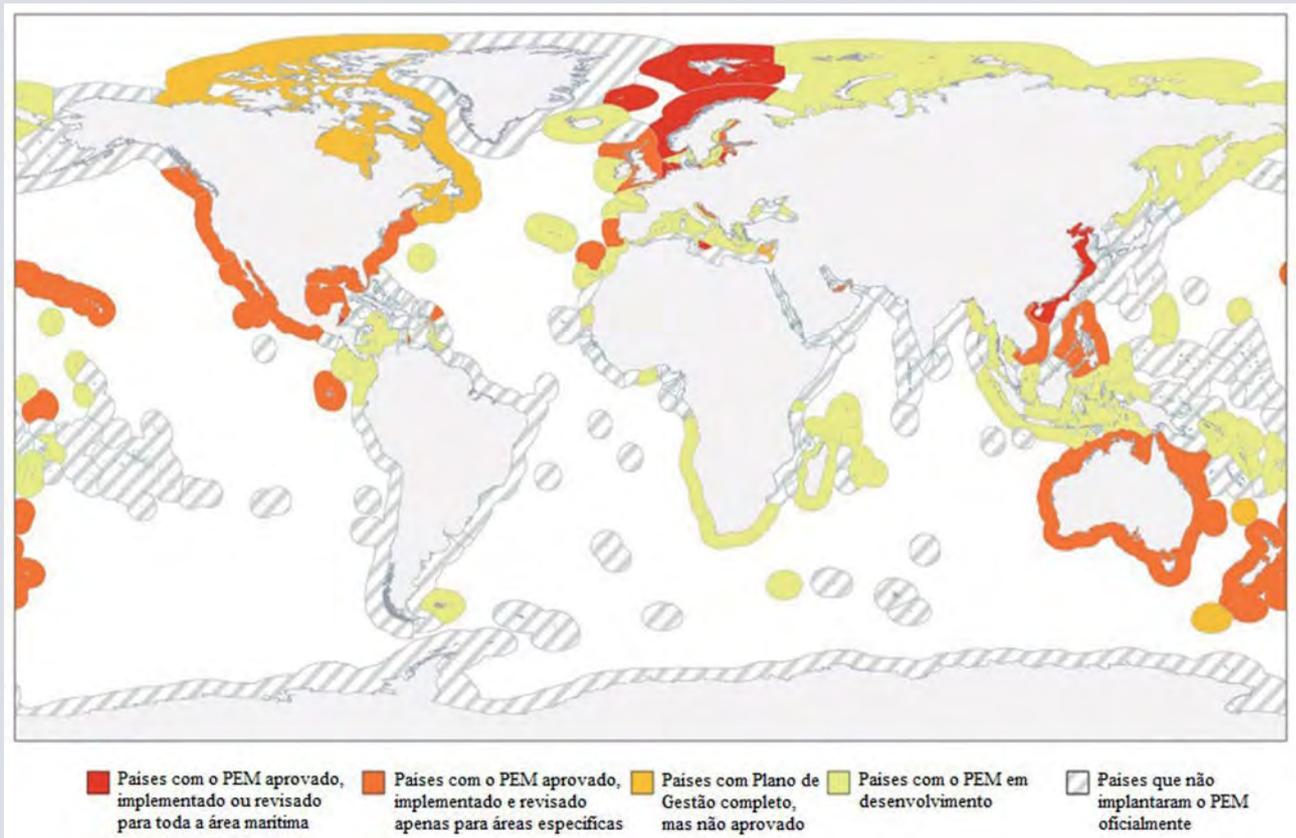


Representação esquemática do SisGAaz - Sistema de Gerenciamento da Amazônia Azul. **Fonte** Acervo da SECIRM - Marinha do Brasil.

## POLÍTICAS DE ORDENAMENTO E GESTÃO

De forma a gerir todo esse singular e valioso patrimônio, denominado Amazônia Azul, torna-se condição *sine qua non* a efetiva implantação do Planejamento Espacial Marinho no país. Também nomeado Ordenamento do Espaço Marinho em alguns países. O Planejamento Espacial Marinho- PEM é um poderoso instrumento público, multissetorial, de cunho operacional e jurídico, indispensável para garantir a governança e a soberania da Amazônia

Azul. Nesse sentido, o uso compartilhado, eficiente, harmônico e sustentável de suas riquezas, e a geração de divisas e de empregos para o Brasil é necessário para que se obtenha a segurança jurídica eficiente e eficaz para investidores nacionais e internacionais, bem como ao próprio Estado, atinente às atividades econômicas desenvolvidas nesse extenso ambiente marinho e costeiro, respeitada a salvaguarda de interesses estratégicos e de Defesa Nacional.



Situação para o ano de 2019, dos países costeiros em relação à implementação do Planejamento Espacial Marinho (PEM).

**Fonte** Acervo da SECIRM - Marinha do Brasil.

Segundo a UNESCO, o “Planejamento Espacial Marinho é um processo público de análise e alocação da distribuição espacial e temporal de atividades humanas em áreas marinhas, para alcançar objetivos ecológicos, econômicos e sociais que geralmente foram especificados através de um processo político”. Neste contexto, pode-se considerar que o PEM não é um fim em si, mas uma maneira prática de criar e estabelecer o uso racional e sustentável do espaço marinho e as interações entre seus usos, equilibrando as demandas de desenvolvimento com a necessidade de proteger o meio ambiente, e oferecer recursos sociais e resultados econômicos de forma aberta e planejada. Embora o PEM em países como Estados Unidos, Austrália e Japão, dentre outros, estão aprovados e implementados em suas respectivas áreas

marítimas, a América do Sul é o continente mais atrasado no estabelecimento de seu planejamento espacial marítimo. O Brasil apesar de ter assumido, durante a Conferência dos Oceanos da ONU em 2017, o compromisso voluntário de implantar o PEM no país até 2030, entretanto, até o presente momento, não teve seu planejamento oficialmente instituído.

O tema “Ordenamento do Espaço Marinho” ganhou relevância e projeção nacional e internacional nos últimos anos, o que pode ser comprovado pela sua inclusão no Plano Plurianual (PPA) 2016-2019, em seu Programa 2046 – Oceanos, Zona Costeira e Antártica, que inclui entre seus objetivos: “promover o uso compartilhado do ambiente marinho e realizar o gerenciamento

da Zona Costeira de forma sustentável”, sob responsabilidade do Ministério da Defesa, por meio da CIRM.

O PEM, sob a coordenação da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), conta com a participação de representantes da Casa Civil da Presidência da República (Casa Civil/PR); Ministério da Defesa (MD); Ministério das Relações Exteriores (MRE); Ministério da Economia (ME); Ministério da Infraestrutura (Minfra); Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA); Ministério da Educação (MEC); Ministério da Cidadania (MC); Ministério da Saúde (MS); Ministério de Minas e Energia (MME); Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovações (MCTI); Ministério do Meio Ambiente (MMA); Ministério do Turismo (Mtur); Ministério do Desenvolvimento Regional (MDR); Estado-Maior da Armada (EMA/MB); Diretoria-Geral de Navegação (DGN/MB); Diretoria de Portos e Costas (DPC/MB); Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN/MB); Centro de Hidrografia da Marinha (CHM/MB); Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE/ME); e Serviço Geológico do Brasil (CPRM/MME).

Dentre as perspectivas para o Planejamento Espacial Marinho destaca-se o estabelecimento da Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais Marinhos (INDEM) no país, de forma a permitir o acesso geoespacializado aos dados já coletados por diversas instituições governamentais e não governamentais na Amazônia Azul ao longo de décadas, e de relevância ao seu ordenamento. Ressalta-se que a disponibilização de todos esses valiosos dados marinhos em um Geoportais especializado atenderá a múltiplos propósitos voltados para o desenvolvimento nacional.

## FORTALECIMENTO DA MENTALIDADE MARÍTIMA

A Amazônia Azul representa uma gigantesca área sobre jurisdição nacional, cerca de 5,7 milhões de km<sup>2</sup>, e incorpora, inegavelmente, um considerável potencial para a realização de inúmeras atividades essenciais para o desenvolvimento do país. No entanto, não obstante a importância associada a essa imensa área, trata-se de região muito pouco conhecida, mesmo diante da efetiva atuação da CIRM. A falta de conhecimento sobre o ambiente marinho em geral, importa ressaltar, é um fator limitante que afeta todo o planeta. Foi no sentido de chamar a atenção do mundo para a necessidade de se reverter esse quadro que a ONU instituiu o período de 2021 a 2030 como a “Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável”, também conhecida como a “Década do Oceano”. É, portanto, mais do que nunca, momento de se intensificar o foco nas ações que se dedicam ao trato da nossa Amazônia Azul. E, nesse cenário, ganha destaque o PSRM, principal instrumento do país que firma o compromisso de apoiar o desenvolvimento da ciência oceânica para o desenvolvimento sustentável, além de contribuir para a consecução das metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 14 (ODS 14) – Vida na Água, voltadas ao uso sustentável dos recursos e dos serviços ecossistêmicos providos pelos oceanos. Adicionalmente, o PSRM fomenta ainda a capacitação e os meios para que os profissionais de educação do ensino fundamental e médio, líderes comunitários e outros formadores de opinião desenvolvam programas de educação sobre o papel do oceano para a economia, para a qualidade de vida e a saúde de todos, de forma a aprimorar a mentalidade marítima das futuras gerações de brasileiros e ampliar sua capacidade de contribuir para o desenvolvimento da Economia Azul no país.

Em 1977, durante a execução de uma comissão hidrográfica, o Comandante do Navio Hidrográfico “Sirius”, Capitão de Fragata Narcílio Reis, organizou

um concurso interno de frases, que representassem a Hidrografia na Marinha do Brasil. A frase vencedora foi: “Restará sempre muito o que fazer...”. Inspirados nesse memorável episódio, “lancemos em direção a esse mar que é nosso, sabedores que restará sempre muito o que fazer...”.

## REFERÊNCIAS

Agência Brasil, 2019. **Economia marítima** rende R\$ 2 trilhões para o Brasil por ano.

Brasil, 2012. **Relatório Rio+20 - O Modelo Brasileiro. Relatório de Sustentabilidade da Organização da Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável**. Link: [http://www.rio20.gov.br/documentos/relatorio-rio-20/1.-relatorio-rio-20/at\\_download/relatorio\\_rio20.pdf](http://www.rio20.gov.br/documentos/relatorio-rio-20/1.-relatorio-rio-20/at_download/relatorio_rio20.pdf). Consultado em 06/10/2020.

Brasil, 2014. **Planejamento Espacial Marinho - Ministério do Meio Ambiente**. Link: [https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80033/Programas%20Acoes%20e%20Iniciativas/Relatorio%20PEM%202014\\_revisao%20final\\_MMA.pdf](https://www.mma.gov.br/images/arquivo/80033/Programas%20Acoes%20e%20Iniciativas/Relatorio%20PEM%202014_revisao%20final_MMA.pdf). Consultado em 27/20/2020.

Brasil, 2019. **Plano Plurianual do Governo Federal (PPA) e as diretrizes das políticas nacionais**. Site: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2019-2022/2019/lei/L13971.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2019-2022/2019/lei/L13971.htm). Consultado em 27/10/2020.

**Brasil, 2020**. Disponível em: <[http://www.itamaraty.gov.br/images/ed\\_desenvsust/Agenda2030-completo-site.pdf](http://www.itamaraty.gov.br/images/ed_desenvsust/Agenda2030-completo-site.pdf)>. Consultado em: 01/10/2020.

Brasil, 2020. SECIRM- MARINHA DO BRASIL. **Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC)**. Site: <https://www.marinha.mil.br/secirm/leplac>. Consultado em 27/10/2020.

CAMPOS E. J. D. **O Papel do Oceano nas Mudanças Climáticas Globais**. REVISTA USP. São Paulo. n. 103, p. 55-66, 2014.

FAO. 2020. **El estado mundial de la pesca y la acuicultura 2020**. La sostenibilidad en acción. Roma. <https://doi.org/10.4060/ca9229es>. 243p.

IBGE, **Anuário estatístico do Brasil / IBGE - Rio de Janeiro**. Vol. 1. 2019. 474p.

INDE, **Infraestrutura Nacional de Dados Espaciais (INDE)**. Site: <https://inde.gov.br/>. Consultado em 27/10/2020.

OLIVEIRA D. M. O., ISOLDI L., SANTOS E., ROCHA L. A. O. **Ocean wave energy as a possible power source for the brasilian energy matrix**. *Defect and Diffusion Forum*. August 2019, Trans tech Publication Ltda. Switzerland. 2019, v 396, pp 70-78.

ONU. **Comissão de Limites da Plataforma Continental**. Site: [http://www.un.org/Depts/los/clcs\\_new/clcs\\_home.htm](http://www.un.org/Depts/los/clcs_new/clcs_home.htm). Consultado em 27/10/2020.

UNESCO, 2020. **Comissão Oceanográfica Intergovernamental (COI) - UNESCO**. Link: <https://ioc.unesco.org/>. Consultado em 27/20/2020.

# CIÊNCIAS DO MAR: ORIGEM, CONCEITOS E FUNDAMENTOS

1

Jorge Eduardo LINS OLIVEIRA<sup>1</sup>  
José GARCIA JUNIOR<sup>2</sup>  
Pollyana Christine Gomes ROQUE<sup>3</sup>  
Danielle de Lima VIANA<sup>3</sup>

**1** Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
- UFRN

**2** Instituto Federal de Educação, Ciência e  
Tecnologia do Rio Grande do Norte - IFRN

**3** Universidade Federal Rural de Pernambuco -  
UFRPE



## 1. HISTÓRIA DAS CIÊNCIAS DO MAR

No início do século XVIII, as grandes expedições empreendidas por James Cook a bordo do *HMS<sup>1</sup> Endeavor* despertou o interesse pela navegação com a descoberta de novos continentes. Com foco no conhecimento sobre os mares encontrados e no aperfeiçoamento das cartas náuticas, a partir do estudo das correntes, dos ventos e da topografia dos continentes, alguns poucos especialistas em ciências naturais se preocuparam em descrever a fauna e a flora dessas regiões. Este cenário perdurou até metade do século XIX, quando foram desenvolvidos os primeiros escafundros que permitiram ao homem acesso às regiões nunca antes visitadas.

O navegador James Cook precedeu a era das grandes expedições oceanográficas como as realizadas pelos navios ingleses *HMS Beagle* e *HMS Challenger*, que exploraram os oceanos Atlântico, Pacífico e Índico, e pelo navio alemão *RV<sup>2</sup> Meteor*, que cruzou o oceano Atlântico com o objetivo de explorar sistematicamente a estrutura vertical da atmosfera avaliando as correntes, as propriedades físico-químicas da água, a natureza dos sedimentos dos fundos oceânicos, a flora e a fauna marinhas. Essa fase deu início a uma nova ciência, denominada Oceanografia (Koslow, 2007; Ellis, 1996).

Além das grandes expedições, destacam-se neste período as publicações científicas sobre oceanografia escritas pelo oficial da marinha americana Fontaine Maury e pelos noruegueses Hansen e Nansen, que estudaram as características físico-químicas do mar da Noruega e, posteriormente, desenvolveram instrumentos oceanográficos que permitiram um avanço nos conhecimentos do meio marinho. Com o intuito de uniformizar os métodos náuticos e as observações meteorológicas no mar, em 1853 Maury organizou a primeira Conferência Internacional de Meteorologia na Bélgica.

A necessidade de se investigar o oceano de forma sistemática levou a formação de comissões científicas internacionais que congregam grande número de estudiosos das diversas áreas para discutir e aperfeiçoar novos métodos de estudos, dentre os quais se destacam: o Conselho Internacional para Exploração do Mar (*International Council for the Exploration of the Sea – ICES*), estabelecido em 1902; o Conselho Internacional de Pesquisa (*International Research Council – IRC*), fundado em 1919; o Comitê Científico de Pesquisa Oceânica (*Scientific Committee On Oceanic Research – SCOR*), criado em 1957 e que viabilizou o lançamento dos primeiros satélites

1. *Her/His Majesty's Ship*  
2. *Research Vessel*

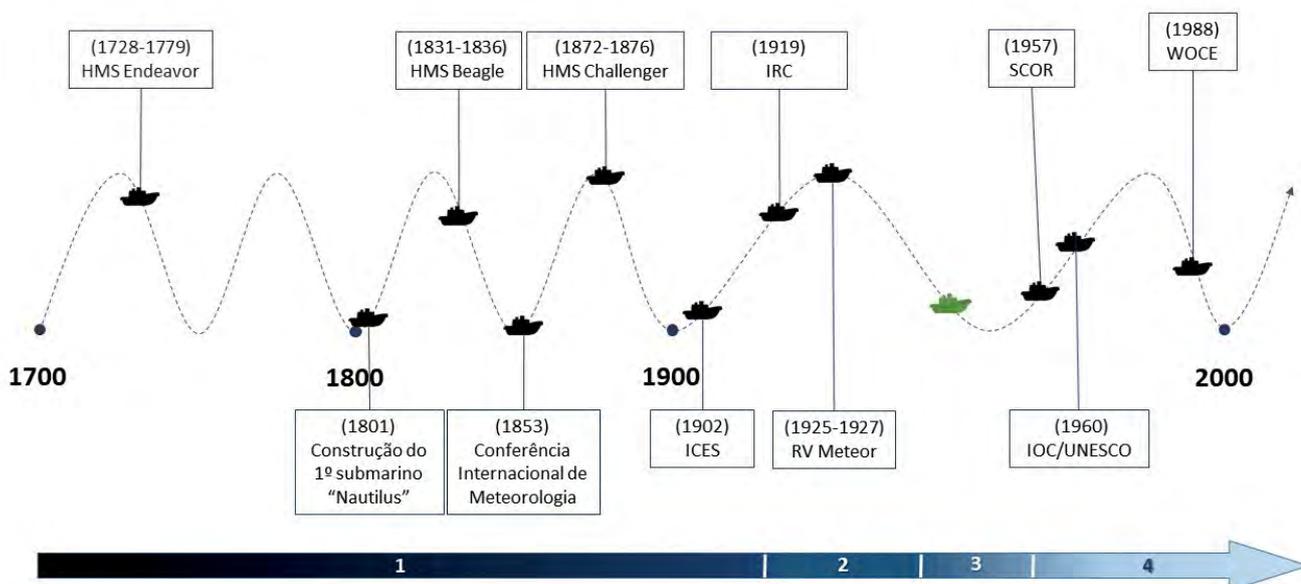
Sputnik e Explorer; a Comissão Oceanográfica Intergovernamental (*Intergovernmental Oceanographic Commission – IOC/UNESCO*), em 1960; e a comissão científica de Experimento da Circulação Oceânica Mundial (*World Ocean Circulation Experiment– WOCE*), em 1988 (Chapman, 1998; ICES; IRC; SCOR) (Fig. 1.1).

Desta maneira, a história da Oceanografia pode ser dividida em quatro fases distintas:

- 1) o período no qual predominaram as grandes expedições de exploração entre 1728 e 1914;
- 2) a fase que deu ênfase ao estudo das ciências naturais e de dinâmica dos oceanos, entre 1925 e 1940;
- 3) o período do pós-guerra (1947 e 1956) no qual o desenvolvimento de equipamentos e métodos de estudo para as novas áreas da oceanografia estavam em plena expansão; e

4) a partir de 1957, com os acordos de cooperação internacional, surgiu a oceanografia moderna (Fig. 1.1). Dentro desta ótica, criou-se em 1961, o Conselho Latino Americano de Oceanografia, que tinha por objetivo principal criar um plano de cooperação internacional de trabalhos oceanográficos para os países da América Latina.

No Brasil, o primeiro estudo oceanográfico relevante consistiu em um levantamento hidrográfico entre as desembocaduras dos rios Mossoró (RN) e São Francisco (BA) realizado, em 1857, pela Marinha brasileira. Entretanto, foi quase um século depois, com a chegada do pesquisador francês Wladimir Besnard (1890-1960) convidado pelo governo paulista para fundar um centro de estudos marinhos, que passamos a desenvolver pesquisas científicas oceanográficas a nível institucional. Instituído através de decreto-lei nº 16.685, em dezembro de 1946, o posteriormente denominado Instituto Paulista de Oceanografia foi integralizado à Universidade de São Paulo (USP) em 1951,



**Figura 1.1** Marcos históricos e fases da oceanografia. HMS – *Her/His Majesty's Ship*, ICES – Conselho Internacional para Exploração do Mar, IOC – Comissão Oceanográfica Intergovernamental, IRC – Conselho Internacional de Pesquisa, RV – *Research Vessel*, SCOR – Comitê Científico de Pesquisa Oceânica, WOCE – Experimento da Circulação Oceânica Mundial, 🌿 – marco da criação do primeiro instituto de oceanografia do Brasil.

recebendo o nome de Instituto Oceanográfico (IO-USP). Em 1967, foi incorporado ao IO-USP o primeiro navio oceanográfico que passou a ser denominado “Professor Wladimir Besnard”.

Nas últimas décadas a oceanografia tem alcançado um desenvolvimento sem precedentes, devido, sobretudo, aos avanços tecnológicos dos instrumentos de observação e cálculos aplicados aos estudos do substrato marinho, de correntes, de recursos bióticos e abióticos, e ao entendimento das interações oceano-atmosfera.

## 2. DEFINIÇÃO

O oceano é definido como um imenso corpo de água salgada que ocupa as depressões da superfície terrestre (Garrison, 2010). A Oceanografia é um conjunto de ciências que estudam os processos naturais dos oceanos e seus limites, assim como, a influência que esses processos exercem sobre o meio, esclarecendo questões acerca dos fenômenos biológicos, climáticos, físicos e químicos, descrevendo-os e estabelecendo as causas e os efeitos que os originam e os modificam.

Desta forma, a Oceanografia engloba diversos aspectos, tanto biótico como abiótico, tendo, em linhas gerais, como principais objetivos:

- > A caracterização química e física da água dos oceanos;
- > O estudo dos movimentos das massas d’água, ondas, correntes e marés;
- > A compreensão da relação entre os fenômenos climatológicos e oceanográficos;
- > O conhecimento da morfologia da área oceânica, quanto às suas dimensões, configurações, arquitetura, geologia, cartografia e natureza das regiões costeiras e do assoalho marinho;
- > O estudo do sedimento quanto à natureza, composição, características geológicas, químicas, mineralógicas e paleontológicas;
- > O estudo dos ecossistemas aquáticos, suas relações e inter-relações com a flora e a fauna;
- > A aplicação do uso sustentável dos recursos bióticos e abióticos.

Como pode-se observar, num campo de estudos de abrangência tão vasta, não somente atuam os oceanógrafos, mas também biólogos, ecologistas, engenheiros de pesca e de aquicultura, geógrafos, físicos, químicos, geodésicos, que dentro de suas especialidades estudam os diversos aspectos supracitados.

De uma maneira geral, podemos dividir a Oceanografia em cinco grandes áreas do conhecimento: a **química** trata da composição da água dos oceanos e as transformações das substâncias que ela contém; a **física** aborda os fenômenos físicos dos oceanos e as propriedades físicas da água do mar; a **geológica** estuda a estrutura e os sedimentos do fundo dos oceanos; a **biológica** versa sobre a vida dos organismos aquáticos e suas interações com o meio; e a **pesqueira** se ocupa dos aspectos relacionados à exploração e ao estudo dos estoques pesqueiros e suas relações com os oceanos (Castello & Krug, 2015; Calazans, 2011; Miller, 2008; Eskinazi-Leça et al., 2004).

Para um melhor detalhamento sobre os diversos ramos da oceanografia ver os seguintes capítulos: Introdução à oceanografia química; Oceanografia física do Atlântico tropical: processos hidrotermodinâmicos; Interações energéticas oceano-atmosfera; Elementos de meteorologia física e fenômenos atmosféricos; Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos; Introdução a oceanografia biológica e Introdução a oceanografia pesqueira.

### 3. O MEIO OCEÂNICO

Formado pela massa de água que recobre o assoalho marinho, o ambiente pelágico é dividido do ponto de vista biológico em “Zona Nerítica”, sobre a plataforma continental, e “Zona Oceânica”, toda área para além desta. Embora diversos autores tenham abordado os fundamentos e entendimentos relacionados a zonação marinha, adotaremos para este tópico aqueles citados por Fonteles Filho (2011), Thurman e Trujillo (2004), Gage e Tyler (1991) e Turekian (1968).

A zona nerítica é caracterizada pela riqueza e diversidade de animais e pela variedade da natureza de seus substratos, representando 7% da superfície total dos oceanos. Já a zona oceânica possui uma variedade de fauna e flora menos representativa, seu substrato é geralmente formado por vasa, e pode ser subdividida de acordo com a penetração de luz em zonas eufótica (epipelágica), disfótica (mesopelágica) e afótica (batipelágica, abissalpelágica e hadalpelágica) (Fig. 1.2).

#### 3.1. Zona Eufótica

Está compreendida até os 200 m de profundidade, onde todas as radiações do vermelho e uma parte das radiações do azul são absorvidas. Os vegetais clorofilados (autótrofos) presentes nesta zona dispõem de energia solar para a síntese da matéria orgânica a partir do  $\text{CO}_2$  em solução na água e dos sais minerais (nitratos, nitritos, amônia e fósforo). Estes vegetais se constituem no mais importante componente da base da cadeia alimentar, já que vão servir de alimento para os organismos herbívoros, que servirão de alimento para os carnívoros, podendo então ser considerados a origem da vida no meio oceânico (Ver capítulo: Oceanografia biológica - Vol. 2).

Esta zona apresenta condições de temperatura muito variáveis, próprias de águas superficiais. É também uma região de grande agitação causada pelo ciclo das marés e pelos movimentos das ondas,

que podem exercer influência em profundidades abaixo de 50 m. A característica mais importante desta zona é a variação dos fatores ambientais que ela apresenta. Mesmo num curto espaço de tempo, fatores como luz, temperatura, salinidade, e concentração de oxigênio dissolvido, podem sofrer grandes variações.

#### 3.2. Zona Disfótica

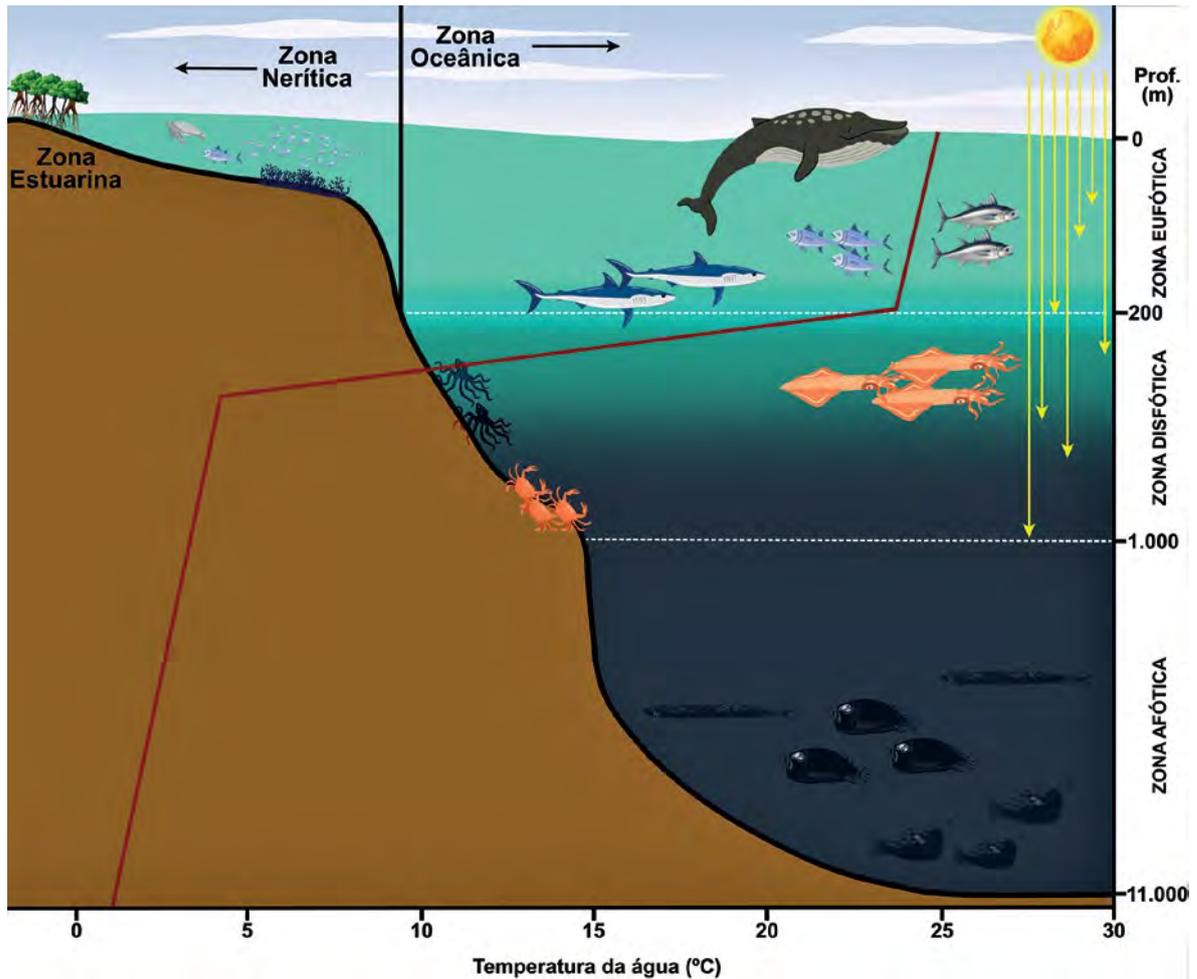
Conhecida como zona de penumbra, a região compreendida entre as profundidades de 200 e 1.000 m não há luz suficiente para suportar a fotossíntese, entretanto há o necessário para que os organismos possam enxergar. A influência das correntes de marés e o movimento das ondas não se faz sentir nesta região, onde predomina um ambiente calmo.

#### 3.3. Zona Afótica

As profundidades limites desta zona situam-se abaixo dos 1.000 m, onde não há penetração de luz. A temperatura é inferior a  $5^\circ\text{C}$ , diminuindo em função do aumento da profundidade, enquanto que a viscosidade da água é muito alta, apresentando-se inversamente proporcional à temperatura. As correntes presentes nesta zona são muito vagarosas, cerca de 1 cm por segundo, porém muito importante já que são o principal processo de renovação da qualidade das águas profundas (Ver capítulo: Mar profundo: registro da história e organismos do Nordeste do Brasil).

### 4. BACIAS OCEÂNICAS

A topografia e a estrutura do fundo oceânico são bastante variáveis de um oceano a outro, tanto no aspecto do relevo como da profundidade e sedimentos do fundo. Todavia, é possível distinguir três feições topográficas comuns a todos os



**Figura 1.2** Domínio pelágico: penetração da luz solar, zonação fótica e perfil de temperatura. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com. A representação gráfica não respeita uma escala padrão.

oceanos: as margens continentais, os assoalhos das bacias oceânicas e as grandes cordilheiras oceânicas. Além destas feições principais, existem também cordilheiras e altos-fundos que estão presentes em áreas profundas dos oceanos (Colaço et al., 2017; Goes & Junior, 2017; Corrêa & Weschenfelder, 2015; Clark et al., 2006; Coutinho, 2000; Palma, 1984) (Fig. 1.3).

A margem continental, representa a zona de transição entre os continentes e as bacias oceânicas e inclui as províncias da plataforma, talude e elevação continental. Conceitualmente, conforme estabelecido pela Convenção das Nações Unidas

sobre o Direito do Mar (CNUDM), em seu Artigo 76, a plataforma continental compreende o leito e o subsolo das áreas submarinas que se estendem além do mar territorial, em toda a extensão do prolongamento natural do território terrestre, até o bordo exterior da margem continental.

O relevo submarino sobre a plataforma continental é bastante acidentado, de modo que a profundidade aumenta de maneira uniforme em direção ao mar, com desníveis médios de 10 a 200 m, mas podendo chegar a 600 m, e sua extensão está diretamente relacionada à região costeira. No Nordeste do Brasil, próximo a Baía de São Marcos (MA), a largura

da plataforma continental é de aproximadamente 160 km, se estreitando até o estado do Rio Grande do Norte, quando atinge entre 8 e 30 km. A partir de então, se alarga progressivamente em direção ao sul alcançando 42 km no estado de Alagoas, até atingir 8 km de largura em frente a cidade de Salvador, quando volta a aumentar, até alcançar 246 km ao largo da cidade de Caravelas, litoral sul do estado da Bahia. Nas regiões Norte e Sul, devido a influência dos rios Amazonas e da Prata, que aportam consideráveis volumes de sedimentos terrígenos, a plataforma continental é consideravelmente mais larga. De uma forma geral, a largura média da plataforma continental brasileira é de aproximadamente 60 km (Coutinho, 2000; Zemruscki & França, 1979).

Para além da plataforma há um aumento brusco do declive até alcançar as profundidades oceânicas, sendo esta região de transição entre a plataforma continental e as grandes profundidades oceânicas, denominada de talude continental. Possuindo uma inclinação muito acentuada, em torno de 1 m a cada 40 m de extensão, esta região se estende até a planície abissal, área mais profunda do oceano. O relevo da área do talude não apresenta homogeneidade, observando-se quebras de declividade, cânions e vales, e normalmente recoberto por sedimentos e restos de organismos marinhos. A base do talude apresenta relevo irregular, conhecido como elevações ou sopé continental, sendo compostas predominantemente por sedimentos de origem continental. As elevações podem se estender até profundidades compreendidas entre 3.000 e 4.500 m, e apresentam

declividade intermediária entre as da plataforma continental e as do talude (Ver capítulo: [Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos](#)).

#### 4.1. Topografia das bacias oceânicas

Na escala geológica, as bacias oceânicas são estáveis e permanentes, não sendo levado em consideração, portanto, as modificações constantes que ocorrem sobretudo nas margens continentais.

Quanto à topografia da região oceânica, observam-se dois tipos principais de acidentes geográficos: as elevações e as depressões. As elevações, já citadas anteriormente e situadas na base do talude, possuem gradientes que vão de 1:1.000 a 1:1.700. As depressões que se apresentam sob formas de relevo, podem ser circulares ou elípticas, largas e côncavas, com bordos de escarpas suaves ou acentuadas. Quando a profundidade ultrapassa 6.000 m, as depressões são denominadas de fossas. A Fossa das Marianas, com 11.022 m de profundidade, situada nas proximidades da Ilha Guam, no Oceano Pacífico, é o ponto mais profundo do planeta. Além desses acidentes, também são observadas as planícies abissais, os cânions submarinos e as cordilheiras oceânicas (Ver capítulo: [Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos](#)).

As características no que diz respeito à área, volume e profundidade média dos oceanos, são apresentadas na tabela abaixo:

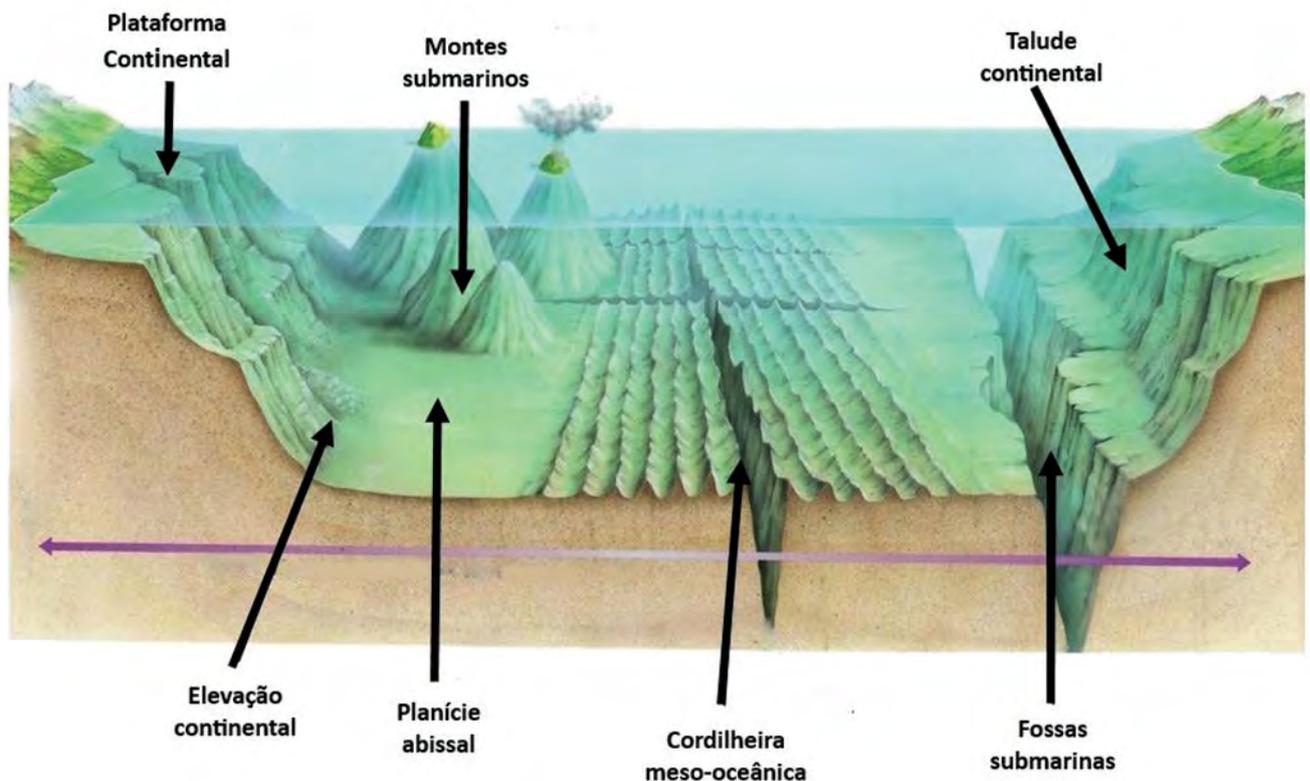
**Tabela 1.1** Área, volume e profundidades dos oceanos.

Oceanos	Área (10 <sup>6</sup> km <sup>2</sup> )	Volume (10 <sup>6</sup> km <sup>3</sup> )	Profundidade média (m)
Pacífico	181,34	714,41	3.940
Atlântico	106,57	351,21	3.575
Índico	74,12	284,61	3.840
Total	362,03	1.350,23	3.785

Fonte Menard e Smith (1966).

Os cânions submarinos geralmente atravessam as elevações continentais, formando canais por onde as correntes transportam os sedimentos em direção ao mar. As planícies abissais são caracterizadas por apresentar superfícies planas e largas, adjacentes às elevações continentais, em profundidades que vão de 4.000 a 5.000 m. São bastante comuns no Oceano Atlântico e raras no Pacífico devido, sobretudo, à presença de grandes depressões. Geralmente, as planícies abissais possuem uma superfície enrugada, causada, aparentemente, por deformações recentes provocadas pelos movimentos sísmicos. Já as cordilheiras oceânicas, presentes em quase todos os oceanos, formam uma série de regiões com relevo predominante, e possuem um relevo acima do fundo oceânico, emergindo, em algumas áreas, sob a forma de ilhas oceânicas.

Dentre as cordilheiras oceânicas, a mais importante é a dorsal meso-oceânica que se situa na região mediana dos oceanos, exceto no Pacífico cuja localização é mais próxima do continente americano. Formada por duas linhas paralelas de montanhas, separadas por uma grande fossa tectônica central, contínua e cercada por vastos platôs em forma de degraus, este conjunto rochoso tem a largura variando entre 500 e 1.000 km e se estendendo por aproximadamente 50.000 km. De uma forma geral, o desnível entre a dorsal meso-oceânica e a planície abissal está compreendido numa profundidade que pode variar entre 1.000 e 3.000 m (Fig. 1.3).



**Figura 1.3** Morfologia do fundo oceânico, com destaque para as margens continentais (plataforma, talude e elevação continental), os assoalhos da bacia oceânica e as grandes cordilheiras oceânicas. **Fonte** UPSC Geography - Sea Floor Spreading | Neo Stencil Acessado em 22 de dezembro de 2020 às 09:10. A representação gráfica não respeita uma escala padrão.

## 5. SEDIMENTOS DO FUNDO OCEÂNICO

Sedimentos marinhos são formados por um imenso conjunto de partículas com os mais variados tamanhos, e podem se originar de fenômenos vulcânicos terrestres e submarinos, da desintegração e da decomposição dos constituintes da terra, de matéria orgânica proveniente de organismos vivos que se encontram no oceano e da precipitação de substâncias inorgânicas dissolvidas na água do mar. Desta forma, de acordo com a origem, eles podem ser classificados em: vulcânicos, terrígenos, de origem litoral, orgânicos e precipitados inorgânicos.

Os sedimentos de origem vulcânica podem ter duas procedências: os que são produzidos pelas erupções vulcânicas terrestres e os derivados dos vulcões submarinos. No primeiro caso, os sedimentos podem sofrer modificações químicas e físicas devido o transporte do local de origem até o ponto de deposição no fundo oceânico.

Os sedimentos terrígenos são intimamente ligados ao fluxo de matéria orgânica e inorgânica em suspensão transportada pelos rios. Grande parte deste vai se depositar em baías, deltas ou bacias, atuando como bacias de sedimentação. Ao atingir o mar, em águas relativamente calmas, este sedimento, que estava sendo carregado pela corrente dos rios, se deposita, de modo que as partículas maiores serão fixadas nas áreas mais próximas à região costeira, enquanto que as partículas de menor granulometria serão transportadas por correntes superficiais para as áreas ao redor.

Os sedimentos de origem litoral são gerados pelo intemperismo na região costeira e rochosa, que fraciona as rochas de forma constante, e, através das correntes, são carregados e depositados no fundo marinho da zona nerítica, numa ordem inversa ao tamanho de suas partículas.

O acúmulo de restos de animais e vegetais que se precipitam no fundo do mar, vão formar os sedimentos de origem orgânica, podendo também

ser chamados de depósitos pelágicos. Os sedimentos de origem vegetal são provenientes, sobretudo, de coccolitoforídeos e macroalgas, que se depositam principalmente nas regiões costeiras, onde normalmente se encontram estas algas. Eles costumam ser menos abundantes do que os sedimentos calcários de origem animal, formados por carapaças de organismos planctônicos como as radiolárias, diatomáceas, foraminíferos e pterópodos, e que se depositam na região oceânica. Os foraminíferos, mais precisamente as globigerinas, são os depósitos mais importantes e frequentes nos sedimentos, seguidos pelo depósito dos restos fragmentados de conchas de moluscos.

Também podemos classificar os sedimentos levando em consideração sua forma, granulometria e composição. Considerando o diâmetro das partículas, observa-se que podem variar de 0,004 a > 256 mm (Fig. 1.4). Os sedimentos provenientes da terra se caracterizam por apresentar uma granulometria fina, podendo ser classificados de acordo com a espessura de seus constituintes.

### 5.1. Transporte dos sedimentos

A deposição dos sedimentos no fundo do mar depende de vários fatores, tais como: granulometria, topografia do fundo, ação de ondas e ventos, intensidade e direção das correntes, e fenômenos de deposição, que podem ser de natureza física, química e biológica.

Desta forma, a distância em que o sedimento pode ser depositado sujeita-se a força mecânica das correntes e a sua origem (animal ou vegetal), isso porque à medida que o mesmo sofre ação do meio, reduz suas dimensões até se transformar num sedimento de granulometria fina. Se a corrente não é forte e não existe turbulência, os sedimentos de origem litoral ou terrígena irão se depositar na região costeira, não ultrapassando os limites da plataforma continental ([Ver capítulo: Geologia, geodinâmica e a formação dos oceanos](#)).



**Figura 1.4** Granulometria (mm) dos sedimentos do fundo oceânico. **Adaptado** de Turekian (1968).

## 5.2. Sedimentos da plataforma continental

### (A) Região Norte

O sedimento da plataforma continental da região Norte é, em grande parte, composto de matéria orgânica em decomposição, que forma os grandes bancos de vasa e areia. Este tipo de fundo, composto pela sedimentação de matéria orgânica, se estende desde a região litorânea até a profundidade que pode ultrapassar os 50 m. Estes fundos são constituídos por uma vasa mole, que cobre uma vasa mais compacta de acumulações sedimentares mais antigas.

Dois fenômenos são responsáveis pela deposição de vasa na região costeira: os depósitos de aluvião, transportados para a plataforma continental pelo Rio Amazonas; e o transporte ao largo, pela ação das ondas e das correntes.

Cálculos demonstram que 10 a 20% dos sedimentos finos, provenientes do Rio Amazonas, circulam em suspensão ao longo da plataforma guiano-brasileira. Este transporte se faz sob a forma de “bancos de

vasa”, que podem ter de 40 a 60 km de comprimento (separados por espaços interbancos) e que migram pela força das correntes ao longo da região costeira a uma velocidade média de 1 km/ano. Esta migração se acentua no início do ano, quando o mar está mais agitado e a região costeira está sob a influência da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) durante o inverno. O transporte dos sedimentos ao largo ocorre principalmente através da corrente das Guianas.

O substrato constituído de areia na plataforma continental está localizado entre 50 e 200 m. A partir de 100 m de profundidade pode-se observar os restos de velha barreira recifal, que é um testemunho do nível marinho há 18.000 anos, quando não existia transporte de sedimentos e as águas eram claras e quentes.

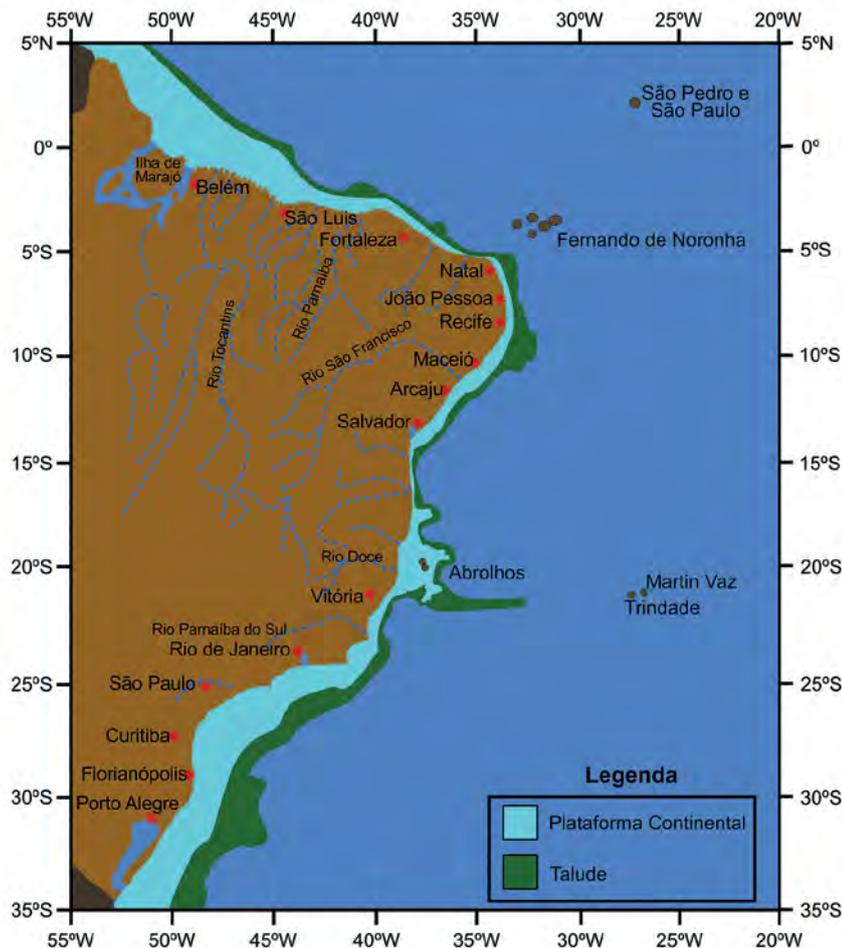
### (B) Região Nordeste

Diferentemente do que se pode observar na plataforma continental da região Norte, a plataforma da região Nordeste é relativamente

estreita apesar de atingir o máximo de 246 km, no largo de Caravelas- BA (Fig. 1.5).

Esta região pode ser subdividida em três zonas distintas: zona costeira, compreendida entre a região de arrebentação das praias até a profundidade de 10 m, na qual predominam as formações recifais de arenitos e coral e as áreas de manguezal; a zona compreendida entre as isóbatas de 10 e 40 m, cujo fundo apresenta-se bastante acidentado; e a zona situada abaixo dos 40 m até o limite da quebra da plataforma (talude), que se caracteriza também, por apresentar um fundo bastante irregular. De uma maneira geral, o fundo da plataforma da região Nordeste é constituído quase completamente por sedimentos carbonáticos biogênicos (Knoppers et al., 1999).

A zona costeira apresenta fundos de areia quartzosa com matéria calcária organógena, tendo também destaque as linhas de recifes de arenitos e corais. Estas linhas de recifes, em número de duas ou três, se dispõem paralelamente à costa, e geralmente podem ser vistas durante a maré baixa. O fundo de recifes é composto por um substrato duro, com uma base de arenito de praia submersa e recoberto por algas calcárias e corais. Esta zona é também caracterizada pela presença de grandes bancos de macroalgas de Phaeophyta (algas pardas), Chlorophyta (algas verdes) e Rhodophyta (algas vermelhas). Dentre estas, alguns gêneros se destacam pelo seu valor comercial, como é o caso do *Sargassum*, *Gracilaria* e *Hypnea*, que no Brasil durante certos períodos do ano são coletadas para fins industriais. Estes bancos de macroalgas cobrem quase toda a porção externa da plataforma continental, sendo a totalidade deles encontrada em



**Figura 1.5** Região costeira brasileira: plataforma e talude continentais. Círculos vermelhos – capitais dos estados litorâneos, círculos marrons – ilhas oceânicas, traço pontilhado – rios. **Fonte** Goes e Ferreira-Junior (2017). **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

profundidades inferiores a 50 m. Este tipo de fundo se caracteriza pelo domínio predominantemente marinho, não existindo, portanto, a influência dos aportes costeiros (Ver capítulo: *Macroalgas marinhas: biologia, ecologia e importância econômica*).

Os fundos de lama são observados geralmente nas desembocaduras dos grandes rios, sendo compostos principalmente por argila terrígena, areia fina quartzosa e biodetrítica. Estes depósitos situam-se entre as áreas de recifes e as praias. Em profundidades de 10 a 50 m, pode ser observada uma abundância expressiva de algas calcárias em fundos de areia, que caracterizam o tipo de substrato onde predominam lagostas, um dos principais produtos da pesca da região Nordeste.

### (C) Região Sudeste/Sul

Os sedimentos carbonáticos são abundantes já no início da região Sudeste, refletindo a continuidade dos processos sedimentares observados na costa nordeste, com predominância de assembleias ricas em algas coralinas ao norte da Cadeia Vitória-Trindade e de briozoários ao sul. Já ao largo do Rio Doce, as areias terrígenas são recobertas por lamas até a profundidade de 20-25 m (Coutinho, 2000).

Mais ao sul, entre o Cabo São Tomé e o Chuí, os sedimentos superficiais da plataforma continental e do talude superior são representados por três importantes fácies: areia, lama e biodetrítica. A fácies arenosa é predominante ao longo de toda a costa sul, alcançando uma maior expressão ao largo dos estados de São Paulo e Rio Grande do Sul, e apresentando, localmente, areias fluviais. A fácies de lama ocorre, principalmente, em toda a área das plataformas média e externa e a maior expressão desta fácies está representada ao largo da costa sul de São Paulo.

A fácies biodetrítica ocorre ao longo de quase toda a plataforma externa da área, com lacunas entre Paranaguá e Cananéia e ao sul da Lagoa dos Patos, voltando a ocorrer, localmente, no extremo sul da

área, ao largo do Arroio Chuí. Os bioclastos mais comuns nesta fácies são moluscos, foraminíferos bentônicos, foraminíferos planctônicos, algas recifais, cirrípedes, briozoários recifais e braquiópodos (Coutinho, 2000).

## 6. NATUREZA E COMPOSIÇÃO DA ÁGUA DO MAR

A água do mar é uma solução aquosa composta por diversos sólidos e gases, na qual se encontram em suspensão material orgânico e inorgânico. Em virtude da abundância em que estão presentes os sais, podemos denominá-los de “constituintes principais”, no caso dos abundantes, ou “constituintes secundários”, presentes em pequenas quantidades.

Os constituintes principais (Tab. 1.2), são formados pelos íons metálicos e básicos (cloro, sódio, magnésio, sulfato, cálcio e potássio), que representam mais de 90% do total dos elementos em solução. Os constituintes secundários (estrôncio, bromo e boro), se caracterizam por apresentar uma concentração constante, sendo por isso considerados constituintes “conservativos” da água do mar. Poucos dos constituintes restantes, incluindo os outros elementos, gases dissolvidos, compostos orgânicos e matéria particulada, ocorrem em proporções variadas. Alguns dos íons dos constituintes secundários podem ser considerados como nutrientes, pois são utilizados por organismos marinhos para formar seus tecidos.

**Tabela 1.2** Constituintes da água do mar para uma salinidade de 35 ‰.

Constituintes	Participação (%)
Cloro	55,04
Sódio	30,61
Sulfato	7,66
Magnésio	3,69
Cálcio	1,16
Potássio	1,10
Bicarbonato	0,41
Bromo	0,19
Estrôncio	0,04

**Fonte** Pereira e Gomes (2009).

Atualmente, a natureza e as quantidades exatas das substâncias dissolvidas na água do mar não são conhecidas com exatidão. Isso se deve ao fato de que algumas substâncias estão presentes em abundância, enquanto outras são escassas. Além disso, as águas de algumas regiões dos oceanos ainda não foram amostradas e analisadas. Finalmente, ainda temos que levar em consideração que a composição da água do mar pode sofrer influência de vários fatores externos, tais como trocas com a atmosfera; solubilidade dos diferentes compostos; redução por bactérias anaeróbicas; precipitação e trocas com o fundo oceânico; aportes de água doce; congelamento e descongelamento das geleiras dos oceanos; reações químicas que controlam ou influenciam as concentrações de diferentes elementos; processos biológicos, incluindo processos vitais e decomposição de matéria orgânica (Ver capítulo: [Introdução à oceanografia química](#)).

Os gases dissolvidos na água do mar, o oxigênio, o nitrogênio e o dióxido de carbono, penetram nos oceanos através da atmosfera. Os gases raros como hélio, neônio, argônio, criptônio e xenônio, vêm de processos de deterioração radioativa dentro de camadas do sedimento no fundo dos oceanos.

## 7. CIRCULAÇÃO OCEÂNICA

Inúmeros processos alteram a distribuição das massas d'água do mar afetando a sua densidade e atuando diretamente sobre a temperatura e salinidade. Tanto a evaporação como a refrigeração, que produzem variações na densidade, causam o reajustamento no campo gravitacional da Terra pelo movimento das massas d'água. Este movimento cria um sistema de circulação profunda. Os ventos também alteram as massas d'água, assim como a rotação da Terra, a geografia da região e a topografia do fundo. Desta maneira, as correntes marinhas constituem-se num deslocamento de massas d'água em determinada direção no oceano, seja ela em áreas superficiais ou profundas,

periódicas ou intermitentes, de forma que diversos fatores atuam de maneira singular ou simultânea para gerar esse deslocamento que apresenta velocidades variadas (Ver capítulos: [Interações energéticas oceano-atmosfera](#); [Oceanografia física do Atlântico tropical: processos hidrotermodinâmicos](#)).

Dentre as principais correntes quanto a sua origem, podemos destacar as seguintes:

### 7.1. Correntes geradas pelo deslocamento de massas d'água

O transporte de grandes massas d'água geram as correntes oceânicas permanentes, que deslocam um enorme volume de água. Estas correntes originadas em virtude das diferenças de densidade na superfície são causadas pelos processos de resfriamento e aquecimento provocados pela incidência de raios solares, pelas precipitações pluviométricas, pelo aporte de águas fluviais, pela condensação do vapor de água da superfície e fusão do gelo, e pela evaporação ou congelamento.

Os fatores acima citados não influenciam as massas de águas em profundidades superiores a 500 m, e por isto, estas correntes se caracterizam pela grande velocidade de deslocamento na camada superficial do mar, onde podem alcançar velocidades de 200 cm/s. Entretanto, apesar de serem consideradas permanentes, as grandes correntes têm deslocamento irregular devido a distribuição da densidade não ser uniforme, em razão da rotação da Terra, acidentes geográficos e a sazonalidade e fenômenos climáticos.

### 7.2. Correntes produzidas pelo vento

Os ventos combinam-se com as camadas superficiais dos oceanos, criando um sistema de circulação superficial. De maneira geral, na altura da linha do equador os ventos movimentam-se de leste para oeste, e são denominados de ventos alísios. A

partir de 40° de latitude, os ventos movimentam-se de oeste para leste, e são chamados de ventos oeste predominantes.

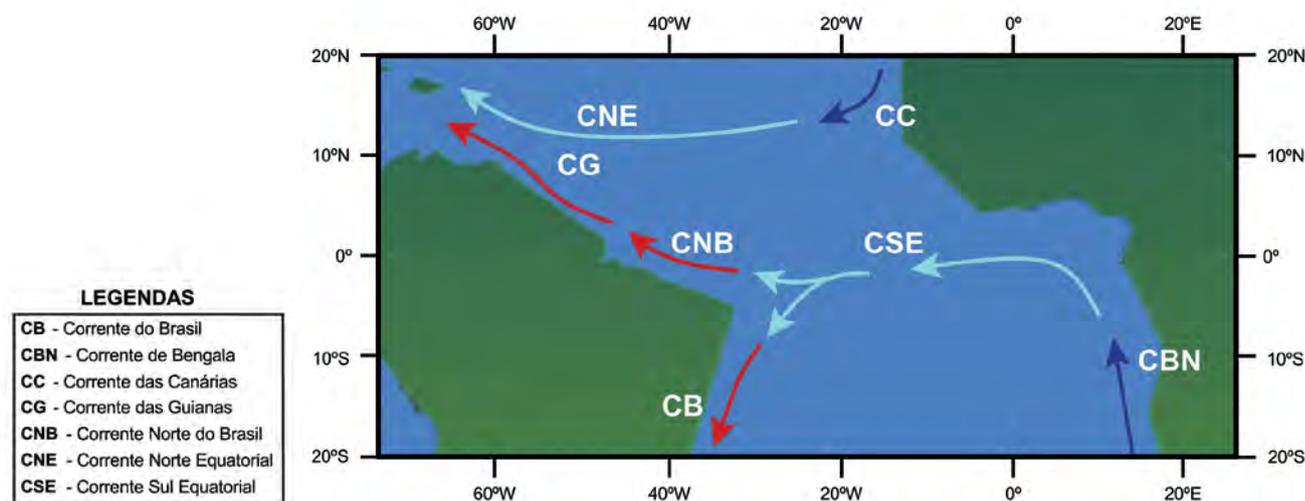
No Oceano Atlântico, os ventos alísios formam a Corrente Norte e Sul Equatorial (CNE e CSE). A CNE recebe águas provenientes da Europa e costa noroeste da África, através da corrente das Canárias (CC), e segue em direção ao Caribe. Já a CSE é formada pela corrente de Benguela (CBN), que passa pela costa sudoeste da África, se bifurca nas proximidades da costa brasileira dando origem a Corrente das Guianas (CG), a Corrente Norte do Brasil (CNB) e a Corrente do Brasil (CB) (Fig. 1.6).

O vento, atuando sobre a superfície do mar, gera um movimento, que ao se comunicar com as camadas inferiores, produz uma corrente pouco profunda, também conhecida como corrente de deriva. A rotação da Terra determina um desvio desta corrente, que tem uma inclinação de 45°, a direita do Hemisfério Norte e a esquerda do Hemisfério Sul. A velocidade desta corrente depende da

intensidade do vento e da latitude geográfica, diminuindo da superfície em direção ao fundo. Ao mesmo tempo, sua direção tende a se afastar da direção do vento, chegando, em determinada profundidade, a ser oposta à direção da corrente de superfície. Nas regiões temperadas as correntes de deriva podem alcançar grandes velocidades, considerando-se que estas representam aproximadamente 1,5% da velocidade do vento.

### 7.3. Circulação Costeira

Na região costeira a circulação está representada por dois sistemas distintos de correntes, o primeiro tem uma intensidade relativamente uniforme e se origina normalmente do fluxo e refluxo das marés, da ação dos ventos e da distribuição das massas d'água; o segundo é causado, principalmente, pela ação das ondas. Este sistema de circulação varia em função da velocidade e direção do vento, e sua conformação depende da topografia do fundo e da natureza das ondas.



**Figura 1.6** Correntes oceânicas no Oceano Atlântico. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** Varejão-Silva (2006). **Adaptado** de Varejão-Silva (2005) utilizando recursos gráficos do Freepik.com. A representação gráfica não respeita uma escala padrão.

## 7.4. Circulação profunda

Movimentos de água não estão limitados à superfície do oceano, estudos em profundidades têm demonstrado a existência de correntes de grande intensidade em regiões profundas. No Oceano Atlântico, massas de águas profundas se deslocam para o sul até as altas latitudes austrais, onde contribuem para a formação da Água Circumpolar Antártica, que por sua vez, contribui para a formação da Água Antártica de Fundo, chegando a alcançar o oeste do Oceano Índico. A Água Antártica de Fundo se desloca em direção ao norte em todos os oceanos, tendo sido detectada até os 35° de latitude norte (Ver capítulo: [Mar profundo: registro da história e organismos do Nordeste do Brasil](#)).

No Oceano Atlântico Norte, as águas profundas se deslocam para o sul, de maneira intensificada, pelo aporte de água de alta salinidade, que abastece o Mediterrâneo através do Estreito de Gibraltar.

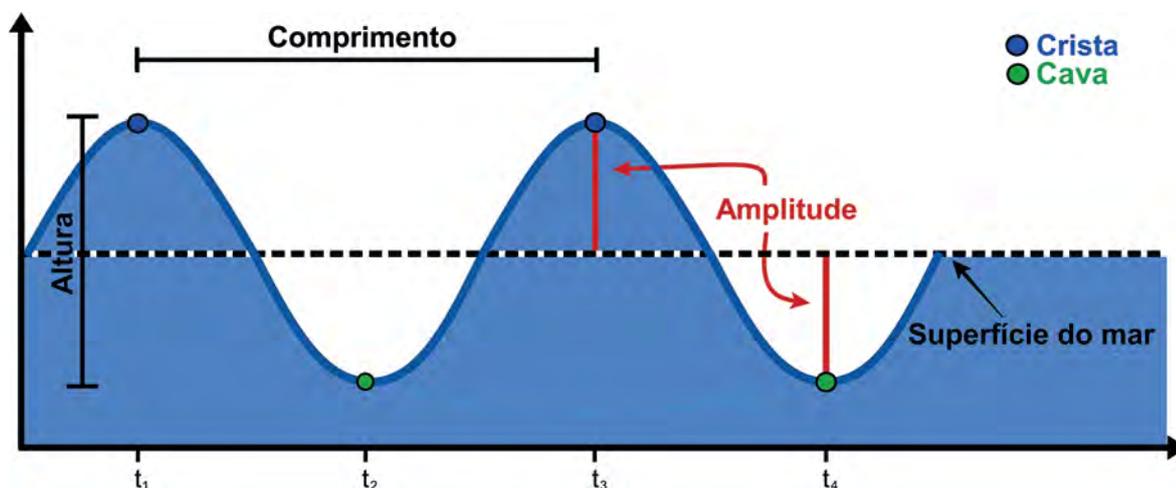
No Oceano Pacífico, a circulação profunda é muito parecida com a circulação do Atlântico Sul, tendo, entretanto, um deslocamento em direção a leste. Não existe intercâmbio de massas d'água nas regiões profundas entre o norte e o sul, porque no Oceano Pacífico Norte não se forma água profunda como acontece no Oceano Atlântico Norte.

## 8. ONDAS

Ondas são formadas por ondulações sobre a superfície do mar, cuja periodicidade e altura dependem da intensidade do vento e que se propagam com velocidades diretamente relacionadas ao seu comprimento. Na região costeira, com a consequente diminuição da profundidade, as ondas aumentam sua altura ocasionando a perda da estabilidade das mesmas e gerando uma zona de arrebatamento. Isto acontece quando a profundidade é de aproximadamente 1,3 vezes a altura da onda (Ver capítulo: [Oceanografia física do Atlântico tropical: processos hidrotermodinâmicos](#)).

As partes componentes de uma onda são (Fig. 1.7):

- > elevação ou crista - parte superior da onda;
- > depressão ou cava - parte inferior da onda;
- > altura- distância medida verticalmente entre a crista e a cava;
- > amplitude - corresponde à metade da altura da onda;
- > comprimento - distância horizontal entre duas cristas, no sentido da propagação da onda;
- > frequência - número de cristas que ocorrem durante um intervalo de tempo; e



**Figura 1.7** Esquema de ondas marinhas, destacando suas principais características. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

- > período- intervalo de tempo necessário para uma oscilação de onda.

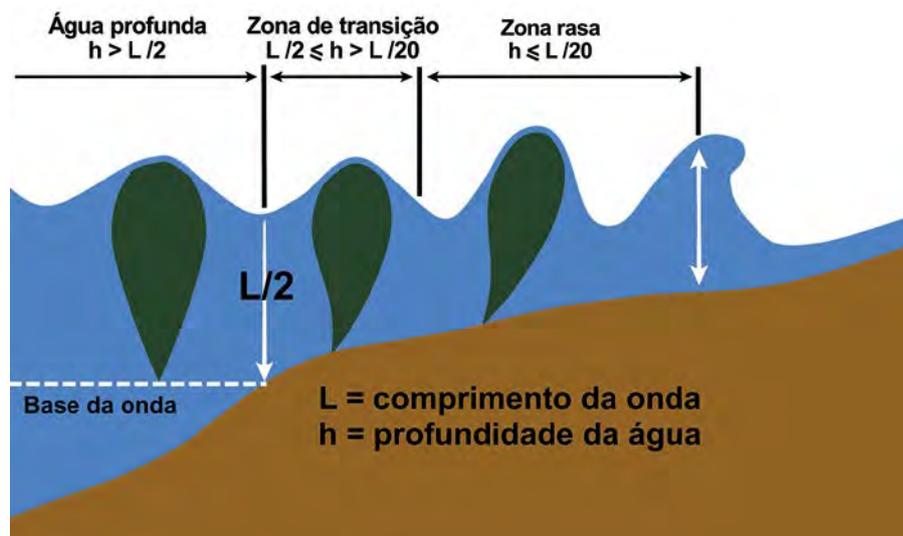
O período das ondas depende dos fatores que as originam e a partir das oscilações geradas elas podem ser classificadas como capilares, de ultra gravidade, de gravidade, de grande período, de maré e de transmarés (Tab. 1.3).

- > Ondas capilares são formadas pela ação dos ventos e são influenciadas principalmente pela tensão superficial da água que atua como força e recompõe o estado de equilíbrio da superfície. Elas possuem períodos menores que 0,1 s, comprimento inferior a 2 cm e altura curta. Sua velocidade de propagação é maior quanto menor for seu período, sendo sempre inferior a 23 s;
- > Ondas de ultra gravidade e de gravidade formadas também pela ação dos ventos, que atuam sobre a superfície do mar, são influenciadas tanto pela tensão superficial da água quanto pela ação da gravidade terrestre. As primeiras possuem períodos que podem variar entre 0,1 e 1 s, e as de gravidade têm períodos entre 1 e 30 s;
- > Ondas de grandes períodos são originadas por fenômenos meteorológicos, embora não esteja totalmente esclarecido, supõe-se que outros

fatores climáticos podem influenciar na sua formação. Elas têm períodos que variam entre 5 minutos e 12 horas e altura inferior a 5 cm;

- > Ondas de maré ocorrem ao longo da região costeira e são resultantes das forças de atração do sol e da lua. Têm períodos entre 12 e 24 h com alturas que podem ser superiores a 5 m;
- > Ondas de transmarés resultam de fenômenos meteorológicos ou climáticos, que produzem elevações ou depressões no nível do mar, e são as que possuem maiores períodos, podendo ser superiores a 24 h. Estas ondas têm, geralmente, força e altura considerável, causando grandes danos quando se aproximam da região costeira.

Ainda podemos citar as ondas que são formadas pelos movimentos sísmicos e de erupções de vulcões submarinos. Ao se formarem na região oceânica, estas ondas têm um período relativamente curto, entre 10 e 20 minutos, altura de 50 cm, o que as torna imperceptíveis, e grande comprimento e velocidade de propagação, podendo alcançar 200 km/h. Entretanto, à medida que se aproximam da região costeira, com a diminuição da profundidade, elas diminuem seu comprimento e aumentam sua altura (Fig. 1.8), podendo ultrapassar 20 m e causar grandes desastres. Estas ondas são denominadas tsunamis.



**Figura 1.8** Comportamento de uma onda marinha em relação a diminuição da profundidade, quando próxima a região costeira. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

**Tabela 1.3** Classificação das ondas de superfície e suas características.

Classificação	Período	Força da Gravidade	Força Restauradora	Tipos Principais
Ondas capilares	< 0,1 segundo	Vento	Tensão superficial	-
Ondas de ultra-gravidade	0,1 a 1 segundo	Vento	Tensão superficial Gravidade	-
Ondas de gravidade ordinária	1 a 30 segundo	Ventos	Gravidade	<i>Swell</i> Ondas de vento
Ondas de infragravidade	30 segundos a 5 minutos	Vento Ondas de gravidade ordinária	Gravidade Coriolis	<i>Surf Beat</i> Seiches Ondas de origem meteorológica
Ondas de longo período	> 5 minutos	Tormentas Maremotos Terremotos	Gravidade Coriolis	Mares de tormenta Ressacas Tsunamis
Ondas de maré	Períodos fixos de 12 horas e 24 horas	Atração do sol e da lua	Gravidade Coriolis	Marés astronômicas
Ondas de transmarés	> 24 horas	Atração do sol e da lua	Gravidade Coriolis	-

Fonte Apel (1987).

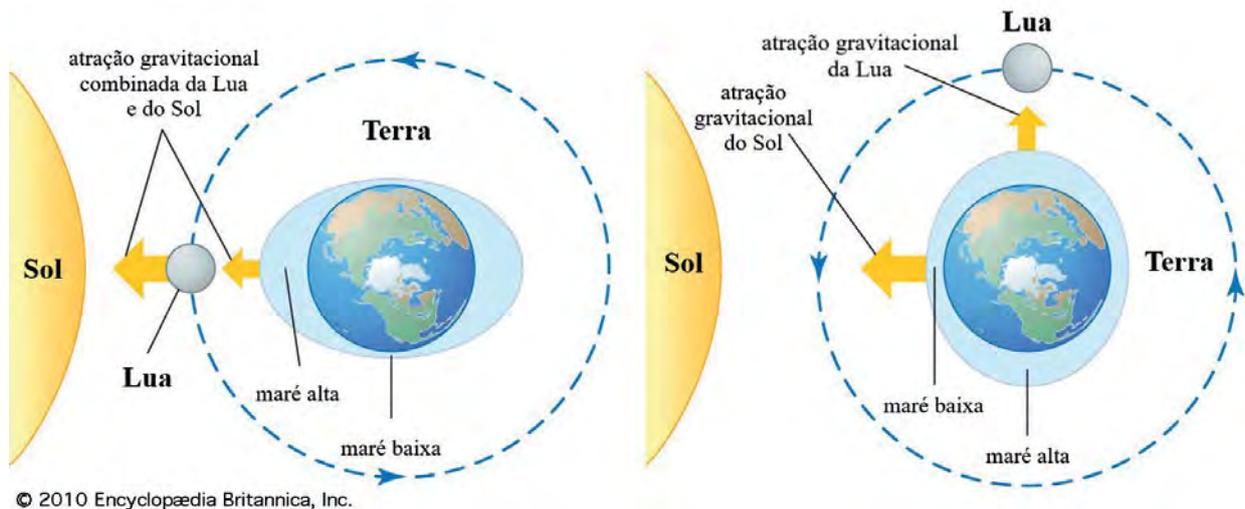
## 9. MARÉS

Como bem definiu Turekian (1968), as marés são resultantes de um modelo simplificado de atração lunar, segundo o qual elas são originadas pelo movimento de rotação do sistema Terra-Lua. Este sistema produz uma força centrífuga em todos os pontos da Terra, fazendo com que o mesmo se equilibre como um todo. Por outro lado, a força centrífuga é diferente e menor do que a força gerada pelo movimento da Terra em torno de seu próprio eixo. A força resultante desses movimentos, que variam em cada ponto geográfico à medida que a lua gira em torno da Terra, tende a mover a superfície da mesma, criando os movimentos de maré.

De uma maneira bastante simplificada, as marés podem ser entendidas como elevações e depressões do nível do mar. Estas elevações coincidem com a passagem da lua pelo meridiano, seguido pelas respectivas diminuições dos níveis de maré, criando assim um “ciclo de maré”. Desta forma, um determinado ponto da superfície da

Terra irá sofrer, durante um período completo de um dia, duas marés-altas e duas marés-baixas, que denominamos como um “ciclo completo de maré”. Quando as atrações do sol e da lua se somam, durante a lua cheia e lua nova, são produzidas as grandes marés denominadas de “sizígias” ou “marés vivas”. Quando as atrações se opõem, surgem as “marés mortas” ou “marés de quadraturas”, que se caracterizam por apresentar pequena variação de amplitude (Fig. 1.9).

Como o plano de evolução da lua em torno da Terra não está no mesmo plano de evolução da Terra em torno do sol, existem efeitos diversos gerados pela ação destas duas forças nos ciclos das marés, sobretudo no que se refere à amplitude das mesmas. Desta forma, podem-se encontrar ciclos de marés de diferentes amplitudes em diferentes pontos geográficos, tendo como exemplo mais marcante a região costeira do Brasil, onde observa-se que as amplitudes máximas de marés podem



© 2010 Encyclopædia Britannica, Inc.

**Figura 1.9** Esquemas de um ciclo completo de marés, e suas relações com a rotação da Terra e os ciclos lunar e solar. **Fonte** <https://www.britannica.com/science/tide>, consultada em 30/12/2020.

variar de 2 m na região Sul a 7 m na região Norte. Na região Nordeste a amplitude média é em torno de 2,5 m. No oceano as marés são geralmente muito pequenas, podendo alcançar, em algumas regiões, menos de 1 m, como é o caso de algumas ilhas do Pacífico e do Atlântico Norte. As marés de “mares interiores”, são menores que as de “mares abertos”, como por exemplo, no Mediterrâneo, onde sua amplitude também não ultrapassa 1 m.

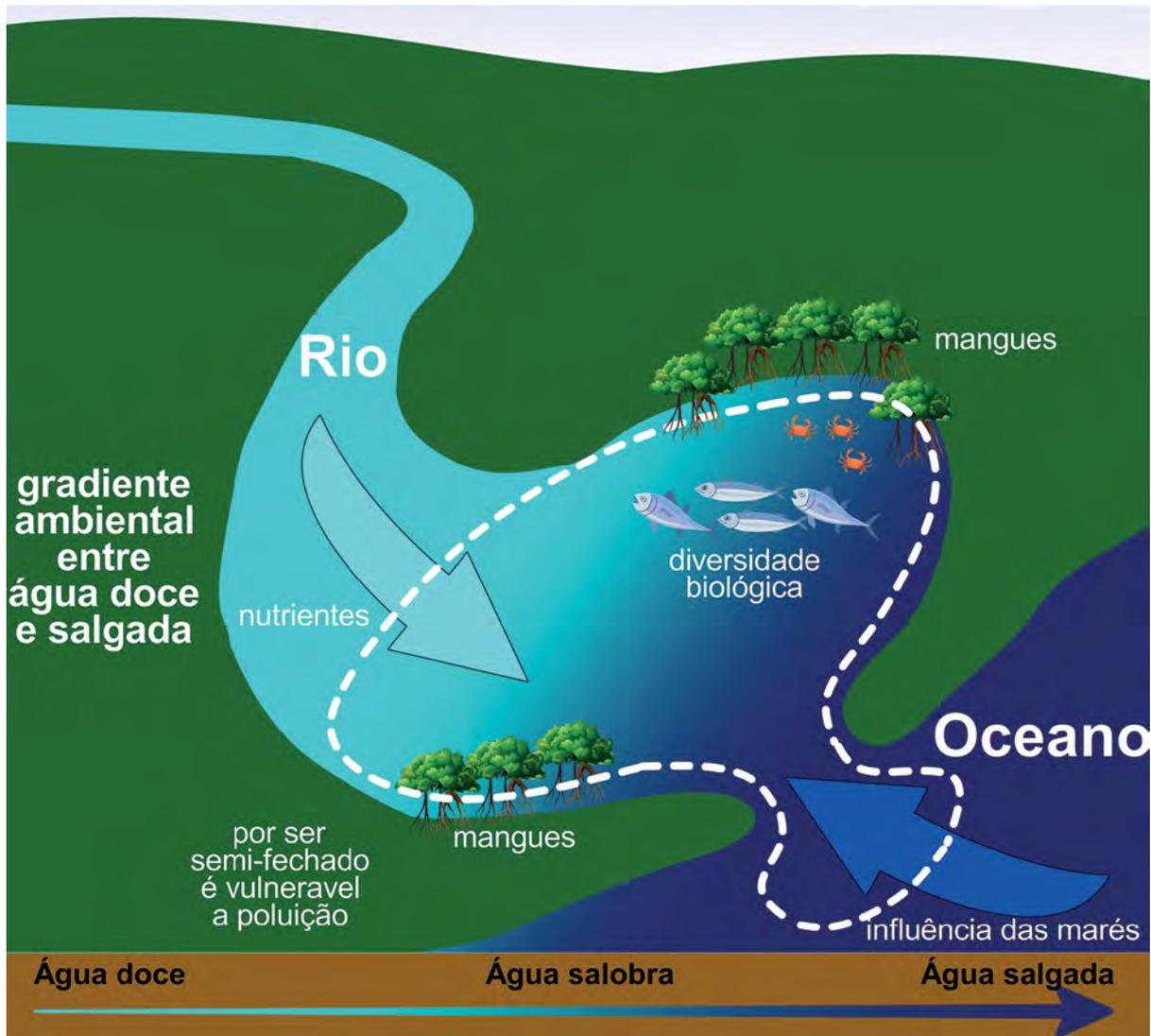
Dois tipos de correntes de marés, que estão classificadas como correntes periódicas, podem ser identificadas: as correntes alternativas e as correntes giratórias. As primeiras são aquelas correntes que mantêm uma direção fixa durante a metade de seu período, e uma direção oposta na outra metade. As correntes giratórias, como o próprio nome leva a entender, são aquelas que giram em todas as direções possíveis em torno de um ponto fixo. No ambiente, levando-se em consideração a localização geográfica e o período, ocorre quase sempre uma combinação dos dois sistemas de correntes. Se considerarmos a disposição da corrente para um ciclo completo de maré, ela terá a forma de uma elipse, que será mais ou menos abaulada em função das correntes

existentes naquele período, diferenciando assim as correntes alternativas das giratórias.

A configuração da região costeira também pode ser considerada como uma das causas que interferem na explicação do fenômeno das marés. Podemos considerar que a elevação da massa d'água, em um determinado lugar, pode sofrer um pequeno retardo em relação ao momento em que a lua passa pelo meridiano correspondente. Este fenômeno não se revela de grande importância no que se refere a amplitudes de marés para a região litorânea, por outro lado, tem grande interesse para a navegação portuária.

## 10. ESTUÁRIOS

Os estuários podem ser considerados como um sistema hidrográfico costeiro semi fechado, que em função do ciclo das marés, são abastecidos por águas oceânicas e fluviais. Esta mistura de águas de diferentes salinidades gera um ambiente que apresenta condições especiais, nos aspectos físico, químico e biológico, transformando-o numa das áreas de grande fertilidade (Fig. 1.10).



**Figura 1.10** Esquema de sistema estuarino. **Fonte** <https://www.infoescola.com/biomas/estuário/> **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

As grandes variações dos parâmetros físico-químicos observadas nos estuários dependem principalmente da relação entre a evaporação, a precipitação e o abastecimento de água, tanto fluvial como oceânica. Desta forma, levando-se em consideração alguns dos fatores acima citados, podemos classificá-los em:

- > **planos costeiros** formados pelas inundações de um vale ou de um antigo rio;
- > **de zona profunda** correspondem aos “fiordes”; e

- > **com barra** resultado da formação de uma barra em frente a uma costa baixa, de pouca profundidade, e que se comunica com o mar por um canal muito estreito.

Os estuários também podem ser classificados segundo os fatores que determinam a circulação e a mistura das águas, a influência dos ventos e os aportes de água oceânica e fluvial.

No Brasil, os estuários se distribuem ao longo de toda a costa, desde o Cabo Orange até a fronteira com a Guiana Francesa. As principais áreas estuarinas encontram-se nos estados do Pará e Amapá, Maranhão, São Paulo e Paraná. No Nordeste, encontram-se poucos estuários, a maioria se concentrando nas desembocaduras dos grandes rios da região.

No litoral brasileiro, em sua quase totalidade, os estuários estão representados pela planície litorânea, de formação recente (Período Quaternário), originária de depósitos fluvio-marinhos, onde são encontrados solos hidromórficos, halomórficos e distróficos de areia quartzosa. A altitude média é de aproximadamente 2 m, podendo variar de 2 a 10 m

nos locais onde predominam as dunas das regiões Norte e Nordeste.

Do ponto de vista biológico, o ecossistema manguezal pode ser representado por uma associação de espécies do gênero *Rhizophora*, *Avicennia*, *Lagunculária* e *Conocarpus* (Fig. 1.11). Com certa frequência, também aparecem espécies do gênero *Hibiscus*, *Acrostichum* e *Spartina* (Herz, 1991). Existem diferenças marcantes entre as vegetações de manguezal para as diversas regiões. No Nordeste predomina a *Rhizophora*, sendo a *Avicennia* mais abundante no Norte e no Sul-Sudeste. O Brasil é um dos países que possui uma das maiores áreas cobertas por mangues do mundo, com um total de, aproximadamente, 25.000 km<sup>2</sup>.



**Figura 1.11** Vegetação característica de ecossistema estuarino e de manguezal. **A)** e **B)** mangue vermelho (*Rhizophora mangle*); **B)** Propágolos em destaque; **C)** mangue branco (*Laguncularia racemosa*); **D)** mangue preto (*Avicennia* sp.); **E)** mangue de botão (*Conocarpus*). **Fonte** Pollyana Roque.



**Figura 1.11** Vegetação característica de ecossistema estuarino e de manguezal. **F)** Manguezal. **Fonte** Pollyana Roque.

O manguezal é separado da área de restinga por uma região de vegetação halofítica, denominado “Apicum”. Esta região, do ponto de vista bioecológico, é chamada de complexo estuarino, e isto se deve ao fato das mesmas serem abastecidas por águas fluviais e oceânicas ao mesmo tempo. Geralmente, as regiões superior e média dos estuários são caracterizadas por apresentar uma elevada salinidade, fortes correntes de marés e baixa concentração de material em suspensão. Enquanto que, a região inferior apresenta uma influência nitidamente fluvial, com grandes variações de salinidade, menor velocidade das correntes de marés e importante transporte de material em suspensão. As regiões estuarinas apresentam, geralmente, uma boa cobertura de mangues, sendo frequente, principalmente na região Nordeste, a presença de salinas ou de projetos aquícolas em áreas de salinas desativadas.

## 11. CONDIÇÕES DO MEIO

A água do mar não possui parâmetros uniformes em todos os oceanos e mares, observando-se grandes variações, como por exemplo, o Golfo da Finlândia no Mar Báltico, e o Mar Morto, no Oriente Médio, os quais apresentam respectivamente os menores e maiores níveis de salinidade.

A temperatura da água do mar varia em função da localização geográfica, das correntes marinhas, da sazonalidade climática e da profundidade. De uma forma geral, podemos considerar que a temperatura da superfície do mar depende da quantidade de energia radiante que recebe (insolação) e do calor que perde por evaporação e condução ([Ver capítulo: Introdução à oceanografia química](#)).

### 11.1. Temperatura

A temperatura média anual dos oceanos aumenta dos polos ao equador, mas em razão da disposição das correntes de superfície, o traçado das isotermas não corresponde exatamente ao das correntes. Desta forma, para uma mesma latitude, podem-se observar temperaturas médias anuais com uma variação bastante representativa.

Em função da temperatura de superfície, o oceano pode ser dividido em:

- > **Mares Polares** temperatura inferior a 5°C;
- > **Mares Subtropicais** temperaturas inferiores a 10°C, mais comumente inferior a 8°C;
- > **Mares Temperados** temperatura variando de 8°C a 23°C.
- > **Mares Tropicais** temperaturas superiores a 23°C.

Esta subdivisão está diretamente relacionada à distribuição e a variabilidade dos organismos marinhos, onde os organismos bênticos habitam o fundo dos mares, e os pelágicos vivem livremente nos corpos d'água. Observando que a independência relativa das grandes massas d'água e sua circulação são os fatores determinantes para a distribuição horizontal destes organismos.

À medida que aumenta a profundidade oceânica, três fatores exercem importante papel na distribuição vertical dos organismos: a luz, a temperatura e a agitação da massa d'água.

Para as temperaturas anuais médias, esta variação de temperatura é bastante nítida para os oceanos Atlântico, Índico e Pacífico entre 40° Norte e 40° Sul. Podemos observar que para esta zona, as temperaturas das águas superficiais variam em torno de 20°C a 22°C, diminuindo para aproximadamente 5°C a 1.000 m de profundidade, para finalmente se estabilizar em torno de 1,5°C nas profundidades maiores que 5.000 m.

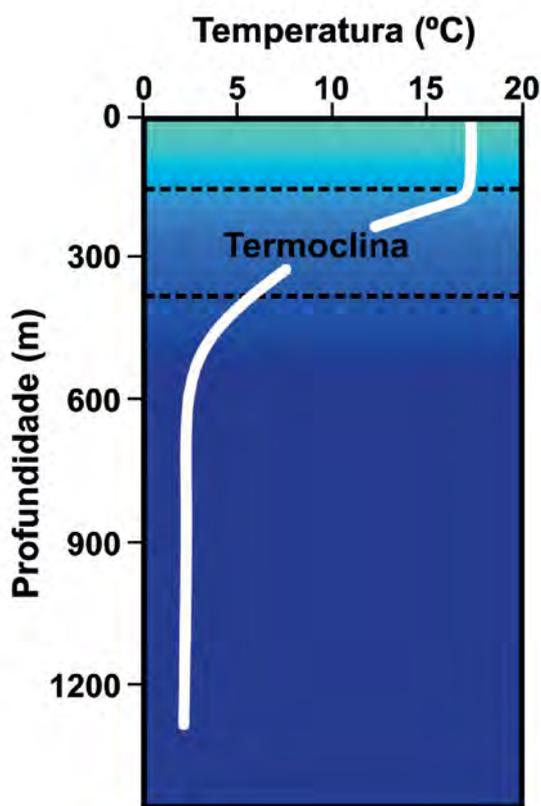
Em geral, a temperatura da água do mar em regiões costeiras, para uma mesma latitude, é mais alta que a de águas profundas em regiões oceânicas. Este fato se deve, principalmente, ao aumento da densidade da água pela diminuição da temperatura nas águas profundas. Por outro lado, esta regra geral deixa de ser válida quando, na região costeira, ocorre uma corrente fria de superfície. A temperatura da água em uma região profunda varia, também, em função da latitude, como é o caso de regiões do Atlântico Oriental onde podemos observar variações de até 10°C para uma mesma profundidade, mas com latitudes diferentes.

De uma forma geral, a temperatura da água do mar varia entre 2°C e 30°C, podendo alcançar valores extremos, como -4°C, para regiões de grandes profundidades e 42°C para regiões fechadas onde não existe renovação constante. Desta forma, as variações de temperatura do mar, tanto para regiões costeiras como oceânicas, não são uniformes, variando em função dos diferentes oceanos, profundidade e épocas do ano.

Os fatores que ocasionam estas variações de temperatura são muito variados, tanto pela sua natureza como pela cronologia de sua ação. Dentre estes fatores, podemos citar a influência da latitude, que em função da época do ano, proporciona um maior ou menor período de insolação. Este fenômeno decorre da penetração de raios solares na superfície do mar, em virtude da posição da Terra em relação ao sol naquele momento. Desta forma, são nas baixas latitudes, como a região Tropical, que se encontram as temperaturas mais altas, com médias em torno de 18°C e 23°C.

Como citamos anteriormente, a profundidade também influencia as variações de temperatura. Regiões pouco profundas sofrem maior influência dos fatores que interferem na temperatura do que em regiões que apresentam grandes profundidades. As variações mais acentuadas de temperatura ocorrem nas camadas superficiais do mar, sendo que as camadas mais profundas apresentam características térmicas mais estáveis.

Entretanto, a variação vertical da temperatura em relação à profundidade não é uniforme. Em geral, a diminuição da temperatura da superfície até as camadas profundas se faz de maneira bastante acentuada. A partir de uma certa profundidade, observa-se uma mudança brusca do gradiente de temperatura, denominada de “termoclina” (Fig. 1.12). A identificação da profundidade onde ocorre este fenômeno, é de grande importância para a indústria pesqueira, que explora os estoques de peixes pelágicos, já que esta zona funciona como uma barreira térmica para estas espécies. (Ver capítulo: [Introdução à oceanografia pesqueira - Vol. 2](#))



**Figura 1.12** Esquema da termoclina em região subtropical. **Fonte** Thurman e Trujillo (2004). **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

As termoclinas são formadas principalmente pela insolação das águas superficiais e pela ação do vento, que aumentando ou diminuindo sua intensidade, pode deslocar as camadas de água

superficiais, as quais determinam modificações no coeficiente angular da temperatura em função da profundidade. Desta forma, a profundidade da termoclina varia em função da região geográfica e das estações climáticas. Nas regiões tropicais e temperadas, a profundidade da termoclina pode se situar em torno de 70 a 150 m.

### 11.2. Densidade

A temperatura é a variável essencial nas modificações da densidade da água do mar. Em salinidades de mesma concentração, águas de baixas temperaturas ocupam um volume menor e, conseqüentemente, apresentam-se mais densas do que as de temperaturas altas. Por exemplo, a água do mar de uma determinada região que apresenta temperatura igual a 0°C possui uma densidade maior do que a água de mesma salinidade, mas que apresenta temperatura de 30°C. A salinidade também influencia na densidade, sendo uma variação de salinidade de duas unidades equivalente a variações de temperatura de aproximadamente 10°C.

Quanto maior a temperatura e salinidade, menor será a densidade. Este fenômeno explica, de uma maneira geral, as variações geográficas da densidade das águas de superfície em regiões oceânicas em função das latitudes. Desta forma, as águas de altas latitudes são geralmente mais densas “*in situ*”, de modo que deslocando-se dos polos em direção ao equador a densidade da água “*in situ*” diminui.

### 11.3. Salinidade

O valor médio da salinidade da água do mar é de 35 ‰ (partes por milhão), podendo, de uma forma geral, variar entre 33 ‰ e 37 ‰. Dois fatores principais determinam esta variação, a temperatura da água de superfície, que se elevada, faz com que a evaporação se torne intensa, aumentando a concentração dos sais em solução e resultando na

elevação da salinidade; e os aportes d'água doce, que por diluição diminui a salinidade (Ver capítulo: [Introdução à oceanografia química](#)).

Nas regiões costeiras, a distribuição da salinidade na superfície depende, principalmente, da descarga dos rios, da evaporação e das precipitações atmosféricas. Sendo influenciada também pela latitude geográfica, estações do ano e correntes. Durante o período de um ano a camada superficial sofre variações importantes, alcançando um máximo na primavera e um mínimo no outono. Os degelos nas regiões polares também podem influenciar as diminuições de salinidade.

Nos oceanos, em geral, a salinidade apresenta variações verticais, da superfície para o fundo, de até 1%. Ela varia, sobretudo, em função da latitude, podendo-se observar que para uma mesma latitude a salinidade de superfície é maior no Hemisfério Sul do que para o Hemisfério Norte. Este fenômeno é devido, principalmente, à repartição dos continentes e dos oceanos. No Hemisfério Sul, por possuir menor área terrestre, os aportes d'água provenientes de grandes rios são menos importantes que no Hemisfério Norte. A tabela 1.4 a seguir mostra as variações médias de salinidade das águas superficiais nos dois hemisférios em função da latitude. Os dados apresentados evidenciam que as águas superficiais são menos salinas nas altas latitudes, podendo-se considerar que este fato se deve, sobretudo, ao degelo nas regiões polares.

No Oceano Atlântico, a salinidade é mais elevada nas latitudes tropicais (20°Norte e 20°Sul), onde a insolação é mais intensa durante todo o ano e há pouca evidência de chuvas. Nas altas latitudes, a salinidade fica em torno de 34‰, devido a dois fatores principais: temperatura baixa, com pouca evaporação, e fusão periódica das geleiras, provocando a diluição da concentração dos sais por uma massa d'água doce. Com ligeiras variações, se observa uma conduta semelhante nas águas superficiais do Pacífico e do Índico.

**Tabela 1.4** Variação média de salinidade para os Hemisférios Norte e Sul em função da latitude.

Salinidade (S ‰)		
Latitudes	Hemisfério Norte	Hemisfério Sul
90 – 80°	21.0	
80 – 70°	26.0	
70 – 60°	30.4	33.2
60 – 50°	32.2	33.8
50 – 40°	33.5	34.4
40 – 30°	35.5	35.3
30 – 20°	35.3	36.0
20 – 10°	35.0	35.8
10 – 0°	34.8	35.2

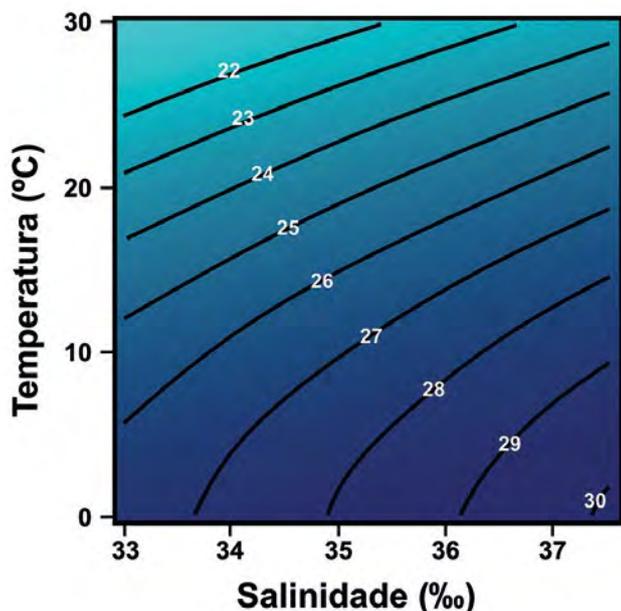
Fonte Pérès e Devèze (1963).

#### 11.4. Curvas T-S

A relação entre a temperatura e a salinidade para uma determinada profundidade é representada por um diagrama denominado “T-S”. Este diagrama é uma representação gráfica na qual os valores de salinidade se expressam nas abscissas (eixo X) e os da temperatura nas ordenadas (eixo Y). Cada curva representa uma estação, com medidas de “T” e “S” desde a superfície até o fundo (Fig. 1.13). O uso deste diagrama é necessário, pois apenas o conhecimento da densidade da água não é suficiente para determinar os caracteres diferenciais das mesmas, já que podem ser igualmente densas e diferir em temperatura e salinidade.

As curvas T-S são normalmente utilizadas para o estudo das variações anuais da salinidade e temperatura das águas superficiais e profundas de uma determinada região. Desta forma, podem-se identificar as características de uma coluna d'água e observar os processos de misturas de águas de diferentes temperaturas e salinidades. No diagrama, as curvas resultantes diferem, geralmente, em função do regime hidrológico da região. Este tipo de diagrama é utilizado, sobretudo, para estudos de massas d'água em regiões tropicais e equatoriais,

onde é bastante “longo”, devido às variações de temperatura e salinidade em função da profundidade, as quais são bastante acentuadas nestas regiões. Por outro lado, nas regiões polares, onde se observam pequenas variações de temperatura e água de baixa salinidade, devido ao degelo, os diagramas se apresentam relativamente “curtos”.



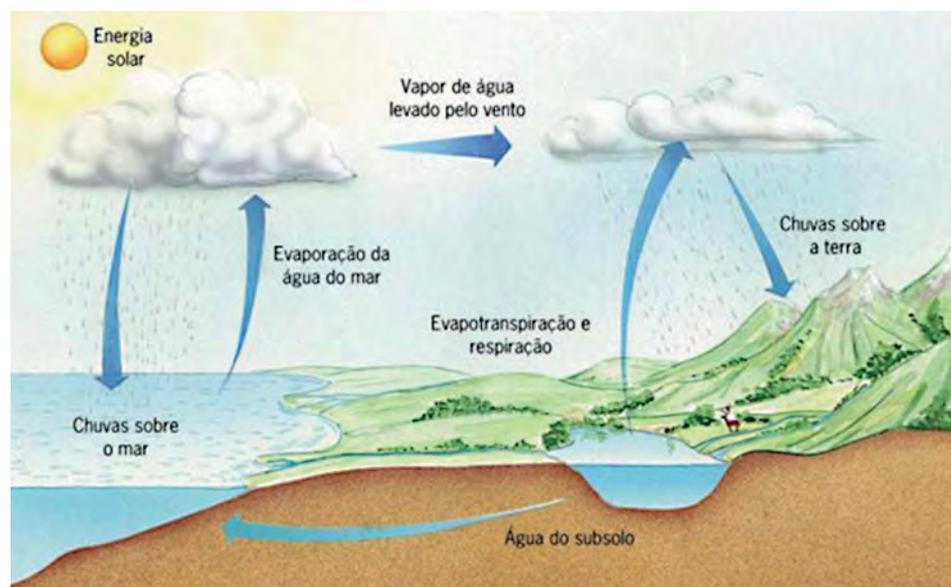
**Figura 1.13** Curva T-S típica. **Adaptado** de Brown et al. (1989).  
**Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com.

## 12. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS

Os ciclos biogeoquímicos são processos de reciclagem de elementos químicos que confere à biosfera um poder de auto-regulação, o qual assegura a perenidade dos ecossistemas e traduz-se por uma notável constância da taxa dos diversos elementos presentes em cada meio. Esses ciclos possibilitam que os elementos interajam com o meio ambiente e com os seres vivos. Elementos químicos como o carbono, o hidrogênio, o oxigênio, o nitrogênio e o fósforo, necessários em grandes quantidades, apresentam ciclos bioquímicos bem definidos que podem ser considerados mais ou menos importantes. Alguns ciclos são perfeitos, como é o caso do ciclo do carbono e da água (Fig. 1.14), outros podem apresentar alguma deficiência, como o ciclo do fósforo, no qual parte do fornecimento se perde por longos períodos de tempo.

### 12.1. Ciclo do carbono

O principal reservatório de carbono é o dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) que existe na atmosfera, nas massas d'água (rios, oceanos etc.) e no solo. Existem



**Figura 1.14** Esquema geral do ciclo biogeoquímico.  
**Fonte** <https://descomplica.com.br/artigo/o-que-sao-os-ciclos-biogeoquimicos/4Lm/>, consulta em 28/11/2020.

dois fenômenos biológicos fundamentais que condicionam a circulação do carbono na biosfera: a fotossíntese e a respiração. Através da respiração, o dióxido de carbono se difunde lentamente na atmosfera, de maneira que a percentagem deste gás aumenta com a profundidade.

O  $\text{CO}_2$  é solúvel na água, e sua concentração na água do mar é de 40 a 60 centímetro cúbico por litro (cc/l). Na atmosfera sua percentagem é, em média, de 0,035%, sendo que apenas 1% de  $\text{CO}_2$  das águas está sob a forma livre e o restante em estado ionizado ( $\text{CO}_3$  e  $\text{HCO}_3$ ). O carbono disponível, na forma de  $\text{CO}_2$ , é retirado através da fotossíntese das plantas clorofiladas aquáticas e terrestres. Por sua vez, os vegetais são consumidos, no início da cadeia trófica, pelos herbívoros, e estes pelos carnívoros. Uma grande parte desses compostos de carbono ingeridos é assimilada, e a outra vai fornecer energia ou servir de reserva. Após a morte desses animais, ocorre a decomposição por bactérias e fungos, que libera carbono, na forma de  $\text{CO}_2$ , para a atmosfera, o solo e as águas.

## 12.2. Ciclo do nitrogênio

O maior reservatório de nitrogênio é o ar, que contém 80% desse elemento, mas também existe dissolvido nos mares, rios etc. O nitrogênio gasoso entra na atmosfera pela ação das bactérias desnitrificantes (*Pseudomonas*), voltando para o ciclo devido a ação das bactérias nitrificantes (*Azobacter*, *Clostridium*) e das algas cianofíceas, que o transforma em nitrato. No meio aquático existem várias bactérias nitrificantes, mas o papel principal na fixação do nitrogênio é das algas cianofíceas (*Nostoc*, *Anabaena* etc.). O nitrato é utilizado pelas plantas para formar proteínas vegetais.

Quando os organismos morrem, ocorre uma ação das bactérias e dos fungos, que leva à mineralização do nitrogênio orgânico (particulado). Essa mineralização compreende a amonificação, que é a formação de amônia, e a nitrificação, que consiste

na transformação da amônia em nitritos, pela ação das bactérias nitrosantes, ou em nitratos, pelas bactérias nitrificantes. Outro grupo de bactérias desnitrificantes, devolve o nitrogênio à atmosfera, decompondo  $\text{NO}_2$ ,  $\text{NO}_3$  e  $\text{NH}_4$  e liberando nitrogênio gasoso.

Parte do nitrogênio se perde no processo na forma de nitratos, que são solúveis, e são levados pelas águas, as quais se depositam em sedimentos profundos. Outra parte é reabsorvida pelos animais que compõem a cadeia alimentar.

## 12.3. Ciclo do fósforo

O estoque de fósforo disponível para os seres está inteiramente contido na litosfera. Os reservatórios de fósforo são as rochas ígneas, que gradualmente vão sofrendo erosão, liberando fosfato para os ecossistemas. Uma grande parte do fosfato é carregada para o mar, onde é depositado em sedimentos superficiais, e o restante se perde nos sedimentos profundos.

O transporte de fosfato para as regiões costeiras proporciona o desenvolvimento do fitoplâncton e dos animais dos diversos níveis da cadeia trófica. No próprio ambiente aquático, o retorno dos fosfatos à água se efetua por intermédio de bio-redutores. O fósforo pode ser encontrado sob quatro formas diferentes, insolúveis ou dissolvidas.

O fósforo controla a maior parte da produção primária, e é provável que seja o grande regulador de todos os outros ciclos biogeoquímicos. A taxa de nitratos nas águas ou de oxigênio na atmosfera, parece ser controlada pelo ciclo do fósforo.

Nos oceanos, o ciclo do fósforo pode ser considerado parcialmente aberto, já que há um retorno de uma parte do mesmo através das aves ictiotróficas, que eliminam o guano no continente (Ver capítulo: [Introdução à oceanografia química](#)).

## 13. PRODUTIVIDADE PRIMÁRIA

A produtividade primária pode ser definida como a taxa na qual a energia radiante é convertida pela fotossíntese e quimiossíntese de organismos produtores em substâncias orgânicas. É a partir desse enriquecimento que se forma a pirâmide trófica, que caracteriza-se pela maneira como a energia alimentar é passada de um nível trófico para o seguinte ao longo da cadeia alimentar. A base da pirâmide é composta por espécies chamadas autotróficas, os principais produtores do ecossistema. É constituída pelo fitoplâncton e algas marinhas, que aportam carbono para a cadeia alimentar, fixando a energia solar e liberando oxigênio na água e na atmosfera. Todos os outros organismos no ecossistema são consumidores chamados heterotróficos (primários, secundários, terciários), que direta ou indiretamente dependem dos produtores primários (Fig. 1.15) (Ver capítulos: *Fitoplâncton marinho tropical* e *Zooplâncton marinho tropical* - Vol. 2).

A fotossíntese está limitada à zona superficial da água do mar, e a medida da extensão útil desta camada produtiva é o nível de compensação, como por exemplo, o nível do fundo ao qual a produção de matéria orgânica se decompõe. Abaixo do nível de compensação não existe fotossíntese, podendo este nível variar continuamente segundo as taxas de iluminação, devendo ser definido em relação ao tempo e à região geográfica.

Nos trópicos, a medida do nível de compensação pode variar até uma profundidade de 100 m ao longo do ano. No verão, em altas latitudes, o nível de compensação durante o período diurno encontra-se entre 10 e 60 m, no inverno, o nível de compensação se reduz a zero. A fotossíntese varia de acordo com a intensidade luminosa, até um limite em que as plantas começam a ficar saturadas de luz. Mensurações nos níveis de fotossíntese demonstraram que o máximo de produção se encontra entre 5 e 20 m abaixo da superfície, sendo menor logo acima deste nível.

A ação contínua do vento sobre a superfície do mar, durante um determinado tempo, gera um deslocamento da camada superficial, proporcionando a ascensão de águas profundas e criando uma circulação vertical denominada de ressurgência (*upwelling*). Estas águas do fundo são caracterizadas por uma maior densidade e baixas temperaturas.

Este fenômeno ocorre principalmente nas costas ocidentais dos continentes e ao longo das zonas equatoriais do mundo, e se reveste de grande importância através do enriquecimento das águas superficiais pelos nutrientes que predominam nas regiões profundas. Este enriquecimento da camada superficial proporciona um desenvolvimento do fitoplâncton, tornando estas regiões extremamente produtivas, do ponto de vista da exploração de recursos pesqueiros

As ressurgências também podem ser originadas de acidentes geográficos nas bacias oceânicas, tais como cordilheiras e montes submarinos. Por outro lado, situações nas quais ocorrem resfriamento brusco da camada superficial do mar, podem causar ressurgências de pequenas dimensões.

Outros fatores como a temperatura, a salinidade, podem interferir sobre o metabolismo dos vegetais. A temperatura também influi, indiretamente, sobre a produção, tanto através de seus efeitos sobre os movimentos e misturas das águas, como sobre o aporte de nutrientes aos níveis eufóticos. Já a salinidade está relacionada com a manutenção da regulação osmótica dos organismos, podendo, assim, influenciar sobre o metabolismo. As variações de salinidade são importantes na zona nerítica, embora as espécies vegetais sejam bem adaptadas às condições de salinidade (eurialinos). As formas oceânicas são estenohalinas, o que corresponde a uma grande estabilidade à salinidade na região oceânica.

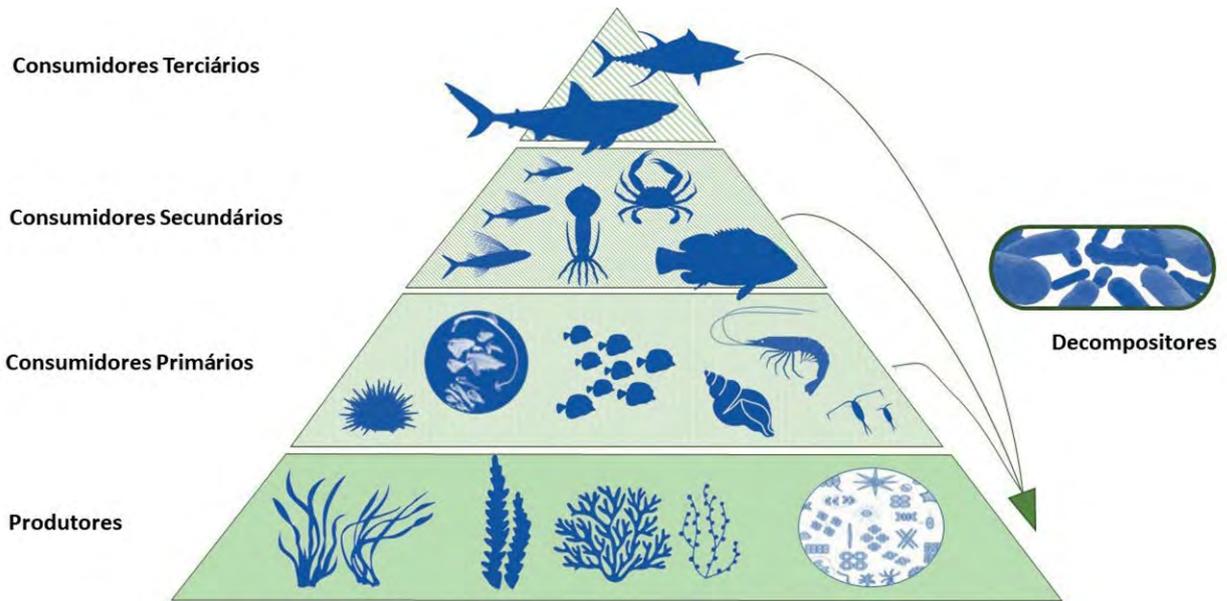


Figura 1.15 Pirâmide trófica no ecossistema marinho.

## 14. PERSPECTIVAS FUTURAS

Apesar dos valiosos avanços nos estudos oceanográficos, ainda existem muitas lacunas no entendimento da relação entre as características oceanográficas e a dinâmica dos recursos biológicos, tanto na região costeira, como oceânica brasileira, denominada de Amazônia Azul, pela sua grandeza quando comparada com a região Amazônica. Os recursos vivos e não vivos de águas profundas são também muito pouco conhecidos, havendo necessidade de implementação de estudos que objetivem uma melhor avaliação, e venham a subsidiar futuros planos de exploração, considerando-se a sustentabilidade como pilar fundamental.

O oceano é uma das últimas regiões para o homem buscar recursos naturais. É fato que os ecossistemas costeiros e oceânicos, contêm a maior parte da biodiversidade disponível no planeta. Além disso, a área da plataforma continental suporta a maior produção de recursos naturais vivos e não vivos. No entanto, a maioria desses recursos tem sofrido

algum tipo de pressão de origem antrópica, o que tem levado a reduções importantes desses recursos, anteriormente abundantes, resultando em alguns casos, na exploração acima dos níveis máximos de sustentabilidade, como é o caso de alguns recursos pesqueiros.

Atualmente, na região Nordeste do Brasil, estudos oceanográficos (climáticos, biológicos, físicos, geológicos e pesqueiros) vêm sendo desenvolvidos por instituições de pesquisas públicas e privadas, com o objetivo de aportar um melhor entendimento dos processos dinâmicos dos ecossistemas marinhos, que permitam um manejo integrado, no qual sejam consideradas as vertentes sociais, econômicas e ambientais num mesmo contexto. Desta forma, entender as relações ecológicas do meio marinho no sentido de manter o equilíbrio dos seus diversos ecossistemas e recursos naturais, certamente permitirão o desenvolvimento de medidas de conservação e gestão, que conduzam a exploração, de forma sustentável, das riquezas de nosso oceano.

## REFERÊNCIAS

- APEL, J. R. **Principles of Ocean Physics (International Geophysics)**. Academic Press. 1987. 634 p.
- BROWN, J.; COLLING, A.; PARK, D.; PHILLIPS, J.; ROHERTY, D.; WRIGHT, J. **Seawater: Its composition properties and behavior**. England, Pergamon Press/The Open University, 1989. 165 p.
- CALAZANS, D. **Estudos Oceanográficos: do instrumental ao prático**. 2011.
- CASTELLO J. P.; KRUG L. C. **Introdução às Ciências do Mar - Pelotas**: Ed. Textos. 2015. 602 p.
- CHAPMAN P., **World Ocean Circulation Experiment Generates Wealth of Data**. Eos, Vol. 79, No. 32, 1998.
- CLARK, M. R.; TITTENSOR, D.; ROGERS, A. D.; BREWIN, P.; SCHLACHER, T.; ROWDEN, A.; STOCKS, K.; CONSALVEY, M. **Seamounts, deep-sea corals and fisheries: vulnerability of deep-sea corals to fishing on seamounts beyond areas of national jurisdiction**. UNEPWCMC, Cambridge, UK. 2006. Site acessado em 01/10/2020. [www.unep-wcmc.org/resources/publications/UNEP\\_WCMC\\_bio\\_series/](http://www.unep-wcmc.org/resources/publications/UNEP_WCMC_bio_series/)
- COLAÇO, A.; CARREIRO E SILVA, M.; GIACOMELLO, E.; GORDO, L.; VIEIRA, A.; ADÃO, H.; GOMES-PEREIRA, J. N.; MENEZES, G.; BARROS, I. **Ecosistemas do Mar Profundo**. DGRM, Lisboa, Portugal. 2017. E-book disponível em [www.sophia-mar.pt](http://www.sophia-mar.pt).
- CORRÊA, I.; WESCHENFELDER, J. **Fisiografia do Fundo Oceânico**. Introdução às Ciências do Mar. Pelotas: Ed. Textos, 2015. 602 p.
- COUTINHO, P. N. **Levantamento do Estado da Arte da Pesquisa dos Recursos Vivos Marinhos do Brasil - PROGRAMA REVIZEE - Oceanografia Geológica**. 2000.
- ELLIS R. Deep Atlantic. **Life, Death, and Exploitation in the Abyss**. The Lyons Press. New York- US. 1996. 395 p.
- ESKINAZI-LEÇA, E.; NEUMANN-LEITÃO, S. E; COSTA, M. F. **Oceanografia: um cenário tropical**. Universidade Federal de Pernambuco. Departamento de Oceanografia. Editora Bagaço, 2004. 761 p.
- FONTELES FILHO A. A. **Oceanografia, Biologia e Dinâmica Populacional de Recursos Pesqueiros**. ExpressãoGrafia e editora, Fortaleza- CE, 2011. 464 p.
- GAGE, J. D.; TYLER, P. A. **Deep-sea biology: a natural history of organisms at the deep-sea floor**. Cambridge University Press. 1991.
- GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia**. Cengage Learning. 2010. 426 p.
- GOES, E. R.; FERREIRA-JUNIOR, A.V. **Caracterização morfo sedimentar da Plataforma Continental Brasileira**. Revista Brasileira de Geografia Física, 10(5): p. 1595-1613. 2017.
- HERZ, R. **Manguezais do Brasil**. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1991. 227 p.
- ICES – **The International Council for the Exploration of the Sea**. 2020. <http://www.ices.dk/about-ICES/who-we-are/Pages/Our-history.aspx> Site visitado em 30 de novembro de 2020 às 13:00.
- IRC – **The International Research Council**. Nature 122, 389–391. 1928. <https://doi.org/10.1038/122389a0>
- KNOPPERS, B.; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A. G. **The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport**. Geo-Marine Letters, 19: p. 171-178, 1999.
- KOSLOW T. **The Silent Deep.:the Discovery, Ecology, and Conservation of the Deep Sea**. The University of Chicago Press. London- UK, 2007. 270 p.
- LUMPKIN, R.; GARZOLI, S. L. **Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean**. Deep-Sea Research I, 52: p. 495-518, 2005.
- MENARD, H.W.; SMITH, S. M. **Hypsometry of ocean basin provinces**. Journal of Geophysical Research, 71: p. 4305–4325, 1966.
- MILLER C. B. **Biological Oceanography, Blackwell Publishing**, Australia, 2004. 392 p.
- PALMA, J. J. C. **Fisiografia da área oceânica**. In: SCHOBENHAUS, Carlos et al. (Coords.). Geologia do Brasil. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, p. 429-441, 1984.
- PÉERÈS, J. M.; DEVÈZE. **Océanographie Biologique et Biologie Marine**. Tome Premier- La Vie Benthique. Paris. Presses Universitaires de France. 1963. 538 p.

PEREIRA, R.C.; GOMES, A. S. **Biologia marinha**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2009. 631 p.

SCOR – **Scientific Committee on Oceanic Research**. 2020 <https://scor-int.org/scor/history/>Site visitado em 30 de novembro de 2020 às 13:10. The International Research Council. *Nature* 122, 389–391. 1928. <https://doi.org/10.1038/122389a0>

THURMAN, H.V.; TRUJILLO, A.P. **Introductory oceanography**. Prentice Hall, California. 2004. 608 p.

TUREKIAN, K. K. **Oceanos**. São Paulo- Brasil. Editora Edgard Blucher Ltda. 1968. 151 p.

ZEMBRUSCKI, S. G.; FRANÇA, A. M. C. **Bathymetric map of the Brazilian continental margin**. (COLLECTION OF PAPERS 1974-1977.), COLETANEA DE TRABALHOS 1974-1977, 1979. 1976. 275 p.

# INTRODUÇÃO À OCEANOLOGIA QUÍMICA

2

Manuel de Jesus FLORES MONTES<sup>1</sup>  
Eliete ZANARDI-LAMARDO<sup>1</sup>  
Gilvan Takeshi YOGUI<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE



## 1. INTRODUÇÃO

O oceano representa o maior ecossistema aquático do planeta, além de exercer diferentes funções, entre elas, a de ser um grande reservatório de elementos e compostos químicos em suspensão, ao longo da coluna de água ou sedimentados no fundo oceânico. Isto é consequência das propriedades físico-químicas que a água apresenta, como elevado calor específico, densidade relativa, tensão superficial. É também considerada o solvente universal, motivo pelo qual conserva grande quantidade de solutos, devido a sua estrutura iônica, decorrente das pontes de hidrogênio que ligam os átomos de hidrogênio e oxigênio de moléculas diferentes. Estas pontes, que formam a molécula de água, fazem uma ligação eficiente, devido à alta eletropositividade do hidrogênio e à alta eletronegatividade do oxigênio. A existência da vida marinha depende da presença de vários dos elementos químicos presentes na água do mar, como oxigênio dissolvido, dióxido de carbono e nutrientes inorgânicos dissolvidos. A produção da matéria orgânica pelos produtores primários demanda a disponibilidade de uma variedade e quantidade de compostos inorgânicos, além da energia solar. A demanda é diferente por cada elemento, sendo os de maior demanda denominados de macronutrientes (C, O, P, N e Si) e os consumidos em menor quantidade de micronutrientes (metais).

### 1.1. O oceano, o ciclo hidrológico e o clima tropical

Devido ao formato esférico do planeta, há uma incidência desigual de luz solar na superfície terrestre, sendo que a região próxima à linha do equador

recebe maior incidência dos raios solares ao longo do ano, a qual diminui em direção aos polos. A região tropical está situada entre 23° 26' N e 23° 26' S, latitudes que correspondem ao Trópico de Câncer e Trópico de Capricórnio, respectivamente. Nesta faixa oceânica o calor provoca intensa e contínua evaporação, resultando em grande quantidade de vapor de água na atmosfera, da qual espera-se que aproximadamente 30% possam precipitar no continente, resultando em um processo interativo entre o oceano e os continentes, bem como na troca de íons entre os diferentes ecossistemas. Esse processo de transporte de água, que apresenta fluxo contínuo, é denominado de ciclo hidrológico, e recebe a energia necessária a partir da radiação solar, a qual controla os fenômenos de evaporação e precipitação. Parte desta massa de água retorna ao oceano por escoamento superficial (**ex:** rios) ou fluxos subterrâneos, carregando uma grande quantidade de elementos dissolvidos ou em suspensão e podendo sofrer interferência das atividades humanas, devido a represamento, desmatamento, crescimento urbano, entre outros. A qualidade da água é afetada pela adição de resíduos líquidos (matéria orgânica, nutrientes inorgânicos, contaminantes orgânicos e inorgânicos), sólidos (lixo, sedimentos, plásticos) e outros gases dissolvidos (dióxido de carbono, metano, gás sulfídrico, óxido nitroso). O Nordeste do Brasil apresenta um clima contrastante quanto ao teor de água na atmosfera, variando entre muito úmido no litoral e semiárido no sertão. A região oceânica tropical apresenta elevada estratificação vertical da coluna de água, resultando em um ambiente com baixa produção primária.

## 2. COMPONENTES DISSOLVIDOS NA ÁGUA DO MAR

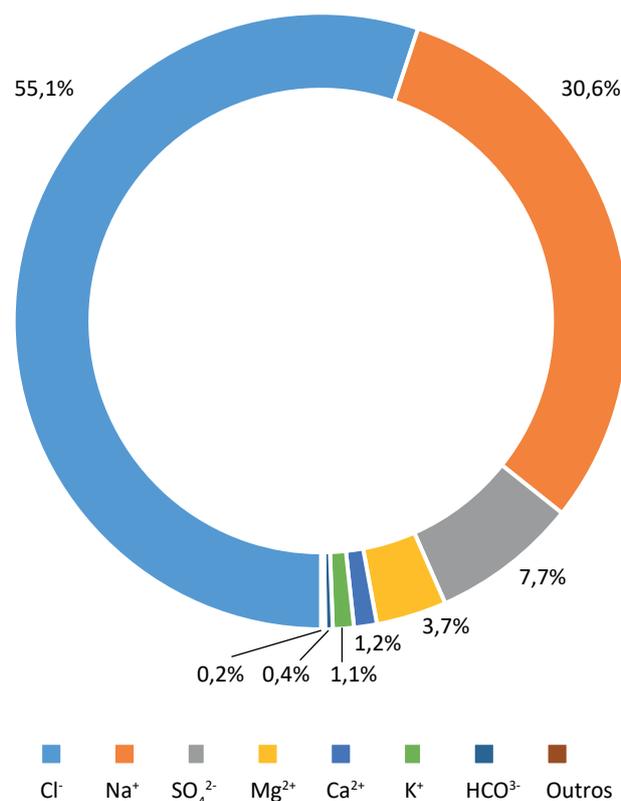
A quantidade de espécies químicas dissolvidas ou particuladas na água do mar é tão grande que podemos dizer que inclui quase todos os elementos da tabela periódica, em suas diferentes formas e valências. O termo dissolvido se refere às moléculas e ou elementos que passam por um filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ , sendo apenas uma definição operacional. Dentro desta classificação, temos ainda as partículas denominadas coloides, que não estão verdadeiramente dissolvidas, mas finamente divididas, e que passam pelo filtro de 0,45  $\mu\text{m}$ . Podemos dividir os componentes dissolvidos em dois grandes grupos: sais e gases dissolvidos.

### 2.1. Sais dissolvidos

Os sais que se encontram dissolvidos na água do mar variam quanto à concentração e reatividade e, baseado nestas características, podem ser classificados como elementos maiores ou menores. Os elementos maiores apresentam relativamente altas concentrações ( $>1 \text{ mg kg}^{-1}$ ) e são pouco reativos. Por esta razão são chamados de conservativos. Os elementos maiores somam cerca de 99,98% do total dos compostos dissolvidos. Estes elementos são os principais responsáveis pela salinidade da água do mar, que pode ser definida como: “salinidade é a massa de sal (em gramas) em 1 kg de água do mar”. Os elementos menores apresentam concentrações  $<1 \text{ mg kg}^{-1}$ , representando cerca de 0,02% do material dissolvido. Estes são geralmente envolvidos em processos biológicos (reativos) e, por esta razão, são chamados de não-conservativos. Os elementos menores podem ser subdivididos em dois grupos: nutrientes e elementos-traço (metais e compostos orgânicos), e serão discutidos em outro subitem abaixo.

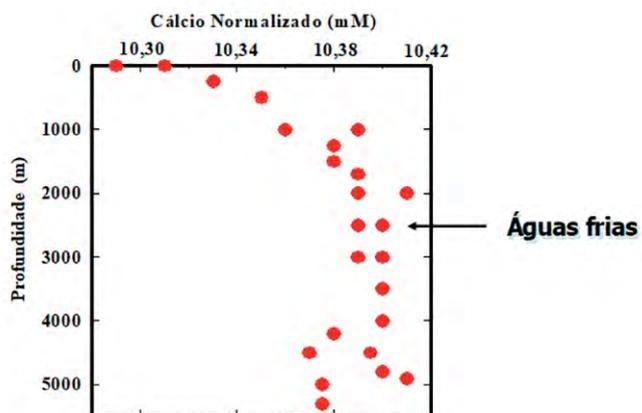
Os principais elementos que compõem os sais dissolvidos são cloreto ( $\text{Cl}^-$ ), sódio ( $\text{Na}^+$ ), sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e potássio ( $\text{K}^+$ ), que somam  $\sim 99,4\%$  (Fig. 2.1). Por se tratar de

elementos conservativos, a proporção entre eles também se mantém constante, independentemente da massa d'água (oceano) ou da profundidade. Este fenômeno é possível uma vez que a taxa com que a água se move dentro e através dos oceanos é muito mais rápida do que os processos químicos e/ou biológicos que ocorrem na introdução ou remoção destes constituintes. Uma exceção dentro deste quadro é o elemento  $\text{Ca}^{2+}$ , classificado como elemento maior (alta concentração), mas bastante reativo. Entretanto, a taxa com que o cálcio é absorvido pelos organismos e excretado novamente para a coluna d'água é bastante alta, fazendo com que sua concentração permaneça praticamente constante e sua proporção relativa aos demais elementos não seja alterada significativamente.



**Figura 2.1** Composição média (%) dos principais elementos que compõem os sais dissolvidos da água do mar.

Fatores naturais / antrópicos podem alterar as concentrações de alguns destes elementos maiores, fazendo com que as proporções sejam modificadas. O aporte considerável de águas fluviais pode alterar a proporção relativa entre alguns elementos, uma vez que são mais ricas em sulfato ( $\text{SO}_4^{2-}$ ), bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ), magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ), etc (Fig. 2.2), resultando em um acréscimo nas razões entre  $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^- / \text{Cl}^-$ ,  $\text{Mg}^{2+} / \text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+} / \text{Mg}^{2+}$ , entre outros. Este fenômeno pode ser observado em estuários e mares internos, como por exemplo, no Mar Báltico, que apresenta baixa salinidade. Além disto, nestas regiões mais próximas aos continentes, o balanço evaporação- precipitação também pode contribuir para alterações relativas nas concentrações dos elementos maiores. Em áreas com baixo teor de oxigênio (**ex:** bacias anóxicas), a decomposição da matéria orgânica reduz a concentração de oxigênio e pEh (potencial redox), favorecendo o desenvolvimento de bactérias redutoras de sulfato. A fonte de  $\text{O}_2$  passa a ser o  $\text{SO}_4^{2-}$ , diminuindo a proporção relativa entre este e demais elementos, **ex:**  $\downarrow \text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ . Este fenômeno pode ser observado em bacias profundas do Mar Negro ou nos fiordes da Noruega. Regiões quentes favorecem a precipitação de carbonatos (quanto maior a temperatura, menor a solubilidade do  $\text{CaCO}_3$ ), gerando alterações na proporção entre cálcio e cloretos:  $\text{Ca}^{2+} / \text{Cl}^-$ . Nas Bahamas pode-se observar um banco de coral de  $\text{CaCO}_3$ .

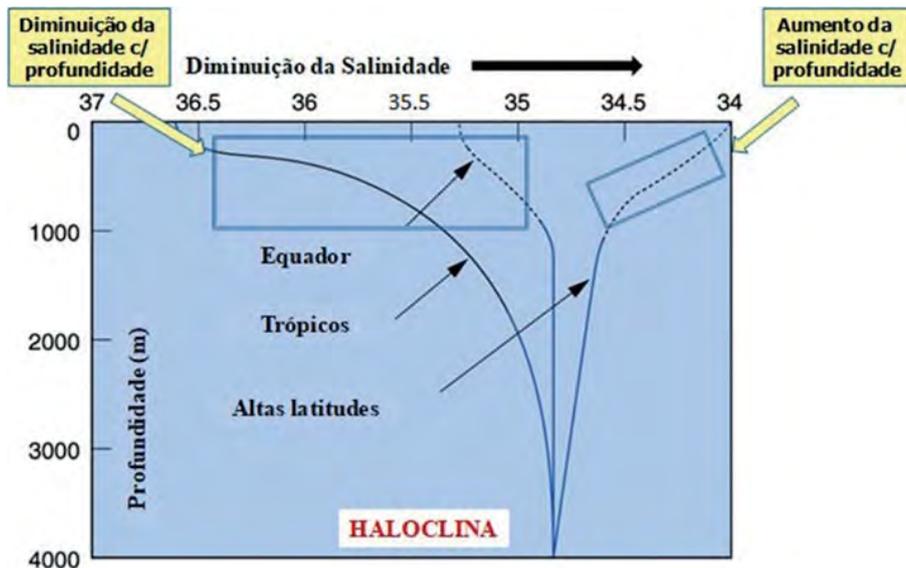


**Figura 2.2** Distribuição do Cálcio (mM) em função da profundidade nas águas do norte do Pacífico. **Fonte** Millero (2006).

Em regiões frias, a dissolução deste sal é favorecida (ver Figura 2.2) e, conseqüentemente, a razão  $\text{Ca}^{2+} / \text{Cl}^-$  aumenta. Regiões que apresentam fissuras no solo oceânico, com introdução de águas muito salinas e quentes (fontes termais), propiciam um aumento considerável na quantidade dos elementos  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , alterando a proporção entre vários elementos. Um exemplo típico deste fenômeno está no Mar Vermelho, a 2.000 m de profundidade, com registros de  $S = 255 - 326$  e  $T = 45 - 58^\circ\text{C}$ . Além destes, outros fatores como ação de vulcões submarinos (aumento de sílica dissolvida e injeção de gases ricos em fluoretos), congelamento da água do mar que incorpora o sulfato ( $\text{SO}_4^{2-} / \text{Cl}^-$ ), interações com a atmosfera (alguns íons são emitidos na forma de aerossóis, principalmente  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ) e/ou com os sedimentos (formação da dolomita  $\text{CaMg}(\text{CO}_3)_2$ , hidrólise dos feldspatos, etc) podem modificar as concentrações dos elementos maiores.

A distribuição da salinidade na superfície do globo pode variar em função da latitude aumenta da região do equador em direção aos trópicos e diminui novamente nos polos, atingindo valores mínimos; da localização geográfica - estuários e mares internos, bacias anóxicas, regiões quentes / frias (como discutido anteriormente); do balanço evaporação / precipitação; e de variações sazonais - chuvas fortes, congelamento / degelo das águas oceânicas, intensas evaporações durante o dia, etc.

A distribuição vertical da salinidade depende da latitude que se encontra a massa de água. De forma geral, a salinidade diminui com o aumento da profundidade em águas tropicais; diminui, embora menos acentuadamente, em regiões equatoriais; e aumenta com a profundidade em regiões de alta latitude (Fig. 2.3). Entretanto, abaixo de 1.000 m de profundidade, as massas d'água apresentam pequenas variações entre si:  $S = 34,5 - 35,5$ .



**Figura 2.3** Distribuição da salinidade em função da profundidade nas regiões equatorial, tropical e em altas latitudes. **Fonte** Millero (2006).

A presença destes sais dissolvidos pode causar algumas alterações na distribuição de outros elementos na coluna d'água. Alta salinidade diminui a solubilidade dos gases, através do efeito "salting out", interfere na oxidação de alguns gases (**ex:** metano  $\text{CH}_4$ ) e dissociação de compostos (**ex:** ácido fosfórico  $\text{H}_3\text{PO}_4$ ). Além disto, os íons cloretos têm a capacidade de complexar com alguns metais, tornando-os indisponíveis para a biota e/ou reduzindo a sua toxicidade.

Durante muitos anos a salinidade foi baseada na titulação dos cloretos ou, mais especificamente, na titulação dos haletos Cl<sup>-</sup>, Br<sup>-</sup> e I<sup>-</sup>. Atualmente, a salinidade é baseada na Escala Prática de Salinidade (EPS), que baseia suas medições na condutividade da amostra. Entretanto, as duas formas de medir a salinidade requerem cuidados. O método de titulação assume a proporção constante entre os constituintes e, somente se obtém a mesma salinidade entre duas amostras, se as mesmas apresentarem a mesma clorinidade. A EPS necessita que as amostras com mesma condutividade elétrica, estejam na mesma temperatura e pressão para que apresentem a mesma salinidade.

## 2.2. Gases dissolvidos

O oceano tem na atmosfera sua principal fonte de gases dissolvidos. As atividades vulcânicas submarinas e processos químicos, biológicos e físicos são também fontes de gases para o ambiente marinho. A importância dos gases dissolvidos se deve a sua participação em diversos processos biogeoquímicos (**ex:** fotossíntese x respiração). Alguns gases também são produtos do metabolismo de bactérias (**ex:**  $\text{NH}_3$ ,  $\text{N}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{S}$ ) e do fitoplâncton (**ex:** dimetilsulfeto (DMS)). No entanto, os gases resultantes das atividades antrópicas intensificam o efeito estufa (**ex:** vapor d'água,  $\text{CO}_2$ ,  $\text{CH}_4$ ,  $\text{N}_2\text{O}$ ), provocam chuva ácida (**ex:**  $\text{NO}_x$  e  $\text{SO}_x$ ), atuam na redução da camada de ozônio (**ex:** clorofluorcarbonetos), são fonte de nutrientes inorgânicos (**ex:**  $\text{NH}_3$  e  $\text{NO}_x$ ) ou compõem o material tóxico volátil (**ex:** Hg).

Os gases dissolvidos são classificados como:

- 1) gases conservativos ou não-reativos, os quais são distribuídos por difusão e processos advectivos; e
- 2) não-conservativos ou reativos, quando sua taxa de produção ou consumo é mais rápida que o transporte na massa d'água.

Representado pelo símbolo O, o oxigênio é o elemento químico mais abundante na natureza, que apresenta número atômico igual a 8 e massa molecular de 15,994 g mol<sup>-1</sup>. É um gás atmosférico pouco solúvel em água, porém é mais solúvel em água do que o nitrogênio e menos do que o dióxido de carbono. No ar, o oxigênio é abundante em sua forma diatômica, representado pela fórmula molecular O<sub>2</sub> (dioxigênio), apresenta o peso molecular de 31,998 g mol<sup>-1</sup> e constitui 20,947% dos gases atmosféricos.

O dioxigênio (O<sub>2</sub>) é essencial para a respiração de todos os organismos aeróbicos e é o agente oxidante mais importante em águas naturais. Na natureza, o oxigênio apresenta três isótopos estáveis: oxigênio 16 (99,76%), oxigênio 17 (0,04%) e oxigênio 18 (0,20%). Devido a sua elevada eletronegatividade o O<sub>2</sub> reage com muitos elementos químicos, exceto os gases inertes.

As principais fontes de oxigênio para a água do mar são a atmosfera e a fotossíntese. No oceano as concentrações de oxigênio dissolvido (OD) são dependentes de diversos processos físicos e biológicos, entre os quais, trocas na interface atmosfera-oceano, o balanço entre fotossíntese e respiração, a circulação e ventilação oceânica, a oxidação da matéria orgânica pelas bactérias e processos de oxi-redução.

A transferência de oxigênio (O<sub>2</sub>) do ar para a água é um processo difusivo que depende inicialmente da pressão parcial do O<sub>2</sub> (lei das pressões parciais de Dalton). Pela lei de Dalton, o oxigênio exerce uma pressão na superfície terrestre de 0,209 atm, uma vez que representa 20,947% dos gases atmosféricos. A pressão total dos gases atmosféricos é assim descrita:

$$P_T = P_{N_2} + P_{O_2} + P_{Ar} + P_{CO_2} + P_{H_2O} + P_{\text{outros gases}}$$

Os fatores que controlam a solubilidade do O<sub>2</sub> na água são a temperatura, a salinidade e a pressão. A taxa de transferência na camada superficial vai

depender do estado da superfície do oceano, da cinética da dissolução, da temperatura superficial e da presença de partículas orgânicas e inorgânicas.

O fluxo líquido de um gás, entre a atmosfera e o oceano, é diretamente proporcional à diferença da pressão parcial imediatamente acima e abaixo da interface ar-água, motivo pelo qual, as trocas de oxigênio entre a atmosfera e o oceano serão uma consequência da diferença de pressão parcial (*p*) segundo a Lei de Henry.



A constante de equilíbrio da Lei de Henry,  $K_H$ , para o processo de dissolução do O<sub>2</sub>, é definida como:

$$K_H = [O_2(aq)] / pO_2$$

onde  $pO_2$  é a pressão parcial do oxigênio atmosférico. O valor de  $K_H$  para o O<sub>2</sub> em temperatura de 25°C é de 1,29 x 10<sup>-3</sup> mol L<sup>-1</sup> atm<sup>-1</sup>.

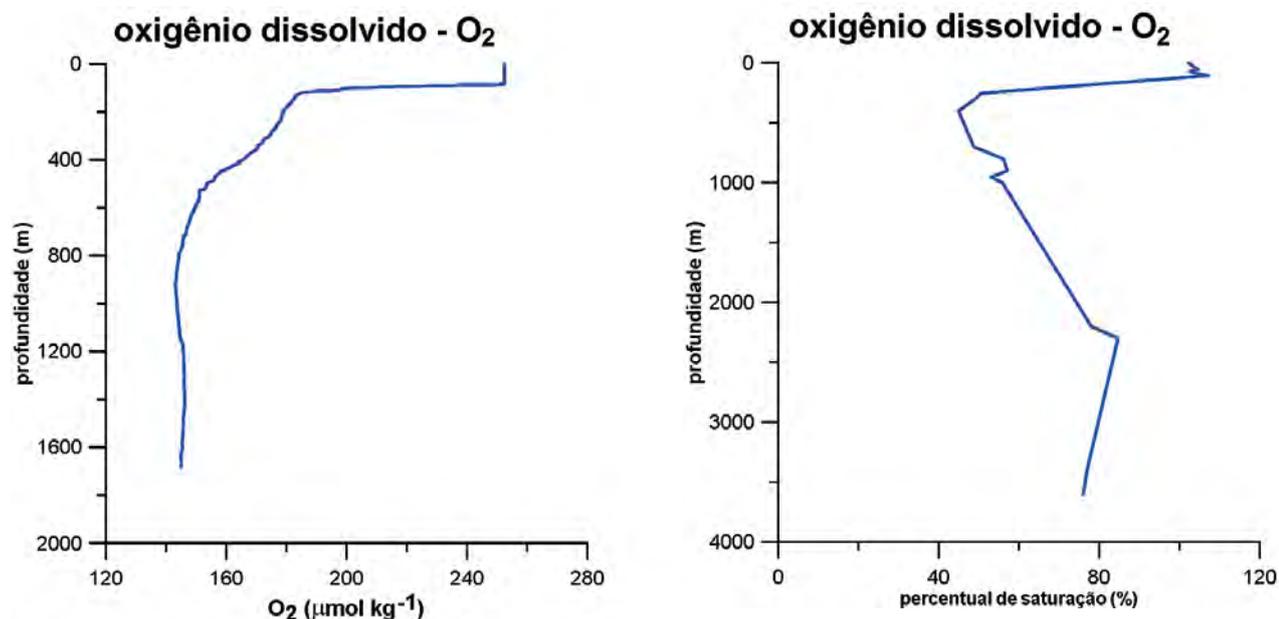
Diferenças espaciais nos valores de OD podem ser observadas longitudinalmente e verticalmente. A concentração na camada superficial dos oceanos é maior nas altas latitudes que nas baixas latitudes. Na distribuição vertical podemos estabelecer quatro zonas distintas:

- > **A primeira** zona, a camada superficial, está em equilíbrio com a atmosfera e é a zona de saturação ou supersaturação;
- > **A segunda**, a zona de concentração máxima, está situada na base da camada fótica, coincidindo com a profundidade da clorofila máxima, na qual a atividade fotossintética é mais intensa;
- > **A terceira**, a zona de transição ou zona do mínimo de oxigênio, apresenta a menor disponibilidade de O<sub>2</sub> no oceano, e está localizada entre 200 e 1.000 m de profundidade;
- > **A quarta**, é a zona de lento aumento, característico de águas profundas. Abaixo dos 2.000 m a quantidade de O<sub>2</sub> varia pouco devido à baixa demanda e consumo.

A camada fótica geralmente contém níveis de oxigênio dissolvido mais elevados, devido ao seu contato com a atmosfera e à contribuição das atividades fotossintéticas. No fundo do oceano, os teores de  $O_2$  são dependentes da concentração inicial de oxigênio que a massa de água apresentava no último contato com a atmosfera. O tempo transcorrido desde esse último contato também influencia a concentração de  $O_2$ , devido à circulação termohalina e pode representar décadas ou séculos. Isso é refletido no consumo de oxigênio devido à respiração de todos os consumidores ao longo desse tempo.



Com aumento da profundidade na coluna de água, a produção e o transporte de  $O_2$  atmosférico tornam-se nulos, elevando-se o consumo e resultando em uma diminuição contínua de  $O_2$ . A intensa variação vertical de  $O_2$ , denominada de oxiclina, é contínua até a profundidade conhecida como Zona do Mínimo de Oxigênio - ZMO, localizada em média no Oceano Atlântico tropical entre 300 e 800 m de profundidade (Fig. 2.4b). Na ZMO está localizada a menor taxa de saturação de  $O_2$ . A partir da ZMO, a disponibilidade de  $O_2$  aumenta devido ao transporte lateral por correntes oceânicas profundas, que transportam massas de água mais oxigenadas. Nas águas próximas ao fundo, ocorre uma lenta inversão nesta distribuição, devido a processos respiratórios.



**Figura 2.4** Variação vertical média da taxa de saturação (a) e da concentração (b) de  $O_2$  no Atlântico Sul (entre 6° e 8°S).

**Fonte** Flores Montes (2003).

Para determinar o nível de saturação de oxigênio em um determinado volume de água, calcula-se a saturação de  $O_2$  que depende dos valores de temperatura, salinidade e pressão (Fig. 2.4a). Isso pode ser feito com o apoio das Tabelas Oceanográficas Internacionais- “*International Oceanographic Tables*” (UNESCO, 1973).

**Percentual de Saturação:**  
**% saturação = 100 G/G'**

**Onde:** **G** = concentração medida na amostra  
**G'** = Concentração de saturação esperada para determinada salinidade, temperatura e pressão.

Uma massa de água superficial, quando afunda, transporta a quantidade de O<sub>2</sub> que absorveu em contato com a atmosfera. A partir daí, essa quantidade de O<sub>2</sub> será lentamente consumida por processos de mineralização, até o momento em que a massa de água retornará à superfície. Esse consumo reduzirá a concentração de O<sub>2</sub> nessa massa de água. A diferença entre o valor inicial (quando a massa de água estava em contato com a atmosfera) e o valor de O<sub>2</sub> existente no momento da coleta (após a perda de contato da massa de água com a atmosfera) é denominada de Uso Aparente de Oxigênio (*Apparent Oxygen Utilization – AOU*

em inglês). Quando as águas superficiais estão em equilíbrio com a atmosfera, elas se encontram saturadas em O<sub>2</sub>, assim assume-se que estariam 100% saturadas no momento em que afundam.

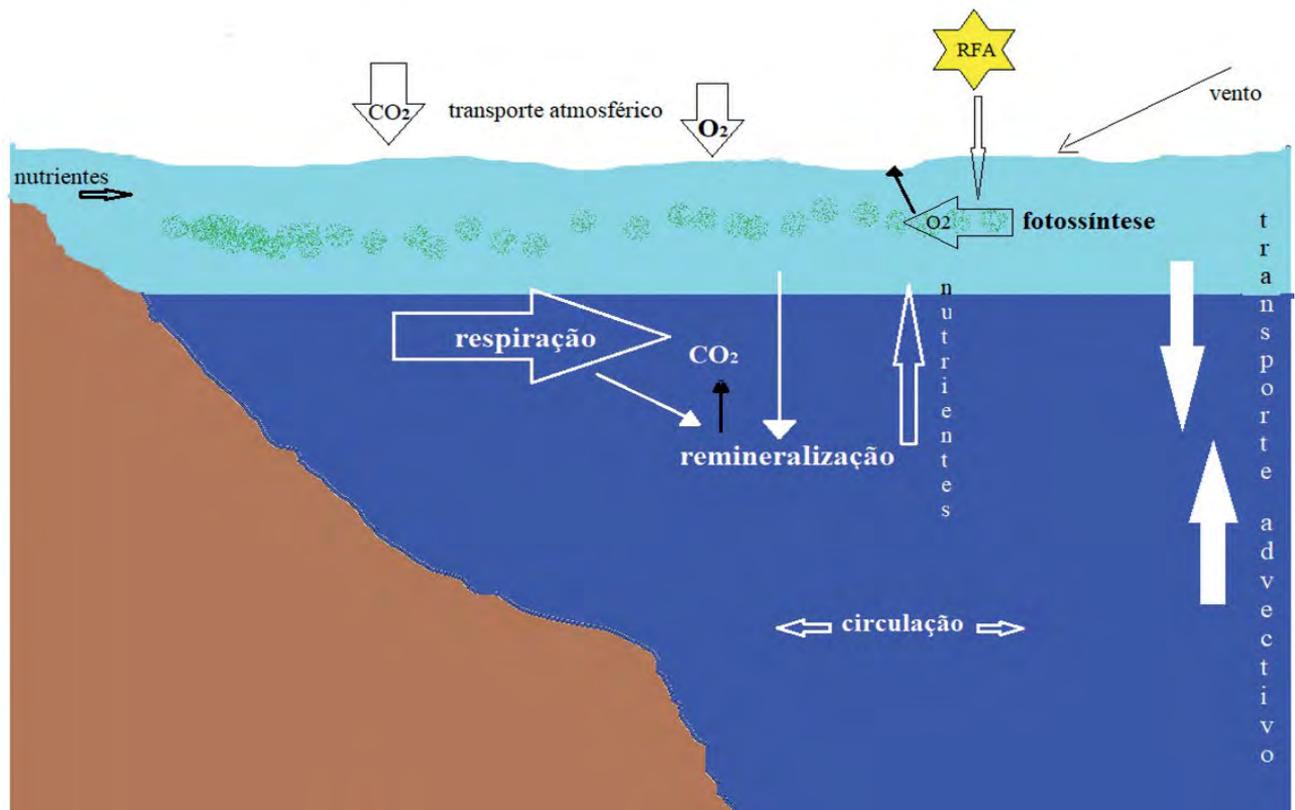
$$AOU = O_2' - O_2$$

sendo:

**O<sub>2</sub>'** = concentração de O<sub>2</sub> que a massa de água teria se estivesse em equilíbrio com a atmosfera, a uma determinada temperatura e salinidade.

**O<sub>2</sub>** = concentração de oxigênio dissolvido medido na mesma amostra de água

O O<sub>2</sub> é utilizado como indicador de processos ecológicos, físicos e biogeoquímicos, entre os quais: traçador de massas de água, traçador de processos geoquímicos, traçador de eutrofização e traçador de poluição (Fig. 2.5).



**Figura 2.5** A distribuição de O<sub>2</sub> no oceano é controlada por processos físicos, químicos e biológicos.

**Legenda** RFA = radiação fotossinteticamente ativa.

Por outro lado, devido ao aquecimento global, a temperatura da superfície dos oceanos vem aumentando, intensificando a estratificação dos mesmos. Esse processo reduz a solubilidade dos gases na água do mar, o que resulta na diminuição da taxa de oxigenação da camada superficial, principalmente em áreas temperadas. Esse evento vem reduzindo a ventilação das águas mais profundas, diminuindo a concentração de OD nas águas oceânicas intermediárias, processo conhecido como desoxigenação oceânica.

Diversas metodologias para determinação das concentrações de OD vêm sendo utilizadas, entre elas o método titulométrico, o qual é uma modificação do método clássico Winkler. Medições diretas podem ser feitas com o uso de sensores acoplados a sondas multiparâmetros ou perfiladores tipo CTDO. A cromatografia gasosa é outro método que pode ser utilizado.

As concentrações de oxigênio dissolvido podem ser apresentadas em unidades de volume ( $\text{mL L}^{-1}$ ), percentual de saturação (%) ou unidades de massa (**ex:**  $\text{mg L}^{-1}$ , partes por milhão (ppm),  $\text{mol m}^{-3}$ ,  $\mu\text{mol L}^{-1}$ ,  $\mu\text{mol kg}^{-1}$ ). As equivalências entre as diferentes unidades são apresentadas na tabela 2.1.

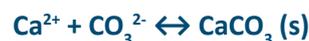
**Tabela 2.1** Dados complementares para cálculo das concentrações de  $\text{O}_2$ .

Equivalências	Valor
Massa molar do Oxigênio	$15,9994 \text{ g mol}^{-1}$
1 g Oxigênio	$0,0625 \text{ mol}$
1 mL Oxigênio	$44,661 \mu\text{mol L}^{-1}$
1 mol Oxigênio	$15,9994 \text{ g}$
$1 \mu\text{mol O}_2$	$0,022391 \text{ mL}$
Conversões	
$1 \text{ mg L}^{-1} \text{ O}_2$	$1 \text{ mL L}^{-1} \times 1,428$
$1 \text{ mg L}^{-1}$	$0,700 \text{ mL L}^{-1}$
$\text{O}_2 \mu\text{mol L}^{-1}$	$44,661 \times \text{O}_2 [\text{mL L}^{-1}]$
$\text{O}_2 \mu\text{mol kg}^{-1}$	$\text{O}_2 [\mu\text{mol L}^{-1}] / 1,025$

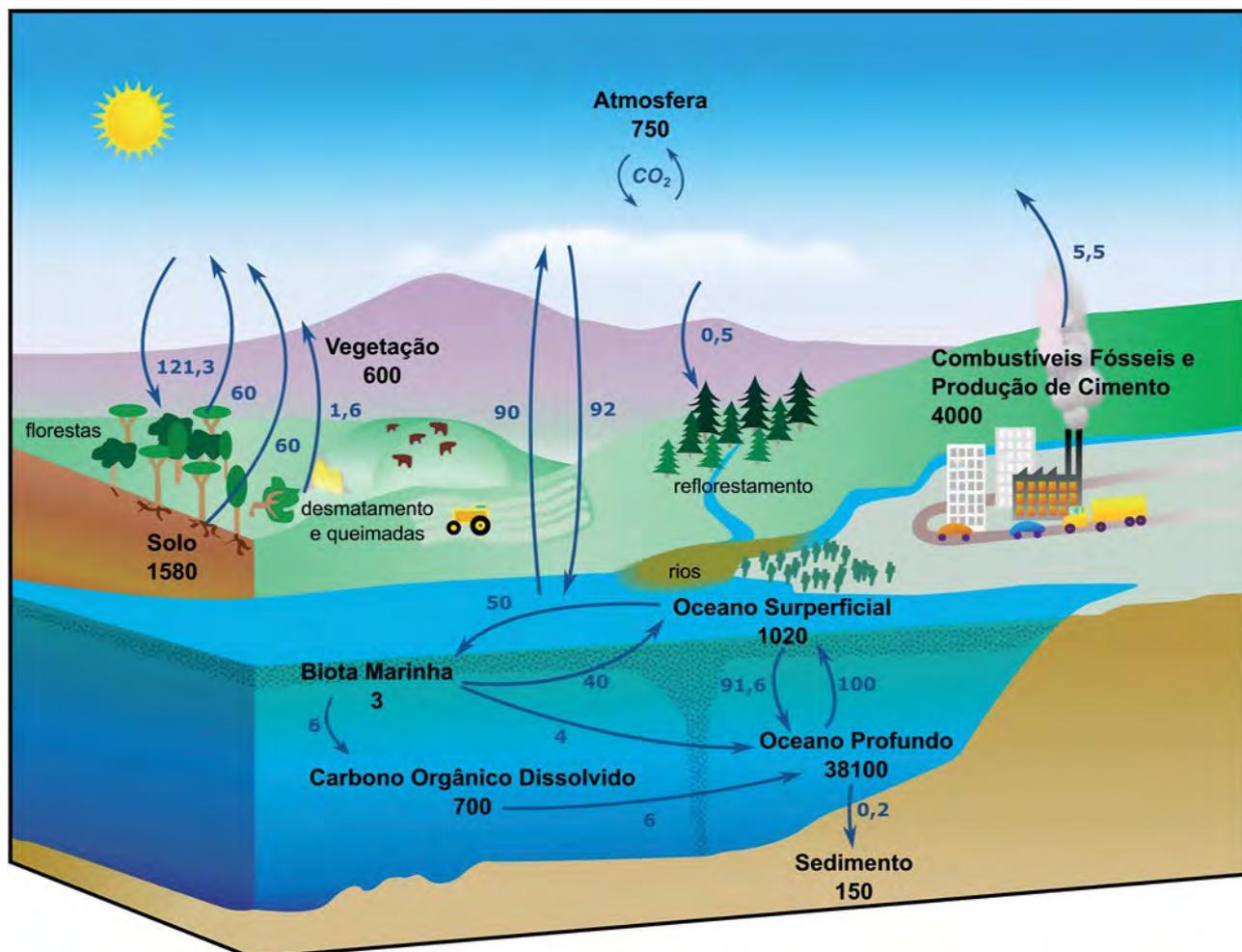
## 3. CICLOS BIOGEOQUÍMICOS MARINHOS

### 3.1. Carbono

O oceano é a principal reserva de carbono entre os reservatórios relevantes para o ciclo biogeoquímico desse elemento no planeta (Fig. 2.6). Ele armazena cerca de 39,8 trilhões de toneladas de carbono, sendo que mais de 98% desse total está na forma de carbono inorgânico dissolvido na água do mar. Esse carbono inorgânico faz parte de um conjunto de reações químicas que é conhecido como sistema carbonato marinho:



Conforme ilustrado acima, o sistema carbonato é formado por cinco reações químicas que conectam três reservatórios do ciclo biogeoquímico do carbono: atmosfera, coluna de água do oceano e sedimento marinho. A primeira reação representa os fluxos de dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ) entre a atmosfera -  $\text{CO}_2 (\text{g})$  - e a coluna de água do oceano -  $\text{CO}_2 (\text{aq})$ . Na segunda reação, o dióxido de carbono dissolvido combina-se com a molécula de água ( $\text{H}_2\text{O}$ ) para formar ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ). Devido ao pH levemente alcalino da água do mar ( $\sim 8,0$ ), o ácido carbônico dissocia-se em duas etapas. Na primeira, representada pela terceira reação do sistema carbonato, há formação de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{HCO}_3^-$  (bicarbonato). Na segunda etapa (quarta reação), há formação de íons  $\text{H}^+$  e  $\text{CO}_3^{2-}$  (carbonato). Por fim, na última reação do sistema, o íon carbonato pode reagir com o cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) dissolvido na água do mar para formar carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ). Por sua vez, este é um mineral -  $\text{CaCO}_3 (\text{s})$  - que tende a se depositar no sedimento marinho.



**Figura 2.6** Ciclo biogeoquímico do carbono no planeta. Os reservatórios e seus estoques de carbono estão representados em preto e negrito. Os fluxos anuais entre os reservatórios estão representados em azul. Estoques e fluxos estão expressos em bilhões de toneladas de carbono. **Adaptado** de <https://commons.wikimedia.org>.

As reações químicas do sistema carbonato podem se deslocar em ambos os sentidos, formando um conjunto bastante dinâmico que atua para minimizar as variações de pH no oceano. Assim, o pH da água do mar varia entre 7,8 e 8,2. Massas de água profundas e antigas são ricas em dióxido de carbono, apresentando pH mais baixo (7,8). Por outro lado, águas superficiais com elevada produção primária apresentam pH um pouco mais elevado (8,2). Estudos do sistema carbonato marinho são fundamentais para compreender importantes questões ambientais, como a acidificação do oceano e as mudanças climáticas globais.

A queima de combustíveis fósseis (petróleo, gás natural e carvão mineral) e a produção de cimento têm lançado anualmente 5,5 bilhões de toneladas de dióxido de carbono na atmosfera (Fig. 2.6). Para compensar isso, o oceano global absorve uma parte desse dióxido de carbono através das trocas de gases que ocorrem através da interface oceano-atmosfera. Na superfície do oceano, o dióxido de carbono (natural ou antrópico) é absorvido pelo fitoplâncton marinho e transformado em matéria orgânica pela reação da fotossíntese:



Assim, o carbono inorgânico dissolvido ( $\text{CO}_2$ ) é transformado em carbono orgânico particulado ( $\text{CH}_2\text{O}$ ) para constituir a matéria orgânica das células fitoplanctônicas. As relações tróficas entre produtores e consumidores retrabalham essa matéria orgânica na complexa teia alimentar marinha. Os organismos marinhos de diferentes níveis tróficos eventualmente liberam carbono orgânico (na forma dissolvida ou particulada) na água do mar a partir de suas excretas. Ao mesmo tempo, todos os organismos devolvem dióxido de carbono (isto é, carbono inorgânico dissolvido) para a coluna de água através da respiração:



É importante notar que a respiração é uma reação química inversa à fotossíntese (veja a comparação das duas reações químicas acima). Além da respiração de produtores e consumidores, as bactérias exercem um papel fundamental na reciclagem de carbono no oceano. Elas são responsáveis pela degradação dos restos mortais de todos os organismos, incluindo suas excretas. Esse papel ecológico exercido pelas bactérias é conhecido como alça microbiana e serve como elo de ligação entre os ciclos biogeoquímicos de diversos elementos (carbono, nitrogênio, fósforo, etc). A degradação da matéria orgânica também é um processo respiratório, ocorrendo conforme a reação química da respiração. Assim, as bactérias transformam carbono orgânico particulado (restos de organismos mortos) em carbono inorgânico dissolvido (dióxido de carbono).

Quase todo o carbono orgânico presente no oceano está na forma dissolvida (Fig. 2.6). Essa matéria orgânica é introduzida na coluna de água através do rompimento da membrana de organismos unicelulares (após sua morte), processos de exsudação de microorganismos vivos (por exemplo, bactérias e fitoplâncton), restos da alimentação do zooplâncton e dissolução de detritos orgânicos particulados na coluna de água. Essas moléculas orgânicas dissolvidas são tão pequenas que

não estão disponíveis como alimento para a maior parte dos organismos marinhos. Apenas o picoplâncton, que é basicamente constituído por organismos procariontes (por exemplo, bactérias e cianobactérias), consegue utilizar essa fonte de energia disponível na água do mar.

O oceano profundo está completamente inserido na zona afótica, que é a região do oceano onde a luz do sol não consegue penetrar. Assim, a produção de carbono orgânico através da fotossíntese está limitada às primeiras centenas de metros de profundidade. Isso faz com que os processos respiratórios de degradação da matéria orgânica sejam predominantes no oceano profundo, convertendo carbono orgânico (particulado e dissolvido) em carbono inorgânico dissolvido ( $\text{CO}_2$ ).

Além dos processos respiratórios, a baixa temperatura da água e a elevada pressão do oceano profundo contribuem para aumentar a solubilidade do carbonato de cálcio na água. Isso diminui o estado de saturação do carbonato de cálcio nas águas profundas do oceano global. Quando a saturação do carbonato de cálcio na água é inferior a 30%, a última reação do sistema carbonato é rapidamente deslocada para a esquerda. Próximo ao assoalho oceânico, esse fenômeno atua na dissolução do carbonato de cálcio depositado no sedimento. A partir de uma determinada profundidade (que varia dependendo do oceano), praticamente não são mais encontrados sedimentos carbonáticos no oceano. Tais sedimentos são conhecidos como vazas calcárias e a isóbata na qual essas vazas praticamente desaparecem do sedimento é conhecida como profundidade de compensação dos carbonatos. As vazas calcárias podem ser formadas por duas formas minerais de carbonato de cálcio: calcita (sistema cristalino trigonal) e aragonita (sistema cristalino ortorrômbico). Este segundo mineral é mais solúvel na água do mar.

Uma das consequências mais problemáticas do processo de acidificação da água do mar é que

a profundidade de saturação dos carbonatos tende a se tornar cada vez mais rasa. Quando a superfície do oceano tornar-se subsaturada em termos de carbonato de cálcio, os organismos que secretam estruturas de aragonita ou calcita sofrerão consequências negativas. Tais organismos incluem grupos planctônicos (cocolitoforídeos, foraminíferos e pterópodos) e bentônicos (por exemplo, corais, algas calcárias e equinodermos). Devido ao seu pequeno tamanho, os organismos do plâncton serão os primeiros a sentir os efeitos da corrosão de suas carapaças devido ao pH mais baixo da água do mar. Estima-se que a água superficial dos oceanos polares se tornará subsaturada em aragonita a partir da segunda metade do século XXI, podendo iniciar um processo de extinção de diversas espécies de pterópodos (pequenos moluscos planctônicos).

### 3.2. Nitrogênio

Nitrogênio é um nutriente essencial para a formação de aminoácidos e consequentemente das proteínas, enzimas e componentes estruturais das paredes celulares. O nitrogênio é o 15º elemento da Tabela Periódica, sendo que seu símbolo é N, o número atômico é 7 e o peso atômico é 14,0067. Existem unicamente dois isótopos estáveis do nitrogênio:  $^{14}\text{N}$  e  $^{15}\text{N}$ , sendo que o primeiro é mais abundante (99,634% do nitrogênio existente na natureza). Esses isótopos se comportam de forma distinta em reações químicas: o isótopo mais leve reage mais rapidamente que o pesado, mudando a razão entre esses isótopos no produto de uma reação. Tal processo é conhecido como fracionamento isotópico. A forma livre,  $\text{N}_2$ , é o gás mais abundante na atmosfera, representa um volume aproximado de 78% do total dos gases atmosféricos e não provoca qualquer problema ambiental porque é um gás inerte. O nitrogênio pode ser encontrado em vários estados de oxidação (5), apresentando o ciclo biogeoquímico mais complexo. Na natureza é encontrado no estado gasoso (**ex:** dinitrogênio, amônia, óxido nitroso) e

sólido (**ex:** nitrato de sódio). Pode estar na forma livre (dinitrogênio -  $\text{N}_2$ ) ou combinada ( $\text{NO}_x$ ,  $\text{NH}_x$ ), formando compostos orgânicos (**ex:** aminoácidos) e inorgânicos (**ex:** nitrato). As formas inorgânicas dissolvidas preferidas pelos vegetais aquáticos são amônio e nitrato. Os organismos procariontes (cianobactérias e outras bactérias) conseguem aproveitar a forma molecular gasosa ( $\text{N}_2$ ) e alguns organismos heterótrofos utilizam nitrogênio de compostos orgânicos (**ex:** ureia -  $(\text{NH}_2)_2\text{CO}$ ). O nitrogênio é o principal fator limitante da produção primária marinha, podendo, em alguns momentos, alternar essa função com o fósforo. O aumento dos aportes antrópicos de nitrogênio para os rios, em consequência das atividades agrícolas, industriais e urbanas, vem intensificando os processos de eutrofização estuarina, favorecendo o aparecimento e crescimento de espécies aquáticas de vegetais não desejadas e provocando mudanças na teia trófica e perdas da biodiversidade marinha. O nitrogênio chega até os estuários via fluxo fluvial, difusão atmosférica e fixação biológica. Nos estuários, é o nutriente que apresenta o ciclo biogeoquímico mais impactado pelas atividades antrópicas. Estudos indicam que a carga global lançada nos ecossistemas aquáticos tem duplicado desde o início da era industrial. O ciclo biogeoquímico é bastante complexo, apresenta duas etapas: uma no ambiente externo quando os processos de nitrificação e amonificação são realizados pelas atividades bacterianas; e a outra intracelular, quando acontece a transformação de amônio em radicais amins e aminoácidos durante a fotossíntese, passando para a teia trófica. Como resultado dos processos respiratórios, os compostos nitrogenados orgânicos (radicais amins e ureia) são devolvidos para o ambiente. As principais etapas do ciclo do nitrogênio são:

- > Amonificação
- > Nitrificação
- > Assimilação do nitrogênio
- > Desassimilação do nitrogênio
- > Redução de nitratos ou desnitrificação
- > Fixação de  $\text{N}_2$

O resultado da nitrificação é o composto nitrogenado mais oxidado, o nitrato, e é uma etapa essencialmente aeróbica. Durante a amonificação, os radicais amina são transformados em amônia (ou amônio) e nitrogênio molecular. As três formas inorgânicas principais são amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), cuja somatória é denominada de nitrogênio inorgânico dissolvido (NID). A nitrificação, etapa do ciclo do nitrogênio durante a qual as formas mais reduzidas de N são transformadas, pela ação bacteriana, em compostos nitrogenados mais oxidados, apresenta dois estágios. No primeiro acontece a transformação bacteriana (**ex:** gêneros *Nitrosomonas*, no solo e *Nitrosococcus*, no mar) de amônia e amônio para nitrito. No segundo estágio, o nitrito é transformado por bactérias (**ex:** gêneros *Nitrobacter*, no solo e *Nitrosococcus*, no mar) em nitrato. Estas reações são sequenciais, consomem  $\text{O}_2$  e são completadas rapidamente, motivo pelo qual as concentrações de nitrito são geralmente baixas na água, exceto em áreas muito poluídas. As bactérias responsáveis por essa transformação são conhecidas como nitrificantes e são estritamente aeróbicas, o que resulta em grande demanda de oxigênio dissolvido para completar a oxidação do nitrogênio. Sendo assim, é um processo que ocorre unicamente em condições aeróbicas. O nitrato é o produto final da oxidação do nitrogênio orgânico (processo exotérmico) e a forma mais estável dos compostos nitrogenados nos ecossistemas aquáticos (Macêdo et al., 2004). Em muitas áreas marinhas é considerado o nutriente que controla a produção primária local. A nitrificação é um passo crítico no ciclo biogeoquímico do nitrogênio. Esse pode ser perturbado pelas atividades antrópicas, aumentando a disponibilidade da amônia como resultado da degradação da matéria orgânica nitrogenada ou de aportes das atividades agrícolas pelo uso de nitrogênio como fertilizante. Durante a etapa de redução de nitrato no ciclo do nitrogênio, as formas mais oxidadas são transformadas, pela ação bacteriana, em compostos mais reduzidos, resultando em amônia, processo conhecido como redução desassimilatória de nitrato para

amônia. A desnitrificação pode acontecer tanto nos ecossistemas terrestres como marinhos. Esse processo ocorre em locais deficientes em oxigênio, como fundos estuarinos ricos em matéria orgânica e locais de baixa circulação ou renovação de água. Bactérias desnitrificadoras usam o nitrato como receptor de elétrons para oxidar a matéria orgânica anaerobicamente, liberando  $\text{NH}_3$ . De uma forma geral, o processo se desenvolve quando existe uma depleção do oxigênio ( $< 0,5 \text{ mL L}^{-1}$ ) e o nitrato se transforma na fonte primária de oxigênio para as bactérias, atuando como fonte substituta na coluna de água e nos sedimentos anóxicos. Isso ocorre quando o consumo de oxigênio no sistema é maior que o produzido (ou importado), e quando existe disponibilidade de uma quantidade suficiente de nitrato. Um novo processo denominado de oxidação anaeróbica de amônia – anammox, vem sendo adicionado ao ciclo do nitrogênio, no qual  $\text{N}_2$  é produzido por bactérias anaeróbicas através da reação de nitrito com amônio ( $\text{NO}_2^- + \text{NH}_4^+ \rightarrow \text{N}_2$ ).

### 3.3. Fósforo

O fósforo (do latim: *ilumina*) é o elemento químico de símbolo P, número atômico 15 e massa atômica igual a 31. Está situado na Tabela Periódica entre o silício (Si) e o enxofre (S).

Nos ecossistemas aquáticos o fósforo é encontrado predominante na forma de fosfato, que é aportado principalmente como produto da erosão natural das rochas fosfáticas. Entra nos rios e córregos através da lixiviação e dissolução a partir do solo e rochas, sendo depois transportado para os estuários. Ligado a quatro oxigênios, forma o íon ortofosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) que é o composto mais oxidado e estável. Na água do mar, a fração mais abundante (79%) é representada pela espécie  $\text{HPO}_4^{2-}$ . Também pode ser encontrado em compostos orgânicos e estar combinado com os íons ferro, cálcio (apatita) ou magnésio. O ciclo do fósforo é muito mais simples que o ciclo do nitrogênio, isso em consequência de o fósforo não apresentar uma fase gasosa,

apresentar um único estado de oxidação e sofrer menos transformações biológicas. É também utilizado como fertilizante nas atividades agrícolas, poluindo os diferentes corpos aquáticos, além dos aportes via efluentes domésticos e industriais, motivo pelo qual é utilizado como um indicador químico na saúde dos estuários. Essencial para o desenvolvimento dos produtores primários durante a fotossíntese, é transformado a partir do fosfato em nucleotídeos (ATP, ADP), fosfolípidios e ácidos nucleicos (DNA, RNA). O fósforo entra na teia trófica via consumidores primários, sendo essencial para a vida aquática. A dinâmica e a baixa profundidade das áreas estuarinas permitem que os processos de regeneração da matéria orgânica, trocas iônicas e ressuspensão de sedimentos mantenham elevados os teores do fosfato dissolvido biodisponível na coluna de água. Nos ecossistemas costeiros, o excesso de fosfatos resulta em uma superfertilização, o que em condições adequadas de luz intensifica os processos de eutrofização estuarina, resultando em grande biomassa vegetal e graves danos ambientais. As formas encontradas nos ambientes aquáticos são frequentemente definidas como fósforo inorgânico dissolvido (PID), fósforo orgânico dissolvido (POD) e fósforo orgânico particulado (POP). A primeira forma é absorvida pelos vegetais aquáticos durante a fotossíntese. O PID é muito reativo, formando complexos com alguns metais, como ferro e manganês (óxidos e hidróxidos), que precipitam em condições aeróbicas. Eles podem retornar à forma dissolvida quando as condições redox se tornam suficientemente reduzidas. A alta carga iônica desse ânion permite que seja adsorvido na superfície de partículas em suspensão, como argilas e detritos orgânicos que atuam como cátions. Esses processos de sorção-liberação formam um mecanismo também para o PID nos ambientes estuarinos. Em elevadas concentrações de PID, o fosfato se adsorve nas partículas, enquanto baixas concentrações de PID favorecem sua liberação para o meio aquoso, mantendo sempre uma biodisponibilidade de PID e não se transformando em nutriente limitante.

As formas dissolvidas e particuladas dependem do seu tamanho. A fração que passa por um filtro com 0,45 µm de porosidade é a fração dissolvida. Devido a sua reatividade, pode mudar de uma fração para outra bastante rápido. Os detergentes utilizam fosfatos na sua composição química, motivo pelo qual os efluentes domésticos transportam uma grande quantidade desse nutriente para os ecossistemas aquáticos costeiros.

### 3.4. Relação N:P

A composição da matéria orgânica marinha demanda uma quantidade balanceada de carbono, nitrogênio e fósforo para a constituição das moléculas vitais dos seres vivos. Muitas vezes, a concentração de um nutriente quando disponível em quantidade relativa muito menor que a requerida durante a fotossíntese, atua como fator limitante da produção primária.

Como observado por Redfield et al. (1963), a relação química estequiométrica da matéria orgânica marinha fitoplanctônica é assim descrita:



Desta forma, uma alteração na biodisponibilidade desses elementos implica na limitação do processo de produção de matéria orgânica marinha (Libes, 2009). A representação da reação para a oxidação da matéria orgânica (respiração) é a seguinte:



A produção de 1 átomo de fósforo, 16 de nitrogênio e 106 de carbono provoca o consumo de 138 moles de oxigênio molecular dissolvido. Pelo fato do carbono ser abundante no meio marinho (carbonato, bicarbonato, dióxido de carbono), dificilmente irá atuar como fator limitante. Sendo assim, a temperatura, a luz e a razão dos nutrientes N:P na forma assimilável são os principais fatores que influenciam a produção primária no meio marinho.

O nitrogênio é considerado o nutriente limitante em águas costeiras e oceânicas (Glibert, 1988, Metzler et al., 1997; Flores Montes et al., 2009b), por ter uma demanda maior e apresentar uma depleção mais rápida em relação aos outros nutrientes. Sua requisição é mais importante e apresenta um ciclo biogeoquímico mais complexo que o do fósforo, estando presente em menores concentrações que as biodemandas (Burford & Rothlisberg, 1999). Uma oscilação entre a limitação pelo nitrogênio ou pelo fósforo ocorre frequentemente nas áreas costeiras, principalmente sob influência de aportes fluviais, em decorrência de aportes naturais nos períodos chuvosos ou pela influência antrópica em áreas próximas a polos industriais ou urbanos.

A relação N:P das águas do Oceano Atlântico varia de 16:1 na superfície, para 15:1 nas águas profundas, devido ao aumento na concentração do fosfato dissolvido (Millero, 2006). Resultados de diferentes pesquisas relataram que a relação N:P de águas de ressurgência é geralmente menor que 16:1. Isto foi observado em regiões de ressurgência da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma continental ao largo de Ubatuba (23°S), quando foram registrados valores próximos a 16:1 (Braga & Muller, 1998).

Em áreas com processos advectivos, vórtices e outros, com substituição de massas de águas é pouco provável que o nitrogênio venha a limitar a produção primária líquida (Smith, 1984; Pastor et al., 2008). Nas zonas costeiras essas proporções são alteradas pelos diferentes tipos de aportes entre as formas nitrogenadas e a forma fosfatada, dependendo da região.

### 3.5. Silício reativo dissolvido

Os sais de silício são de grande importância no ecossistema aquático do ponto de vista biológico. Apesar de não formar compostos orgânicos, seu aporte terrestre a partir do sedimento é representativo, sendo assimilável a sua forma

inorgânica dissolvida. O silício reativo dissolvido, apesar de não entrar no ciclo da matéria orgânica, é um componente importante na composição das carapaças de diatomáceas, silicoflagelados e exoesqueleto de outros organismos, como espículas de espongiários. A assimilação de silício alterna períodos de maior ou menor consumo de acordo com crescimento populacional desses organismos.

O silício reativo dissolvido está presente nas águas fluviais, principalmente como ácido ortossilícico, e deriva principalmente da desagregação de minerais de silicato e aluminossilicato. O silício também se encontra em uma variedade de formas particuladas, as quais incluem minerais (**ex:** quartzo, aluminossilicatos) e material biológico (**ex:** opala, carapaças de diatomáceas).

A forma predominante de silício reativo dissolvido presente nas águas marinhas é  $\text{Si(OH)}_4$ , podendo também ser encontrado na forma de  $\text{SiO}_2$ .

Esse nutriente apresenta grande variação de suas concentrações na camada superficial oceânica tropical, devido a influências de diversos fenômenos físicos, como fluxos horizontais e verticais de massas de água. No período chuvoso, quando há um aumento dos aportes continentais para a área costeira, as concentrações desse nutriente aumentam de forma diretamente proporcional ao volume da descarga fluvial.

O silício reativo dissolvido é assimilado pelas diatomáceas em uma proporção aproximada a do nitrogênio, porém a utilização do silicato está muito associada às formas simples ou mais elaboradas das carapaças das diversas espécies de diatomáceas. Após a morte do organismo, o silício retorna à solução através de lentos processos físico-químicos de dissolução. Diferentes pesquisadores fazem referência ao modelo de Redfield incluindo o silício reativo dissolvido na equação, ficando a relação assim distribuída: 16N : 15Si : 1P. (Flores Montes et al., 2002).

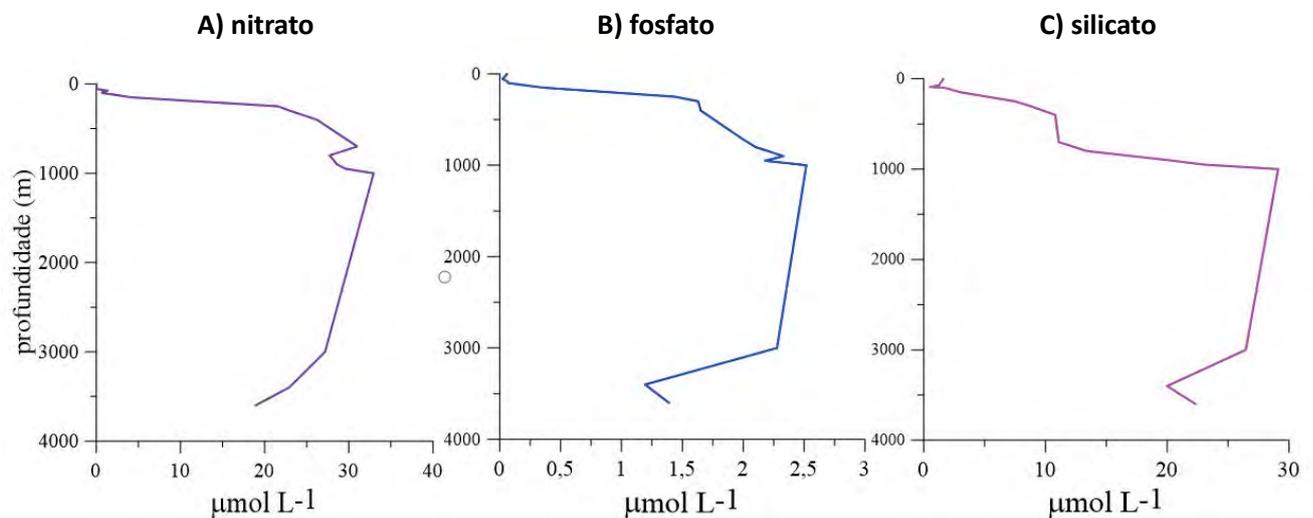
### 3.6. Nutrientes dissolvidos no Atlântico Sul

A distribuição dos nutrientes dissolvidos nas regiões tropical e subtropical do Atlântico Sul apresenta dois padrões definidos: um superficial, com pequenas variações, e outro vertical, com um gradiente positivo a partir da camada de mistura. Essas regiões apresentam uma termoclina permanente que começa aproximadamente a partir da base da camada fótica, formando uma barreira física que restringe o transporte advectivo dos nutrientes que viriam a substituir aqueles consumidos pelo fitoplâncton na camada superficial (Costa, 1991; Medeiros et al., 1999, Braga & Niencheski, 2006, Macêdo et al., 2009 e Flores Montes et al., 2009a). Nas regiões Sudeste e Sul, a presença de ressurgências sazonais provoca um considerável aumento nas concentrações desses nutrientes, aumentando a produtividade dessas áreas (Braga & Niencheski, 2006).

Existem assim, três importantes zonas com diferentes concentrações de nutrientes:

- i) uma zona fótica, com baixos teores, onde acontecem os processos fotossintéticos;
- ii) uma zona de mistura onde os nutrientes começam a ser regenerados, formando a nutriclina; e
- iii) uma zona profunda, onde as massas de água circulam com diferentes concentrações de nutrientes dependentes da origem de cada uma, acentuando a nutriclina. Isso resulta em camadas limitadas pela luz e camadas limitadas pelos nutrientes, em consequência da presença de uma termoclina permanente.

A distribuição vertical do nitrato nas áreas tropicais apresenta baixas concentrações na camada superficial ( $< 0,05 \mu\text{mol L}^{-1}$ ), com rápido aumento a partir da base da camada fótica, apresentando valor máximo entre 500 e 1.000 m de profundidade. A partir deste ponto, a nitraclina apresenta uma pequena inversão dos valores até o fundo oceânico. A nitraclina varia de oceano para oceano, no Atlântico as concentrações podem apresentar valores de até  $30 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Fig. 2.7a), porém ainda inferiores quando comparados com as concentrações do Oceano Pacífico (Tab. 2.2).



**Figura 2.7** Variação vertical média do nitrito (A), do fosfato (B) e do silicato (C) no Atlântico Sul (entre  $6^\circ$  e  $8^\circ$  S).

**Fonte** Flores Montes (2003).

No Atlântico Sul subtropical é observada uma profundidade bem definida de concentração máxima de nitrato, exatamente abaixo da camada de mínimo de oxigênio dissolvido, aproximadamente entre 400 e 800 m de profundidade, com valores próximos de  $32 \mu\text{mol L}^{-1}$  (Grasshoff et al., 1983).

É importante registrar que os valores de nitrato são mais importantes em águas oceânicas em relação aos de nitrogênio amoniacal total e nitrito, que são formas menos estáveis de nitrogênio inorgânico. Máximos de nitrito podem ocorrer em dois momentos: junto à profundidade de máxima oxidação do nitrogênio amoniacal gerado pela degradação da matéria orgânica e junto à redução do nitrato que ocorre associada ao mínimo de oxigênio.

A distribuição vertical do fosfato é semelhante àquela do nitrato, variando de concentrações  $< 0,02 \mu\text{mol L}^{-1}$  na camada fótica até  $2 \mu\text{mol L}^{-1}$  no Atlântico profundo (Fig. 2.7b).

A distribuição vertical do silício reativo dissolvido, diferentemente dos outros nutrientes, apresenta um aumento gradativo desde a superfície até o fundo oceânico, variando de  $1 \mu\text{mol L}^{-1}$  até  $30 \mu\text{mol L}^{-1}$  no Atlântico Sul (Fig. 2.7c).

**Tabela 2.2** Relação média das concentrações dos principais nutrientes nas regiões profundas dos oceanos Atlântico e Pacífico. **Fonte** Millero (2013).

Nutriente	O. Pacífico / O. Atlântico
Nitrato	2
Fosfato	2
Carbono	3
Silicato	5

### 3.7. Elementos-traço

Os elementos-traço são aqueles elementos cuja concentração na água do mar é inferior a  $0,1 \mu\text{mol kg}^{-1}$ . Os micronutrientes fazem parte

desse grupo e são essenciais para os organismos autótrofos, sendo consumidos em pequenas quantidades. De uma forma geral, não são fatores limitantes para o desenvolvimento desses organismos. Na relação dos micronutrientes estão ferro, cobalto, cromo, cobre, iodo, manganês, selênio, zinco e molibdênio. O elemento ferro tem sido indicado como limitador da produção primária em áreas com elevados teores de nutrientes (nitrogênio e fósforo) e baixos teores de clorofila-*a*. Tais áreas são conhecidas como ANBC (alto nutriente, baixa clorofila). Outros elementos-traço são importantes nos processos de oxi-redução (**ex:** Mn, Fe, Cr, Mo) ou formam depósitos de importância comercial no sedimento marinho (**ex:** nódulos de Mn, Cu, Co, Ni, Cd). Alguns têm origem nas atividades antrópicas e são indicadores de poluição (**ex:** Pb, Pu, Ag, Cu, Hg).

## 4. POLUIÇÃO MARINHA

### 4.1. Componentes orgânicos

Poluentes orgânicos persistentes (POPs) são compostos orgânicos sintetizados intencionalmente pelo homem ou gerados como subproduto de atividades antrópicas (por exemplo, incineração de plásticos e síntese de solventes orgânicos). Esses compostos são classificados como persistentes porque sofrem degradação muito lentamente. Por exemplo, a meia vida de alguns POPs no ambiente pode chegar a 10 anos. Na prática, isso significa que o desaparecimento de um desses compostos na natureza (isto é, degradação de 99,9% da quantidade inicialmente lançada) levaria um século. Além da persistência ambiental, os POPs são facilmente dispersados após sua introdução na natureza, sendo transportados por longas distâncias pelas correntes de ar na atmosfera e/ou pelas correntes marinhas no oceano. Assim, eles têm sido encontrados nos locais mais inóspitos do planeta, como o continente gelado da Antártica e a Fossa das Marianas no Oceano Pacífico.

Os POPs são tóxicos para diversos grupos de organismos, incluindo invertebrados, peixes, aves, mamíferos e o próprio homem. Entre os efeitos negativos que têm sido associados aos POPs pode-se destacar:

- 1) desenvolvimento de câncer;
- 2) doenças neurológicas;
- 3) doenças hepáticas;
- 4) baixa resistência imunológica;
- 5) desregulação hormonal;
- 6) baixa fertilidade; e
- 7) má-formação fetal.

Além da acumulação dos POPs em organismos vivos, esses compostos também são biomagnificados ao longo da cadeia trófica. Assim, os predadores de topo de cadeia (**ex:** tubarões, golfinhos e baleias) são aqueles que acumulam as maiores concentrações de POPs em seus tecidos. Os mamíferos marinhos tendem a acumular esses compostos em níveis mais altos do que os peixes. Isso ocorre devido às diferenças fisiológicas no sistema respiratório desses dois grupos. Os peixes conseguem eliminar parte de sua carga de contaminantes através das brânquias. Por serem basicamente hidrofóbicos, os POPs tendem a se acumular em tecidos ricos em lipídios. Uma consequência disso é que as fêmeas de mamíferos marinhos transferem parte de sua carga de contaminantes para os filhotes durante a gestação e principalmente através da amamentação.

A lista de POPs possui mais de 30 nomes, que representam um composto específico ou um grupo de compostos químicos. Essa lista pode ser dividida em duas grandes classes:

- 1) os contaminantes que representam um legado ambiental
- 2) os contaminantes emergentes.

O primeiro grupo é formado por POPs que foram produzidos e lançados no ambiente em grandes quantidades na segunda metade do século XX, como os pesticidas organoclorados (**ex:** DDTs, HCHs, endosulfan, aldrin e endrin) e as bifenilas policloradas (PCBs). Os pesticidas foram amplamente empregados na agricultura e em campanhas de saúde pública, enquanto os PCBs foram usados na indústria química (principalmente como fluidos isolantes em transformadores e capacitores). A segunda grande classe de POPs (contaminantes emergentes) é formada por compostos de uso mais recente e sobre os quais ainda não há muitas informações em amostras ambientais. Entre eles destacam-se compostos organobromados (PBDEs - difenilas éter polibromadas) e organofluorados (PFOS - ácido perfluorooctanossulfônico e seus derivados). Ambos foram empregados na indústria química, sendo os PBDEs utilizados como retardantes de chama e os PFOS como antiaderentes. Esses compostos foram aplicados em diversos materiais existentes nos ambientes doméstico e corporativo, mas pouco se sabe sobre seu destino ambiental e as implicações tóxicas para organismos vivos.

Entre os contaminantes emergentes, embora não sejam classificados como POPs, também estão os compostos utilizados pela indústria farmacêutica e cosmética. Contaminantes de origem farmacêutica incluem antibióticos, antidepressivos e hormônios femininos prescritos como contraceptivos e/ou em terapias de reposição hormonal. Os contaminantes usados em produtos de higiene e uso pessoal cosmético incluem fragrâncias e aditivos de filtros de proteção contra a radiação solar. Alguns desses compostos têm a capacidade de interagir com o sistema endócrino de mamíferos e outros organismos. Portanto, são também chamados de desreguladores endócrinos. Geralmente apresentam alto coeficiente de partição octanol-água ( $K_{ow}$ ), tendo como destino final no ambiente marinho os sedimentos e/ou tecidos biológicos ricos em lipídio. Vários estudos têm comprovado a presença desses compostos em sistemas estuarinos,

reportando alguns efeitos nocivos aos organismos locais. Tais efeitos incluem peixes com condições de intersexo (isto é, sendo parte macho e parte fêmea), diminuição da fertilidade, alteração na razão macho/fêmea da prole e comprometimento da função imunológica. Em humanos, a exposição a altas doses desses compostos pode estar relacionada à formação de câncer, ovários policísticos, disfunção da tireoide e do sistema reprodutivo, entre outros efeitos.

Dentro da classe dos compostos orgânicos, ainda há o grupo dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), que são reconhecidos mundialmente por seu potencial carcinogênico, mutagênico e, mais recentemente, também como interferentes do sistema endócrino. Os HPAs perfazem uma importante fração do petróleo (7-10% do óleo cru) mas também podem ser produzidos naturalmente, embora em concentrações muito baixas. Podem chegar ao ambiente estuarino/marinho através da introdução direta do petróleo e/ou seus derivados ou por processos de combustão da matéria orgânica, principalmente grandes queimadas, sejam elas intencionais (**ex:** queima da palha da cana-de-açúcar) ou naturais (**ex:** incêndios florestais).

Durante muitas décadas, compostos a base de estanho ligados a cadeias carbônicas (organoestânicos) foram utilizados como aditivos biocidas na formulação de tintas antiincrustantes para a proteção de cascos de embarcações e estruturas metálicas submersas. Dentre eles, o tributilestanho (TBT) provou ser muito eficiente, mas a história mostrou também ser um dos mais tóxicos. O efeito mais significativo é a interação com o sistema endócrino de organismos marinhos, especialmente moluscos gastrópodes, onde fêmeas podem desenvolver vaso deferente e pênis - fenômeno conhecido como imposex. Em estágios avançados, as fêmeas podem apresentar uma total obstrução do oviducto palial, tornando-se estéreis. Em 2008, o uso do TBT como aditivo em tintas antiincrustantes foi mundialmente banido (IMO, 2008), mas estudos recentes reportam que ainda

é encontrado em ambientes costeiros de alguns países, incluindo o Brasil.

#### 4.2. Contaminação orgânica no Nordeste brasileiro

Vários estudos têm sido realizados no litoral nordestino do Brasil, buscando investigar a contaminação por contaminantes orgânicos em diversas matrizes ambientais, principalmente no litoral pernambucano. O sistema estuarino do Rio Capibaribe (SERC), localizado na porção central do estado de Pernambuco, abriga o Porto de Recife e é formado por vários afluentes que atravessam a Região Metropolitana do Recife (RMR), trazendo efluentes domésticos e/ou industriais geralmente lançados *in natura* ou sem tratamento adequado. Esta região apresentou os maiores índices de contaminação por HPAs, PCBs, pesticidas organoclorados e compostos organoestânicos, em relação aos demais sistemas costeiros de Pernambuco (Cabral, 2015; Maciel et al., 2015a; 2016; 2018; Yogui et al., 2018). Efeitos subletais foram observados no copépodo *Tisbe biminiensis* quando exposto a sedimentos coletados nessa região (Maciel et al., 2015b). Por outro lado, o consumo de cavala (*Scomberomorus cavalla*) - pescado comercializado na RMR - não apresenta riscos à saúde da população local no que diz respeito à presença de compostos organoclorados (Miranda & Yogui, 2016). Em contraposição, o Canal de Santa Cruz, no litoral norte de Pernambuco, apresentou os menores índices de contaminação por HPAs e compostos organoclorados (Santos, 2015; Silva, 2015). Estudos realizados na região do Porto de Suape também revelaram baixos níveis de contaminação por HPAs, organoclorados - OCs e organoestânicos, quando comparados ao SERC (Lemos, 2013; Lemos et al., 2014; Maciel et al., 2018; Yogui et al., 2018). Apesar de abrigar um complexo industrial em plena expansão com fontes potenciais de contaminação, a área é favorecida pela hidrodinâmica local que atua na dispersão dos prováveis contaminantes (Zanardi-Lamardo et al., 2018).

Sedimentos coletados em locais de caranguejos do mangue, à beira do Rio Potengi (Rio Grande do Norte), apresentaram contaminação moderada por HPAs e estas concentrações foram positivamente correlacionadas com alterações genéticas observadas na hemolinfa desses animais (Cabral, 2017). No Ceará, as concentrações de HPAs nos sedimentos das regiões portuárias de Mucuripe e Pecém (Buruagem et al., 2016) foram relativamente menores do que os níveis reportados para as regiões do Porto de Suape e Porto de Recife (Lemos, 2013; Maciel et al., 2015a). (Ver capítulo: [Poluição aquática.](#))

## 5. PERSPECTIVAS FUTURAS

Os oceanos vêm sofrendo mudanças com o aumento das concentrações dos gases de efeito estufa na atmosfera, principalmente as emissões de dióxido de carbono. As consequências incluem a elevação da temperatura da atmosfera e a elevação da taxa de transferência de calor para a superfície oceânica, provocando menor fluxo de gases para a coluna de água (principalmente oxigênio). O resultado é um processo denominado desoxigenação oceânica, pelo qual vem aumentando as áreas marinhas com concentrações deficitárias em oxigênio dissolvido. Este fato afetará os processos de oxidação química, bem como aumento da atividade bacteriana anaeróbica, produzindo compostos reduzidos como metano, gás sulfídrico e amônia, que apresentam elevado grau de toxicidade. Outra consequência do aumento da pressão parcial de  $\text{CO}_2$  na atmosfera é o aumento da taxa de transferência de  $\text{CO}_2$  para a superfície oceânica, resultando no desequilíbrio do sistema carbonato e no processo denominado acidificação marinha. Neste processo, o percentual de carbonato ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) na água diminui, aumentando o percentual de bicarbonato ( $\text{HCO}_3^-$ ) e ácido carbônico ( $\text{H}_2\text{CO}_3$ ) dissolvidos na água do mar. O desequilíbrio nesse processo pode também ser provocado

pelo aumento da carga de resíduos sólidos e líquidos ricos em matéria orgânica que, através da mineralização bacteriana, são transformados em  $\text{CO}_2$ . O impacto direto desse desequilíbrio será nas estruturas calcárias de organismos marinhos, resultando na perda de biodiversidade e degradação ambiental. Outra perspectiva é o aumento dos processos de eutrofização em áreas costeiras e estuários, devido ao aumento de resíduos orgânicos e inorgânicos, ricos em matéria orgânica e nutrientes, resultantes das atividades domésticas, industriais e agropecuárias. Em consequência das emissões dos gases de efeito estufa, ainda é esperado um aumento na temperatura da água no oceano profundo para níveis acima da sua densidade máxima ( $4^\circ\text{C}$ ). Isso resultará em uma expansão da coluna de água no oceano, aumentando a área de contato com os continentes e provavelmente a quantidade de partículas em suspensão (de natureza orgânica ou inorgânica, inertes ou reativas). Isso quer dizer que algumas características químicas do oceano, como a salinidade, deverão continuar com pouca variação, enquanto a concentração de gases poderá diminuir e outros elementos dissolvidos ou em suspensão poderão aumentar sua concentração na água do mar. Por outro lado, a ciência vem mostrando que uma grande variedade de compostos químicos utilizados pelo homem, estão sendo acumulados no ambiente marinho e causando efeitos adversos na biota. Agora cabe à sociedade evitar o consumo indiscriminado de produtos que contenham esses contaminantes marinhos e, principalmente, conscientizar-se sobre sua destinação final, promovendo a reciclagem e/ou descarte adequado desses produtos. Tais interferências antrópicas podem afetar de forma drástica a vida marinha. É esse o legado que a atual geração vai deixar para as próximas gerações?

## REFERÊNCIAS

- BRAGA, E. S.; MULLER, T. J. **Observation of regeneration of nitrate, phosphate and silicate during upwelling off Ubatuba, Brazil**, 23<sup>o</sup>S. Cont. Shelf Res. 18: p. 915-922. 1998.
- BRAGA, E. S.; NIENCHESKI, L. F. H. **Composição das massas de água e seus potenciais produtivos na área entre o Cabo de São Tomé (RJ) e o Chuí (RS)**. In: O Ambiente Oceanográfico da Plataforma Continental e do talude na Região Sudeste-Sul do Brasil, ROSSI-WONGTSCHOWSKI C. L. D. B. & MADUREIRA, L. S. (eds). p. 161-218, 2006.
- BURFORD, M. A.; ROTHLIBERG, P. C. **Factors limiting phytoplankton production in a tropical continental shelf ecosystem**. Est. Coast. Shelf Sci. Amsterdam, v. 48, p. 541-549. 1999.
- BURUAEM, L. M.; TANIGUCHI, S.; SASAKI, S. T.; BÍCEGO, M. C.; COSTA-LOTUFO, L. V.; ABESSA, D. M. S. **Hydrocarbons in surface sediments of harbor areas in a tropical region (Ceará state, northeast Brazil)**. Environmental Earth Sciences (Internet), v. 75, p. 642, 2016.
- CABRAL, C. B. **Variabilidade longitudinal e mareal das concentrações de hidrocarbonetos de petróleo no estuário do Rio Capibaribe**. Monografia de Graduação, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. 50 p.
- CABRAL, C. B. **Avaliação de danos genômicos em caranguejo-Uçá (Ucides cordatus) expostos a sedimentos contaminados por hidrocarbonetos policíclicos aromáticos no Estuário do Rio Potengi (Natal/RN)**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2017. 78 p.
- COSTA, K. M. P. **Hidrologia e Biomassa Primária da Região Nordeste do Brasil entre as latitudes de 8<sup>o</sup>00'00" e 2<sup>o</sup>44'30"S e as longitudes de 35<sup>o</sup>56'30" e 31<sup>o</sup>48'00" W**. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Universidade Federal de Recife, p. 217. Recife-PE, 1992.
- FLORES MONTES, M. J. **Fatores que influenciam na produtividade dos oceanos: a importância do fluxo de difusão dos nutrientes para a biomassa do fitoplâncton na região oceânica do nordeste brasileiro**. Tese (Doutorado em Oceanografia Abiótica), Recife, UFPE, 2003. 179 p.
- FLORES MONTES, M. J.; MACÊDO, S. J.; KOENING, L. **N:Si:P ratio in the Santa Cruz Channel, Itamaracá-PE: a nyctemeral variation**. Braz. Arch. Biol. Technol., Curitiba, v. 45, n. 2, p. 115-124. 2002.
- FLORES MONTES, M. J.; MACÊDO, S. J.; MUNIZ, K. **Estrutura Hidrodinâmica da Região Oceânica do Nordeste do Brasil**. In: Meteorologia e Sensoriamento Remoto, Oceanografia Física, Oceanografia Química e Oceanografia Geológica. Fortaleza. Org. FÁBIO V. HAZIN. Ed. Martins & Cordeiro (Programa Revizee-Score Nordeste). p. 192-216. 2009a.
- FLORES MONTES, M. J.; MELO, G.; MOURA, G. **Relação entre a Distribuição de Nutrientes Dissolvidos e a Biomassa Primária na Zona Econômica Exclusiva (ZEE) do Nordeste do Brasil**. In: Meteorologia e Sensoriamento Remoto, Oceanografia Física, Oceanografia Química e Oceanografia Geológica. Fortaleza. Org. FÁBIO V. HAZIN. Ed. Martins & Cordeiro (Programa Revizee-Score Nordeste). p. 137-157. 2009b.
- GLIBERT, P. M. **Primary productivity and pelagic nitrogen cycling**, pp. 3-31. In: BLACKBURN, T.H. AND SØRENSEN, J.(EDS.), Nitrogen Cycling In Coastal, Marine Environments. SCOPE, Wiley. 1988.
- GRASSHOFF, K.; ERHARDT, M.; KREMLING, K. **Methods of seawater analysis**. 2nd editon, Verlag Chemie, 419 p. 1983.
- IMO, 2008. **Summary of the status of conventions as at 31 May 2007**, <http://www.imo.org/>. International Maritime Organization, United Kingdom.
- LEMOS, R. T. O. **Origem e distribuição de hidrocarbonetos no estuário de Suape - PE**. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. 72 p.
- LEMOS, R. T. O.; CARVALHO, P. S. M.; ZANARDI-LAMARDO, E. **Petroleum hydrocarbons in water from a Brazilian tropical estuary facing industrial and port development**. Mar. Pol. Bull., 82: p. 183-188. 2014.
- LIBES, S. **Introduction to Marine Biogeochemistry**. Academic Press. 2nd. Ed. 2009. 909 p.
- MACIEL, D. C.; CASTRO, I. B.; SOUZA, J. R. B.; YOGUI, G. T.; FILLMANN, G.; ZANARDI-LAMARDO, E. **Assessment of organotins and imposex in two estuaries of the northeastern Brazilian coast**. Mar. Pol. Bull., 126: p. 473-478. 2018.
- MACEDO, S. J.; MUNIZ, K.; FLORES MONTES, M. J. **Hidrologia da região costeira e plataforma continental do Estado de Pernambuco**. In: Oceanografia um cenário tropical. Recife. Org. ESKINAZI-LEÇA, E.; NEUMANN-LEITÃO, S.; COSTA, M. Ed. Bargaço, p. 255-286. 2004.

- MACEDO, S. J.; FLORES MONTES, M. J.; MUNIZ, K. **Condições Hidrológicas da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil. In: Meteorologia e Sensoriamento Remoto, Oceanografia Física, Oceanografia Química e Oceanografia Geológica.** Fortaleza. Org. FÁBIO V. HAZIN. Ed. Martins & Cordeiro (Programa Revizee-Score Nordeste). p. 104-136. 2009.
- MACIEL, D. C.; SOUZA, J. R. B.; TANIGUCHI, S.; BÍCEGO, M. C.; ZANARDI-LAMARDO, E. **Sources and distribution of polycyclic aromatic hydrocarbons in an urbanized tropical estuary and adjacent shelf, Northeast of Brazil.** Mar. Pol. Bull., 101: 429-433. 2015.
- MACIEL, D. C.; SOUZA, J. R. B.; TANIGUCHI, S.; BÍCEGO, M. C.; SCHETTINI, C. A. F.; ZANARDI-LAMARDO, E. **Hydrocarbons in sediments along a tropical estuary-shelf transition area: sources and spatial distribution.** Mar. Pol. Bull., 113: p. 566-571. 2016.
- MEDEIROS, C.; MACEDO, S. J.; FEITOSA, F. A.; KOENING, M. L. **Hydrography and phytoplankton biomass and abundance of North-East Brazilian waters.** Arch. Fish. Mar. Res., [S.l.], v. 47, n. 2-3, p. 133-151. 1999.
- METZLER, P. M.; GLIBERT, P. M.; GAETA, S. A. **New and regenerated production in the South Atlantic off Brazil.** Deep-Sea Res. I. Oxford, v. 44, n. 3, p. 363-384, 1997.
- MILLERO, F. J. **Chemical Oceanography.** Boca Raton: CRC Press, 4th Ed. 2013. 571 p.
- REDFIELD, A. C., KETCHUM, B. H. & RICHARDS, F. A. **The influence of organisms to the composition of phytoplankton.** In: James Memorial, University of London, Interscience, v.2, p. 26-77. 1963.
- MIRANDA, D. A.; YOGUI, G. T. **Polychlorinated biphenyls and chlorinated pesticides in king mackerel caught off the coast of Pernambuco, northeastern Brazil: occurrence, contaminant profile, biological parameters and human intake.** Sci. Total Environ., v. 569-570: p. 1510-1516. 2016.
- PASTOR, M. V.; PELEGRI, J. L.; HERNÁNDEZ-GUERRA, A.; FONT, J.; SALAT, J.; EMELIANOV, M. **Water and nutrients fluxes off Northwest Africa.** Cont. Shelf Res., Amsterdam, v. 28, p. 915-936. 2008.
- SANTOS, R. H. A. **Avaliação dos níveis de hidrocarbonetos na água e sedimentos do Canal de Santa Cruz - PE.** Monografia de Graduação. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015. 52 p.
- SILVA, AMANDA T. A. **Pesticidas organoclorados e bifenilas policloradas no Canal de Santa Cruz, Pernambuco.** Monografia de Graduação, Faculdade Frassinetti do Recife, Recife, 2015. 37 p.
- SMITH, S. V. **Phosphorus versus nitrogen limitation in the marine environment.** Limn. and Ocean., Lawrence, v. 29, n. 6, p. 1149-1160, 1984.
- UNESCO. **International Oceanographic Table.** Wormly, n. 2, 1973. 141 p.
- YOGUI, G. T.; TANIGUCHI, S.; SILVA, J.; MIRANDA, D. A.; MONTONE, R. C. **The legacy of man-made organic compounds in surface sediments of Pina Sound and Suape Estuary, northeastern Brazil.** Braz. J. Oceanogr. v. 66 p. 58-72. 2018.
- ZANARDI-LAMARDO, E.; SCHETTINI, C. A. F.; VIEIRA-CAMPOS, A. A.; CABRAL, C. B.; SILVA, M. S. **Intratidal variability and transport of petroleum aromatic hydrocarbons in an anthropized tropical estuarine system: the Suape estuary (8.4S 35W).** Braz. J. Ocean., 66: p. 47-57. 2018.

# OCEANOGRAFIA FÍSICA DO ATLÂNTICO TROPICAL: PROCESSOS HIDROTERMODINÂMICOS

Carlos Alexandre Domingos LENTINI<sup>1</sup>  
Marcus André SILVA<sup>2</sup>  
Dóris Regina Aires VELEDA<sup>2</sup>  
Moacyr Cunha de ARAÚJO Filho<sup>2</sup>  
Marcio Machado CINTRA<sup>3</sup>  
Humberto Lázaro Varona GONZÁLEZ<sup>2</sup>  
Carlos Eduardo Peres TEIXEIRA<sup>4</sup>  
Leonardo Vieira Bruto da COSTA<sup>2</sup>  
Luís Felipe Ferreira de MENDONÇA<sup>1</sup>  
Júlia Martins de ARAÚJO<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal da Bahia - UFBA

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

<sup>3</sup> Universidade Federal do  
Rio Grande do Norte - UFRN

<sup>4</sup> Universidade Federal do Ceará - UFC

<sup>5</sup> Instituto Oceanográfico da Universidade  
de São Paulo



## 1. INTRODUÇÃO

Em geral, o padrão da circulação de larga escala gerada pelo rotacional da tensão de cisalhamento do vento é a principal forçante da circulação na troposfera oceânica, com a presença de intensas correntes de borda oeste responsáveis pelo retorno meridional do transporte de Sverdrup do interior das bacias oceânicas.

Entretanto, a configuração geométrica dos continentes e, consequentemente, das bacias oceânicas em conjunto com as variações do padrão de distribuição da tensão de cisalhamento do vento e da circulação termohalina é que são responsáveis pela circulação oceânica e suas interações com a plataforma continental adjacente. Essas interações podem ocorrer na forma de meandros, vórtices e/ou anéis de mesoescala, intrusões de massas de água profundas sobre a plataforma, aporte de água doce de rios e excesso de precipitação, e da tensão de cisalhamento do vento, seja ela devida a efeitos locais ou remotos. Por exemplo, o padrão meandrante das correntes de borda oeste podem ser responsáveis pelas fortes mudanças temporais e espaciais das propriedades termodinâmicas e regimes oceanográficos sobre a plataforma adjacente. Caso as correntes se tornem instáveis, vórtices e anéis, que são estruturas de mesoescala decorrentes de processos de instabilidade baroclínica e/ou interações com feições topográficas em diferentes escalas espaciais e temporais, podem se destacar da corrente-mãe e interagir com correntes e massas de água adjacentes tanto sobre

a própria plataforma continental como ao largo, sendo responsáveis por fluxos de momentum, sal e calor no ambiente.

Devido ao forte acoplamento entre a atmosfera e o oceano, o processo de evaporação fornece não só vapor d'água, mas também parte da energia para o ciclo hidrológico que conduz à condensação, precipitação, e à descarga de água doce dos rios. Desta forma, tanto a precipitação como o aporte de água doce influenciam fortemente a distribuição da salinidade do oceano, principalmente em regiões onde a descarga fluvial tem sua importância local relativa. Esse aporte afeta, principalmente, não só a circulação costeira através da geração de estratificação, frentes (superfície e/ou sub-superfície) como também a circulação baroclínica devido à flutuabilidade (empuxo), especialmente em regiões tropicais onde o balanço entre evaporação e precipitação (E-P) é positivo.

O efeito sinérgico entre a circulação oceânica, seus meandros e vórtices, com o aporte fluvial em regiões de intensa descarga de rios pode afetar não somente as propriedades hidrotermodinâmicas, mas também o transporte e distribuição larval de organismos planctônicos. Por exemplo, a presença de uma frente de turbidez e de baixa salinidade sobre a plataforma pode afetar a sobrevivência, o sucesso da espécie e sua conectividade ecológica, ou seja, a conexão entre populações de organismos marinhos planctônicos que colonizam áreas costeiras.

## 2. O ATLÂNTICO TROPICAL

Geograficamente, a faixa latitudinal que compreende os “Trópicos” refere-se à região do planeta delimitada pelo Trópico de Câncer (23,5°N) e pelo Trópico de Capricórnio (23,5°S), que são as latitudes onde o sol atinge o zênite apenas uma vez ao ano no solstício de verão. Uma definição alternativa seria escolher a região de 30°N a 30°S, dividindo assim a superfície da Terra em metades iguais. Definido desta forma, os trópicos podem ser considerados como a fonte de todo o momentum angular da atmosfera e a maior parte do calor (Peixoto & Oort, 1992), o que torna o Atlântico Tropical (AT) uma região de extrema complexidade hidrotermodinâmica.

Os fluxos de massa e energia que ocorrem na interface atmosfera-oceano, como também os que ocorrem na camada de mistura, são capazes de influenciar e serem influenciados pela dinâmica da troposfera oceânica, também bastante complexa. Por exemplo, na região equatorial, um complexo sistema de correntes e contra-correntes, somado à ocorrência de processos como a divergência de Ekman e a ressurgência equatorial, faz com que a sua variabilidade espaço-temporal se estenda por um amplo espectro de escalas. À medida que nos afastamos do equador essa complexidade diminui; entretanto, muitos desses fenômenos continuam ocorrendo sobre os giros tropicais e ao longo das regiões costeiras, sobretudo nas regiões dominadas pelas correntes de contorno superficial e profunda (**ex:** Silva et al., 2009; Veleza et al., 2012; Cintra et al., 2015; Varona et al., 2019).

Por estes e outros motivos, a bacia do AT destaca-se como uma área que sofre forte influência das condições impostas pelo sistema acoplado ar-mar, tanto remota como local, e em diversas escalas de tempo (Carton et al., 1996; Servain et al., 2003). Por exemplo, remotamente o AT sofre influência dos eventos associados ao *El Niño*/Oscilação Sul (ENOS), ao índice de Oscilação do Atlântico Norte (Enfield & Mayer, 1997; Enfield et al., 1999; Taylor et al.,

2002) e ao Dipolo do Atlântico (Hastenrath & Heller, 1977; Moura & Shukla, 1981; Servain, 1991; Nobre & Shukla, 1996). Localmente, o AT é governado pelas condições impostas pelos balanços de massa e calor oceânico, assim como pelo sistema de monção (Gouriou & Reverdin, 1993; Lazar et al., 2001; Schott et al., 1998, 2002, 2003) (Fig. 3.1). A variabilidade temporal no AT é dominada por um forte ciclo anual forçado pela tensão de cisalhamento dos ventos. Sobreposto a este ciclo estão flutuações em outras escalas temporais que, embora mais fracas do que o sinal anual, apresentam variações sistemáticas que são consideradas como um dos fatores mais importantes e responsáveis pelo aparecimento de anomalias climáticas regionais (Hastenrath & Heller, 1977; Moura & Shukla, 1981; Nobre & Shukla, 1996).

Do ponto de vista oceanográfico, o AT é uma região importante para a circulação de larga escala e para o clima global. Isso ocorre devido ao escoamento inter-hemisférico dos fluxos líquidos de massa e calor associados à circulação termohalina e à Célula Subtropical Rasa (Fratantoni et al., 2000; Lazar et al., 2001; Schott et al., 1998; 2002; 2003). Do ponto de vista atmosférico, a circulação sobre os trópicos é extremamente sensível às flutuações dos campos de temperatura da superfície do mar (TSM), variável oceânica importante para o estudo de processos de interação ar-mar, para a previsão do tempo e estudos climáticos (**ex:** Brunke et al., 2003; Foltz et al., 2003; Frankignoul et al., 1998; Lindzen & Nigam, 1987).

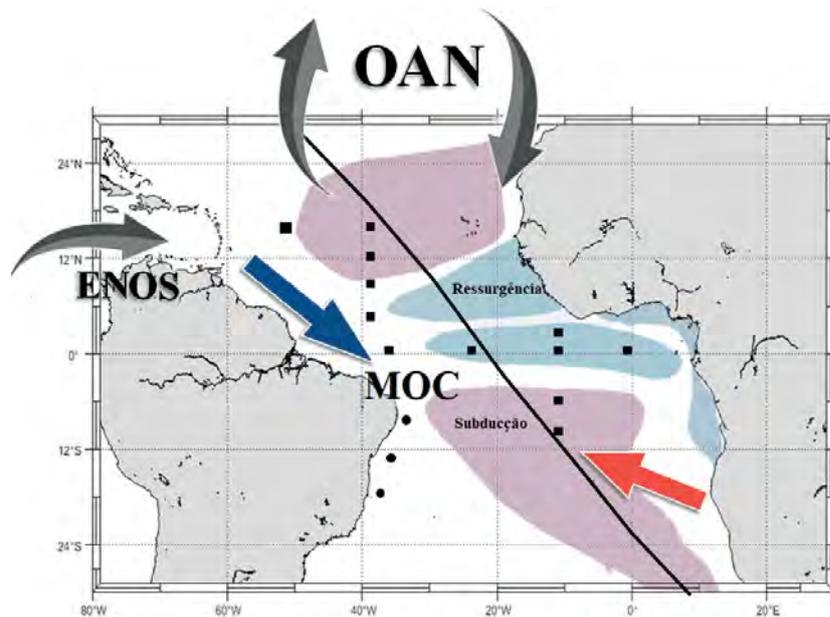
Entretanto, uma vez que a ênfase está em uma descrição dos processos oceanográficos físicos que atuam sobre as margens norte, nordeste e leste brasileiras, o foco será dado a alguns processos hidrotermodinâmicos que ocorrem na porção oeste do AT, denominado aqui de Atlântico Tropical Sudoeste (ATSO). Independentemente da faixa latitudinal escolhida, o ATSO apresenta uma região identificada como sendo um sistema combinado por forçantes de naturezas distintas. Por exemplo, em geral é influenciado por correntes oceânicas e de

borda oeste decorrentes tanto da circulação gerada pelo vento como pela circulação termohalina, pela presença dos ventos alísios de nordeste e sudeste, bem como pelo aporte de água doce do Rio Amazonas. Tanto as correntes oceânicas como os alísios apresentam uma migração latitudinal sazonal vinculada às oscilações da posição da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), também conhecida como “equador meteorológico” devido ao aquecimento diferencial latitudinal e à distribuição assimétrica entre os continentes e os oceanos.

## 2.1. O Atlântico Tropical Sudoeste

Conforme mencionado anteriormente, a ação dos ventos contribui para a formação de células de circulação nos oceanos, denominados de giros oceânicos. Na região do ATSO, os giros Tropical e Equatorial são formados por um conjunto de

correntes e contracorrentes, predominantemente zonais, que se distribuem meridionalmente na região (Fig. 3.2). Muitas dessas correntes apresentam variações sazonais de acordo com o posicionamento da ZCIT (Stramma & Schott, 1999; Marin, 2009). De acordo com Ninomiya (2007), a ZCIT é um dos maiores sistemas convectivos do planeta e um dos principais da região tropical, desempenhando um papel crucial na determinação dos regimes de precipitação no ATSO. Isto ocorre devido convergência dos ventos alísios de nordeste, provenientes do Hemisfério Norte, e de sudeste, provenientes do Hemisfério Sul, carregando calor e umidade principalmente do AT (Hastenrath, 1996; Xie & Carton, 2004). Ao convergirem, os alísios induzem movimentos verticais ascendentes, conferindo à ZCIT um padrão típico comumente observado em imagens de satélite formado por uma faixa zonal de nebulosidade convectiva (**ex:** Gadgil & Guruprasad, 1990).

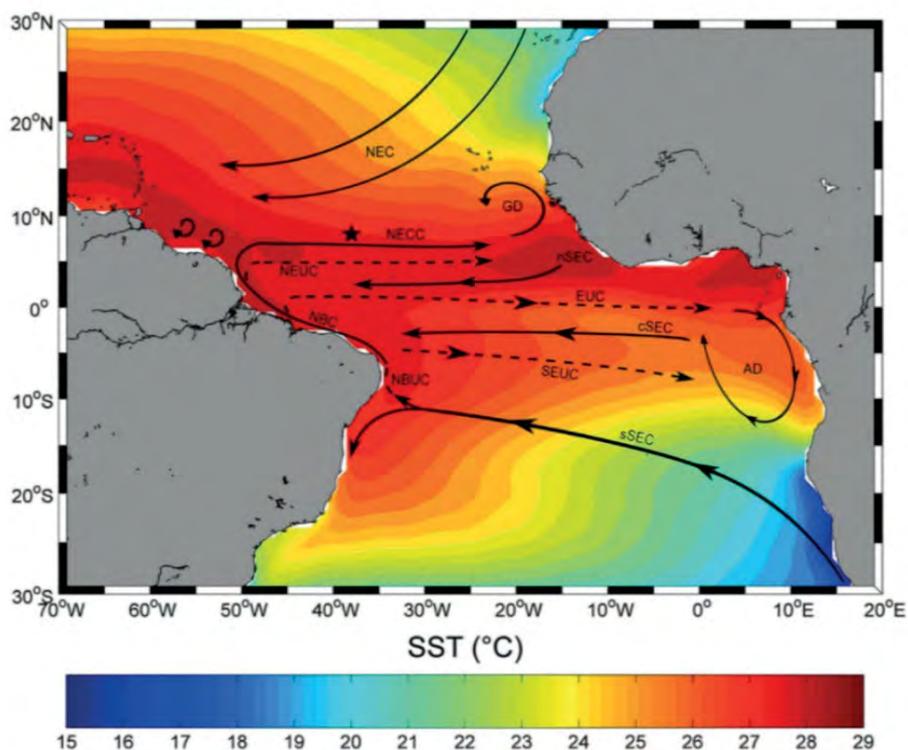


**Figura 3.1** Representação esquemática dos principais mecanismos atuantes remota e localmente sobre a variabilidade do Oceano Atlântico Tropical. ENOS: *El Niño* e Oscilação Sul; OAN: Oscilação do Atlântico Norte; MOC: Célula de Revolvimento Meridional. As regiões sombreadas correspondem às áreas de subducção (tons de rosa) e ressurgência (tons azuis) decorrentes da convergência/divergência de Ekman. A linha transversal representa a linha de alta densidade de amostragem de XBTs (AX8). Os quadrados correspondem à posição das boias PIRATA e os círculos, à extensão sudoeste do PIRATA. **Adaptado** por C. A. D. Lentini (2006). **Fonte** CLIVAR *special issue*, AGU (2003).

De acordo com Bruto et al. (2017), a Corrente Norte Equatorial (NEC) origina-se no nordeste do oceano Atlântico através da corrente das Ilhas Canárias e segue em direção oeste (Fig. 3.2). Não apresenta variação sazonal marcante e está localizada entre as latitudes de 7°N e 20°N, representando o ramo sul do giro subtropical do Atlântico Norte (Bourles et al., 1999; Urbano et al., 2008; Hormann et al., 2012).

O ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sSEC), que se origina a partir da corrente de Benguela e cruza a bacia do Atlântico Sul entre 14°S e 20°S, atinge a costa nordeste brasileira na altura do estado da Bahia, onde se bifurca (Rodrigues et al., 2007). Parte do fluxo segue para sul alimentando a Corrente do Brasil (BC), enquanto a outra parte segue para norte e alimenta o fluxo da Subcorrente Norte do Brasil (NBUC).

A Corrente Norte do Brasil (CNB) é um importante escoamento de borda oeste, atuando diretamente na costa norte-nordeste brasileira, contribuindo para o sistema de correntes equatoriais zonais e alimentando o fluxo da Subcorrente Equatorial (EUC) na região da termoclina e da Subcorrente Norte Equatorial (NEUC) ao norte. De acordo com Schott et al. (1998), a cSEC junta-se ao limite ocidental em torno de 5° S, somando-se a NBUC na superfície e transformando a mesma na intensa corrente de contorno oeste CNB. A CNB possui velocidade média de 0,5 a 1,0 m/s, fluindo junto ao talude da margem equatorial brasileira durante todo o ano (Johns et al., 1998; Neto & Silva, 2014). Ao cruzar a linha do equador geográfico, uma parte da CNB sofre retroflexão para leste e transforma-se na EUC, enquanto que a outra parte continua em direção noroeste e sofre uma nova retroflexão nas



**Figura 3.2.** Representação esquemática retratando as principais correntes superficiais (linhas contínuas) e sub-superficiais (linhas tracejadas) do Atlântico Tropical, superimpostas sobre a média climatológica de Temperatura da Superfície do Mar (SST) para o período de 1998 a 2011. Corrente Norte Equatorial (NEC); ramo sul da Corrente Sul Equatorial (sSEC); Subcorrente Norte do Brasil (NBUC); ramo central da Corrente Sul Equatorial (cSEC); Corrente Norte do Brasil (CNB); Subcorrente Equatorial Norte (NEUC); Contra Corrente Equatorial Norte (NECC); Subcorrente Equatorial (EUC). **Fonte** Bruto et al. (2017).

proximidades de 7°N-50°W (Bourles et al., 1999), contribuindo com a NEUC e com a Contra-Corrente Norte Equatorial (NECC).

A NECC é uma corrente de superfície com direção predominante para leste (Stramma et al., 2005) e dividida em dois núcleos (Urbano et al., 2006, 2008; Brandt et al., 2011): um localizado geralmente entre as latitudes de 3°N e 10°N (Richardson & McKee, 1984; Fonseca et al., 2004; Brandt et al., 2006; Hormann et al., 2012), e o outro, em média, na latitude de 6° +/- 1,3°N (Fonseca et al., 2004). Longitudinalmente, a NECC se origina entre os meridianos de 50°W e 40°W, atravessando o AT em direção ao continente Africano.

Do ponto de vista termodinâmico, as camadas mais superiores do oceano desempenham um importante papel na troca de energia e massa na interface atmosfera-oceano (Kumar & Narvekar, 2005). Desta forma, a variabilidade da profundidade da camada de mistura (MLD) é um indicativo comumente usado na análise da resposta da camada superior dos oceanos às forçantes atmosféricas locais (Noh & Lee, 2008).

Na atmosfera, as forçantes que regulam a mistura na superfície oceânica são os ventos, o aquecimento solar e as taxas de evaporação e precipitação (E-P). A MLD oceânica ainda desempenha um papel crucial nas alterações climáticas, bem como no próprio ecossistema marinho (Nagai et al., 2005).

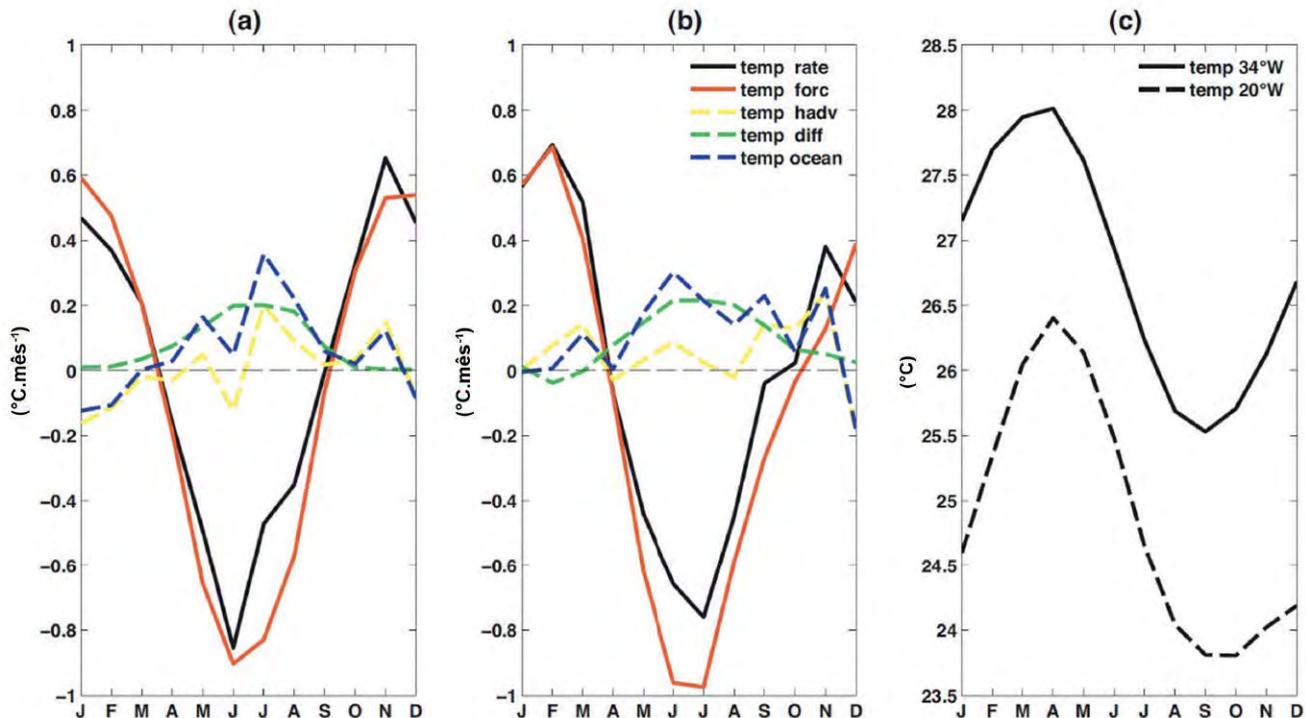
De fato, o ATSO apresenta uma região denominada de “piscina quente”, onde águas superficiais atingem temperaturas acima de 28°C, com ocorrências praticamente durante todo o ano (Wang & Enfield, 2001, 2003; Enfield et al., 2006; Cintra et al., 2015). Essas características passam por uma grande variação espacial e sazonal, e sua presença tem implicações importantes para o clima regional brasileiro, sendo identificada como uma área-chave que contribui para os fortes eventos de chuvas que ocorrem entre fevereiro e julho ao longo da costa leste e nordeste brasileira (Kouadio et al., 2012; Hounsou-gbo et al., 2015). Cintra et al.,

(2015) investigaram a ocorrência e a evolução sazonal da Piscina Quente do Atlântico Tropical Sudoeste (PQATSO) através da análise de tendência dos termos da equação de balanço de calor. Os autores observaram, através de uma simulação numérica climatológica com o modelo regional oceânico (ROMS), que de março a maio, a PQATSO alcança o seu desenvolvimento máximo, fundindo-se, por vezes, com as águas equatoriais aquecidas próximas ao continente africano (Fig. 3.3). Ao longo do equador, a combinação dos termos oceânicos de advecção e difusão são importantes para promover a separação, quando ocorre, das águas quentes equatoriais das águas tropicais do Atlântico Sudoeste, que se desenvolvem ao largo da costa brasileira. A predominância das forçantes atmosféricas sobre os termos de advecção horizontal e difusão vertical igualmente desenvolvem um papel importante para explicar a ocorrência/extinção da PQATSO (Fig. 3.4). Além disso, a variabilidade sazonal da temperatura média e da quantidade de calor dentro da camada de mistura (ML) sugere a predominância da forçante atmosférica em relação aos outros termos, como a advecção e a difusão turbulenta vertical/horizontal oceânica. Isso implica que a atmosfera desempenha um papel importante sobre os termos oceânicos na determinação da temperatura dentro da ML.

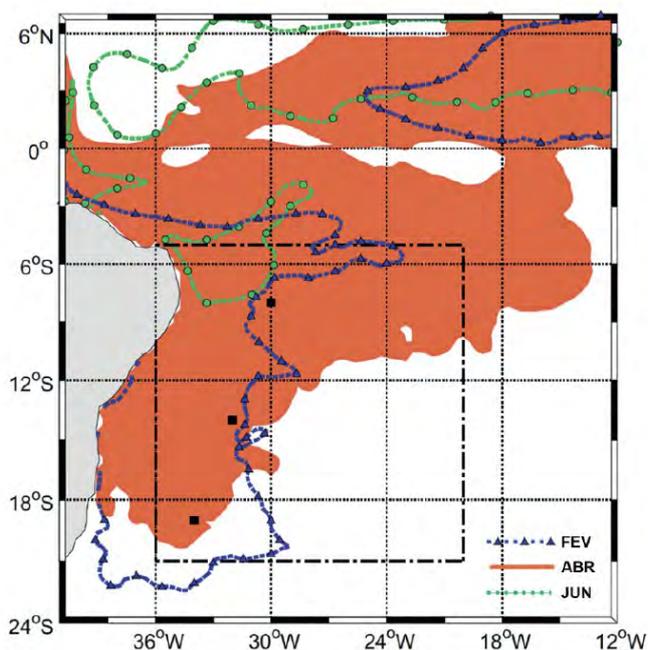
Do início de outubro a final de março, a ML torna-se relativamente mais quente, visto que a troposfera oceânica começa a se resfriar de abril a setembro. Os termos oceânicos parecem ser opostos à forçante atmosférica em superfície, exceto próximo dos núcleos dos ramos da SEC e da EUC, onde os termos advectivos são significativos. A quantidade de calor dentro da ML é maior quando essa camada é mais profunda, o que sazonalmente ocorre sobre a PQATSO durante o inverno austral. Consequentemente, o armazenamento do calor é modulado pela intensificação/relaxamento da tensão de cisalhamento do vento e pela transferência vertical de momentum da troposfera oceânica.

Além disso, ao largo, a estratificação da densidade oceânica nas camadas superiores é controlada, principalmente, por variações de temperatura na profundidade da termoclina (**ex:** Araújo et al., 2011). No entanto, há algumas evidências de que as variações de salinidade podem regular a MLD (Sprintall & Tomczak, 1992). A camada de barreira (BL), que é uma camada entre a haloclina e a termoclina (Lukas & Lindström, 1991), pode isolar a porção superior da camada isohalina de águas relativamente frias da termoclina, afetando assim o balanço de calor oceânico e suas trocas com a atmosfera (Swenson & Hansen, 1999; Pailler et al., 1999; Foltz & McPhaden, 2009).

De acordo com alguns estudos, a forte precipitação na porção ocidental da bacia do ATSO é o principal mecanismo responsável pela formação da BL (Sprintall & Tomczak, 1992; Ando & McPhaden, 1997; Tanguy et al., 2010). Quando a BL ocorre, a energia transferida da atmosfera para o oceano, através da ação dos ventos e do balanço E-P, pode ficar aprisionada na parte superior da camada de mistura (ML) e limitada pela estratificação de salinidade (Delcroix & McPhaden, 2002). Essa estratificação é mais fina e teoricamente mais reativa do que a definida pela ML de temperatura (Vialard & Delecluse, 1998; De Boyer Montegut et al., 2007). A seguir, dois exemplos da importância da ML e BL na dinâmica do ATSO serão apresentados tanto para a região norte como nordeste-leste do Brasil.



**Figura 3.3** Ciclo sazonal dos termos de tendência de temperatura em  $^{\circ}\text{C}/\text{mês}$ . As parcelas mostram valores médios mensais climatológicos meridianos ( $5^{\circ}\text{S} - 21^{\circ}\text{S}$ ) para duas longitudes diferentes: **A)** a  $34^{\circ}\text{W}$  e **B)** a  $20^{\circ}\text{W}$ ; **C)** apresenta a temperatura média sobre a camada de mistura ML (em  $^{\circ}\text{C}$ ) para estes dois transectos meridianais (para detalhes, favor consultar o manuscrito). Em (a) e (b), as linhas coloridas representam os seguintes termos: preto, a taxa de mudança de temperatura; vermelho, a forçante superficial; amarelo, o termo de advecção horizontal; verde, os termos difusivos (horizontal + vertical); e azul, os termos oceânicos totais (advectivos + difusivos). **Fonte** Cintra et al. (2015).

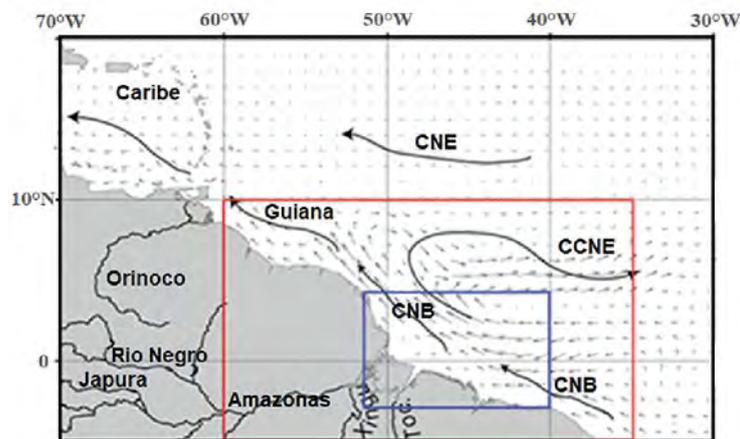


**Figura 3.4** Evolução sazonal espaço-temporal da TSM (média mensal), considerando as águas quentes ( $T > 28^{\circ}\text{C}$ ) dentro do PQATSO para os meses de fevereiro (linha pontilhada azul com triângulos), abril (linha contínua preenchida em vermelho) e junho (linha pontilhada verde com círculos). Os quadrados pretos representam as posições das boias PIRATA da Extensão Sudoeste (PIRATA-SWE) e a linha pontilhada tracejada representa os limites do ATSO. **Fonte** Cintra et al. (2015).

### 2.1.1. Região Norte

Na Margem Equatorial Brasileira, a plataforma Norte do Brasil (PNB), que se estende da Venezuela ( $10^{\circ}\text{N}$ ,  $60^{\circ}\text{W}$ ) à borda oriental do Brasil ( $5^{\circ}\text{S}$ ,  $35^{\circ}\text{W}$ ), compreende a Plataforma Continental Amazônica (PCA). Segundo Castro & Miranda (1998), do ponto de vista fisiográfico a PCA é delimitada pelo Cabo Orange ( $\sim 4^{\circ}30'\text{N}$ ) no estado do Amapá, e pela Baía de Turiaçu ( $\sim 2^{\circ}\text{S}$ ) no Maranhão. Nessa extensão de cerca de 1.000 km, a largura da plataforma varia de 125 km no Cabo Orange a 165 km nas proximidades da Baía de Turiaçu, sendo a parte mais larga (**ex:**  $\sim 300$  km) encontrada nas proximidades da Foz do Rio Amazonas (Fig. 3.5).

Por estar localizada próximo ao equador onde a aceleração de Coriolis é muito fraca, a PCA experimenta marés semi-diurnas quase ressonantes, fortes correntes de maré, grandes fluxos de fluabilidade da descarga do Rio Amazonas que basicamente respondem à tensão de cisalhamento dos ventos alísios e aos gradientes de pressão regionais que conduzem o escoamento da CNB ao longo da costa para noroeste (Johns et al., 1990; Lentz, 1995a; Geyer et al., 1996; Castro & Miranda, 1998).



**Figura 3.5** Principais correntes que atuam na troposfera oceânica nas porções Norte (retângulo vermelho) e Amazônica (retângulo azul) do Oceano Atlântico Tropical Oeste que atuam na Plataforma Norte do Brasil (retângulo vermelho) e Plataforma Continental Amazônica (retângulo azul): Corrente Norte do Brasil (CNE), Corrente Norte Equatorial (NEC), Contra Corrente Norte Equatorial (NECC) e Corrente das Guianas. O Cabo Orange e a Baía de Turiaçu estão localizados, respectivamente, nos cantos superior esquerdo e inferior direito do retângulo azul.

O Rio Amazonas, o maior do mundo tanto em comprimento quanto em vazão, é responsável por cerca de 16% de todo o volume de água doce desaguado nos oceanos (Muller-Karger et al., 1988). Sua vazão máxima ocorre de maio a julho, enquanto a mínima, de outubro a novembro, com valores da ordem de  $1,2 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $2,0 \times 10^5 \text{ m}^3/\text{s}$  (ex: Dagg et al., 2004; Coe et al., 2002; 2007). A pluma do Rio Amazonas, cuja assinatura é marcada por águas de baixa salinidade contendo nutrientes, sedimentos em suspensão e material dissolvido, é dinamicamente instável e sujeita às mesmas forçantes descritas acima para a PNB.

Embora a enorme descarga de água fluvial gere uma frente halina bem definida, os processos dinâmicos na PCA são dominados pela forte circulação das marés semi-diurnas (Castro & Miranda, 1998; Nittrouer & Demaster, 1996; Lentz & Limeburner, 1995; Geyer et al., 1996). Por ser uma plataforma larga, as marés nessa região são co-oscilantes, apresentando propagação quase-perpendicular à costa em sintonia com o oceano profundo. Entretanto, a maré barotrópica, principalmente as componentes semi-diurnas  $M_2$ ,  $S_2$  e  $N_2$ , que são as mais importantes, apresenta grande amplificação na PCA em consequência do fenômeno de “ressonância”, que ocorre em plataformas cuja largura é de aproximadamente 1/4 do comprimento de onda de maré (ex: Huthnance, 1989). Beardsley et al. (1995) descrevem a maré  $M_2$  como uma onda quase-ressonante com amplitudes de 3 metros, aproximadamente. As correntes de maré na região são caracterizadas como fluxos intensos de até  $\sim 2,0 \text{ m/s}$ , preferencialmente polarizadas na direção perpendicular à costa.

O campo de ventos sobre a PNB é definido pelos ventos alísios e pela migração latitudinal sazonal da ZCIT que se posiciona mais ao norte em agosto-setembro e mais próxima do equador em março-abril. Esta variação faz com que os alísios sejam mais fortes entre os meses de janeiro e abril, com orientação preponderantemente de nordeste, e mais fracos entre julho e outubro, quando

sopram preferencialmente para oeste/noroeste na PCA (Castro & Miranda, 1998). Entretanto, na região leste da PNB, mais precisamente entre a Baía de Turiaçu ( $\sim 2^\circ\text{S}$ ) no Maranhão e o Cabo do Calcanhar no Rio Grande do Norte, os ventos são mais fortes durante julho e outubro, e mais fracos durante os meses de janeiro e abril, com direções predominantes de sudeste e leste respectivamente. Essa região da PNB também se diferencia da PCA por quase não receber aportes fluviais, caracterizando, desta forma, um escoamento tipicamente barotrópico.

Ao longo da quebra-da-plataforma, a PNB é marcada pela presença da CNB, uma corrente de borda oeste bem estabelecida e definida, que transporta águas de termoclina para noroeste ao longo da costa brasileira (Figs. 3.2 e 3.5). Segundo Johns et al. (1990; 1998), a CNB possui um transporte máximo de 36 Sv (1 Sverdrup =  $10^6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) em julho-agosto, e mínimo de 13 Sv em abril-maio, ambos estimados para a latitude de  $4^\circ\text{N}$ . Ainda segundo esses autores, a CNB apresenta um fluxo estreito e raso na primavera, ao passo que no outono, ele é largo e profundo.

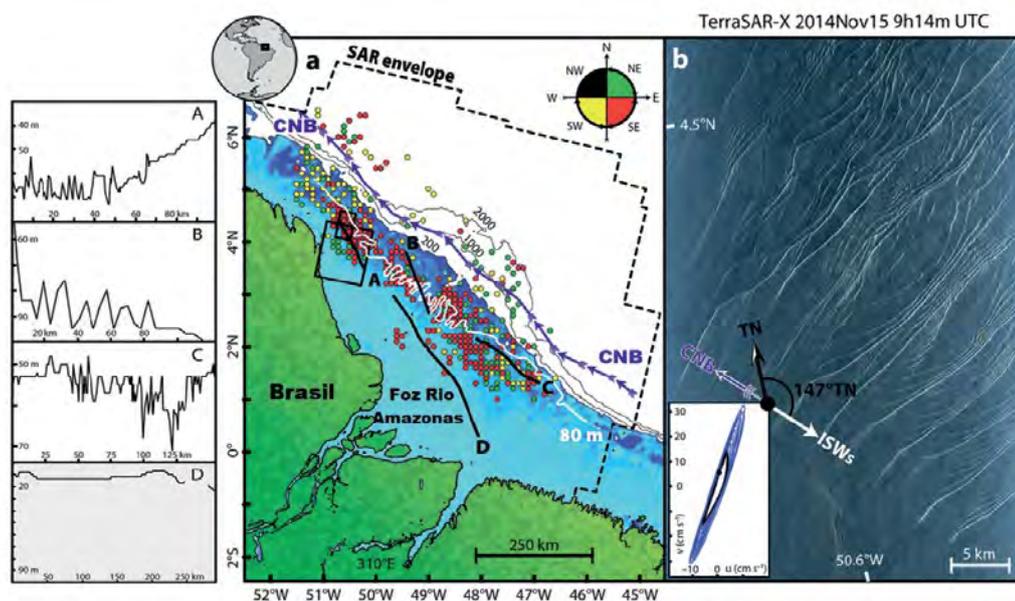
Na Foz do Rio Amazonas, Ondas Internas (OIs), sólitons e frentes são observadas desde meados dos anos 90 por fotografias aéreas tiradas a bordo de estações espaciais e de imagens de satélites operando tanto na faixa do espectro visível como no de micro-ondas (Lentini et al., 2016). Essas observações apontam para a importância relativa dessas feições de sub e mesoescalas na dinâmica da região, com implicações na indústria de extração de óleo e gás, na produção primária, no transporte de larvas e sedimentos, bem como nos modelos de circulação oceânica.

As OIs desempenham um papel ativo em numerosos campos de investigação e são essencialmente equivalentes às ondas de superfície, porém propagando-se no interior do oceano ao longo da picnoclina. Sua existência depende apenas de uma estratificação estável. São geralmente oriundas das

marés barotrópicas e se formam quando correntes de maré estratificadas fluem sobre uma topografia de fundo irregular, dando origem às marés internas. As marés internas podem se propagar por longas distâncias e, frequentemente, gerar pacotes de Ondas Internas Solitárias (OISs), típicas de processos de submesoscala (**ex:** Jackson et al., 2012; Alford et al., 2015; Da Silva et al., 2015). A geração de OISs por um fluxo, seja ele devido às marés ou não, quando sofre algum tipo de efeito de bloqueio por um obstáculo subaquático e sob as condições hidráulicas apropriadas, pode resultar em ondas quase-estacionárias que se formam a montante ou a jusante do obstáculo, com velocidades de fase opostas à direção do escoamento principal (Lentini et al., 2016). Esse processo de geração é baseado na teoria de escoamentos críticos, que muitas vezes é caracterizado por um número de Froude densimétrico ou interno, comumente

usado para determinar o estado hidráulico de fluxos estratificados, ou seja: subcrítico, crítico ou transcrito, quando comparado com a velocidade de fase linear dessa onda interna (Melville & Helfrich, 1987; Farmer & Armi, 1999).

De fato, Lentini et al. (2016) observaram OISs propagando-se perto da Foz do Rio Amazonas com base em um conjunto de dados de radar de abertura sintética (SAR). Três grupos distintos de ondas foram identificados de acordo com sua direção de propagação (Fig. 3.6). Embora a propagação de OISs perpendiculares à plataforma em direção ao largo tenha sido documentada antes (**ex:** Jackson et al., 2012; Magalhães et al., 2016), verificou-se que a maioria das ondas observadas se propagam ao longo da PCA a montante e na direção oposta da CNB (Fig. 3.6). Esses pacotes de OISs apresentam distâncias entre pacotes em torno de 5 km,

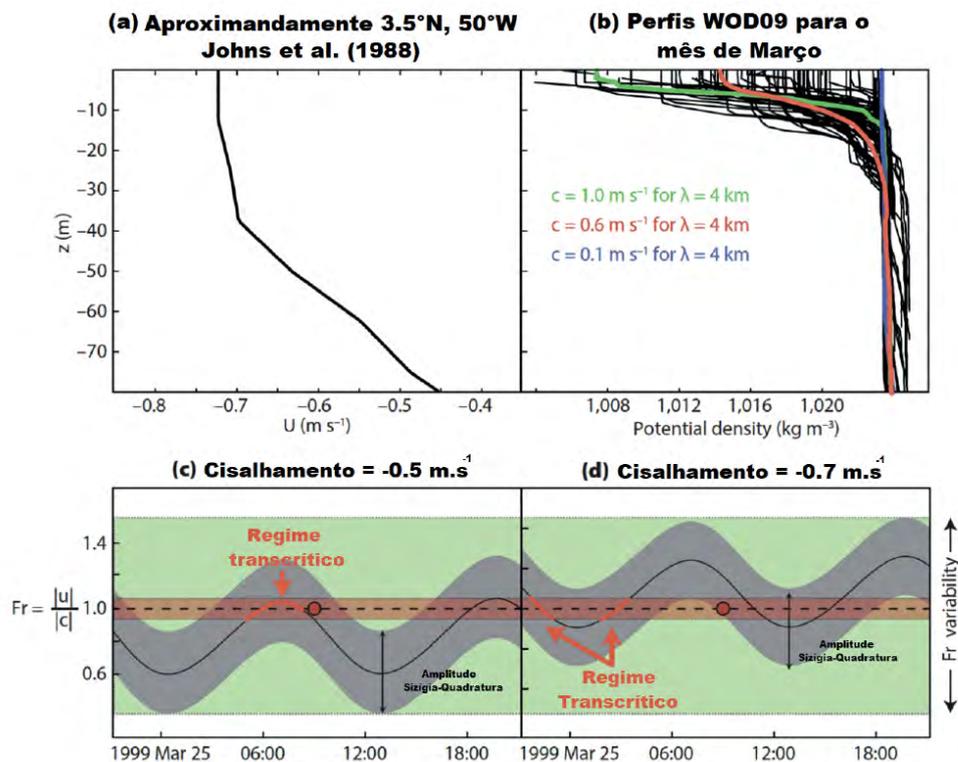


**Figura 3.6 A)** plataforma continental da Amazônia e a foz do Rio Amazonas no sudoeste do Atlântico Tropical. A linha tracejada preta define um envelope com base em 35 imagens de radar de abertura sintética (SAR) onde ondas internas solitárias (OISs) são observadas e codificadas por cores de acordo com sua direção de propagação. Para referência, a plataforma continental (< 200m) é definida pela região sombreada em azul e a isóbata de 80 m destacada em branco. Os transectos de alta resolução da batimetria aparecem como linhas contínuas pretas, e os perfis inferiores são mostrados nos painéis à esquerda etiquetados A a D. As setas azuis indicam a direção da Corrente Norte do Brasil (CNB); **B)** aquisição da imagem do TerraSAR-X de 15 de novembro de 2014, às 09:14 UTC. Elipses de maré computadas a cada 10 minutos em 4,2°N e 50,5°W por um período de 20 dias (centrado no tempo de aquisição da imagem) são mostrados no canto inferior esquerdo. O ponto preto nas elipses de maré representa a hora de aquisição da imagem e a linha preta sólida abrange um ciclo de maré semi-diurna. **Fonte** Lentini et al. (2016).

com comprimentos de crista médios de 8 km, e comprimentos de aproximadamente 500 m intrasólitos. Apesar de ser observado ao longo de todo o ciclo semi-diurno e quinzenal (**ex: fortnight**) das marés, a origem das OIs resulta de uma combinação entre o fluxo da CNB, as correntes de maré e a complexa topografia de fundo sobre a plataforma média-externa da PCA. A análise de número Froude, considerando as ondas lineares não-hidrostáticas do primeiro modo e que se propagam à montante da CNB, é consistente com um regime de fluxo transcrito, que é consonante com as teorias da geração de ondas internas por ressonância, na qual a CNB, modulada pelas marés, flui sobre a plataforma média-externa contrária ao sentido de propagação dessas ondas (Fig. 3.7).

Ainda próximo à Foz do Rio Amazonas, trabalhos pretéritos utilizando medições de velocidade e temperatura do Projeto AmasSeds (Geyer et al., 1996), dados hidrográficos do Programa REVIZEE-N (Neto & Silva, 2014) e modelagem numérica (Araujo & Mezilet, 2016) indicam a presença de células de ressurgência na região da PCA e do talude continental associadas a uma CNB mais intensa. Para investigar a variabilidade espaço-temporal dessas células de águas relativamente frias nessa região, Araújo (2018) utilizou observações *in situ* e de sensoriamento remoto para examinar a evolução dessas feições.

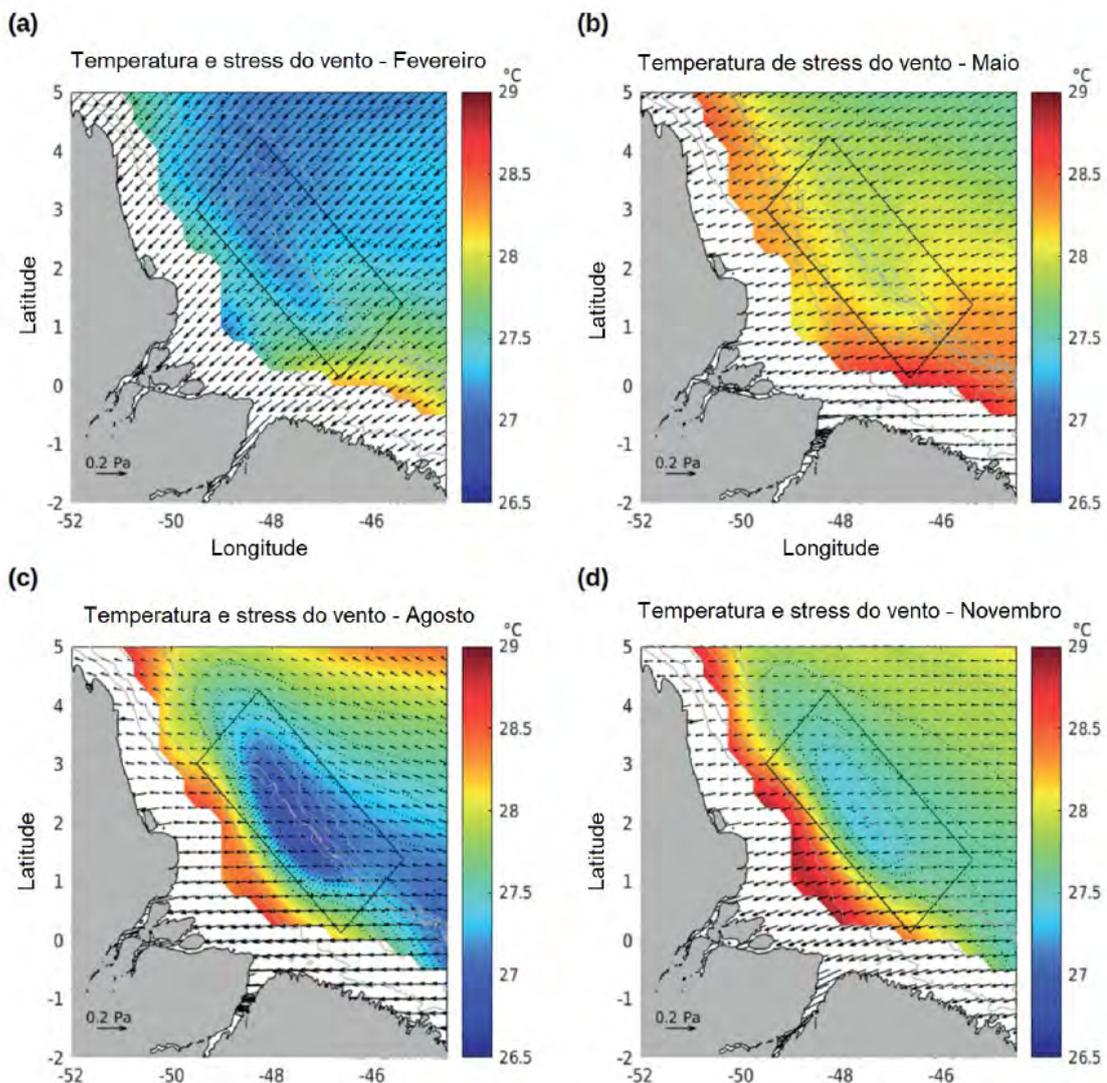
Os resultados de temperatura da superfície do mar (SST), obtidos a partir do projeto *Tropical*



**Figura 3.7 A)** cisalhamento vertical da Corrente Norte do Brasil (CNB) ao longo da direção da propagação das OISs (ou seja, 147°TN) estimada a partir de Johns et al. (1998). **B)** perfis de densidade potencial referentes ao envelope de propagação das ondas apresentado na Figura 3.6. Perfis destacados em verde e azul mostram distintas condições de estratificação separadas por apenas dois dias, e um perfil médio é mostrado em vermelho. **C)** a linha preta sólida representa as estimativas internas do número de Froude para aproximadamente dois ciclos de maré semi-diurna e considerando um cisalhamento vertical médio de 0,5 m/s. A curva cinzenta representa uma variabilidade quinzenal de 15 cm/s. **D)** idem ao painel (c), porém considerando um cisalhamento vertical médio de 0,7 m/s. A variabilidade total para os painéis c e d é realçada em verde. **Fonte** Lentini et al. (2016).

*Rainfall Measuring Mission (TRMM) Microwave Imager* de frequência diária para o período de 1998 a 2015 e com uma resolução espacial de  $\frac{1}{4}$  de grau, apresentam uma forte variabilidade espaço-temporal da célula de ressurgência próxima à foz do Rio Amazonas. De acordo com Araújo (2018), observa-se a distribuição horizontal climatológica da TSM e do cisalhamento dos ventos atuando na PCA para os meses de fevereiro, maio, agosto e novembro (Fig. 3.8).

Segundo a autora, a célula de ressurgência começa a se formar a partir do mês de junho, tornando-se mais intensa em agosto e desaparecendo em janeiro. De fevereiro a maio, ela é completamente ausente. Entretanto, de dezembro a janeiro essa mesma célula encontra-se menos definida, tendo em vista que há um resfriamento progressivo de toda a região até o mês de março (Fig. 3.8).



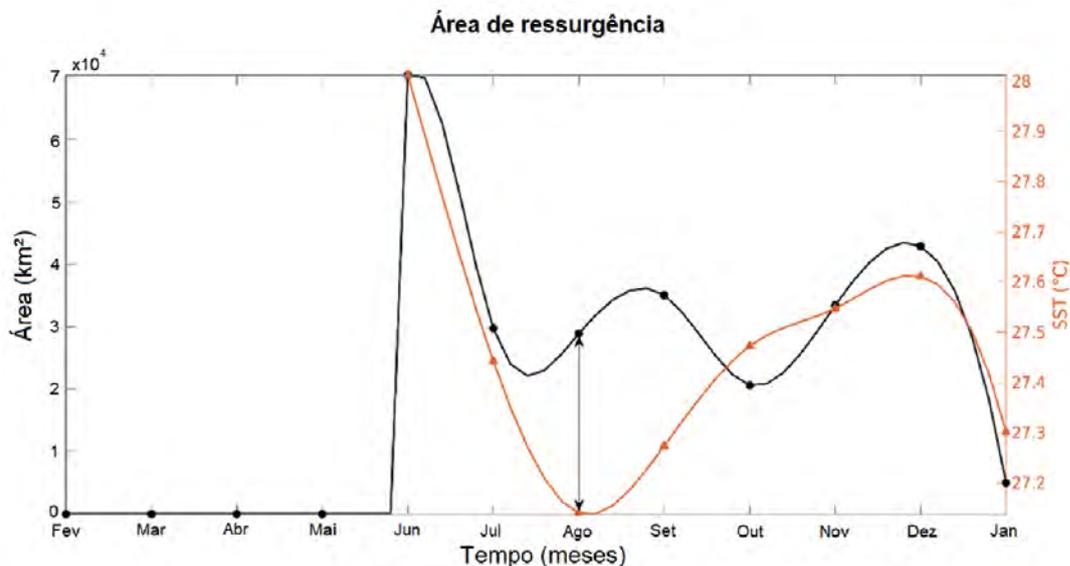
**Figura 3.8** Distribuição horizontal climatológica de TSM (cores) e tensão de cisalhamento dos ventos (vetores) na PCA em **A)** fevereiro, **B)** maio, **C)** agosto e **D)** novembro a partir de dados diários do satélite TRMM-TMI (1998-2015). A linha preta contínua representa a linha de costa, as linhas cinza-claro representam as isóbatas de 20 m, 50 m, 80 m, 100 m, 500 m, 1.000 m e 2.000 m. As linhas pretas pontilhadas representam as isotermas de 27°C a 27,8°C com intervalos de 0,1°C. O retângulo delimita a região representativa da célula de ressurgência. **Fonte** Araújo (2018).

A variabilidade espacial da célula de ressurgência (Fig. 3.9), representada pela área compreendida entre os contornos das isothermas fechadas de maiores temperaturas verificadas e as temperaturas correspondentes às respectivas isothermas na região R (vide figura 3.8), indicam que no período de fevereiro a maio, não existem contornos de isothermas fechadas e, portanto, as áreas são iguais a zero, reforçando ainda mais a ausência da célula de ressurgência nesse período (Araújo, 2018). Ainda de acordo com a autora, apesar da isoterma fechada apresentar uma área significativa em junho, sua temperatura mais elevada é igual a 28,0°C, o que não caracteriza ressurgência (Fig. 3.9). Entretanto, nos meses posteriores as áreas das isothermas fechadas variam entre  $3,0 \times 10^4 \text{ km}^2$  e  $4,2 \times 10^4 \text{ km}^2$ , sendo que agosto corresponde ao mês da isoterma fechada de menor temperatura (27,1°C), o que confirma novamente que este é o período de ocorrência de águas mais frias na região da PCA. Em janeiro, apesar da baixa temperatura da isoterma fechada, a área de  $0,5 \times 10^4 \text{ km}^2$  é inferior à dos meses anteriores, desaparecendo em seguida (Araújo, 2018).

A variabilidade interanual da célula de ressurgência na foz do Rio Amazonas também foi investigada e caracterizada através da evolução temporal mensal da TSM e de sua anomalia (ATSM) na região R, representada na figura 3.10 e calculadas a partir dos dados diários do sensor TMI a bordo do satélite TRMM no período de 1998 a 2015. Observa-se que a temperatura superficial varia entre os limites 26,8°C (2014) e 29,0°C (2010), ao longo de todo o período avaliado (Fig. 3.10).

A principal fonte de água doce no ATSO deve-se à descarga continental do Rio Amazonas em conjunto com as chuvas devido à presença da ZCIT. A sobreposição espacial e temporal dessas fontes de água doce, principalmente na PNB, contribuem na variabilidade da salinidade da superfície do mar (SSS) e da dinâmica da pluma do Rio Amazonas (Coles et al., 2013; Grodsky et al., 2014; Ibánhez et al., 2015, 2016).

Na PNB, a descarga de águas do Rio Amazonas produz uma pluma que cobre uma área de  $\sim 10^6 \text{ km}^2$ , estendendo-se zonalmente em 30°W



**Figura 3.9** Evolução temporal climatológica da área compreendida entre os contornos das isothermas fechadas de maiores temperaturas verificadas (preto) e as temperaturas correspondentes às respectivas isothermas (vermelho) na região de observação das águas frias (R – vide figura 3.8). A seta dupla vertical indica o mês de ocorrência mais intensa da célula de ressurgência.

**Fonte** Araújo (2018).

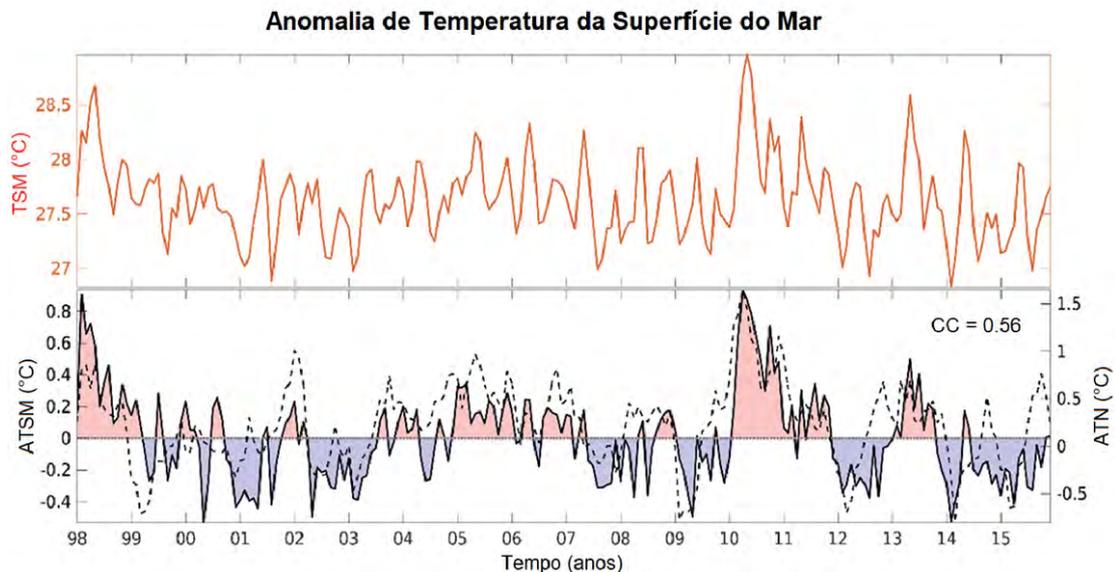
(Coles et al., 2013) podendo chegar até 25°W no final do outono boreal, período em que a NECC apresenta maior transporte (Lefèvre et al., 1998). Em contrapartida, na primavera boreal (março/junho), a ZCIT está localizada mais ao sul e a NECC perde força para leste, apresentando um transporte mínimo de 1,4 Sv, podendo, inclusive, se deslocar para oeste devido ao transporte de Ekman (Urbano et al., 2006, 2008). Nesse cenário, a NECC passa a apresentar uma menor velocidade para oeste, contudo sua amplitude aumenta podendo ser encontrada ao sul de 10°N. Nessa época do ano, a pluma das águas do Rio Amazonas é transportada para noroeste pela CNB dentro da plataforma continental e próxima à costa da PNB (Lentz & Limeburner, 1995; Silva et al., 2005; 2009; 2010).

Para entender melhor a influência da descarga do Rio Amazonas na PNB, Varona et al. (2019) investigaram o impacto da pluma na dinâmica dessa região. Os autores quantificaram o papel da pluma do Rio Amazonas e do Rio Pará na temperatura, salinidade e dinâmica das principais correntes

superficiais, bem como na retroflexão da CNB, seus vórtices e na NECC através de um modelo oceânico regional. Para tal, os autores utilizaram o modelo ROMS em dois estudos de caso:

- 1) com a presença dos rios (RRF) e
- 2) sem a presença deles (NRF).

O impacto da presença dos rios na PNB é evidente nos campos de SSS. Esses autores reportam que o ciclo sazonal do experimento com rios (RRF) está em consonância com perfis das boias PIRATA e com a distribuição espacial de produtos de satélite e reanálise. Comparado a alguns estudos prévios sobre campos de salinidade na região da PNB, os autores encontraram valores de salinidade, temperatura e profundidade da camada mistura semelhantes aos reportados na literatura (Coles et al., 2013; Korosov et al., 2015; Newinger & Toumi, 2015). A estrutura da SSS na área da retroflexão da CNB e NECC é claramente identificada no ciclo sazonal, mostrando um confinamento de salinidades mais baixas perto da costa de dezembro a fevereiro,



**Figura 3.10** Evolução temporal mensal da TSM (linha vermelha) e de sua anomalia (ATSM, linha preta contínua) dentro da área R (vide Figura 3.8), e evolução temporal média mensal do Índice Tropical do Atlântico Norte de ATSM (linha tracejada preta) no período de 1998 a 2015, a partir dos dados de TRMM-TMI e OI TSM (NOAA). As áreas vermelhas destacam os períodos de anomalias positivas e as áreas azuis destacam os períodos de anomalias negativas. **Fonte** Araújo (2018).

espalhando-se para leste ao longo da região da NECC de setembro a novembro. Além disso, as maiores velocidades das correntes são de junho a novembro, com uma estrutura vortical bem definida nos vórtices gerados na retroflexão da CNB de setembro a novembro. As diferenças nas correntes superficiais enfatizam o papel da pluma amazônica na dinâmica da retroflexão dessa corrente. O experimento RRF aumenta as correntes superficiais em 1 m/s em comparação com o experimento sem rio. A ML no experimento com rios (RRF) foi de 20 a 50 metros mais rasa sobre toda a extensão da pluma. A descarga de água doce dos rios desempenha também um papel fundamental na formação da BL. A espessura máxima da BL encontra-se na foz dos rios, estendendo-se para norte e diminuindo gradualmente sua espessura à medida que se afasta com a pluma, principalmente nos períodos de MAM e JJA. Em SON, a pluma estende-se para norte e depois retroflete para leste acompanhando a NECC (Varona et al., 2019).

Do ponto de vista ecológico, Cordeiro (2018) investigou o papel da circulação oceânica ao longo da PNB na conectividade ecológica da lagosta *Panulirus argus*, mais conhecida como lagosta espinhosa. O autor também investigou se a presença de regiões de baixa salinidade desenvolvidas pela pluma do Amazonas seriam uma barreira para o transporte dessas larvas entre as regiões da PNB e do Caribe através de simulações numéricas. De acordo com o autor, essas regiões de baixa salinidade não atuam como uma barreira física para a conectividade, embora diminuam consideravelmente o número de larvas que chegam à região caribenha. O período mais favorável à conectividade é quando ocorrem desovas entre outubro e janeiro. Para as desovas ocorridas no primeiro semestre, a conectividade é reduzida devido à presença da retroflexão da CNB e das baixas salinidades que as larvas encontram ao cruzar a região oceânica sobre a influência da pluma.

### 2.1.2. Região Nordeste e Leste

As regiões Nordeste e Leste brasileiras compreendem duas plataformas continentais com regimes hidrodinâmicos e geomorfológicos distintos: a plataforma continental leste brasileira (PCLB), de 8°S a 15°S, e a plataforma de Abrolhos-Campos (PAC), de 15°S a 23°S (Castro & Miranda, 1998; Knoppers et al., 1999).

A norte de 15°S, a plataforma continental é relativamente estreita, com aproximadamente 15 km de largura e a profundidade de quebra da plataforma ocorre em torno dos 60 m. A PCLB é dominada pela presença da CNB, da SEC e da BC. Abaixo dessa latitude até o paralelo de 23°S, a topografia é complexa. A extensão da PAC é bem variável com uma largura de 35 km na sua porção norte, aumentando na direção sul nas proximidades do Banco Royal Charlotte, onde atinge 110 km (Castro & Miranda, 1998). Em seguida, ela se estreita (~ 45 km) para novamente se estender até 190 km na altura do Banco dos Abrolhos. Mais ao sul, outra estrutura geomorfológica presente é a Cadeia Vitória-Trindade, uma longa cadeia formada de ilhas oceânicas e montes submarinos disposta na crosta oceânica em torno de 20,5°S, culminando a leste nas Ilhas de Trindade e Martin Vaz, e em direção à costa da cidade de Vitória-ES.

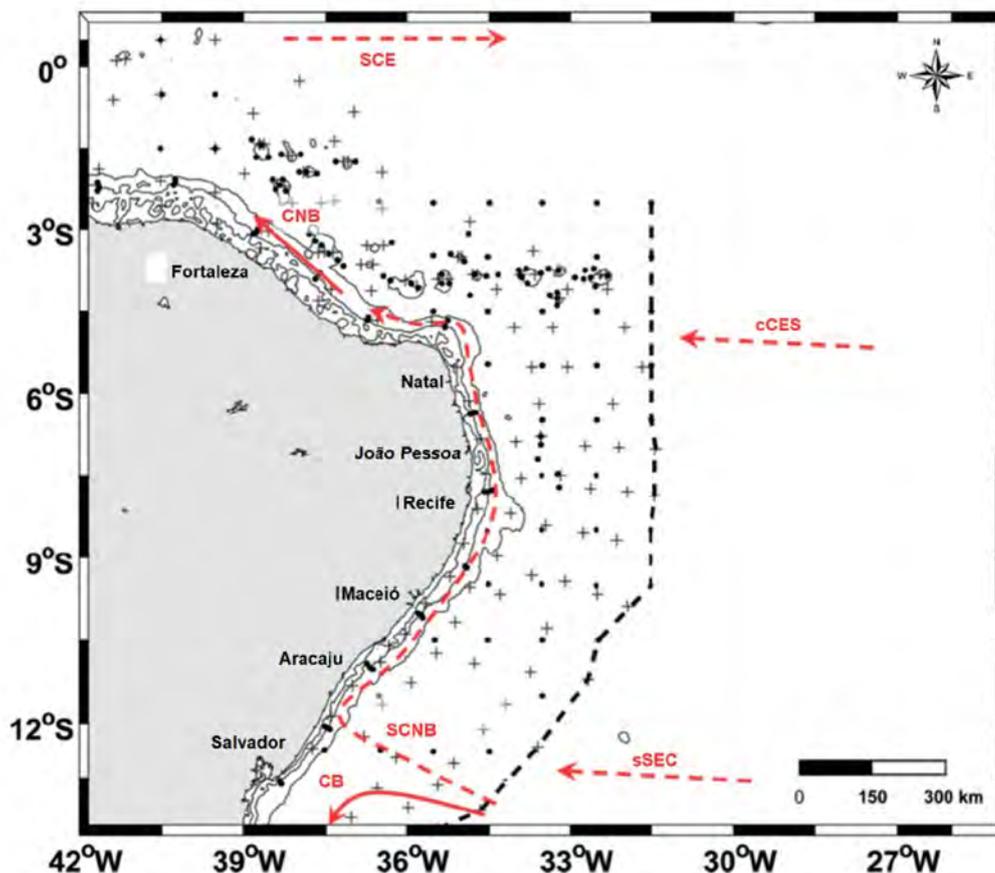
Conforme mencionado anteriormente, ao largo a distribuição das isopicnais nas camadas superiores da troposfera oceânica é controlada principalmente por variações de temperatura na profundidade da termoclina e pelo balanço E-P. Portanto, caso haja um forte balanço negativo de E-P no ATSO, a presença da BL pode isolar a porção superior da camada isohalina de águas relativamente frias da termoclina e, conseqüentemente, afetar o balanço térmico na ML e os processos de interação atmosfera-oceano.

De fato, a primeira descrição da presença da BL em águas tropicais brasileiras foi feita por Araújo et al. (2011). Esses autores observaram a presença da BL na região compreendida entre 0°30'N–14°S

e  $31^{\circ}24'$ – $41^{\circ}48'W$  através de levantamento oceanográfico das propriedades físicas da água do mar ao largo da costa N-NE Brasileira a bordo do NOc. Antares (H-40) da Marinha do Brasil durante o Programa REVIZEE (Fig. 3.11). De acordo com os resultados, os autores observaram camadas de barreira com espessuras maiores do que 60 m de profundidade ao largo e na porção mais ao sul da área de estudo durante o final do inverno austral. Mesmo durante o verão austral, uma BL com espessura de 30 m foi observada em toda a região (Fig. 3.12). De acordo com esses autores, a formação da BL parece estar associada à advecção

de águas de máxima salinidade formadas na região do giro subtropical do Atlântico Sul e transportadas em direção à costa Nordeste-Leste brasileira pelo ramo sul da SEC (**ex**: sSEC) e pelo sistema de correntes de contorno CNB/NBUC (Stramma et al., 2005). A predominância de camadas barreira mais espessas na porção Sul (Norte) durante o final do inverno (durante o verão) indica uma associação com a posição mais ao sul (norte) da sSEC.

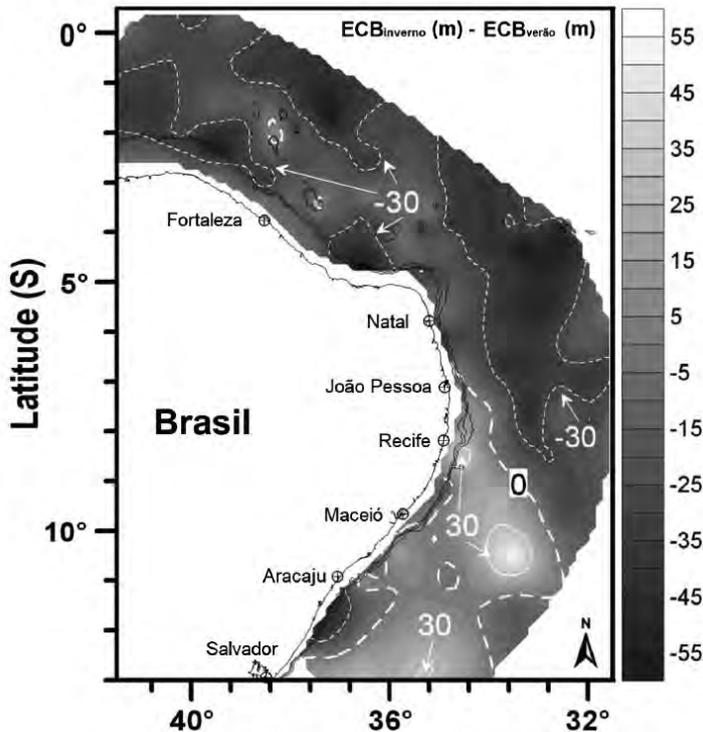
Apesar da evidente importância da NBUC para as circulações de larga e mesoescalas, uma linha de 5 fundeios da componente alemã do Projeto



**Figura 3.11** Área de estudo com indicação das isóbatas de 20 m, 100 m e 2.000 m. **A)** os pontos e cruzes indicam, respectivamente, as estações de CTD durante o final do inverno austral (agosto-outubro 1995) e verão (janeiro-abril 1997) austrais. A linha tracejada preta indica a área limitada ao longo do qual foram investigadas a salinidade e as origens da massa hídrica (diagramas T/S). Um esquema das correntes de superfície (sub-superfície) é representado por setas vermelhas sólidas (tracejadas): CNB = Corrente Norte do Brasil; EUC = Subcorrente Equatorial; NBUC = Subcorrente Norte do Brasil; c/sSEC = ramo central/sul da Corrente Equatorial Sul; BC = Corrente do Brasil. **Fonte** Araújo et al. (2011).

CLIVAR- *Tropical Atlantic Variability* (Schott et al., 2005) estendendo-se por 225 km ao longo da NBUC entre 10°S e 11,5°S durante o período de março de 2000 a agosto de 2004, indicam a presença de sinais intra-sazonais ao largo da costa brasileira em 11°S (Veleda et al., 2012). Embora alguns trabalhos descrevam um modo dominante na variabilidade da NBUC entre 50 e 100 dias (**ex:** Von Schuckmann, 2006), o flanco ocidental da NBUC apresenta modos dominantes de variabilidade com flutuações de alta frequência na faixa de 14 a 21 dias.

De acordo com Veleda et al. (2012), teoricamente, essas flutuações intra-sazonais podem ser excitadas através de diversos processos dinâmicos locais ou remotos, tais como a ação direta dos ventos, processos de instabilidade do escoamento médio,

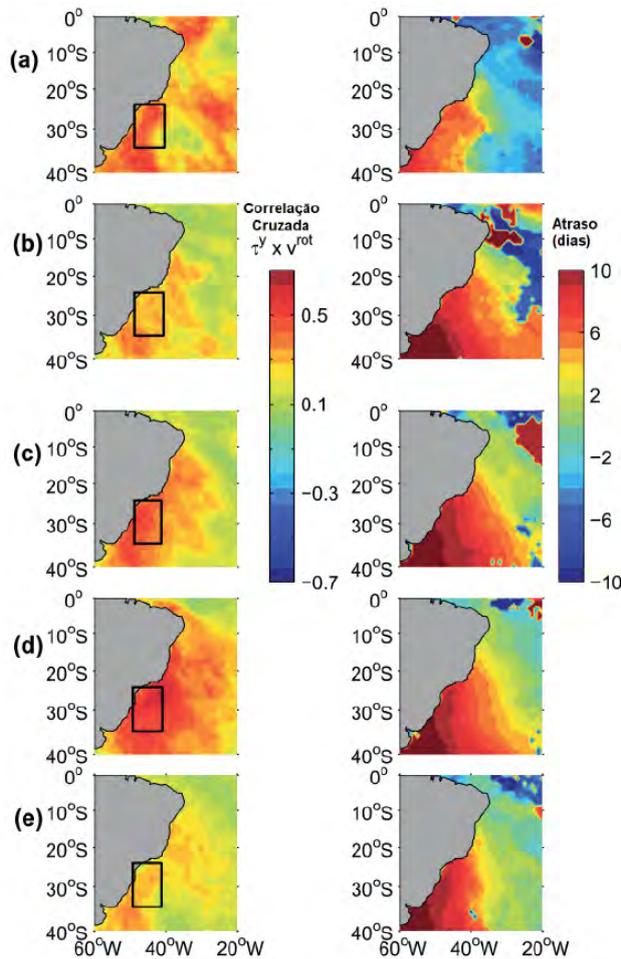


**Figura 3.12.** Distribuição espacial da diferença da espessura da camada de barreira (BLT) entre o final do inverno (agosto-outubro de 1995) e verão (janeiro-abril de 1997) austrais. Linhas sólidas finas (tracejadas) representam valores positivos (negativos). Linhas tracejadas grandes representam valores nulos. **Fonte** Araújo et al. (2011).

efeito de ressonância devido à geometria da linha de costa e pela presença dinâmica do guia de ondas (**ex:** “*waveguide*”) devido à ação remota da tensão de cisalhamento dos ventos. De acordo com os resultados desses autores, essa banda de flutuações de alta frequência é gerada pela presença de Ondas Aprisionadas na Costa (CTWs). Essa família de ondas é responsável pela maior parte da variabilidade observada nas correntes sobre a plataforma continental em algumas regiões (**ex:** Pietri et al., 2014; Illig et al., 2018). Segundo Tomczak (1998), o ponto de partida para a compreensão da geração e propagação das CTWs baseia-se no princípio da geostrofia. Esse balanço estabelece uma situação de equilíbrio entre as forças de Coriolis e de gradiente de pressão, onde ambas atuam perpendicularmente à direção do escoamento. Entretanto, em regiões costeiras, os centros de alta e baixa pressão não são uniformes como os observados ao largo e longe de contornos físicos (**ex:** continentes e ilhas), mas podem “inclinarem-se contra a costa”. Isso implica que a corrente pode fluir ao longo das isóbaras somente em um lado dos centros de pressão e não em direção à costa. Portanto, o resultado líquido desse balanço é o transporte de águas de um lado do centro de pressão para o outro, ou uma redução/elevação do nível do mar ao longo da costa. Essas variações equivalem à alternância entre centros de baixa/alta pressão que já não são mais fixos, mas que se deslocam ao longo da costa preferencialmente. Além disso, segundo Allen (1980) e Dale et al. (2001), duas propriedades são importantes para a presença de CTWs: uma física, oriunda da estratificação do campo de massa, e outra morfodinâmica, devido ao perfil da topografia de fundo da plataforma continental e talude. A combinação desses dois fatores aponta as ondas internas de Kelvin como fortes candidatas responsáveis pelas flutuações de alta frequência entre 2 a 3 semanas observadas em 11°S.

De fato, através de uma série de ferramentas estatísticas e matemáticas, Veleda et al. (2012) reportam a presença de correlações significativas entre o estresse de vento meridional, entre os

paralelos de 22° e 36°S ao largo da costa brasileira, e correntes paralelas à costa em 11°S durante o inverno e primavera austrais (Fig. 3.13). Na coluna d'água a 11°S, a máxima correlação dos ventos remotos com as correntes ao longo da costa (Fig. 3.14) está nos primeiros 100 m da coluna d'água.

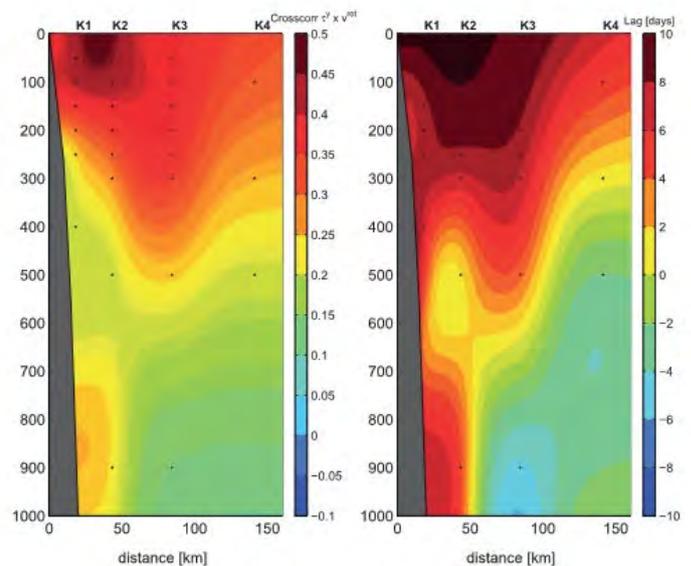


**Figura 3.13** (Esquerda) Correlação cruzada entre o cisalhamento meridional do vento e correntes ao longo da costa a 100 m de profundidade para os fundeios **A)** o K1, 3 / 2002–1 / 2003 e **B)** 6 / 2003–8 / 2004, **C)** fundeio K2, 3 / 2002–5 / 2004, **D)** fundeio K3, 6 / 2003–8 / 2004 e **E)** fundeio K4, 3 / 2002–5 / 2004. (Direita) As defasagens correspondentes. O quadrado em preto nos mapas marca a área de máxima correlação.

**Fonte** Veleda et al. (2012).

Essa correlação mostra uma resposta das correntes defasadas em 8 a 10 dias em relação a entrada de frentes frias ocorridas entre o inverno e primavera na região Sul e Sudeste do Brasil. Durante a entrada de frentes frias ocorre uma inversão brusca dos ventos de Nordeste da alta subtropical para ventos de Sudoeste com a entrada do centro de baixa pressão, causando uma oscilação da coluna d'água. As distâncias entre a área da forçante dos ventos e o fundeio em 11°S, bem como as defasagens correspondentes, indicam uma velocidade de propagação 285,63 km dia<sup>-1</sup>, ao longo da costa brasileira. Tal propagação é compatível com ocorrências de CTWs.

Como descrito em Enfield & Allen (1980), esses sinais intra-sazonais propagam-se em direção ao equador mantendo a costa a sua esquerda e com velocidades ao longo da costa consistentes com a propagação de ondas internas de Kelvin.



**Figura 3.14** Correlação cruzada e defasagem (em dias) entre o cisalhamento meridional do vento médio na área entre 22°S–36°S e 40°W–50°W e correntes no fundeio a 11°S.

**Fonte** Veleda et al. (2012).

### 3. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com base no exposto, fica evidente que o oceano Atlântico Tropical (AT), localizado em torno da latitude zero do equador geográfico, é uma região de alta complexidade hidrotermodinâmica, cobrindo uma gama de escalas temporais e fenômenos oceanográficos relevantes para as diversas subáreas da Oceanografia Física. Do ponto de vista global, a margem oeste do AT funciona como um conduto, conectando os ramos sul e norte da circulação meridional do oceano Atlântico, além de receber o aporte de água doce do Rio Amazonas.

### REFERÊNCIAS

- ALFORD, M. H.; T. PEACOCK, J. A.; MACKINNON, J. D.; NASH, M. C.; BUIJSMAN, L. R. et al. **The formation and fate of internal waves in the South China Sea**. *Nature*, 5(21): p. 65–69, 2015. doi:10.1038/nature14399
- ALLEN, J. S. **Models of wind-driven currents on the continental shelf**. *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 12, p. 389–433, 1980. doi:10.1146/annurev.fl.12.010180.002133
- ANDO, K.; MCPHADEN, M. J. **Variability of surface layer hydrography in the tropical Pacific Ocean**. *J. Geophys. Res.*, 102, p. 23063–23078, 1997.
- ARAUJO, J. M. **Variabilidade espaço-temporal da célula de ressurgência próximo à quebra da plataforma do Amazonas**. Monografia de Conclusão de Curso, Universidade Federal de Pernambuco, PE, 2018. 70 p.
- ARAUJO, J.; MEZILET, Y. **Variabilit. de la cellule d’upwelling au large de l’embouchure de l’Amazone**. Rapport de Stage M1-AOC, UPS-OMP/LEGOS, 2016. 22 p.
- ARAUJO, M.; LIMONGI, C.; SERVAIN, J.; SILVA, M.; LEITE, F. S.; VELEDA, D.; LENTINI, C. A. D. **Salinity-induced mixed and barrier layers in the southwestern tropical Atlantic Ocean off the northeast of Brazil**. *Ocean Sci.*, 7, p. 63–73, 2011. doi:10.5194/os-7-63-2011.
- BEARDSLEY, R. C.; CANDELA, J.; LIMBURNER, R.; GEYER, W. R.; LENTZ, S. J.; CASTRO, B. M.; CACCHIONE, D.; CARNEIRO, N. **The M2 tide on the Amazon shelf**. *J. Geophys. Res.*, 100 (C2), p. 2283–2319, 1995.
- BOURLÈS, B.; GOURIOU, Y.; CHUCHLA, R. **On the circulation in the upper layer of the western equatorial Atlantic**. *J. Geophys. Res.*, 104 (C9), p. 21151–21170, 1999. doi:10.1029/1999jc900058
- BRANDT, P.; CANIAUX, G.; BOURLÈS, B.; LAZAR, A.; DENGLER, M.; FUNK, A.; HORMANN, V.; GIORDANI, H.; MARIN, F. **Equatorial upper-ocean dynamics and their interaction with the West African monsoon**. *Atmos. Sci. Lett.*, 12, p. 24–30. 2011. doi:10.1002/asl.287
- BRANDT, P.; SCHOTT, F.A.; PROVOST, C.; KARTAVTSEFF, A.; HORMANN, V.; BOURLÈS, B.; FISCHER, J. **Circulation in the central equatorial Atlantic: Mean and intraseasonal to seasonal variability**. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L07609. 2006. doi:10.1029/2005GL025498
- BRUTO, L.; ARAUJO, M.; NORIEGA, C.; VELEDA, D.; LEFÈVRE, N. **Variability of CO2 fugacity at the western edge of the tropical Atlantic Ocean from the 8°N to 38°W PIRATA buoy**. *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 78, p. 1-13, 2017. doi:10.1016/j.dynatmoce.2017.01.003
- CARTON, J. A.; CAO, X.; GIESE, B. S.; DA SILVA, A. M. **Decadal and interannual SST variability in the Tropical Atlantic Ocean**. *J. Phys. Oceanogr.*, 26, 11651175, 1996.
- CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B. **Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S**. *The Sea*, John Wiley & Sons: New York, v. 11, p. 209–251, 1998.
- CINTRA, M. M.; LENTINI, C. A. D.; SERVAIN, J.; ARAUJO, M.; MARONE, E. **Physical processes that drive the seasonal evolution of the Southwestern Tropical Atlantic Warm Pool**. *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 72, p. 1-11, 2015. doi:10.1016/j.dynatmoce.2015.08.00
- COE, M. T.; COSTA, M. H.; BOTTA, A.; BIRKETT, C. M. **Long-term simulations of discharge and floods in the Amazon basin**. *J. Geophys. Res.*, 107(D20), 2002. doi:10.1029/2001JD000740
- COE, M. T.; COSTA, M. H.; HOWARD, E. A. **Simulating the surface waters of the Amazon River basin: impacts of new river geomorphic and parameterizations**. *Hydrological processes*, 22(14), p. 2542-2553, 2007.
- COLES, V. J.; BROOKS, M.T.; HOPKINS, J.; STUKEL, M.R.; YAGER, P.L.; HOOD, R.R. **The pathways and properties of the Amazon river plume in the tropical North Atlantic Ocean**. *J. Geophys. Res. Oceans*, 118, p. 6894–6913, 2013.

- CORDEIRO, V. P. N. **Conectividade ecológica entre a margem equatorial brasileira e o Caribe**. Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar, Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2018. 48 p.
- DAGG, M.; BENNER, R.; LOHRENZ, S.; LAWRENCE, D. **Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: plume processes**. *Cont. Shelf Res.*, 24(7-8), p. 833-858, 2004.
- DALE, A. C.; HUTHNANCE, J. M.; SHERWIN, T. J. **Coastal-Trapped Waves and Tides at Near-Inertial Frequencies**. *J. Phys. Oceanogr.*, 31, p. 2958-2970, 2001.
- DA SILVA, J.C.B, M.C. BUIJSMAN, AND J.M. MAGALHAES. **Internal waves on the upstream side of a large sill of the Mascarene Ridge: A comprehensive view of their generation mechanisms and evolution**. *Deep-Sea Res., Part I*, 99:87–104, 2015. doi:10.1016/j.dsr.2015.01.002
- DE BOYER MONTÉGUT, C. B.; MIGNOT, J.; LAZAR, A.; CRAVATTE, S. **Control of salinity on the mixed layer depth in the world ocean: 1. General description**. *J. Geophys. Res.*, 112, C06011, 2007. doi:10.1029/2006JC003953
- DELCROIX, T.; MCPHADEN, M.: **Interannual sea surface salinity and temperature changes in the western Pacific warm pool during 1992–2000**. *J. Geophys. Res.*, 107(C12), 8002, 2002. doi:10.1029/2001JC000862
- ENFIELD, D.B.; LEE, S.K.; WANG, C. **How are large western hemisphere warm pools formed?** *Prog. Oceanogr.*, 70, p. 346–365, 2006. doi:10.1016/j.pocean.2005.07.006
- ENFIELD, D. B.; MAYER, D. A. **Tropical Atlantic sea surface temperature variability and its relation to El Niño/Southern Oscillation**, *J. Geophys. Res.*, 102(C1), 929945, 1997.
- ENFIELD, D. B.; MESTAS-NUNEZ, A. M.; MAYER, D. A.; CIDSERRANO, L. **How ubiquitous is the dipole relationship in the tropical Atlantic sea surface temperatures?** *J. Geophys. Res.*, 104, 78417848, 1999.
- FARMER, D. M.; L. ARMI. **The generation and trapping of internal solitary waves over topography**. *Science*, 283: p. 188–190, 1999. doi:10.1126/science.283.5399.188
- FOLTZ, G. R.; MCPHADEN, M. J. **Impact of barrier layer thickness on SST in the central tropical North Atlantic**. *J. Climate*, 22, p. 285–299, 2009.
- FOLTZ G. R.; GRODSKY, S. A.; CARTON, J. A.; MCPHADEN, M. J. **Seasonal mixed layer heat budget of the tropical Atlantic Ocean**, *J. Geophys. Res.*, 108 (C5), 3146, 2003. doi:10.1029/2002JC001584
- FONSECA, C. A.; GONI, G. J.; JOHNS, W. E.; CAMPOS, E. J. D. **Investigation of the North Brazil Current retroflexion and North Equatorial Countercurrent variability**. *Geophys. Res. Lett.*, 31 (21): p. 1–5, 2004. doi:10.1029/2004GL020054
- FRANKIGNOUL, C.; CZAJA, A.; L’HEVEDER, B. **Airsea feedback in the North Atlantic and surface boundary conditions for ocean models**. *J. Climate*, 11, 23102324, 1998.
- FRATANTONI, D. M.; JOHNS, W. E.; TOWNSEND, T. L.; HURLBURT, H. E. **Low latitude circulation and mass transport pathways in a model of the tropical Atlantic Ocean**. *J. Phys. Oceanogr.*, 30, 19441966, 2000.
- GEYER W. R.; BEARDSLEY, R. C.; LENTZ, S. J.; CANDELA, J.; LIMEBURNER R.; JOHNS, W. E.; CASTRO, B. M.; SOARES, I.D. **Physical oceanography of the amazon shelf**. *Cont. Shelf Res.*, 5/6 (16), p. 575–616, 1996.
- HASTENRATH, S. **Circulation and teleconnection mechanisms of Northeast Brazil droughts**. *Prog. Oceanogr.*, 70, p. 407–415, 2006. doi:10.1016/j.pocean.2005.07.004
- HASTENRATH, S.; HELLER, L. **Dynamics of climatic hazards in northeast Brazil**. *Quart. J. R. Meteor. Soc.*, 110, 411425, 1977.
- HORMANN, V.; LUMPKIN, R.; FOLTZ, G.R. **Interannual North Equatorial Countercurrent variability and its relation to tropical Atlantic climate modes**. *J. Geophys. Res. Ocean.*, 117, p. 1–17. 2012. doi:10.1029/2011JC007697
- HOUNSOU-GBO, G.A.; ARAUJO, M.; BOURLÈS, B.; VELEDA, D.; SERVAIN, J. **Tropical Atlantic contributions to strong rainfall variability along the Northeast Brazilian coast**. *Adv. Meteorol.*, p. 1–13, 2015. doi:10.1155/2015/902084
- HUTHNANCE, J. **Internal tides and waves near the continental shelf edge**. *Geophysical & Astrophysical Fluid Dynamics*, 48 (1-3), p. 81–106, 1989.
- IBÁNHEZ, J. S. P.; DIVERRÈS, D.; ARAUJO, M.; LEFÈVRE, N. **Seasonal and interannual variability of sea-air CO<sub>2</sub> fluxes in the tropical Atlantic affected by the Amazon River plume**. *Global Biogeochem. Cycles* 28 (9), p. 1–16. 2015. doi:10.1002/2015GB005110
- IBÁNHEZ, J. S. P.; ARAUJO, M.; LEFÈVRE, N. **The overlooked tropical oceanic CO<sub>2</sub> sink**. *Geophys. Res. Lett.*, 43 (8), p. 3804–3812. 2016. doi:10.1002/2016GL068020

ILLIG, S.; BACHÈLERY, M. L.; CADIER, E. **Subseasonal Coastal-Trapped Wave Propagations in the Southeastern Pacific and Atlantic Oceans: 2.** Wave Characteristics and Connection with the Equatorial Variability. *J. Geophys. Res.*, 123, p. 3942-3961, 2018. doi:10.1029/2017JC013540

JACKSON, C. R.; DA SILVA, J. C. B.; JEANS, G. **The generation of nonlinear internal waves.** *Oceanography*, 25(2), p. 108–123, 2012. doi:10.5670/oceanog.2012.46

JOHNS, W.E.; LEE, T.N.; BEARDSLEY, R.C.; CANDELA, J.; LIMEBURNER, R. AND CASTRO, B.M. **Annual cycle and variability of the north brazil current.** *J. Phys. Oceanogr.*, 28, p. 103–128, 1998.

JOHNS, W.E.; LEE, T.N.; SCHOTT, F.; ZANTOPP, R.J. AND EVANS, R.H. **The north brazil current retroflection: seasonal structure and eddy variability.** *J. Geophys. Res.*, 95, 22103–22120, 1990.

KNOPPERS, B.; EKAU, W.; FIGUEIREDO, A. **The coast and shelf of east and northeast Brazil and material transport.** *Geo-Marine Letters*, 19, p. 171–178, 1999. doi:10.1007/s003670050106

KOROSOV, A.; COUNILLON, F.; JOHANNESSEN, J.A. **Monitoring the spreading of the Amazon freshwater plume by MODIS, SMOS, Aquarius, and TOPAZ.** *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, p. 268–283, 2015.

KOUADIO, Y.K.; SERVAIN, J.; MACHADO, L.A.T.; LENTINI, C.A.D. **Heavy rainfall episodes in the Eastern Northeast Brazil linked to large-scale ocean-atmosphere conditions in the tropical Atlantic.** *Adv. Meteorol.*, 1–16, 2012. doi:10.1155/2012/369567

KUMAR, S. P.; NARVEKAR, J. **Seasonal variability of the mixed layer in the central Arabian Sea and its implication on nutrients and primary productivity.** *Deep-Sea Research II*, 52 (2005) p. 1848–1861, 2005. doi:10.1016/j.dsr.2.2005.06.002

LAZAR, A.; MURTUGUDDE, R.; BUSALACCHI, A. J. **A model study of temperature anomaly propagation from the subtropics to tropics within the South Atlantic thermocline.** *Geophys. Res. Lett.*, 28, 12711274, 2001.

LEFÈVRE, N., DIVERRÈS, D., GALLOIS, F. **Origin of undersaturation in the western tropical Atlantic.** *Tellus B* 62, p. 595–607, 2010.

LENTINI, C. A. D.; MAGALHÃES, J. M.; DA SILVA, J. C. B.; LORENZETTI, J. A. **Transcritical flow and generation of internal solitary waves off the Amazon River: Synthetic aperture radar observations and interpretation.** *Oceanography*, 29(4), 2016. doi:10.5670/oceanog.2016.88

LENTZ, S. J.; LIMEBURNER, R. **The Amazon River plume during AMASSEDs: Spatial characteristics and salinity variability.** *J. Geophys. Res.*, 100 (C2), p. 2355–2375, 1995.

LINDZEN, R. S.; NIGAM, S. **On the role of sea surface temperature gradients in forcing low level winds and convergence in the tropics.** *J. Atmos. Sci.*, 44, 24182436, 1987.

LUKAS, R.; LINDSTRÖM, E. **The mixed layer of the western equatorial Pacific Ocean,** *J. Geophys. Res.*, 96, p. 3343–3357 (Suppl.), 1991.

MAGALHÃES, J. M.; DA SILVA, J. C.; BUIJSMAN, B. M.C.; GARCIA, C. A. E. **Effect of the North Equatorial Counter Current on the generation and propagation of internal solitary waves off the Amazon shelf (SAR observations).** *Ocean Science*, 12: p. 243–255, 2016. doi:10.5194/os-12-243-2016

MELVILLE, W. K.; K.R. HELFRICH. **Transcritical two-layer flow over topography.** *Journal of Fluid Mechanics*, 178: p. 31–52, 1987. doi:10.1017/S0022112087001101

MOURA, A. D.; SHUKLA, J. **On the dynamics of droughts in northeast Brazil: observations, theory, and numerical experiments with a general circulation model.** *J. Atmos. Sci.*, 38, 26532675, 1981.

NETO, A. V. N.; SILVA, A. C. **Seawater temperature changes associated with the North Brazil current dynamics.** *Ocean Dynamics*, v. 64, p. 13-27, 2014.

NEWINGER, C., TOUMI, R. **Potential impact of the colored Amazon and Orinoco plume on tropical cyclone intensity.** *J. Geophys. Res. Oceans*, 120, p. 1296–1317, 2015.

NITTROUER, C. A.; DEMASTER, D. J. **The Amazon shelf setting: tropical, energetic, and influenced by a large river.** *Cont. Shelf Res.*, 16 (5), p. 553–573, 1996.

NOBRE, P.; SHUKLA, J. **Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the Tropical Atlantic and South America.** *J. Climate*, 9, 24642479. 1996.

PAILLER, K.; BOURLÈS, B.; GOURIOU, Y. **The barrier layer in the western Atlantic Ocean.** *Geophys. Res. Lett.*, 26, p. 2069–2072, 1999.

PEIXOTO, J. P.; OORT, A. H. **Physics of Climate.** Springer-Verlag, New York, 1992.

- PIETRI, A.; Echevin, V.; TESTOR, P.; CHAIGNEAU, A.; MORTIRE, L.; GRADOS, C.; ALBERT, A. **Impact of coastal-trapped wave on the near-coastal circulation of the Peru upwelling system from glider data.** *J. Geophys. Res.*, 73, p. 14-30, 2014. doi: 10.1016/j.csr.2013.11.015
- SCHOTT, F. A.; DENGLER, M.; ZANTROPP, R.; STRAMMA, L.; FISCHER, J.; BRANDT, P. **The shallow and deep western boundary circulation of the South Atlantic at 5° – 11°S.** *J. Phys. Oceanogr.*, 35, p. 2031–2053, 2005.
- SCHOTT, F. A.; DENGLER, M.; BRANDT, P.; AFFLER, K.; FISCHER, J.; BOURLES, B.; GOURIOU, Y.; MOLINARI, R. L.; RHEIN, M. **The zonal currents and transports at 35 W in the tropical Atlantic.** *Geophys. Res. Letters*, 30, 1349, 2003. doi:10.1029/2002GL016849
- SCHOTT, F. A.; BRANDT, P.; HAMMANN, M.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. **On the boundary flow off Brazil at 510 S and its connection to the interior tropical Atlantic.** *Geophys. Res. Letters*, 29, 1840, 2002. doi:10.1029/2002GL014786
- SCHOTT, F. A.; FISCHER, J.; STRAMMA, L. **Transports and pathways of the upper-layer circulation in the western tropical Atlantic.** *J. Phys. Oceanogr.*, 28, p. 1094-1928, 1998.
- SILVA, A. C.; ARAUJO, M.; MEDEIROS, C.; SILVA, M.; BOURLÈS, B. **Seasonal changes in the mixed and barrier layers in the western equatorial Atlantic.** *Braz. J. Oceanogr.*, 53 (3/4), p. 83–98, 2005.
- SILVA, M.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PENVEN, P.; LENTINI, C. A. D. **High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic.** *Ocean Modelling*, 30, p. 256–269, 2009. doi:10.1016/j.ocemod.2009.07.002
- SILVA, A. C.; ARAUJO, M.; BOURLÈS, B. **Seasonal variability of the Amazon River plume during REVIZEE program.** *Trop. Oceanogr.*, 38, p. 70–81, 2010.
- SPRINTALL, J.; TOMCZAK, M. **Evidences of the barrier layer in the surface layer of the tropics.** *J. Geophys. Res.*, 97, p. 7305–7316, 1992.
- STRAMMA, L.; SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean,** *Deep-Sea Res.*, 46B, p. 279–303, 1999.
- SWENSON, M. S.; HANSEN, D. V. **Tropical Pacific Ocean mixed layer heat budget: The Pacific cold tongue.** *J. Phys. Oceanogr.*, 29, p. 69–81, 1999.
- TANGUY, Y.; ARNAULT, S.; LATTES, P. **Isothermal, mixed, and barrier layers in the subtropical and tropical Atlantic Ocean during the ARAMIS experiment.** *Deep-Sea Res. Pt. I*, 57, p. 501–517, 2010.
- TAYLOR, M. A.; ENFIELD, D. B.; CHEN, A. A. **Influence of the tropical Atlantic versus the tropical Pacific on Caribbean rainfall.** *J. Geophys. Res.*, 107 (C9), 3127, 2002. doi: 10.1029/2001JC001097
- TOMCZAK, M. **Shelf and Coastal Oceanography.** Capítulo 8, <https://www.mt-oceanography.info/ShelfCoast/chapter08.html>, 1998. Acessado em 01/10/2019.
- URBANO, D. F.; DE ALMEIDA, R. A. F.; NOBRE, P. **Equatorial Undercurrent and North Equatorial Countercurrent at 38°W: a new perspective from direct velocity data.** *J. Geophys. Res.*, 113 (C4), p. 1–16, 2008. doi:10.1029/2007JC004215
- URBANO, D. F.; JOCHUM, M.; DA SILVA, I. C. A. **Rediscovering the second core of the Atlantic NECC.** *Ocean Modelling*, 12, p. 1-15, 2006. doi:10.1016/j.ocemod.2005.04.003
- VARONA, H. L.; VELEDA, D.; SILVA, M.; CINTRA, M.; ARAUJO, M. **Amazon River plume influence on Western Tropical Atlantic dynamic variability.** *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 85, p. 1–15, 2019. doi:10.1016/j.dynatmoce.2018.10.002
- VELEDA, D.; ARAUJO, M.; ZANTOPP, R.; MONTAGNE, R. **Intraseasonal variability of the North Brazil Undercurrent forced by remote winds.** *Journal of Geophysical Research*, 117, C11024, 2012. doi:10.1029/2012JC008392
- VIALARD, J.; DELECLUSE, P. **An OGCM study for TOGA decade. Part II: Barrier layer formation and variability.** *J. Phys. Oceanogr.*, 28, p. 1089–1106, 1998.
- SERVAIN, J.; CLAUZET, G.; WAINER, I. **Modes of tropical Atlantic climate variability observed by PIRATA.** *Geophys. Res. Letters*, 30, 2003. doi: 10.1029/2002GL015147
- XIE, S. P.; CARTON, J. A. **Tropical Atlantic variability: Patterns, mechanisms, and impacts.** *Earth's Clim. Ocean. Interact.*, p. 121–142, 2004.
- WANG, C.; ENFIELD, D. B. **A Further Study of the Tropical Western Hemisphere Warm Pool.** *J. Climate*, p. 1476-1493, 2003.
- WANG, C.; ENFIELD, D. B. **The tropical Western Hemisphere warm pool.** *Geophys. Res. Letters*, 28, 8, p. 1635-1638, 2000GL011763, 2001.

# INTERAÇÕES ENERGÉTICAS OCEANO-ATMOSFERA

4

David MENDES<sup>1</sup>

Monica Cristina Damião MENDES  
(pesquisadora Consultora)

Marcio Machado CINTRA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte  
UFRN



## 1. TRANSFERÊNCIA DE ENERGIA NO ACOPLAMENTO OCEANO-ATMOSFERA

A radiação solar é a força motriz final para todos os movimentos na atmosfera e no oceano, e dá origem a ciclos diurnos e sazonais, assim como, na distribuição da radiação solar devido às mudanças orbitais da Terra. Entretanto, o sistema oceano-atmosfera não apresenta apenas ciclos repetidos e regulares de radiação solar, mas também variabilidade que não está relacionada com a radiação solar.

Uma das características mais notáveis da Terra, é que a atmosfera e o oceano atuam como um sistema interdependente. Os estudos e as observações do sistema atmosfera-oceano, mostram que uma condição anômala na atmosfera, por exemplo, implica em uma condição de impacto no oceano, e vice-versa. Além disso, esses dois sistemas, estão interligados por ciclos de feedbacks complexos, alguns dos quais, reforçam uma modificação e outros neutralizam essas modificações. Por exemplo, as correntes oceânicas superficiais, são um dos resultados direto da circulação atmosférica, induzida pelo vento em superfície. Por outro lado, certos fenômenos atmosféricos se manifestam nos oceanos, como por exemplo os ciclones tropicais, mencionando mais a baixo neste capítulo e o *El Niño*-Oscilação Sul (ENOS).

Para uma compreensão melhor do comportamento da atmosfera e do oceano, suas interações e relações mútuas devem ser estudadas. A energia solar aquece a superfície da Terra e cria ventos atmosféricos que, por sua vez, conduzem a maior parte das correntes e ondas superficiais nos oceanos. A energia solar é, portanto, responsável pelos movimentos atmosféricos e oceânicos. As variações na radiação solar acionam um “motor” global na interface oceano-atmosfera, criando um diferencial de pressão e densidade que agitam as correntes e ondas na atmosfera e no oceano. É importante mencionar que, a atmosfera e o oceano, usam a alta capacidade de calor da água para trocar constantemente essa energia, moldando os padrões climáticos globais.

A interação entre o oceano e atmosfera, têm implicações importantes no processo de aquecimento global, e vários estudos recentes (Mann et al., 1998; Trossman et al., 2016; Maffre et al., 2018), confirmam que a atmosfera está experimentando um aquecimento sem precedentes, como resultado das emissões humanas de dióxido de carbono e outros gases do Efeito Estufa, que absorvem e predem o calor na atmosfera. Este calor aprisionado na atmosfera da Terra, está sendo transferido para os oceanos e tem o potencial de causar modificações generalizadas no ecossistema marinho (Pedlosky, 1987).

### 1.1. Fluxo de calor oceânico e suas implicações

Perto dos polos, a maior parte da radiação solar incidente atinge a superfície da Terra em ângulos pequenos. Além disso, o gelo tem um alto albedo, e desta forma, mais energia é refletida de volta para o espaço do que absorvida. Em contraste, entre 40° de latitude Norte e 40° de latitude Sul, a radiação atinge a superfície da Terra em ângulos mais altos portanto, mais energia é absorvida do que refletida de volta para o espaço. Já sabemos que os principais processos interativos entre o oceano e a atmosfera (Fig. 4.1), envolvem trocas de calor, evaporação e modificações nos ventos. Os efeitos desses processos, são a produção de uma camada vertical no oceano que é de grande significado climático, citamos:

1 Em uma superfície oceânica, os ventos produzem uma camada superficial termicamente misturada, variando em algumas dezenas de metros de profundidade na direção dos polos, aproximadamente em 60° de latitudes, a profundidade pode variar de 400 a 600 metros, e na faixa equatorial, essa profundidade varia entre 100 e 200 metros (Akitomo, 1999).

2 Abaixo da camada de mistura relativamente quente, está a termoclina, uma camada na qual a temperatura diminui e a densidade aumenta (picnoclina) acentuadamente com a profundidade. A camada termoclina, dentro da qual a estratificação estável, tende a inibir a mistura vertical, atuando como barreira entre a água superficial mais quente e a água mais fria da camada profunda. Em um oceano aberto, e entre as latitudes de 60° Sul e 60° Norte, a camada termoclina se estende em profundidade entre 200 metros e um máximo de 1.000 metros, no equador entre 200 e 800 metros. Em latitudes altas, em torno de 60° de latitude, a água mais fria da camada profunda se aproxima da superfície. A localização do gradiente de temperatura mais acentuado é denominada de termoclina permanente, que apresenta um efeito inibidor dinâmico no oceano, muito semelhante ao de uma grande inversão atmosférica. Entretanto, as trocas de calor ocorrem entre o oceano e a atmosfera, por mistura turbulenta acima da termoclina permanente, bem como por ressurgência (Martinson, 1990; Akitomo, 1999).

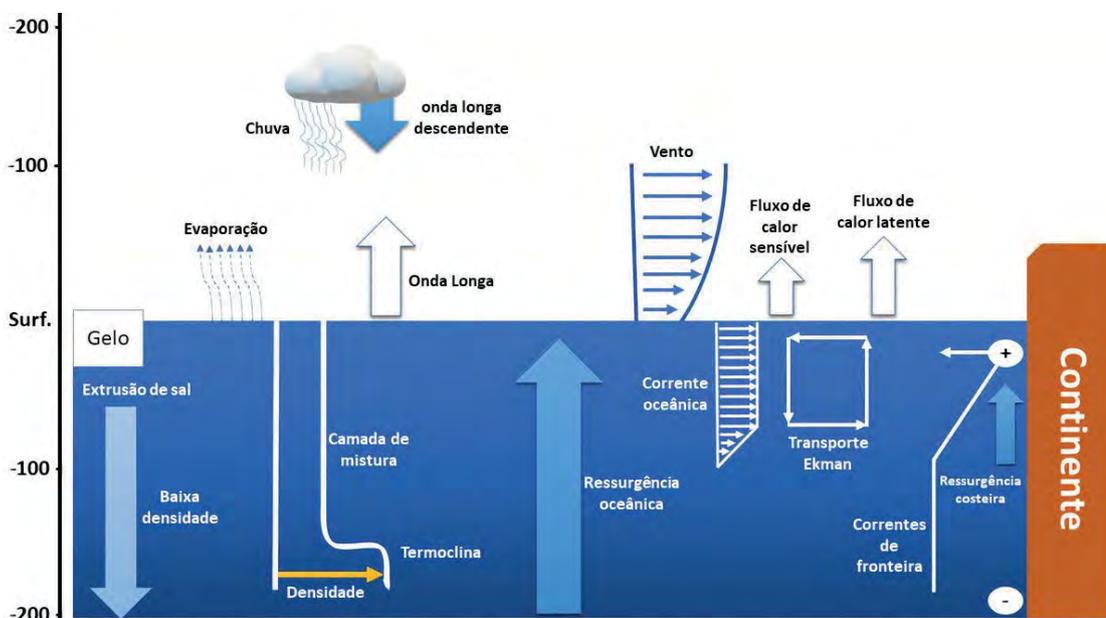
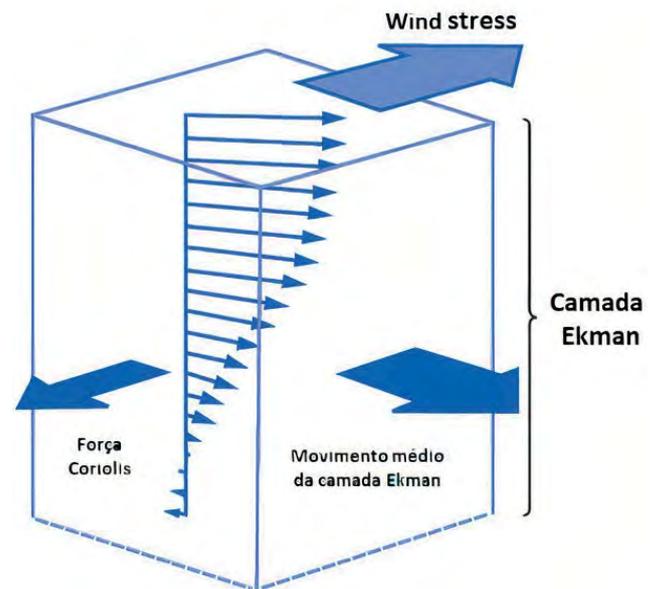


Figura 4.1 Principais processos da interação oceano-atmosfera. Adaptado da NASA (n.d.).

Durante a primavera e o verão em latitudes médias, o aquecimento superficial acentuado leva ao desenvolvimento de uma termoclina sazonal que ocorre em profundidades de 50 a 100 metros. O resfriamento da superfície e a mistura do vento, tendem a destruir essa camada no outono e no inverno (Pedlosky, 1987).

Abaixo da camada da termoclina, há uma camada profunda de água fria e densa. Dentro disso, os movimentos da água são impulsionados principalmente por variações da densidade, comumente devido a diferença de salinidade, ou seja, um mecanismo termohalino. Também em relação a circulação, o oceano pode ser visto como consistindo de um grande número de camadas, uma camada superior, sujeita aos efeitos do vento em superfície, uma camada mais abaixo da superfície, influenciada pelo atrito da camada mais acima, e assim por diante, todas as camadas sendo influenciadas pela força de Coriolis (Pedlosky, 1987; Martinson, 1990). A água superficial, tende a ser desviada para direita no Hemisfério Norte, com um ângulo médio de  $45^\circ$  em relação a direção do vento em superfície, e movendo-se a cerca de 3% de sua velocidade. Essa deflexão, aumenta com a profundidade à medida que a velocidade da corrente impulsionada pelo atrito, diminui exponencialmente (Fig. 4.2) (Ekman, 1905).

Na região equatorial, onde não há força de Coriolis, a água em superfície se move na mesma direção do vento em superfície. Este espiral de Ekman, foi desenvolvido sob suposição de profundidades idealizada no oceano, constância do vento, viscosidade uniforme da água e pressão constante da água em uma determinada profundidade. Isso raramente acontece, e na maioria das condições oceânicas, a espessura da camada de Ekman, impulsionada pelo vento é de aproximadamente 200 metros. Ao Norte (Sul) de  $30^\circ$  de latitudes, os ventos de Oeste (Leste) criam um transporte de água para Sul (Norte) na camada de Ekman, dando origem a uma convergência e afundamento da massa de água entre  $25^\circ$  e  $35^\circ$  de latitude, esse processo é conhecido como “bombeamento de Ekman” (*Ekman pumping*) (Ekman, 1905).



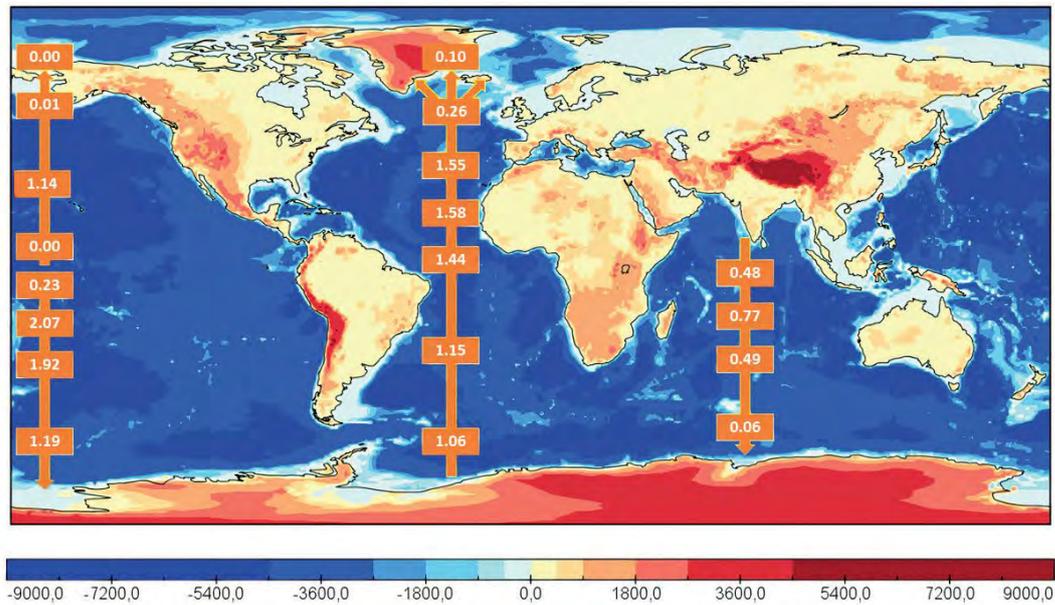
**Figura 4.2** O padrão da corrente do oceano Ekman no Hemisfério Norte. **Adaptado** Open University 1989 from *Ocean Circulation*, Bearman (1989). Copyright © Butterworth-Heinemann, Oxford.

É importante mencionar que comparações podem ser feitas entre a estrutura e a dinâmica dos oceanos e da atmosfera no que diz respeito ao seu comportamento acima da termoclina permanente e abaixo da tropopausa, seus dois limites de estabilização mais significativos. Dentro dessas duas zonas, as circulações são mantidas por gradientes de energia térmica meridional, dirigidos de forma dominante para os polos (Fig. 4.3) e influenciados pela força de Coriolis (Ganachaud & Wunsch, 2000; Stammer et al., 2003).

Antes de 1970, a oceanografia era estudada em uma estrutura espaço-temporal, semelhante à aplicada na climatologia clássica. Entretanto, suas semelhanças com a meteorologia moderna são aparentes. As principais diferenças entre o oceano e a atmosfera, derivam da maior densidade e viscosidade das águas oceânicas e das restrições de atrito muito maiores impostas ao seu movimento global.

Muitas características em grande escala da dinâmica dos oceanos, lembram características da atmosfera, onde incluímos: a circulação geral, grandes giros oceânicos (semelhante as altas pressões subtropicais), grandes fluxos semelhantes a jatos,

como a corrente do Golfo, áreas em larga escala de subsidência e elevação, camada estabilizadora da termoclina permanente, efeitos da camada limite, descontinuidades frontais criadas pelo contraste de temperatura e densidade, e região de massa d'água.



**Figura 4.3** Transporte de calor meridional médio anual (1015W) nos oceanos, Pacífico, Atlântico e Índico, respectivamente (delimitado pelas linhas laranjas). Contorno em cores a orografia. **Fonte** Ganachaud e Wunsch (2000) e Stammer et al. (2003).

## 1.2. Ressurgência

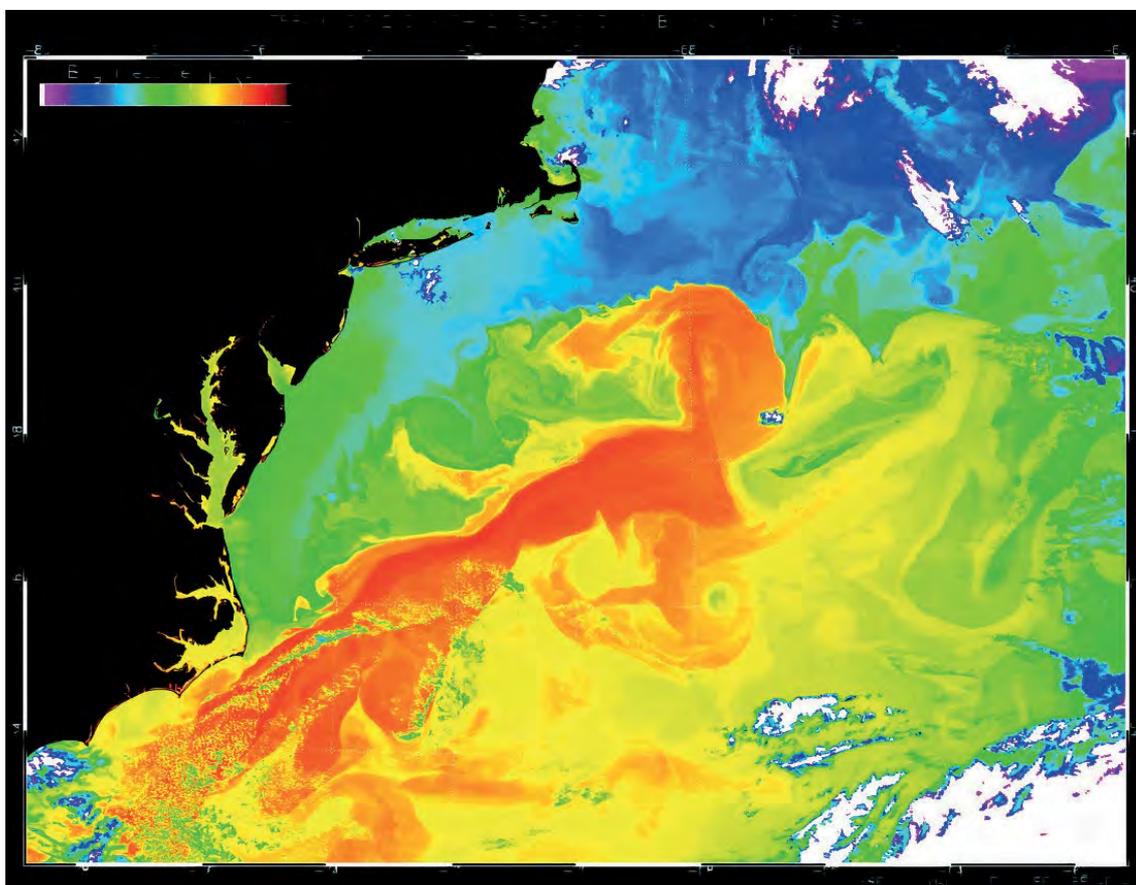
Em contraste com as correntes oceânicas nos lados ocidentais dos oceanos, as correntes oceânicas orientais que fluem em direção ao equador, adquirem vorticidade ciclônica que está em oposição à tendência dos ventos anticiclônicos (mais detalhes dessa circulação no tópico Ciclones tropicais na pág. 103), levando a fluxos relativamente amplos de baixa vorticidade. Além disso, a deflexão devido ao efeito de Ekman faz com que as águas superficiais se movam para oeste, afastando-se do litoral, levando à substituição pela ressurgência de água fria de profundidades entre 100 e 300 metros (Fig. 4.4). Salientamos que a taxa de ressurgência é baixa, variando entre 1 e 2 metros por dia, sendo aproximadamente a mesma que a

velocidade das correntes de superfície, com as quais estão em equilíbrio. A taxa de ressurgência, varia com o *wind stress* em superfície, como o mesmo é proporcional ao quadrado da velocidade do vento, pequenas modificações na velocidade do vento podem levar a variações grandes nas taxas de ressurgência.

Sabe-se que a faixa de ressurgência apresenta uma largura limitada em até 200 km, como por exemplo, a corrente de Benguela, onde o efeito de Ekman, espalha a água fria para oeste. Nas margens polares, onde há presença de água fria, a oscilação meridional dos cinturões de vento, conferem uma forte sazonalidade à ressurgência.

Uma grande região de ressurgência em águas profundas, está ao longo da costa oeste da América do Sul, onde há uma plataforma estreita de aproximadamente 20 km de largura e ventos de leste paralelo a costa. O transporte nos primeiros 20 metros de profundidade é *offshore*, ou seja, paralelo a linha de costa. Entre 30 e 80 metros, o padrão muda para *onshore*. Esse padrão é forçado

pelo fluxo de ar *offshore*, normalmente associado à célula convectiva de Walker (grande escala), ligando o Sudeste da Ásia ao sudeste do Pacífico Sul. A ressurgência costeira também é causada por mecanismos menos importantes, como a divergência da corrente de superfície, ou pelo efeito da configuração do fundo do oceano (Fig. 4.4).



**Figura 4.4** Fluxos oceânicos coloridos com dados de temperatura da superfície do mar (pixels vermelhos são áreas mais quentes que se aproximam de 25°C, verdes são valores intermediários de 12-13°C e azuis são menos de 10°C). **Fonte** *National Aeronautics and Space Administration (NASA) Scientific Visualization Studio, Gulf Stream's Brightness Temperature* (2 de maio de 2001).

### 1.3. Camada de mistura oceânica

A energia térmica e a energia mecânica recebida da atmosfera, não apenas controla a dinâmica local, mas a própria camada modula o fluxo dessa energia para as massas de águas mais profundas. Entretanto, o fluxo de calor de volta à camada

limite planetária atmosférica, tem uma importância sobre o clima e suas flutuabilidades. Isso é o que simplificamos na figura 4.5, onde mostramos os mecanismos que são responsáveis pelo armazenamento de energia na camada de mistura

oceânica. Todo processo em superfície, como por exemplo o *wind stress* e os fluxos de fluabilidade, gerado também pelo vento, mais evaporação, precipitação e pela radiação solar incidente na

superfície oceânica, intensificam a produção de cisalhamento e a fluabilidade no interior da camada de mistura, criando turbulências horizontais e verticais através da energia cinética.

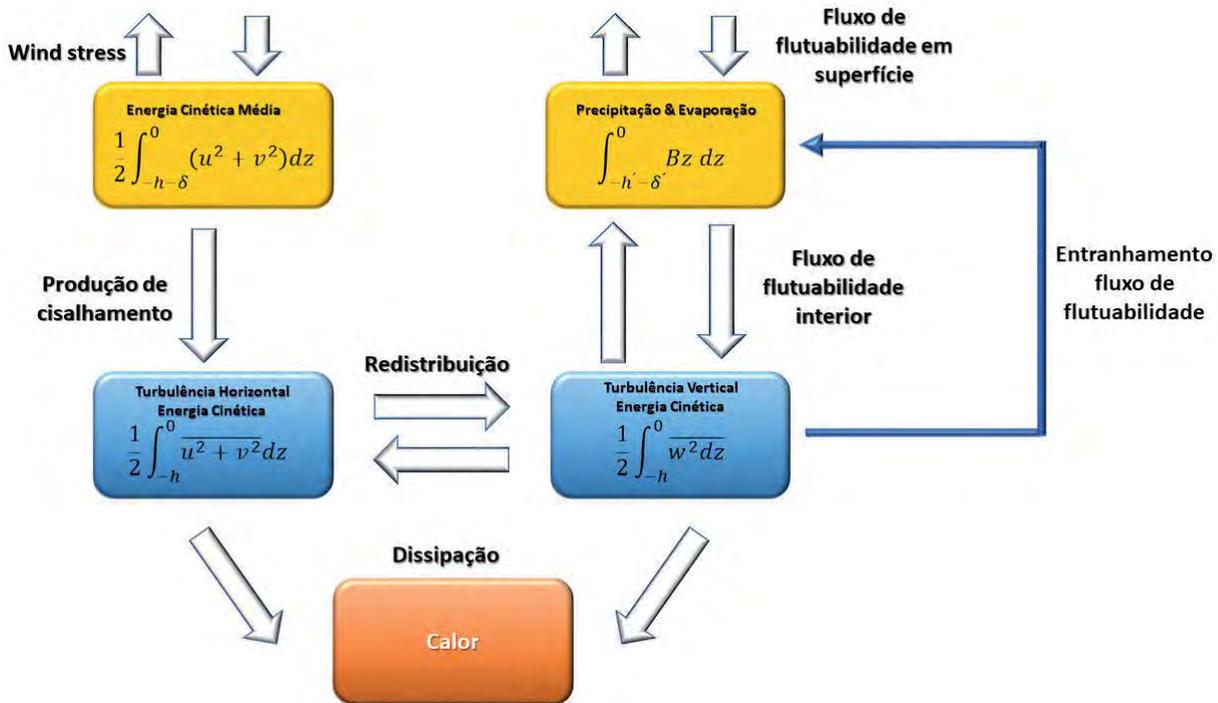


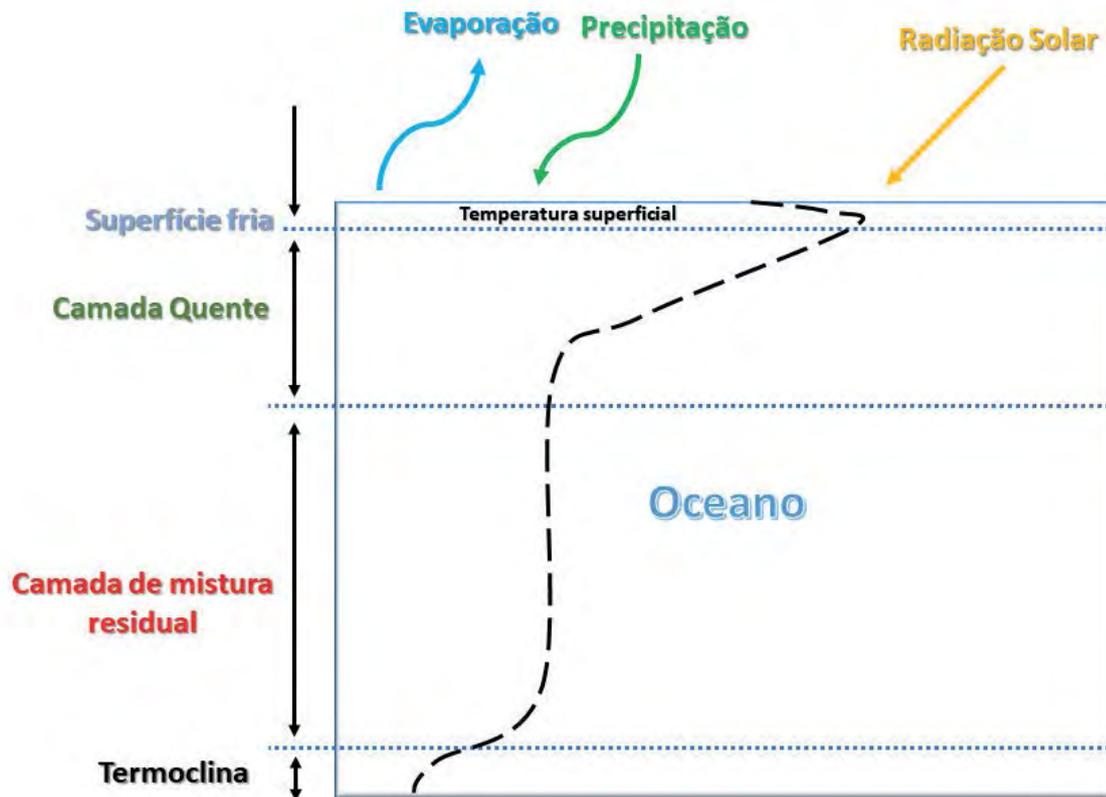
Figura 4.5 Mecanismo responsável pelo armazenamento de energia na Camada de Mistura Oceânica. Fonte Garwood (1977).

É importante salientarmos que outras aplicações práticas da camada de mistura oceânica, incluem a dinâmica da advecção de calor e diluição turbulentas, principalmente de nutrientes e poluentes.

A camada de mistura oceânica é definida como a região totalmente turbulenta, estando presente na parte superior do oceano, delimitada pela interface oceano-atmosfera. O vento e o fluxo de fluabilidade ascendente, atribuíveis ao resfriamento da superfície, são as fontes primárias de energia mecânica para a mistura. A característica mais distintiva dessa camada, e o que realmente define sua extensão é sua

intensidade relativamente alta de movimentos turbulentos de forma contínua, em todas as direções. Fluxos turbulentos verticais dentro da camada de mistura.

Mostramos na figura 4.6, a variação da temperatura da camada de mistura oceânica e nela, verificamos que existe subcamadas e que essas subcamadas apresentam profundidade diferentes. A primeira subcamada, chamada de “superfície fria”, logo abaixo há uma camada quente e posteriormente, uma camada de mistura bem residual, com uma profundidade de centenas de metros, e a última condição da camada de mistura oceânica é a termoclina já mencionada e definida acima.



**Figura 4.6** Variação vertical da temperatura na Camada de Mistura Oceânica. **Fonte** Palmeira et al. (2015).

## 2. CICLONES TROPICAIS: SISTEMA ACOPLADO OCEANO-ATMOSFERA

Os ciclones de escalas sinóticas intensos nos trópicos, são chamados de ciclones tropicais. Como acontece com todos os ciclones, os tropicais têm uma baixa pressão no centro do ciclone em superfície. Além disso, os ventos em baixos níveis troposféricos que giram ciclonicamente (sendo opostos nos hemisférios da Terra – sentido anti-horário no Hemisfério Norte, e sentido horário no Hemisfério Sul) ao redor da massa de nuvens de tempestades. Em algumas regiões da Terra, os ciclones tropicais ganham nomes diferentes, são furacões no Atlântico, Caribe e Golfo do México, assim como no Oceano Pacífico oriental. São chamados de

tufões no Pacífico Oeste e no Oceano Índico, e próximo da Austrália, são apenas chamados de ciclones.

É importante salientar, que os ciclones tropicais diferem dos ciclones de latitudes médias ou ciclones extratropicais, isso porque os ciclones tropicais não estão associados a sistemas frontais e os ciclones extratropicais sim. Os ciclones tropicais têm núcleos quentes, enquanto os ciclones extratropicais apresentam núcleos frios. Desta forma, mostraremos a estrutura dinâmica e física deste sistema atmosférico, inteiramente acoplado ao oceano.

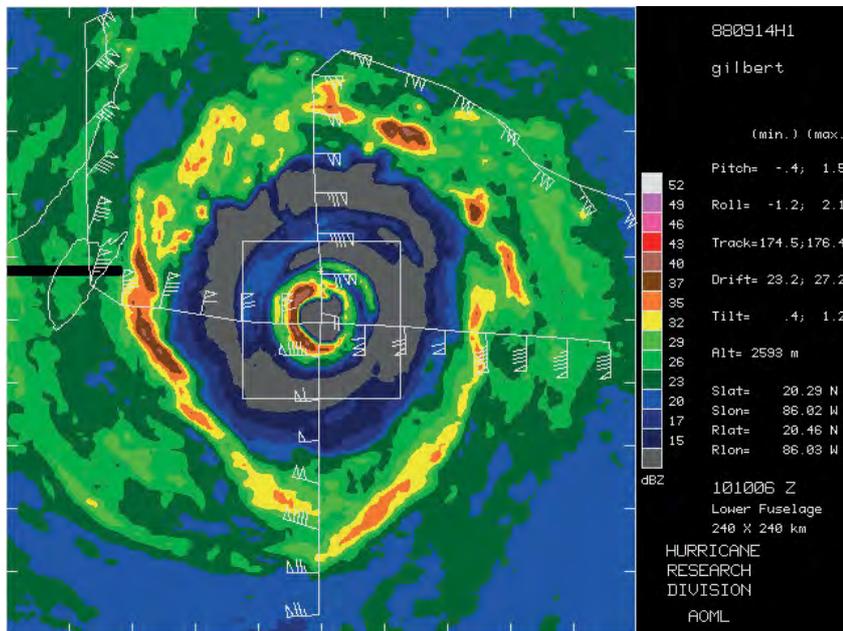
## 2.1. Estrutura física dos ciclones tropicais

Os ciclones tropicais são compostos de tempestades, são dezenas de núcleos de sistemas convectivos, que “rodeiam” o centro desses ciclones. Perto do centro (núcleo) dos ciclones tropicais, está o “anel” ou círculo de tempestade, chamado de olho. Esta é a parte mais intensa dos ciclones tropicais, com a presença de chuvas fortes e ventos com velocidades superiores a  $119 \text{ km h}^{-1}$ .

Na figura 4.7, mostramos uma imagem de radar meteorológico, do furacão Gilbert, em setembro

de 1988 no litoral leste do México. A parte mais escura da imagem, mostra o cinturão de máxima atividade convectiva, com intensas chuvas, o centro da imagem, sem a presença de atividades convectiva e quente, como mencionado anteriormente é identificado com a cor cinza.

O topo dessas tempestades associadas aos ciclones tropicais, se estende até a estratosfera inferior, entre 15 e 18 km de altura. Assim, os ciclones tropicais preenchem as profundezas da troposfera tropical.



**Figura 4.7** Imagem de Radar do *Hurricane Research Division*. Furacão Gilbert, 14 de setembro de 1988. **Fonte** <https://www.nhc.noaa.gov/1988gilbert.html>.

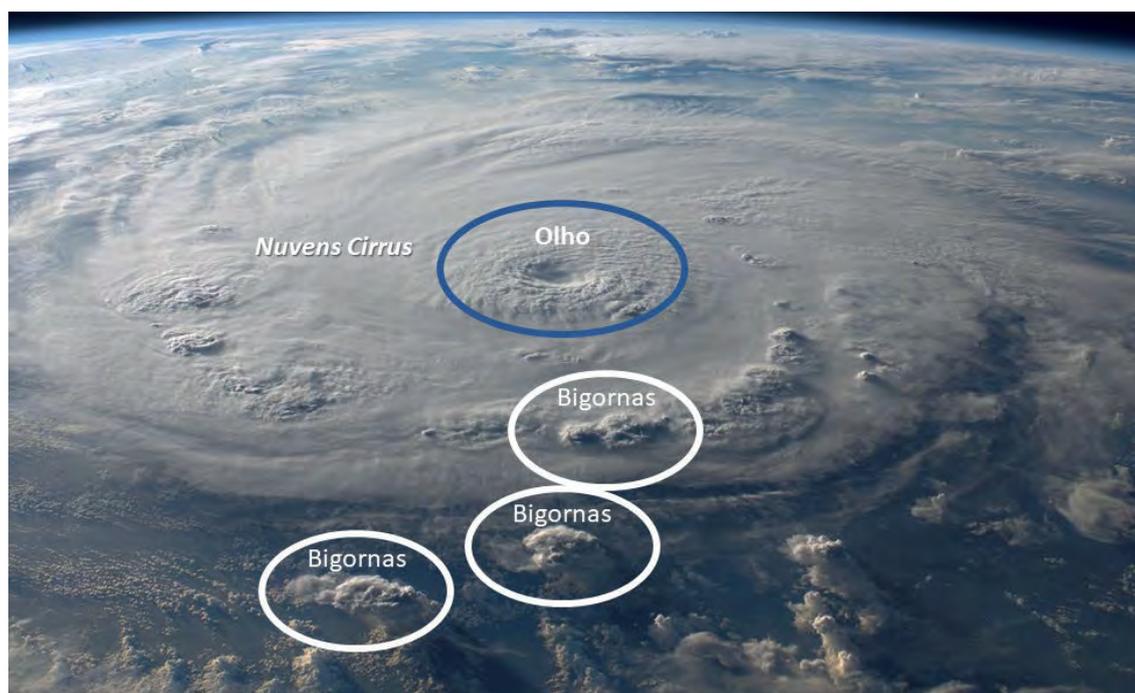
As bigornas<sup>1</sup> que compõem cada tempestade na parede onde está localizado o olho do ciclone tropical, se fundem em um grande escudo de nuvens quase circular que é visível através de imagens de satélite (Fig. 4.8). Na figura 4.8, é perceptível o olho do furacão Katrina, assim como o complexo de nuvens circundantes ao núcleo do furacão.

Essa bigorna se espalha para fora do olho do furacão em até 150 km, conseqüentemente, os diâmetros dos ciclones tropicais apresentam entre 10 a 20 vezes sua profundidade. Na figura 4.9, mostramos a representação do olho do furacão Felix (círculo azul) e das bigornas (círculos brancos) oriundas das nuvens Cumulonimbus (CBs) que formam a estrutura dos furacões (Bender et al., 2010; Sitkowski et al., 2011).

**1.** Bigornas são formadas por nuvens do tipo Cirrus (compostas de cristais de gelo bem pequenos, que praticamente flutuam na atmosfera), e estão localizadas no topo dos Cumulonimbus (CBs).

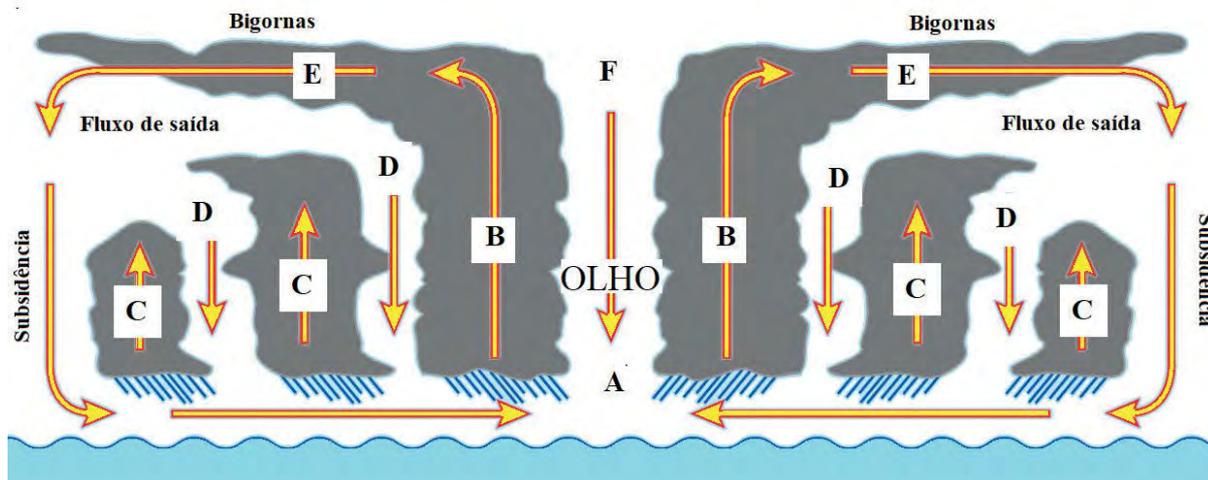


**Figura 4.8** Furacão Katrina imagem tirada do satélite GOES-East às 21:15 UTC em 28 de agosto de 2005, com uma vista que se estende do estado americano de Louisiana e através do Golfo do México e Mar do Caribe. **Fonte** *National Oceanic Atmospheric Administration – NOAA*. <https://www.nesdis.noaa.gov/content/hurricane-katrina-0>.



**Figura 4.9** Imagem do furacão Felix, tiradas da Estação Espacial Internacional no dia 20 de setembro 2007. O olho do furacão é delineado com o círculo azul, enquanto o fluxo da parede do olho, composto de nuvens CBs, preenche a maior parte desta imagem. Com círculos em branco algumas bigornas. **Adaptado** pelo autor, e imagem oriunda da *National Aeronautics and Space Administration (NASA)* código ID: ISS015-E-25049.

No centro da parede de nuvens, onde está o olho do ciclone tropical, as condições atmosféricas são calmas, com temperaturas quentes e movimento do ar subsidente<sup>2</sup>, que inibi a formação de nuvens nesta região. O diâmetro do olho ao nível do mar varia entre 20 e 50 km, onde esse olho é cônico, com diâmetro maior no topo da tempestade (Fig. 4.10).



**Figura 4.10** Seção transversal de um ciclone tropical, identificando o conjunto de nuvens convectivamente presentes (cumulonimbus-CB), e os fluxos, associados a divergência e convergência de massa (setas amarelas). **Fonte** Fea et al. (2015).

Na tabela 4.1, informamos as características dinâmicas da seção transversal representada na figura 4.10.

**Tabela 4.1** Condições e características referentes a figura 4.10.

Condição	Características
A	A baixa pressão no centro ou “olho” da tempestade pode variar muito. A pressão aumenta sistematicamente do olho para a periferia da tempestade.
B	Os ciclones tropicais incluem fortes ventos horizontais que convergem para o olho e atingem sua força máxima em uma área chamada “parede do olho” (10- 25 km do olho). A atividade convectiva é mais intensa aqui, onde nuvens cumulonimbus altas, atingem a tropopausa.
C	O movimento ascendente leva a formação de nuvens convectivas em toda a tempestade. Muitas vezes são organizados em bandas, afastando-se do centro do corpo em espiral.
D	Em algumas áreas, ocorre uma convecção fraca.
E	Um fluxo suave em espiral, sai do topo do olho.
F	Aprofundamento da camada de ar no olho, causa céus relativamente claros, com poucas nuvens.

## 2.2. Intensidade e distribuição geográfica dos ciclones tropicais

Os ciclones tropicais, são sistemas de baixa pressão atmosférica em superfície e quando essa pressão atmosférica diminui muito rapidamente em poucas horas e há um aumento dos ventos na baixa troposfera, há um aumento da intensidade dos ciclones tropicais, e para isso foi criado uma escala de intensidades.

<sup>2</sup> significa um fluxo de ar de cima para baixo. A subsidência traz para a superfície o ar seco dos níveis mais elevados da atmosfera.

No início dos anos de 1970, o Engenheiro e consultor Herbert Saffir e o então diretor do Centro Americano de Furacões (*National Hurricane Center – NHC*), Robert Simpson, criaram uma escala para dar aos funcionários da Segurança pública e órgão americanos de prevenção e desastres naturais dos Estados Unidos, uma estimativa da intensidade dos ciclones tropicais, com base na velocidade máxima do vento e pressão ao nível médio do mar, no olho do ciclone tropical, desta forma, foi criada a escala

de intensidades de Saffir-Simpson. Em 2010, o HNC atualizou essa escala, agora chamada de Escala de Furacão de Saffir-Simpson, e definiu a intensidade do furacão apenas em função da velocidade do vento gerada pelos ciclones tropicais. Essa escala, varia da categoria 1, onde o ciclone tropical é mais fraco, à categoria 5, onde o ciclone tropical é o mais intenso e destrutivo. Na tabela 4.2, mostramos a Escala de Furacão de Saffir-Simpson, com suas categorias e distintas velocidades do vento.

**Tabela 4.2** Escala de Furacões de Saffir-Simpson, baseada na intensidade dos ventos geradas pelos furacões. **Fonte** <https://www.nhc.noaa.gov/pdf/sshws.pdf>.

Categorias	Velocidade do vento			
	m/s	Km/h	knots	Milhas/h
1	33 – 42	119 – 153	64 – 82	74 – 95
2	43 – 49	154 – 177	83 – 95	96 – 110
3	50 – 58	178 – 209	96 – 113	111 – 130
4	59- 69	210 – 249	114 – 135	131 – 155
5	> 69	> 249	> 135	> 155

### 2.2.1. Escala de intensidade dos ciclones tropicais/tufões

Como mencionando anteriormente, há variações nos nomes adotados para distinguir ciclones tropicais, no Pacífico Oeste, adotando-se o nome de tufão. A intensidade dos tufões é classificada de três maneiras diferentes, por três organizações diferentes: Agência de Meteorologia do Japão (*Japan Meteorological Agency – JMA*), Observatório de Hong Kong (*Hong Kong Observatory – HKO*) e o Centro de Alerta Conjunto de Tufões do Estados Unidos (*US Joint Typhoon Warning Center – JTWC*). Na tabela 4.3, mostramos essas diferentes escalas de intensidades para as três organizações aqui citadas.

**Tabela 4.3** Escala de Intensidades de tufões (ciclones tropicais), baseada em ventos máximos por mais de 10 minutos. **Fonte** [https://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/data/trmmxge/images/TyphoonLevel\\_e.pdf](https://www.eorc.jaxa.jp/TRMM/data/trmmxge/images/TyphoonLevel_e.pdf).

Categorias	Velocidade do vento		
	m/s	Km/h	knots
Depressão Tropical	< 17	< 61	< 33
Tempestade Tropical	17- 24	62- 88	35 – 48
Tempestade Tropical Severa	25- 32	89- 117	48 – 63
Tufão	33- 41	118- 149	64 – 79
Tufão Severo	42 – 51 (HKO)	150 – 184 (HKO)	80 – 99 (HKO)
Super Tufão	>51 (HKO) >67 (JTWC)	>185 (HKO) >241 (JTWC)	>100 (HKO) >130 (JTWC)

### 2.2.2. Outras escalas de ciclones tropicais

Escalas adicionais de intensidades de ciclones tropicais, com diferentes definições de velocidade do vento e categorias. Essas definições foram definidas por diversas agências que medem e fazem previsões dos ciclones tropicais/tufões:

- > *Australian Bureau of Meteorology* (Austrália), para o Hemisfério Sul;
- > *Météo-France* (França e ilhas francesas do Índico) Hemisfério Sul;
- > *Regional Specialized Meteorological Center in New Delhi* (Índia), para o Hemisfério Norte e Oceano Índico.

### 2.3. Distribuição geográfica e movimentos dos ciclones tropicais

Os ciclones tropicais apresentam uma trajetória ao longo de sua atuação, regida pela circulação atmosférica em grande escala; A maioria dos ciclones tropicais se formam entre 10° e 30° de latitude, que é a região de formação dos ventos alísios, conseqüentemente, a maioria dos ciclones tropicais são direcionados de leste para oeste inicialmente. Os rastros dos ciclones tropicais, são comumente chamados de *storm-tracks* e em algumas vezes se confundem com *storm-tracks*, de ciclones extratropicais, e como mencionamos anteriormente, são sistemas dinamicamente diferentes.

Na figura 4.11, mostramos as principais trajetórias dos ciclones tropicais no globo. Há preferencialmente 4 regiões dinamicamente preferenciais para a formação e propagação dos ciclones extratropicais, são elas:

- i) No Atlântico Norte, entre o litoral noroeste da África até a costa leste dos Estados Unidos e Golfo do México, com gêneses entre os meses de junho e outubro (Evans & Hart, 2003);

- ii) Na costa Pacífica do México e dos Estados Unidos, estendendo-se até o arquipélago do Havaí, com gêneses entre junho e setembro (Chan, 2005);

- iii) No centro-oeste do Pacífico, estendendo-se até o Mar da China e do Japão, com gênese entre junho e setembro (Chan, 2005);

- iv) No Índico Norte, entre 8°N até o litoral da Índia, Bangladesh e Península Arábica, com gêneses entre os meses de julho e setembro (Chan, 2005);

- v) No Pacífico Sudoeste, estendendo-se sobre o norte da Nova Zelândia e litoral leste da Austrália, com gêneses nos meses de dezembro do ano anterior até abril do ano posterior (Chan, 2005);

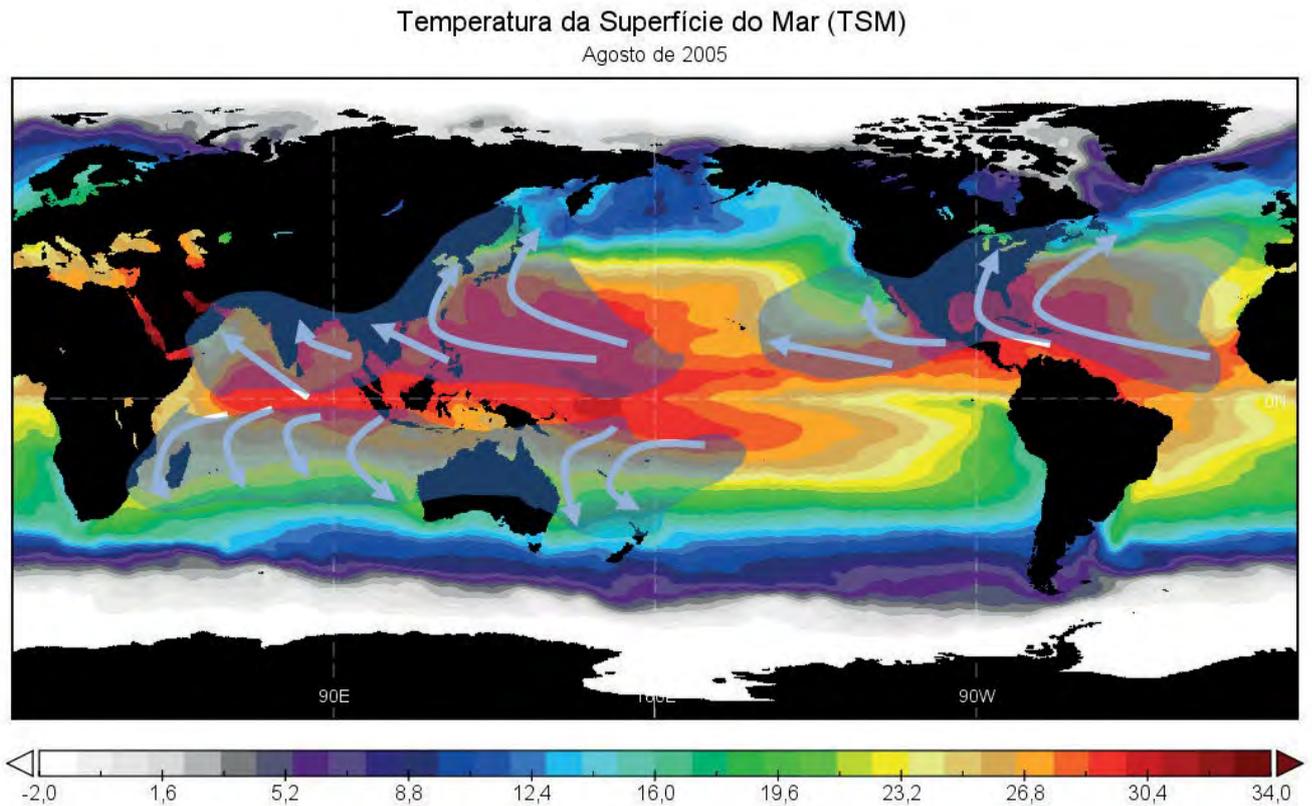
- vi) No Índico Centro Sul, entre a latitude de 8°S até 30°S, estendendo-se desde do litoral oeste da Austrália até o litoral sudeste da África (Chan, 2005).

### 2.4. Evolução dos ciclones tropicais

Sete condições são necessárias para a formação de um ciclone tropical, são elas (Wells, 2011);

- i) Temperatura da Superfície do Mar (TSM) mais quente que a climatologia para a região de formação dos ciclones tropicais;
- ii) Força de Coriolis diferente de zero;
- iii) Instabilidade gerada pelas condições atmosféricas;
- iv) Alta umidade relativa do ar na baixa e média troposfera;
- v) Cisalhamento do vento mais fraco;
- vi) Vorticidade em escala sinótica intensa.

Falaremos um pouco dessas condições necessárias para a formação dos ciclones tropicais.



**Figura 4.11** Mapa com a trajetória padrão dos ciclones tropicais. Em cores a Temperatura da Superfície do Mar em agosto de 2005, em preenchimento com a cor cinza a área de formação e trajetória padrão dos ciclones tropicais e as linhas brancas com as setas, as trajetórias preferenciais dos ciclones tropicais. **Fonte** National Hurricane Center (EUA) e Australian Bureau of Meteorology (ABM), reanálises do NCEP/NCAR.

## 2.5. Temperatura da Superfície do Mar (TSM)

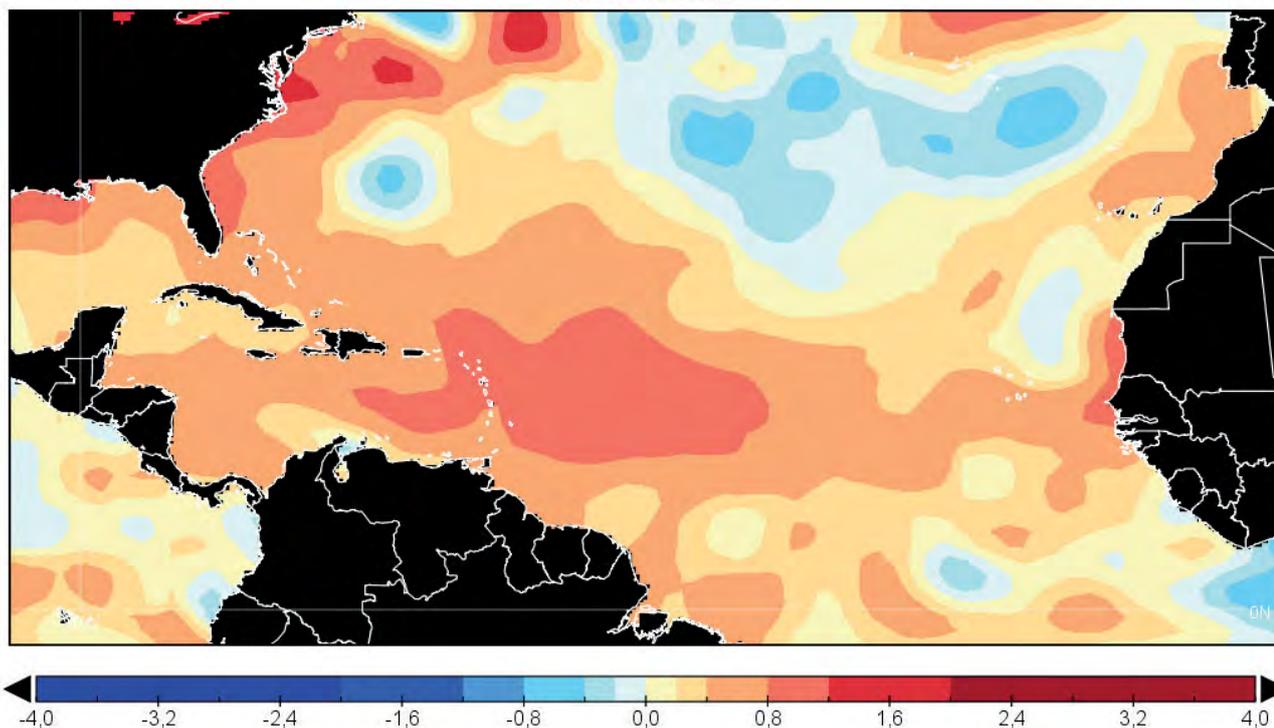
A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) deve estar acima de 26,5°C (Fig. 4.12), e as águas quentes em superfície devem ter pelo menos 50 metros de profundidade. Essa TSM mais quente é necessária para criar uma forte evaporação e transferência de calor da superfície do mar para a baixa e média troposfera. O ar quente e úmido da baixa troposfera serve como combustível para os ciclones tropicais, onde, os ventos mais intensos nos ciclones tropicais criam ondas mais altas e intensas em energia. Se as águas mais quentes forem muito rasas, essa mistura turbulenta agitará as águas mais profundas e frias até a superfície. Quando isso acontece, a

TSM diminui até alcançar condições que inibem a intensificação dos ciclones tropicais (McBride & Zehr, 1981; Sitkowski et al., 2011).

Na figura 4.12, por exemplo, sobre o Mar do Caribe (Atlântico Equatorial), no mês de agosto de 2005, foi registrada uma anomalia da TSM em até 2,5°C acima da média climatologia para esse mês. Lembrando que neste mesmo mês entre os dias 23 e 31, o Furacão Katrina esteve ativo, chegando à categoria 5 da Escala de Furacões de Saffir-Simpson, a escala mais intensa de acordo com o Centro Americano para Furacões (Sitkowski et al., 2011).

### Temperatura da Superfície do Mar - TSM

AGOSTO DE 2005



**Figura 4.12** Anomalia da Temperatura da Superfície do Mar no mês de agosto de 2005. **Fonte** Reanalises do NCEP/NCAR.

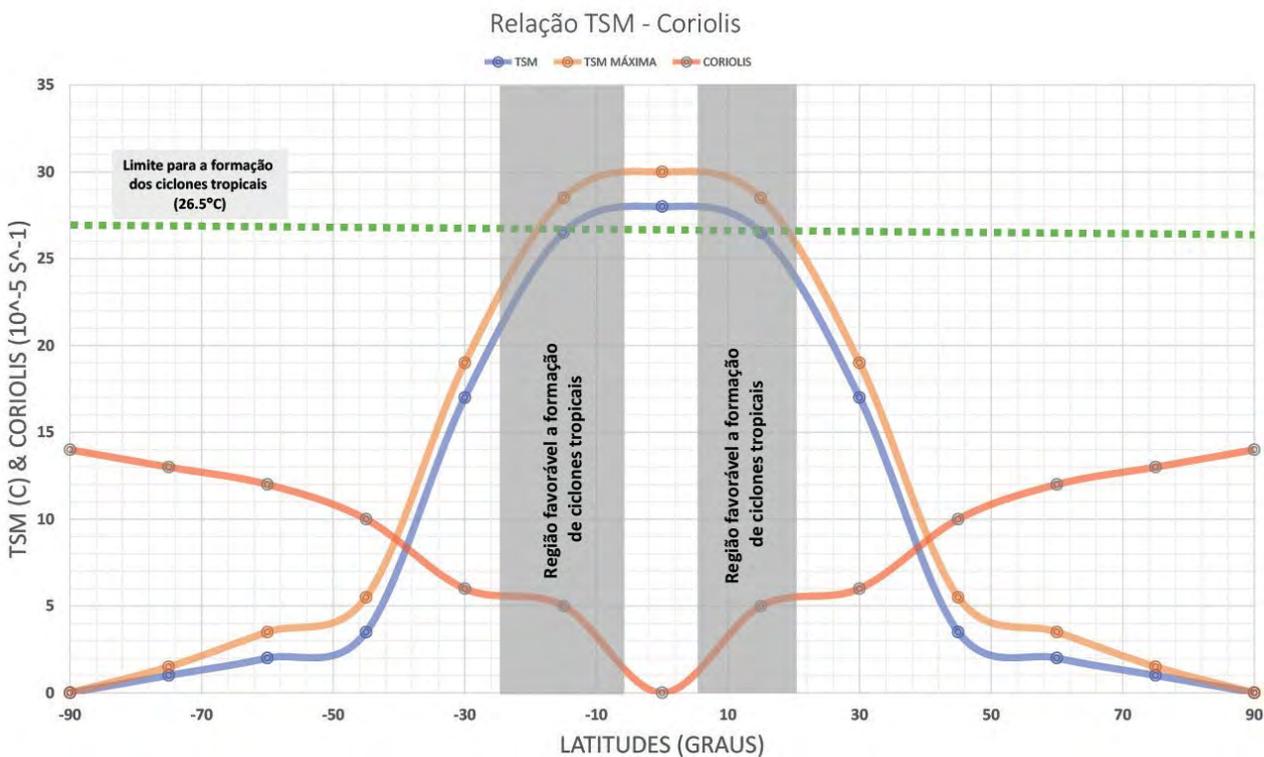
#### 2.5.1. Força de Coriolis

Para uma compreensão melhor do que é a Força de Coriolis, é necessário fazermos uma analogia. Um objeto sobre a superfície da Terra, constitui-se como um referencial não inercial (onde as Leis Físicas de Newton não são cumpridas), que gira em relação a uma inercia com origem no centro da Terra, desta forma, para tal objeto, a força de Coriolis explica, diversos fenômenos observados na superfície da Terra, e isso inclui os ciclones tropicais.

Os ciclones tropicais não podem existir a cerca de 800 km do equador da Terra, ou seja, latitudes menores ou igual a  $5^\circ$ , isso ocorre porque a força de Coriolis se aproxima de zero no equador, sendo exatamente zero no equador. É importante mencionar que, não só apenas os ciclones tropicais não podem ser formados no equador, mas os ciclones existentes também não podem cruzar o equador (Fig. 4.13).

Sem a força de Coriolis, o ar na baixa troposfera seria sugado diretamente para o olho do ciclone tropical, através da baixa pressão existente nesta região. Assim, as moléculas de ar se acumulariam no olho, fazendo com que a pressão aumentasse. O resultado é que a baixa pressão desapareceria, os ventos iriam diminuir e o ciclone tropical deixaria de existir em poucas horas. É o que acontece com os raros ciclones que se aproximam do equador (Gray, 1998).

Traduzimos a figura 4.13, onde as latitudes que excedem o limite de temperatura e têm o parâmetro de Coriolis que não é próximo de zero, são locais favorecidos para a formação dos ciclones tropicais (sombreamento em cinza na figura 4.13). Os ciclones tropicais também podem ocorrer em outras regiões fora desse limite de latitude, como mencionando, para isso é necessário ter TSM anormalmente alta, ou seja, positiva em relação a climatologia de TSM (Wells, 2011).



**Figura 4.13** Temperatura zonal média da superfície do mar ( $^{\circ}\text{C}$ , linha sólida azul) para o globo em 5 de agosto de 2005. TSM máxima ( $^{\circ}\text{C}$ , linha sólida laranja) também para o dia 05 de agosto de 2005. A magnitude do parâmetro de Coriolis ( $10^{-5} \text{ s}^{-1}$  – linha branca). A linha pontilhada em verde, é o limite de  $26,5^{\circ}\text{C}$  para o gatilho de formação dos ciclones tropicais. **Fonte** Stull (2000).

### 2.5.2. Instabilidade gerada pelas condições atmosféricas

Antes de definirmos a importância da instabilidade condicional, é necessário definirmos o que é a instabilidade atmosférica. Desta forma, podemos fazer a seguinte pergunta: Quais são os fatores que implicam para que uma troposfera seja instável?

A troposfera se torna instável quando a taxa de variação vertical da temperatura do ar se acentua, ou seja, quando a mesma decresce rapidamente com a altitude. Esse processo, ocorre porque, o ar na troposfera superior é mais frio e o ar na baixa troposfera é mais quente, e essa combinação gera uma taxa de variação vertical de temperatura do

ar repentina (rápida) e instabiliza a troposfera. Para um ciclone tropical, essa definição se aplica, pois como mencionamos anteriormente, um ciclone tropical é um conjunto de tempestades, e para que ocorra essas tempestades é necessário que a troposfera esteja instável.

De uma forma mais leiga, quando um ciclone tropical está em sua fase inicial, ou seja, em desenvolvimento, há um processo de troca de energia entre a superfície do mar e a camada mais baixa da troposfera, desta forma, há um fluxo grande de energia entre esses dois sistemas (oceano-troposfera), criando um feedback positivo através de uma energia potencial convectivamente grande.

Emanuel (1987), expressou fisicamente e matematicamente essa condição, dando nome de entropia úmida ( $S$ ) e entropia úmida saturada ( $S^*$ ), onde:

$$S = c_p \ln \Theta_e \quad (4)$$

$$S^* = c_p \ln \Theta_e^* \quad (5)$$

E como traduziríamos essas formulações. Para isso, é necessário compreender o que é o  $\Theta_e$  e  $\Theta_e^*$ , assim como  $c_p$ .

O  $\Theta_e$  é a temperatura potencial equivalente, é a temperatura que uma amostra de ar teria se toda sua umidade fosse condensada por um processo pseudoadiabático<sup>3</sup>, e depois essa amostra é trazida ao nível original por um processo adiabático seco<sup>4</sup>, ou seja, é a temperatura que uma parcela de ar teria se todo o vapor d'água fosse condensado de forma isobárica<sup>5</sup> e adiabaticamente<sup>6</sup>, e depois esse vapor d'água condensado, fosse removido da parcela de ar, onde o calor latente liberado é utilizado para aquecer a parcela de ar.

A  $\Theta_e^*$  é a temperatura alcançada por uma parcela de ar saturada (umidade do ar igual a 100%) se todo o vapor d'água disponível fosse condensado ou até removido do sistema.

O  $c_p$  é capacidade térmica ou calor específico, e determina a relação entre a quantidade de calor fornecido a um corpo ou sistema, como é o caso da troposfera. O  $c_p$  é uma constante no valor de  $1004 \text{ J K}^{-1} \text{ kg}^{-1}$  (Emanuel, 1987; 2005; 2007).

Desta forma a aplicação da entropia que representa

o caos das partículas de ar suspensas na troposfera em virtude do processo de instabilidade aqui já mencionado, representam um ciclo de energia definido como “*Carnot-cycle Heat Engine*” ou, na tradução literal para o português, “Motor térmico de ciclo de Carnot”, que é a conversão da energia térmica em energia mecânica, originando a entropia total ( $S_T$ ).

### 2.5.3. Alta umidade relativa do ar na baixa e média troposfera

Em uma camada troposférica centrada a cerca de 5 km acima do nível do mar, a umidade relativa é alta ainda durante a atividade dos ciclones tropicais, caso contrário, as tempestades associadas ao ciclone não podem continuar a crescer e se organizar, intensificando os ciclones extratropicais.

### 2.5.4. Cisalhamento do vento mais fraco

O cisalhamento do vento, é a diferença na velocidade e/ou direção do vento em uma distância curta na troposfera. Esse cisalhamento pode ser dividido em vertical, quando há mudança do vento entre níveis troposféricos diferentes, e horizontal, quando há mudanças do vento na horizontal ou em ambos os casos.

Para os ciclones tropicais, o cisalhamento do vento é incipiente e fraco, variando pouco na vertical, principalmente entre a baixa e média troposfera, com valores em média inferiores a  $10 \text{ ms}^{-1}$ , desta forma, permitindo a formação de aglomerados de tempestades. Esses aglomerados

3. Processo pseudoadiabático ocorre porque a água condensada sai imediatamente da parcela de ar, tornando o processo irreversível.
4. No processo adiabático seco, o ar resfria por diminuição de pressão na relação de  $10^\circ\text{C}/\text{km}$ , conforme o movimento ascendente do ar.
5. Isobárica dos gases, a pressão permanece constante e o volume aumenta ou diminui proporcionalmente à variação da temperatura.
6. Adiabática é uma transformação termodinâmica em que não há troca de calor com o ambiente.

de tempestades, são os precursores dos ciclones tropicais. Se o cisalhamento do vento for muito forte, as correntes ascendentes nas tempestades tornam-se inclinadas e o aquecimento latente, devido à condensação do vapor d'água se espalha por uma área muito ampla. Isso resulta em um aquecimento menos concentrado e uma capacidade reduzida de criar um centro de baixa pressão ao nível do mar, em torno do qual as tempestades podem se tornar um ciclone tropical. Esse processo, difere das condições de ciclones extratropicais, onde principalmente em latitudes médias há um forte cisalhamento, o que propicia a formação de tempestades e estimula a criação de mesociclones<sup>7</sup> e tempestades supercélulas<sup>8</sup> (Chan, 2005).

### 2.5.5. Vorticidade em escala sinótica intensa

A vorticidade é uma grandeza física empregada em mecânica dos fluidos e na meteorologia, com a finalidade de quantificar a rotação das partículas de um fluido em movimento. Há três tipos de vorticidade, a relativa, a planetária e a absoluta empregadas na meteorologia. A relativa, é a vorticidade que está associada ao cisalhamento do vento; a planetária, está associada à rotação da Terra, e a absoluta, é a somatória das vorticidades relativas e planetárias.

Para a formação e intensificação dos ciclones tropicais, um máximo valor de vorticidade relativa está presente entre a baixa e média troposfera, isso ajuda a organizar as tempestades em um ciclone tropical. Caso contrário, quaisquer tempestades que se formarem agiriam de forma

independente uma da outra, desorganizando os ciclones tropicais (Gray, 1998).

### 2.6. Gatilho para a formação de um ciclone tropical

Mesmo que todas as condições anteriores mencionadas sejam satisfeitas, um método para acionar um ciclone tropical é necessário. Chama-se de *Triggers*, ou gatilho em português. Esse gatilho é qualquer coisa que cria convergência de massa na horizontal em uma escala sinótica<sup>9</sup>. Essa convergência horizontal, força o movimento para cima e para fora da camada mais baixa da troposfera, conhecida como, Camada Limite Planetária (CLP), de acordo com a conservação de massa<sup>10</sup>. O movimento ascendente em escala sinótica, pode iniciar e apoiar um agrupamento organizado de tempestades. Há alguns sistemas que podem contribuir para esse gatilho, citamos a Zona de Convergência Intertropical, Ondas Planetárias de Leste e Monções.

### 2.7. Ciclo de vida dos ciclones tropicais

Em locais onde todas as condições necessárias são atendidas, incluindo qualquer um dos gatilhos, os ciclones tropicais geralmente progridem através dos seguintes estágios de intensificação (Emanuel, 1987; Evans & Hart, 2003; Sitkowski et al., 2011).

- i) Perturbações tropicais;
- ii) Depressões tropicais;
- iii) Tempestades tropicais;
- iv) Ciclones tropicais (furacões, ciclones e tufões).

7. Mesociclone é um vórtice de ar, de aproximadamente 2 a 10 km de diâmetro, dentro de uma tempestade convectiva.

8. Supercélula é um tipo de tempestade caracterizada pela presença de um mesociclone.

9. Escala sinótica é quando suas dimensões horizontais e escalas de tempo podem ser prognosticadas pela teoria de instabilidade baroclínica e podem ter até 2.000 km de extensão.

10. Conservação de Massa é onde qualquer sistema fechado, físico ou químico, nunca se cria nem se elimina matéria, apenas é possível transformá-la de uma forma em outra.

## 2.8. Perturbações tropicais

O Centro Americano de Furacões (NHC- sigla em inglês), define um distúrbio tropical como um sistema climático tropical, com atividade convectiva aparentemente organizada, tendo geralmente entre 200 e 600 km de diâmetro, e são originados nos trópicos e subtropicais, tendo um caráter migratório, ou seja, podendo migrar da região tropical para a subtropical e vice-versa. O tempo de vida de uma perturbação tropical varia entre 1 e 4 dias. Esse aglomerado de tempestades é visível por satélite como tempestades distintas, com suas próprias bigornas e região com precipitação separadas (Fig. 4.14). Não há olho, e pouca ou nenhuma rotação visível, como é característico nos ciclones tropicais. Alguns distúrbios tropicais se formam a partir de Complexos Convectivos de Mesoescala (CCMs), particularmente aqueles que desenvolvem um Vórtice Convectivo de Mesoescala (VCMs).

A maioria das perturbações tropicais não evoluem para ciclones tropicais. Consequentemente, os distúrbios tropicais, geralmente não são nomeados ou numerados como outros sistemas tropicais. Entretanto, os meteorologistas os observam cuidadosamente enquanto eles evoluem, como potenciais futuros ciclones tropicais (Evans & Hart, 2003).

Dinamicamente, a condensação e a precipitação continuam neste aglomerado de tempestades, mais uma grande quantidade de calor latente é liberado para a média troposfera, criando um *feedback* favorável a formação de futuros ciclones tropicais.

A troposfera, próxima destes aglomerados de tempestades, se torna mais quente do que a troposfera circundante, e de acordo com a relação hipsométrica<sup>11</sup>, a pressão diminui mais lentamente com o aumento da altitude nesta região mais quente. Desta forma, uma alta pressão em escala sinótica começa a se formar próximo ao topo da troposfera na região onde está localizado a perturbação tropical (Emanuel, 2007).



**Figura 4.14** Aglomerado de nuvens no litoral oeste da África, identificada na imagem de satélite do GOES East, no dia 28 de agosto de 2018. **Fonte** NOAA- <https://www.nesdis.noaa.gov/content/tropical-disturbance-coast-africa>.

11. Relação hipsométrica representa a variação de altitude de uma área em relação ao nível do mar, onde a altitude é zero.

## 2.9. Depressões tropicais

Como mencionando anteriormente, há uma alta pressão no topo da troposfera durante a formação das perturbações tropicais, e em muitos casos essas perturbações tropicais migram para depressões tropicais, e essa alta pressão no topo da troposfera começa a criar uma circulação térmica, onde o ar no alto da troposfera é conduzido horizontalmente para fora, diminuindo o gradiente de pressão em direção a pressão mais baixa fora do aglomerado de tempestades. Este ar divergente no alto da troposfera, também começa a girar no sentido anticiclone, que para o Hemisfério Norte é horário, e no Hemisfério Sul é anti-horário.

O ar que se move para fora do sistema, remove as moléculas de ar da região onde está este aglomerado de tempestades, reduzindo assim a pressão em superfície sob o aglomerado (Evans & Hart, 2003).

As depressões tropicais recebem um número de identificação, começando com o número 1 a cada ano. À medida que está baixa pressão em superfície se forma, ela cria um gradiente de pressão que começa a sugar os ventos horizontalmente em direção ao centro da baixa pressão.

Este fluxo de ar começa a girar ciclonicamente, de acordo com cada hemisfério, isso ocorre devido à força de Coriolis. A baixa pressão em superfície, geralmente é muito alta, oscilando entre 1005 e 999 hPa. No entanto, este estágio de depressão tropical é definido por ventos próximos a superfície, podendo chegar até  $17 \text{ m s}^{-1}$  ( $\sim 61.2 \text{ km h}^{-1}$ ), girando ciclonicamente como uma circulação fechada ao redor do aglomerado de tempestades (Evans & Hart, 2003).

Na tabela 4.4, mostramos as condições do vento referente ao estágio que levam a formação de um ciclone tropical, indo de um distúrbio tropical até tempestade tropical.

**Tabela 4.4** Estágios que levam a ciclones tropicais.

Estágio	Vento Máximo		
	( $\text{m s}^{-1}$ )	( $\text{km h}^{-1}$ )	(knós)
Distúrbio tropical	N.a.	N.a.	N.a.
Depressão tropical	< 17	< 61	≤ 33
Tempestade tropical	17- 32	61- 118	33 – 63
Ciclone tropical	≥ 33	≥ 119	≥ 64

A maioria das depressões tropicais, não se fortalece mais, entretanto, para as poucas tempestades que continuam a se intensificar, os ventos próximos à superfície são ventos de gradiente mais intenso na baixa troposfera, que espiralam em direção ao centro do aglomerado. Esse influxo radial, atrai mais ar úmido e quente na baixa troposfera, reabastecendo as tempestades e permitindo que elas persistam e se intensifiquem. A condensação e a precipitação aumentam (Evans & Hart, 2003). Na figura 4.15, mostramos através de uma imagem de satélite uma depressão tropical no Atlântico Tropical

no dia 13 de agosto de 2017. É perceptível nesta imagem o aglomerado de nuvens cumulonimbus intensos, agregados entre si e adquirido uma condição espiralada, condição essa, com um alto teor de energia em todo o sistema. Este núcleo quente da tempestade, fortalece ainda mais a alta pressão no topo da troposfera, por meio da relação hipsométrica, que impulsiona mais fluxo de saída e remove mais moléculas de ar da troposfera perto do aglomerado. Desta forma, a baixa pressão em superfície, pode continuar a se aprofundar, apesar do influxo na baixa troposfera, ou seja, a alta



**Figura 4.15** Imagem de uma depressão tropical No dia 13 de agosto de 2017, sobre o Mar do Caribe, detectada pelo satélite NOAA GOES-East às 1445 UTC. **Fonte** <https://phys.org/news/2017-08-nasa-tropical-depression-east-lesser.html>.

pressão no alto da troposfera, cria um “sistema de exaustão”<sup>12</sup>, enquanto a baixa troposfera seria a região de convergência do ciclone incipiente (Evans & Hart, 2003).

## 2.10. Tempestade tropical

Quando em superfície, a baixa pressão é aprofundada o suficiente para impulsionar os ventos mais rápidos que  $17 \text{ m s}^{-1}$ , em uma circulação ciclônica fechada, então o sistema é classificado como uma tempestade tropical.

As bigornas das nuvens CBs que formam as tempestades, geralmente se fundem em um sistema único e denso, que é claramente visível como nuvens convectivamente altas e frias, com grande diâmetro.

Não há olho ainda nesta fase, pois as tempestades tropicais são organizadas o suficiente para serem

capazes de modificar seu ambiente local, para permitir sua persistência, sem depender tanto de um ambiente favorável. Neste estágio, a tempestade recebe um nome para sua identificação. O mesmo nome é utilizado se a tempestade se tornar um ciclone tropical (Evans & Hart, 2003).

Furacões (Atlântico e Pacífico Oriental) e ciclones (Oceano Índico e Pacífico Sudoeste, próximo da Austrália), geralmente recebem nomes de homens ou mulheres. Estes são atribuídos em ordem alfabética de acordo com listas que foram definidas com antecedência pela Organização Meteorológica Mundial (OMM ou WMO em inglês). Os tufões recebem nomes de flores, animais, pássaros, árvores, alimentos, definidos por um comitê de tufões da OMM. Os nomes das tempestades tropicais são reutilizados em um ciclo de seis anos. No entanto, os nomes dos ciclones tropicais mais intensos e destrutivos são “aposentados” e nunca mais são utilizados.

**12.** Sistema de Exaustão, funciona como um mecanismo que tem por objetivo captar, transportar e retirar o ar.

## REFERÊNCIAS

- AKITOMO, K. **Open-ocean deep convection due to thermobaricity**. 1. Scaling argument. *J. Geophys. Res.*, 104 (C3), 5235–5249, 1999.
- BENDER, M. A.; KNUTSON, T. R.; TULEYA, R. E.; SIRUTIS, J. J.; VECCHI, G. A.; GARNER, S. T.; HELD, I. M. **Modeled impact of anthropogenic warming on the frequency of intense Atlantic hurricanes**. *Science*, v. 327, p. 454–458, 2010.
- CHAN, J. C. L. **The physics of tropical cyclone motion**. *Annu. Rev. of Fluid Mech.*, v. 37(1), p. 99–128, 2005.
- EKMANN, V. W. **On the influence of the earth's rotation on ocean currents**. *Ark. Mat. Astr. Fys.*, 2, 1–52, 1905.
- EMANUEL, K. A. **The dependence of hurricane intensity on climate**. *Nature*. V. 326, p. 483–485, 1987. doi:10.1038/326483a0
- EMANUEL, K. A. **Increasing destructiveness of tropical cyclones over the past 30 years**. *Nature*, v. 436, p. 686–688, 2005.
- EMANUEL, K. A. **Environmental factors affecting tropical cyclone power dissipation**. *J. Clim.*, v. 20, p. 5497–5509, 2007.
- EVANS, J. L.; HART, R. E. **Objective indicators of the life cycle evolution of extratropical transition for Atlantic tropical cyclones**. *Mon. Weather Rev.* v. 131, p. 909–925, 2003.
- GANACHAUD, A.; WUNSCH, C. **Improved estimates of global circulation, heat transport and mixing from hydrographic data**. *Nature*, 408: 453–457, 2000.
- GARWOOD, R. W., JR. **An oceanic mixed layer model capable of simulating cyclic states**. *J. Phys. Oceanogr.*, 7, 455–468. 1977.
- GRAY, W. M. **The formation of tropical cyclones**. *Meteorol. Atmos. Phys.*, v. 67, p. 37–69, 1998.
- MAFFRE, P.; LADANT, J.; DONNADIEU, Y. et al. **The influence of orography on modern ocean circulation**. *Clim. Dyn.* 50, 1277–1289, 2018. <https://doi.org/10.1007/s00382-017-3683-0>
- MANN, M.; BRADLEY, R.; HUGHES, M. **Global-scale temperature patterns and climate forcing over the past six centuries**. *Nat.* 392, 6678, 779–787, 1998.
- MARTINSON, D. G. **Evolution of the Southern Ocean winter mixed layer and sea ice: Open ocean deepwater formation and ventilation**. *J. Geophys. Res.*, 95, 11641–11654, 1990.
- MCBRIDE, J. L.; ZEHR, R. **Observational analysis of tropical cyclone formation**. Part II: Comparison of non-developing versus developing systems. *J. Atmos. Sci.*, v. 38, p. 1132–1151, 1981.
- NAMIAS, J. **Hurricane Agnes - an event shaped by large-scale air-sea systems generated during antecedent months**. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 99(421), p.506–519, 1973.
- PALMEIRA, A. C. P.; CAMARGO, R.; PALMEIRA, R. M. J. **Relação entre a temperatura da superfície do mar e a camada de mistura oceânica sob a passagem de ciclones extratropicais no Atlântico Sudoeste**. *Revista Brasileira de Meteorologia*, 30(1), 89–100. 2015. <https://doi.org/10.1590/0102-778620130679>
- PEDLOSKY, J. THERMOCLINE THEORIES. In: **General Circulation of the Ocean**, Eds. Abarbanel H.D.I. and Young WR., Springer-ferlag, Berlin Heidelberg New York, pp. 55–101, 1987.
- RUGG, A.; FOLTZ, G. R.; PEREZ, R. C. **Role of mixed layer dynamics in tropical North Atlantic interannual sea surface temperature variability**. *J. Climate*, 29, 8083–8101, 2016. doi:10.1175/JCLI-D-1500867.1.
- SEN, A.; SCOTT, R. B.; ARBIC, B. K. **Global energy dissipation rate of deep-ocean low-frequency flows by quadratic bottom boundary layer drag: comparisons from current-meter data**. *Geophys. Res. Lett.* 35, L09606, 2008. <https://doi.org/10.1029/2008GL033407>
- SITKOWSKI, M.; KOSSIN, J. P.; ROZOFFJ, C. M. **Intensity and structure changes during hurricane eyewall replacement cycles**. *Mon. Wea. Rev.*, v. 139, p. 3829–3847, 2011.
- STAMMER D.; WUNSCH, C.; GIERING, R.; ECKERT, C.; HEIMBACH, P.; MAROTZKE, J.; ADCROFT, A.; HILL, C. N.; MARSHALL, J. **Volume, heat, and freshwater transports of the global ocean circulation 1993–2000, estimated from a general circulation model constrained by World Ocean circulation Experiment (WOCE) data**. *Journal of Geophysical Research*, 108: p. 7-1-7-23, 2003.
- STULL, R.B. **Meteorology for scientists and engineers**. 2nd edition, Brooks/Cole Thomson Learning, Pacific Grove. 2000.
- TROSSMAN, D. S.; PALTER, J. B.; MERLIS, T. M.; HUANG, Y.; XIA, Y. **Large-scale ocean circulation-cloud interactions reduce the pace of transient climate change**, *Geophys. Res. Lett.*, 43, 3935–3943, 2016. doi:10.1002/2016GL067931.

# ELEMENTOS DE METEOROLOGIA FÍSICA E FENÔMENOS ATMOSFÉRICOS

5

Igor DA MATA-OLIVEIRA <sup>1</sup>  
Fabrício Berton ZANCHI <sup>2</sup>  
Natalia Pereira de CAMPOS <sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Alagoas - UFAL

<sup>2</sup> Universidade Federal do Sul da Bahia - UFSB

<sup>3</sup> Catavento Ambientale



## 1. INTRODUÇÃO

A superfície da Terra é envolvida por uma camada de gases, vapor d'água e partículas, constituindo o que chamamos de ar, ou atmosfera terrestre. A atmosfera é responsável pelo desenvolvimento e manutenção da vida na Terra como a conhecemos, atuando nos processos de fotossíntese, respiração, proteção e estabilidade térmica. O conjunto das suas condições apresenta influência decisiva sobre nossa vida cotidiana, com uma série de implicações práticas, muitas vezes imperceptíveis: nosso comportamento, vestuário, atividades, transporte, disponibilidade e preço dos produtos são todos determinados pelas condições e fenômenos atmosféricos. Por isso, o seu conhecimento e previsão é fundamental para o funcionamento da sociedade.

A meteorologia (do grego *meteoros*, que significa elevado no ar, e *logos*, que significa estudo) e a climatologia são as áreas do conhecimento que permitem ao homem conhecer e entender as condições atmosféricas. Durante muito tempo, ambas faziam parte do mesmo ramo do conhecimento. Porém, o homem, com o passar dos tempos, desenvolvendo técnicas e tecnologias, conseguiu apresentar explicações sobre os fenômenos naturais. E definir distinções mais claras e específicas existente entre os termos meteorologia e climatologia, e seus dois principais aspectos: o tempo e o clima (Diesel, 2018).

A meteorologia é o estudo da atmosfera em seu sentido mais amplo, que incluem a física, a química e a dinâmica sobre a superfície da Terra, os oceanos e a vida em geral. O objetivo da meteorologia é, portanto,

a percepção do estado da atmosfera e dos seus fenômenos (Vianello & Alves, 2012; Diesel, 2018).

Tempo é definido como o estado momentâneo da atmosfera num determinado lugar. Para tal, são consideradas as condições de temperatura, pressão, velocidade e direção do vento, umidade, nebulosidade, precipitação e outros fenômenos (Ayoade, 1996; Conti, 1998).

Já o clima pode ser definido como o “tempo médio”, ou seja, o clima de um determinado lugar, o qual é caracterizado pela análise de uma série histórica das condições do tempo (aproximadamente 30-35 anos), considerando as frequências de ocorrência, probabilidades, interações e condições extremas do tempo. Portanto, a climatologia trata do estudo científico do clima. Refere-se à estatística das características do estado da atmosfera e das condições de tempo predominantes, obtidas a partir de observações contínuas do tempo, com base na inferência dos valores durante um longo período em um determinado local (Ayoade, 1996). A climatologia utiliza os mesmos dados básicos da meteorologia, com os seus resultados sendo usados por meteorologistas na elaboração das previsões de tempo, na agricultura, na saúde, nos transportes, entre outros.

Tendo em vista a importância e a diversidade de aplicações práticas dessa área de conhecimento, apresentamos a seguir os elementos básicos da atmosfera, suas características, principais fenômenos atmosféricos e suas influências em diferentes locais do planeta.

## 2. CARACTERÍSTICAS DA ATMOSFERA

A atmosfera terrestre começou a se formar a cerca de 4,5 bilhões de anos, a partir da liberação de gases do interior da Terra principalmente por atividade vulcânica, passando por muitas alterações na sua composição e características. A atmosfera é muito fina, desvanece com a altura e não possui um topo definido. Porém, 80% da sua massa está contida abaixo de 10 km de altitude, onde a vida terrestre se concentra. É constituída de gases permanentes, gases variáveis, líquidos (água) e sólidos (Tab. 5.1). Os principais gases permanentes são Nitrogênio e Oxigênio, além de Argônio, Hélio e Criptônio. Os gases variáveis são Dióxido de carbono, vapor d'água e Ozônio. Os sólidos se dividem em inorgânicos (partículas finas, como argila, areia, fuligem, cinzas vulcânicas e sal marinho), orgânicos (pelos, esporos, pólen e fibra vegetal) e organizados (bactérias, fungos, vírus, líquens e algas).

**Tabela 5.1** Valores médios e percentuais da composição da atmosfera.

Gás	Partes por milhão por volume (ppm/v)	Percentual (%)
N <sub>2</sub>	781000	78,1%
O <sub>2</sub>	209000	20,1%
Ar	9340	0,9%
CO <sub>2</sub>	416	0,0416%%
Ne	18	0,0018%
He	5,2	0,00052%
CH <sub>4</sub>	1,87	0,000187%
H <sub>2</sub>	0,58	0,000058%
N <sub>2</sub> O	0,33	0,000033%
CO	0,1	0,00001%
O <sub>3</sub> (troposférico)	0,01–0,10	
O <sub>3</sub> (estratosférico)	0,5–10,0	
Hydrocarbonetos	0,005–0,02	
Halógenos carbônicos	0,001	
Óxidos de Nitrogênio (NOx)	0,00001–0.2	
H <sub>2</sub> O		Atmosfera: ~ 0.40%, Superfície: 1%- 4%

**Fonte** Dlugokencky (sem data), Dlugokencky e Tans (sem data), NOAA (2020).

- a) Nitrogênio:** É o elemento mais abundante da atmosfera. Absorve radiação ultravioleta e é indispensável à vida porque faz parte do ácido ribonucléico (RNA). Cerca de 25% (35 milhões de toneladas) do total de nitrogênio produzido é ciclado na atmosfera (Rockström, et al., 2009). São formados principalmente pelas indústrias de fertilizantes e nas queimadas e câmaras de combustão de motores de veículos, que contêm grandes quantidades de nitrogênio e oxigênio e, devido à altíssima temperatura, combinam-se formando os NOx.
- b) Oxigênio:** Desempenha um papel essencial do ponto de vista biológico, por tornar possível a vida aeróbica na terra. Absorve radiação ultravioleta, forma o Ozônio, permite a combustão e a decomposição, e propicia a dissociação do oxigênio molecular (O<sub>2</sub>) na alta atmosfera.
- c) Gás carbônico:** Do total de dióxido de carbono existente na Terra, cerca de 98% se encontra dissolvido na água dos oceanos sob a forma de bicarbonato, com quase todo o restante estando presente na atmosfera. Há um intercâmbio contínuo de gás carbônico entre a atmosfera e os seres vivos, através da respiração e fotossíntese, dos materiais da crosta (combustão e oxidação), da decomposição e respiração do solo e nos oceanos. O carbono integrante das moléculas sintetizadas pelos vegetais provém do gás carbônico atmosférico. O CO<sub>2</sub> também desempenha um papel de destaque na energética do sistema globo-atmosfera absorvendo energia solar e terrestre de determinados comprimentos de ondas, por isso ele é considerado termorregulador com uma forçante radioativa de 1,5 Wm<sup>-2</sup> (IPCC, 2007).
- d) Ozônio:** É encontrado desde níveis próximos da superfície terrestre até o topo da atmosfera, com as maiores concentrações ocorrendo entre 10 e 50 km de altitude. A concentração desse gás varia com a altitude, época do ano, hora do

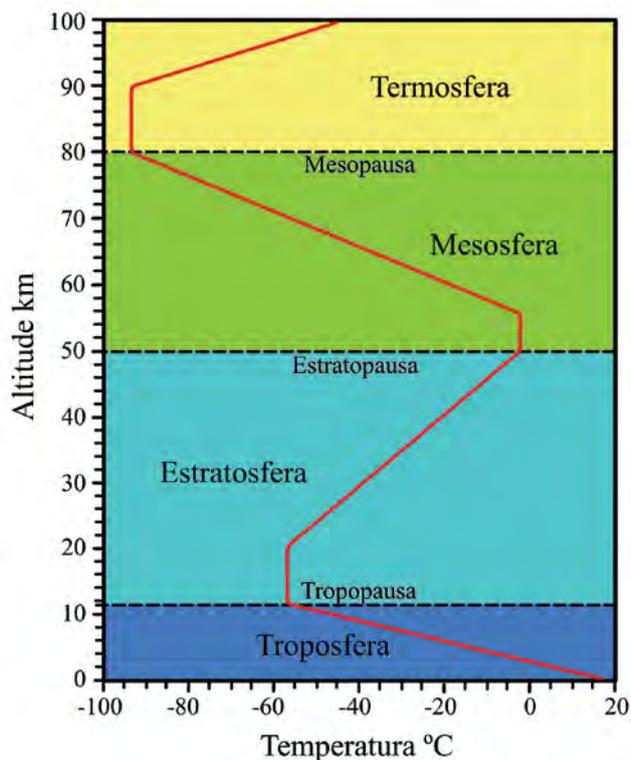
dia e ainda com uma maior ou menor atividade solar. Absorve radiação ultravioleta por conta da sua propriedade radioativa, o que o torna um dos gases mais importantes da atmosfera, embora concentrações elevadas deste gás em baixas altitudes possam gerar um amarelamento e “enferrujamento” das folhas das plantas, devido à oxidação dos cloroplastos, além de causar edemas e inflamações pulmonares em seres humanos (IPCC, 2005).

**e) Vapor d’água:** A concentração do vapor d’água na atmosfera, embora relativamente pequena, é variável e em geral diminui com a altitude. Em baixas altitudes, esta variável, em conjunto com a temperatura do ar, influencia diretamente no conforto térmico e na disponibilidade de água para formação das nuvens.

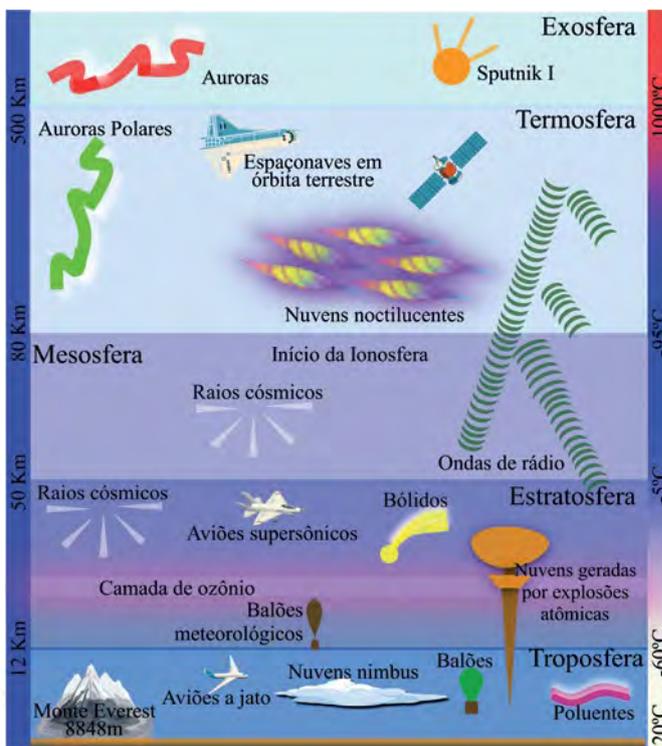
**f) Partículas sólidas:** Partículas de sal marinho, poeira e de outras naturezas são importantes no processo de condensação e formação de chuvas, porque funcionam como núcleos higroscópicos (Artaxo et al., 2009).

### 2.1. Divisão da atmosfera

Embora a atmosfera possa ser dividida e classificada de acordo com a pressão, densidade, altitude ou temperatura (Vesentini & Vlach, 2005, Ayoade, 2006), uma das formas mais comuns de se classificar a atmosfera baseia-se nas mudanças de temperatura (Fig. 5.1), que são características das diferenças entre a constituição gasosa de cada camada, além de serem responsáveis por produzirem fenômenos atmosféricos específicos (Fig. 5.2). A seguir são apresentadas as principais informações sobre cada uma das camadas atmosféricas:



**Figura 5.1** Divisão da atmosfera de acordo com a variação vertical da temperatura. **Ilustração** Gianfrancisco Schork.



**Figura 5.2** Classificação da atmosfera de acordo com a altitude e a temperatura, mostrando os locais de ocorrência de alguns fenômenos atmosféricos. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** Pidwirny (2006).

- a) Troposfera:** também conhecida como baixa atmosfera, é menos espessa nos polos e mais extensa no equador (média de 10 km). É a camada de maior concentração gasosa e onde se concentra a vida terrestre, além de ser a camada onde ocorre a maioria dos fenômenos meteorológicos: chuvas, nevoeiros, neves, furacões, ventos, nuvens, trovoadas etc. Nesta camada há um decréscimo normal da temperatura com a altitude à medida que a concentração de gases se torna mais rarefeita (-6,5°C por km), até aproximadamente -55°C.
- b) Tropopausa:** considerada como uma zona de transição isotérmica com espessura média de 3 km.
- c) Estratosfera:** tem como principais características a ausência de fenômenos meteorológicos e a difusão mais significativa da radiação solar. Nesse processo, a luz de maior difusão é a azul, o que confere a tonalidade azulada do céu. Nesta camada há um aumento do Ozônio (200 mg L<sup>-1</sup>), proporcionando um aumento da temperatura com a altitude. Sua espessura pode chegar a 20 km e a altura máxima a 50 km.
- d) Estratopausa:** considerada como uma zona de transição, sua temperatura é de 0°C e sua espessura pode variar de 3 a 5 km.
- e) Mesosfera:** camada atmosférica onde há substancial queda de temperatura que pode chegar a até -90°C em seu topo (a mais baixa de toda a atmosfera, juntamente com a Mesopausa), situado entre 50 e 80 km de altitude. Como há poucos elementos presentes, sendo eles monoatômicos, a temperatura se reduz a uma taxa de 3,5°C por km. Nesta camada também ocorrem os fenômenos da aeroluminescência das emissões de hidroxila e é nela que se dá a combustão dos meteoróides.
- f) Mesopausa:** região da atmosfera que determina o limite entre uma atmosfera com massa molecular constante e onde predomina a difusão

molecular. Sua espessura é, em média, de 10 km, sendo a camada com a temperatura mais baixa da atmosfera (cerca de -90°C).

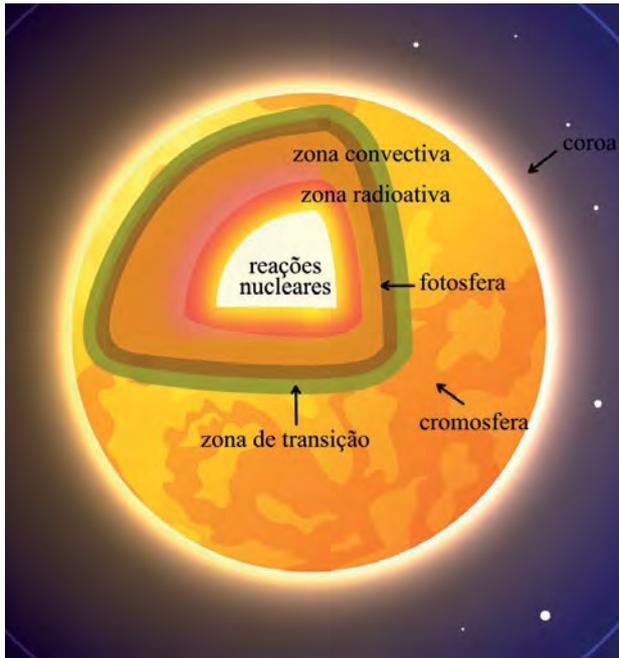
- g) Termosfera:** também denominada de Quimiosfera, sua temperatura aumenta com a altitude rápida e monotonicamente. Esta camada da atmosfera vai desde 90 km, até aproximadamente 640 km de altitude, em relação à superfície do planeta Terra. É a camada onde ocorrem as auroras (boreais e austrais), onde também orbitam os ônibus espaciais e onde há a refração das ondas de rádio.
- h) Exosfera:** última das camadas atmosféricas, é uma região onde as moléculas movem-se em trajetórias balísticas e raramente colidem entre si. Nesta região, o significado gás não tem mais sentido, em razão da sua elevada rarefação.

### 3. RADIAÇÃO

Radiação ou energia radiante, na forma de Radiação Eletromagnética (REM), é a energia produzida em grandes quantidades pelo sol que se propaga sem necessidade da presença de um meio material (vácuo). O sol é uma esfera de gases incandescentes composta, principalmente, por átomos de hidrogênio e hélio, embora ocorra a presença de outros gases, como carbono e oxigênio.

O sol é composto por: núcleo- região onde ocorrem as reações nucleares; zona radiativa; zona convectiva; fotosfera; zona de transição; e cromosfera (Fig. 5.3); emitindo grande quantidade de energia cinética. Na sua superfície, a energia dos átomos equivale (em média) a 5.770 K, com uma quantidade de radiação emitida em torno de 72 milhões de Wm<sup>-2</sup>. Até chegar à órbita terrestre, esse valor cai para 1.367 Wm<sup>-2</sup> (constante solar).

Quando estes raios solares adentram a atmosfera, eles são modificados de diversas formas. Enquanto uma parte da energia total é absorvida, outra é



**Figura 5.3** Partes do sol. **Ilustração** Gianfrancisco Schork.  
**Fonte** [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/sunearth/science/Sunlayers.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/sunearth/science/Sunlayers.html).

refletida de volta para o espaço por moléculas, vapor d'água da atmosfera, partículas de poeira, entre outros constituintes. Apenas 60 a 70% da energia solar atinge a superfície do planeta. Uma parte importante da radiação emitida pelo sol, porém, não é visível ao olho humano, que consegue perceber apenas a faixa de radiação do espectro eletromagnético com comprimento de ondas de  $0,4 \mu\text{m}$  (violeta) a  $0,8 \mu\text{m}$  (vermelho). A radiação com comprimento de onda abaixo de  $0,4 \mu\text{m}$  é chamada de radiação ultravioleta (UV), enquanto aquela com comprimento de onda acima de  $0,8 \mu\text{m}$  é chamada de infravermelha (IV). A Radiação UV compreende ondas de  $0,28$  a  $0,38 \mu\text{m}$  e têm efeito nocivo sobre as plantas e seres humanos.

### 3.1. Absorção/reflexão

Considerando-se 100% como o total de radiação que chega ao topo da atmosfera em um ano, podemos distribuí-la da seguinte forma:

- > Radiação Solar absorvida pela atmosfera = 19% (17% gases e partículas + 2% nuvens);
- > Radiação Solar absorvida pela superfície da Terra = 47% (23% radiação direta + 10% radiação difusa + 14% transmissão/reflexão das nuvens)
- > Radiação Solar reenviada para o espaço = 34% (23% refletida pelas nuvens + 7% difundida pela atmosfera + 4% refletida pela superfície da Terra).

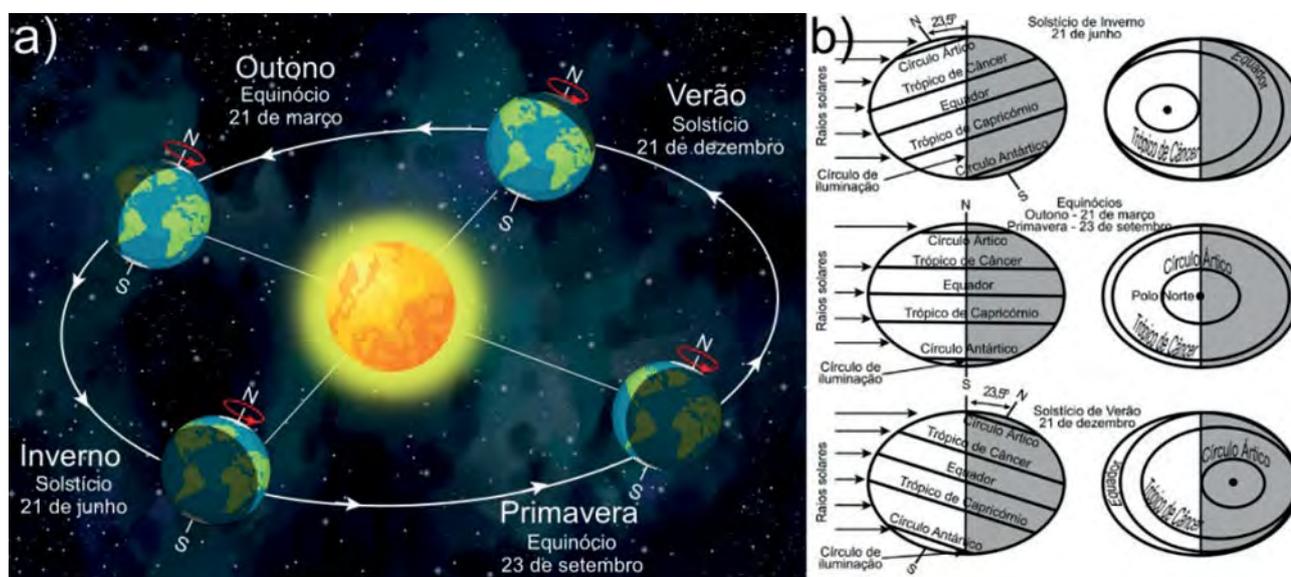
Como o solo terrestre, a atmosfera absorve e emite energia. Embora a atmosfera seja quase transparente à radiação de ondas curtas, emitida pelo sol, ela apresenta alta capacidade de absorção de radiação de ondas longas, emitida pela Terra. Já as nuvens absorvem radiação em todos os comprimentos de onda. Enquanto a atmosfera absorve somente 19% da radiação solar que atinge a Terra, que é de ondas curtas, somente 9% da radiação infravermelha, emitida pela Terra, é liberada diretamente para o espaço, principalmente através da chamada janela atmosférica, representada pelos comprimentos de onda de  $8,5$  a  $11 \mu\text{m}$ . A atmosfera reirradia, portanto, a radiação de ondas longas absorvida, em menor proporção para o espaço e em sua maior parte de volta para a superfície terrestre, que é chamada de contra-irradiação.

Essa relação de reflexão e absorção da radiação solar pela atmosfera é responsável pela existência do **Efeito Estufa**, um fenômeno natural, porém essencial para manter a temperatura do planeta em condições para existência da vida como nós a conhecemos. Os principais gases causadores do efeito estufa são:  $\text{CO}_2$ ,  $\text{O}_3$ ,  $\text{NO}_2$  e  $\text{CH}_4$ , que absorvem a radiação de ondas longas com maior eficiência, de forma que uma alteração na quantidade desses gases na atmosfera pode provocar mudanças climáticas importantes.

### 3.2. Distribuição e sazonalidade da radiação (estações do ano)

Na Terra, a região equatorial recebe maior quantidade de radiação. Com o aumento da latitude, a incidência vai ficando mais difusa sendo mínima na região polar. No entanto, a quantidade de radiação que incide sobre um determinado ponto da superfície da Terra não é o mesmo ao longo do ano. Os movimentos de rotação e translação, aliado à inclinação (Obliquidade) do seu eixo (variando entre

21,8° e 24,4°), faz com que tenhamos uma sazonalidade na quantidade de radiação recebida, e consequentemente da temperatura, bem como de ventos, pluviosidade entre outros fenômenos, de acordo com as estações do ano (Fig. 5.4). Os solstícios são os instantes em que o sol se encontra mais afastado do plano equatorial celeste (ou terrestre) e equinócios, os instantes em que o sol passa pelo plano equatorial. Essa variação na incidência de radiação, regem a existência das estações do ano.



**Figura 5.4** Posições da Terra em relação ao sol durante os eventos de equinócios e solstícios. **A)** posições da Terra em relação ao sol durante as estações do ano. **Fonte** Oliveira (2014); **B)** inclinação e incidência de luminosidade da Terra durante as estações do ano. **Fonte** Reboita et al. (2015). **Ilustrações** Gianfrancisco Schork.

## 4. TEMPERATURA DO AR

A temperatura é medida através de um índice que expressa a quantidade de calor sensível de um corpo, ou seja, é a intensidade de vibração da matéria, que quando nula (menor temperatura possível de um corpo), chamamos de zero absoluto (0 Kelvin ou -273, 15°C), estado no qual a energia cinética média é nula. A temperatura de um corpo varia de acordo com o saldo de radiação que incide sobre ele. Assim, na superfície terrestre a

temperatura varia de acordo com a latitude, hora do dia, dia do ano (que determinam a altura do sol e a intensidade e duração da radiação solar incidente), cobertura de nuvens (pois ela afeta o fluxo tanto de radiação solar como de radiação terrestre) e natureza da superfície (determina o albedo e a porcentagem da radiação solar absorvida usada para aquecimento por calor sensível e aquecimento por calor latente).

Esse saldo de radiação é destinado, basicamente, a três processos físicos, entre os quais dois estão associados à temperatura: fluxo convectivo de calor sensível (temperatura do ar) e o fluxo por condução de calor no solo (temperatura do solo). Por isso, a temperatura do ar é usualmente maior nos trópicos e menor em latitudes médias, maior durante o dia que a noite, sob céu claro do que nublado e quando o solo está seco ao invés de úmido. De acordo com a Organização Meteorológica Mundial- OMM, para efeitos de previsão, as observações da temperatura do ar na superfície, quando realizadas em terra, devem ser feitas com os sensores em um abrigo (não exposto ao sol) a uma altura de 1,25 a 2,00 m acima do terreno.

#### 4.1. Fatores para o aquecimento diferencial da terra e do mar

##### a) Calor específico

Uma importante razão para que as temperaturas da superfície da água aumentem e diminuam mais vagarosamente diz respeito à capacidade calorífica e calor específico da água em relação à superfície da Terra. O calor específico é uma grandeza física que define a variação térmica de determinada matéria ou substância, sendo medido em  $\text{cal/g}\cdot^{\circ}\text{C}$  (a quantidade de calor necessária para aumentar de  $1^{\circ}\text{C}$  uma massa de 1 g da substância). O calor específico é quase 3x maior para a água que para a terra. Assim, a água necessita de bem mais calor para aumentar sua temperatura na mesma quantidade que a terra, para uma mesma quantidade de massa.

##### b) Albedo

É o coeficiente de reflexão, sendo ele a razão entre a luz refletida por um objeto e a luz que incide sobre ele. Superfícies claras e polidas refletem mais, enquanto superfícies escuras e não polidas absorvem mais. Como a superfície da Terra é opaca, o calor é absorvido somente na superfície. A água, sendo mais transparente, permite que a radiação solar penetre em profundidades de vários metros. O albedo varia entre 0 (nenhuma luz refletida) a

1 (toda a luz refletida), ou pode ser expressa em porcentagem (valor médio da Terra é de 30%).

##### c) A água é altamente móvel

Quando aquecida, a turbulência distribui o calor através de uma massa bem maior. A variação diurna de temperatura na água alcança a profundidade de 6 m ou mais, enquanto a variação anual pode atingir de 200 a 600 m. Como o calor não penetra profundamente no solo ou na rocha, permanecendo numa fina camada superficial, devido ao lento processo de condução, as variações diárias são muito pequenas além da profundidade de 10 cm, enquanto as variações anuais atingem apenas 15 m.

##### d) Evaporação

A evaporação é o processo físico no qual um líquido ou sólido passa ao estado gasoso, resultando no seu resfriamento, uma vez que a mudança de estado, no caso da água a  $25^{\circ}\text{C}$ , consome  $585 \text{ cal}\cdot\text{g}^{-1}$ . Como a taxa de evaporação é bem maior sobre a água do que sobre a terra, as localidades costeiras apresentam menores variações anuais de temperatura. Em uma escala global, a influência moderadora da água pode ser demonstrada quando se comparam as variações de temperatura no Hemisfério Norte (HN) e Sul (HS). Como o HN é coberto por 61% de água, contra 39% de terra e o HS tem apenas 19% de terra, contra 81% de água, as variações de temperatura observadas ao longo do ano no HN são bem maiores do que no HS.

##### e) Correntes oceânicas

Os efeitos de correntes oceânicas sobre as temperaturas de áreas adjacentes dependem diretamente da temperatura da água que transportam. Correntes oceânicas quentes que se dirigem para os polos, têm efeito moderador do frio, a exemplo da deriva do Atlântico Norte, uma extensão da corrente do Golfo (quente), que mantém as temperaturas mais altas no norte da Europa do que o esperado para aquela latitude (Stramma, 1984). Da mesma forma, a Corrente do Labrador (fria) torna a costa leste norte-americana muito mais fria do que seria se não fosse a sua existência.

**f) Altitude**

A diminuição vertical da temperatura média na troposfera é de  $6,5^{\circ}\text{C km}^{-1}$ . Contudo, a diferença não é totalmente explicada pela taxa de variação vertical, pois a diferença de temperatura entre localidades não corresponde exatamente à essa taxa de variação de altitude, mas sim pela interação e composição das camadas limites de cada local (Stull, 1988). O fato da temperatura em lugares com maior altitude ser maior que a calculada através da taxa de variação vertical resulta da absorção e reirradiação da energia solar pela superfície do solo. Além de influir sobre a temperatura média, a altitude também influi sobre a amplitude do ciclo diurno. Como a densidade do ar também diminui com a altitude, o ar absorve e reflete uma porção menor de radiação solar incidente. Consequentemente, com o aumento da altitude a intensidade da insolação também cresce, resultando num rápido e intenso aquecimento durante o dia e um resfriamento também bem mais rápido durante a noite.

**g) Posição geográfica**

A posição geográfica pode ter influência sobre a temperatura em uma localidade específica por variadas razões. As principais influências são: latitude (variação natural da incidência de radiação no globo), áreas de florestas, áreas desnudas ou desérticas, presença de corpos hídricos, como grandes rios ou lagos, proximidade da zona costeira, ou, ainda, intensidade e direção dos ventos (**ex:** áreas nas quais os ventos dominantes se dirigem do mar para a terra x áreas nas quais os ventos são dirigidos da terra para o mar).

## 5. UMIDADE, NUVENS E PRECIPITAÇÃO

**5.1. Umidade**

Umidade é a quantidade de vapor d'água na atmosfera. Umidade Relativa (UR) é definida como a razão entre a umidade específica observada e aquela que prevaleceria em condições saturadas à mesma temperatura, sendo expressa em percentagem. São medidas mais comumente pelos Higrógrafos ou Psicrômetros.

Umidade específica é a quantidade de vapor de água contido em uma determinada massa de ar, medida em  $\text{g kg}^{-1}$  (gramas de vapor por quilograma de ar). O ar quente pode conter muito mais vapor d'água que o ar frio. A Umidade específica é usada para descrever as características de umidade de grandes massas de ar. Por exemplo, o ar seco nas regiões árticas tem umidade específica de  $0,2 \text{ g kg}^{-1}$ , enquanto no equador a umidade chega a  $18 \text{ g kg}^{-1}$ . É também uma medida da quantidade de água que pode ser extraída da atmosfera como precipitação. Quanto à sua variação latitudinal, a umidade tende a ser máxima no equador e mínima nos polos, acompanhando a temperatura (Vianello & Alves, 1991; Oyade, 1996).

**5.2. Nuvens**

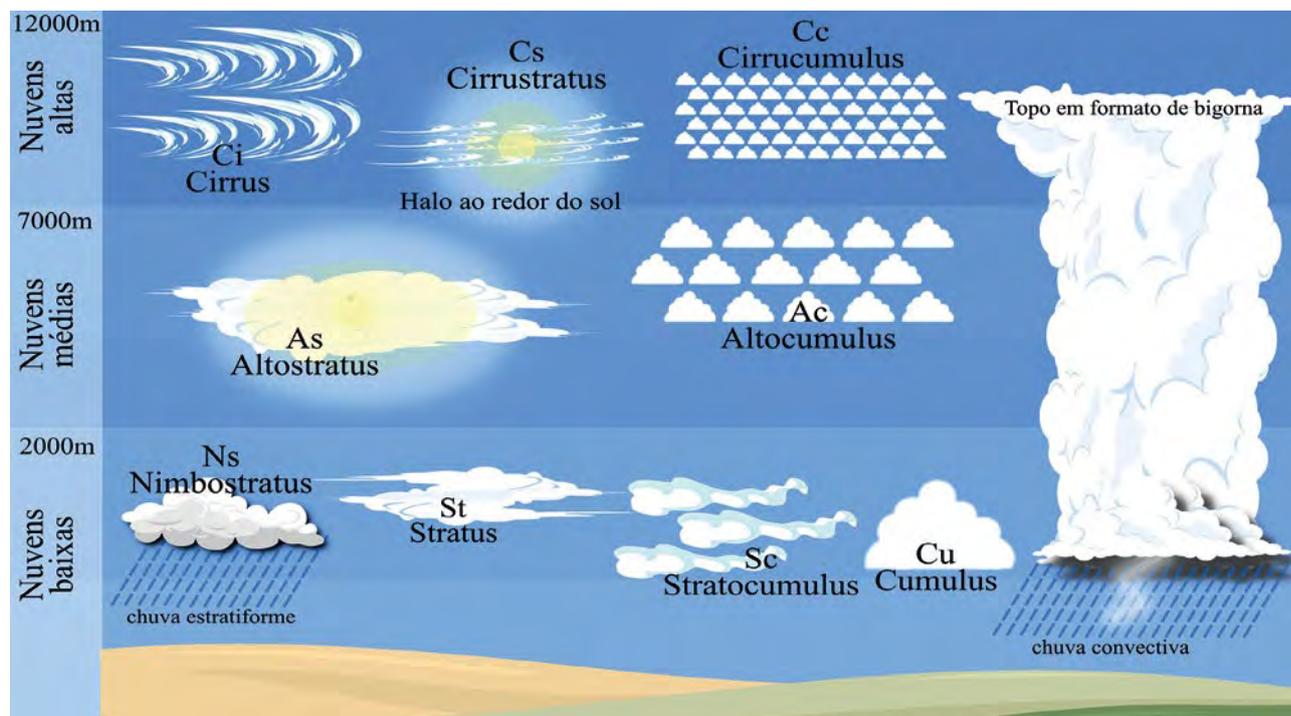
Nuvem é um conjunto visível de partículas minúsculas de água líquida ou de gelo, podendo ser ambas ao mesmo tempo, em suspensão na atmosfera. Este conjunto pode também conter partículas de água líquida ou de gelo em maiores dimensões, e partículas procedentes, por exemplo, de vapores industriais, de fumaças ou de poeira.

O vapor d'água atmosférico pode passar para a fase líquida pelo processo de condensação, ou diretamente para a fase sólida, pelo processo de sublimação, através do processo de elevação das massas de ar adiabaticamente e com intensa

liberação de calor latente. Esses processos também dão origem às nuvens, aos nevoeiros, ao orvalho e à geada (Oyade, 1996). Para haver a formação de nuvens, precisa haver condensação, quantidade de vapor d'água suficiente e núcleos de condensação.

**Núcleos de condensação** são partículas em torno das quais o vapor d'água se condensa e, a partir daí, continua a se condensar em torno da gotícula inicial. São constituídos de substâncias higroscópicas, como, por exemplo, o cloreto de sódio proveniente do mar, que tem uma grande afinidade com o vapor d'água. Além do cloreto de sódio, aerossóis (Artaxo et al., 2009) e produtos oriundos de combustão também são núcleos ativos. Sem a presença desses núcleos não há formação de gotículas, a não ser que a atmosfera esteja supersaturada (105% de UR), o que raramente acontece. Como a atmosfera dificilmente está isenta de impurezas, os núcleos de condensação estão sempre presentes.

Existem 10 gêneros de nuvens: Cirrus, Cirrocumulus, Cirrostratus, Altocumulus, Altostratus, Nimbostratus, Stratocumulus, Stratus, Cumulus e Cumulonimbus (Varejão-Silva, 2006). As nuvens estão geralmente situadas a alturas compreendidas entre o nível do mar e 18 km nas regiões tropicais, 13 km nas altitudes médias e 8 km nas regiões polares. As nuvens do tipo Cirrus, Cirrocumulus e Cirrostratus se formam acima de 6 km de altura, na chamada Camada Superior da Troposfera, sendo classificadas como nuvens altas. Em geral, estão relacionadas a tempo bom. Na camada média da troposfera (2 a 6 km), são encontradas nuvens Altocumulus e Altostratus, sendo classificadas como nuvens médias. Já na camada inferior, ocorrem as nuvens Stratus, Stratocumulus, Nimbostratus e Cumulus, que são classificadas como nuvens baixas (abaixo de 2 km) (Fig. 5.5).



**Figura 5.5** Caracterização e altura de nuvens. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** <https://www.cptec.inpe.br/glossario.shtml>.

### 5.3. Processos de precipitação

A precipitação é medida por um pluviômetro, em mm, no qual cada mm corresponde a um litro por metro quadrado, podendo ser de três tipos principais: frontal, convectiva e orográfica.

#### a) Precipitações frontais

São originárias de nuvens formadas a partir do encontro de massas de ar frio e quente. A massa

quente e úmida (mais leve) tende a se elevar de forma abrupta, resfriando-se adiabaticamente, isto é, sem trocar calor com o meio adjacente. As chuvas frontais ou ciclônicas caracterizam-se por longa duração (dias), intensidade moderada a fraca e sem horário predominante para sua ocorrência, podendo também serem fortes e com possibilidade de raios (Fig. 5.6).

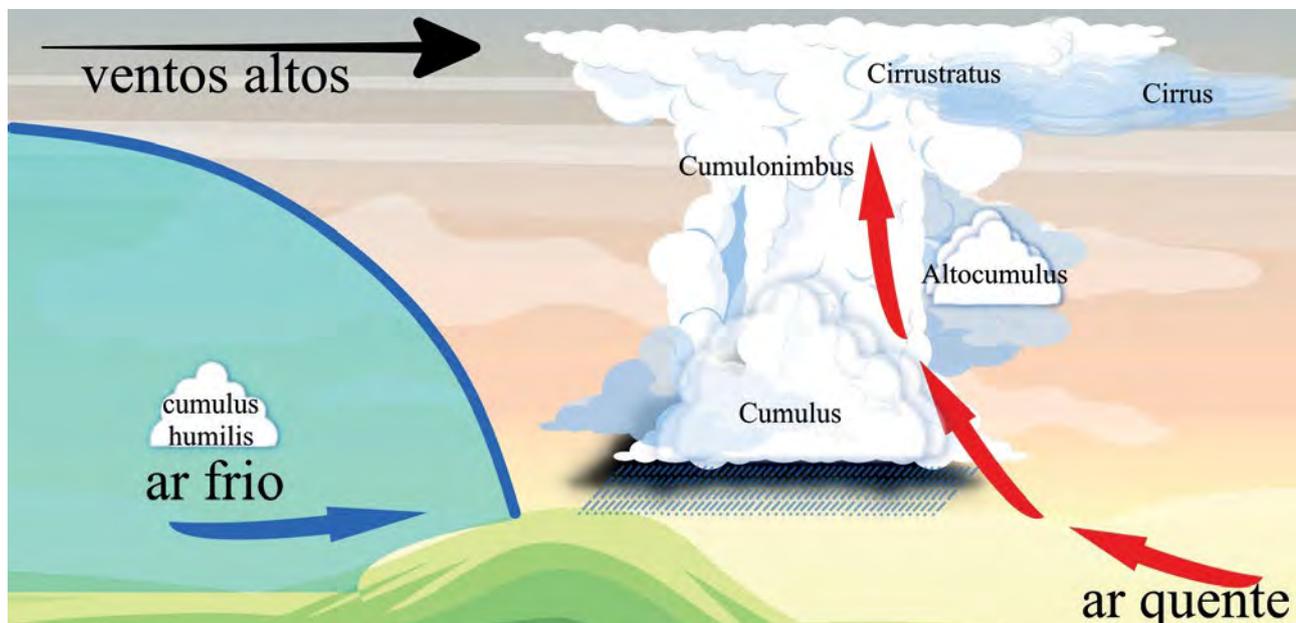


Figura 5.6 Esquema de formação do sistema de precipitação frontal fria. Ilustração Gianfrancisco Schork. Fonte Varejão-Silva (2006).

#### b) Precipitações convectivas

Originam-se de nuvens formadas a partir de correntes convectivas (térmicas), que se resfriam adiabaticamente ao se elevarem, resultando em nuvens de grande desenvolvimento vertical (cumuliformes). As chuvas convectivas se caracterizam por forte intensidade e curta duração, podendo haver descargas elétricas, trovoadas, ventos fortes e granizo, sendo predominantes no período da tarde e da noite (Fig. 5.7).

#### c) Precipitação orográfica

O vento (barlavento) por sua direção faz a massa de ar úmido subir a montanha. Eventualmente, a precipitação começa. Depois de passar o topo, começa a descer (sotavento) e a se esquentar, chegando ao pé da montanha seco e quente (Armani & Tarifa, 2000). As barreiras orográficas mais significativas de chuvas orográficas que ocorrem no Brasil são: a Serra do Mar, na região Sul-Sudeste, e o Planalto da Borborema, na região Nordeste, cuja estiagem pode durar até 8 meses (Ayoade, 1996; Mendonça, 2007) (Fig. 5.8).

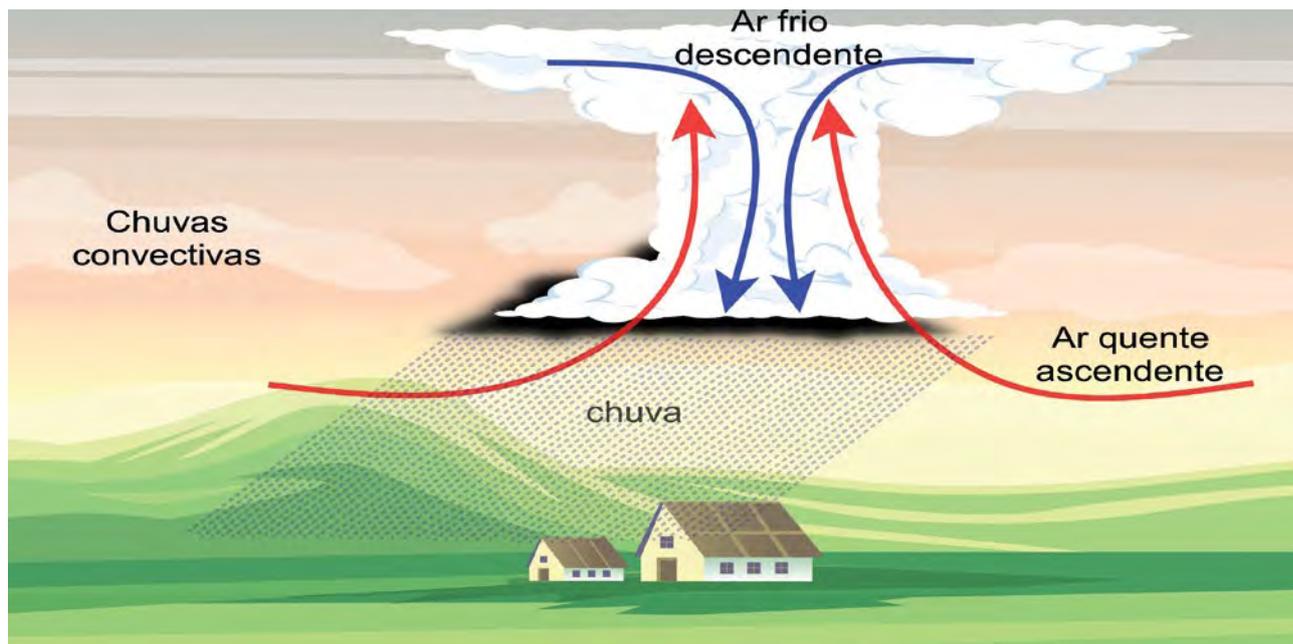


Figura 5.7 Precipitação Convectiva. Ilustração Gianfrancisco Schork.

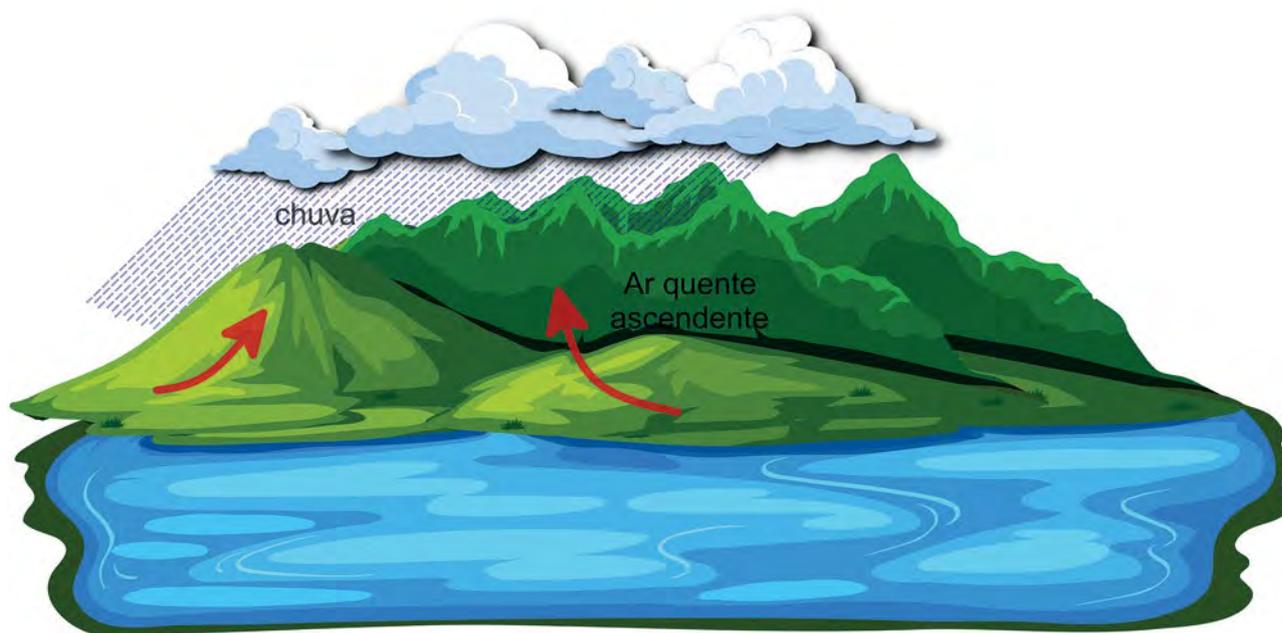


Figura 5.8 Precipitação orográfica. Ilustração Gianfrancisco Schork.

#### 5.4. Nevoeiros

Nevoeiro é um tipo de nuvem estratiforme que se forma a partir de um resfriamento da massa de ar na superfície ou muito próxima a ela. Por sua estreita associação com inversões de temperatura, apresenta grande importância nos transportes, segurança pública e atividades humanas em geral (Varejão-Silva, 2006).

Os nevoeiros merecem uma séria consideração como propriedade da massa de ar para os propósitos desta discussão. Do ponto de vista físico, nevoeiros podem ser formados tanto por resfriamento ao ponto de orvalho como por adição de vapor d'água até que a temperatura do ponto de orvalho seja igual à temperatura atual.

A classificação considera dois tipos principais, dependendo de qual dos efeitos citados é predominante no sentido de igualar a temperatura do ponto de orvalho com a temperatura atual. Estes dois tipos são: nevoeiros formados por abaixamento de temperatura de uma massa de ar e nevoeiros frontais, formados na presença de precipitação.

## 6. CIRCULAÇÃO ATMOSFÉRICA

Podemos dizer que a circulação atmosférica é originada pela radiação solar, assim como a circulação oceânica. A circulação geral de larga escala do ar na troposfera, assim como a circulação superficial dos oceanos, consiste no movimento de fluidos, em contato físico, com grande interação e apresentando comportamento semelhante. Por isso que muitos princípios discutidos com respeito aos oceanos são largamente aplicados também à atmosfera.

Em toda a faixa intertropical, a superfície da Terra recebe mais radiação do que perde. Já nos polos a quantidade de radiação absorvida é menor. Se o calor, não fosse transportado do equador para os polos, o equador se tornaria cada vez mais quente. Se o frio não fosse transportado dos polos para o equador, os polos se tornariam cada vez mais frios. A atmosfera é, portanto, um grande agente de transporte de calor, através da sua circulação (Holton, 2004), assim como as correntes marinhas.

### 6.1. Distribuição da pressão atmosférica e ventos na troposfera

O aquecimento desigual da superfície do solo gera diferenças de temperatura (dos polos e do

equador, da terra e do mar), que por sua vez vão gerar diferenças de **pressão atmosférica**. Esse gradiente de pressão entre as diferentes regiões vai originar movimentos do ar (ventos) que são muito importantes no tempo meteorológico. Portanto, os ventos na troposfera são gerados em zonas de Alta Pressão, dirigindo-se às zonas de Baixa Pressão, com sua velocidade dependendo diretamente da magnitude do gradiente de pressão.

Zonas de Baixa Pressão Atmosférica, ou Ciclônicas, são regiões de encontro (convergência) de ventos. Centros de baixa pressão ocorrem quando o ar se aquece, torna-se mais leve e sobe. Portanto, as zonas de baixa pressão são mais quentes, receptoras de massas de ar e ventos. Além da ausência de ventos é comum a ocorrência de chuvas causadas pela evaporação e pelo movimento ascendente do ar, além da concentração de nuvens carregadas pelos ventos que se dirigem das zonas de alta pressão para as zonas de baixa.

Já Zonas de Alta Pressão Atmosféricas, ou Anti-ciclônicas, são regiões de formação (divergência) de ventos. Ocorrem quando o ar se resfria, torna-se mais denso e desce. As áreas frias ou de alta pressão como as tropicais (próximas aos trópicos de Câncer e de Capricórnio) e as polares, são dispersoras de massas de ar e ventos fortes e, como consequência, apresentam baixa cobertura de nuvens, elevada precipitação e maior salinidade das águas superficiais.

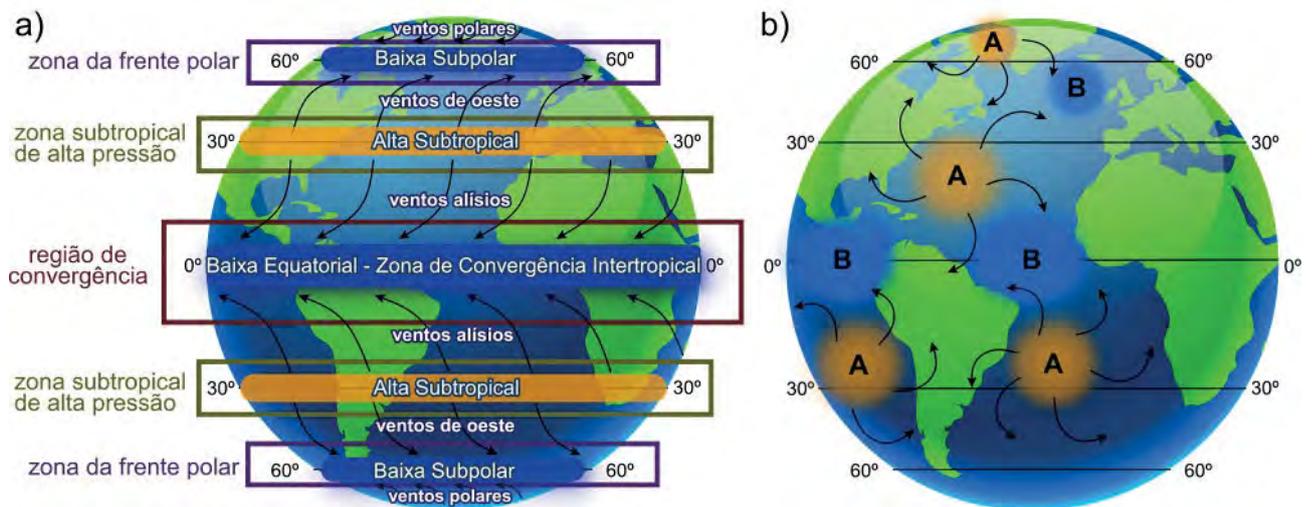
A região equatorial da Terra corresponde à uma grande faixa de baixa pressão atmosférica, devido às altas temperaturas, na qual predominam os ventos alísios, de Nordeste, no Hemisfério Norte, e de Sudeste, no Hemisfério Sul, que ao se encontrarem na região equatorial formam a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), também conhecida como zona de calmarias. É uma das faixas do planeta mais chuvosas (Miller, 1971), razão pela qual concentra também as grandes florestas equatoriais (Amazônia, Congo, Malásia, Bornéu). Os deslocamentos da ZCIT influenciam diretamente o regime de chuvas

na Amazônia e, assim, em boa parte da América Latina. Devido à sazonalidade da incidência da radiação solar, o posicionamento geográfico das zonas de alta e baixa pressão também oscilam sazonalmente. De junho a setembro, a ZCIT se desloca para o Norte, devido ao inverno no HS que intensifica o centro de alta pressão localizado em torno do Trópico de Capricórnio, enquanto de dezembro a fevereiro, ela se move mais para o sul, aproximando-se da linha equatorial, devido ao verão no HS e o consequente enfraquecimento do centro de alta pressão aí localizado. Os “cinturões” de alta pressão atmosférica, situados próximos aos Trópicos de Câncer (HN) e de Capricórnio (HS), em torno de 30° de latitude, são os responsáveis pela formação dos ventos alísios, que se dirigem para a ZCIT, e dos ventos de oeste, em direção às maiores latitudes, em cada hemisfério (Molion, 2002). Os ventos de oeste predominam na faixa entre 30 e 60° de latitude de cada hemisfério. Na Baixa Subpolar (em torno de 60° N e S) eles se encontram com os ventos de Leste (ou polares), formados na Alta Polar (Fig. 5.9).

Devido ao **efeito de Coriolis**, os ventos não se dirigem em sentido perpendicular aos centros de alta e de baixa pressão. A rotação da Terra desvia o

movimento (Holton, 2004) de qualquer corpo que se desloque sobre a sua superfície, para a direita, no HN, e para a esquerda no HS. Tal desvio, no entanto, varia significativamente com a latitude: o efeito de Coriolis é zero no equador e tende ao máximo nos polos, além de ser proporcional à velocidade do vento (ou seja, o desvio aumenta com ventos mais fortes) (Holton, 2004) (Ver capítulo: *Introdução à oceanografia pesqueira - Vol. 2*).

A ação dos ventos (fricção) sobre os oceanos, promove uma transferência de energia (atmosfera-hidrosfera), gerando as principais correntes oceânicas superficiais (primeiras centenas de metros de profundidade). O movimento inicial das massas de água “empurradas” pelos ventos, também serão desviados pelo efeito de Coriolis. Por isso os grandes giros oceânicos ocorrem em sentido dextrógiro (horário) no Hemisfério Norte e sinistrógiro no Hemisfério Sul (anti-horário). A distribuição das correntes marinhas superficiais nos oceanos reflete, portanto, em grande medida, o padrão dos ventos do globo, especialmente dos ventos predominantes (tanto no Hemisfério Norte quanto no Sul), que são, nos dois hemisférios, os Ventos alísios, os Ventos de Oeste e Ventos de Leste (polares).



**Figura 5.9** Padrão de circulação horizontal na troposfera. **A)** idealizado. **B)** real. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** Andrade e Basch (2017). [https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/7715/1/Livro%20Hidrologia\\_Clima.pdf](https://dspace.uevora.pt/rdpc/bitstream/10174/7715/1/Livro%20Hidrologia_Clima.pdf).

## 6.2. Células de circulação vertical na troposfera

Existem na atmosfera terrestre três células de circulação em cada hemisfério: uma na região equatorial (célula de Hadley), outra em latitudes médias (Célula de Ferrel) e outra nos polos (Célula Polar), que são geradas pela chamada instabilidade baroclínica (Nieuwolt, 1972; Holton, 2004; Marshall, 2001).

A Célula de Hadley ou célula tropical é um modelo de circulação fechada da atmosfera terrestre predominante nas latitudes equatoriais e tropicais. Esta circulação está intimamente relacionada aos ventos alísios, às zonas tropicais úmidas, desertos subtropicais e *jet streams*. A circulação de Hadley se origina pelo transporte de calor desde as zonas equatoriais até às latitudes médias, em torno de 30°, onde a quantidade de radiação solar incidente é normalmente menor. Este calor é transportado em um movimento celular, com o ar ascendendo por convecção nas regiões equatoriais e deslocando-se até as latitudes superiores, pelas camadas mais altas da troposfera. A subida do ar quente no equador está acompanhada pela formação frequente de tempestades convectivas na chamada ZCIT.

As Células de Ferrel estão situadas em médias latitudes e transportam energia de uma área fria (Célula Polar) para uma área quente e vice-versa. Uma característica desta célula é que elas circulam em direção oposta à Célula de Hadley e à Célula Polar. A circulação meridional média realiza um grande transporte de energia da zona equatorial, vinda da Célula de Hadley através da circulação dos vórtices em direção aos polos e dos polos para as zonas equatoriais (Holton, 2004; Varejão-Silva, 2006).

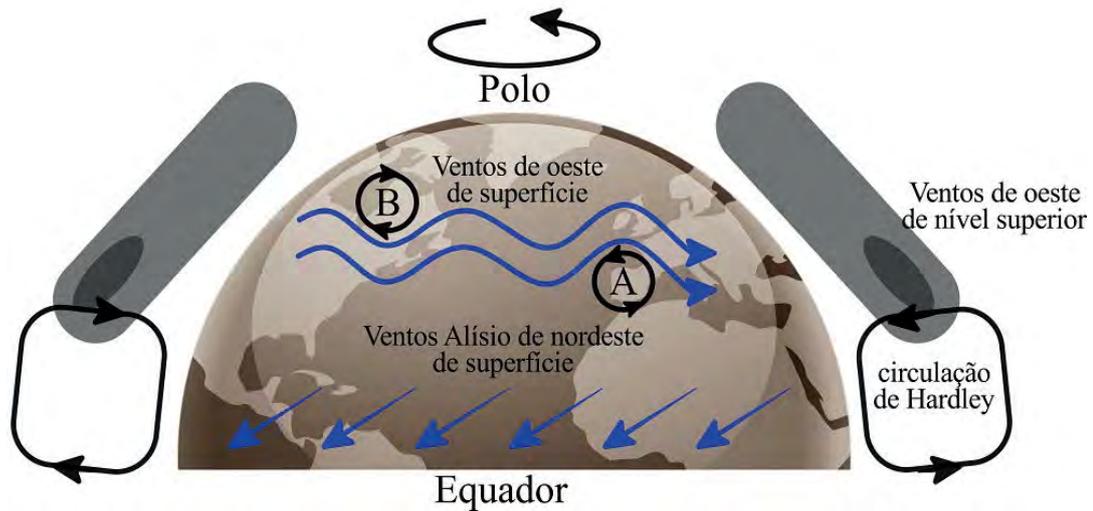
Quanto à Célula Polar, existe uma subsidência nas proximidades dos polos que produz uma corrente próxima à superfície da Terra, em ambos os hemisférios, em direção ao equador, formando, assim, os Ventos Polares de Leste (Nieuwolt 1972; Holton, 2004). O encontro dos ventos polares que

se movem em direção ao equador com a corrente de oeste de baixas latitudes (quentes) forma as frentes polares. Já a instabilidade baroclínica é devido ao aquecimento diferenciado entre o equador e os polos, criando na região subtropical um gradiente meridional de temperatura que aumenta continuamente, pois a Célula de Ferrel, hipoteticamente, se aquece mais rapidamente do que a Célula Polar (Riehl, 1965; Holton, 2004). Este gradiente de temperatura não pode aumentar indefinidamente, porque quando chega a um valor crítico, surgem advecções de ar frio em direção ao equador e ar quente em direção aos polos, a fim de compensar este gradiente de temperatura (Nieuwolt 1972, Holton, 2004).

Estas advecções perturbam a corrente de jato dos níveis superiores, ondulando-os. Por outro lado, as advecções são influenciadas pelo jato, adquirindo sua curvatura de tal forma que ao passar pela região do jato as advecções tomam um “empurrãozinho”, ou seja, tem sua intensidade aumentada pela energia potencial “que roubam” do estado básico (jato). O processo através do qual as perturbações crescem exponencialmente usando para isso a energia potencial do estado básico é chamado de instabilidade baroclínica (Fig. 5.10).

## 6.3. Massas de ar

Dentro das ciências atmosféricas, massas de ar são definidas como uma extensa parcela de ar que pode ter milhares de quilômetros quadrados e com uma distribuição vertical bem uniforme tanto de temperatura, quanto de umidade. Estas características são provenientes da origem de formação delas, como resultado do tempo de contato que ela teve com a superfície, adquirindo, assim, as características da região que a formou (Ayoade, 1996). Em razão da diferença de pressão entre diferentes áreas, as massas de ar se movem, deslocando-se sempre de uma área de alta pressão (baixa temperatura e alta densidade) para uma área de baixa pressão (alta temperatura



**Figura 5.10.** Desenho esquemático da Instabilidade Baroclínica. **Ilustração** Gianfrancisco Schork.

e baixa densidade), de forma quase constante, com a estratificação das suas grandezas escalares (temperatura e umidade) das componentes meridional e zonal sofrendo pequena variação em seu trajeto (Varejão-Silva, 2006).

Os locais mais propícios para a formação de massas de ar são nas proximidades dos polos e no entorno da faixa anticiclônica às cercanias de 30° de latitude (tanto sul como norte) das áreas cobertas de gelo, regiões desérticas e extensas áreas uniformes (florestas, savanas). As massas de ar ao longo de sua trajetória, apresentam certa tendência para igualar suas pressões, estabelecendo uma dinâmica atmosférica, ou seja, uma circulação geral de ar quente entre os trópicos e os polos, passando pelas zonas de médias latitudes (Holton, 2004).

Segundo Retallack (1970) e Varejão-Silva (2006), as massas de ar podem ser classificadas como Polar ou Tropical e subclassificadas como Marítima e Continental, esta última apresentando, em geral, menor umidade do que as massas de ar marítimas para uma mesma região e época do ano. As massas de ar podem ser classificadas, ainda, quanto à sua temperatura, podendo ser considerada uma massa de ar quente ou fria (Holton, 2004).

As massas de ar quente se deslocam para uma área mais fria, perdendo assim, calor por condução para a superfície. Neste movimento são formadas nuvens estratiformes e nevoeiros, com atmosfera mais estável nesta camada. Já as massas de ar frio, quando se sobrepõem a áreas com temperatura mais elevadas, causam instabilidade atmosférica, movimento ascendente abrupto e gênese de nuvens convectivas que trarão trovoadas e chuvas intensas para a região de ocorrência.

#### 6.4. Massas de ar do Brasil

Há várias massas de ar quentes e frias predominantes no Brasil (Varejão-Silva, 2006). Os nomes das massas de ar representam o lugar em que elas se formam, sendo possível, a partir daí, se inferir algumas das suas características (quente ou fria, seca ou úmida etc.) (Fig. 5.11).

**a) Massa Equatorial Continental (mEc):** forma-se basicamente sobre a região Amazônica, dominada por baixas pressões. Nela predomina os movimentos convectivos, intensificados pela convergência dos ventos alísios de nordeste e de sudeste. Sua atuação estende-se bastante ao sul no verão, retraindo-se ao máximo no inverno (Vianello & Alves, 2000).

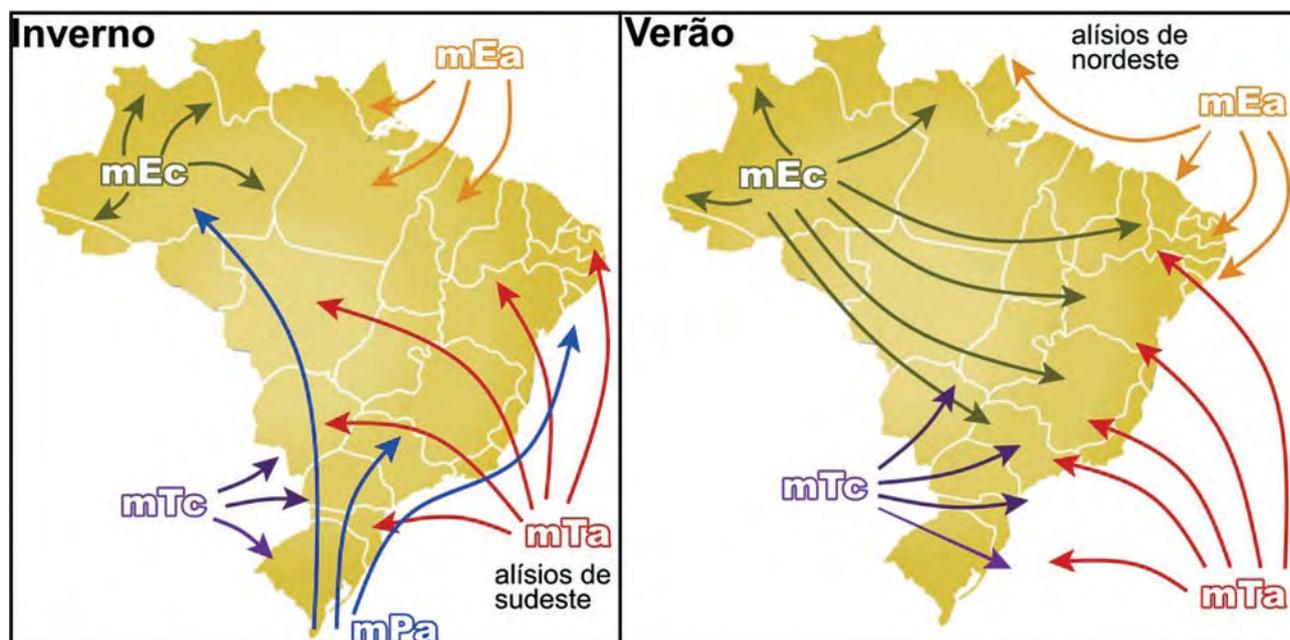
**b) Massa Equatorial Atlântica (mEa):** ocorre sobre os oceanos Atlântico e Pacífico, resultante da convergência dos alísios (ZCIT). Como tal, desloca-se latitudinalmente ao longo do ano, atingindo latitudes de até 8°S, no verão, influenciando, inclusive, o extremo norte do continente sul-americano (Vianello & Alves, 2000) e retornando no inverno para o Hemisfério Norte.

**c) Massa Tropical Continental (mTc):** está associada à baixa pressão predominante sobre a região do Chaco, em consequência do grande aquecimento da sua superfície, especialmente no verão. Este superaquecimento continental dá origem a uma massa de ar quente e seca, instável, que apresenta intensa atividade convectiva, estendendo-se até 3 km de altitude. Apesar disso, as precipitações são fracas, predominando céu pouco nublado, o que favorece ainda mais o aquecimento diurno e o resfriamento noturno (Vianello & Alves, 2000).

**d) Massa Tropical Atlântica (mTa):** forma-se sobre os oceanos Atlântico e Pacífico, associada aos anticiclones do Atlântico Sul e do Pacífico Sul. Os anticiclones, na superfície, induzem a subsidência do ar superior, como descrito anteriormente. Esse ar subsidente, quente e seco, sobrepondo-se ao ar úmido e menos aquecido que repousa sobre a superfície oceânica, dá origem a uma camada de inversão (entre 500 e 1.500 m de altitude). Essa massa de ar, portanto, é formada por duas camadas: uma inferior, fria e úmida, e outra superior, quente e seca. A umidade que se acumula na parte inferior da massa de

ar dá origem à formação de nuvens do tipo cumulus de pequena extensão vertical, por isso provocam poucas chuvas, geralmente no litoral ou associadas à orografia, quando a massa se desloca sobre o continente. No inverno, com o deslocamento do anticiclone do Atlântico Sul para o continente, a mTa passa a ser uma massa puramente subsidente continental (cS), incapaz de provocar sequer a formação de nuvens, predominando céu claro e ausência de chuvas, características da estação seca. A massa Tropical Marítima do Pacífico exerce importante papel no tempo e no clima do Brasil, na estação do verão, por meio de um mecanismo que a associa com a Tropical Continental. Nessa estação a mT do Pacífico transborda sobre a Cordilheira dos Andes, indo alimentar a depressão do Chaco sob a forma de brisa de montanha. Excetuando esse fenômeno, a Cordilheira dos Andes atua como um divisor entre as massas continentais a leste e as massas marítimas a oeste (Vianello & Alves, 2000).

**e) Massa Polar Atlântica (mPa):** acha-se associada aos anticiclones migratórios que se localizam na região sub-antártica. Em virtude dos mecanismos de subsidência associados, a mPa é originalmente muito estável, mas, à medida que se desloca para o norte ou para o nordeste, a inversão desaparece e a massa passa a ser instável. Embora existam em todas as estações, são mais intensas no inverno e por isso influenciam mais o continente nessa estação, quando suas incursões atingem as baixas latitudes (Vianello & Alves, 2000).



**Figura 5.11** Trajetória das massas de ar que incidem no Brasil durante os períodos de inverno e verão. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** Sene e Moreira (2010).

### 6.5. Sistemas frontais

Quando ocorre um encontro entre duas massas de ar, elas não se misturam imediatamente: a massa de ar mais quente, menos densa, sobrepõe-se sobre a massa de ar mais fria, mais densa. Forma-se então uma zona de transição entre as duas massas, onde ocorrem variações bruscas de temperatura, provocada pela presença de um gradiente de pressão. Essa zona de transição é denominada frente ou zona frontal. Do contato entre as massas, ocorre o aparecimento de uma frente no solo, separando o ar frio do ar quente (Vianello & Alves, 2000). As frentes podem ser frias, quentes, oclusas ou estacionárias. No Hemisfério Sul, os ventos que precedem as frentes são predominantemente de sudoeste. Os ventos que ocorrem com a passagem das frentes frias são mais intensos e mais frios e são, no Hemisfério Norte, predominantemente de noroeste. No Hemisfério Sul as direções dos ventos pré-frontais e pós-frontais são inversas.

**Frente fria** é a borda dianteira de uma massa de ar frio, formada pelo seu avanço, movendo-se dos polos para o equador (Fig. 5.12). O ar frio, relativamente denso, introduz-se abaixo do ar mais quente e menos denso, que é, então, forçado a subir, gerando uma oclusão de frente fria, substituindo uma massa de ar mais quente (Vianello & Alves, 2000).

A aproximação de uma frente fria é percebida pela sensação de abafamento e pela aparição de cirrus no céu (nuvens altas em forma de filamentos de algodão). A pressão começa a cair e no momento da passagem e quando chega ao seu valor mínimo, a temperatura cai, seguindo-se tempestades e trovoadas. O vento cessa, passando então a soprar em direção oposta. A chuva para abruptamente após a passagem da frente. As frentes frias chegam a deslocar-se a 64 km/h (Mendes & Soares-Gomes, 2007).

Desde que seja suficientemente húmido, o ar quente condensa formando cumulus e depois cumulonimbus, produzindo precipitação forte, rajadas e trovoadas. No topo dessas nuvens (cumulonimbus), os ventos altos podem soprar os cristais de gelo, formando nuvens cirrus e cirrostratus. Se o ar elevado for quente e

estável, as nuvens predominantes serão stratus e nimbostratus, com possibilidade de formação de nevoeiro na área de chuva. Se o ar seco for estável, o teor de umidade no ar aumentará e aparecerão somente nuvens esparsas, sem precipitação. A passagem de uma frente fria é seguida por tempo bom, indicado pela formação de nuvens cumulus.

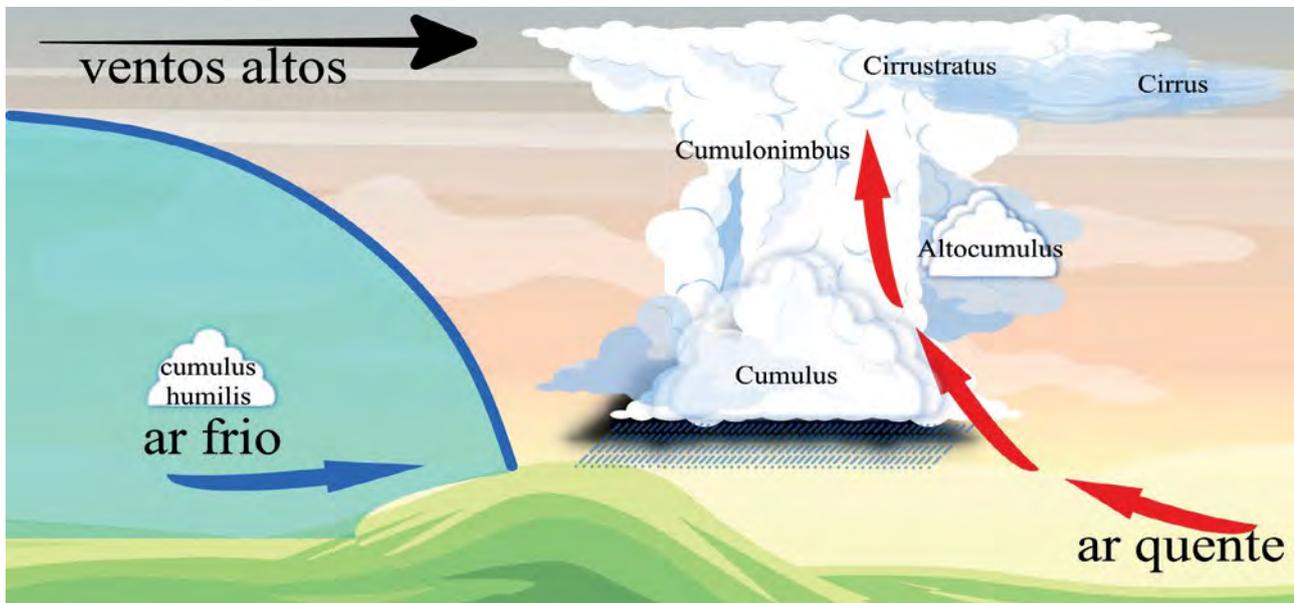


Figura 5.12 Desenho esquemático da formação de uma frente fria. Ilustração Gianfrancisco Schork. Fonte Varejão-Silva (2006).

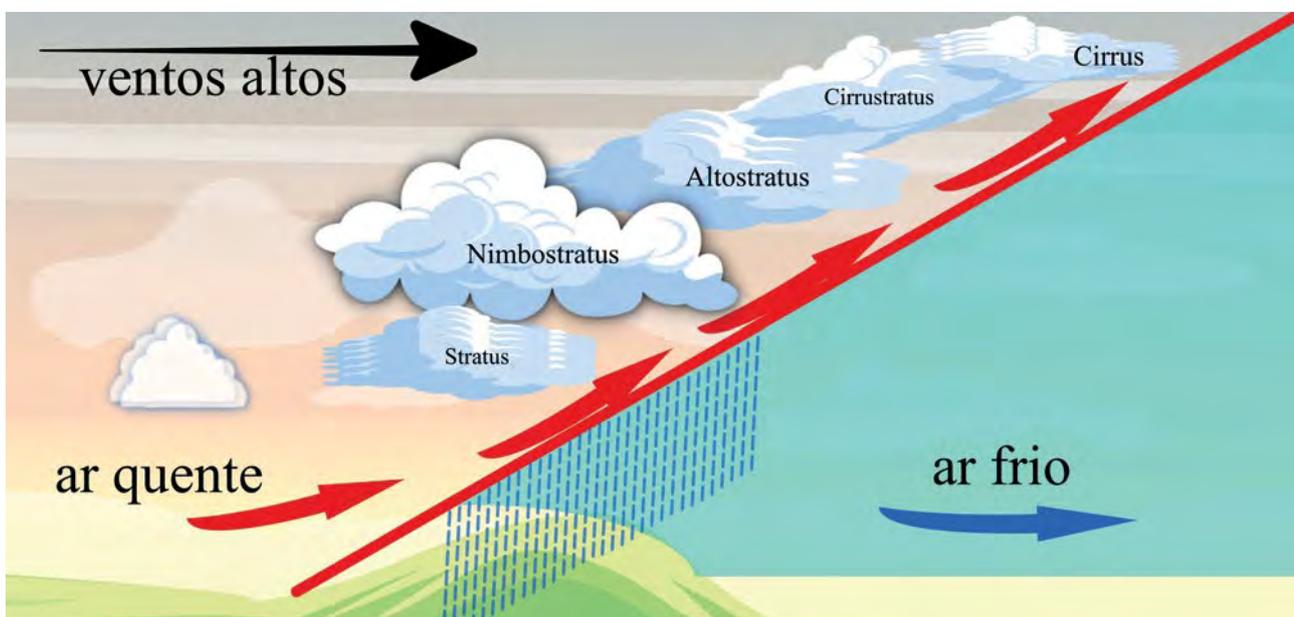


Figura 5.13 Esquema da formação do sistema frontal quente. Ilustração Gianfrancisco Schork. Fonte Varejão-Silva (2006).

Frente quente é a parte dianteira de uma massa de ar quente em movimento, no sentido do equador para os polos. A passagem de uma frente quente acarreta a substituição do ar frio por ar quente. Como o ar quente é menos denso que o ar frio, a massa de ar quente passa por cima da massa de ar mais frio. O ar frio, mais denso, tende a ser dominado pelo ar quente, produzindo uma larga faixa de nuvens e uma chuva fraca e persistente e, às vezes, nevoeiro esparso (Fig. 5.13). Uma frente quente é, portanto, uma zona de transição onde uma massa de ar quente e úmido substitui uma massa de ar fria.

Geralmente, forma-se uma camada de nuvens finas (cirrus) por mais de 1.000 km à frente da superfície da frente quente, cerca de 48 horas antes da sua chegada, quando se formarão nuvens cirrostratus e altostratus. Mais próximo, cerca de 300 km antes da frente, surgem nuvens stratus e nimbostratus, podendo, eventualmente, começar a cair uma chuva leve. Depois da frente passar, observam-se cumulus de bom tempo.

Momentos antes da chegada de uma frente quente, a temperatura eleva-se ligeiramente. Isso ocorre porque as nuvens aumentam localmente a absorção da radiação. A precipitação associada com uma frente quente antecede-a, pois o ar mais frio pode se aquecer e saturar, originando o aparecimento de nuvens stratus. Antes da chegada da frente quente, essas nuvens podem crescer rapidamente gerando falta de visibilidade ou nevoeiros (se a temperatura estiver mais baixa). As nuvens mais pesadas, como cumulus e cumulonimbus, embora sejam mais comuns em frentes frias, também ocorre com frentes quentes. Isso acontece quando o ar quente que se eleva é instável, com um considerável gradiente de temperatura nos dois lados da frente. Nesse caso, os cirrus podem favorecer o surgimento de cirrocumulus e depois de cumulonimbus e trovoadas.

Como as frentes quentes tendem a deslocar-se mais lentamente que as frentes frias, elas podem

ser alcançadas e ultrapassadas, gerando um sistema denominado frente oclusa. Nesse caso, ambas se encontrarão à superfície, na fase final do sistema, fazendo todo o ar quente elevar-se. A chuva contínua característica das frentes quentes é seguida imediatamente pelos aguaceiros associados às frentes frias. Por outro lado, quando uma frente deixa de se mover, designa-se por frente estacionária (Varejão-Silva, 2006; Vianello & Alves, 2000).

## 6.6. Perturbações na atmosfera

As perturbações na atmosfera são eventos que normalmente podem gerar algum prejuízo e catástrofes para a humanidade. Todas estas perturbações na atmosfera podem ser mensuradas por meio de escalas de intensidade, são elas: escala **Beaufort**, que varia de 1 a 12, sendo 1 ventos calmos chegando a 12 que seriam os Furacões, fundamentando-se, portanto, na velocidade e nos efeitos que os ventos provocam no mar e em terra. A escala **Saffir-Simpson**, está restrita à classificação dos Furacões e Tufões, variando de 1 a 5, com a sua classificação ordenando o quão destruidoras estas perturbações podem ser. Qualquer perturbação acima de 3 já proporciona grandes prejuízos e destruição por onde passa. Já a escala **Fujita-Pearson** varia de EF0 (117 km/h) a EF12 (velocidade do som), embora convencionalmente esta escala na natureza somente exista até a EF5, já que ela se refere ao dano causado e não à velocidade do vento, que neste caso possuiria uma velocidade entre 419 e 512 km/h, que é o máximo poder destrutivo para um tornado (Fujita, 1971), ou seja, caso ocorram as escalas superiores a EF5, elas também trariam a máxima destruição.

### Zonas tropicais

As perturbações atmosféricas tropicais são aquelas que ocorrem por meio de sistemas de baixa pressão, havendo, ao seu redor, uma alta pressão que fomenta uma grande quantidade de energia (calor) em seu ponto central (olho). Sua ocorrência

é normalmente entre a linha do equador em direção à latitude de 20° (Gray, 1968). Segundo Palmen (1948), para estas regiões (Golfo do México e Nordeste do Pacífico) desenvolverem as tempestades e perturbações na atmosfera, a temperatura precisa ultrapassar 26,5°C. Com isso, a formação dos ciclones tropicais é proporcionado pelo rápido resfriamento atmosférico que em razão destas diferenças entre o topo e a base da atmosfera podem criar condições de tempestades, que ocorrem quando o chamado complexo convectivo de mesoescala produz um vórtice de mesoescala e assim desencadeia outros eventos como, os furacões e os tufões (Zehr, 1992). Por meio da escala Saffir-Simpson, a intensidade das perturbações pode ser classificada de 1 a 5, sendo que acima de 3 já são perturbações com grande potencial de desastres, com ventos, na escala 5, podendo chegar a até 252 km/h (Varejão-Silva, 2006).

Furacão e tufão, diferem somente na posição geográfica de suas ocorrências, com os primeiros ocorrendo no litoral da América do Norte, tanto no Atlântico como no Pacífico, e os segundos ocorrendo próximos da Austrália, tanto no Oceano Índico como no Pacífico, bem como no Japão e sul da Ásia. Ambos têm diâmetros que podem alcançar os 1.500 km. Estes ciclones também têm uma relação direta com a força de Coriolis atuante em cada hemisfério, uma vez que as perturbações no Hemisfério Norte, gira no sentido anti-horário, e no Hemisfério Sul, gira no sentido horário (Chen, 1993; Emanuel, 1993).

### Zonas extratropicais

Outros eventos com menor perturbação na atmosfera, porém também de forma ciclônica e que ocorrem nas Zonas de Convergência Extratropical, são as perturbações atmosféricas que existem também em ambos os hemisférios, ocorrendo no sentido anti-horário no Hemisfério Norte e horário no sul. Estes fenômenos decorrem de duas frentes, uma quente, que se desloca em direção aos polos, e uma fria que se move para

as zonas tropicais. Estes ciclones extratropicais possuem menor intensidade que os tropicais, uma vez que a fonte de energia primária é baroclínica, ou seja, resulta do contraste de temperatura entre massas de ar quente e frio que possuem pressões distintas.

### Zonas polares

Vórtices polares são áreas de baixa pressão e de escala subsinótica (Varejão-Silva 2006), localizados nas regiões circumpolares. Apresentam algumas características que se assemelham aos ciclones tropicais, como sua abrangência de grande escala, com menos de 1.000 quilômetros, apresentando em seu núcleo, temperaturas mais quentes. Seu sentido de rotação também segue o mesmo sentido dos vórtices tropicais, além de possuir faixa espiraladas de nuvens. Seu trajeto enfraquece na medida em que seu movimento atinge a terra, sendo, por isso, também denominados de furacões polares (Schoeberl et al., 1992; Coy et al., 1997).

### Tornados

São os fenômenos mais destrutivos de todas as perturbações atmosféricas. Segundo a AMS (2000), o tornado é uma coluna giratória de ar em contato com a superfície, relacionado a uma nuvem cumuliforme (supercélulas), sendo frequentemente visível como uma nuvem em funil e/ou detritos e poeira em circulação no solo. Sua formação também depende de um forte cisalhamento de vento vertical, que por sua vez causa um cilindro de ar horizontalmente rotativo (Varejão-Silva, 2006). Sua classificação está entre EF0 a EF5 que são os de destruição máxima. Estas perturbações ocorrem em terra. Quando estes tipos de perturbações ocorrem sobre a água e próximas ao continente, são chamadas de trombas d'água ([Ver capítulo: Interações energéticas oceano-atmosfera](#)).

## 7. EL NIÑO E LA NIÑA

O *El Niño* é um fenômeno de larga escala relacionado a alterações significativas na distribuição da temperatura da superfície do Oceano Pacífico, com notável influência sobre o clima de boa parte do planeta. Refere-se a uma combinação de dois mecanismos que demonstram, de forma marcante, o vínculo existente entre o oceano e a atmosfera. Sua expressão mais reconhecida é um fenômeno natural periódico, que causa o aquecimento anormal das águas superficiais e subsuperficiais do Oceano Pacífico Tropical. O termo *El Niño*, originariamente, designava “uma corrente marinha quente” com sentido Sul, que invade a costa do Peru e do Equador, relacionada ao enfraquecimento dos ventos alísios (que em condições normais sopram de leste para oeste). Esse nome foi dado pelos pescadores da região, sendo alusivo ao Menino Jesus, visto que o aparecimento dessa corrente quente se dava próxima ao Natal (coincidindo com o verão). Com esse enfraquecimento dos ventos, começam a ser observadas mudanças da circulação da atmosfera, desde altos níveis até próximo ao oceano, determinando mudanças nos padrões de correntes oceânicas e de transporte de umidade e, portanto, variações na distribuição das chuvas. São observados aumento ou queda de temperatura e da precipitação, tanto em regiões tropicais como em latitudes médias e altas.

Talvez a melhor maneira de se referir ao fenômeno seja pelo uso da terminologia mais técnica, que inclui as características meteoceanográficas, associadas ao aquecimento anormal do Oceano Pacífico Tropical. O ENOS, ou *El Niño*- Oscilação Sul representa de forma mais genérica um fenômeno de interação atmosfera-oceano, associado a alterações dos padrões normais dos ventos alísios e da Temperatura da Superfície do Mar (TSM), na região do Pacífico Equatorial, entre a costa peruana e no Pacífico oeste próximo à Austrália.

Em condições normais, entre agosto e dezembro, os ventos alísios propelem a corrente de Humboldt

(ou corrente do Peru), a qual atinge o seu limite norte, se juntando à Corrente Sul Equatorial (CSE), enquanto que as Contracorrentes Norte Equatorial (CCNE) e Sul Equatorial (CCSE) que se deslocam no sentido oeste-leste se retraem. Devido ao efeito de Coriolis, os ventos alísios empurram as águas mais quentes próximas da costa oeste da América do Sul para oeste (Fig. 5.14 a). Esse afastamento de águas superficiais e subsuperficiais promove um afloramento de águas mais profundas do oceano, denominado de ressurgência, fazendo com que a termoclina fique mais rasa e as águas da zona eufótica muito mais ricas em sais nutrientes (Ver capítulo: [Introdução à oceanografia pesqueira - Vol. 2](#)). Estas águas mais frias têm mais oxigênio dissolvido e vêm carregadas de nutrientes e micro-organismos vindos de maiores profundidades do mar, que vão enriquecer as águas da região. Como consequência há um incremento da produção primária e da cadeia alimentar marinha. Não é por acaso que a costa oeste da América do Sul é uma das regiões mais piscosas do mundo. Os pássaros que vivem naquela região, responsáveis pela fertilização do solo, se alimentam dos peixes, que por sua vez se alimentam dos microrganismos e nutrientes. Já do lado oeste da bacia do Oceano Pacífico, ocorre um empilhamento de águas quentes superficiais levadas pelos ventos, tornando as águas do Pacífico Oeste Tropical mais quentes, com mais evaporação e formação de nuvens em uma grande área.

A atmosfera é compensatória, ou seja, se o ar sobe numa determinada região, deverá descer em outra. O componente atmosférico, denominado Oscilação Sul (também chamado de gangorra barométrica), expressa a correlação entre a pressão atmosférica nos extremos leste e oeste do Oceano Pacífico. O ar que sobe no Pacífico Equatorial Central e Oeste, desce no Pacífico Leste (junto à costa oeste da América do Sul). Os ventos alísios em baixos níveis da atmosfera sopram de leste para oeste, e os ventos de oeste para leste em altitudes elevadas

da atmosfera. Essa correlação foi estabelecida pelo matemático britânico Sir Gilbert Walker, em 1920, sendo denominada de célula de Walker.

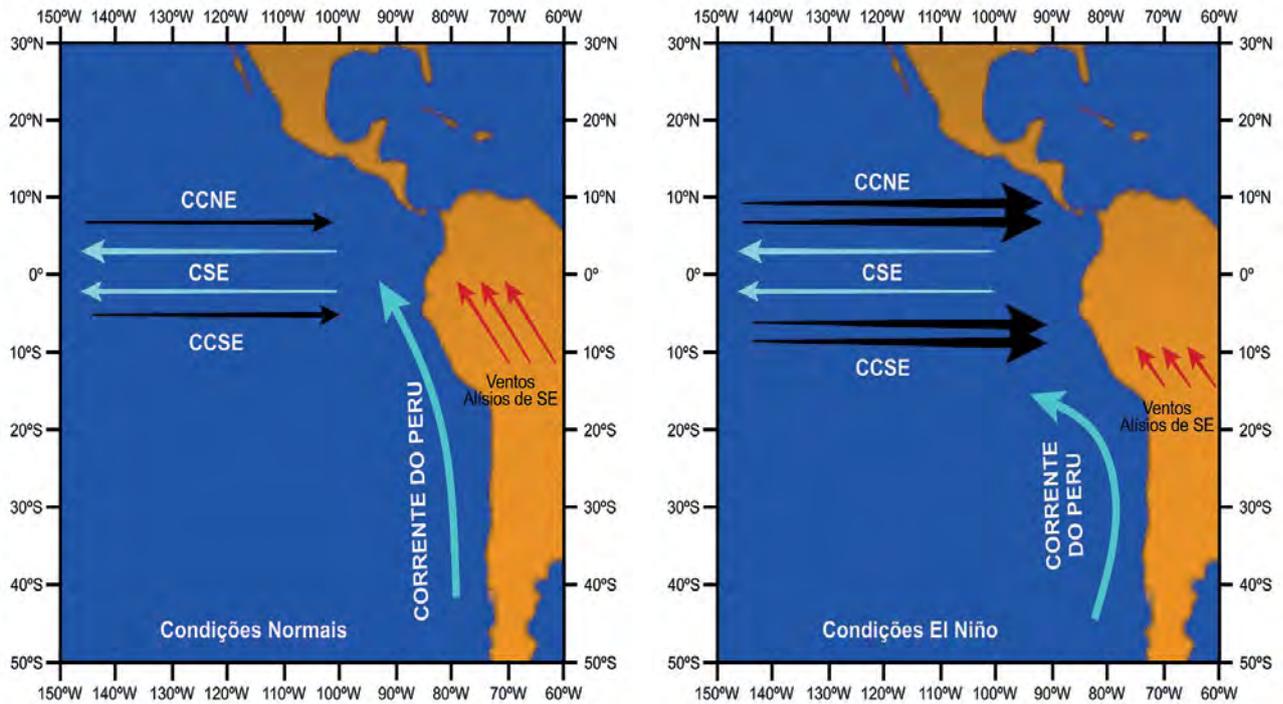
Com a proximidade do verão no Hemisfério Sul, o aumento da temperatura causa uma diminuição da pressão atmosférica nessa região, reduzindo, conseqüentemente, os ventos alísios e a intensidade da corrente de Humboldt, que gira para a esquerda alguns graus ao sul do equador, atraindo águas quentes das Contra Correntes Equatoriais Norte e Sul (CCNE e CCSE) (Fig. 5.14 b). Essa condição normalmente permanece até final março, quando a temperatura vai gradativamente diminuindo acompanhando a sazonalidade e as condições dos ventos alísios e ressurgência vão sendo retomadas.

Em alguns anos, entretanto, a água fica especialmente quente, causando estacionamento das águas superficiais aquecidas pela radiação solar, com uma forte redução da produtividade pesqueira - até maio ou junho. O arrasto resultante que o vento provoca nas águas desaparece ou diminui, o sistema atmosférico se inverte, a corrente de Humboldt se retrai, girando para oeste bem mais ao sul (até 12°S), e a água quente equatorial chega muito mais ao sul. As águas do lado oposto da bacia irão então refluir, em razão da cessação das forças que mantinham o empilhamento (ventos alísios). O sol continuará aquecendo as águas, enfraquecendo ainda mais os ventos alísios na superfície. Ainda que não parem de soprar, os ventos na superfície, em alguns casos, chegam até a mudar de sentido, ou seja, passam a se deslocar de oeste para leste. Agora, todo o Oceano Pacífico Equatorial começa a se aquecer e ao invés de observarmos a formação de nuvens com chuvas intensas no Pacífico Equatorial Ocidental, observa-se a formação de nuvens principalmente no Pacífico Equatorial Central e Oriental. Há um deslocamento da região com maior formação de nuvens e a célula de Walker fica bipartida. No Oceano Pacífico Equatorial podem ser observadas águas quentes em praticamente toda a sua extensão.

Ao longo dos anos, o termo *El Niño* ficou reservado para estes intervalos excepcionalmente quentes, que ocorrem em ciclos interanuais de 2 a 7 anos, em média, a cada 4 anos, mas com considerável variação. O aumento da temperatura próximo à costa mata muitos peixes intolerantes ao calor. Outros, com maior capacidade de deslocamento, podem se posicionar em profundidades maiores onde encontram isotermas compatíveis com seus limites de tolerância. Eventos mais fortes podem comprometer o recrutamento de algumas espécies, com prejuízos à produção pesqueira em anos subsequentes. A evaporação e, conseqüentemente, a precipitação também aumentam, causando inundações na região, que é geralmente seca (Pickard, 1974).

Nas últimas décadas ocorreram dezenas de *El Niños*, aumentando a temperatura da água não apenas ao longo da costa da América do Sul, mas também nas Ilhas Galápagos e em um cinturão de 8.000 km através do Pacífico Tropical. As intensidades dos eventos variaram bastante. Eventos fracos apenas elevaram a temperatura da água em alguns graus e tiveram um impacto mínimo na pesca sul americana. Mas eventos fortes, como o *El Niño* de 1982-83, deixaram sua marca além do clima local e da vida marinha, mas nas condições climáticas de grande parte do planeta, gerando prejuízos de bilhões de dólares com secas, inundações e furacões.

A explicação para que esse fenômeno de larga escala ocorra nessa região, diz respeito à extensão da bacia do oceano Pacífico (com quase 12.000 km na faixa equatorial). Em comparação com os oceanos Atlântico e Índico, que são bem mais estreitos, as ondas de calor atravessam todo o seu leito em menos tempo, o que garante um ajuste mais rápido às mudanças de temperatura. Já no oceano Pacífico, as ondas levam muito tempo para cruzar o leito oceânico. Assim, o Pacífico se ajusta mais lentamente a mudanças nos ventos. Esse maior tempo de ajuste faz com que o sistema oceano-atmosfera se distancie do



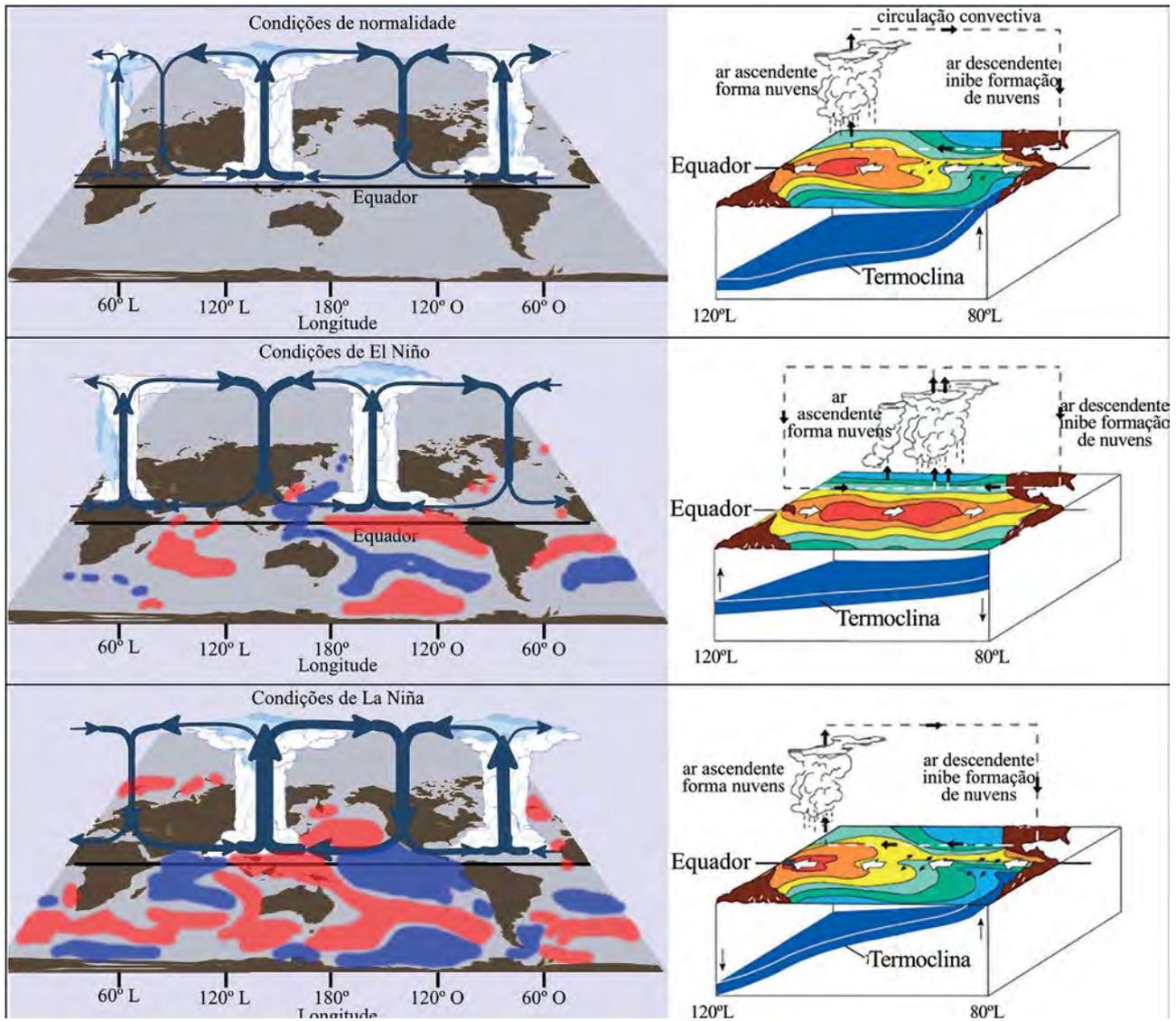
**Figura 5.14** Sistema de ventos e correntes no oceano Pacífico Tropical Leste, em condições normais (a) e de *El Niño* (b). **Ilustração** Gianfrancisco Schork.

equilíbrio. Além disso, em um oceano mais estreito, a influência das massas costeiras no clima sazonal é mais significativa do que no Pacífico. Por isso as anomalias climáticas interanuais são maiores no oceano Pacífico, o que explica a ocorrência de um fenômeno dessa magnitude nessa região do planeta.

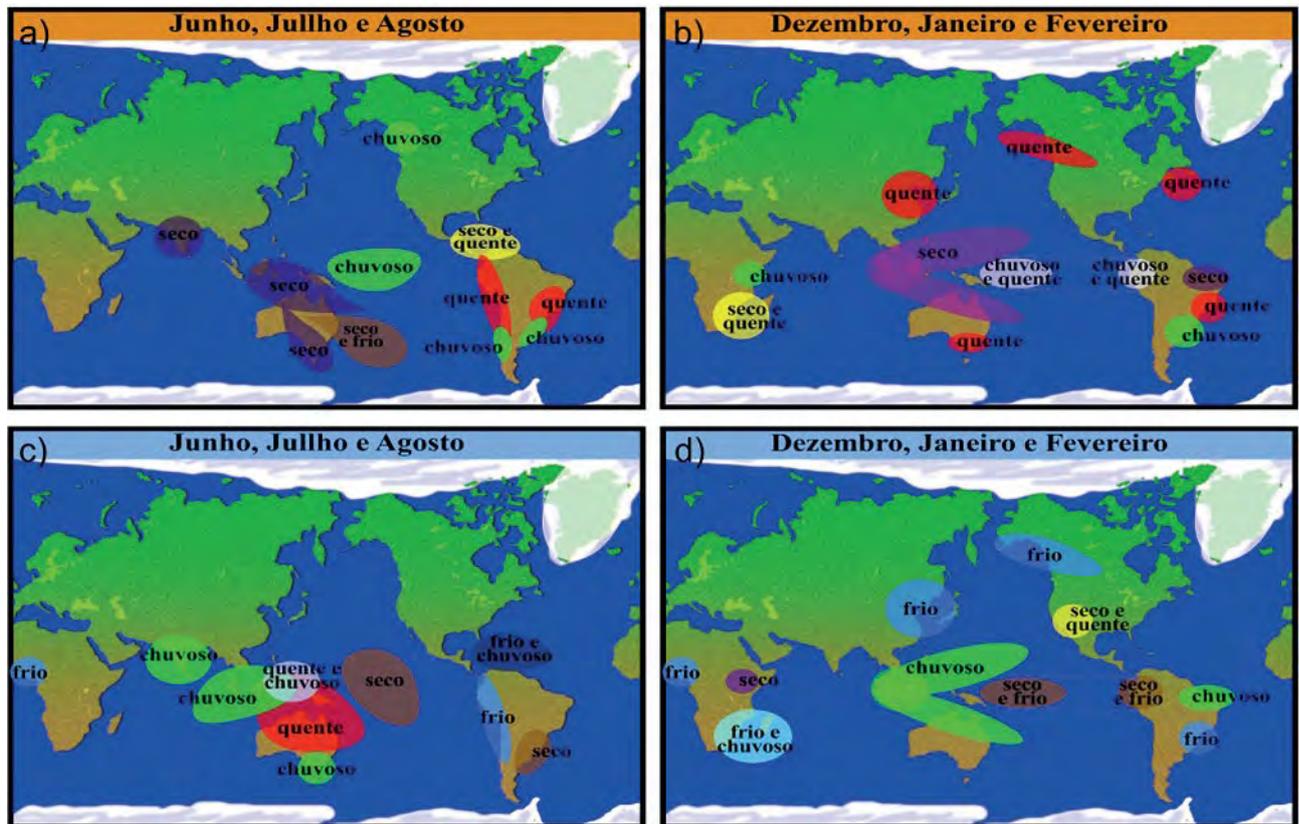
Como o oceano apresenta grande capacidade de armazenamento (e liberação) de energia (vide item 4.1), a ocorrência do *El Niño* tende a ser seguida em anos subsequentes de fenômenos inversos (intercalados por condições de resfriamento e aquecimento do oceano Pacífico no mês de dezembro), ou seja, de intensificação das condições normais (diminuição da temperatura, ventos alísios e ressurgência mais forte). Essas anomalias negativas de TSM são mais comumente denominadas de *La Niña*. Ou seja, a *La Niña* corresponde a um aumento na pressão atmosférica na região leste do Pacífico (também denominada

fase fria ou positiva) resfriando as águas. *El Niño* e *La Niña* são identificados pelo Índice de Oscilação Sul (IOS), que é calculado pela diferença de pressão entre as regiões do Taiti e Darwin. Quando estas anomalias na média da TSM perduram por mais de 3 meses são, então, indicadas como evento de *El Niño* e *La Niña*, os quais têm uma tendência a se alternar a cada 3-7 anos, embora de um evento ao seguinte, o intervalo possa variar de 1 a 10 anos.

Segundo Voituries e Jacques (2000), o *El Niño* produz um colapso na célula de Walker, perturbando, assim, e até invertendo as características climáticas da região. Já a *La Niña* intensifica as condições normais, empurrando o sistema climático da região para o seu extremo (Fig. 5.15). Tanto o *El Niño* como a *La Niña*, provocam mudanças na circulação atmosférica em escala regional e global, gerando anomalias climáticas em várias partes do mundo (Fig. 5.16).



**Figura 5.15** Circulação de Walker no Oceano Pacífico Tropical, em condições normais, de *El Niño* de *La Niña*. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** <https://www.pmel.noaa.gov/elnino/what-is-el-nino> NOAA PMEL (2009).



**Figura 5.16** Efeitos associados aos eventos de *El Niño* (a, b) e de *La Niña* (c, d). **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** <http://enos.cptec.inpe.br>.

## 8. MONÇÕES

Monções (ou clima monçônico) caracterizam-se por uma mudança sazonal na direção dos ventos, que geralmente apresentam o seguinte comportamento: no inverno, os ventos secos sopram do continente para o oceano, enquanto no verão os ventos úmidos sopram do oceano para o continente. Essa variação está relacionada à oscilação sazonal da pressão atmosférica sobre vastas extensões de terra no Hemisfério Norte, acima do Oceano Índico. Como a água e o ar atmosférico sobre o mar aquecem e resfriam mais lentamente (*vide o tópico: Fatores para o aquecimento diferencial da terra e do mar*), as localidades próximas ao litoral e, mais ainda, locais cercados pelo mar (ilhas) apresentam uma amplitude térmica muito

menor que regiões centrais em grandes extensões de terra (continentais).

O aquecimento diferencial da Terra durante as diferentes estações do ano provoca o deslocamento dos centros de pressão (ciclones e anticiclones). Sobre os continentes, os centros de alta pressão atmosférica, durante o inverno, impulsionam ventos e massas de ar frias e secas (formadas sobre o continente). Com a proximidade do verão, e o conseqüente aumento da temperatura, a pressão atmosférica vai diminuindo, com o ar se tornando menos denso e ascendendo. Em algumas situações, podem se formar centros de baixa pressão atmosférica no verão onde a pressão

é alta no inverno, tornando-se, com isso, regiões receptoras (convergência) de ventos, que “invadem” o continente, carregando massas de ar quentes e úmidas (formadas sobre o mar), as quais, ao encontrar alguma elevação topográfica, promoverão precipitações orográficas geralmente de forte intensidade.

Eventos com essas características ocorrem em diversas regiões tropicais do planeta, como na Espanha, no norte da Austrália, no centro-sul do continente africano, no litoral oriental dos Estados Unidos e no Chile. No entanto, o fenômeno mais intenso, e com efeitos mais visíveis, ocorre na região do oceano Índico e sul da Ásia, especialmente na Índia, Paquistão e Bangladesh. A palavra monção significa “estação” e deriva do árabe “mausin”. Há séculos marinheiros árabes usam esse termo para definir a mudança sazonal da direção do vento no mar da Arábia. Na Ásia, a importância das Monções está diretamente relacionada à sobrevivência do povo, estando diretamente ligada à cultura do arroz (rizicultura), cujo ciclo produtivo acompanha o fenômeno.

Isso ocorre porque o oceano Índico apresenta como principal particularidade uma reduzida extensão ao Norte, com a presença do grande maciço continental asiático (Hemisfério Norte). Esse aspecto confere notáveis variações sazonais à região, com variações extremas de temperatura ao longo do ano, que resultam em drásticas variações sazonais no regime de ventos, chuvas e correntes oceânicas, inclusive as equatoriais. Essa é a única região do oceano em que uma mudança tão considerável de regime de ventos ocorre regularmente. Em outras regiões, ocorrem variações latitudinais do vento, mas não tão profundas como no Índico Norte. O deslocamento latitudinal da área de atuação da ZCIT segue o ritmo das estações mantendo-se em fase com os picos máximos de insolação (Peixoto & Oort 1992). O aquecimento e arrefecimento sazonais de vastas regiões continentais tem como consequência a inversão das correntes atmosféricas, que se dirigem de terra para o mar na estação mais fria, invertendo

o sentido do seu deslocamento, passando a soprar do mar para terra, na estação quente.

No inverno boreal (dezembro a março), sobre essa região central da Ásia, em torno de 30-35° de latitude forma-se um centro de alta pressão atmosférica (anticiclone) que propela os ventos alísios de nordeste. Esses ventos geram massas de ar polares extremamente secas (porque foram formadas sobre o continente) que se deslocam para o sul, em direção aos centros de baixa pressão nas baixas latitudes, onde se encontram com os ventos alísios de sudeste na ZCIT, provocando estiagens ou secas prolongadas. Nesse caminho, os alísios de nordeste propõem a Corrente Norte Equatorial (CNE), com sentido oeste, com esse padrão sendo conhecido como monções de inverno, ou continentais ou de nordeste.

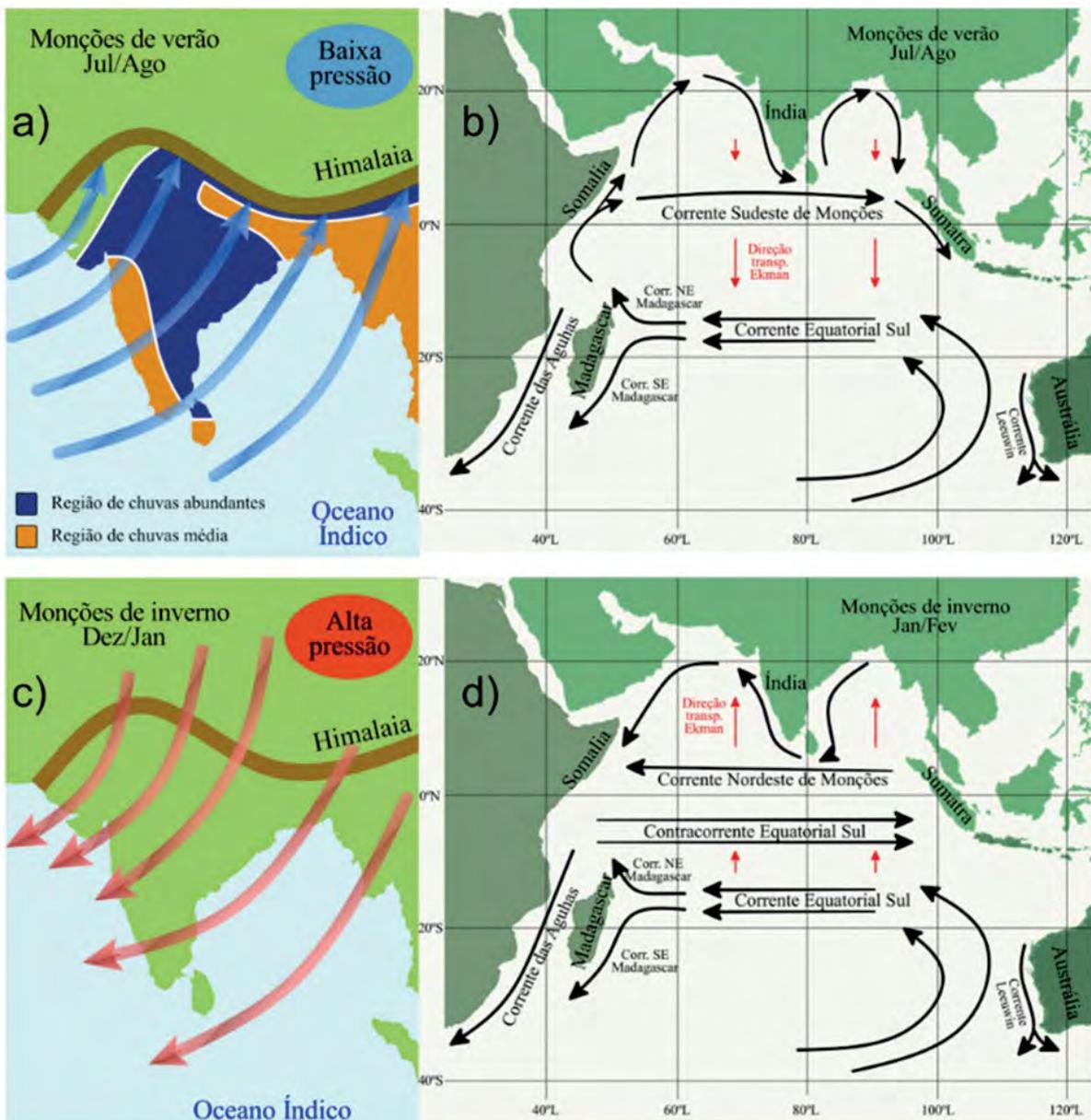
Em abril, com o aumento da temperatura, começa a ocorrer uma mudança completa no regime de ventos ao norte do equador. À medida em que se aproxima o verão (Hemisfério Norte), essa região se aquece dezenas de graus, fazendo com que o centro de alta pressão sobre a Ásia Central perca intensidade, transformando-se em um centro de baixa pressão e causando, assim, a cessação dos Ventos alísios de Nordeste. Nos meses de inverno austral a ZCIT, nessa região, se encontra deslocada para a Índia e Indochina. Sobre os Oceanos Pacífico e Índico este deslocamento latitudinal pode chegar a 40°, com o eixo máximo da taxa de precipitação oscilando de 20°S (verão austral sobre Madagascar) a 20°N (verão boreal sobre o norte do golfo de Bengala) (Peixoto & Oort, 1992).

As massas equatoriais e tropicais se deslocam para o norte, em direção a esse centro. Nesse deslocamento, passam pelo Oceano Índico e ganham umidade. Com isso, e obedecendo ao princípio da conservação do volume de fluidos, os alísios de sudeste ultrapassam a linha do equador com mais intensidade, e sobretudo a ZCIT. Ao transpor a região equatorial, o efeito de Coriolis desvia o sentido do movimento desses ventos para a direita. Dessa forma, são formados os alísios de sudoeste, que são um prolongamento, além do equador, dos alísios de sudeste que invadem a Ásia,

provocando chuvas de verão torrenciais no sul e sudeste do continente e causando, assim, enchentes e inundações. São as monções de verão também conhecidas como marítimas ou de sudoeste.

Na monção de nordeste, a Corrente Sul-Equatorial, ao alcançar a costa africana, supre a Contracorrente Norte-Equatorial e a Corrente das Agulhas,

extraordinariamente estreita, provavelmente não possuindo mais de 100 km de largura e correndo para o sul, junto à costa africana. Uma vez que chega ao extremo sul da África, uma parte gira para leste e penetra na Deriva do vento Oeste da Corrente Circumpolar, enquanto outra parte continua para oeste e penetra no Atlântico para formar a Corrente de Benguela (Pickard, 1974).

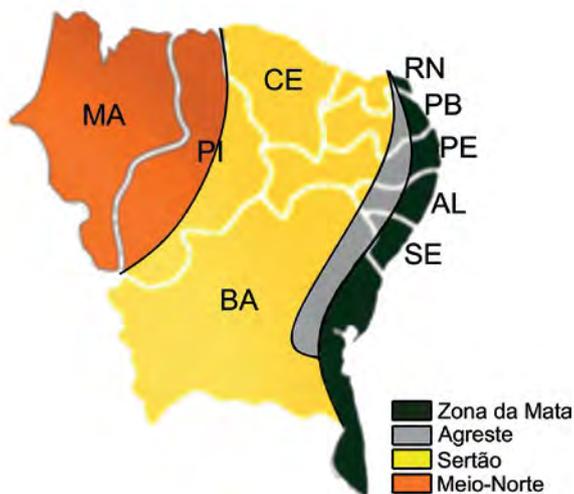


**Figura 5.17** Fenômeno das Monções no oceano Índico. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. **Fonte** Hermes et al. (2019), <https://doi.org/10.3389/fmars.2019.00355>.

Com a mudança no regime de ventos na monção sudoeste, a CNE é substituída por uma “corrente de monção” (para leste) e a CCE desaparece, ou se confunde com as correntes de monção. Uma componente da Corrente Sul-Equatorial gira para o Norte, formando a Corrente da Somália que sobe pela costa leste da África com velocidade média de 200 cm/s, comparáveis às da corrente da Flórida. Essa situação se mantém de maio a setembro, quando a monção sudoeste acaba e a CNE reaparece com os alísios de nordeste (Pickard, 1974). Nessa época do ano, as temperaturas são altíssimas e alagamentos e enchentes são comuns nas cidades indianas.

## 9. CLIMATOLOGIA DO NORDESTE DO BRASIL

O Brasil se estende desde o Hemisfério Norte (5°) até as latitudes médias do Hemisfério Sul (34°), experimentando, por essa razão, uma variedade de climas com características regionais próprias. O clima de qualquer região é determinado, em grande parte, pela circulação geral da atmosfera. Na região Nordeste do Brasil, o clima se divide em 4 sub-regiões: Meio-Norte, Sertão, Agreste e Zona da Mata (Figura 5.18).



**Figura 5.18** Subregiões do Nordeste do Brasil. Ilustração Gianfrancisco Schork. Fonte <https://brasilecola.uol.com.br/brasil/as-subregioes-nordeste.htm>.

O **Meio-Norte** compreende uma faixa de transição entre o sertão semiárido do Nordeste e a região amazônica. Apresenta clima úmido e vegetação exuberante, à medida que avança para o oeste.

O **Sertão** é uma extensa área de clima semiárido, que chega até o litoral, nos estados do Rio Grande do Norte e do Ceará. As atividades agrícolas sofrem grande limitação, pois os solos são rasos e pedregosos e as chuvas escassas, e mal distribuídas. A vegetação é a caatinga e o Rio São Francisco é a única fonte de água perene.

A **Zona da Mata** estende-se do estado do Rio Grande do Norte ao sul da Bahia, numa faixa litorânea de até 200 km de largura. O clima é tropical úmido e o solo é fértil, embora a vegetação nativa da mata atlântica já esteja quase extinta, tendo sido substituída por lavouras de cana de açúcar desde o início da colonização.

O **Agreste** é a área de transição entre a zona da mata (região úmida e cheia de brejos) e o sertão do semiárido. Nessa região, os terrenos mais férteis são ocupados por minifúndios onde predominam as culturas de subsistência e a pecuária leiteira.

A região Nordeste do Brasil, apresenta temperaturas elevadas cuja média anual varia de 20° a 28°C. Nas áreas situadas acima de 200 m e no litoral oriental as temperaturas variam de 24° a 26°C. As médias anuais inferiores a 20°C encontram-se nas áreas mais elevadas da Chapada Diamantina e do Planalto da Borborema. O índice de precipitação anual varia de 300 a 2.000 mm. Três dos quatro tipos de climas que existem no Brasil estão presentes no Nordeste, são eles:

**Clima equatorial úmido:** Presente em uma pequena parte do estado do Maranhão, na divisa com o Pará; nas regiões de clima equatorial não existe uma estação seca definida e a temperatura do ar é elevada durante o ano inteiro, com uma amplitude térmica anual inferior a 4°C e uma amplitude térmica diária inferior a 10°C.

**Clima litorâneo úmido:** Presente do litoral da Bahia ao do Rio Grande do Norte. A massa de ar que exerce maior influência nesse clima é a tropical atlântica (mTa), havendo duas principais estações: verão (chuvoso) e inverno (menos chuvoso), com médias térmicas e índices pluviométricos elevados, caracterizando um clima quente e úmido.

**Clima tropical:** Presente nos estados da Bahia, Ceará, Maranhão e Piauí; um clima tropical próximo ao árido é a designação dada aos climas das regiões intertropicais caracterizados por serem megatérmicos, com temperatura média do ar em todos os meses do ano superior a 18°C, sem estação invernal, e precipitação anual superior à evapotranspiração potencial anual.

**Clima tropical semiárido:** Presente em todo o sertão nordestino. É um tipo de clima caracterizado pela baixa umidade e pouco volume pluviométrico. Na classificação mundial do clima, o clima semiárido é aquele que apresenta precipitação de chuvas média entre 300 e 800 mm.

A caracterização climática da região Nordeste é um pouco complexa, sendo que os quatro sistemas de circulação que influenciam são denominados Sistemas de Correntes Perturbadas de Sul, Norte, Leste e Oeste. O proveniente do Sul, é representado pelas frentes polares que alcançam a região na primavera. O verão nas áreas litorâneas até o sul da Bahia traz chuvas frontais e pós-frontais, sendo que no inverno atingem até o litoral de Pernambuco, enquanto o sertão permanece sob ação da alta tropical.

O sistema de correntes perturbadas de Norte, representadas pela CIT, provoca chuvas do verão ao outono, até em Pernambuco, nas imediações do Raso da Catarina. Por outro lado, as correntes de Leste são mais frequentes no inverno e normalmente provocam chuvas abundantes no litoral, raramente alcançando as escarpas do Planalto da Borborema (800 m) e da Chapada Diamantina (1.200 m).

Por fim, o sistema de correntes de Oeste, trazidas pelas linhas de Instabilidade Tropical (IT), ocorrem desde o final da primavera até o início do outono, raramente alcançando os estados do Piauí e Maranhão

Em relação ao regime térmico, suas temperaturas são elevadas, com médias anuais entre 20°C e 28°C, tendo sido observado máximo em torno de 40°C no sul do Maranhão e Piauí. Os meses de inverno, principalmente junho e julho, apresentam mínimas entre 12°C e 16°C no litoral, e inferiores nos planaltos, tendo sido verificado 1°C na Chapada Diamantina após a passagem de uma frente polar.

A pluviosidade na região é complexa e fonte de preocupação, sendo que seus totais anuais variam de 2.000 mm até valores inferiores a 500 mm no Raso da Catarina, entre Bahia e Pernambuco, e na depressão de Patos na Paraíba. De forma geral, a precipitação média anual na região Nordeste é inferior a 1.000 mm, sendo que em Cabaceiras, interior da Paraíba, foi registrado o menor índice pluviométrico anual já observado no Brasil, 278 mm/ano. Além disso, no sertão desta região, o período chuvoso é, normalmente, de apenas dois meses no ano, podendo, em alguns anos até não existir, ocasionando as denominadas secas regionais.

A **seca** é um fenômeno natural, caracterizado pelo atraso na precipitação de chuvas ou a sua distribuição irregular, que acaba prejudicando o crescimento ou desenvolvimento das plantações agrícolas. No Nordeste, de acordo com registros históricos, o fenômeno aparece com intervalos próximos há dez anos, podendo se prolongar por períodos de três, quatro e, excepcionalmente, até cinco anos. As secas são conhecidas, no Brasil, desde o século XVI.

A seca se manifesta com intensidades diferentes dependendo do índice de precipitações pluviométricas. Quando há uma deficiência acentuada na quantidade de chuvas no ano, inferior ao mínimo do que necessitam as plantações, a

seca é absoluta. O Polígono das Secas, com uma dimensão de 950.000 km<sup>2</sup>, equivale a mais da metade do território da região Nordeste (52,7%), que vai desde o Piauí até parte do norte de Minas Gerais. O clima é semiárido e a vegetação de caatingas. O solo é raso, na sua maior parte, e a evaporação da água de superfície é grande. Essa é a área mais sujeita aos efeitos das secas periódicas. Essas variações climáticas prejudicam o crescimento das plantações e acabam provocando um sério problema social, uma vez que expressivo contingente de pessoas que habita a região vive, verdadeiramente, em situação de extrema pobreza. Não é possível se eliminar um fenômeno natural pois as secas vão continuar existindo. Mas é possível conviver com o problema. O Nordeste é viável. Seus maiores problemas são provenientes mais da ação ou omissão dos homens e da concepção da sociedade que foi implantada, do que propriamente das secas de que é vítima.

## REFERÊNCIAS

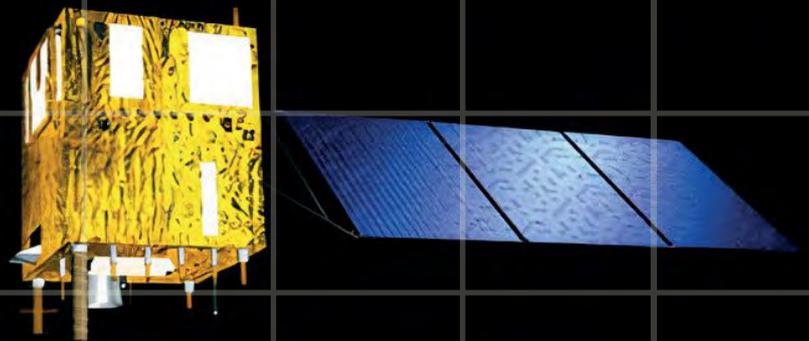
- AMS American Meteorological Society, **Glossary of Meteorology**, Second Edition. Boston, MA: Allen Press, 2000.
- ARTAXO, P.; RIZZO, L.; PAIXÃO, M.; LUCCA, S.; OLIVEIRA, P.; LARA, L.; WIEDEMANN, K.; ANDREA, M.; HOLBEN, B.; SCHAFER, J.; CORREIA, A.; PAULIQUEVIS, T. **Aerosol Particles in Amazonia: Their Composition, Role in the Radiation Balance, Cloud Formation, and Nutrient Cycles**. Washington DC. American Geophysical Union Geophysical Monograph Series. 186. 2009. 233-250. 10.1029/2008GM000778.
- ARMANI, G.; TARIFA, J. R. **Variação Temporo-espacial da Pluviosidade na Região da Barragem de Barra Bonita (FOLHA BAURU– SF-22-Z-B)**. In: IV Simpósio Brasileiro de Climatologia Geográfica-Clima & Ambiente, 2000. Anais ... Rio de Janeiro. p. 1-16, 2000.
- AYOADE, J. O. **Introdução à Climatologia para os Trópicos**. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos; revisão de Suely Bastos; coordenação editorial de Antonio Christofolletti. 4ª ed. Rio de Janeiro; Bertrand Brasil, 1996. 332 p.
- CHEN, S.A.; W.M. Frank **A numerical study of the genesis of extratropical convective mesovortices**. Part I: Evolution and dynamics. J. Atmos. Sci., 50. 1993. 2401-2426.
- CONTI, J. B. **Clima e meio ambiente**. Editora Atual, São Paulo, 1998.
- COY, L.; NASH, E R.; NEWMAN, P A. **Meteorology of the polar vortex: Spring 1997**. Geophysical Research Letters. 24 (22): 2693–2696. 1997. doi: 10.1029 / 97GL52832.
- DIESEL, L. E. **Climatologia e meteorologia**. Editora e Distribuidora S/A. Londrina. 2018. 232p. ISBN 978-85-522-1098-6.
- DLUGOKENCKY, E. **Trends in atmospheric methane**. NOAA/ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends\_ch4/. Acesso em agosto 2020.
- DLUGOKENCKY, E.; TANS, P. **Trends in atmospheric carbon dioxide**. NOAA/ESRL. www.esrl.noaa.gov/gmd/ccgg/trends/. Acesso em agosto 2020.
- EMANUEL, K. A. **The physics of tropical cyclogenesis over the Eastern Pacific**. Tropical Cyclone Disasters. J. Lighthill, Z. Zheming, G. J. Holland, K. Emanuel (Eds.), Peking University Press, Beijing, p. 136-142, 1993.
- FUJITA, T. T. **Proposed characterization of tornadoes and hurricanes by area and intensity**. Satellite Mesometeorology Research Program Research Paper Number 91, Department of Geophysical Sciences, University of Chicago. 1971. 42 p.
- FERREIRA D.; MARSHALL J.; O’GORMAN P. A.; Seager A. **Climate at high-obliquity**. Icarus, 243: p.236-248. 2014.
- GRAY, W. M. **A global view of the origin of tropical disturbances and storms Mon**. Wea. Rev., 96, p. 669-70, 1968.
- HARTMANN D. L. **Global Physical Climatology**. Academic Press, San Diego. International geophysics: 56. 1994. ISBN 0-12-328530-5.
- HOLTON, J. R. **An Introduction to Dynamic Meteorology**, 4th Edition, Elsevier Academic Press, New York, 2004. 535 p.
- IPCC. **La protección de la capa de ozono y el sistema climático mundial: Cuestiones relativas a los hidrofluorocarbonos y a los perfluorocarbonos**. Intergovernmental Panel Climatic Change. PNUMA OMM, Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático y Grupo de Evaluación Tecnológica y Económica. 2005. ISBN: 92-9169-318-9.
- IPCC. The Physical Science Basis. **Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Intergovernmental Panel Climatic Change. eds Solomon, S. et al. Cambridge University Press, 2007.
- IRIBARNE, J. V.; GODSON, W. L. **Atmospheric Thermodynamics**. Universidade de Toronto. 1985.
- LEMES, M. A. M.; MOURA, A. D. **Fundamentos de Dinâmica Aplicados à Meteorologia e Oceanografia**. Ribeirão Preto: Holos Editora, 2ª Edição, 2002, 296 p.

- LOBO, P. R. V.; SOARES, C. A. **Meteorologia e Oceanografia**. Usuário Navegante. Rio de Janeiro: FEMAR, 1999, 481 p.
- LUTGENS, F. K.; TARBUCK, E. J. **The Atmosphere: an introduction to Meteorology**. Prentice Hall, 1989.
- MENDES, C. L. T.; SOARES-GOMES, A. **Circulação nos oceanos: correntes oceânicas e massas d'água**. Disciplina: Oceanografia, Bacharelado em Biologia Marinha, Universidade Federal Fluminense. 2007. <http://ole.uff.br/wp-content/uploads/sites/290/2017/11/Correntes.pdf>
- MENDONÇA, F. **Climatologia: noções básicas e climas do Brasil**. São Paulo: Oficina de Textos, 2007.
- MILLER, A. **Meteorology**. Charles E. Merrill, Columbus, Ohio, 1971.
- MORAN, J. M.; MORGANN, M. D. **Meteorology: atmosphere and the science of weather**. MacMillan, 1989.
- MORAN J. M. Climate Studies. **Introduction to Climate Sciences**. American Meteorology Society, 2012, 525 p.
- MOLION, L. C. B.; BERNARDO, S. O. **Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro**. Revista Brasileira de Meteorologia, Rio de Janeiro (RJ), 17(1): 1-10, 2002.
- NIEUWOLT, S. **Tropical Meteorology**. John Wiley and Sons, New York, 1977.
- NOAA. **Halocarbons and other atmospheric trace species group**. ESRL. <https://www.esrl.noaa.gov/gmd/hats/insitu/cats/conc.php?site=mlo&gas=n2o>. Acesso em agosto 2020.
- OLIVEIRA, L. L.; VIANELLO, R. L.; FERREIRA, N. J. **Meteorologia Fundamental**. Erechim/RS: EdIFAPES, 2001, 423 p.
- PALMBN, E. H. **On the Formation and Structure of Tropical Cyclones**. Geophysica. Helsinki, 3, p. 26-38, 1948.
- PEIXOTO J. P.; OORT, A. H. **Physics of Climate**. Springer Berlin, 1992.
- PICKARD, G. L. **Oceanografia Física Descritiva: Uma Introdução**. 2ª edição em português. Tradução e notas de Paulo Moreira da Silva. Fundação de Estudos do Mar, Rio de Janeiro, 1974.
- PIDWIRNY, M. **"The Layered Atmosphere"**. Fundamentals of Physical Geography, 2nd Edition. 2006. <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7b.html> <http://www.physicalgeography.net/fundamentals/7b.html>.
- PEREIRA, N. **Meteorologia, climatologia e interações oceano-atmosfera**. Notas de aula da Professora Natalia Pereira.
- REBOITA M. S.; PIMENTA A. P.; NATIVIDADE U. A. **Influência da inclinação do eixo de rotação da terra na temperatura do ar global**. Terræ Didática, 11(2): p. 67-77. 2015.
- RETTALACK, B. J. **Compendium of Lecture Notes for Training Class IV Meteorological Personnel**. Vol II- Meteorology. Organização Meteorológica Mundial, Genebra, 1970.
- RIEHL, R. **Meteorologia Tropical**. Ao Livro Técnico, Rio de Janeiro, 1965.
- ROCKSTRÖM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K. et al. **A safe operating space for humanity**. Nature 461, p. 472–475. 2009.
- RUDDIMAN W. F. **Earth's Climate: Past and Future**. New York: W.H. Freeman. 2008. 388 p.
- SALBY, M.L. **Fundamentals of Atmospheric Physics**. Academic Press. 61, 1996. 627 p. ISBN-13: 978-0-12-615160-2/ ISBN-10: 0-12-615160-1.
- SCHOEBERL, M R.; LAIT, L R.; NEWMAN, P A.; ROSENFELD, J E. **The structure of the polar vortex**. Journal of Geophysical Research. 97 (D8): 7859–82. 1992JG. 1992. doi: 10.1029/91JD02168.
- SENE, E.; MOREIRA, J. C. **Geografia geral e do Brasil: Espaço Geográfico e Globalização**. Geografia Ensino Médio. Scipione. São Paulo, 2010.
- STRAMMA, L. **Geostrophic transport in the warm water sphere of the eastern subtropical North Atlantic**. Journal of Marine Research, 42, 537-558. 1984.
- STULL, R. B. **An Introduction to Boundary Layer Meteorology**. Kluwer, 666 p. 1988.
- TALLEY, L. D.; PICKARD, G. L.; EMERY, W. J. **Descriptive Physical Oceanography: An Introduction**. Swift, James H. Sixth Edition. 2011. ISBN: 978-0-7506-4552-2.
- VAREJÃO-SILVA, M. A. **Meteorologia e Climatologia**. Versão digital 2. Recife, 2006, 449 p.
- VESENTINI, J. W.; VLACH, V. **Geografia Crítica: o espaço natural e a ação humana**. Volume 1. São Paulo: Ática, 2002. 184 p.
- VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia Básica e Aplicações**. Viçosa, UFV, 1991, 449p.
- VOITURIES, B.; JACQUES, G. *El Niño*. **Realidade y ficción**. Paris: Unesco, 2000. Wallace, J.M. & P.V. Hobbs, Atmospheric Science: an introductory survey. Academic Press, 1977.
- ZEHR, R. M. **Tropical cyclogenesis in the western North Pacific**. NOAA Technical Report NESDIS 61, U. S. Department of Commerce, Washington, DC 20233, 1992. 181 p.

\* As figuras do presente trabalho foram desenvolvidas utilizando-se de recursos gráficos do Freepik.com.

# PRINCÍPIOS BÁSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO E SUAS APLICAÇÕES NA OCEANOGRAFIA E NA PESCA

6



Antônio Geraldo FERREIRA<sup>1</sup>  
Paulo TRAVASSOS<sup>2</sup>

1 Universidade Federal do Ceará - UFC

2 Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



## 1. INTRODUÇÃO

A *Challenger*, realizada entre 1872 e 1876, foi a primeira expedição científica de caráter puramente oceanográfico a realizar medições de temperatura da água do mar, correntes oceânicas, entre outros parâmetros capazes de caracterizar o ambiente marinho percorrido ao longo da expedição (Challenger Society, 2020). Desde então, estudos oceanográficos sempre estiveram fortemente dependentes da obtenção de dados ambientais. Atualmente, dados *in situ* têm sido normalmente obtidos, de forma sistemática, através de sensores colocados em plataformas estacionárias (boias oceanográficas fundeadas, como as dos Projetos TAO (*Tropical Atmosphere Ocean*), PIRATA (*Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic*) e RAMA (*Research Moored Array for African-Asian-Australian Monsoon Analysis and Prediction*), entre outros, ou plataformas móveis (derivadores, flutuadores Argo e embarcações).

Entretanto, apesar da evolução tecnológica ocorrida desde a expedição *Challenger*, a obtenção de dados oceanográficos através dessas plataformas ainda apresenta grandes limitações espaço-temporais. A aquisição desses dados com resolução espacial e temporal requeridas para estudos dos processos oceanográficos nas suas mais variadas escalas (principalmente regional e global), seria

impraticável utilizando as plataformas mencionadas anteriormente.

Para gerar dados da vasta área oceânica do planeta é preciso dispor de uma ferramenta adequada, que garanta medidas frequentes e precisas da distribuição espacial e temporal de parâmetros abióticos e bióticos dos oceanos. Os sensores remotos instalados nos satélites que orbitam a Terra apresentam essas características e são, portanto, as ferramentas apropriadas para realizar essa missão.

Assim, desde o lançamento ao espaço do primeiro satélite meteorológico TIROS 1- (*Television Infrared Observation Satellite*), em 01 de abril de 1961, e do primeiro satélite oceanográfico, o SeaSat, em 27 de junho de 1978, o sensoriamento remoto tornou-se ferramenta indispensável para estudos da atmosfera e dos oceanos do planeta.

Poucos meses depois, em 13 de outubro de 1978, é colocado em órbita o satélite TIROS-N (*Television InfraRed Operational Satellite - Next-generation*) e, em 24 de outubro de 1978, o Nimbus-7, ambos operados pela NOAA/NASA (*National and Oceanic Atmospheric Administration/National Aeronautics and Space Administration*). O TIROS-N levava a bordo o sensor AVHRR/1 (*Advanced Very High*

*Resolution Radiometer*), que permitia estimar a Temperatura da Superfície do Mar (TSM), e o Nimbus-7, o sensor CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*), com finalidade de gerar dados sobre a cor do oceano, para estimar a concentração de clorofila.

Tendo como exemplo esses dois satélites e seus sensores, a possibilidade de se dispor de uma ferramenta capaz de coletar importantes parâmetros oceanográficos em escala global e elevada frequência, é fácil compreender o interesse despertado pela comunidade científica internacional no que se refere ao potencial do sensoriamento remoto como ferramenta de coleta de dados em comparação com qualquer outro sistema de observação (Kidder & Vonder Haar, 1995).

Até então, o conhecimento sobre os oceanos apoiava-se em medidas pontuais obtidas através da realização de expedições oceanográficas, distribuídas no tempo e no espaço de forma bastante heterogênea. Foi apenas a partir do aparecimento da técnica do sensoriamento remoto que estes parâmetros passaram a ser coletados de forma repetitiva, com uma frequência da ordem de 24 h ou menos, com resolução espacial variando de metros a centenas ou milhares de quilômetros e cobrindo regiões do espectro eletromagnético do visível, infravermelho e micro-ondas, regiões estas de interesses para a oceanografia.

Assim, foi possível desenvolver aplicações que permitiram o acompanhamento e análise da evolução espaço-temporal de parâmetros oceanográficos e da interação oceano-atmosfera, tais como:

- i) temperatura da superfície do mar e suas anomalias, indicativas dos fenômenos *El Niño/La Niña* e Dipolo do Atlântico (sensores operando na faixa do Infravermelho e micro-ondas passiva);
- ii) cor do oceano, indicativa da concentração de clorofila-*a* e ressurgências costeiras (sensores operando na faixa do visível), e

- iii) ventos próximos à superfície e salinidade (sensores operando na faixa do micro-ondas).

Com base nessa nova ferramenta tecnológica, inúmeros trabalhos científicos utilizando dados de TSM, vento e concentração de clorofila-*a*, juntamente com medidas *in situ*, foram publicados para validar os algoritmos desenvolvidos para estimar os valores desses diferentes parâmetros (McMillin, 1975; McClain et al., 1993; Barton & Prata, 1995; Platt & Sathyendranath, 1988; Yoder, 2000; Hardman Mountford et al., 2003).

Portanto, através das tecnologias espacial e computacional atualmente disponíveis, é possível estudar o planeta Terra em suas várias escalas espaciais e temporais. Os estudos científicos, assim conduzidos, procuram integrar as diversas disciplinas de pesquisa que focam no entendimento do planeta como um todo, suas partes e como essas partes interagem entre si (Kampel, 2004).

## 2. PRINCÍPIOS FÍSICOS DO SENSORIAMENTO REMOTO

O Sensoriamento Remoto (SR) do ambiente oceânico envolve medidas da Radiação Eletromagnética (REM) refletida ou emitida pela Terra. Neste tópico será apresentada, de forma breve, a teoria envolvida no uso dessa ferramenta uma vez que, para aqueles que desejarem aprofundar-se neste tópico, deixamos vasta referência no final do capítulo.

### 2.1. O espectro eletromagnético - vivemos num “mar” de ondas eletromagnéticas

A REM é um conjunto de energias com componentes elétrico e magnético que se propagam à velocidade da luz (aproximadamente  $c = 300.000 \text{ km.s}^{-1}$ ) no vácuo e variam de acordo com o comprimento de onda ( $\lambda$ ) ou a frequência ( $\nu$ ). Cobrem a região do espectro que vai desde a radiação gama até às ondas de rádio.

Da Teoria Quântica, sabemos que a energia ( $E$ ) transportada pelos fótons é diretamente proporcional à frequência ( $\nu$ ) da onda de propagação dessa energia e pode ser obtida de acordo com a Eq.1.

$$E = h \nu \text{ (Eq.1)}$$

onde  $h$  é a Constante de Planck, cujo valor é  $6,625 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}^{-1}$  (Joules/segundo).

A propagação dessa energia ( $E$ ) se dá na forma de ondas eletromagnéticas de comprimentos de onda ( $\lambda$ ) e frequências ( $\nu$ ), que estão relacionados de acordo com a Eq. 2.

$$c = \lambda \nu \text{ (Eq.2)}$$

Combinando as Equações (1) e (2) obtemos a Eq. 3.

$$E = \frac{hc}{\lambda} \text{ (Eq.3)}$$

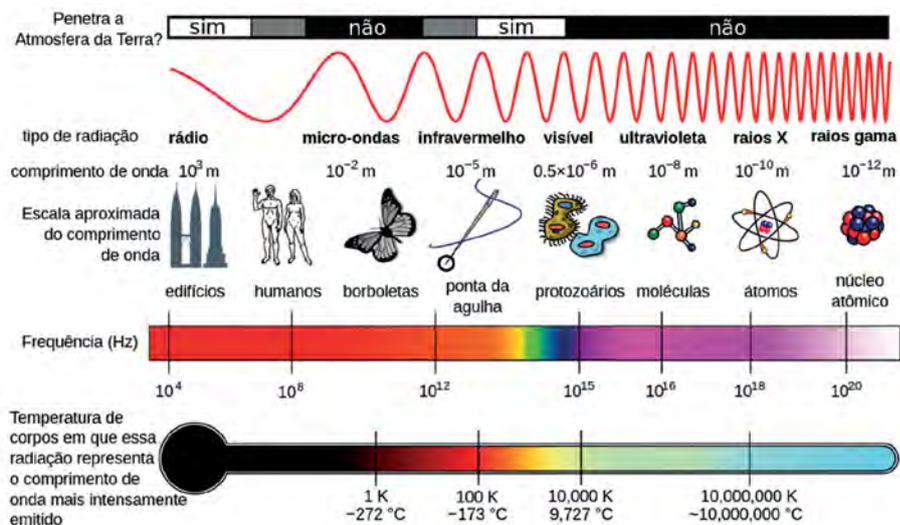
Analisando a Eq. 3, verificamos que quanto menor o comprimento de onda, maior a energia associada a esse  $\lambda$ , e quanto maior o  $\lambda$  menor a energia, uma vez que  $h$  e  $c$  são constantes. Portanto, podemos concluir que a energia transportada pela onda eletromagnética é inversamente proporcional ao

comprimento de onda. Isto explica o fato da radiação gama ser altamente energética (devido à sua alta frequência e comprimento de onda  $\lambda < 10^{-5} \mu\text{m}$ ), e das ondas de rádio serem menos energéticas (frequências da ordem de 300 MHz e  $\lambda > 10^6 \mu\text{m}$ ).

Ao conjunto das radiações Gama, Raio-X, Ultravioleta, Visível, Infravermelho, Micro-ondas e Ondas de Rádio, dá-se o nome de Espectro Eletromagnético (EEM) que, segundo Moreira (2003), nada mais é do que a ordenação dessas radiações em função do comprimento de onda ou da frequência (Fig. 6.1).

A radiação ultravioleta situa-se na região espectral ( $0,28 \mu\text{m} < \lambda < 0,39 \mu\text{m}$ ); a radiação visível situa-se na região espectral ( $0,39 \mu\text{m} < \lambda < 0,74 \mu\text{m}$ ) e a radiação infravermelho próximo na região espectral ( $0,74 \mu\text{m} < \lambda < 2,4 \mu\text{m}$ ). Juntos, os intervalos espectrais do ultravioleta, visível e infravermelho próximo, formam o denominado espectro óptico (Bukata et al., 1995).

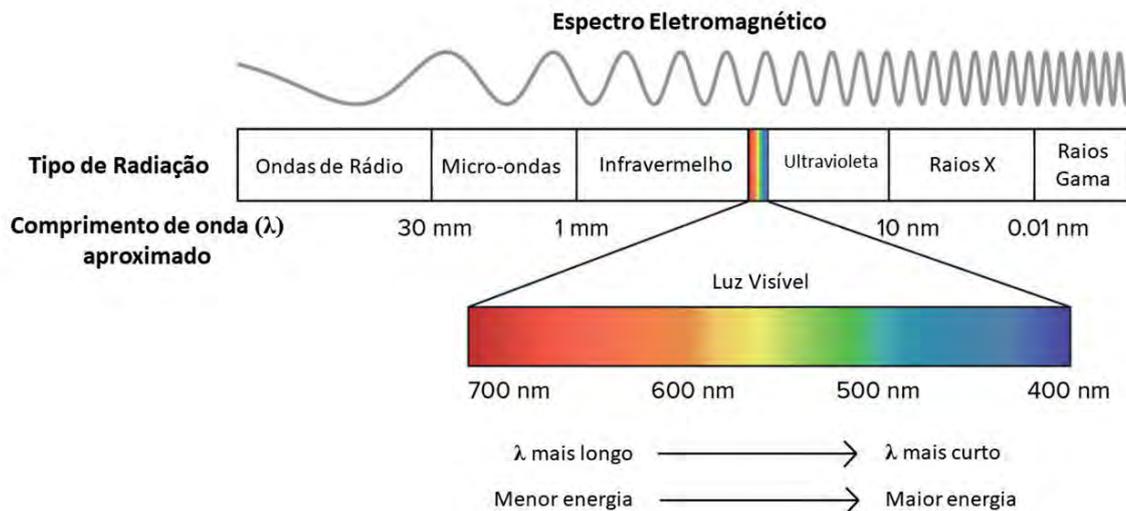
As bandas mais utilizadas para se obter informações da superfície da Terra utilizando técnicas de sensoriamento remoto, incluindo os oceanos, são as do visível, infravermelho próximo, infravermelho médio, infravermelho termal ou distante e micro-ondas.



**Figura 6.1** Espectro Eletromagnético. Adaptado de [https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro\\_eletromagnético#/media/Ficheiro:Espectro\\_EM\\_pt.svg](https://pt.wikipedia.org/wiki/Espectro_eletromagnético#/media/Ficheiro:Espectro_EM_pt.svg). Acesso 06/04/2020.

### 2.1.1. A região do espectro visível

O espectro visível ou radiação visível é composto de ondas eletromagnéticas localizadas entre os comprimentos de onda ( $\lambda$ ) situados entre 0,39  $\mu\text{m}$  e 0,74  $\mu\text{m}$  (ou entre as frequências ( $\nu$ ) de  $7,692 \times 10^{14}$  Hz e  $4,054 \times 10^{14}$  Hz). Detalhes da região visível do Espectro Eletromagnético são apresentados na figura 6.2. Para cada comprimento de onda ( $\lambda$ ) ou frequência ( $\nu$ ) há uma luz correspondente a uma determinada cor (Tab. 6.1).

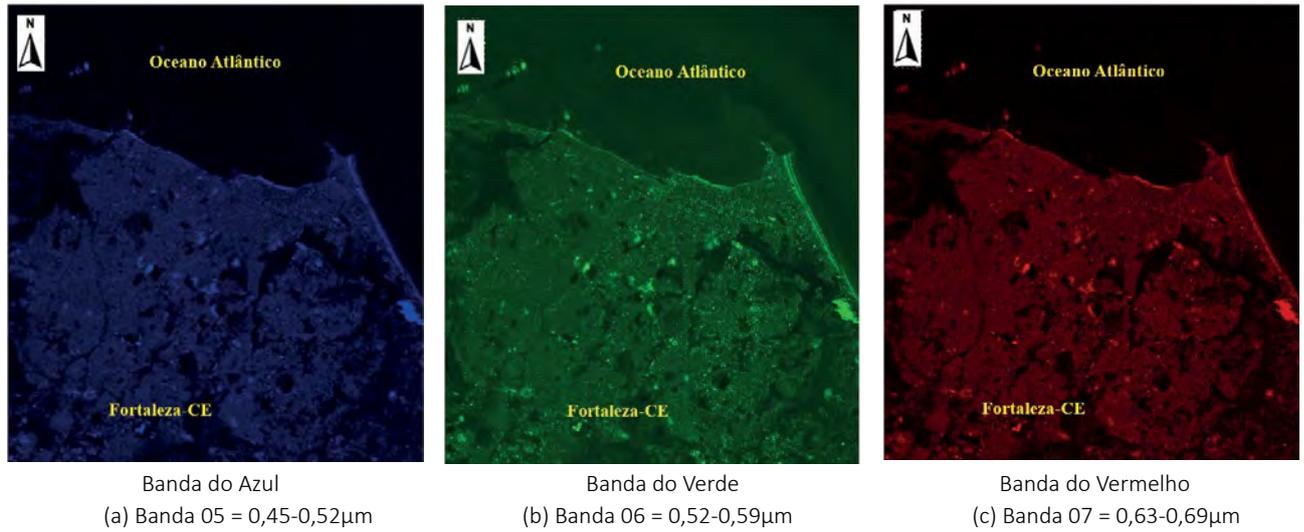


**Figura 6.2** Espectro Eletromagnético com detalhes do Espectro Visível. **Adaptado** de <https://www.infoescola.com/wp-content/uploads/2007/12/espectro-visivel-da-luz.jpg>. **Acesso** 19/11/2020.

**Tabela 6.1** Faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ ) e frequência ( $\nu$ ) para radiação visível e sua subdivisão em intervalos de cores.

Cor	Comprimentos de onda $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Comprimento de Onda Central $\lambda$ ( $\mu\text{m}$ )	Frequência ( $\nu$ ) ( $10^{14}$ Hz)
VIOLETA	0,390- 0,455	0,430	6,593- 7,692
AZUL	0,455- 0,488	0,470	6,147- 6,593
CIANO	0,488- 0,505	0,495	5,941- 6,147
VERDE	0,505- 0,575	0,530	5,217- 5,941
AMARELA	0,575- 0,585	0,580	5,128- 5,217
LARANJA	0,585- 0,620	0,600	4,839- 5,128
VERMELHA	0,620- 0,740	0,640	4,054- 4,839

Imagens do satélite CBERS-4 (*China-Brazil Earth Resources Satellite*; em português: Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres), do Litoral Oeste do estado do Ceará, nas bandas espectrais do azul, do verde e do vermelho, são mostradas na figura 6.3.



**Figura 6.3** Imagens do Satélite CBERS-4 geradas no dia 19/07/2019 do litoral oeste do estado do Ceará e Oceano Atlântico adjacente nas Bandas Espectrais 5 (Azul), 6 (verde) e 7 (Vermelho) da Câmera Multiespectral Regular (MUX), com Resolução Espacial = 20 m. **Fonte** <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers3-4.php>. Imagens processadas no Software Spring 5.5.6.

### 2.1.2. Região do infravermelho

Outra região de interesse para o Sensoriamento Remoto dos oceanos é a infravermelha, cujos comprimentos de onda ( $\lambda$ ) estão compreendidos entre, 0,74  $\mu\text{m}$  e 1.000  $\mu\text{m}$ , situando-se, portanto, na sequência de comprimentos de onda do espectro eletromagnético, logo após o espectro visível (Fig. 6.2). Esta região, segundo Lorenzetti (2015), normalmente é dividida conforme ilustrado na tabela 6.2.

**Tabela 6.2** Faixas Espectrais da região do Infravermelho do Espectro Eletromagnético.

Faixas do Espectro Eletromagnético na região do Infravermelho	Intervalo de Comprimentos de Onda ( $\lambda$ )
Infravermelho Próximo (Near Infrared - NIR)	0,74 $\mu\text{m}$ – 1,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho de Ondas Curtas (Short Wave Infrared - SWIR)	1,0 $\mu\text{m}$ - 3,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho Vermelho de Ondas Médias (Mid Wave Infrared - MWIR)	3,0 $\mu\text{m}$ - 5,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho Vermelho de Ondas Longas (Long Wave Infrared - LWIR)	8,0 $\mu\text{m}$ - 14,0 $\mu\text{m}$
Infravermelho Vermelho de Ondas Muito Longas (Very Long Wave Infrared - VLWIR)	14 $\mu\text{m}$ - 1000 $\mu\text{m}$

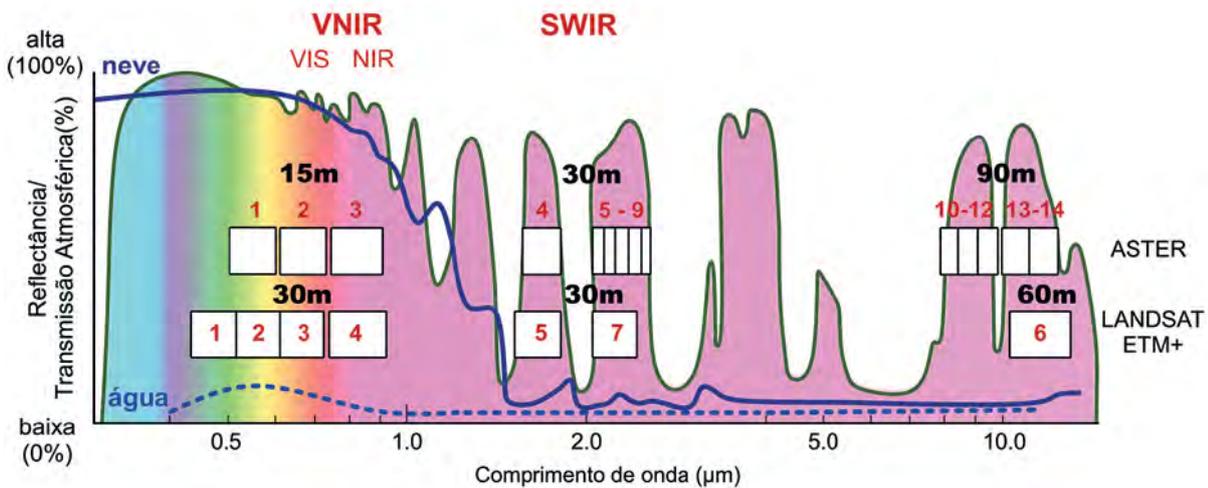
Na figura 6.4 são apresentadas imagens do satélite CBERS-4, do Litoral Oeste do estado do Ceará, nas bandas espectrais do Infravermelho Próximo, do Infravermelho de Ondas Curtas e do Infravermelho Vermelho de Ondas Longas (Infravermelho Termal).

Quando a radiação solar atinge determinada superfície (oceano, por exemplo), ela pode ser absorvida, refletida ou transmitida. Observa-se na figura 6.4 que o oceano aparece escuro nas imagens. Isto se explica pelo fato de que a partir de 1  $\mu\text{m}$  (SWIR), a água absorve praticamente toda a energia incidente sobre ela, deixando de refletir radiação em direção ao espaço (Fig. 6.5), passível de ser registrada por sensores a bordo dos satélites. Como se pode observar, os comprimentos de onda a partir do infravermelho próximo (NIR) são quase que totalmente absorvidos pela água (baixa reflectância). Na parte visível (VIS) existe um pico de reflectância em torno de  $\lambda \sim 0,54 \mu\text{m}$  (porção verde do espectro eletromagnético).



Banda do Infravermelho Próximo (NIR) Banda do Infravermelho de Ondas Curtas (SWIR) Banda do Infravermelho Termal (LWIR)  
**A)** Banda 08 = 0,77-0,89  $\mu\text{m}$  **B)** Banda 11: 2,08- 2,35  $\mu\text{m}$  **C)** Banda 12: 10,4- 12,5  $\mu\text{m}$

**Figura 6.4** Imagens do Satélite CBERS-4 do litoral oeste do estado do Ceará e Oceano Atlântico adjacente. Bandas Espectrais: **A)** Banda 08 (NIR); **B)** Banda 11 (SWIR); e **C)** Banda 12 (LWIR). Instrumentos: MUX e Imageador Multiespectral e Termal (IRS): Resolução Espacial = 40/80 m. **Fonte** <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/cameras/cbers3-4.php>. Imagens processadas no Software Spring 5.5.6.



**Figura 6.5** Curva de reflectância para a água em estado líquido e em forma de neve. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com. **Adaptado** de [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_EN/SEMPJ7TWLUG\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_EN/SEMPJ7TWLUG_0.html). [https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_Global\\_EN/SEMPJ7TWLUG\\_0.html](https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_Global_EN/SEMPJ7TWLUG_0.html). **Acesso** 19/05/2020.

Por este motivo, a água do mar, dependendo de seus constituintes orgânicos e inorgânicos, aparecerá normalmente azul ou esverdeada aos nossos olhos, devido à forte reflectância nos comprimentos de onda do visível (bandas do violeta, azul escuro, azul claro e verde do espectro

eletromagnético), e escura se observada nas bandas do infravermelho próximo (NIR), infravermelho de ondas curta (SWIR) e infravermelho termal (TIR), pois nestes comprimentos de onda praticamente todo fluxo radiante incidente é absorvido pela coluna d'água (Figs. 6.4 A, B, C e Fig. 6.5).

### 2.1.3. Região das micro-ondas

A região das micro-ondas tem sido amplamente utilizada nos últimos anos em sensoriamento remoto dos oceanos, pois sendo uma faixa do EEM não afetada pela dispersão atmosférica, ela consegue operar em qualquer condição de tempo, através de nuvens, nevoeiros e sob chuva (Fonseca & Fernandes, 2004). As micro-ondas compreendem o intervalo de comprimento de ondas entre 1 mm e 1 m, o que corresponde a frequências ( $\nu$ ) entre 300 GHz e 300 MHz, respectivamente. As imagens podem ser adquiridas no modo passivo ou ativo. Os radiômetros de micro-ondas são sensores passivos,

pois medem as energias que estão naturalmente disponíveis no ambiente e que são emitidas pelo sistema Oceano/Terra/Atmosfera. Já o RADAR (**R**adio **D**etection **A**nd **R**anging: em português: Detecção e Telemetria por Rádio) é um sensor ativo, pois possui sua própria fonte de energia. A antena do RADAR emite pulsos direcionais de energia que interagem com o alvo na superfície da Terra e mede os ecos de retorno, permitindo, desta forma, extrair informações sobre a área de interesse. As imagens de RADAR são geradas em vários comprimentos de onda e é comum referir-se às bandas da região das micro-ondas por letras (Tab. 6.3, Fig. 6.6).

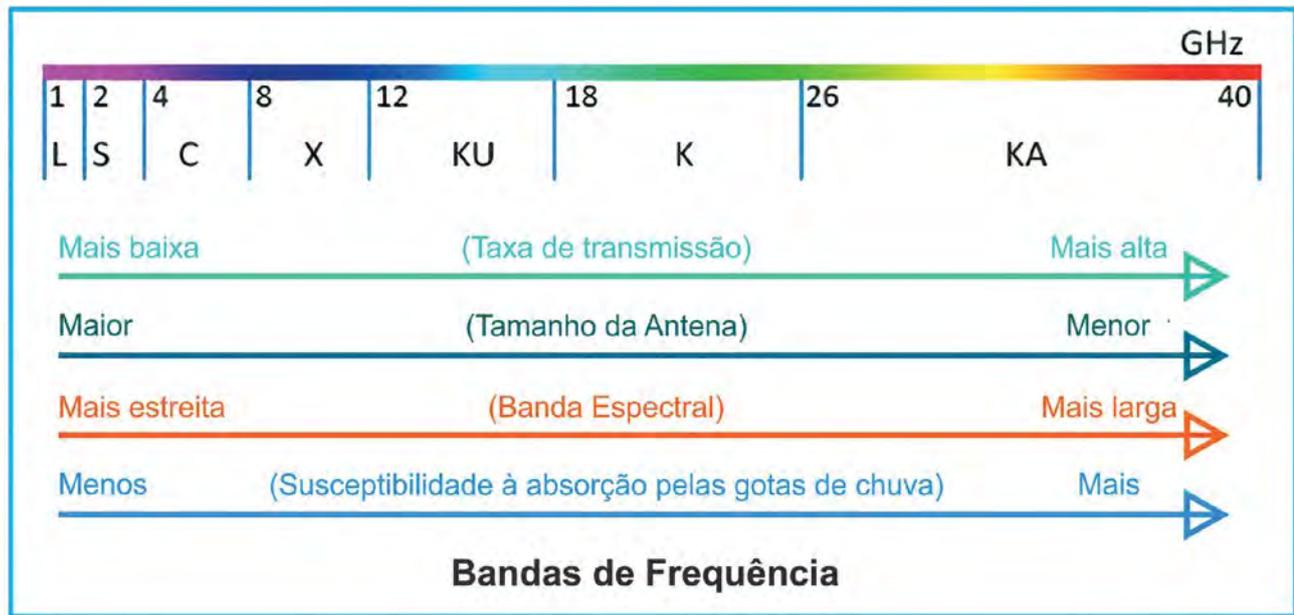
**Tabela 6.3** Subdivisões dos comprimentos de onda  $\lambda$  (cm) e frequências  $\nu$  (GHz) do radar utilizados em Sensoriamento Remoto por micro-ondas ativas, e utilização mais comum de cada banda.

Banda	Frequência (GHz)	Comprimento de Onda (cm)	Utilização mais comum
P	0,3 – 1	100 – 30	Sensoriamento Remoto
L	1 – 2	30 – 15	Sensoriamento Remoto; Navegação por Satélite (GPS, Galileo, GLONASS, BeiDou)
S	2 – 4	15 – 7,5	Transponder de Satélites de Comunicações, RADARES Meteorológicos, NASA utiliza para comunicação com ISS ( <i>International Space Station</i> )
C	4 – 8	7,5 – 3,75	Sensoriamento Remoto, RADARES Meteorológicos
X	8 – 12,5	3,75 – 2,4	RADARES de espaço aéreo e Sensoriamento Remoto
Ku	12,5 – 18	2,4 – 1,67	Comunicações e RADARES de espaço aéreo
K	18 – 26,5	1,67 – 1,1	Comunicações, RADARES, Observações Astronômicas
Ka	26,5 – 40	1,1 – 0,75	Comunicações

**Fontes** Emery, 2017, Pag 62, e <https://www.everythingrf.com/tech-resources/frequency-bands>. Acesso 20/05/2020.

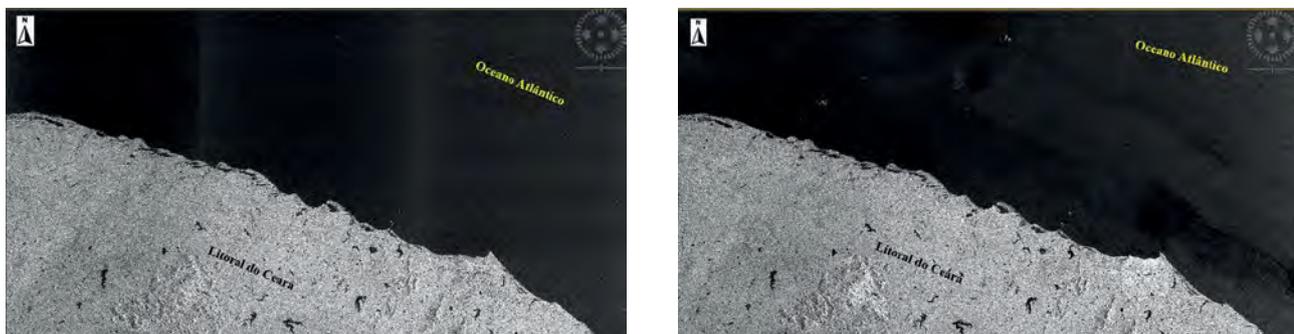
Segundo Fonseca e Fernandes (2004) e Jensen (2011), as letras atribuídas às bandas espectrais da região das micro-ondas do EEM tem origem nas investigações secretas realizadas em sensoriamento remoto sobre o sistema RADAR durante a

Segunda Guerra Mundial, quando foram utilizados descritores alfabéticos em vez de comprimentos de ondas ou frequências reais. Esta nomenclatura permanece até hoje.



**Figura 6.6** Bandas de frequências das micro-ondas e sua designação por letras. **Adaptado** de <https://www.everythingrf.com/tech-resources/frequency-bands>. **Acesso** 20/05/2020.

Na figura 6.7 são apresentadas imagens do satélite Sentinel 1 da ESA (*European Space Agency*), do litoral oeste do estado do Ceará, com polarizações vertical-horizontal (VH: do inglês *Vertical Transmit/Horizontal Receive*) e vertical-vertical (VV: do inglês *Vertical Transmit/Vertical Receive*).



**A)** Polarização Vertical-Horizontal (VH)

**B)** Polarização Vertical-Vertical (VV)

**Figura 6.7** Imagens do Satélite Sentinel 1 do litoral oeste do estado do Ceará e do oceano Atlântico adjacente nas polarizações: **A)** vertical-horizontal e **B)** vertical-vertical. Produto GRD (*Ground Range Detected*), sensor no modo IW (*Interferometric Wide Swath*). Imagens geradas utilizando o aplicativo SNAP (*Sentinel Application Platform*) da ESA (*European Space Agency*).

Devido ao fato do retroespalhamento do sinal emitido pelo Sentinel 1 na banda C-SAR (*Synthetic Aperture Radar*) e na polarização VV ser mais forte

do que na polarização VH, é possível observar mais detalhes sobre o oceano na figura 6.7B do que na figura 6.7A.

## 2.2. Leis da radiação

### 2.2.1. Lei de Planck

A radiação que deixa o sistema Terra/Atmosfera em direção ao espaço pode ser dividida em duas categorias principais: (1) radiação refletida pelo sol e (2) radiação emitida pela Terra, nas quais a relação entre o fluxo de energia, temperatura do corpo e o comprimento de onda  $\lambda$  é descrita pela função de Planck (Eq. 4).

$$B_{\lambda} = \frac{2hc^2}{\lambda^5 \left( e^{\left( \frac{hc}{\lambda KT} \right)} - 1 \right)} \quad [\text{Wm}^{-2}\text{sr}^{-1}\mu\text{m}^{-1}] \quad (\text{Eq. 4})$$

onde  $B_{\lambda}$  é a radiância emitida num determinado comprimento de onda  $\lambda$ ,  $h$  é a constante de Planck ( $6,626 \times 10^{-34}$  J.s),  $K$  é a constante de Boltzman ( $1,38 \times 10^{-23}$  J.K<sup>-1</sup>),  $c$  é a velocidade da luz ( $2,998 \times 10^8$  m.s<sup>-1</sup> no vácuo) e  $T$  é a temperatura física da fonte emissora, medida em Kelvin. Através da Eq. 5 e Eq.7 podemos inferir que qualquer objeto com temperatura acima de 0 (zero) Kelvin emite energia e que esta aumenta com a temperatura. Assim, quanto maior for a temperatura ( $T$ ) do objeto, este emitirá energia em comprimentos de onda  $\lambda$  mais curtos.

### 2.2.2. Lei de Stefan Boltzmann

A Lei de Stefan Boltzmann pode ser utilizada para se determinar o fluxo radiante total  $M_T$  emitido por um corpo, por unidade de área, em todo o seu espectro, sendo descrita pela Eq. 5.

$$M_T = \epsilon \sigma T^4 \quad [\text{W m}^{-2}] \quad (\text{Eq.5})$$

onde  $M_T$  é a energia radiante total emitida pelo corpo;  $\epsilon$  é a emissividade (Eq. 6) ou poder emissivo do corpo ( $\epsilon = 1$ , para o corpo negro);  $\sigma$  é a constante de constante de Stefan-Boltzmann ( $5,6696 \times 10^{-8}$  W m<sup>-2</sup> K<sup>-4</sup>) e  $T$  é a temperatura absoluta do corpo (K).

$$\epsilon_{\lambda} = \frac{B_{\lambda}(\text{corpo real})}{B_{\lambda}(\text{corpo real})} \quad 0 \leq \epsilon \leq 1 \quad (\text{Eq.6})$$

Como  $M_T$  varia com a quarta potência da temperatura (Eq.5), quanto maior for a energia radiante detectada pelo sensor a bordo do satélite, maior a temperatura do corpo emissor (Novo, 2010). Segundo Lorenzetti (2015), pelo fato de  $M_T$  depender  $T^4$ , pequenas variações desta implicam em grandes variações na exitância radiante, o que explica o fato de sensores remotos que operam na faixa espectral do infravermelho termal poderem discriminar pequenas variações de temperaturas dos alvos.

### 2.2.3. Lei de Wien

Através da Lei de Wien podemos conhecer em qual comprimento de onda  $\lambda$  a emissão de um corpo é máxima, conhecendo sua temperatura. É a chamada Lei do Deslocamento de Wien (Eq. 7).

$$\lambda_{\text{max}} = \frac{K}{T} \quad [\mu\text{m}] \quad (\text{Eq.7})$$

onde,  $\lambda_{\text{max}}$  é o comprimento de onda de máxima emissão espectral,  $K$  é uma constante de valor igual  $2.898 \mu\text{m K}$ , e  $T$  é a temperatura em Kelvin. Através da Eq.7, verificamos que a medida que a temperatura de um corpo aumenta, o  $\lambda_{\text{max}}$  se desloca para comprimentos de ondas cada vez menores.

## 3. CARACTERÍSTICAS DOS SATÉLITES

### 3.1. Órbita dos satélites

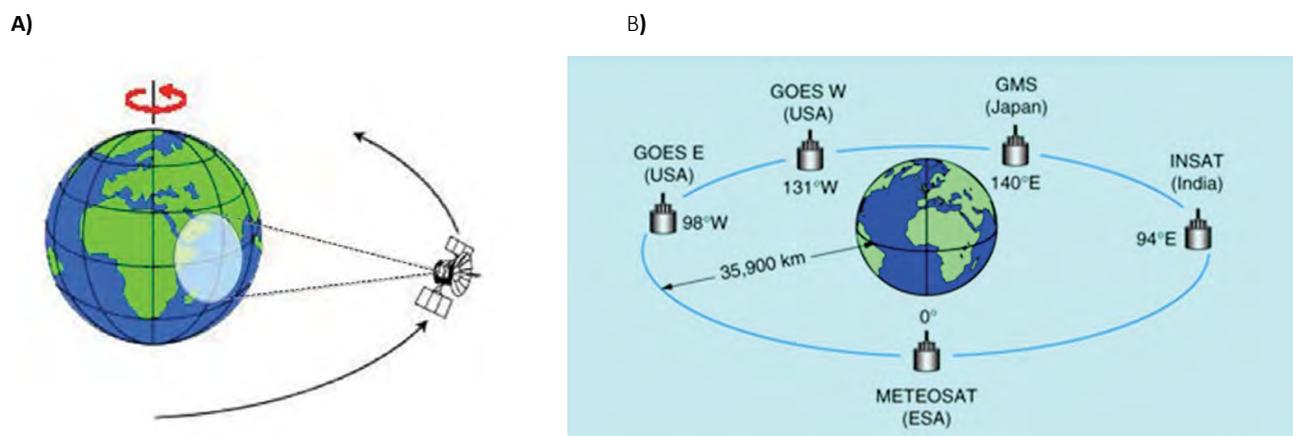
Os satélites ambientais são colocados em duas órbitas principais: Geoestacionária e Polar (ou heliossíncrona).

#### 3.1.1. Geoestacionária

Os satélites geoestacionários (Fig. 6.8) ficam posicionados em uma órbita circular sobre o equador terrestre, a aproximadamente 35.900 km. Estes satélites têm o mesmo período de rotação

que o da Terra e, portanto, giram com a mesma velocidade de rotação do nosso planeta (mesma velocidade angular). Desta forma, o satélite parece estar parado para um observador na Terra, mantendo sua posição sobre uma determinada longitude da superfície terrestre sobre a linha do equador. Assim, como observam sempre a mesma face da Terra voltada para o satélite eles podem fornecer imagens desta face a cada 15 min,

como fazem os satélites MSG (*Meteosat Second Generation*) e GOES (*Geostationary Operational Environmental Satellite*). Embora sejam muito utilizados em sistemas de telecomunicações, os satélites geoestacionários são também bastante úteis para estudos meteorológicos e oceanográficos. Porém, eles não podem observar a Terra em latitudes superiores a 80°, em decorrência da curvatura do planeta.



**Figura 6.8** Órbita Geoestacionária. **Fonte A)** <https://www.ipma.pt/pt/educativa/observar.tempo/index.jsp?page=satelite02.xml&print=true>; **B)** [http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace\\_PT/SEMSX965P1G\\_1.html#subhead1](http://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_PT/SEMSX965P1G_1.html#subhead1). **Acesso** 08/04/2020.

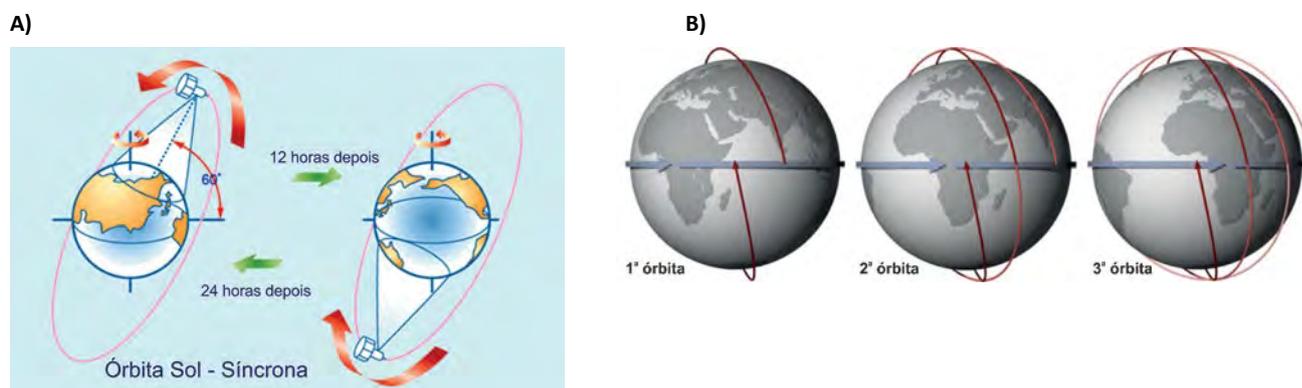
A figura 6.9 ilustra imagens do satélite geoestacionário GOES em diferentes horários do dia, na qual fica evidente que, independente da hora da imagem gerada, a face do planeta observada pelo satélite é sempre a mesma.



**Figura 6.9** Imagens do satélite geoestacionário GOES às 11:45 GMT; 14:45 GMT; 17:45 GMT e 20:45 GMT. **Fonte** <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog/page2.php>. **Acesso** 08/04/2020.

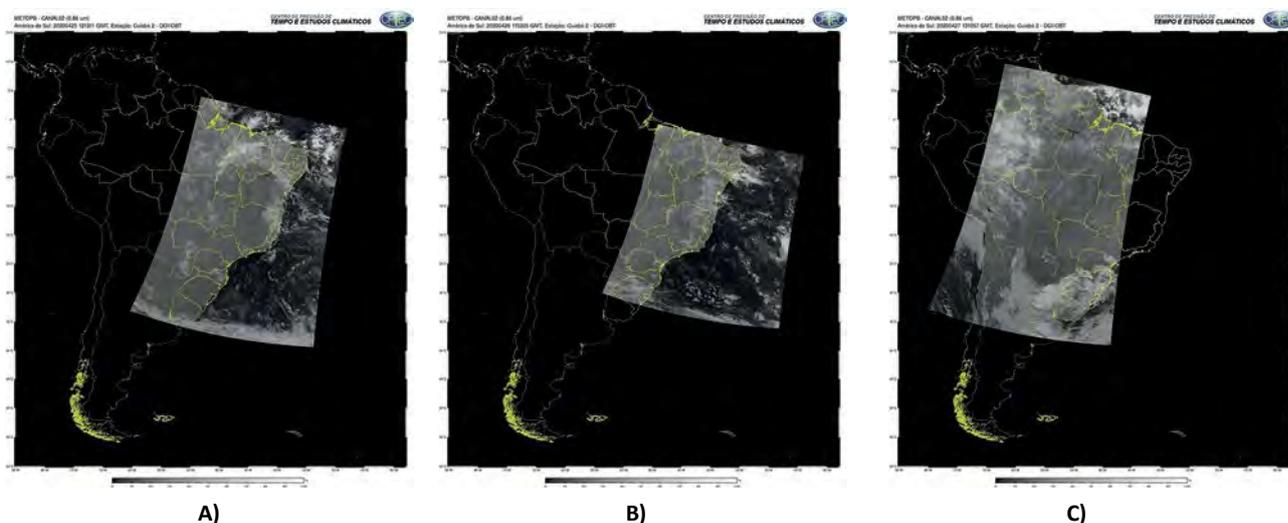
### 3.1.2. Polar

Os satélites de órbita polar (Fig. 6.10) passam sobre os polos (órbita polar) ou próximos a eles (órbita quase polar) a uma altitude que varia de 700 a 900 km, com órbita de pequena excentricidade e heliossíncronas, o que permite que uma determinada zona da Terra seja observada com condições semelhantes de iluminação para passagens consecutivas do satélite. Este tipo de órbita permite a cobertura diária de toda a superfície da Terra a cada 14,1 revoluções do satélite e cruzam o equador terrestre aproximadamente a mesma hora local, todos os dias e noites, o que permite análises comparativas de dados multi-temporais.



**Figura 6.10** Órbita Polar. **Fonte A)** [http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m415\\_715/MonteVerdi/Satellite/PolarOrbiter/Polar\\_Orbits.html](http://tornado.sfsu.edu/geosciences/classes/m415_715/MonteVerdi/Satellite/PolarOrbiter/Polar_Orbits.html), e **B)** <https://earthobservatory.nasa.gov/features/OrbitsCatalog/page2.php>. **Acesso** 08/04/2020.

Imagens do satélite de órbita polar Metop B sobre a América do Sul, em diferentes dias do ano (25 a 27/04/2020) são apresentadas na figura 6.11. Observa-se que, devido às características da órbita polar, imagens de áreas e tamanhos diferentes são geradas pelo satélite.



**Figura 6.11** Imagens do satélite de órbita Polar Metop B – Canal 2 ( $0,86 \mu$ ), sobre a América do Sul e Oceano Atlântico Adjacente: **A)** 25/04/2020; **B)** 26/04/2020; **C)** 27/04/2020. **Fonte** Estação de Cuiabá 2 – DGI-OBT. [http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/noaa/formulario\\_logic?i=br](http://satellite.cptec.inpe.br/acervo/noaa/formulario_logic?i=br). **Acesso** 10/05/2020.

## 4. CARACTERÍSTICAS DOS SENSORES

Os sensores remotos são dispositivos desenhados para coletar dados através da detecção do fluxo de energia refletida ou emitida pelo sistema Terra/Atmosfera, nas bandas do visível, infravermelho e micro-ondas. Esses sensores podem estar instalados a bordo de satélites, drones ou mesmo em aeronaves. A seguir apresentamos algumas de suas características.

### 4.1. Classificação dos sensores

Os sistemas sensores podem ser classificados sob diferentes aspectos relativos aos mecanismos de registro e geração de informações a partir da radiação eletromagnética. Vamos nos ater apenas, de forma bastante breve, às principais classificações, como segue.

#### 4.1.1. Quanto às faixas do espectro eletromagnético

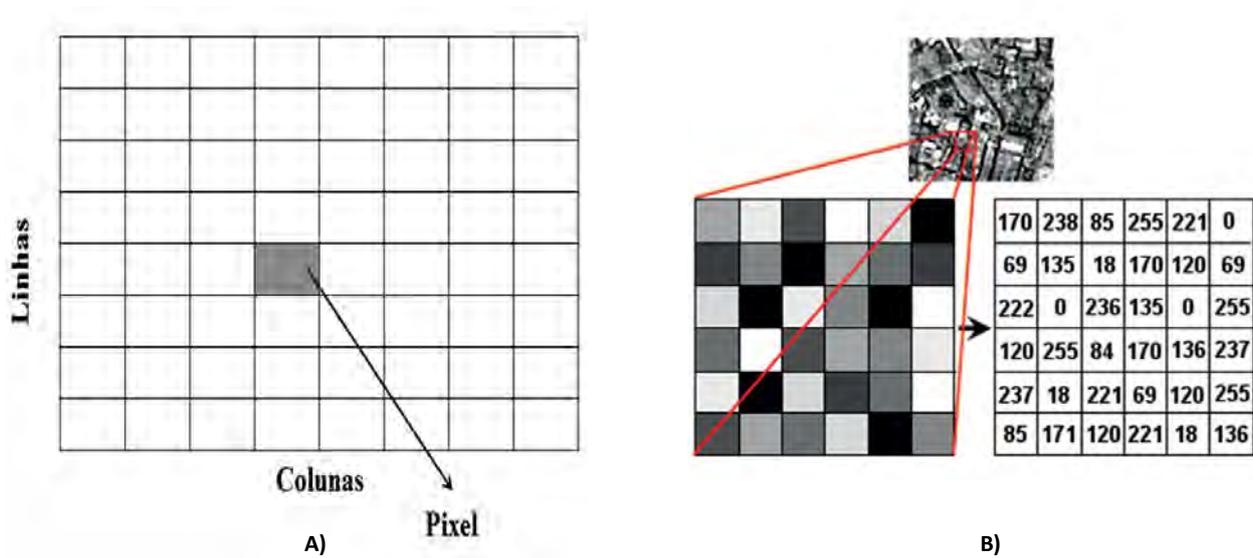
Os sensores remotos podem ser classificados de acordo com as faixas ou regiões do espectro eletromagnético em que operam, sendo estas, geralmente, as do espectro visível, do infravermelho e de micro-ondas.

#### 4.1.2. Quanto ao formato do produto final gerado

Neste caso, os sensores são classificados como não imageadores, que não geram imagens, mas sim apresentam seus produtos na forma de gráficos ou matrizes numéricas, e os sensores imageadores, aqueles capazes de gerar uma imagem digital como produto, após registro e processamento da radiação.

Neste último caso, as imagens são representações bidimensionais de determinada área da superfície da Terra (continente ou oceano) geradas por sensores eletrônicos instalados a bordo de satélites que orbitam o planeta em variadas altitudes. Elas são formadas por uma matriz bidimensional ( $m$  linhas x  $n$  colunas) composta por células (como em uma planilha eletrônica), cuja unidade é denominada pixel (*picture element*) (Fig. 6.12A), que isoladamente cobre uma determinada área na superfície da Terra (ver resolução espacial) e, em conjunto, a área da imagem como um todo (Fig. 6.12B). O valor associado a cada pixel refere-se à intensidade do fluxo de radiação eletromagnética (radiância) proveniente da sua superfície de cobertura, a qual sensibiliza o sensor e possui coordenadas espaciais referenciadas por suas linhas (**ex:** latitudes) e colunas (**ex:** longitudes).

A radiância ( $L$ ) pode ser definida com o fluxo radiante ( $\Phi$ ) que deixa uma unidade de área da superfície em uma direção particular por unidade de ângulo sólido nessa direção específica. Ela é medida em  $W.m^{-2}.sr^{-1}$  e sua importância reside no fato de que é a magnitude de energia eletromagnética que o sensor remoto registra para posterior geração de uma imagem digital. Segundo Jensen (2011), a “radiância é a medida radiométrica mais precisa em sensoriamento remoto”. Quando a radiância se refere a uma porção específica do espectro eletromagnético ela é referida como radiância espectral ( $L_\lambda$ ).



**Figura 6.12 A)** Imagem digital representada por um conjunto de pixels (*picture elements*) formando uma matriz de dados. **B)** cada pixel tem um valor de intensidade (radiância) e é localizado pelo par ordenado linha x coluna. Em uma imagem de satélite as linhas e colunas podem representar latitudes e longitudes respectivamente (Imagem georreferenciada). **Adaptado** de [http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/images\\_sat/ima\\_sat/ima\\_sat.htm](http://espace-svt.ac-rennes.fr/applic/images_sat/ima_sat/ima_sat.htm). **Acesso** 02/06/2020.

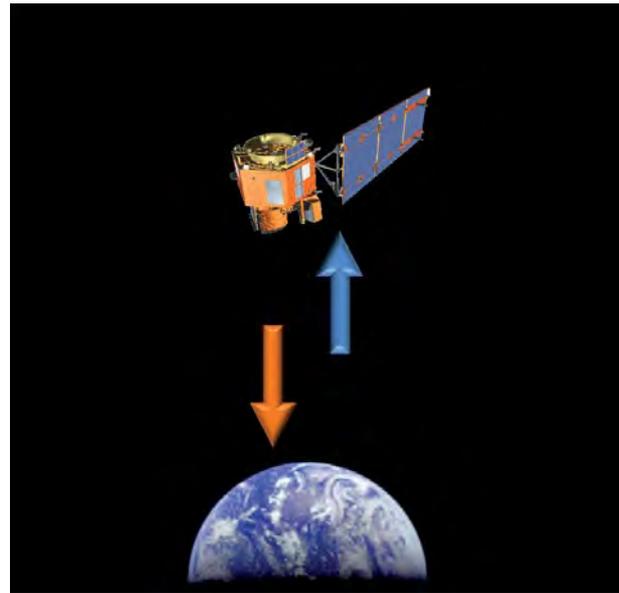
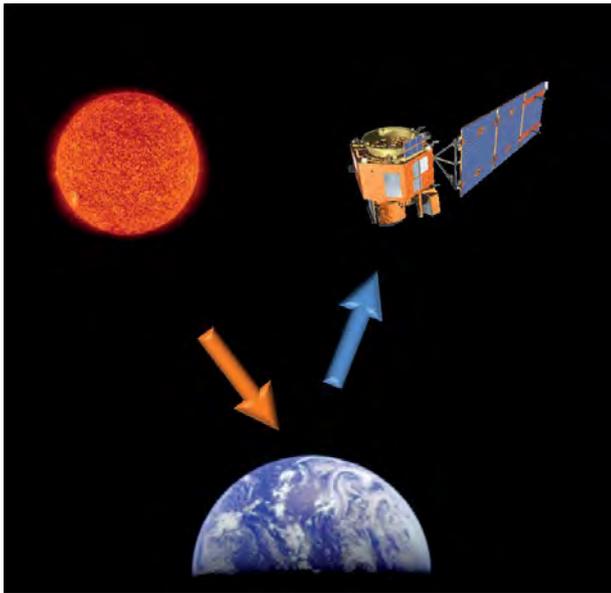
A intensidade dos valores observados na figura 6.12B representa a quantidade física de radiação medida pelo sensor remoto. Esta quantidade pode representar a radiação solar em uma determinada faixa de comprimento de onda ( $\lambda$ ) refletida pela superfície terrestre (região do visível ou infravermelho próximo), a radiação infravermelha termal emitida ou a intensidade de energia retroespalhada na região das micro-ondas (radar). Esse valor normalmente é o valor médio integrado para todos os alvos presentes na área da superfície coberta pelo tamanho do pixel (ver resolução espacial).

Para gerar uma imagem digital, a intensidade do pixel é digitalizada e armazenada como números digitais (bits- dígitos binários, do inglês *binary digits*). Cada sensor a bordo do satélite tem uma determinada capacidade de armazenar dados e o número de bits determina a resolução radiométrica da imagem (ver resolução radiométrica).

#### 4.1.3. Quanto à fonte de energia utilizada

Os sensores podem ser também classificados em passivos e ativos, de acordo com a fonte de energia

utilizada para processamento e geração de seus produtos. Os sensores passivos (Fig. 6.13A) são aqueles que dependem de uma fonte de energia externa que está naturalmente disponível. Eles, portanto, detectam a radiação refletida e/ou emitida pela superfície terrestre em diversas faixas de comprimento de onda do espectro eletromagnético, como do visível, dos infravermelhos próximo e termal, e das micro-ondas. Os satélites Aqua/MODIS (*Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer*), AVHRR (*Advanced Very High Resolution Radio Motor*) e Sentinel-2/ MSI (*Multispectral Imager*), por exemplo, são passivos. Já os sensores ativos (Fig. 6.13B), por possuírem fonte de radiação própria, são capazes de emitir um feixe de energia em determinada faixa espectral em direção à superfície terrestre (determinada área ou alvo) e medir a radiação retroespalhada que retorna em direção ao sensor. A maioria dos sensores ativos operam na faixa das micro-ondas do espectro eletromagnético. São exemplos de sensores ativos os satélites Sentinel 1/ C-SAR (*C-band SAR instrument*), e Alos 2 / PALSAR-2 (*Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar-2*).



**Figura 6.13** A) Sensores Passivos, e B) Sensores ativos. **Fonte** [https://www.nasa.gov/sites/default/files/active\\_sensor.png](https://www.nasa.gov/sites/default/files/active_sensor.png). **Acesso** 10/04/2020.

## 4.2. Resoluções de um sensor

Além dessas classificações mencionadas acima, os sistemas sensores instalados a bordo dos satélites apresentam outras características que são relevantes não apenas para os diferenciarmos uns dos outros, mas principalmente para conhecer a capacidade técnica de cada um na geração de informações da superfície do planeta, assim como a missão para a qual eles foram projetados. Essas características são definidas e conhecidas pelo termo “resolução” e normalmente divididas em resolução espacial ou geométrica, temporal, espectral e radiométrica. Segue uma breve descrição de cada uma delas (Fonseca & Fernandes, 2004; Novo, 2010).

### 4.2.1. Resolução espacial

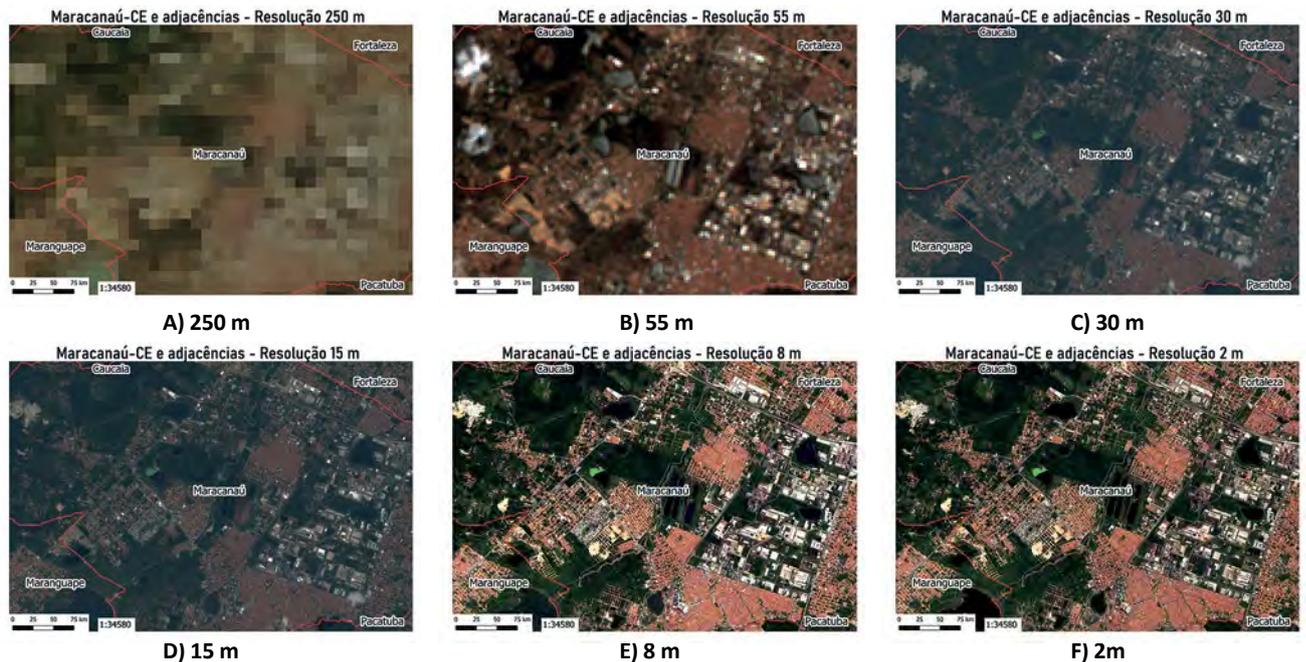
A resolução espacial ou geométrica está ligada à capacidade do sensor em distinguir objetos na superfície terrestre. Sensores considerados de alta resolução espacial possuem pixels de tamanho bem reduzido, entre 41 cm e 4 m, enquanto nos de baixa resolução espacial os pixels são bem maiores, variando entre 30 m e 1,1 km ou mais.

A tabela 6.4 apresenta a resolução espacial para alguns sensores como o AVHRR-3 (*Advanced Very High Resolution Radiometer-3*), OLI (*Operational Land Imager*), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), WFI- (*Wide Field Imager*) e o IRMSS- (*InfraRed MultiSpectral Scanner*).

**Tabela 6.4** Resolução espacial dos sensores AVHRR-3, OLI, MODIS, OLCI, WFI e IRMSS.

Resolução Espacial	
Satélite/Sensor	Resolução Espacial
NOAA 19 / AVHRR-3	Bandas 1 a 5: 1,1 km
LANDSAT 8 / OLI	Bandas 1,2,3,4,5,6,7 e 9: 30 m Banda 8: 15 m Bandas 10 e 11: 100 m
AQUA e TERRA / MODIS	Bandas 1 e 2: 250 m Bandas 3 a 7: 500 m Bandas 8 a 36: 1 km
SENTINEL 3 / OLCI	Bandas 1 a 21: 300 m
CBERS2 / WFI	Bandas 1 e 2: 260 m
CBERS2 / IRMSS	Bandas 1 a 4: 80 m

**Fonte** <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>; <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions>; <https://eos.com/landsat-8/>; <https://modis.gsfc.nasa.gov/>; <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. **Acesso** 29/05/2020.



**Figura 6.14** Imagens de satélite ilustrando diferentes resoluções espaciais sobre a cidade de Maracanaú-CE e adjacências : **A)** Satélite Terra– 250 m, dia 05/09/2020; **B)** Satélite CBERS-4A- 55 m, dia 13/09/2020; **C)** Satélite Landsat 8 – 30 m, dia 27/09/2020, **D)** Satélite Landsat 8 – 15 m, dia 27/09/2020; **E)** Satélite CBERS-4A – 8 m, dia 22/06/2020; **F)** Satélite CBERS-4A- 2 m, dia 22/06/2020.

As imagens de diversos satélites com diferentes resoluções espaciais são apresentadas na figura 6.14. Pode-se observar através das imagens, que com o aumento da resolução espacial (pixel menor), mais detalhes da superfície podem ser observados.

#### 4.2.2. Resolução temporal

A resolução temporal refere-se à frequência de cobertura ou intervalo de tempo que o satélite leva para voltar a observar e adquirir dados de uma mesma área de interesse da superfície terrestre, ou seja, é a frequência com a qual o alvo é amostrado. Sensores com altíssima resolução temporal fornecem duas imagens por dia da mesma região, de alta resolução as imagens são disponibilizadas com frequência de 1 a 3 dias, de média resolução entre 4 e 16 dias e baixa resolução temporal uma mesma região é imageada com frequências superiores a 16 dias. A resolução temporal dos sensores AVHRR-3, OLI, MODIS, OLCI, WFI, e IRMSS são apresentadas na tabela 6.5.

**Tabela 6.5** Resolução temporal dos sensores AVHRR-3, OLI, MODIS, OLCI, WFI, e IRMSS.

Resolução temporal	
Satélite/Sensor	Resolução temporal
NOAA 19 / AVHRR-3	12 horas
Landsat 8 / OLI	16 dias
AQUA e TERRA / MODIS	1 a 2 dias
SENTINEL 3 / OLCI	4 dias
CBERS2 / WFI	3 a 5 dias
CBERS2 / IRMSS	26 dias

**Fonte** <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>; <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions>; <https://eos.com/landsat-8/>; <https://modis.gsfc.nasa.gov/>; <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. **Acesso** 29/05/2020.

#### 4.2.3. Resolução espectral

A resolução espectral de um determinado sistema sensor está relacionada ao número de bandas espectrais que ele possui e à largura individual de cada banda. Um sistema com alta resolução

espectral, tipicamente contém um número elevado de bandas espectrais, as quais, individualmente, abrangem um intervalo bastante estreito de comprimentos de onda. Nos últimos anos, o avanço tecnológico tem permitido o uso de sensores que operam com elevada quantidade de bandas, chegando a 200 ou mais, apresentando elevada resolução espectral. Um bom exemplo é o AVIRIS (*Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer*),

da NASA/EUA, que possui 224 bandas espectrais, razão pela qual é denominado um sensor hiperespectral. Bem abaixo dessa capacidade estão os sensores AVHRR-3 e OLI/TIRS dos satélites NOAA-19 e Landsat-8, de baixa resolução espectral, que possuem apenas 5 e 11 bandas espectrais respectivamente. A resolução espectral de cada um desses sensores e ainda do sensor MODIS são encontradas na tabela 6.6.

**Tabela 6.6** Resolução espectral dos sensores AVHRR-3, OLI, MODIS, OLCI, WFI, e IRMSS.

Resolução espectral		
Satélite/Sensor	Bandas espectrais e comprimentos de onda ( $\mu\text{m}$ )	
NOAA 19 / AVHRR-3	1	0,58- 0,68 (Vermelho)
	2	0,725- 1,1 (Infravermelho próximo)
	3a	1,58 – 1,64 (Infravermelho de Ondas Curtas)
	3b	3,55- 3,93(Infravermelho de Ondas Médias)
	4	10,30- 11,30 Infravermelho termal
LANDSAT 8 / OLI	5	11,50- 12,50 Infravermelho termal
	1	0,433 – 0,453 (Azul Profundo)
	2	0,450 – 0,515 (Azul)
	3	0,525- 0.600 (Verde)
	4	0,630 – 0,680 (Vermelho)
	5	0,845 – 0,885 (Infravermelho Próximo)
	6	1,560 – 1,660 (Infravermelho de Ondas Curtas)
	7	2,100 – 2,300 (Infravermelho de Ondas Curtas)
	8	0,500 – 0,680 (Pancromática)
LANDSAT 8 / TIRS	9	1,360 – 1,390 (Infravermelho de Ondas Curtas)
	10	10,3 – 11,3 (Infravermelho Termal)
AQUA e TERRA / MODIS	11	11,5 – 12,5 (Infravermelho Termal)
	1 a 19	0,405 – 2,155 (Visível- Infravermelho de Ondas Curtas)
	20 a 36	3,66 – 14,28 (Infravermelho Vermelho de Ondas Médias – Infravermelho Termal)

**Fonte** <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>; <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions>; <https://eos.com/landsat-8/>; <https://modis.gsfc.nasa.gov/>; <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. Acesso 29/05/2020.

#### 4.2.4. Resolução radiométrica

A resolução radiométrica, ou nível de quantização, refere-se à capacidade de um sistema sensor de discriminar e registrar pequenas variações no nível da energia refletida, emitida, ou retroespalhada por um alvo na superfície terrestre. Portanto, quanto maior a resolução radiométrica mais ampla

é a faixa de intensidades de radiação que o sensor remoto é capaz de distinguir e registrar. Ela é normalmente expressa em números de bits para cada banda espectral. Segundo Jensen (2011), quanto maior for a resolução radiométrica de um sensor remoto, maior a probabilidade de que os

fenômenos de interesse sejam estudados com mais exatidão.

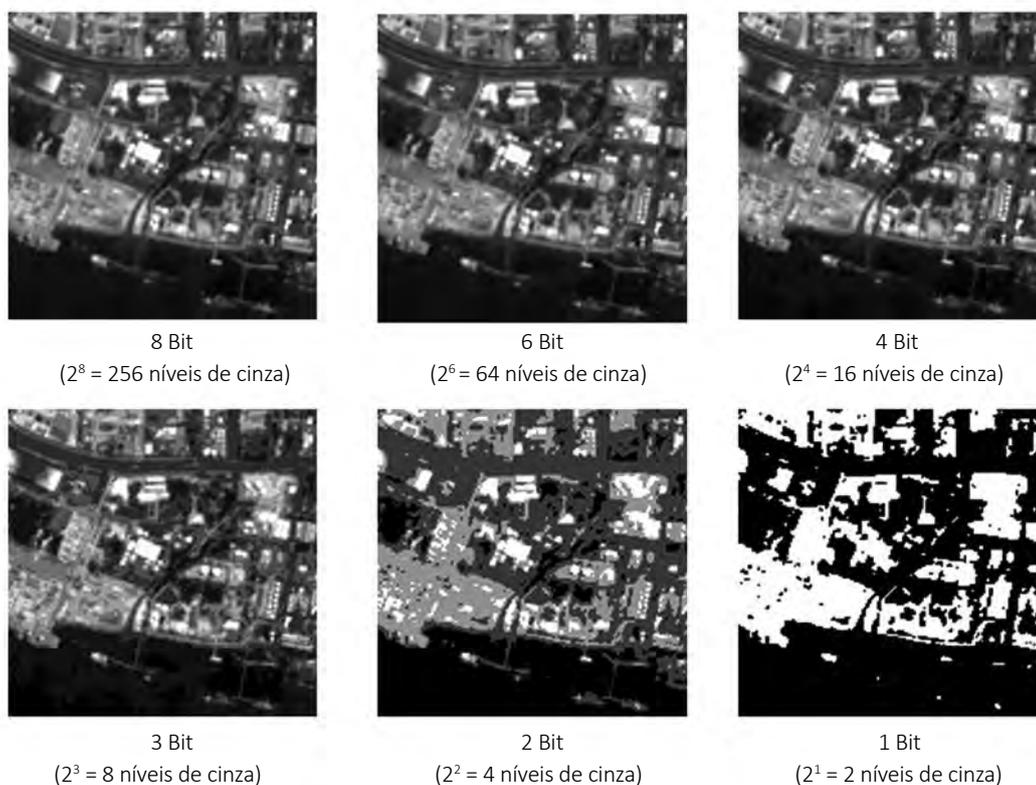
Como mencionado anteriormete, as imagens de satélites são formadas por uma matriz de elementos (pixels) indexados por linhas e colunas. O valor associado a cada pixel refere-se à intensidade de radiação que sensibiliza o sensor. Esses valores contidos na imagem geralmente são exibidos em um intervalo de tons ou níveis de cinza, com cada pixel assumindo tonalidades que variam do preto ao branco. Os níveis de cinza são medidos em bits ( $2^n$ ), onde o n representa a quantidade de níveis de cinza ou nível de quantização. Por exemplo, uma imagem de 8 bits ( $2^8$ ) terá 256 níveis de cinza e cada pixel da imagem pode assumir valores entre 0 e 255 (Fig. 6.12 B). Uma imagem de 10 bits ( $2^{10}$ ) terá 1.024 níveis de cinza e cada pixel da imagem poderá assumir valores entre 0 e 1.023. Alguns sensores são apresentados na tabela 6.7.

**Tabela 6.7** Resolução espectral dos sensores WFI, IRMSS, AVHRR-3, OLI, MODIS, e OLCI.

Resolução Radiométrica	
Satélite/Sensor	Resolução Radiométrica
CBERS2 / WFI e IRMSS	8 bits (256 níveis de cinza)
NOAA 19 / AVHRR-3	10 bits (1.024 níveis de cinza)
AQUA e TERRA / MODIS / SENTINEL 3 / OLCI	12 bits (4.096 níveis de cinza)

**Fonte** <http://www.dgi.inpe.br/CDSR/>; <https://earth.esa.int/web/eoportal/satellite-missions>; <https://modis.gsfc.nasa.gov/>; <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides>. **Acesso** 29/05/2020.

O efeito da variação da resolução radiométrica nas imagens de satélites pode ser observado na figura 6.15. À medida que a resolução radiométrica vai diminuindo de 8 bits (256 níveis de cinza ou informação) para 1 bit (2 níveis de cinza ou informação preto ou branco), perde-se riqueza de detalhes na imagem. Portanto, quanto mais elevado for o número de bits nas imagens, mais sensibilidade e poder de diferenciação de níveis de informação se obtêm.



**Figura 6.15** Imagens 8 bits ( $2^8 = 256$  níveis de cinza) do satélite Spot e o efeito da degradação da resolução radiométrica de 8 bits para 1 bit. **Adaptado** de <https://crisp.nus.edu.sg/~research/tutorial/image.htm>. **Acesso** 02/06/2020.

## 5. SISTEMAS SENSORES

### 5.1. Sensores de cor do oceano

Muitos sensores desenvolvidos e lançados em órbita desde o final da década de 1970 tem permitido o estudo detalhado da dinâmica de diversos processos de ressurgência no mundo todo através de imagens da concentração de clorofila. O pioneiro foi o sensor CZCS (*Coastal Zone Color Scanner*), lançado a bordo do satélite Nimbus-7 em 24/10/1978 e que operou de 30/10/1978 a 22/06/1986 (NASA, 2020). Após o sucesso do CZCS, outros sensores de observação da cor do oceano foram lançados ao espaço, tais como SeaWiFS (*Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor*), MODIS (*Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*), MMRS (*Multispectral Medium Resolution Scanner*), MERIS (*Medium Resolution Imaging Spectrometer*) e OLCI (*Ocean and Land Color Instrument*). Na tabela 6.8 estão discriminadas algumas das características desses sensores. Para mais detalhes sobre outros sensores de cor do oceano não operacionais, operacionais e de futuras missões, acessar: <https://iocg.org/resources/missions-instruments/>.

Mas por que chamamos esses instrumentos de sensores de cor do oceano? Eles são chamados assim porque operam na banda visível do espectro eletromagnético e a cor das águas dos oceanos nos dá uma indicação da concentração dos seus constituintes ópticos. A cor da água do mar pode ser definida, em termos gerais, como sendo o resultado das interações existentes entre os raios solares que penetram no oceano e diversos tipos de matérias (orgânica ou inorgânica) e/ou substâncias dissolvidas contidas na água.

Em águas de elevada transparência, o principal constituinte que influencia a cor do oceano é o fitoplâncton. Assim, quanto maior for a concentração de fitoplâncton mais verde será a água. Se houver pouco fitoplâncton, a água aparecerá tipicamente de coloração azul marinho, característico das zonas oceânicas. Por ter

poucos componentes suspensos e dissolvidos, a reflectância das águas oceânicas é dominada pelas propriedades ópticas da água pura, motivo pelo qual essas águas apresentam cor característica de azul escuro (Kampel & Novo, 2005). Nessas condições, a absorção molecular da água, segundo Jensen (2011), ocorre principalmente na região do ultravioleta ( $\lambda < 400$  nm), do amarelo ( $\lambda \sim 575 - 585$  nm), do vermelho ( $\lambda \sim 620 - 740$  nm), e do infravermelho próximo e médio ( $\lambda \sim 740 - 2500$  nm). Já o espalhamento na coluna d'água é mais significativo nas regiões do violeta ( $\lambda \sim 390 - 455$  nm) e azul ( $\lambda \sim 455 - 505$  nm). Já em regiões de águas rasas costeiras, os sedimentos suspensos e a matéria orgânica dissolvida colorida (CDOM - *Colored or Chromophoric Dissolved Organic Material*) influenciam a cor do oceano de forma predominante, se sobrepondo, muitas vezes, aos efeitos ópticos gerados pelo fitoplâncton.

Com base nessas características, Morel (1980) propôs a classificação da água do mar em duas categorias: a água do Tipo 1 e a água do Tipo 2. Na água do Tipo 1, relativas às zonas oceânicas de mar aberto, é o fitoplâncton que apresenta efeitos predominantes sobre as propriedades ópticas (absorção e difusão) da água. Aqui, a presença do fitoplâncton com seus pigmentos fotossintéticos na coluna d'água é a principal responsável pela absorção e difusão dos raios solares que penetram o oceano. Quando há um florescimento fitoplanctônico importante, a cor da água torna-se esverdeada em decorrência da maior reflectância da clorofila e seus derivados associada a esta elevada biomassa primária. Desta forma, a concentração do fitoplâncton pode alterar a cor da água do mar de um azul marinho típico das zonas oceânicas, característico de águas oligotróficas, para um azul-esverdeado, cor que indica a ocorrência de uma elevada biomassa primária local e, portanto, altas concentrações de clorofila. Vários fenômenos oceanográficos, como divergências, vórtices, frentes, entre outros, capazes de aportar nutrientes na zona eufótica trazidos

**Tabela 6.8** Sensores de cor do oceano (operacionais e não operacionais).

SENSOR	AGÊNCIA ESPACIAL	SATÉLITE	LARGURA DE FAIXA (km)	RESOLUÇÃO ESPACIAL (m)	RESOLUÇÃO TEMPORAL (DIAS)	NÚMERO DE BANDAS ESPECTRAIS	LARGURA DAS BANDAS (nm)	ÓRBITA DO SATÉLITE	PERÍODO DE OPERAÇÃO
CZCS	NASA (USA)	Nimbus-7	1556	825	6	6	433 - 12500	Polar	24/10/1978-22/6/1986
SeaWiFS	NASA (USA)	OrbView-2 (USA)	2806	1100	1	8	402 - 885	Polar	01/08/1997-14/02/2011
MODIS	NASA (USA)	AQUA (EOS-PM1)	2330	250/500/1000	1	36	405 - 14385	Polar	04/05/2002-
MODIS	NASA (USA)	TERRA (EOS-AM1)	2330	250/500/1000	1	36	405 - 14385	Polar	18/12/1999-
MMRS	CONAE (Argentina)	SAC-C	360	175	9	5	480 - 1700	Polar	18/12/1999-
MERIS	ESA (Europa)	ENVISAT	1150	300/1200	3	15	412 - 1050	Polar	01/03/2002-09/05/2012
OLCI	ESA (EUMETSAT)	Sentinel 3A	1270	300/1200	4 dias	21	400 - 1020	Polar	16/02/2016-
OLCI	ESA (EUMETSAT)	Sentinel 3B	1270	300/1200	4 dias	21	400 - 1020	Polar	25/04/2018-

**Fonte** <https://ioccg.org/resources/missions-instruments/historical-ocean-colour-sensors/> e <https://ioccg.org/resources/missions-instruments/current-ocean-colour-sensors/>.

de águas de subsuperfície, podem induzir a um aumento considerável da biomassa primária nessas regiões oceânicas passíveis de serem detectados por sensores em órbita da Terra. Este é o caso da divergência equatorial observada nos três oceanos, cujos efeitos positivos na geração de biomassa primária promovem alterações na coloração da água do mar que, por sua vez, é utilizada para estimar a concentração de clorofila. É desta forma que se torna possível o estudo da dinâmica desse e de outros fenômenos de ressurgência e da produtividade dos oceanos através do sensoriamento remoto.

No que se refere à água do Tipo 2, típica de zonas costeiras, suas propriedades ópticas são mais afetadas por outros tipos de matéria ou substância. Nestas condições, a cor da água do mar é mais influenciada pela presença de matéria mineral e orgânica dissolvida, cujas ações preponderantes sobre a absorção e difusão dos raios solares que penetram a coluna d'água, "mascaram" os efeitos

óticos da presença do fitoplâncton. Como resultado dessas características da água do Tipo 2, é a matéria em suspensão que poderá ser quantificada nas regiões costeiras.

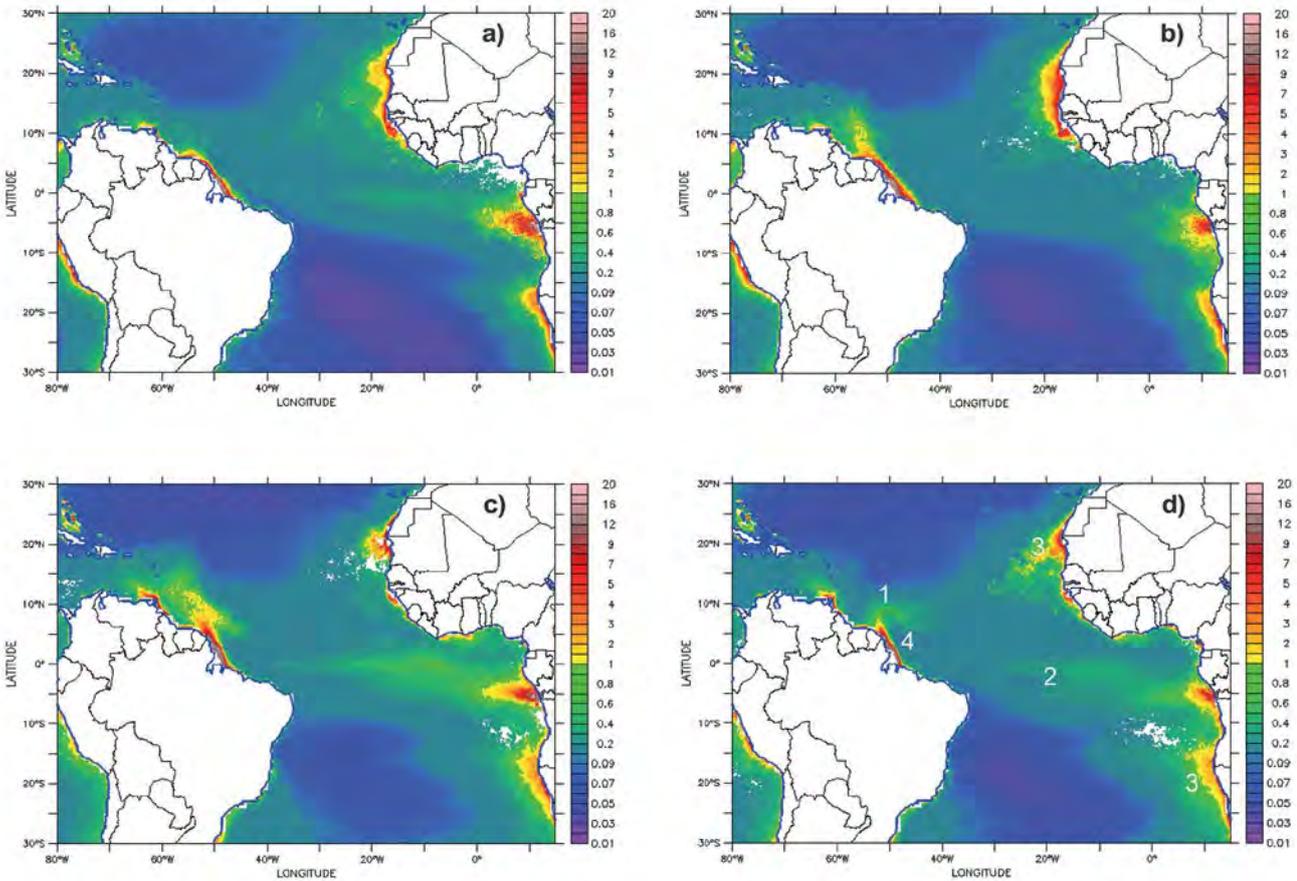
Os algoritmos utilizados para estimar a concentração de clorofila (C) ou abundância de biomassa fitoplanctônica, normalmente se baseiam em razão de bandas espectrais dos diferentes sensores e possuem a seguinte forma (Eq. 8):

$$C = a \left( \frac{R_{\lambda_1}}{R_{\lambda_2}} \right)^b \quad (\text{Eq. 8})$$

onde a e b são constantes derivadas empiricamente e  $R_{\lambda_1}$  e  $R_{\lambda_2}$  são as reflectâncias (radiância emergindo da água do mar em direção ao sensor, normalizada pela irradiância solar na superfície oceânica) em comprimentos de ondas específicos registrados pelo sensor de cor do oceano. Em Jensen (2011) pode-se encontrar, no capítulo referente ao "Sensoriamento Remoto da Água", uma tabela com algoritmos

operacionais utilizados para estimar a cor dos oceanos a partir dos sensores: OCTSc (*Ocean Color and Temperature Scanner*), SeaWiFS, MODIS, MERIS e GLI (*Global Imager*).

A seguir, apresentamos algumas imagens (Fig. 6.16) de médias sazonais (setembro de 1997 e dezembro de 2004) de concentração de clorofila-*a*, geradas a partir do sensor SeaWiFS para a área compreendida entre as latitudes 30°N- 30°S e longitudes 80°W- 15°E.



**Figura 6.16** Imagens de médias sazonais da concentração de clorofila-*a* para os meses: **A)** janeiro a março; **B)** abril a junho, **C)** julho a setembro e **D)** outubro a dezembro. Essas imagens foram obtidas a partir da composição dos dados coletados pelo sensor SeaWiFS, no período compreendido entre setembro de 1997 e dezembro de 2004. A escala de cores representa a concentração de clorofila-*a* em  $\text{mg m}^{-3}$ . **Fonte** Ferreira, 2005.

Nestas imagens, é possível observar alguns fenômenos oceanográficos através da concentração de clorofila-*a*, dentre os quais se destacam a retroflexão da Corrente Norte do Brasil (destaque para a imagem d-1), a divergência equatorial (destaque para a imagem d-2), e as ressurgências costeiras na costa africana (destaque para a imagem d-3). Vale ressaltar que na foz do Rio Amazonas (imagem d-4) a mancha vermelha não indica área

com maior concentração de clorofila e sim, neste caso, de sedimentos carregados pelo rio e dispersos na sua pluma.

## 5.2. Sensores infravermelhos termais

A Temperatura da Superfície do Mar (TSM) pode ser obtida com acurácia de aproximadamente 0,5°C a partir de sensores infravermelhos termais

(radiômetros) a bordo de satélites. Esses sensores operam em bandas espectrais com comprimentos de onda entre 8 e 15  $\mu\text{m}$ . Os dados coletados têm permitido o monitoramento desse importante parâmetro oceanográfico e climático em escala global e regional, numa base diária, semanal, mensal e de longo prazo, através de séries temporais desde a década de 1970. Mas como é possível estimar a TSM a partir do espaço?

Para estimar a TSM a partir de dados de radiometria coletados a bordo de satélites de órbita polar ou geoestacionária, é importante levar em consideração que o oceano emite energia em função de sua temperatura e que entre a superfície do oceano e o radiômetro a bordo do satélite existe a atmosfera terrestre. Portanto, é necessário entender os processos pelo qual a radiação eletromagnética é emitida e refletida pela superfície do mar, e como ela é emitida e atenuada pela atmosfera sendo necessário realizar correção atmosférica.

Através da Lei de Planck (Eq. 4), podemos conhecer a distribuição espectral da radiação emitida pela superfície do mar e convertê-la em temperatura de brilho ( $T_b$ ), dada em Kelvin (K). Segundo Njoku e Brown (1993), como a forma da função de Planck é bem conhecida, a TSM pode ser estimada a partir da temperatura de brilho se a emissividade  $\epsilon(\lambda, \theta)$  (Eq. 6) da superfície do mar for medida ou modulada com suficiente acurácia, onde  $\lambda$  é o comprimento de onda da radiação emitida e  $\theta$  é o ângulo de emissão da radiação em relação à normal da superfície. Segundo Minnett et al. (2019) e Hanafin e Minnett, (2005), a emissividade da água do mar nos comprimentos de onda do infravermelho, onde a TSM é medida, é alta ( $\epsilon \sim 0,985$  para  $\lambda = 10 \mu\text{m}$ ,  $\theta = 40^\circ$  e  $\epsilon \sim 0,970$  para  $\theta = 55^\circ$ ), o que torna a Lei de Planck muito útil para converter os dados radiométricos em TSM.

Supondo que a superfície terrestre tenha uma temperatura aproximada de 300 K, aplicando a Lei do Deslocamento de Wien (Eq. 7), verificamos que o comprimento de onda de máxima emissão da Terra se encontra na região do infravermelho termal

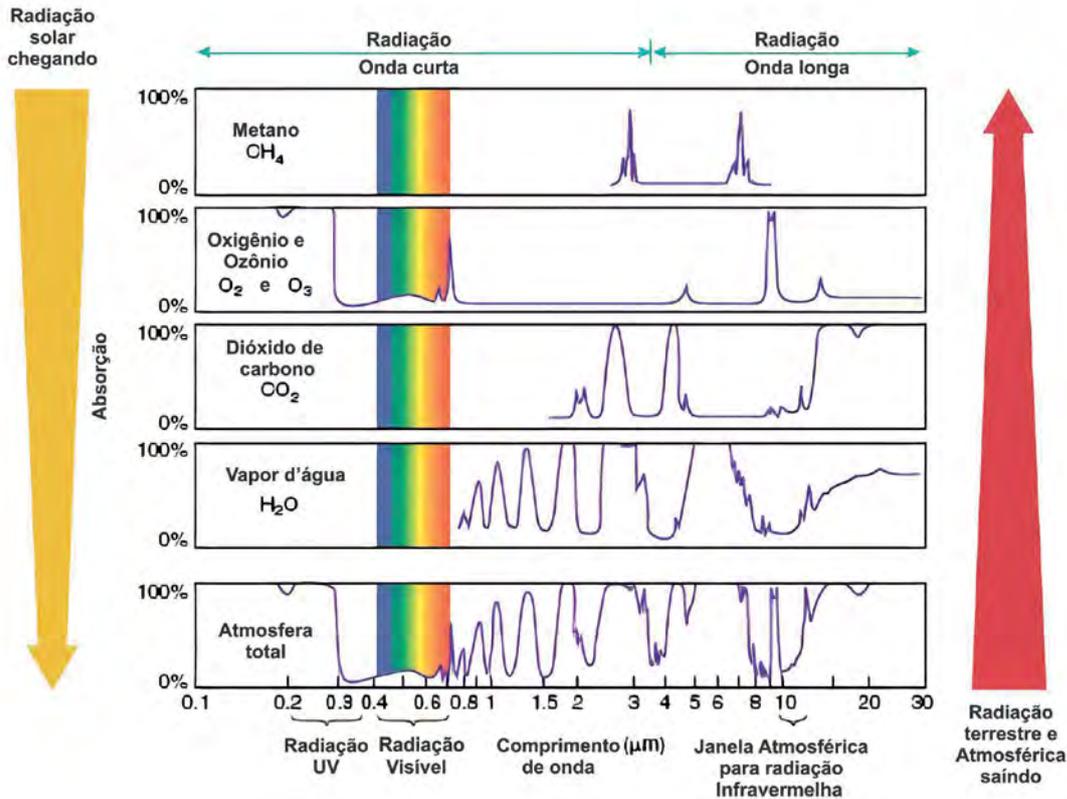
( $\lambda_{\text{max}} = 9,7 \mu\text{m}$ ). Normalmente a TSM é medida no intervalo de comprimentos de onda entre 10,3 e 11,3  $\mu\text{m}$  e 11,5 e 12,5  $\mu\text{m}$ , que correspondem aos canais 4 e 5 respectivamente, do satélite NOAA-18/AVHRR-3. Já o sensor MODIS, a bordo dos satélites AQUA e TERRA, estimam a TSM utilizando os canais espectrais 31 (10,780 e 11,280  $\mu\text{m}$ ) e 32 (11,770 e 12,27  $\mu\text{m}$ ).

Estes comprimentos de onda encontram-se no que chamamos de janelas atmosféricas (Fig. 6.17), que são regiões do espectro eletromagnético onde a absorção da radiação, pelos constituintes atmosféricos é muito pequena, ou seja, a atmosfera é praticamente transparente à radiação eletromagnética.

Segundo Lorenzetti (2015), para estimar a TSM utilizando dados de satélites é necessário sempre realizar uma correção atmosférica, devido ao fato de que a radiância medida pelo sensor não é igual à radiância emitida pela superfície do mar, devido aos processos de interação dessa radiância ao longo do caminho óptico entre a superfície do mar e o sensor. Em sua trajetória da superfície até o radiômetro, pode haver atenuação da radiância emitida pela superfície do mar devido à presença de gases absorvedores como, por exemplo, o vapor d'água e o dióxido de carbono. Os aerossóis presentes na atmosfera também atenuam a radiação de uma maneira importante, através do espalhamento (Fig. 6.17).

Mas como se faz a correção atmosférica?

As primeiras metodologias utilizadas para a correção da atenuação atmosférica nos canais do infravermelho termal para estimar a TSM baseavam-se no algoritmo proposto por McClain et al. (1985), denominado MCSST (*Multi-Channel Sea Surface Temperature*), aplicado ao sensor AVHRR/NOAA. Este algoritmo utilizava um método estatístico de comparação da temperatura de brilho medida pelos radiômetros embarcados em satélites com medidas *in situ* da TSM, obtidas a partir de boias oceanográficas na profundidade média de 1 m, feitas simultaneamente às passagens dos satélites. O algoritmo MCSST tem a seguinte forma:



**Figura 6.17** Absorção atmosférica da radiação de onda curta que chega (esquerda) e de onda longa que sai (direita). Absorção atmosférica total indicada pela linha inferior **Fonte** <https://cimss.ssec.wisc.edu/sage/meteorology/lesson1/AtmAbsorbtion.htm>. **Acesso** 20/11/2020.

$$TSM = a_0 T_i + a_1 (T_i - T_j) + a_2 \quad (\text{Eq.9})$$

onde,  $T_i$  e  $T_j$  são as temperaturas de brilho medidas em dois canais espectrais diferentes ( $i$  e  $j$ ) e os parâmetros  $a_0$ ,  $a_1$  e  $a_2$ , são coeficientes de correlação entre as temperaturas de brilho e a TSM das boias que são atualizados periodicamente. A medida da temperatura de brilho assume que a atmosfera é transparente à radiação eletromagnética e que a superfície do mar se comporta como um corpo negro. A partir do MCSST, apresentamos alguns algoritmos mais novos utilizados para estimar a TSM a partir de imagens de satélites (adaptados de Minnet, et al., 2019):

$$TSM = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{11} - T_{12}) T_{sup} + a_3 (\sec(\theta) - 1,0) (T_{11} - T_{12}) \quad (\text{Eq.10})$$

$$TSM_{\text{triplo}} = a_0 + a_1 T_{11} + a_2 (T_{3,7} - T_{12}) T_{sup} + a_3 (\sec(\theta) - 1,0) \quad (\text{Eq.11})$$

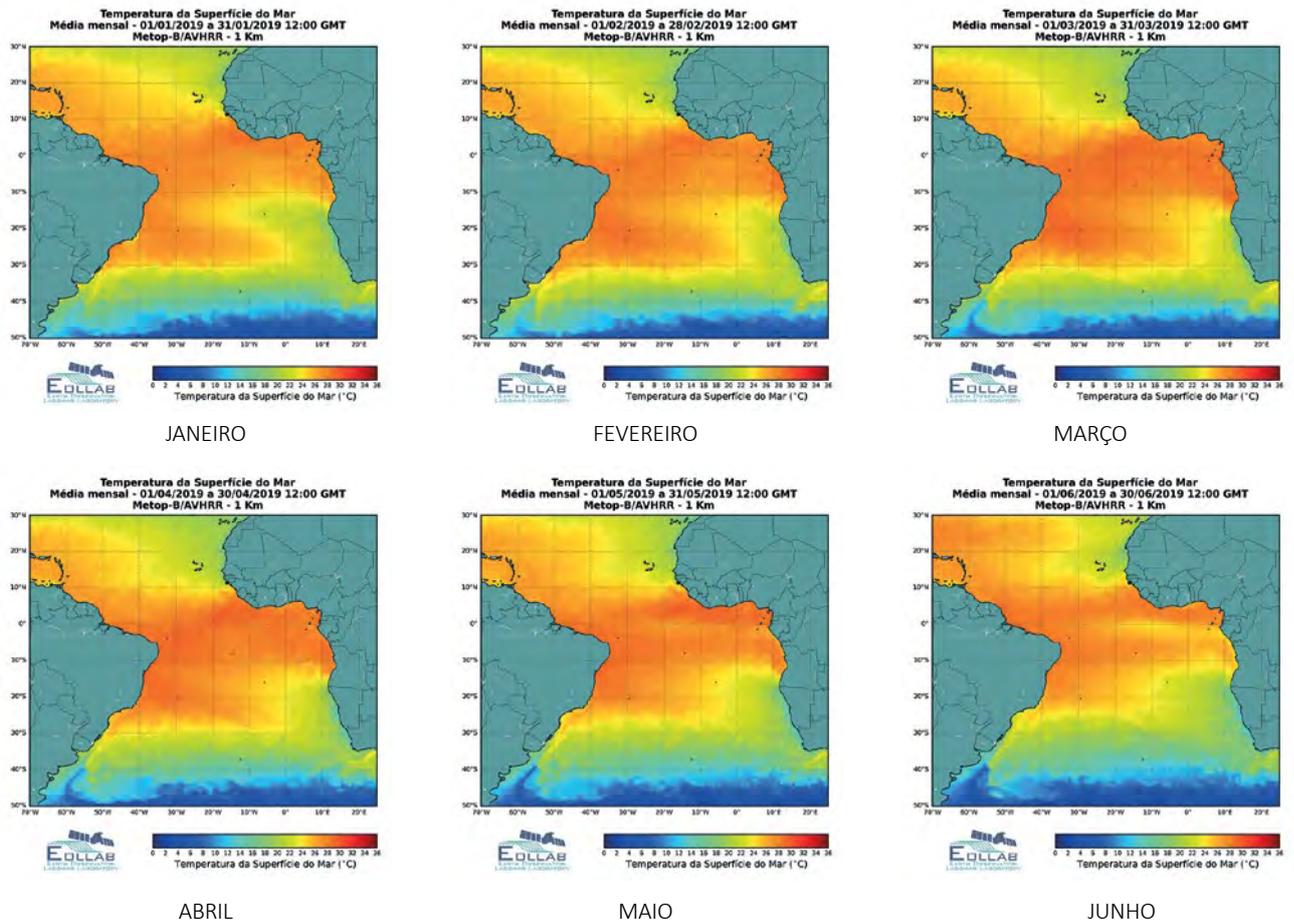
$$TSM_4 = a_0 + a_1 T_{3,95} + a_2 (T_{3,95} - T_{4,05}) T_{sup} + a_3 (\sec(\theta) - 1,0) \quad (\text{Eq.12})$$

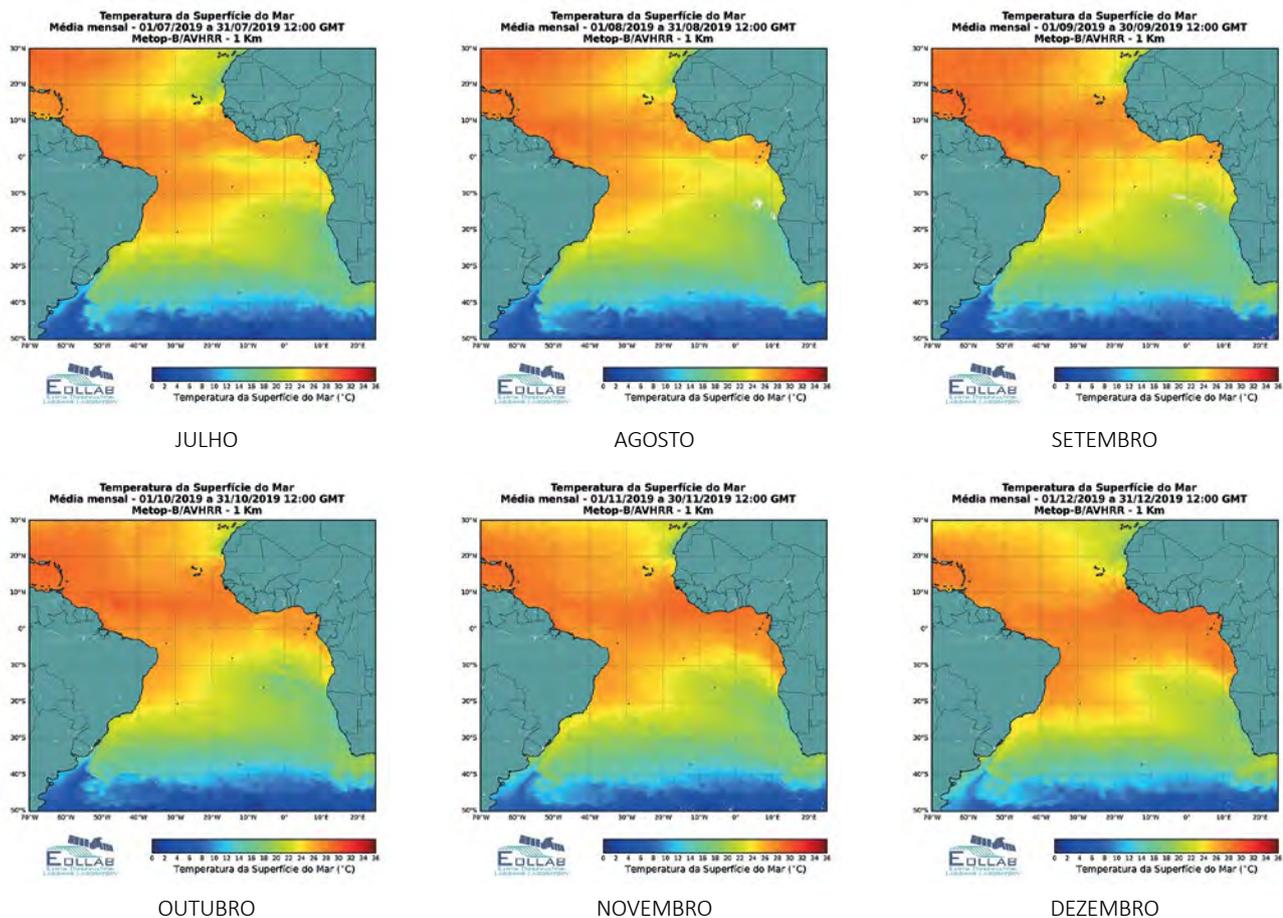
onde  $T_{11}$ ,  $T_{12}$ ,  $T_{3,7}$ ,  $T_{3,95}$  e  $T_{4,05}$  são temperaturas de brilho medidas nos canais espectrais de 11  $\mu\text{m}$ , 12  $\mu\text{m}$ , 3,7  $\mu\text{m}$ , 3,95  $\mu\text{m}$ , 4,05  $\mu\text{m}$ , respectivamente,  $T_{sup}$  é uma TSM inicial estimada (em inglês: *first guess*) e  $\theta$  é o ângulo zenital do satélite medido em relação à superfície. Esses novos algoritmos são denominados NLSST (*Non-Linear Sea Surface Temperature*). Os valores calculados para os coeficientes  $a_0$ ,  $a_1$ ,  $a_2$  e  $a_3$  levam em consideração o conteúdo de vapor d'água presentes na atmosfera, no momento da passagem do satélite.

A Eq. 10 é baseada na medida da temperatura de brilho obtida no topo da atmosfera, no intervalo de comprimentos de onda entre 10 e 12  $\mu\text{m}$ , onde a atmosfera é relativamente transmissiva (Fig.6.17), e pode ser utilizada para estimar a TSM diurna e noturna. As Eqs. 11 e 12 fornecem uma estimativa mais acurada da TSM para as órbitas noturnas dos satélites/sensores NOAA/VIIRS (*Visible Infrared Imaging Radiometer Suite*) e AQUA/MODIS respectivamente (Minetti et al., 2019).

A seguir, apresentamos alguns mapas de médias mensais da TSM sobre o oceano Atlântico estimados pelo satélite METOP-B, sensor AVHRR/3, para os meses de janeiro a dezembro do ano de 2019 (Fig. 6.18). Através dessa figura, verificamos que

as águas mais aquecidas se encontram, no período de janeiro a maio (verão/outono austral), entre aproximadamente 5°N e 10°S, acompanhando o movimento aparente do sol. A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), principal sistema atmosférico causador de chuvas na região Norte do Nordeste do Brasil (NEB), por estar associada às águas mais aquecidas, permanece em posições próximas à linha do equador, onde as condições dinâmicas e termodinâmicas sobre o Oceano Atlântico Intertropical estão favoráveis. O período chuvoso do NEB se estende de fevereiro a maio de cada ano. A partir de junho, essa massa de águas mais aquecidas começa a ser “empurrada” para o norte, em consequência da penetração de águas com temperaturas mais baixas na parte sudoeste da bacia Atlântica.





**Figura 6.18** Mapas mensais de TSM do ano de 2019 sobre o Oceano Atlântico entre as latitudes 30°N- 50°S e as longitudes 70°W- 20°E, geradas a partir do METOP-B/AVHRR-3, com resolução espacial de 1 km. Período: janeiro a dezembro de 2019.

Também notamos nos meses de junho a setembro, uma “língua” de águas relativamente mais frias ao longo do equador, do lado leste, que pode estar associada aos efeitos da divergência equatorial (ressurgência). A partir de outubro até dezembro as águas mais aquecidas voltam a envolver toda a costa norte/nordeste do Brasil.

### 5.3. Sensores de micro-ondas

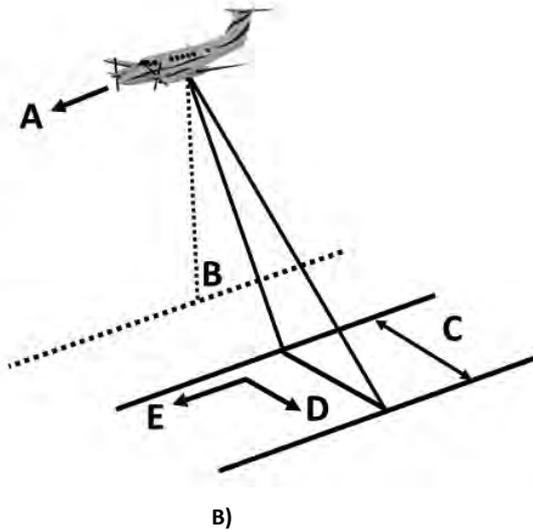
#### 5.3.1. Estimativa de vento

Os sensores remotos ativos de micro-ondas utilizados para medir a direção e velocidade dos ventos são chamados de escaterômetros, que significa sensor de espalhamento. A fim de estimar a velocidade do vento sobre os oceanos através

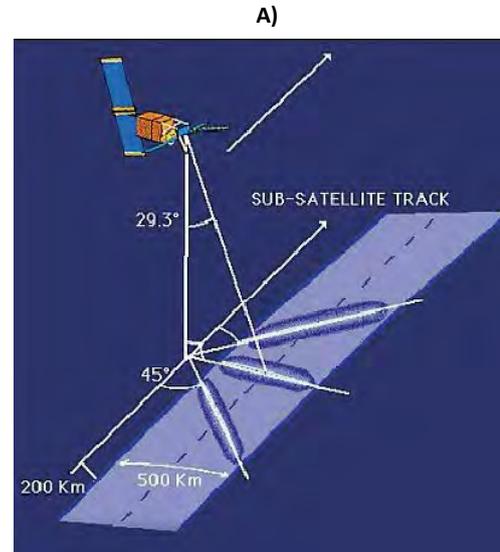
desses equipamentos, é necessário estimar o coeficiente de retroespalhamento ( $\sigma$ ). O escaterômetro de micro-ondas emite um sinal de radar com comprimento de onda  $\lambda$  em direção ao oceano, em um determinado ângulo oblíquo em relação à vertical. A radiação refletida de uma onda reforça ou cancela aquela das ondas sucessivas, dependendo do espaçamento das ondas e da geometria de visada do satélite. Uma parte deste sinal é espalhada pela superfície do mar, que sofre ondulações devido à ação dos ventos.

Para realizar essas medidas, o sensor a bordo do satélite ou avião viaja no sentido do voo (A) com o nadir (B) diretamente abaixo da plataforma. O feixe de micro-ondas é transmitido obliquamente em ângulos retos na direção do voo, “iluminando”

a faixa (C) que é afastada do nadir. A largura (D) se refere à dimensão sobre uma faixa perpendicular à direção do voo, enquanto o azimute (E) se refere à dimensão ao longo da trilha, paralela ao sentido do voo. Esse tipo de geometria de observação



(side-looking viewing “visada lateral”) é típica dos sistemas de sensores ativos orbitais (sistemas RADAR) que voam a bordo de aviões ou satélites (Figs. 6.19 A e 6.19 B).



**Figura 6.19** Geometria de imageamento dos sistemas radar: **A)** a bordo de avião e **B)** a bordo de satélites: as três antenas do escaterômetro do vento geram um feixe de radar 45° para frente, obliquamente, e 45° para trás, através de uma faixa de 500 km de largura, 200 km à direita da direção de deslocamento do satélite. **Fonte** <https://www.nrcan.gc.ca/maps-tools-publications/satellite-imagery-air-photos/remote-sensing-tutorials/microwave-remote-sensing/viewing-geometry-and-spatial-resolution/9341> e 6.23b): <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/e/ers-1>. **Acesso** 15/04/2020.

Segundo Polito e Sato (2004), uma fração do sinal emitido volta à antena do satélite e a este pequeno sinal dá-se o nome de “seção reta de espalhamento” ou simplesmente  $\sigma^0$ , que é a medida que o escaterômetro registra efetivamente, conforme equação Eq. 6.13, abaixo.

$$\sigma = \int_A \sigma^0 dA \Rightarrow \sigma = 4\pi A \cos\theta \left( \frac{I_s}{\Phi_i} \right) \text{ (m}^2\text{)} \text{ (Eq.13)}$$

onde A é a área observada pelo radar,  $\theta$  é o ângulo zenital entre a normal à superfície e a direção de visada do satélite,  $I_s$  é a intensidade radiante espalhada em direção à antena e é medida em  $W sr^{-1}$ , e  $\Phi_i$  é o fluxo radiante incidente sobre a superfície, medido em W.

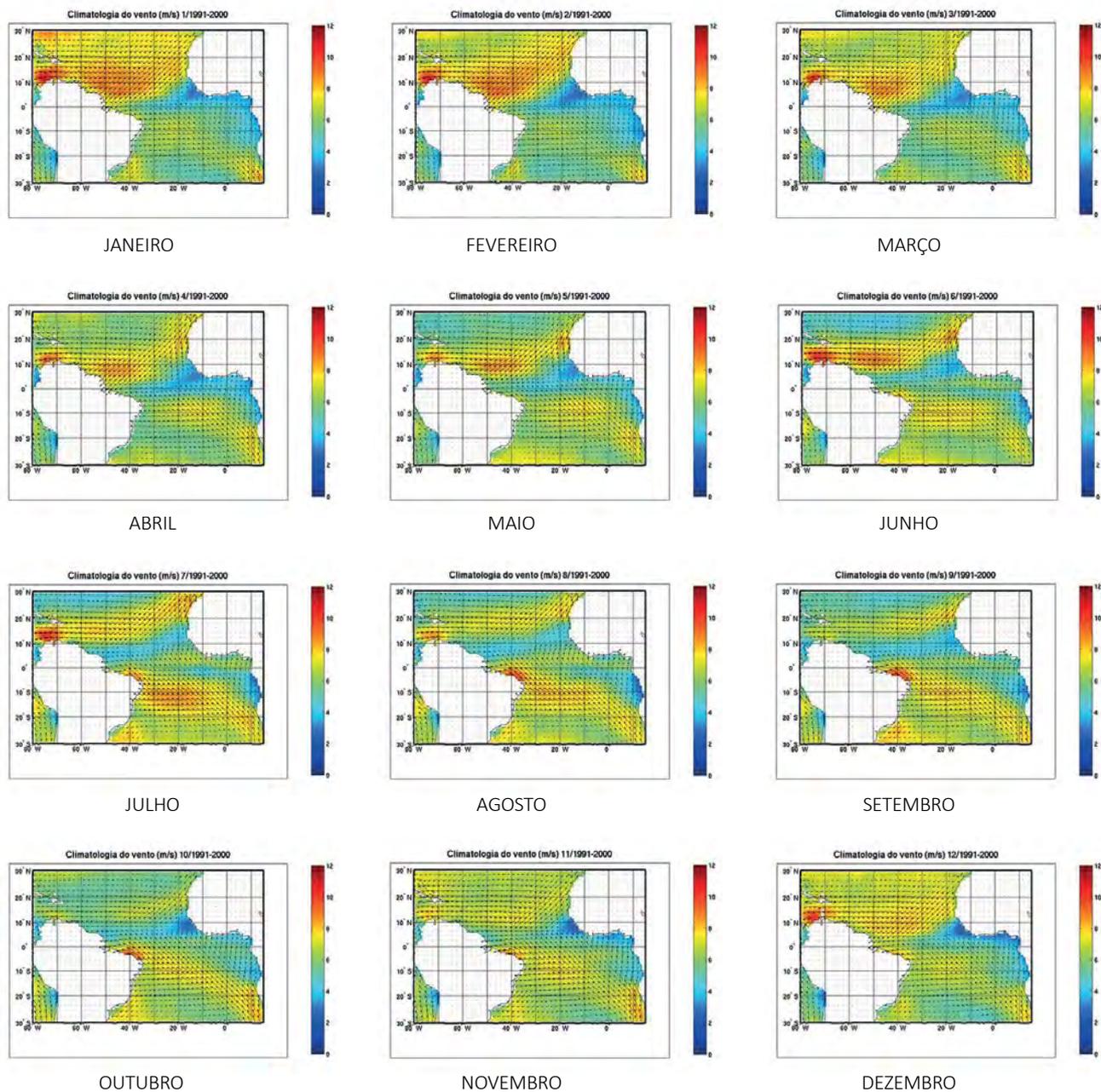
A função de transferência para o escaterômetro, que relaciona o coeficiente normalizado de

retroespalhamento e o vento à superfície, utilizados pela ESA (Banda C do ERS) e pela NASA (*Quikscat*), são denominados CMD04 (Stoffelen & Anderson, 1997) e QSCAT-1 (*SeaWinds User’s Manual*, 2003), respectivamente.

A figura 6.20 ilustra as médias históricas sazonais (1991 a 2000) do campo de ventos à superfície, nos meses de janeiro a dezembro, estimadas a partir dos dados dos satélites ERS1 e ERS2 (*European Remote-Sensing Satellite*). Observa-se claramente nessas figuras o giro do vento no sentido anti-horário no sul e horário no norte do Atlântico Intertropical. Esses giros estão associados à presença dos Centros de Alta Pressão Climatológicos Semipermanentes do Atlântico Norte (AAN) e do Atlântico Sul (AAS). Em ambos os hemisférios, verifica-se uma variação sazonal bem

característica. No sul, os trimestres junho-julho-agosto (JJA) e setembro-outubro-novembro (SON) apresentam as maiores intensidades na velocidade do vento, enquanto na outra metade do ano os ventos são mais fracos. O contrário ocorre

no Hemisfério Norte, sendo que os trimestres JJA e SON são os que apresentam as menores intensidades na velocidade do vento, sendo eles mais intensos nos trimestres dezembro-janeiro-fevereiro (DJF) e março-abril-maio (MAM).



**Figura 6.20** Dados mensais da direção e velocidade dos ventos, gerados a partir dos dados dos radares a bordo dos satélites ERS1 (*European Remote-Sensing Satellite*) e ERS 2, para o período compreendido entre março de 1992 e janeiro de 2001 (03/1992 a 12/1996 para o ERS1 e 03/1996 a 01/2001 para o ERS2). Foram Processadas 108 imagens com resolução espacial de 111 km x 111 km. A escala de cores indica a velocidade do vento em  $m s^{-1}$ .

Com base na figura 6.20, verifica-se que a confluência dos ventos alísios de sudeste com os de nordeste ocorre em torno da faixa equatorial, originando a formação de convergência de massa à superfície, com ascensão associada de ar, dando origem à chamada Zona de Convergência Intertropical (ZCIT).

#### 5.4. Radar de Abertura Sintética

O Radar de Abertura Sintética (SAR – do inglês: *Synthetic Aperture Radar*), que voa a bordo de satélites, é um sensor que produz imagens de micro-ondas com alta resolução espacial através da emissão e recepção de um feixe de radiação eletromagnética centrado na banda das micro-ondas do espectro eletromagnético. Segundo Novo (2010), o SAR é uma forma engenhosa de contornar o problema do tamanho físico da antena do RADAR a partir da ‘síntese’ de uma antena virtual pelo registro acumulado dos sinais de retorno de cada objeto pela antena, durante o período em que ela se desloca sobre uma região da superfície terrestre. Nos itens que se segue serão apresentados produtos gerados a partir de SAR.

## 6. OUTRAS APLICAÇÕES SENSORIAMENTO REMOTO NA OCEANOGRAFIA E NA PESCA

Além dos parâmetros oceanográficos acima mencionados, como a temperatura da superfície do mar, a concentração de clorofila e o vento, o sensoriamento remoto pode ser usado como ferramenta para obtenção de outras variáveis e em apoio a estudos e pesquisas sobre diversos temas, tanto em zonas oceânicas quanto costeiras. Assim, do ponto de vista da aplicação dessa tecnologia, podemos dividi-la em duas vertentes: a aplicação na oceanografia e a aplicação na pesca.

### 6.1. Aplicação na oceanografia

#### 6.1.1. Salinidade

Outros parâmetros oceanográficos são passíveis de serem obtidos através de sensores remotos a bordo de satélites em órbita da Terra. Um exemplo relativamente recente é a salinidade, parâmetro de elevada importância como indicador da relação precipitação-evaporação na superfície dos oceanos, do aporte de água doce nas desembocaduras de rios, do derretimento-congelamento da água nas calotas polares e da circulação através de sua influência na densidade das massas d’água, fornecendo informações sobre as suas propriedades químicas (Dinnat & Yin, 2019).

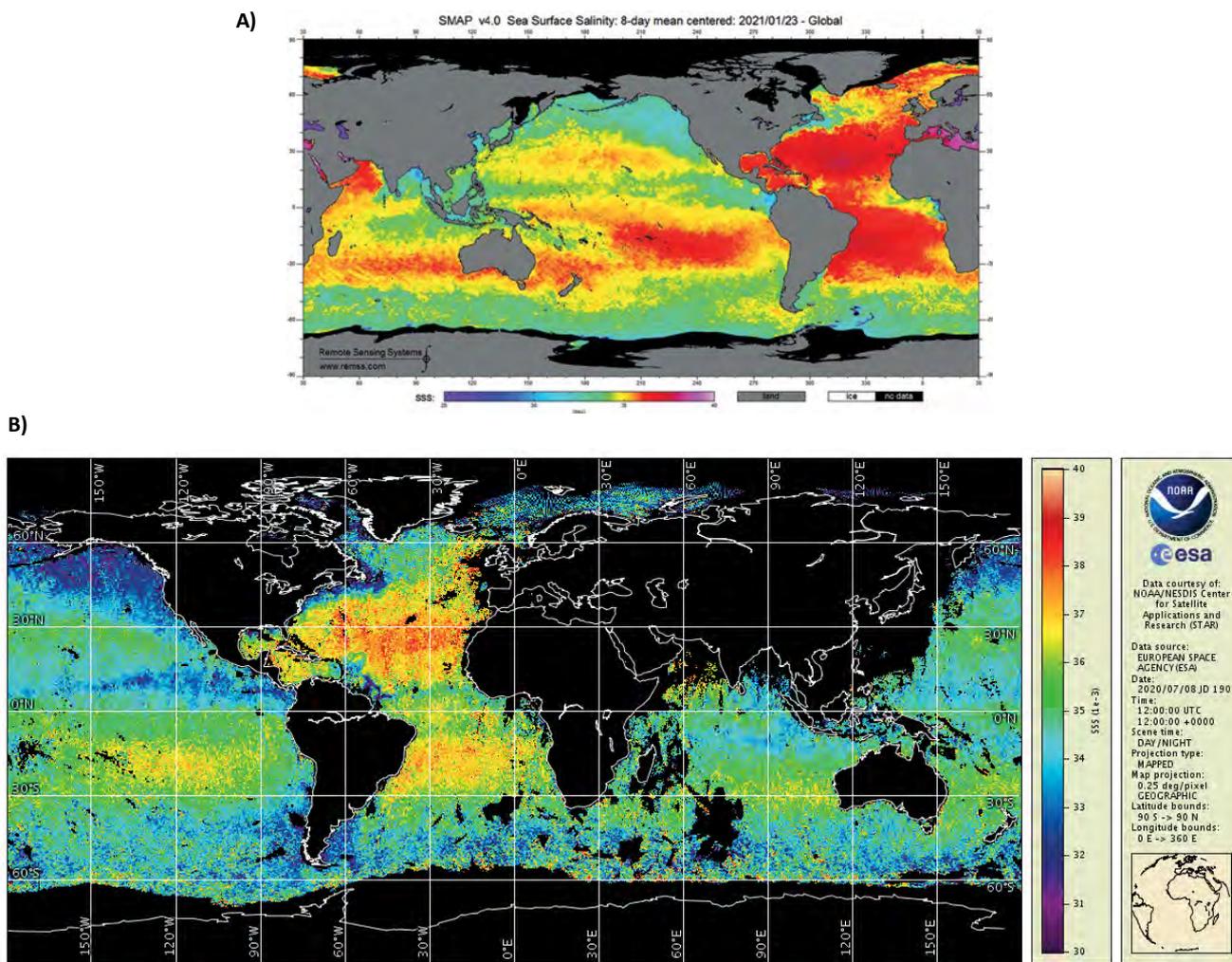
Em decorrência desse relevante papel como parâmetro oceanográfico e com o objetivo de preencher as enormes lacunas espaço-temporais das coletas da salinidade *in situ*, a Agência Espacial Europeia (ESA) desenvolveu o SMOS (*Soil Moisture and Ocean Salinity*), satélite lançado em novembro de 2009 tendo a bordo o radiômetro interferométrico de micro-ondas MIRAS (*Microwave Imaging Radiometer with Aperture Synthesis*), operando na frequência de 1,4 GHz. Este foi o primeiro satélite construído e lançado para obtenção de dados da salinidade da superfície do mar, gerando informações desde 2010 (Font et al., 2010).

Outros sensores e satélites foram desenvolvidos e lançados em seguida, como o sensor Aquarius, definido como uma combinação de radar e radiômetro de banda L, instalado no satélite SAC-D. Essa missão foi lançada em junho de 2011 (encerrada em 2015) como resultado da cooperação entre a Agência Espacial e Aeronáutica Nacional (NASA) dos Estados Unidos que forneceu o sensor Aquarius, e a agência espacial argentina, *Comisión Nacional de Actividades Espaciales* (CONAE), que forneceu o satélite (*Satelite de Aplicaciones Cientificas - SAC-D*) (Le Vine et al., 2018). Com a experiência adquirida, a NASA lançou poucos anos depois, no final de janeiro de 2015, o satélite *Soil*

*Moisture Active Passive* (SMAP), equipado com um radar ativo e um radiômetro passivo operando na banda L. O primeiro deixou de funcionar já em julho desse mesmo ano, mas o radiômetro passivo, capaz de obter informações sobre a salinidade da superfície do mar, continua operando até hoje (Fig. 6.21) (Vinogradova et al., 2019).

A base do funcionamento desses sensores é a relação entre a condutividade da água do mar e a sua salinidade. Esse processo para estimar a salinidade por satélite é bastante complexo e envolve muitas variáveis, incluindo a rugosidade da

superfície oceânica. Para isso, todos estes sensores mencionados acima partiram do princípio da medição da radiação emitida pelos oceanos na faixa de micro-ondas, mais especificamente na banda L (1,4 GHz), registrando a temperatura de brilho da água do mar ( $T_b$ ) em polarizações horizontal e vertical (TH e TV) e a rugosidade. Embora a SSM não seja função linear da  $T_b$ , esta está relacionada à salinidade e à TSM através da equação  $T_b = e \times TSM$ , onde  $e$  é a emissividade da superfície do mar, a qual, por sua vez, é função de SSM e TSM (Klemas, 2011; Vinogradova et al., 2019).



**Figura 6.21** Imagens globais da salinidade da superfície do mar. **A)** média de 8 dias centrada em 07/10/2020 gerada pelo satélite *Soil Moisture Active Passive* (SMAP), da NASA. **Fonte** [http://images.remss.com/smap/smap\\_data\\_8day.html](http://images.remss.com/smap/smap_data_8day.html), **B)** imagem média de 3 dias centrada em 23/07/2020 gerada pelo satélite *SMOS-Soil Moisture and Ocean Salinity*. **Fonte** [https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/sss/4sqm/metrics/L2/mapimages/SM/SM\\_D2020205\\_Map\\_SATSSS\\_data\\_3days.png](https://www.star.nesdis.noaa.gov/socd/sss/4sqm/metrics/L2/mapimages/SM/SM_D2020205_Map_SATSSS_data_3days.png).

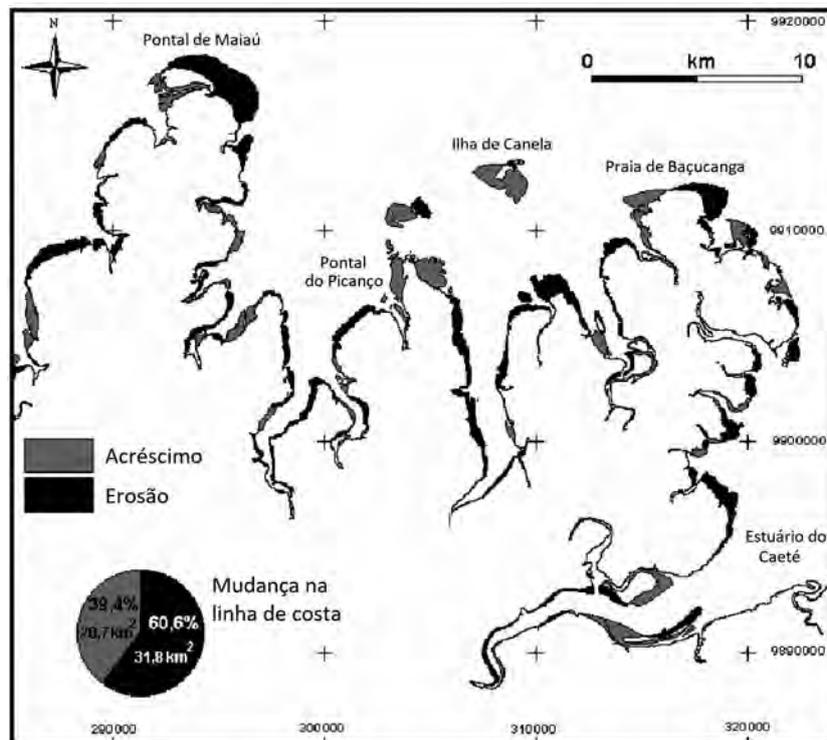
### 6.1.2. Zonas costeiras

Além da geração direta de informações espaço-temporais dos parâmetros aqui discutidos, o SR é amplamente empregado em estudos de zonas costeiras (Klemas, 2011), auxiliando na avaliação da dinâmica de processos erosivos e dispersão de sedimentos nas plumas de rios, em estimativas da superfície de manguezais, em levantamentos de bancos de corais e algas (mesmo submersos), estudos de poluição por derrames de petróleo no mar, entre outras aplicações.

#### 6.1.2.1. Erosão

Um exemplo do uso do SR para melhor entender processos erosivos e de cobertura do solo em zonas costeiras é o trabalho realizado por Souza-Filho e Paradella (2003) no litoral de Bragança, estado do

Pará. Usando imagens do radar aerotransportado GEMS-1000 (banda X, polarização HH, ano 1972) e do radar de abertura sintética (SAR) do RADARSAT-1 (banda C, polarização HH, ano 1998), esses autores observaram variações importantes na linha de costa ocorridas ao longo desse período, em decorrência da elevada dinâmica de processos de erosão e deposição de sedimentos, resultando em uma perda de aproximadamente 12 km<sup>2</sup> na superfície do manguezal, decorrente do balanço entre a erosão de 32 km<sup>2</sup> e a adição de 20 km<sup>2</sup> (Fig. 6.22). Vários trabalhos com este objetivo têm sido realizados, incluindo não apenas o uso de imagens radar, importantes em zonas tropicais pela sua capacidade de geração de imagens noturnas e sob nuvens, mas também de sensores óticos convencionais, que operam no espectro visível (Amaro et al., 2014; Toure et al., 2019; Pradhan et al., 2019; Li et al., 2020).

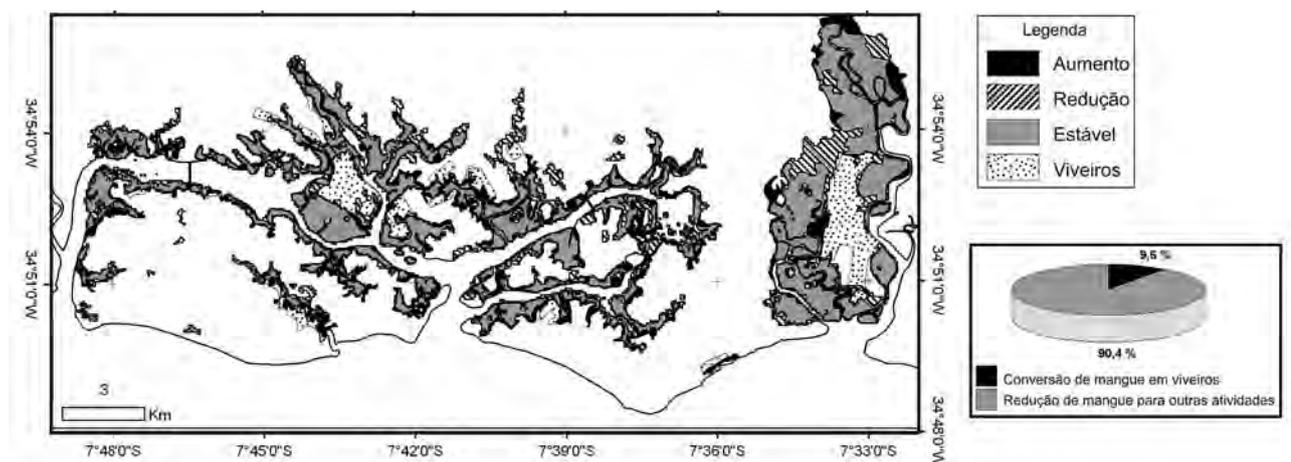


**Figura 6.22** Mudanças ocorridas na região litorânea de Bragança-PA mostrando os trechos onde ocorreram processos de erosão e acréscimo de linha de costa usando uma imagem do RADARSAT-1 de 1998 comparada a uma imagem Radar (GEMS 1000 SAR) aerotransportado de 1972. **Fonte** Souza-Filho e Paradella (2003).

### 6.1.2.2. Mangue

No que se refere aos estudos do ecossistema manguezal, há também uma grande quantidade de trabalhos desenvolvidos com o uso do sensoriamento remoto. Com o objetivo de avaliar os impactos da carcinicultura na redução das áreas de manguezais no litoral norte de Pernambuco, Guimarães et al. (2010) realizaram estudo com base em imagens dos satélites/sensores LANDSAT-1/MSS, LANDSAT-5/TM, LANDSAT-7/ETM1 e CBERS-2/CCD no período de 1973 a 2005. Os resultados obtidos mostraram uma redução de cerca de 2.052 ha de mangue, dos quais 197 ha foram convertidos em viveiros para cultivo de camarão, correspondendo a apenas 9,6% da área total (Fig. 6.23). Os autores identificaram que outras atividades antropogênicas tiveram papel bem mais importantes na redução da superfície de manguezal neste litoral, tais como a agricultura, a expansão urbana e o turismo. Outro resultado interessante

obtido neste trabalho foi que, embora se tenha observado um decréscimo na superfície de mangue para a totalidade do período estudado, o período 1988-1999 foi caracterizado pelo aumento de 621 ha de áreas de mangue. Este fato foi atribuído aos longos períodos de seca e represamento dos rios da região, os quais, em sinergia com o aumento do nível do mar, contribuíram para uma maior penetração de água salgada, gerando condições ambientais favoráveis à expansão do manguezal em zonas mais internas dos estuários. Outros trabalhos sobre o tema foram realizados aqui no Brasil (Tupinambá et al., 2006; Queiroz et al., 2013; Santos & Bitencourt, 2016; Diniz et al., 2019) e no exterior (Berlanga-Robles et al., 2011; Shapiro et al., 2015; Jayanthi et al., 2018; Wang et al., 2019), mostrando que o sensoriamento remoto é uma ferramenta de grande utilidade neste tipo de análise, tanto a partir da utilização de sensores óticos como de radar.



**Figura 6.23** Análise espaço-temporal da conversão de áreas de mangue em viveiros de aquicultura no litoral norte de Pernambuco no período de 1975-2005 através do sensoriamento remoto. **Fonte** Guimarães et al. (2010).

### 6.1.2.3. Bancos de algas e corais

Estudos para mapear o fundo do mar em zonas costeiras com uso do sensoriamento remoto também vem sendo realizados no mundo todo, principalmente com o objetivo de se determinar os padrões espaciais na distribuição de bancos de algas e recifes. Entretanto, é importante salientar que as condições ambientais no momento da captação da imagem são fatores limitantes para

esse tipo de aplicação do sensoriamento remoto, principalmente no que se refere à transparência da água, à rugosidade da superfície do mar e à profundidade (Hedley et al., 2016). No Nordeste do Brasil, cujo extenso litoral é caracterizado pela presença desses representantes da flora e fauna marinhas, trabalhos têm sido realizados nos últimos anos, demonstrando a eficiência e aplicabilidade

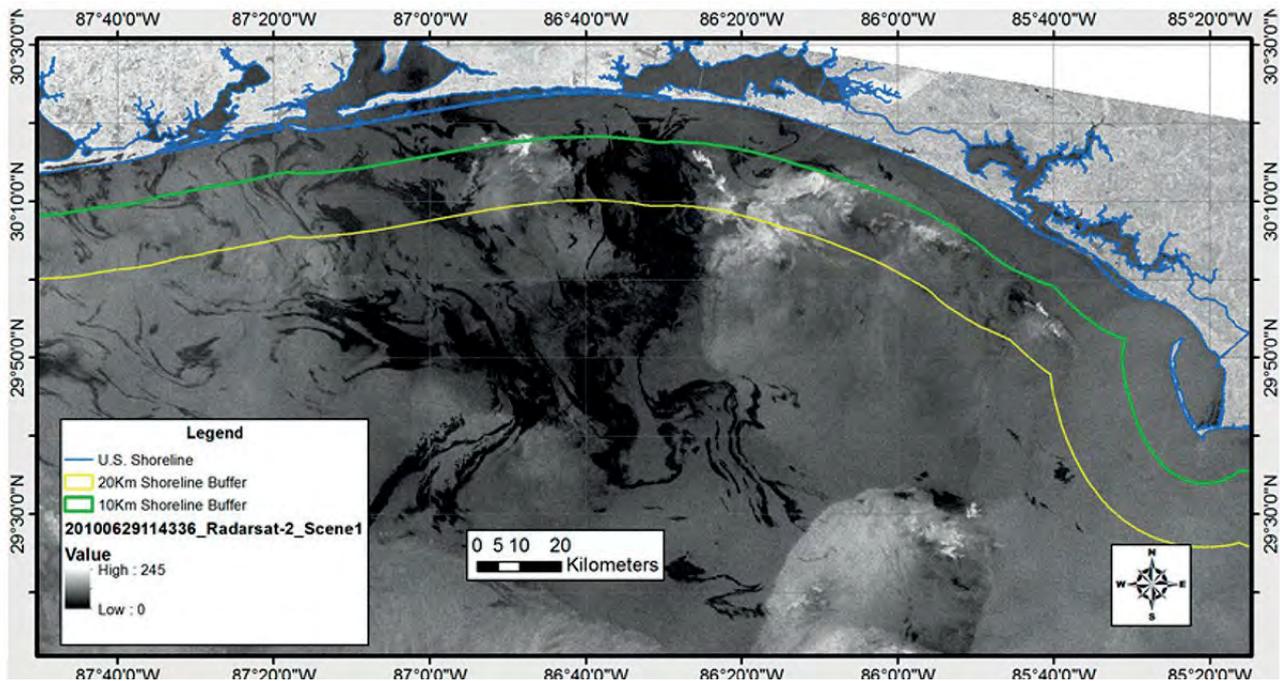
desta ferramenta neste tipo de levantamento. Um exemplo disso foi o mapeamento de macroalgas e fanerógamas marinhas realizado por Silva et al. (2017) nos recifes de Maracajaú e Rio do Fogo, no Rio Grande do Norte, na Área de Proteção Ambiental dos Recifes de Corais (APARC). Os autores utilizaram imagens do radiômetro *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer Type 2 (AVNIR-2)*, do satélite *Advanced Land Observing Satellite (ALOS)*, associadas a dados obtidos *in situ*, como fotografias submarinas e amostras de algas para identificação em laboratório. Com os resultados obtidos foi possível gerar mapas temáticos dos dois recifes estudados, com sete classes para o de Maracajaú (1- Algas densas, 2- Areia, 3- Fanerógamas esparsas, 4- Fanerógamas densas, 5- Algas calcáreas, 6- Algas esparsas e 7- Areia fina) e seis classes para o de Rio do Fogo (1- Macroalgas, 2- Concreções de algas calcáreas, 3- Areias, 4- Areia com mistura calcárea, 5- Fanerógamas, e 6- recifes de corais). Trabalho similar foi realizado por León-Pérez et al (2019) na Reserva Natural da Ilha da Acixa dos Mortos, em Porto Rico, utilizando imagem de alta resolução do *WorldView-2 (WV-2)* associada com dados de campo. Em mapeamento de habitats coralíneos na Grande Barreira de Corais (GBR) da Austrália, Roelfsema et al. (2018) combinaram dados de reflexão de fundo derivados de imagens do sensor *OLI – Operational Land Imager*, instalado a bordo do satélite *Landsat 8*, com informações da composição bentônica obtidos *in situ*, entre outros dados. De acordo com os autores, o método apresentou potencial para ser aplicado em toda a extensão dos recifes pouco profundos *offshore* da GBR, gerando resultados bastante satisfatórios com o mapeamento de corais em vasta área de recifes (~2.500 km<sup>2</sup>), dos quais 245 km<sup>2</sup> cobertos por recifes de coral pouco profundos.

#### 6.1.2.4. Derramamento de óleo

O sensoriamento remoto tem desempenhado também um importante papel na detecção de poluição por derrame de petróleo no mar, geralmente provocado por acidentes com navios-tanque ou plataformas de extração, ou até mesmo

de forma deliberada. Essa utilização tem permitido, além da simples detecção da mancha de óleo na superfície do mar, estimar seu tamanho e acompanhar seu deslocamento pela ação de ventos de correntes, permitindo a tomada de decisões a tempo de minimizar os efeitos negativos ao ambiente provocados por esse tipo de acidente, principalmente nas zonas costeiras. Embora sensores óticos passivos possam ser utilizados neste tipo de aplicação, suas limitações em relação às condições meteorológicas (nuvens) e à impossibilidade de geração de imagens noturnas fazem com que os sensores ativos de micro-ondas sejam os mais comumente empregados (Fingas & Brown, 2018). De qualquer forma, os dois tipos foram amplamente usados e testados durante o acidente com a plataforma de petróleo *Deepwater Horizon*, que explodiu em 20 de abril de 2010, no Golfo do México. Operada pela *British Petroleum*, este é considerado ainda hoje como o maior desastre ambiental marinho da indústria petrolífera, com uma estimativa de vazamento de cerca de 4,9 milhões de barris (equivalente a 780.000 m<sup>3</sup>) durante os 87 dias que se seguiram ao desastre (US National Report, 2011).

Para avaliar a presença e dispersão de óleo na zona costeira durante o derrame de petróleo da *Deepwater Horizon (DWH)*, Garcia-Pineda et al. (2017) analisaram 715 imagens radar de abertura sintética (SAR) recolhidas durante o evento, geradas pelos satélites *RADARSAT-1*, *RADARSAT-2*, *Envisat*, *ERS-2* na Banda C, *Terra SAR-X* e *COSMO-SkyMed 1-2-3-4* na Banda X, e *ALOS-1* na Banda L. Desse total, 188 mostraram claros registros de óleo, muitos dos quais (156 imagens) em áreas a 10 km da linha de costa entre a Louisiana ocidental e a Florida ocidental, incluindo manchas perto de praias, pântanos e ilhas (Fig. 6.24). Os autores concluíram que as manchas de petróleo detectadas nas imagens durante o evento contribuíram para avaliar seu potencial impacto na zona costeira, principalmente em áreas de acesso difícil em casos como o da DWH, de grande amplitude espaço-temporal.



**Figura 6.24** Imagem radar do COSMOSky-Med-1 do dia 05/07/2010 mostrando manchas de óleo na costa da Louisiana ocidental. **Fonte** Garcia-Pineda et al. (2017).

## 6.2. Aplicação na pesca

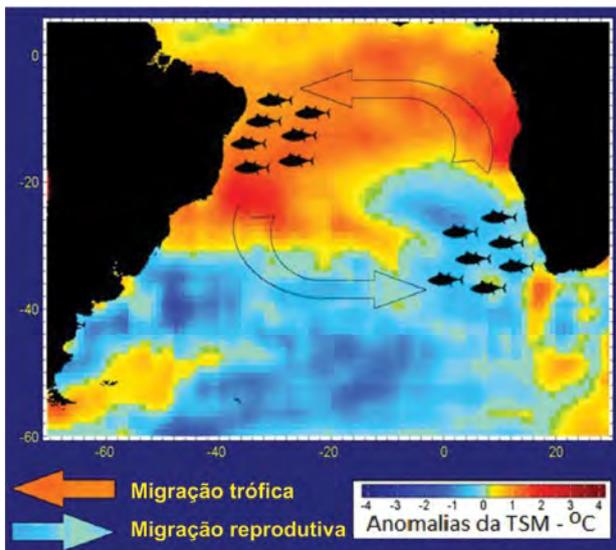
A aplicação do sensoriamento remoto na pesca pode ser feita de duas formas. A forma direta, através do uso de parâmetros ambientais (TSM, concentração de clorofila, correntes, entre outros) que influenciam a distribuição e abundância de recursos pesqueiros, e a forma indireta, quando cardumes são identificados e localizados na superfície do oceano (Butler et al., 1988; Stuart et al., 2011).

### 6.2.1. Aplicação indireta

A aplicação indireta é de uso mais comum e remonta ao início das operações dos primeiros sensores e satélites lançados para obtenção da TSM (AVHRR – *Advanced Very High Resolution Radiometer/NOAA*) e clorofila (CZCS – *Costal Zone Color Scanner/Nimbus 7*), havendo, desde então, diversos trabalhos realizados no mundo todo (Zagaglia et al., 2004; Klemas, 2012; Menon et al., 2019). Alguns exemplos são resumidos a seguir.

Laurs et al., (1984) avaliaram dados de captura da albacora-branca (*Thunnus alalunga*) na região da ressurgência da Califórnia durante o verão de 1981 associando-os às imagens de TSM e concentração de clorofila geradas de forma simultânea pelo NOAA-7/AVHRR e Nimbus-7/CZCS, respectivamente. Os resultados obtidos mostraram elevadas agregações da espécie localizadas em bolsões de água oceânica quente e oligotrófica na fronteira de mistura com as águas mais frias e de maior concentração de clorofila, associadas à ressurgência costeira. Estudando essa mesma espécie, Travassos (1999) analisou a influência da TSM e suas anomalias (combinando dados obtidos *in situ* e por satélite) sobre as capturas e os processos migratórios (reprodutivo e trófico) da albacora-branca no Atlântico Sul. Os resultados obtidos demonstraram que as fortes anomalias da TSM associadas ao *El Niño* e observadas na primavera/verão de 1972-1973, 1973-1974 e 1987-1988 ao largo da costa, entre 10°S e 20°S (área de

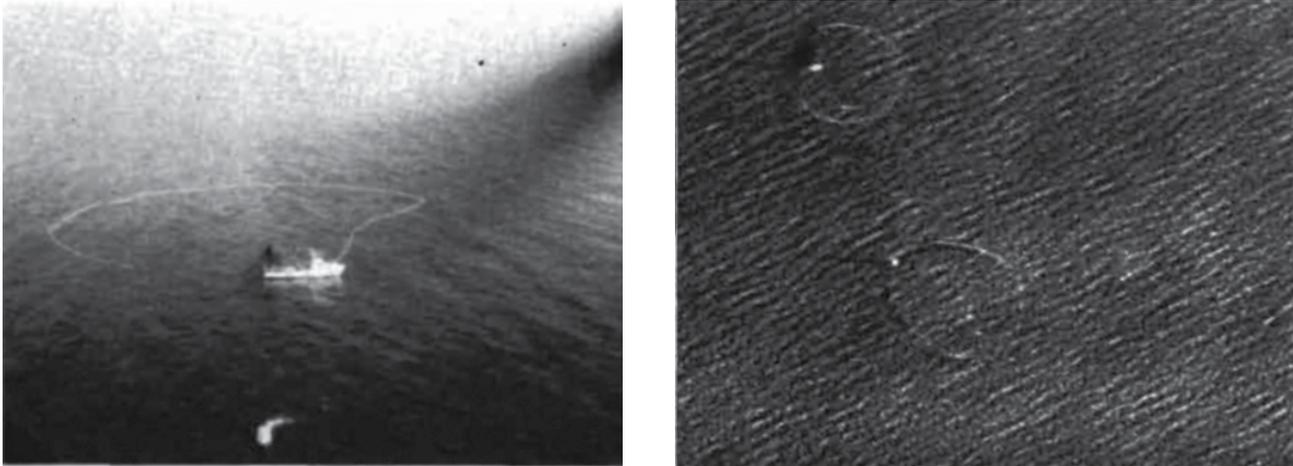
reprodução da espécie), provocaram importantes quedas nos índices de abundância (CPUE em número de peixes/1000 anzóis). No que se refere ao processo migratório, aparentemente a TSM e suas anomalias não provocaram nenhuma alteração nos deslocamentos da espécie do sul da África em direção à costa do Brasil (avanços, atrasos ou mesmo mudança de zona de reprodução) (Fig. 6.25). O autor concluiu então que a albacora-branca apresenta um comportamento obstinado, que consiste em retornar ao local e época de nascimento para se reproduzir (*holming*), independente das condições ambientais vigentes.



**Figura 6.25** Processos migratórios da albacora-branca associados às anomalias da temperatura da superfície do mar (ASTM) no Atlântico Sul. **Adaptado** de Travassos (1999).

### 6.2.2. Aplicação direta

A aplicação direta do sensoriamento remoto na pesca, como mencionado anteriormente, ocorre quando os recursos pesqueiros são identificados e localizados na superfície do oceano, sendo geralmente empregada nas pescarias que dependem da busca e visualização dos cardumes, como a pesca de atuns com rede de cerco (Butler et al., 1988). Nestes casos, sensores do tipo radar (SAR- radar de abertura sintética) são usados a bordo de aeronaves, que sobrevoam as zonas de pesca para localizar os cardumes e repassar sua localização para as embarcações de pesca que estão na região, sendo esta a única forma de transmitir essa informação em tempo real, condição *sine qua non* para viabilizar a operação de pesca, o que não seria possível, evidentemente, através do uso de satélites. Esta possibilidade do uso direto do sensoriamento remoto foi avaliada pelo projeto HAREM (*HALieutics Radar Experimentation Mediterranean sea*), desenvolvido em 1989 no Golfo de Lion (Petit et al., 1992), sendo este o primeiro experimento a usar um SAR na pesca. Seu objetivo principal foi avaliar a potencialidade dessa ferramenta para identificar e localizar cardumes de atuns através da detecção da rugosidade da superfície do mar gerada pela agitação desses peixes em grandes grupos, normalmente em atividade trófica. Os experimentos foram realizados com uso de radar de banda C (polarização VV) acoplado a uma aeronave Dornier 228, cujos dados e imagens foram confrontados com vídeos e fotografias aéreas e dados de captura da frota de cerco francesa, obtidos simultaneamente. Os resultados indicaram que esse e outros tipos de rugosidade provocados por animais marinhos (cetáceos) e pela atividade de pesca (embarcações e flutuadores da rede de cerco de atuns) geram uma modulação do sinal SAR, cujas assinaturas podem ser interpretadas eficientemente através desse método (Fig. 6.26).



**Figura 6.26** Embarcação de pesca de atuns com rede de cerco em operação (esquerda) e imagem radar (SAR) no mar Mediterrâneo. Adaptado de Petit et al. (1992).

Mais recentemente, sistemas laser de alta potência que operam na porção azul-verde do espectro visível (LIDAR – *Light Detection and Range*) tem demonstrado elevado potencial para a detecção de peixes e estimativas de biomassas (James & Hunter, 1996). Em trabalho realizado com este sistema no nordeste do Oceano Pacífico (costa do Oregon e Washington), Churnside et al. (2009) utilizou um *Fish Lidar* (Churnside et al., 2001; Churnside, 2008) acoplado a uma aeronave em voo a 300 m de altitude, com transmissão de pulsos curtos (12 ns) e intensos (120 mJ) de luz laser verde (532 nm). Os dados gerados foram comparados aos obtidos simultaneamente com uma ecossonda Simrad ES60 instalada e bordo de embarcação de pesca, que realizou prospecções acústicas nos mesmos perfis percorridos pela aeronave, além de arrastos de superfície para captura de amostras dos cardumes detectados. Os resultados demonstraram a eficiência e potencialidade do método, tendo os autores ressaltado as vantagens do LIDAR de:

- (i) detectar cardumes na superfície do mar, fator limitante na ecossonda (zona morta acima do transdutor, instalado no fundo do casco da embarcação),
- (ii) evitar a fuga dos peixes, como ocorre com o deslocamento do barco na prospecção acústica,
- (iii) realizar prospecções em vastas áreas de forma mais rápida.

As desvantagens são:

- (i) o limite de profundidade da penetração do sinal LIDAR na coluna d'água (<50 m, a depender das condições oceanográficas) e,
- (ii) a impossibilidade de obtenção de amostras para identificar a espécie responsável pelas agregações detectadas. Assim, para fins de manejo da pesca e estimativas de biomassas, recomenda-se o uso combinado dos dois métodos (Churnside et al., 2011).

## REFERÊNCIAS

- AMARO, V. E.; GOMES, L. R. S.; LIMA, F. G. F. DE; SCUDELARI, A. C.; NEVES, C. F.; BUSMAN, D. V.; SANTOS, A. L. S. **Multitemporal analysis of coastal erosion based on multisource satellite images**, Ponta Negra beach, Natal City, Northeastern Brazil. *Marine Geodesy*, 38(1): p. 1-25, 2014. doi: 10.1080/01490419.2014.904257.
- BARTON, I. J.; PRATA, A. J. **Satellite derived sea surface temperature data sets for climate applications**. *Advanced Space. Research*, v. 16, n.10, p. 127-136, 1995.
- BERLANGA-ROBLES, C. A.; RUIZ-LUNA, A.; GERARDO, B.; VEKERDY, Z. **Spatial analysis of the impact of shrimp culture on the coastal wetlands on the Northern coast of Sinaloa, Mexico**. *Ocean & Coastal Management*, 54(7): p. 535-543, 2011. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2011.04.004
- BUKATA, R. P.; JEROME, J. H.; KONDRATYEV, K. Y.; POZDNYAKOV, D.V. **Optical Properties and Remote Sensing of Inland and Coastal Waters**. CRC Press LLC, Florida – USA, 1995. 362 p.
- BUTLER, M. J. A.; MOUCHOT, M.-C.; BARALE, V.; LEBLANC, C. **The application of remote sensing technology to marine fisheries: an introductory manual**. *FAO Fish. Tech.Pap.*, (295): 1988. 165 p.
- CHALLENGER SOCIETY, The History of the Challenger Expedition. **Challenger Society for Marine Science**, Disponível em [https://www.challenger-society.org.uk/History\\_of\\_the\\_Challenger\\_Expedition](https://www.challenger-society.org.uk/History_of_the_Challenger_Expedition), 2020. Acesso em 17/11/2020.
- CHURNSIDE, J. H. **Polarization effects on oceanographic lidar**. *Opt. Exp.*, 16:1196–1207, 2008.
- CHURNSIDE, J. H.; WILSON, J. J.; TATARSKII, V. V. **Airborne lidar for fisheries applications**. *Opt. Engin.* 40:406–414, 2001.
- CHURNSIDE, J. H.; HANAN, D.; HANAN, Z. D.; MARCHBANKS, R. D. **Lidar as a tool for fisheries management**. *Proceedings of SPIE- The International Society for Optical Engineering*, 8159, 2011. doi: 10.1117/12.892560.
- CHURNSIDE, J. H.; HUNTER, J. R. **Laser remote sensing of epipelagic fishes**, *Proc. SPIE 2964, CIS Selected Papers: Laser Remote Sensing of Natural Waters: From Theory to Practice*, (13 November 1996), 1996. doi.org/10.1117/12.258352.
- DINIZ, C.; CORTINHAS, L.; NERINO, G.; RODRIGUES, J.; SADECK, L.; ADAMI, M.; SOUZA-FILHO, P. W. M. **Brazilian mangrove status: three decades of satellite data analysis**. *Remote Sens.*, 11(7), 808, 1-19, 2019. doi.org/10.3390/rs11070808.
- DINNAT, E.; YIN, X. **Editorial for the Special Issue “Sea Surface Salinity Remote Sensing”**, *Remote Sensing*, 11, 1300, 2019. doi:10.3390/rs11111300.
- FERREIRA, A. G. **Técnicas de sensoriamento remoto para monitoramento ambiental com aplicações em recursos pesqueiros no Atlântico Tropical**. (Dissertação de Mestrado). LABOMAR – UFC., 2005. 169 p.
- FINGAS, M.; BROWN, C. E. **A review of oil spill remote sensing**. *Sensors*, 18, 91, 1-18, 2018. doi:10.3390/s18010091.
- FONSECA, A. D.; FERNANDES, J. C. **Detecção Remota**. Lidel Edições Técnicas. Lisboa, Portugal, 224 p, 2004.
- FONT, J.; CAMPS, A.; BORGES, A.; MARTIN-NEIRA, M.; BOUTIN, J.; REUL, N.; KERR, Y.H.; HAHNE, A.; MECKLENBURG, S. SMOS: **The Challenging Sea Surface Salinity Measurement From Space**, in *Proceedings of the IEEE*, vol. 98, no. 5, pp. 649-665, May 2010, 2010. doi: 10.1109/JPROC.2009.2033096.
- GARCIA-PINEDA, G.; HOLMES, J.; RISSING, M.; JONES, R.; WOBUS, C.; SVEJKOVSKY, J.; HESS, M. **Detection of Oil near Shorelines during the Deepwater Horizon Oil Spill Using Synthetic Aperture Radar (SAR)**. *Remote Sens.*, 9, 567, 1-19, 2017. doi:10.3390/rs9060567.
- GUIMARÃES, A. S.; TRAVASSOS, P.; SOUZA-FILHO, P. W. M.; GONÇALVES, F. B.; COSTA, F. **Impact of aquaculture on mangrove areas in the Northern Pernambuco coast (Brazil) using remote sensing and geographic information system**. *Aquaculture Research*, 41, 828-38, 2010. doi: 10.1111/j.1365-2109.2009.02360.x.
- HANAFIN, J. A.; MINNETT, P. J. **Infrared-emissivity measurements of a wind-roughened sea surface**. *Appl. Opt.* 44, p. 398 – 411, 2005.
- HARDMAN-MOUNTFORD, N. J.; RICHARDSON, A. J.; AGENBAG, J. J.; HAGEN, E.; NYKJAER, L.; SHILLINGTON, F. A.; VILLACASTIN C. **Ocean climate of the south east Atlantic observed from satellite data and wind models**. *P. in Oceanography*, v. 59, p.181-221, 2003.
- HEDLEY, J.; ROELFSEMA, C. M.; CHOLLETT, I.; HARBORNE, A. R.; HERON, S. F.; WEEKS, S. J.; SKIRVING, W. J.; STRONG, A. E.; EAKIN, C. M.; CHRISTENSEN, T. R. L.; TICZON, V.; BEJARANO, S.; MUMBY, P. J. **remote sensing of coral reefs for monitoring and management: a review**. *Remote Sens*, 8, 118, 2016. doi:10.3390/rs8020118.

JAYANTHI, M.; SELVASEKAR, T.; MURALIDHAR, M.; PITCHAIYAPPAN, R. **Impact of shrimp aquaculture on important ecosystems in India**. *Global Environmental Change*, 52, p. 10-21, 2018. doi: 10.1016/j.gloenvcha.2018.05.005.

JENSEN, J.R. **Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma perspectiva em Recursos Terrestres**. Parêntese Editora, S. J. do Campos-SP. 2011. 598 p.

KAMPEL, M. **Características gerais dos satélites NOAA: Histórico, instrumentos e comunicação de dados**. In: Ferreira, N. J. (Ed.) *Aplicações ambientais brasileiras dos*

satélites NOAA e TIROS-N, São Paulo-SP: **Oficina de Textos**. p.15 – 40, 2004.

KAMPEL, M., NOVO, E. M. L. M. **Sensoriamento Remoto da Cor da Água, em Oceanografia por Satélites** (de Souza R. B. – Organizador). *Oficina de Textos*, p. 179 – 196, 2005.

KIDDER, S. Q.; VONDER HAAR, T. H. **Satellite meteorology an introduction**. San Diego- California: Academic Press, Inc. 1995. 466 p.

KLEMAS, V. **Remote sensing techniques for studying coastal ecosystems: an overview**. *Journal of Coastal Research*, 27(1): p. 2–17, 2011.

KLEMAS, V. **Remote Sensing of Sea Surface Salinity: An Overview with Case Studies**. *Journal of Coastal Research* 27(5):830-838, 2011. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-11-00060.

KLEMAS, V. **Remote sensing of environmental indicators of potential fish aggregation: An overview**. *Baltica* 25(2): p. 99-112, 2012. doi: 10.5200/baltica.2012.25.10.

LAURS, M. R.; FIEDLER, P.C.; MONTGOMERY, D. R. **Albacore tuna catch distributions relative to environmental features observed from satellites**. *Deep-Sea Res.*, 31, p. 1085-1099, 1984.

LE VINE, D. M.; DINNAT, E. P.; MEISSNER, T.; WENTZ, F. J.; KAO, H-S; LAGERLOEF, G.; LEE, T. **Status of Aquarius and Salinity Continuity**. *Remote Sensing*, 10, 1585, 2018. doi:10.3390/rs10101585.

LEÓN-PÉREZ, M. C.; HERNÁNDEZ, W. J.; ARMSTRONG, R. A. **Characterization and distribution of seagrass habitats in a Caribbean nature reserve using high-resolution satellite imagery and field sampling**. *Journal of Coastal Research*, 35(5), p. 1-11, 2019. doi: 10.2112/JCOASTRES-D-18-00106.1.

LI, H.; HUANG, C.; LIU, Q.; LIU, G. **Accretion–erosion dynamics of the Yellow river delta and the relationships with runoff**

**and sediment from 1976 to 2018**. *Water*, 12, 2992, 1-23, 2020). doi:10.3390/w12112992

LORENZZETTI, J. A. **Princípios Físicos de Sensoriamento Remoto**. Editora Blucher, 2015. 293 p.

MCCLAIN, C. R.; FELDMAN, G.; ESAIAS, W. **Oceanic biological productivity**. In: Gurney, R. J.; Folster, J. L.; Parkinson, C. L (Ed.). *Atlas of satellite observations related to global change*. USA, Cambridge University Press. 1993. 470 p.

MCMILLIN, L. M. **Estimation of sea surface temperatures from two infrared window measurements with different absorption**. *Journal of Geophysical Research*, v. 80, n. 5, p.113- 117, 1975.

MENON, N.; SANKAR, S.; SMITHA, A.; GEORGE, G.; SHALIN, S.; SATHYENDRANATH, S.; PLATT, T. **Satellite chlorophyll concentration as an aid in understanding the dynamics of Indian oil sardine in the southeastern Arabian Sea**. *Marine Ecology Progress Series*, 16, 11p, 2019. doi: 10.3354/meps12806.

MINNETT, P. J.; ALVERA-AZCÁRATE, A.; CHIN, T. M.; CORLETT, G. K.; GENTEMANN, C. L.; KARAGALI, I.; LI, X.; MARSOUIN, A.; MARULLO, S.; MATURI, E.; SANTOLERI, R.; SAUX PICART, S.; STEELE, M.; VAZQUEZ-CUERVO, J. **Half a century of satellite remote sensing of sea-surface temperature**. *Remote Sensing of Environment*, 2019. 233 p.

MOREIRA, M. A. **Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação**. 2ª Ed. Revista Ampl. Viçosa, MG, UFV. 307 p, 2003.

MOREL, A. **In-water and remoting measurements of ocean color**. *Boundary Layer Meteorology*, 18:177201, 1980.

NASA GODDARD SPACE FLIGHT CENTER. **Ocean Ecology Laboratory, Ocean Biology Processing Group**. Coastal Zone Color Scanner Experiment (CZCS) {Dataset Name} Data; NASA OB.DAAC, Greenbelt, MD, USA, 2020. doi: {DOI}. Accessed on 08/07/2020.

NJOKU, E. G.; BROWN, O.B. Sea Surface Temperature (237 – 249 p.). In **Atlas of satellite observations related to global change** Gurney, R.J., Foster, J L., Parkinson, C. L. Cambridge University Press, 1993. 470 p.

Novo, E. M. L. de M. **Sensoriamento Remoto Princípios e Aplicações**. Editora Blucher, 4ª. Edição revista, 2010. 385 p.

PETIT, M.; STRETTA, J. M.; FARRUGIO, H.; WADSWORTH, A. **Synthetic aperture radar imaging of sea surface life and fishing activities**. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 80(5): p. 1085-1089, 1992.

PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S. **Oceanic Primary Production: Estimation by Remote Sensing at local and regional scales.** *Articles*, p. 1613 – 1619, 1998.

POLITO, S.P.; SATO, O.T. **Oceanografia por satélites.** São Paulo: Instituto Oceanográfico da USP. 2004. 51 p.

PRADHAN, B.; RIZEEI, H.M.; ABDULLE, A. **Quantitative assessment for detection and monitoring of coastline dynamics with temporal RADARSAT images.** *Remote Sens.*, 10, 1705, 2-18, 2019. doi:10.3390/rs10111705.

QUEIROZ, L.; ROSSI, S.; MEIRELES, J.; COELHO, C. **Shrimp aquaculture in the federal state of Ceará, 1970–2012: Trends after mangrove forest privatization in Brazil.** *Ocean & Coastal Management*, 73:54–62, 2013. doi: 10.1016/j.ocecoaman.2012.11.009

ROELFSEMA, C.; KOVACS, E.; ORTIZ, J.C.; WOLF, N.H.; CALLAGHAN, D.; WETTLED, M.; RONAN, M.; HAMILTON, S.M.; MUMBY, P.J.; PHINN, S. **Coral reef habitat mapping: A combination of object-based image analysis and ecological modelling.** *Remote Sensing of Environment*, 208, p. 27-41, 2018. doi.org/10.1016/j.rse.2018.02.005.

SANTOS, L. C. M.; BITENCOURT, M. D. **Remote sensing in the study of Brazilian mangroves: review, gaps in the knowledge, new perspectives and contributions for management.** *Journal of Integrated Coastal Zone Management*, 16(3): p. 245-261, 2016. doi: 10.5894/rgci662.

SEAWINDS SCIENCE DATA PRODUCT–USER’S MANUAL. Version 1.1- D-21551. 2003. 128 p.

SHAPIRO, A. C.; TRETTIN, C. C.; KÜCHLY, H.; ALAVINAPANAH, S.; BANDEIRA, S. **The mangroves of the Zambezi delta: increase in extent observed via satellite from 1994 to 2013.** *Remote Sens.*, 7, p. 16504–16518, 2015.

SILVA, G. C. M. DA; SOUZA, F. E. S. DE; MARINHO-SORIANO, E. **Application of ALOS AVNIR-2 for the detection of seaweed and seagrass beds on the northeast of Brazil.** *International Journal of Remote Sensing*, 38(3): p. 662-678, 2017. doi: 10.1080/01431161.2016.1268738.

STOFFELEN, A.; ANDERSON, D. **Scatterometer data interpretation: estimation and validation of the transfer function CMD04.** *Journal of Geophysical Research*, v. 102, n. C3, p. 5767-5780, 1997.

SOUZA-FILHO, P. W. M.; PARADELLA, W. R. **Use of synthetic aperture radar for recognition of Coastal Geomorphological Features, land-use assessment and shoreline changes in**

**Bragança coast**, Pará, Northern Brazil. *Anais da Academia Brasileira de Ciências* (2003) 75(3): p. 341-356, 2003.

STUART, V.; PLATT, T.; SATHYENDRANATH, S.; PRAVIN, P. **Remote sensing and fisheries: an introduction.** *ICES Journal of Marine Science*, 68(4), 639 –641, 2011. doi:10.1093/icesjms/fsq193.

TOURE, S.; DIOP, O.; KPALMA. K.; MAIGA, A.S. **Shoreline detection using optical remote sensing: a review.** *Int. J. Geo-Inf.* 8(75): 2-21, 2019. doi:10.3390/ijgi8020075.

TRAVASSOS, P. **Anomalies thermiques et pêche du germon (*Thunnus alalunga*) dans l’Atlantique tropical sud-ouest.** *Col. Vol.Sci.Pap. ICCAT*, 49 (4): p. 324-338, 1999.

TUPINAMBÁ, S. V.; QUEIROZ, L. DE S.; CASSOLA, R.; MEIRELES, A. **Impactos ambientais decorrentes das atividades da carcinicultura ao longo do litoral cearense, Nordeste do Brasil.** *Mercator*, 6(12): p. 83-106, 2006.

US NATIONAL REPORT. **Deep Water- The Gulf Oil Disaster and the Future of Offshore Drilling.** Report to the President, National Commission on the BP Deepwater Horizon Oil Spill and Offshore Drilling, 2011. 398 p.

VINOGRADOVA, N.; LEE, T.; BOUTIN, J.; DRUSHKA, K.; FOURNIER, S.; SABIA, R.; STAMMER, D.; BAYLER, E.; REUL, N.; GORDON, A.; MELNICHENKO, O.; LI, L.; HACKERT, E.; MARTIN, M.; KOLODZIEJCZ, N.; HASSON, A.; BROWN, S.; MISRA, S.; LINDSTROM, E. **Satellite Salinity Observing System: Recent Discoveries and the Way Forward.** *Frontiers in Marine Science*, 22(6), 2019. p 243. doi.org/10.3389/fmars.2019.00243.

WANG, L.; JIA, M.; YIN, D.; TIAN, J. **A review of remote sensing for mangrove forests: 1956–2018.** *Remote Sensing of Environment*, 231, 1-15, 2019. doi.org/10.1016/j.rse.2019.111223.

YOLDER, A. J. **An overview of temporal and spatial patterns in satellite-derived chlorophylla imagery and their relation to ocean process.** In: Halpern, D. (Ed.). *Satellites, Oceanography and Society.* (Elsevier Oceanography series).p. 225 – 255, 2000.

ZAGAGLIA, C. R.; LORENZZETTI, J. A.; STECH, J. L. **Remote sensing data and longline catches of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic.** *Remote Sensing of Environment*, 93, p. 267 – 281, 2004. doi:10.1016/j.rse.2004.07.015.

# GEOLOGIA, GEODINÂMICA E A FORMAÇÃO DOS OCEANOS

7

Helenice VITAL<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN



## 1. INTRODUÇÃO

A Geologia é o estudo científico da Terra. A Ciência da Geologia abrange o estudo do planeta, sua formação, sua estrutura interna, seus materiais e suas propriedades, seus processos químicos e físicos e sua história química, física e biológica.

A Geodinâmica por sua vez, é a ciência que investiga a dinâmica da Terra, e busca entender todos os processos geológicos envolvidos na sua transformação ao longo do tempo geológico e na geração de recursos naturais como minério, água, óleo e gás. Os processos geológicos afetam nossas vidas todos os dias, tanto de forma sutil quanto marcante, benéfica ou destrutiva. O conhecimento acerca desses processos e dos riscos a eles associados deveriam exercer um papel importante no planejamento das atividades humanas.

Neste capítulo vamos procurar entender os processos (causas das erupções vulcânicas, terremotos, deslizamentos, enchentes, etc) que atuam na superfície terrestre e com os materiais (solos, sedimentos, rochas, ar, água do mar, etc.) nos quais estes processos atuam. E também com a cronologia de eventos, tanto físicos quanto biológicos, que ocorreram no passado. A partir destes estudos é possível resolver questões tais como: Quando os oceanos se formaram? Quando os dinossauros desapareceram da Terra? Quando se deu o soerguimento das montanhas Andinas?

Vamos enfatizar também a compreensão dos processos e materiais terrestres que afetam nossas

vidas. A relação planeta-homem é dinâmica e caracterizada por mudanças. O próprio planeta está sempre em modificação e o homem contribui em grande escala para tais mudanças, na medida em que é dependente dos recursos materiais da Terra, e ao extraí-los participa do Ciclo Geológico, já que move materiais, cria resíduos e altera ciclos biogeoquímicos naturais. Entretanto, os processos geológicos e a natureza humana atuam em diferentes escalas. Enquanto o que é importante para o homem, tanto social quanto politicamente, são medidos na escala de dias a anos, os processos geológicos atuam em escalas desde pouco segundos (os terremotos) a alguns milênios de anos (a formação do solo), ou algumas centenas de milhões de anos (formação de um depósito mineral).

Os processos geológicos podem ser endógenos ou internos, quando causados ou direcionados, direta ou indiretamente pelo calor oriundo do interior da Terra, produzido continuamente pelo decaimento de elementos radioativos na Terra. Bem como, superficiais ou exógenos, quando suas causas e efeitos encontram-se na ou próximo a superfície terrestre; envolvem principalmente a ação da água, gelo ou gravidade.

Uma combinação extraordinária de processos geológicos e astronômicos levou ao desenvolvimento de um planeta habitável. Tanto quanto nós sabemos, a Terra é o único entre os planetas de nosso sistema solar, que abriga vida (pelo menos como nós a conhecemos). Isto serve como lembrete da

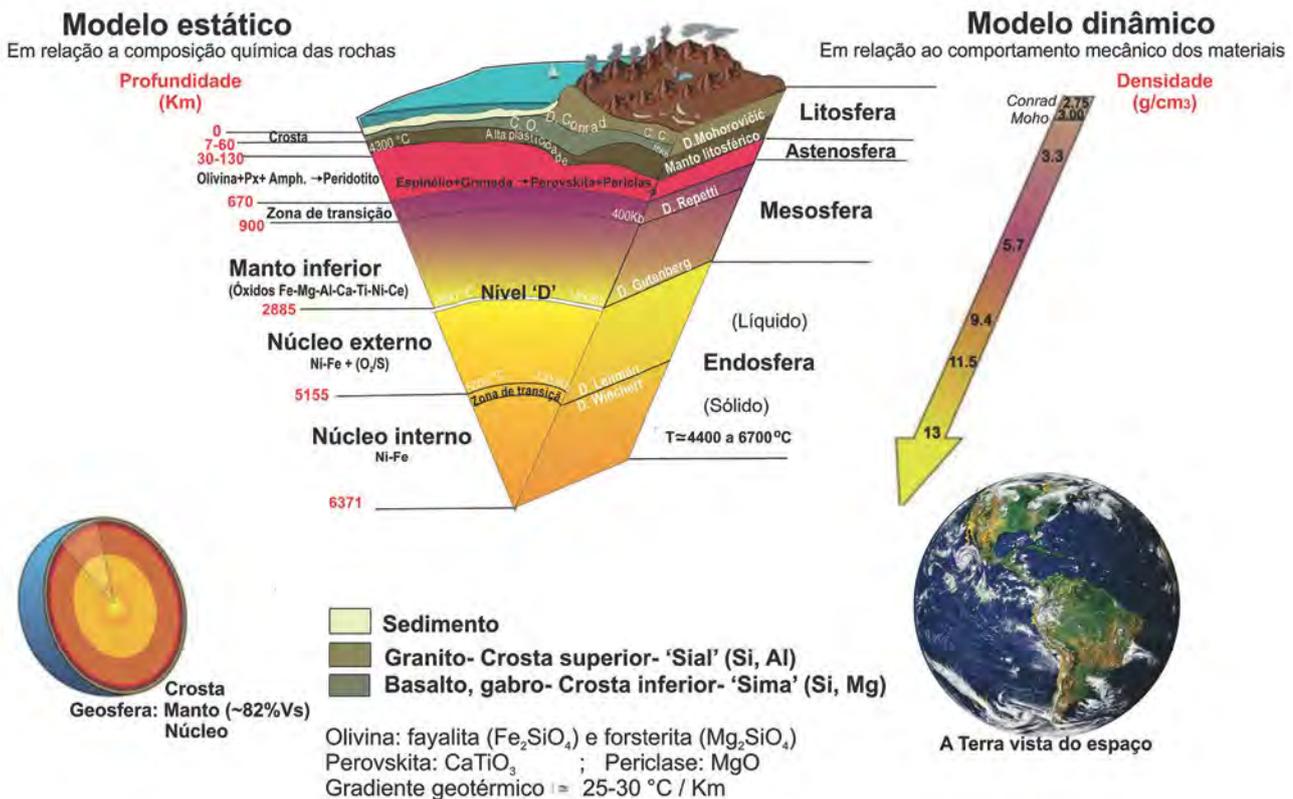
preciosidade do sistema natural, do qual somos dependentes, e da importância do uso correto dos recursos naturais, com o objetivo principal de garantir o bem estar das futuras gerações.

## 2. A TERRA E O CICLO DAS ROCHAS

### 2.1. Geosfera

Somente depois que a Terra foi observada do espaço é que passou a ser vista como um sistema integrado. A perspectiva anterior, a partir da

Terra, possibilitava apenas a visão fragmentada de aspectos físicos do planeta, como cordilheiras de montanhas ou grandes rios. O avanço da tecnologia, com novos equipamentos de observação permitiram concluir que as esferas materiais da Terra participam, em graus variáveis, de múltiplas interações, que envolvem a atmosfera, hidrosfera, geosfera e biosfera. O sistema evolui em conjunto no decorrer de uma história muito longa, o Tempo Geológico, que possui em torno de 4,6 bilhões de anos. Nos últimos milhares de anos, um novo personagem, muito ativo, veio se somar aos participantes da evolução do planeta: a esfera humana ou social (Carneiro et al., 2009).



**Figura 7.1** A estrutura interna da Terra ou Geosfera, é estratificada em camadas esféricas, consistindo de uma crosta externa sólida de silicato, uma astenosfera e manto altamente viscosos, um núcleo externo líquido que é muito menos viscoso que o manto e um núcleo interno sólido. Esta figura mostra essa estrutura em camadas em termos de química e mineralogia, o modelo estático (crosta, manto e núcleo) e comportamento mecânico das rochas constituintes, o modelo dinâmico (litosfera, astenosfera, mesosfera e endosfera). A crosta é subdividida em continental (cc) e oceânica (co). A imagem também inclui algumas propriedades físicas das diferentes camadas e a Terra vista do espaço. Adaptados de Gervilla et al. (2019) e Andergeo (2012).

Análises baseadas na longa história geológica do planeta tornaram-se imprescindíveis para entender a complexidade e as interações dos processos naturais e humanos e antever suas possíveis consequências. O Ciclo das Rochas faz parte desse contexto dinâmico cujo estudo permite até mesmo fazer previsões de acontecimentos futuros com a agricultura, o solo, o clima, os oceanos, e a disponibilidade de recursos minerais.

Para melhor compreensão sobre o que acontece no Ciclo das Rochas no planeta Terra, os materiais terrestres são separados pelos processos típicos que os afetam em grandes domínios, chamados de esferas terrestres. Diferentes classificações são utilizadas na literatura mas, em linhas gerais, existe certa congruência na grande maioria delas (Carneiro et al. 2009). A diferença pode ser baseada em algum interesse particular de um dado campo científico especializado. O ponto comum é que as definições partem do pressuposto de que a Terra é um todo unificado: o que acontece em uma esfera interfere em todas as demais. Embora o Ciclo das Rochas pertença ao contexto da Tectônica de Placas, para facilidade de abordagem, Carneiro et al. (2009) enfatizam a atuação de processos, na interação entre as várias esferas terrestres:

- > **Atmosfera:** engloba os gases que compõem os materiais terrestres. Dentre os processos que acontecem na atmosfera, destaca-se a função de distribuir a energia solar e a umidade em toda a superfície.
- > **Hidrosfera:** envolve toda a água do planeta e os fenômenos relacionados à circulação desse fluido pelos continentes e oceanos, tanto na forma líquida quanto gasosa (vapor) ou sólida. Neste caso costuma-se usar o nome criosfera para a esfera congelada. Acredita-se que a maior parte desta água é proveniente do interior da terra inicial, quando a temperatura terrestre era maior. Atualmente, exceto por adições ocasionais e menores a partir de vulcões, que traz água “nova” do manto, e pequenas quantidades de água que retorna ao manto com a subducção litosférica, a quantidade da água na hidrosfera permanece essencialmente constante.
- Toda a água da hidrosfera é aprisionada no ciclo hidrológico. De longe, o maior reservatório no ciclo hidrológico consiste dos oceanos, que contém cerca de 97% da água da hidrosfera; lagos e correntes juntas contém apenas 0,016% da água.
- > **Geosfera:** é o nome dado a toda a parte sólida da Terra, formada por camadas de distinta composição material, como a crosta, o manto e o núcleo, ou camadas cujo comportamento mecânico obedece a certos padrões, como a litosfera e a astenosfera. Na geosfera é possível encontrar registros das principais mudanças ambientais que ocorreram e ocorrem na Terra (Fig. 7.1).
- > **Crosta:** é a camada externa da geosfera cuja composição a distingue do manto e núcleo, mas seu comportamento mecânico permite considerá-la parte da litosfera.
- > **Litosfera:** é o envoltório sólido rochoso externo do planeta. Inclui a crosta (continental e oceânica) e a parte mais externa do manto superior. Os processos e transformações na litosfera ocorrem lentamente, permitindo que funcione como um campo transitório, geologicamente falando, onde interagem os fenômenos da superfície e do interior do planeta.
- > **Manto e núcleo:** são as esferas rochosas internas. Embora sejam inacessíveis à observação direta pelo homem, sabe-se que são responsáveis por muitos fenômenos observados na superfície, como o magnetismo terrestre ou a contínua emissão de calor, desde o interior quente.
- > **Biosfera:** compreende todos os organismos vivos, dos reinos animal, vegetal, protista, monera e fungi. Podemos subdividir a matéria viva, devido às formas peculiares de organização material, em dois grandes domínios – a biosfera e a esfera social –, que se mantêm intimamente relacionadas.

> **Antroposfera ou Noosfera:** a esfera social é formada pelas sociedades humanas e os processos superficiais que promovem. A ideia de interação no âmbito de Sistema Terra exige abordar a noosfera integrada com as demais esferas, de modo a se visualizar a Terra como resultado de mútuas interações. Enquanto a biosfera se transforma mediante mecanismos explicados pela teoria da evolução, a esfera social – da qual fazemos parte – modifica-se sobretudo por meio de instrumentos culturais e que podem ser explicados pela economia, política e formas de organização social.

## 2.2. Tempo geológico

A descoberta da radioatividade no final do século XIX e sua aplicação para avaliar a idade das rochas forneceu indícios da duração de cada era geológica (Fig. 7.2). De acordo com Carneiro et al. (2009), para compreendermos a dinâmica do planeta é essencial a concepção de Tempo Geológico, pois a duração do conjunto de processos e fenômenos terrestres exerce papel decisivo nos ciclos de transformação do Sistema Terra, onde qualquer feição geológica ou rocha representa uma série de eventos naturais que estão situados em um intervalo de tempo específico da história geológica da Terra e processos e ciclos interagem uns com os outros de modo complexo:

Ciclos de duração extremamente longa, medidos em dezenas de milhões a bilhões de anos passados. Processos evolutivos da crosta, manto e núcleo da Terra; formação de continentes, ilhas e áreas oceânicas; deriva continental; formação de cadeias montanhosas devido a colisões entre placas; erosão e aplainamento das cadeias de montanhas; transgressões e regressões em escala continental; fases orogênicas, ou formação de montanhas, e metalogênicas ou formação de recursos minerais; surgimento da vida e criação da atmosfera, estratosfera etc.; evolução das espécies etc.

Ciclos de duração longa, medidos em várias dezenas, em centenas de milhares até alguns milhões de anos. Ciclos climáticos globais de longa duração; oscilações climáticas entre eras glaciais e interglaciais no sistema terrestre; desenvolvimento de solos muito espessos; variações no sistema de correntes oceânicas profundas; intemperismo químico extensivo; evolução das espécies; mudança no sentido de movimento das placas tectônicas; flutuações eustáticas (do nível do mar em relação às terras emersas) com amplitudes acima de 100 m; variações de excentricidade da órbita da Terra; inversão do campo magnético.

Processos de duração média, medidos em séculos a poucos milhares de anos. Variações climáticas globais; formação de planícies de inundação; variações da linha de costa; assoreamento de lagos; formação de solos de 0,5 a mais de 2,0 m de espessura; precessão e variações na inclinação do eixo da Terra; depósitos tecnogênicos (lixo, esgotos, efluentes industriais e rejeitos em geral, etc.) e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica.

Processos de duração curta, medidos em ano, vários anos e décadas. Formação da camada de húmus do solo; variações climáticas sazonais; variação da calota polar; crescimento anual dos animais e vegetais; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pelo homem (poluição do ar e das águas superficiais e subterrâneas); subsidências.

Processos de duração muito curta, medidos em meios-dias, dias e semanas. Ciclo das marés e depósitos correlatos; variação diurna de temperatura devido à rotação da Terra; tempestades e inundações com depósitos de inunditos [sedimentos ligados a inundações] e escorregamentos; cataclismas vulcânicos e depósitos de tufo e piroclastos inconsolidados; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica (incêndios, desmatamentos, poluição do ar e águas superficiais etc.).

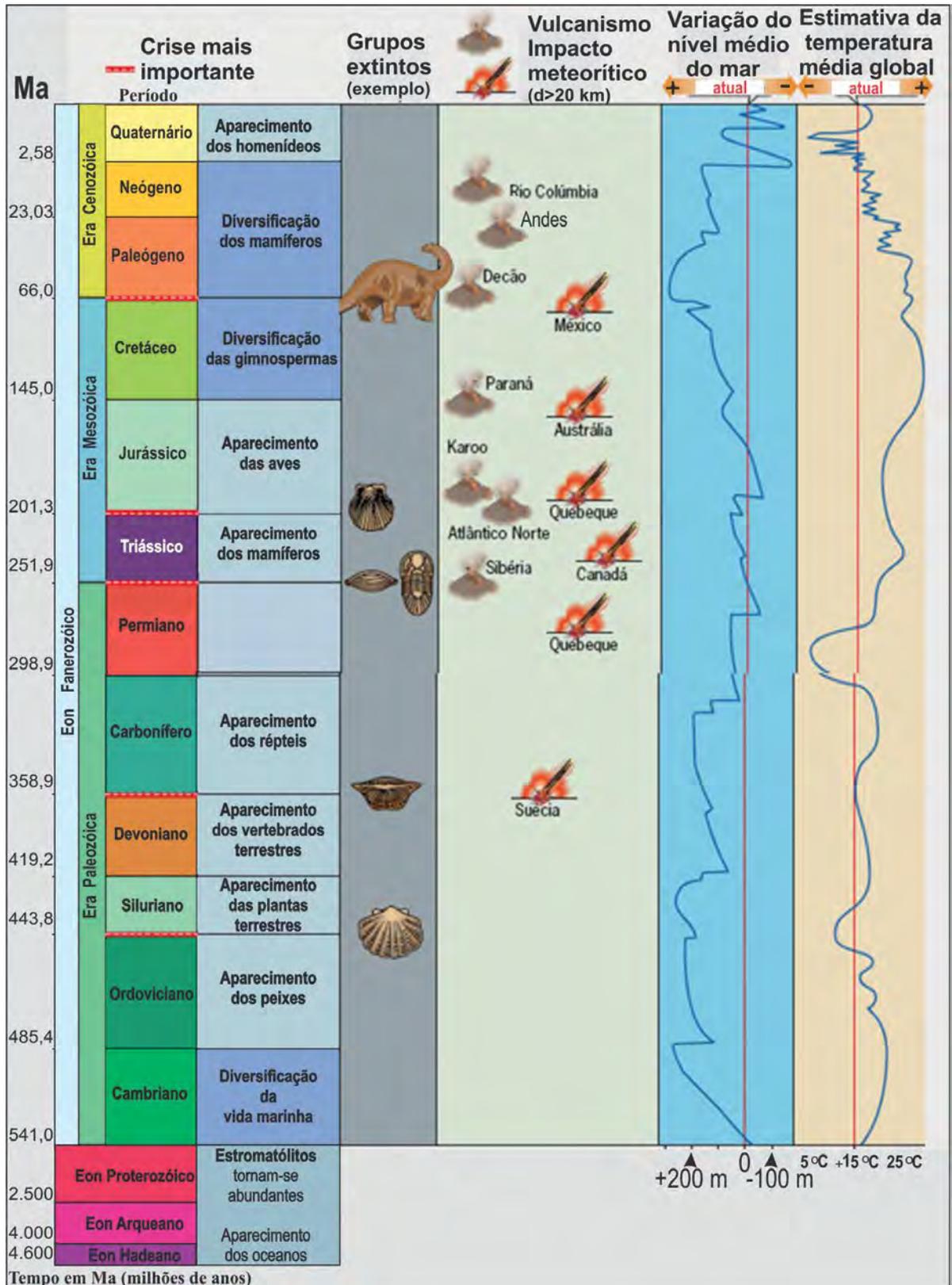


Figura 7.2 O Tempo Geológico. Adaptado de IUGS (2020) e BIOGEOGILDE WEBLOG (2008).

Períodos excessivamente curtos, medidos em segundos, minutos e horas. Tempestades e furacões, terremotos e tsunamis; correntes de turbidez; cataclismas vulcânicos; deslizamentos e avalanches; impacto de meteoritos; catástrofes em geral; depósitos tecnogênicos e modificações do meio ambiente pela esfera antrópica (incêndios, poluição sonora etc.).

### 2.3. Minerais, rochas e o Ciclo das Rochas

Uma substância mineral é um sólido ou líquido que ocorre naturalmente, formado por meio de processos geológicos. Uma espécie mineral é uma substância mineral com composição química e propriedades físicas bem definidas, que recebe um nome mineralógico único (Menezes, 2012).

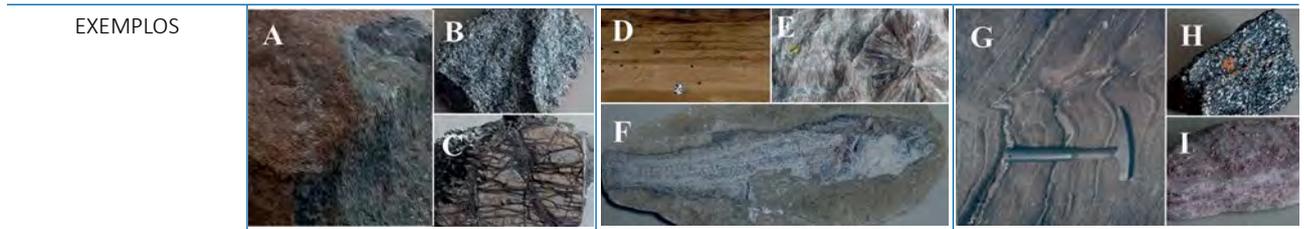
A água (gelo, no estado sólido) e o mercúrio são dois minerais encontrados no estado líquido em condições normais de temperatura e pressão. As substâncias formadas por intervenção humana

(substâncias antropogênicas) não são consideradas minerais, e as substâncias produzidas por processos biológicos (substâncias biogênicas) podem ou não ser consideradas minerais. Somente algumas substâncias biogênicas que existem como minerais formados por processos geológicos são consideradas minerais válidos, como a aragonita e a calcita da concha de moluscos, a hidroxilapatita em dentes etc. Em geral, as diferentes espécies minerais apresentam-se sob a forma de poliedros limitados por faces planas, conhecidos pelo nome de cristais.

Rochas, são um conjunto de vários minerais. Existem três grandes grupos de rochas: as rochas sedimentares, ígneas ou magmáticas, e as metamórficas. A distinção entre elas é feita de acordo com os processos geradores. Entretanto, há variações nas condições de formação das rochas com mesma origem genética, resultando em diversos tipos de rochas em cada grupo. As principais características distintivas entre os três grupos de rochas são mostradas na tabela 7.1.

**Tabela 7.1** Principais grupos de rochas – Material fonte e processos formadores. **Adaptado** de Press et al. (2006); Carneiro et al. (2009).

	ÍGNEAS ou MAGMÁTICAS	SEDIMENTARES	METAMÓRFICAS
MATERIAL FONTE	Fusão de rochas na crosta quente e profunda e no manto superior	Intemperismo e erosão das rochas expostas na superfície	Rochas sob altas temperaturas e pressões nas profundezas da crosta e no manto superior
PROCESSO FORMADOR	Cristalização (solidificação de magma ou lava)	Deposição, soterramento ou litificação	Recristalização em estado sólido de novos minerais
CARACTERÍSTICAS	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Aspecto maciço ou compacto</li> <li>*Grãos imbricados, sem deixar poros (exceto vulcânicas, como pedra-pomes)</li> <li>*Constituintes com formas irregulares ou geométricas. Nunca mecanicamente arredondados</li> <li>*Distribuição espalhada e homogênea; ausência de camadas, estratos, foliação, ou orientação dos grãos</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Geralmente friáveis (desfaz com facilidade), maciça ou em camadas</li> <li>* Grãos não-imbricados, apresentando poros ou cimento. Fragmentado</li> <li>*Constituintes com formas arredondadas ou ovaladas. Por vezes angulosos (pedaços quebrados). Raramente com formas geométricas</li> <li>* Distribuição espalhada e homogênea dos grãos. Camadas comuns, estratificação e fósseis</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>*Aspecto foliado ou maciço</li> <li>*Grãos imbricados ou firmemente justapostos</li> <li>*Constituintes com formas geométricas ou irregulares. Raramente arredondados</li> <li>*Distribuição dos componentes em bandas. Por vezes dobradas</li> <li>*Frequentemente há orientação dos componentes, com foliação da rocha</li> </ul>



**Exemplos** Rochas Ígneas: **A)** Basalto do Pico do Cabugi, Angicos-RN; **B)** Diorito Carajás-PA; **C)** Peridotido serpentinizado, Arquipelago de São Pedro e São Paulo; Rochas Sedimentares: **D)** Arenito, Natal-RN; **E)** Gipsita, Gov. Dix-Sept-Rosado-RN; **F)** Concreção calcárea com fóssil de peixe, Bacia do Araripe-CE; Rochas Metamórficas: **G)** Paragnaisse com dobras, São José de Espinharas-PB; **H)** Anfíbolito, Carajás-PA; **I)** Quartzito. Parelhas-RN **Fotos** H. Vital.

As rochas sedimentares são formadas pela deposição soterramento e litificação de sedimentos provenientes de outras rochas ou de materiais de origem biogênica, ou ainda da precipitação química de minerais. Rochas sedimentares como calcários e gipsita (Tab. 7.1) são formados por processos químicos/bioquímicos.

As rochas metamórficas são formadas por transformações na mineralogia, química e estrutura de rochas já existentes, devido a mudanças nos parâmetros físicos (pressão e temperatura principalmente) e químicos diferentes das condições diagenéticas. As rochas resultantes do processo de metamorfismo dependem do tipo de rocha e sua composição mineralógica, e as principais transformações são a recristalização de minerais e, ou, formação de novos minerais e deformações na estrutura das rochas (dobras, foliação, lineação etc.).

As rochas ígneas têm sua origem no resfriamento do magma ou lava, nas quais o tamanho dos cristais geralmente é proporcional ao tempo de resfriamento: quanto mais lenta a cristalização de um magma, maiores os tamanhos dos cristais formados.

Existem três tipos de rochas ígneas: plutônicas ou intrusivas, subvulcânicas ou intrusivas rasas e vulcânicas ou extrusivas. O magma pode migrar dos locais onde se originou para regiões da crosta

terrestre onde a pressão seja menor, alojando-se como intrusão magmática. Uma intrusão pode variar em tamanho e forma; quando atinge grandes proporções constitui uma câmara magmática. Nessas condições o resfriamento lento do magma favorece o processo de cristalização dos minerais, dando origem a rochas ígneas plutônicas como os granitos.

Ao longo do Tempo Geológico, um tipo de rocha pode transformar-se em outro e o Ciclo das Rochas (Fig. 7.3) é utilizado para representar essas diferentes possibilidades. As rochas são uma espécie de memória inanimada do planeta, porque guardam registros das alterações e dos fenômenos ocorridos ao longo da história geológica. Por meio das rochas podemos deduzir as condições atuantes no Sistema Terra na época em que foram geradas (Carneiro et al., 2009).

Para explicar como funciona o Ciclo das Rochas (Fig. 7.3) Carneiro et al., (2009) inicia pelo intemperismo, o processo de transformação ou modificação das rochas quando expostas à atmosfera e à hidrosfera. Quanto mais longo o tempo que a rocha fica exposta aos três processos básicos (físico, químico e biológico) responsáveis pelo intemperismo, mais intensas e profundas serão as transformações. O calor, a umidade, os organismos e o relevo determinam o grau de atuação de cada um desses processos. O intemperismo físico, ou desagregação, altera o

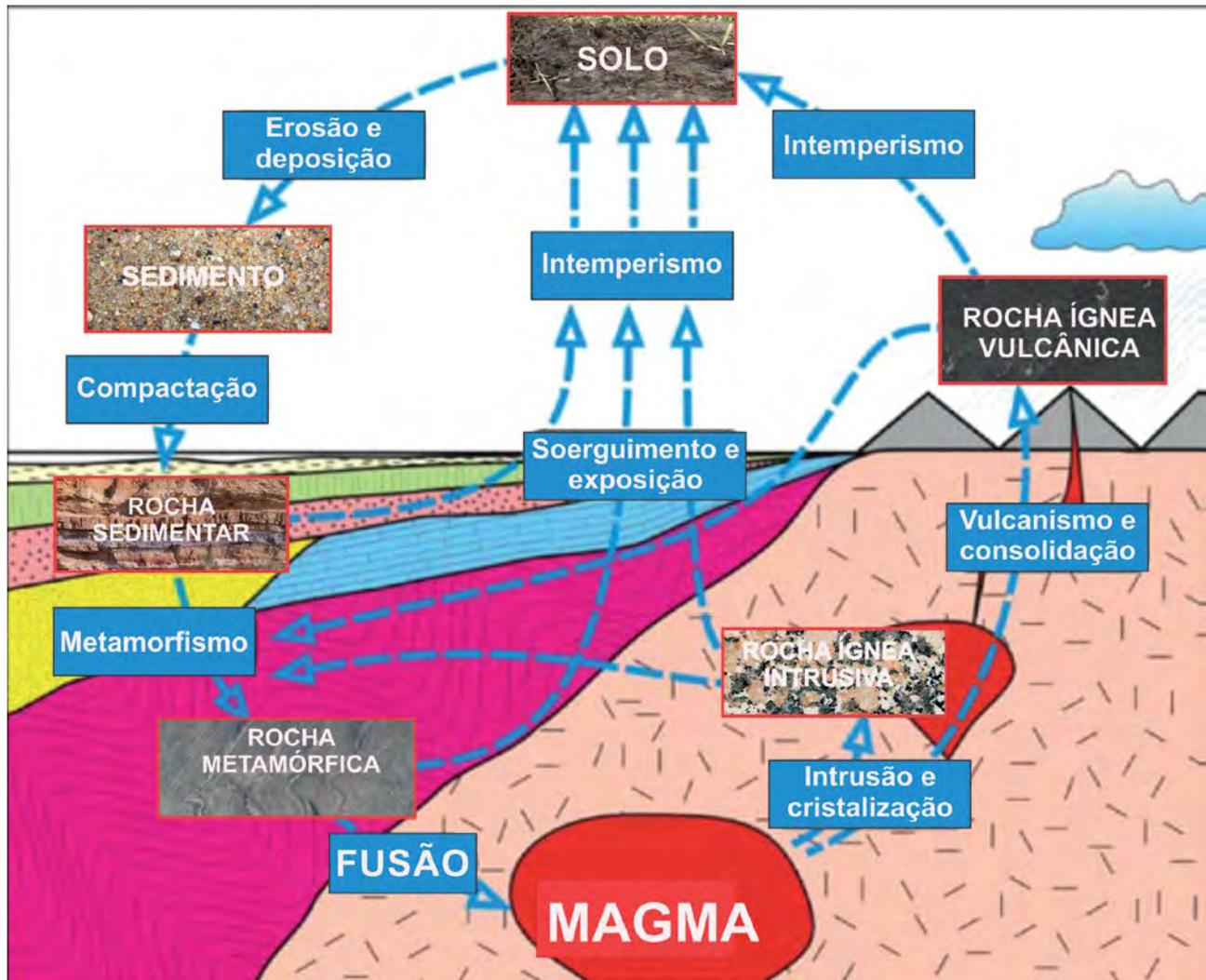


Figura 7.3 O ciclo das rochas. Adaptado a partir de Carneiro (2009).

tamanho ou a forma dos minerais sem mudar radicalmente a composição mineralógica. Denomina-se intemperismo químico, ou decomposição, toda ação que altera a composição química da rocha, transformando os minerais primários da rocha em minerais secundários. Já o intemperismo biológico, que envolve a ação dos seres vivos, contribui para acentuar o intemperismo físico ou químico, tanto mecânica quanto quimicamente, por meio de substâncias produzidas pelos organismos, ou geradas a partir de sua decomposição. De uma região para outra da Terra, dependendo das condições climáticas,

de distribuição da vida e das formas de relevo, há predomínio de modificações físicas, químicas ou bioquímicas.

A rocha, quando passa por processos intempéricos, forma camadas de materiais desagregados onde se formam os solos, processo que recebe o nome de pedogênese. O material solto torna possível desenvolver-se a vida de plantas e pequenos animais que por sua vez contribuem para a decomposição, ao formar o húmus. O húmus nos solos, além de representar nutrientes armazenados de modo seguro para sustentar a vida, são também

um modo de reter carbono na forma de moléculas complexas, e evitar seu retorno à atmosfera como um dos principais gases-estufa. A cadeia de processos de intemperismo pode atuar sobre qualquer rocha exposta à superfície da Terra, e assim facilitar o papel da erosão em promover o desgaste desses materiais e seu transporte. Ao serem deslocadas, as partículas recebem o nome de sedimentos, que são transportados e depositados em depressões do relevo ou levados até o fundo do mar.

A sedimentação é o processo de acumulação dos sedimentos em depressões, chamadas bacias sedimentares, onde, dependendo das condições e da profundidade a que os sedimentos são submetidos, o peso dos sedimentos acumulados e a movimentação de fluidos provocam compactação e cimentação dos materiais. A transformação de um sedimento em rocha sedimentar é chamada diagênese.

Quando as placas litosféricas se movimentam durante o Tempo Geológico, as rochas podem ser levadas a ambientes muito diferentes daqueles sob os quais se formaram. Qualquer rocha submetida à ação de altas pressões e temperaturas, além da percolação de fluidos, passa por transformações dos minerais que as constituem, além de modificar sua estrutura, tornando-se orientadas. Rochas sedimentares, enterradas a profundidades suficientes e submetidas ao profundo calor interno da Terra e a pressões dirigidas, terá como consequência a reorientação dos minerais, no processo denominado metamorfismo.

Durante a deposição, diagênese e metamorfismo progressivo de um sedimento argiloso (tamanho do grão menor que 0,002 mm), ele passa por uma série de etapas. As rochas envolvidas nessas transformações permanecem no estado sólido, e podem formar rochas sedimentares, como o argilito ou folhelho, ou podem dar origem a rochas metamórficas, como a ardósia, filito, xisto e gnaíse. Se as condições de metamorfismo

forem muito intensas, as rochas podem se fundir, parcial ou totalmente, e gerar magmas. Estes, ao se solidificar, darão origem a novas rochas ígneas. Somente rochas que tenham atingido alta temperatura, equivalente à dos gnaíses, poderiam atingir condições extremas capazes de realizar a fusão parcial ou total do material. O magma assim formado, se for resfriado lentamente, dará origem a uma rocha plutônica; caso contrário, se for extravasado na superfície da Terra, formará uma rocha vulcânica.

Raríssimas vezes, sob condições naturais, um sedimento pode ser transformado, repentinamente, em material fundido. Quando há impactos de corpos celestes de grande porte, nas proximidades da área impactada pode haver fusão instantânea de rochas e materiais, mas esse fenômeno tem distribuição extremamente limitada na Terra. Quando ocorre intrusão de uma grande massa ígnea (magma), pode haver nas vizinhanças da intrusão a fusão parcial do material adjacente. Mesmo sob tais condições extremas, um eventual sedimento acabaria por sofrer algum tipo de metamorfismo. As condições que determinam fusão de material durante o metamorfismo progressivo são o aumento de temperatura, a diminuição de pressão ou a introdução de água no sistema, que rebaixa o ponto de fusão de diversos minerais.

O magma é um líquido parcial ou totalmente fundido, de alta temperatura, em torno de 700 a 1.200°C, proveniente do interior da Terra, resultante do aquecimento e fusão das rochas sob altas temperaturas e em determinadas condições e locais da litosfera ou astenosfera. Muitas vezes o magma carrega consigo metais valiosos e, portanto, jazidas de vários metais como ouro, platina, cobre e estanho podem associar-se a corpos de rochas ígneas.

As rochas ígneas vulcânicas, também conhecidas como efusivas, se formam quando a migração do magma alcança a superfície da Terra, por processos associados ao tipo de vulcanismo atuante. Nos

vulcões, o magma, que agora pode ser chamado de lava, atinge a superfície da crosta e se resfria rápido ao entrar em contato com a temperatura ambiente, com a consequente consolidação das rochas. Os basaltos são as rochas vulcânicas mais comuns. Devido à solidificação praticamente instantânea (consolidação), não há tempo para os cristais se desenvolverem, sendo muito pequenos, invisíveis a olho nu (<1 mm). Para situações em que o magma se cristaliza no interior da crosta, próximo à superfície, mas com resfriamento um pouco mais lento que o das rochas vulcânicas, podem se formar cristais de tamanho pequeno (~1 mm), visíveis a olho nu. Rochas deste tipo são denominadas rochas subvulcânicas, como o diabásio.

Os movimentos da litosfera por sua vez promovem o aparecimento das rochas na superfície. Quando partes das cadeias de montanhas são erodidas, o alívio de peso da parte superior da crosta faz com que exista um “empuxo” da parte inferior e a superfície da crosta seja soerguida. Os processos erosivos revigoram sua atuação e o Ciclo das Rochas é realimentado.

O ciclo possui ligações que podem ser estabelecidas com outros ciclos interligados, como os da água e do carbono. Uma consequência do Ciclo das Rochas é o fato de que os processos envolvidos determinam a existência de bens minerais úteis ao homem, ou responsáveis por diversos desastres ambientais, relacionados às dinâmicas interna e externa do planeta.

As rochas dos continentes e dos fundos dos oceanos constituem registros das transformações relacionadas ao Ciclo das Rochas, que funciona desde os primórdios da história geológica da Terra, e acompanham a evolução do planeta. O Ciclo das Rochas envolve as fontes de energia dos processos terrestres que são, essencialmente, três: a energia proveniente do sol, a energia (calor) proveniente do interior do planeta e a gravidade.

Os materiais terrestres estão continuamente sob a ação de um ou mais agentes que provocam desequilíbrios. As transformações, por sua vez, representam respostas a fluxos de energia na Terra. A relação dinâmica entre os agentes e as configurações da parte mais externa do planeta, interligadas naturalmente à Tectônica Global, constitui o motor do Ciclo das Rochas.

### 3. FORÇAS ENDOGÊNICAS E O PARADIGMA DA TECTÔNICA DE PLACAS

#### 3.1. Tectônica de placas

A tectônica global ou tectônica de placas é o arcabouço conceitual para compreensão de muitos aspectos dos terremotos e vulcões, cuja ocorrência não é aleatória, mas consequência lógica do deslocamento da crosta terrestre e resultante criação e destruição da crosta e rochas subjacentes do manto superior (**ex:** Montgomery, 1995; Murck et al., 1996; Press et al., 2006).

O paradigma da tectônica de placas foi desenvolvido durante os anos 60, e explica a maioria das feições topográficas da superfície terrestre e dos oceanos (**ex:** Hess, 1962; Vine & Matthews, 1963; Wilson, 1965; LePichon, 1968; Morgan, 1968). A teoria é baseada no mapeamento de anomalias magnéticas e terremotos, pelos quais é possível definir grandes regiões da superfície terrestre que movem-se como unidades (placas), com terremotos ocorrendo nos limites destas unidades ou placas (Fig. 7.4). A tectônica de placas também explica o comportamento dinâmico e cinemático de outras partes da Terra em termos de placas litosféricas rígidas. Estas placas, que compreendem o manto superior e na maioria dos casos tanto crosta oceânica quanto continental, flutuam lentamente em uma astenosfera relativamente viscosa, e movem-se uma em relação a outra

sobre a superfície terrestre. O movimento de placas é dirigido por convecção mantélica, o principal mecanismo pelo qual calor, derivado da desintegração radioativa, é transferido das profundezas no interior da Terra, para a superfície.

Um dos axiomas da tectônica de placas é que estas são fortes e rígidas, com deformação ocorrendo apenas nas suas margens, onde as placas interagem. Isto é consistente com o fato da maioria das principais feições topográficas terrestres ocorrerem em margem de placas atuais ou antigas e a maior parte da atividade sísmica e vulcânica em limites de placas ativas.

O movimento das placas resultam em três tipos de limites de placas:

**1)** Limites de placas construtivas ou divergentes são cordilheiras alongadas onde nova crosta oceânica

é formada; subsequentemente a crosta afasta-se do eixo da cordilheira por expansão do fundo oceânico e subside à medida que a litosfera esfria;

**2)** Limites de placas destrutivas ou convergentes são frequentemente marcados por fossas oceânicas, onde litosfera oceânica é subduccionada para o interior da astenosfera (quando dois continentes colidem resulta em uma cadeia de montanhas);

**3)** Limites de placas conservativos ou transformantes, placas adjacentes deslizam uma pela outra, sem que haja criação ou destruição de material. As placas principais são mostradas na figura 7.4, a maioria das quais contém tanto litosfera oceânica quanto continental, e movem-se uma em relação a outra.



**Figura 7.4** Placas tectônicas: Mapa mostrando as configurações atuais das placas e movimentos das placas na Terra; setas brancas indicam movimento relativo ao longo dos limites de placas e as setas amarelas indicam movimentos absolutos das placas relacionados a um sistema de referências baseado em pontos quentes estacionários. Limites de Placas construtiva (dorsais meso-oceânicas) são marcados por linhas verdes, limites de placas destrutivas (zonas de subducção) por linhas vermelhas e limites de placas conservativas (falhas transformantes) por linhas cinzas. **Adaptado** de Frisch et al. (2011).

### 3.2. Terremotos

Os terremotos resultam da liberação de tensão na litosfera. Podem ser definidos como um abalo do interior da Terra causado por ondas sísmicas que emanam de falhas que se rompem subitamente.

A maioria dos terremotos ocorrem em limites de placas e estão relacionados a processos da dinâmica global ou tectônica de placas (Fig. 7.4). Na maioria dos terremotos, o mecanismo de falhas é determinado pelo tipo de limites de placas: falhamentos normais sob tensão extensional

ocorrem nos limites de placas divergentes, falhas de empurrão sob tensão compressiva ocorrem em limites convergentes e movimentos direcionais, ao longo de falhas transformantes.

O Brasil está situado no interior de uma placa litosférica, a Placa Sul-Americana, onde os sismos intraplaca são rasos (até 30-40 km de profundidade), e de magnitudes baixas a moderadas. O Nordeste é a região que mais sofre com abalos sísmicos, com destaque para região de João Câmara-RN (Fig. 7.5).



**Figura 7.5** Imagens dos efeitos do sismo de João Câmara-RN no ano de 1986. O primeiro tremor - sentido inclusive em Natal - aconteceu no dia 21.08, e alcançou 4.3 na Escala Richter. No mês seguinte, foram dois eventos sísmicos: 4.3 e 4.4, respectivamente. O terremoto principal ocorreu no dia 30.11, com magnitude de 5.1, seguido por milhares de réplicas. **Fonte** Folha São Paulo (2014).

A escala Richter, utilizada para medir o tamanho de um terremoto, é determinada a partir da amplitude do movimento da terra, quando as ondas sísmicas são registradas em sismógrafos. A magnitude do momento é baseada no produto do movimento da falha, na área de “quebra” da falha, e na rigidez da rocha.

Existem dois tipos de ondas sísmicas, as ondas primárias (P) e as ondas secundárias (S), que viajam através do interior da Terra (as chamadas ondas interiores). As ondas P (primárias), que são conduzidas por todas as formas de matéria e movem-se mais rapidamente, e as ondas S (secundárias), que são conduzidas apenas por meios sólidos e movem-se com cerca da metade da velocidade das ondas P. Ondas superficiais necessitam de um espaço livre para ondular. Elas movem-se muito mais suavemente que as ondas interiores.).

Riscos relacionados a terremotos incluem ruptura e abalo de terra, liquefação, deslizamentos, tsunamis, inundações costeiras e fogo. As vibrações da Terra podem danificar ou destruir edifícios e outras estruturas e também podem provocar avalanches. O fogo é uma séria ameaça que segue um terremoto. Terremotos no fundo marinho podem provocar tsunamis, ondas que viajam através dos oceanos à velocidades de até 800 km/h podendo atingir alturas maiores que 20 metros ao alcançar a costa; os tsunamis por sua vez podem causar destruição generalizada quando alcançam as águas rasas costeiras.

Apesar de não ser possível interromper um terremoto, seus efeitos negativos podem ser amenizados ou interrompidos por:

- 1) Utilização de estruturas mais resistentes em zonas de falhas ativas; a construção em zonas de terremotos pode ser regulamentada de forma que os edifícios e outras estruturas sejam suficientemente fortes para resistir as vibrações destrutivas;
- 2) Identificação, e quando possível evitar o desenvolvimento em áreas de risco de terremotos; a construção em áreas de abalo sísmico pode ser regulamentada de forma que os edifícios e outras estruturas não sejam localizadas em áreas instáveis;
- 3) Aumentar o conhecimento público e preparação para terremotos em áreas afetadas; pessoas que vivem em uma área propícia a terremotos deveriam ser informadas acerca do que fazer quando ocorre um terremoto, e autoridades públicas deveriam planejar-se antecipadamente e estarem preparadas com suprimentos de emergência, equipes de salvamento, procedimentos de evacuação, planos contra incêndios e outras medidas para minimizar as consequências de terremoto.
- 4) Aprendendo sobre padrões de sismicidade ao longo de zonas de falha e sobre fenômenos precursores de terremotos para fazer previsões precisas. Atualmente os cientistas podem caracterizar o grau de risco em uma região, mas eles não podem prever um terremoto com o grau de precisão que seria necessário para alertar uma população horas ou dias antes. Eles procuram por sinais ou fenômenos premonitórios que possam ser utilizados para indicar o período e o local de um terremoto mais precisamente.

### 3.3. Vulcanismo

O vulcanismo ocorre quando rocha fundida no interior da Terra ascende a superfície por terem densidade menor que as rochas circundantes. Na realidade a rocha fundida é comprimida para cima pelo peso das camadas subjacentes.

A maior parte da atividade vulcânica está concentrada próxima ao limite de placas. A crosta oceânica forma-se a partir de magma basáltico que ascende da astenosfera pelas fissuras do sistema de rifts - cadeia oceânica onde as placas se separam. Lavas riolíticas (félsicas), andesíticas (intermediárias), e basálticas (básicas) tendem a ser expelidas com violência em zonas convergentes. Os basaltos são típicos de ilhas vulcânicas encontradas em convergência de duas placas oceânicas. Andesitos e riolitos são mais comuns em cinturões vulcânicos de limites convergentes de placa oceânica com placa continental. No interior das placas o vulcanismo pode ocorrer acima de *“hot spots”* ou pontos quentes, que são manifestações de plumas de material quente que ascendem das profundezas do manto.

Os vulcões diferem no estilo de erupção e tipos de riscos que apresentam. Aqueles ao longo de cadeias de expansão e em *hot spots* tendem a ser mais tranquilos, geralmente com erupções fluidas de lava basáltica. Vulcões em zonas de subducção produzem magma muito mais viscoso, rico em sílica, carregado em gás e além da lava podem emitir grandes quantidades de piroclásticos, fluxos piroclásticos e gases tóxicos.

Atualmente os vulcanologistas podem detectar os sinais iniciais de que um vulcão pode entrar em erupção num futuro próximo, mas não podem prever o período exato ou o tempo de erupção. Vulcões individuais, entretanto, mostram estilos eruptivos característicos (em função do tipo de magma) e padrões de atividade. Portanto o conhecimento da história eruptiva de um vulcão permite antecipação da natureza geral das erupções.

Efeitos secundários das erupções vulcânicas: Uma única erupção vulcânica pode ter um impacto global no clima, apesar dos efeitos serem breves. Erupções explosivas intensas colocam grandes quantidades de poeira vulcânica na atmosfera. A poeira pode levar vários dias para assentar, e neste interim, bloquear parcialmente a entrada de raios solares, causando resfriamento.

Além da sua beleza e efeitos destrutivos os vulcões também apresentam benefícios. A atmosfera e os oceanos podem ter sido originados em episódios vulcânicos de um passado distante. Solos derivados a partir de material vulcânico são excepcionalmente férteis devido aos nutrientes minerais que contém. Rochas vulcânicas, gases e vapor também são fonte de importantes materiais industriais e químicos, tais como ácido bórico, amônia, enxofre, dióxido de carbono e alguns metais. A circulação da água marinha através de fissuras no sistema de cadeias meso-oceânicas é um dos principais fatores na formação de minérios.

Atualmente não existem vulcões no Brasil. Entretanto, em um passado geologicamente distante, havia uma grande quantidade de vulcões em nosso território. Os mais recentes se manifestaram em regiões oceânicas, originando ilhas pertencentes ao Brasil no Atlântico, incluindo Fernando de Noronha. O Pico do Cabugi (Fig. 7.6), 7 km a oeste de Lages, Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, é um dos muitos necks da província basáltica alcalina neogena do Rio Grande do Norte, registrando o mais jovem (19,7 Ma) magmatismo continental do Brasil (Cordani, 1970).



**Figura 7.6** Vista panorâmica do Pico do Cabugi-RN, com suas rochas basálticas se elevando a cerca de 500 metros acima do nível regional. O talus do Pico é coberto por uma vegetação rala, arbustiva, típica de climas semiáridos, quentes e secos como o do sertão nordestino. **Fonte** Ferreira e Sial (2006).

## 4. FORÇAS EXÓGENAS

É na superfície terrestre que nós observamos a interação entre o calor interno da Terra, responsável pela formação de montanhas e deslocamento dos continentes), o calor externo proveniente do sol, que direciona o vento e fornece energia para guiar o ciclo hidrológico, e a força da gravidade, que tenta puxar todas as coisas para um mesmo nível,

formando-se assim um ciclo de decomposição, denudação e sedimentação (**ex:** Montgomery, 1995; Murck et al., 1996; Press et al., 2006). Fenômenos geológicos provocados por agentes externos (energia do sol, águas e vento) são chamados de exógenos ou superficiais.

#### 4.1. Enchentes e correntes

A água, isoladamente, é o agente mais importante a esculpir a superfície terrestre. Montanhas podem ser erguidas por ação da tectônica de placas e vulcanismo, mas são moldadas primariamente pela água. São as correntes que escavam vales, nivelam planícies e movem enormes quantidades de sedimentos de um local para outro.

Enchentes/inundações provavelmente são os perigos geológicos catastróficos mais amplamente vivenciados. Algumas enchentes são resultantes de eventos anormais, como por exemplo, o colapso de uma represa, mas a grande maioria é perfeitamente normal, e com alguma extensão previsível, parte do funcionamento natural das correntes. Portanto, é interessante observar como a água move-se através do ciclo hidrológico e quais as características básicas e comportamento das correntes.

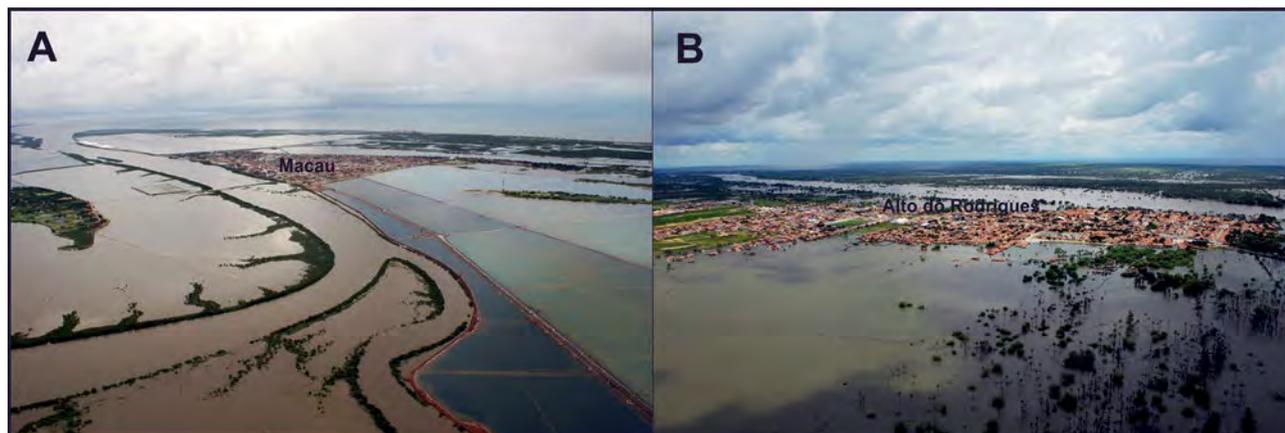
Uma corrente é um corpo de água em movimento confinado ao interior de um canal, independente do tamanho. Flui montanha abaixo através de baixos topográficos levando água sobre a superfície terrestre. A região drenada por uma corrente de água é chamada de bacia de drenagem. O fluxo pode ser do tipo laminar ou turbulento de acordo com a velocidade das correntes, geometria do canal e viscosidade do fluido. Os sedimentos são transportados como carga em suspensão (partículas finas) ou arrasto e saltação da carga de fundo (sedimento mais grosso).

Os rios constroem canais, que podem ter tamanhos grandes ou pequenos, dependendo da inclinação do trecho de encosta e do volume de água disponível. Ao longo desses canais os rios movimentam sedimentos, muitas vezes com grande turbulência. Rios com grande volume de água e alta declividade possuem grande capacidade de transporte e movimentam partículas sedimentares de todos os tamanhos. Nos trechos onde a declividade se reduz, a velocidade das águas se reduz também. Mesmo que o volume de água seja grande, a competência do fluxo diminui, e determinadas partículas de

maior tamanho acabam sendo depositadas. A capacidade de transporte de muitos rios pode ser extremamente grande, como é o caso do Amazonas, que leva até o mar grandes volumes de argilas, siltes e areias todos os anos ao transportar um fluxo total de material em suspensão de 600-800 x 10<sup>6</sup> ton ano<sup>-1</sup> (Filizolla & Guyot, 2011). No Amazonas tudo é superlativo: Sua bacia de drenagem abrange 40% da área da América do Sul (Lehner et al., 2008); nasce nos andes peruanos a uma curta distância do oceano Pacífico e desagua no oceano Atlântico a mais de 6.500 km de extensão, e contribui com cerca de 17% da água doce da Terra, que entra no oceano (Callède et al., 2010). Em contraste, os rios da região Nordeste do Brasil apresentam baixo transporte de sedimentos em função do pequeno tamanho das suas bacias de drenagem, associados a um baixo relevo e baixos valores de precipitação.

As correntes são agentes ativos do transporte de sedimentos. Elas são também forças poderosas no modelamento da paisagem, constantemente envolvida na erosão e deposição, com seus canais deslocando-se naturalmente sobre a superfície terrestre. Uma enchente ou inundação é a resposta de uma corrente a uma entrada anormalmente alta de água em um curto espaço de tempo.

Os riscos associados às inundações afetam todos os rios, independente do seu tamanho (Fig. 7.7) e incluem desde danos na estrutura de edifícios e no interior das casas (móveis), perda de vidas, destruição de estradas, pontes, construções, prédios históricos, inundação de cemitérios, até destruição de habitat de vida selvagem, impactos à saúde (distúrbios relacionados à poluição, choque elétrico, fadiga, stress, depressão), interrupção de serviços de transporte e elétricos, ausência no trabalho, impacto econômico na indústria, utilização indevida dos fundos do governo, mudanças nos canais de rios.



**Figura 7.7** Enchente no rio Açu-RN no ano de 2009. **A)** salinas e fazendas de camarão alagadas no entorno da cidade de Macau; **B)** cidade alagada de Alto do Rodrigues. **Fotos** Getulio (2009).

As enchentes de um rio podem ser previstas por:

- 1) Técnicas estatísticas para prever a frequência de enchentes de uma dada magnitude (análise do registro hidrológico-descarga máxima anual);
- 2) Utilização de modelos e mapeamento para determinar a extensão da área associada com riscos de inundação de uma dada magnitude (fotografias aéreas e imagens de satélite, paleoenchentes);
- 3) Monitoramento do progresso de uma tempestade para fornecer planos de rápido atendimento aqueles que possam ser afetados por uma enchente.

Regiões sujeitas a inundação, e o grau de risco, podem ser identificadas em mapas precisos, bem como através de registros sobre enchentes ocorridas em épocas passadas. Entretanto, estes registros podem não se estenderem por períodos extensos o suficiente para permitir uma previsão precisa sobre as enchentes raras, mas severas. Além disso a atividade humana pode provocar mudanças regionais nos padrões de remoção da água do solo pela drenagem natural ou características das enchentes através do tempo, diminuindo a utilidade dos registros históricos na previsão de problemas futuros.

Estratégias designadas para minimizar os prejuízos das inundações incluem restrição ou proibição de desenvolvimento em planícies de inundação, controle do tipo de desenvolvimento das planícies de inundação, canalização, utilização de barragens, diques e represas controladoras do fluxo.

#### 4.2. Movimentos de massa

Enquanto o calor interno direciona os processos de formação de montanhas, a força da gravidade atua para trazê-las abaixo. Gravidade é o grande nivelador. Na superfície da Terra o processo de erosão tem início pelos chamados movimentos de massa, que são deslocamentos de grandes volumes de materiais pelo efeito gravitacional, em direção à base das encostas. Outro tipo de deslocamento muito comum ao longo das encostas são os movimentos de partículas isoladas, levadas pela água da chuva e pelas enxurradas.

Estes movimentos podem ser imperceptíveis (muito lentos) ou muito rápidos. As massas consistem de substrato; material consolidado, incluindo sedimentos compactados ou regolito; ou material inconsolidado, tais como sedimentos incoesos, facilmente desagregados.

Os movimentos de massa são classificados de acordo com:

- 1) a natureza do material (rocha ou detrito inconsolidado),
- 2) a velocidade do movimento (cm/ano a km/h) e,
- 3) a natureza do movimento (deslizamento: material move-se como uma unidade; fluxo: material move-se como se fosse um fluido).

Os movimentos de rocha incluem:

- 1) de rochas (5 km/h ou mais, blocos individuais),
- 2) deslizamento de rocha (1 km/h ou mais, grandes massas de rochas) e,
- 3) avalanche de rocha (5 km/h ou mais, grandes massas de material rochoso fluidificado).

O material inconsolidado move-se por:

- 1) arrasto- “*creep*” (movimento dos solos e outros detritos à velocidades de 1-10 mm/ano),
- 2) desmoronamento (deslizamento lento, como uma unidade),
- 3) deslizamento de detritos (move-se mais rápido que o desmoronamento),
- 4) avalanche de detritos (fluxo mais rápido),
- 5) fluxo de terra (km/h, material relativamente fino),
- 6) fluxo de lama (vários km/h, grandes quantidades de água) e,
- 7) fluxo de detritos (km/h, material mais grosso que areia).

Os três fatores com maior influência na predisposição do material que move-se talude abaixo são:

- 1) a inclinação e instabilidade do talude ou encosta;
- 2) a natureza do material- inconsolidado ou consolidado (depende da geologia) e,
- 3) o conteúdo de água do material (depende da porosidade e da quantidade de chuva a que foi exposto).

Os três atuam em conjunto, mas a inclinação do talude e o conteúdo de água são mais influenciados pela atividade humana.

Taludes tornam-se instáveis quando ficam mais inclinados que o ângulo de repouso (ângulo máximo que um material inconsolidado pode suportar). Taludes ou encostas em material consolidado também podem tornar-se instáveis quando a vegetação é retirada ou o ângulo de inclinação é aumentado. A água absorvida pelo material contribui para a instabilidade de duas formas: pela diminuição da fricção interna (e assim a resistência ao fluxo) e pela lubrificação dos planos de fraqueza do material. Movimentos de massa podem ser provocados por terremotos ou por absorção rápida de grandes quantidades de água após uma chuva torrencial. Em muitos locais a encosta chega a um ponto de instabilidade tal que a mais suave vibração pode provocar um deslizamento, fluxo ou queda.

O Brasil é considerado muito suscetível aos movimentos de massa devido às condições climáticas marcadas por verões de chuvas intensas em regiões de grandes maciços montanhosos:

- i) Nos centros urbanos os movimentos de massa têm tomado proporções catastróficas,
- ii) Atividades humanas como cortes em talude, aterros, depósitos de lixo, modificações na drenagem, desmatamentos, entre outras, têm aumentado a vulnerabilidade das encostas para a formação desses processos,
- iii) Essa condição é agravada, principalmente, quando ocorrem ocupações irregulares, sem a infraestrutura adequada, em áreas de relevo íngreme.

Os deslizamentos (Fig. 7.8) constituem o principal tipo de movimento de massa monitorado e alertado pelo CEMADEN (Centro Nacional de Monitoramento e Alertas de Desastres Naturais).



**Figura 7.8** Movimentos de massa após chuvas torrenciais. **A) e B)** Bairro de Mãe Luiza, Natal-RN em 2014; **C)** Bairro Garcia em Blumenau-SC em 2008. **Fotos A) e B)** Grupo de pesquisa Georisco (Lima et al. 2020); **C)** Aumond (2008).

Fatores responsáveis por movimentos catastróficos de massa e como tais movimentos podem ser prevenidos ou minimizados: a análise dos movimentos de massa, tanto naturais quanto induzidos pela atividade humana, mostra que um dos fatores que mais contribuem para os movimentos catastróficos é o aumento na inclinação do talude ou encosta, seja por processos erosionais, por construções humanas ou escavações. A absorção de água a partir de chuvas prolongadas ou torrenciais exerce um forte controle na estabilidade da encosta ou talude. A atitude estrutural das camadas, especialmente quando o acamamento apresenta mergulho paralelo a encosta, pode promover movimentos de massa.

Erupções vulcânicas podem produzir grande quantidade de cinzas e outros materiais que provocam instabilidade. Os deslizamentos e fluxos de material vulcânico são provocados por terremotos que acompanham a erupção. Perda de vida e danos à propriedade devido movimentos de massa catastróficos podem ser prevenidos ou reduzidos pela modificação da geometria do talude, reduzindo a carga ou peso atuante no talude, plantando vegetação, ou retirando água do solo ou rocha. Em áreas propícias a movimentos de massa, o desenvolvimento deveria ser restrito.

Os movimentos de massa podem ser prevenidos:

- 1)** ao evitar construções em áreas favoráveis a movimentos de massa,
- 2)** ao evitar construções em locais onde o talude é naturalmente estável e,

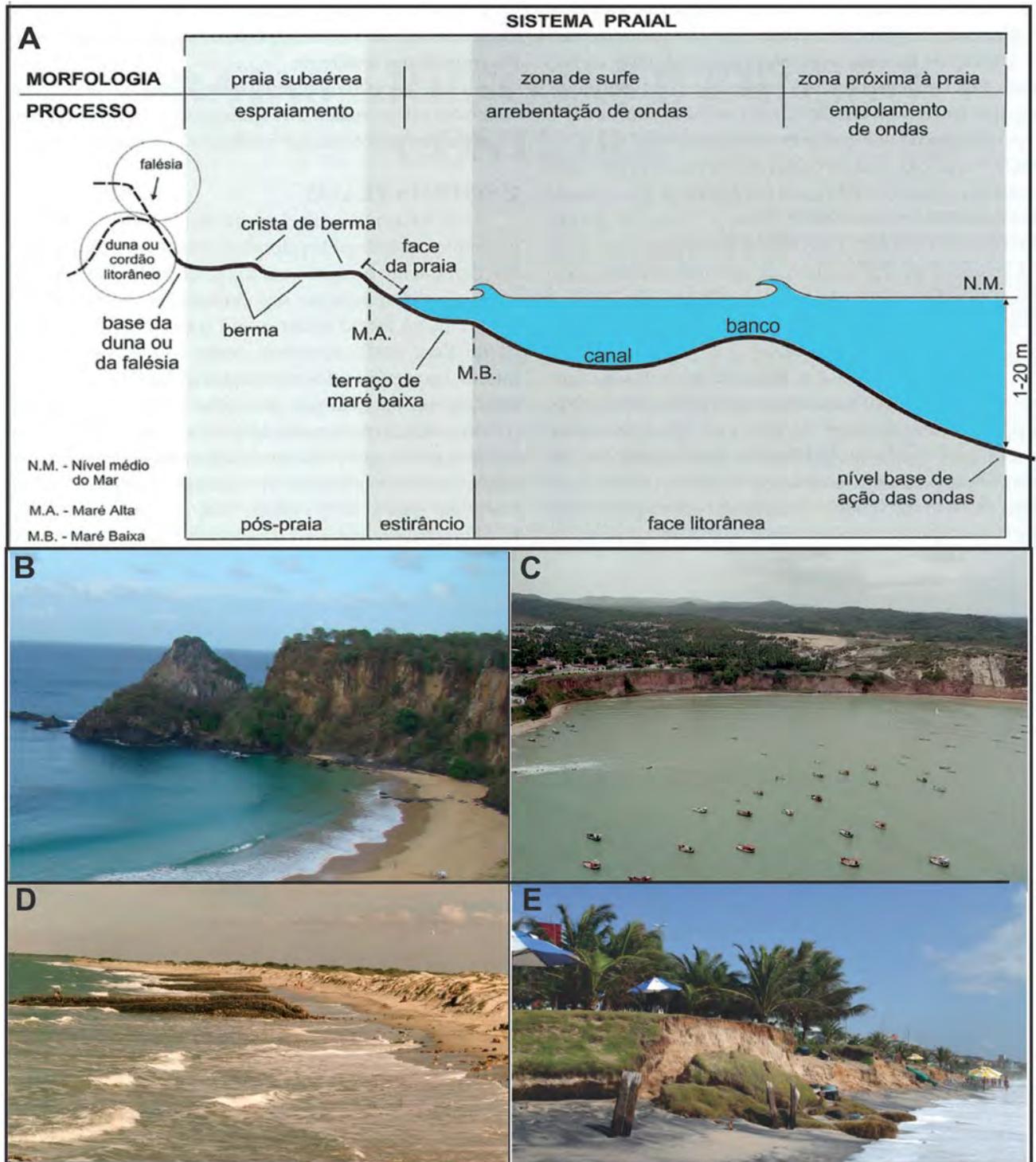
**3)** como a saturação é um fator crítico, deve-se utilizar a engenharia para drenagem da água.

#### 4.3. Processos em zonas costeiras

A maior parte da população mundial vive próxima ao oceano (~100 km). Isto reflete nossa dependência dos oceanos e os benefícios econômicos oferecidos pelo fácil acesso aos recursos do mar. Entretanto, a concentração de um grande número de pessoas em áreas costeiras significa que o ambiente costeiro precisa absorver os impactos das atividades humanas. Isto também significa que a vulnerabilidade humana as catástrofes pode ser muito grande em zonas costeiras.

A zona costeira representa a interface entre o continente e o mar incluindo comunidades terrestres e marinhas. Fisicamente é um ambiente em constante mudança. Podem ser classificadas em: costas erosionais, caracterizadas por falésias rochosas ou por sedimentos e costas deposicionais (Fig. 7.9).

De acordo com Reading e Collinson (1996) as costas deposicionais podem ser desprovidas de sedimentos terrígenos ou siliciclásticos permitindo a formação de sedimentos bioquímicos; ou podem apresentar suprimento substancial de sedimentos terrígenos, derivados diretamente do continente (através de sistemas fluviais) ou da plataforma e costas adjacentes (por processos marinhos, Fig. 7.10).

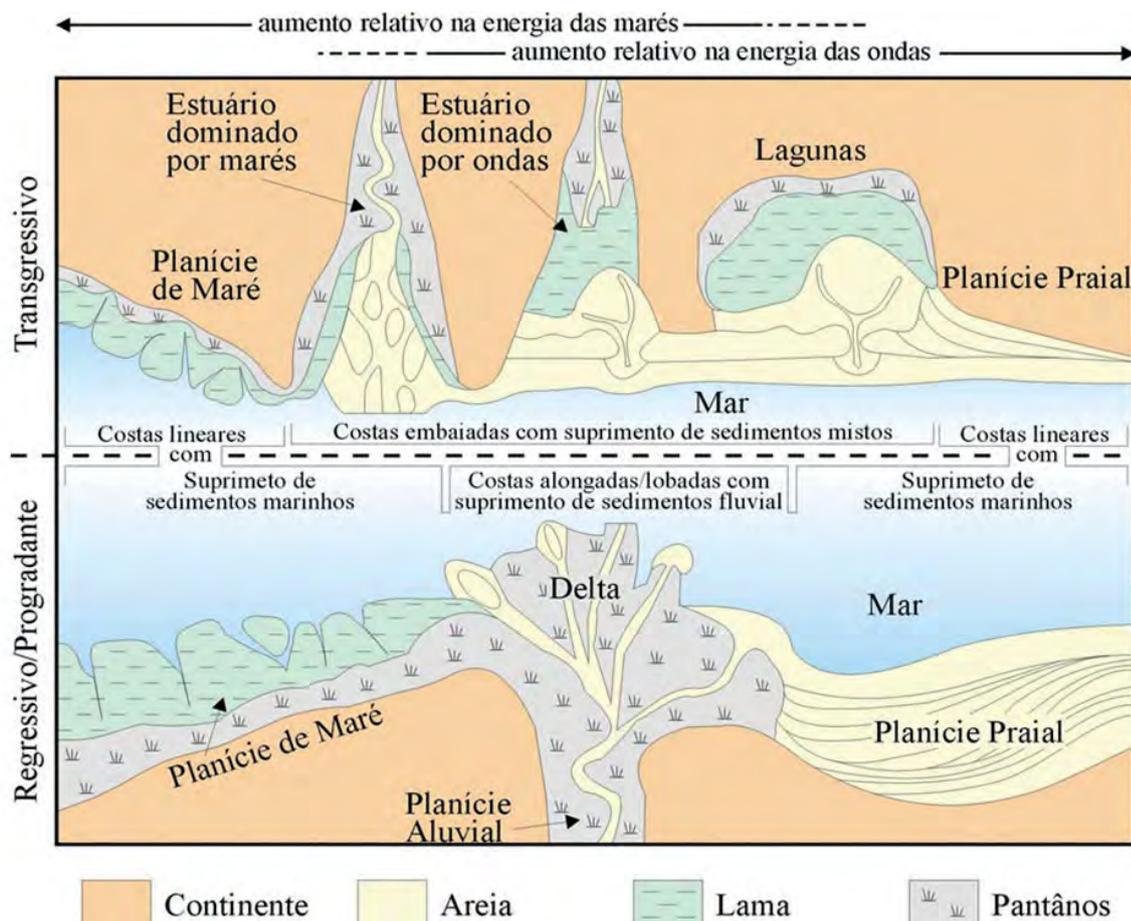


**Figura 7.9** Zonas costeiras **A)** Nomenclatura e limites do sistema praial. **Adaptado** de Short (1999) e Souza et al. (2005); **B)** Costa erosional com falésia de rochas basálticas, Fernando de Noronha; **C)** Costa erosional com falésia de rochas sedimentares. Baía Formosa-RN; **D)** Costa erosional sedimentar, Macau-RN e **E)** Costa erosional sedimentar, Ponta Negra-RN. **Fotos** H. Vital.



**Figura 7.10** Costas deposicionais **A)** sem sedimentação terrígena, APA Costa dos Corais, AL-PE; **B)** com sedimentação terrígena e fonte marinha, Praia de Genipabu-RN e **C)** com sedimentação terrígena e fonte fluvial, Foz do Amazonas-AP. **Fotos A)** ICMBio, **B)** H. Vital e **C)** O. Silveira.

Assim as zonas costeiras terrígenas ou siliciclásticas refletem a interação de processos fluviais e marinhos (correntes fluviais e energia basal) e duas fontes distintas de sedimentos (Fig. 7.11).



**Figura 7.11** Representação esquemática de zonas costeiras siliciclásticas. **Adaptado** de Reading e Collinson (1996); Boyd et al. (1992).

Quando são alimentadas diretamente a partir dos rios contemporâneos que fornecem mais sedimento do que a energia da bacia pode redistribuir, dão origem ao desenvolvimento de uma discreta protuberância denominada delta. (Ver capítulo: [Delta do Parnaíba: ecologia e conservação](#)).

Quando os sedimentos são oriundos principalmente de costas adjacentes ou plataformas, as linhas de costa tendem a ser lineares (planícies de areia, chenier, ilha barreira) se os processos dominantes são ondas e tempestades ou indentedas (foz de rios afogados ou estuários) se as marés são os processos dominantes.

Áreas costeiras apresentam grande variedade de características e nos tipos e intensidade dos processos geológicos atuantes, compreendendo uma ampla variedade de ecossistemas e paisagens, tais como mangues, estuários, praias, barreiras, recifes de coral. Cada tipo de ecossistema exibe dinâmicas físicas e biológicas próprias.

A medida em que os sedimentos aluviais chegam a costa, são distribuídos por processos marinhos: deriva litorânea, correntes costeiras, ondas, tempestades e correntes de marés.

A morfologia da linha de costa reflete essencialmente a interação entre processos de retrabalhamento e fornecimento de sedimentos: Ondas (que originam correntes), marés (que atuam no deslocamento local de ação das ondas, influenciam a biologia da zona próxima a costa e geram correntes) e tempestades que interrompem estes processos através do aumento da intensidade dos mesmos, gerando turbulências e movimentos súbitos de água e sedimentos.

As marés são resultado das subidas e descidas rítmicas das águas oceânicas. Elas resultam da atração gravitacional da lua e (em menor proporção) do sol atuando sobre a Terra. Flutuações do nível do mar também podem ser causadas por mudanças climáticas de longa duração, especialmente aquelas relacionadas a ciclos glaciais e interglaciais.

As correntes na superfície do oceano são impulsionadas pelos ventos dominantes. Tanto a norte quanto a sul do equador, as correntes são direcionadas pelos ventos alísios, mas influenciadas pelo efeito de Coriolis e deflexionadas quando encontram uma região costeira.

Como as correntes, as ondas recebem energia a partir do vento. Em mar aberto a água move-se através de movimentos circulares, com o diâmetro do círculo diminuindo com a profundidade. Quando uma onda se aproxima da costa, ela começa a sentir o fundo; seu comprimento de onda diminui e a altura da onda aumenta até que ela desestabiliza e eventualmente quebra na zona de surfe.

Forças erosivas atuam no continente, enquanto outras forças movem e depositam sedimentos, adicionando-os ao continente. A maior parte da erosão é acompanhada pela ação das ondas na zona de surfe. Correntes litorâneas e à deriva litorânea movem os sedimentos erodidos no sentido das correntes ao longo da linha de costa. O balanço entre erosão e deposição dependem das forças que atuam ao longo das áreas costeiras.

Técnicas para proteção de áreas costeiras contra erosão incluem as chamadas estabilização dura (estruturas de engenharia tais como paredões, gabiões, quebra-mar e a estabilização suave (alimentação de praias, estabilização de dunas). A estabilização de praias é cara e pode levá-la a degradação ou destruição com o passar do tempo, entretanto a beleza cênica é preservada. Já a estabilização dura, apesar de mais barata exige um bom conhecimento da área para planejamento da obra de engenharia a ser construída. Outra forma de proteger as áreas costeiras é a não intervenção, isto é, proteção das áreas costeiras através de leis de zoneamento entre outras.

#### 4.4. Variações do nível do mar

As flutuações no nível do mar, em escalas entre milhares e milhão de anos, dominaram o calendário da história geológica.

O nível do mar é um nível de equilíbrio: nível no qual as bacias oceânicas entre os blocos continentais são preenchidas com água marinha num determinado período.

Teoricamente, se as bacias oceânicas estão conectadas então existe um nível de mar médio mundial eustático (global). Já as transgressões e regressões em uma plataforma em particular são produzidas por subsidência e soerguimento regional da plataforma tectônica. Assim as variações do nível de mar relativo são os resultados de variações reais no nível do mar (eustasia) e de mudanças no nível dos continentes (tectônica e isostasia) (Morner, 1986, 1995; Suguio et al., 2005).

Para se reconstruir uma antiga posição de nível de mar relativo é necessário definir um marcador no tempo (conhecer a idade de sua formação ou deposição) e no espaço (conhecer sua altitude atual em relação a sua formação ou deposição).

As causas das variações do nível do mar dependem das relações entre elipsóide de rotação, geóide e dinâmica da superfície, ou seja, três causas principais:

- > **Glacio-Eustasia:** mudanças no volume das águas oceânicas em resposta as mudanças do volume glacial da Terra. Estas mudanças ocorreriam em velocidades da ordem de 10 milímetros por ano;
- > **Tectono-Eustasia:** mudanças no volume das bacias oceânicas devido a uma variação dos processos de dinâmica crustal. Ocorreriam em velocidades da ordem de 0,06 mm por ano; por exemplo, redução no volume das bacias oceânicas pode ser ocasionada por rápida expansão, fragmentação continental, formação de províncias ígneas, isto acarretaria transgressão. Já a colisão dos continentes (soerguimentos) acarretaria o inverso, ou seja, uma redução do nível do mar.
- > **Variáveis dinâmicas:** processos rápidos e apenas de pequenas amplitudes. Velocidades da ordem de 100 mm por ano (um mês ou menos); estas

variáveis podem ser de vários tipos, por exemplo, meteorológicas (ar, pressão, etc), hidrológicas (velocidade das correntes, etc.), oceanográficas (temperatura, salinidade, etc.).

#### 4.4.1. Perspectivas de variações futuras do nível do mar

Se toda a água do planeta, atualmente acumulada na forma de gelo derretesse, a mudança no nível do mar deveria ser catastrófica. Se todo o gelo existente derretesse, o nível dos oceanos deveria subir e as principais cidades do mundo, Rio de Janeiro, Londres, Nova York, Tóquio e muitas outras, incluindo as cidades costeiras brasileiras, seriam inundadas. As áreas baixas dos continentes, onde vive a maior parte da população, submergiria transformando-se em mares rasos, os chamados mares epicontinentais.

Não é provável que todo o gelo da Terra derreta por muitos milhões de anos ainda. Mas é muito possível que um aquecimento do clima no próximo século resulte em dois efeitos que poderiam causar uma subida do nível do mar:

- > O degelo das geleiras deveria por si só produzir uma pequena subida.
- > Expansão extremamente pequena das águas que acompanham um aumento na temperatura, deveria ser multiplicada pela quantidade de águas oceânicas aquecidas, causando uma expansão adicional dos oceanos e uma subida no nível do mar.

Enquanto o aumento do nível do mar no século XX foi dominado pela expansão térmica da água do oceano, atualmente a perda de massa de geleiras e mantos de gelo são considerados como grandes contribuintes. Há incerteza sobre como os mantos de gelo responderão ao aumento do aquecimento, no entanto, reduzindo a confiança nas projeções do nível do mar do século XXI. Em 2019, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) relatou que a partir dos modelos atuais de

projeção dos efeitos do aquecimento global nos mantos de gelo, chegou à conclusão de que o cenário de aumento de mais de 4° graus até 2100 faz com que seja provável o aumento do nível do mar entre 0,61 e 1,10 metros acima dos níveis de 1950. Nesta perspectiva, estudos mais recentes (Siegert et al., 2020) indicam que o aumento do nível do mar pode ultrapassar as atuais estimativas dos especialistas até 2100, caso não sejam adotadas medidas de combate às alterações climáticas que protejam os campos de gelo polares.

## 5. A TERRA SOB OS OCEANOS

### 5.1. Características, desenvolvimento, origem e evolução dos oceanos

O conhecimento sobre a natureza dos fundos oceânicos (crosta oceânica e manto superior) advém de quatro fontes principais (Open University, 1998):

- 1) técnicas geofísicas, notavelmente sísmica de refração e reflexão, bem como reconhecimentos magnéticos e de gravidade, e medições de fluxo de calor;
- 2) exame e medição das propriedades físicas das rochas dragadas do fundo do mar e testemunhadas na parte superior da crosta;
- 3) observação direta e fotografias do fundo do mar utilizando-se submersíveis e
- 4) estudo de complexos ofiolíticos (fragmentos de antigas litosferas oceânicas) no continente.

Estudos de refração sísmica foram os primeiros a revelarem que a litosfera oceânica consiste de camadas cuja velocidade sísmica (a velocidade na qual ondas de som viajam através das rochas) aumenta com a profundidade. Estas camadas sísmicas são numeradas de 1 (no topo) a 4, e tem sido correlacionadas com tipos de rochas: A camada 1 consiste principalmente de sedimentos sobrejacentes a crosta ígnea das camadas 2 e 3, a

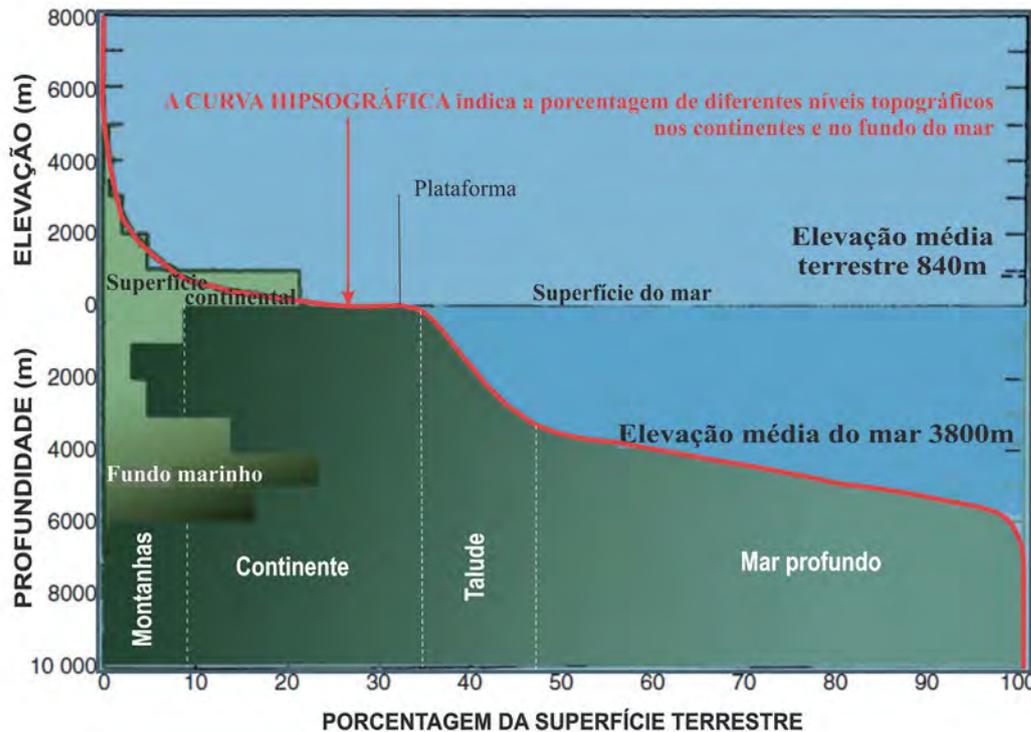
camada 4 corresponde ao manto (litosfera superior). A espessura dos sedimentos que constituem a camada sísmica 1 da crosta oceânica aumenta com a distância do eixo de expansão. A razão óbvia para isso é que quanto mais distante a crosta encontra-se da cordilheira oceânica, mais antiga ela é e mais tempo decorreu para que os sedimentos se acumulassem. A camada 2 é vulcânica, dominada por lavas almofadadas (*pillow* lavas) na porção superior e diques na porção inferior. A camada 3 é constituída por gabro e representa o conteúdo solidificado da camada magmática sub-dorsal. A espessura total da crosta oceânica ígnea normal é de cerca de 7 km. Virtualmente todas as rochas das camadas 2 e 3 são basálticas, tanto em composição mineralógica, quanto em química. A camada 4 é de composição peridotítica. As principais discontinuidades sísmicas na crosta oceânica estão na base da camada 1 e no topo da camada 4 (o Moho). Velocidades sísmicas geralmente aumentam com a profundidade, e variações no gradiente dessas mudanças de velocidade permitem reconhecer subdivisões na crosta.

As rochas mais antigas da Terra- com cerca de 4,4 bilhões de anos da Austrália Ocidental (Wilde et al., 2001)- incluem tanto sedimentos que foram depositados na água quanto evidências de antiga crosta oceânica. Na América do Sul, as rochas mais antigas (3,4 a 3,5 bilhões de anos) são encontradas no Rio Grande do Norte e Piauí, Nordeste do Brasil (Dantas et al., 2004; Pitarello et al., 2019). Desta forma infere-se que a formação dos oceanos ocorre desde o início do registro geológico e provavelmente antes disso. Entretanto, a forma das antigas bacias oceânicas só pode ser reconstruída a partir de observações de remanescentes preservados em áreas continentais. Isto ocorre porque as bacias oceânicas são feições relativamente efêmeras deste planeta: Não se conhece nos oceanos atuais nenhuma crosta oceânica mais antiga que 190 Ma.

A maioria das feições topográficas da superfície terrestre pode ser explicada a partir da tectônica

de placas (ex: Open University, 1998; Vital et al., 2005; Frisch et al., 2011; Seibold & Berger, 2017). Aproximadamente metade da superfície sólida terrestre encontra-se entre dois limites bem definidos (Fig. 7.12):

- 1) altitude de 0-1 km e
- 2) profundidade de 4-5 km. E uma proporção significativa (70-71%) encontra-se abaixo do nível do mar.

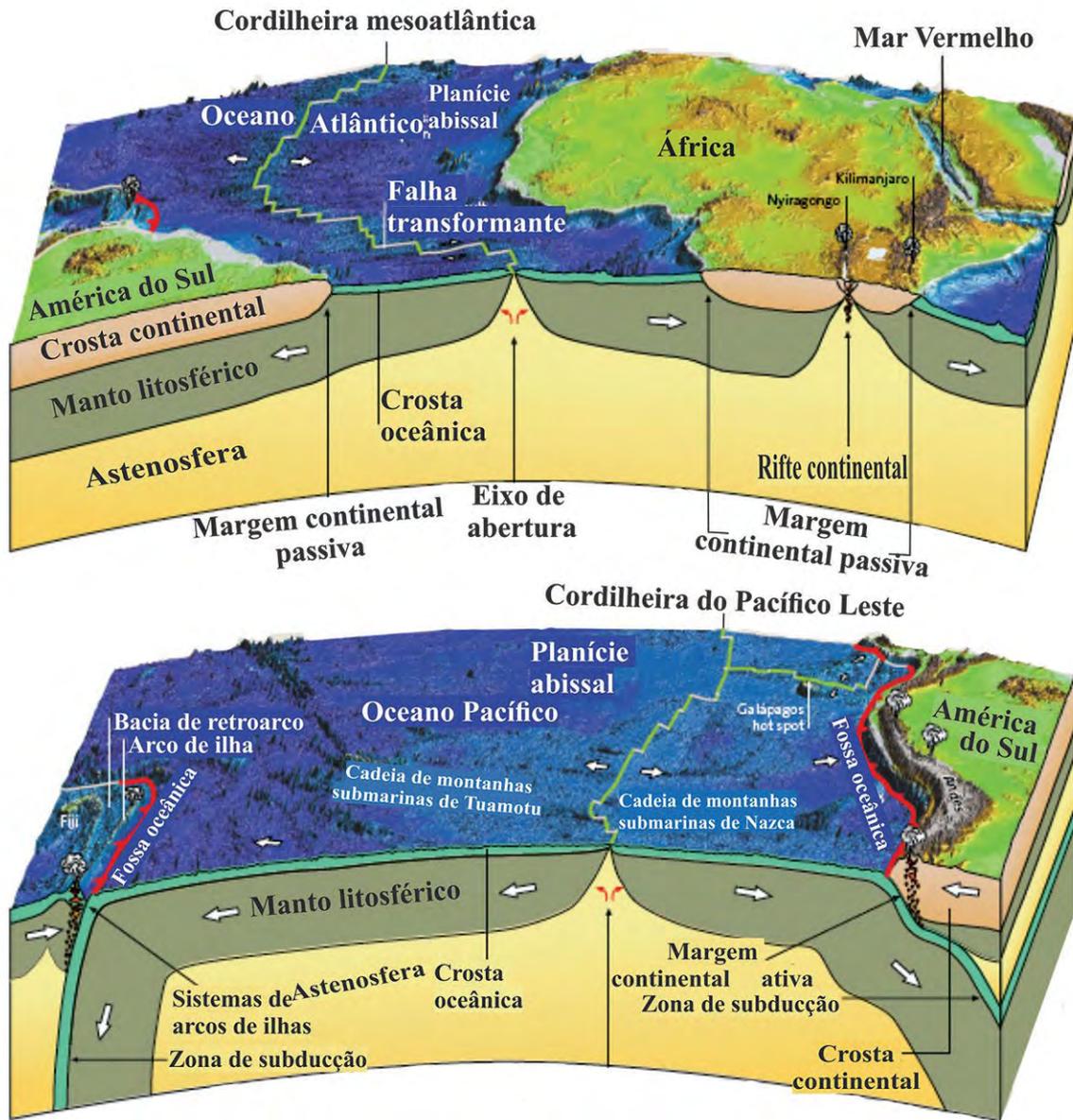


**Figura 7.12** Distribuição geral da profundidade do fundo do oceano e de elevações de terreno. Distribuição de frequência de elevações e profundidades do planeta. **Adaptado** de Sverdrup et al. (1942) por Seibold e Berger (2017).

As duas feições mais impressionantes do fundo oceânico são os sistemas de cordilheiras meso-oceânicas, que atravessam as principais bacias oceânicas (e em alguns locais invadindo os continentes) e os sistemas de fossas profundas (especialmente em torno do pacífico). Nova litosfera oceânica está sendo continuamente formada ao longo das cordilheiras (ou eixos de expansão) pela expansão do assoalho oceânico. A litosfera assim formada pode eventualmente retornar a astenosfera através das fossas, que são a expressão superficial de planos inclinados conhecidos como zonas de subducção (Fig. 7.13).

Entre as cordilheiras e as fossas encontram-se

planícies abissais cobertas por sedimentos, bem como cordilheiras subsidiárias, e uma variedade de altos e platôs, alguns dos quais, atingindo a superfície na forma de ilhas. Margeando os continentes estão as plataformas continentais, formadas por espessas acumulações de sedimentos, onde a profundidade da água é geralmente 200 m ou menos. A largura da plataforma varia de lugar para lugar. No Brasil ela é mais larga ao norte e ao sul, devido a influências dos Rios Amazonas e Prata respectivamente, que contribuem com grandes quantidades de sedimentos terrígenos; enquanto no Nordeste são estreitas, rasas com presença marcante de sedimentos bioclásticos, ou mistas (carbonáticas costa afora e siliciclásticas próximo à costa).



**Figura 7.13** Bloco Diagramas das camadas externas da Terra na região do Atlântico e do Pacífico. Os três tipos de limites de placas podem ser observados: margens continentais passivas e ativas, arcos de ilha, cadeias vulcânicas alimentadas por vulcanismo *hot-spot*, e um sistema grabens (forte exagero vertical). As placas são constituídas por crosta e manto litosférico. Dados de relevo são do etopo30 (superfície terrestre) e dados gtopo2 de Smith e Sandwell (1997), e dados etopo1 de Amante e Eakins (2009). **Adaptado** de Frisch et al. (2011).

A margem continental representa uma zona de transição, que separa os domínios continentais dos oceânicos; incluindo: plataforma continental, talude continental, sopé continental, fossa, além das planícies costeiras.

- > As plataformas continentais ocupam cerca de 7% do assoalho oceânico, com profundidade média de 130 m, podendo chegar a 550 m.
- > Os taludes continentais ocupam cerca de 9% do

assoalho oceânico e variam desde a quebra da plataforma até profundidades de 4.000 e 5.000 m. Inclinação média de 4°.

> O sopé continental estende-se desde a base do talude até profundidades de 4.000 a 6.000 m. Onde as fossas de mar profundo marcam as zonas de convergência, o sopé continental está ausente.

1. Margens continentais assísmicas (tipo Atlântico ou passiva) desenvolvem-se onde o continente e a bacia oceânica adjacente fazem parte da mesma placa. Elas estão sobre uma fina crosta continental, sobre a qual acumula-se sedimentos para construir a plataforma continental, talude e sopé. Microcontinentes são áreas da crosta continental, separadas de grandes massas continentais, formando ilhas (crosta de espessura aproximadamente normal) ou platôs submersos (crosta fina).
2. Margens continentais sísmicas (tipo Pacífico ou ativa) ocorrem onde um continente e uma bacia oceânica adjacente pertencem a diferentes placas, e a litosfera oceânica está sendo subduccionada abaixo da margem continental. São as margens de placas destrutivas. A plataforma continental é tipicamente mais estreita e o talude mais íngreme que em margens assísmicas, e uma fossa no pé do talude continental geralmente substituem o sopé continental encontrado nas margens assísmicas. Arcos de ilhas ocorrem em outro tipo de margens sísmicas (destrutivas), sendo formados por vulcões que se encontram acima de zonas de subducção, onde uma placa oceânica desce abaixo de outra.
3. Cordilheiras ou dorsais oceânicas são as feições fisiográficas (batimétricas) mais importantes das bacias oceânicas. Constituem margens de placas construtivas (*spreading axes*), onde nova litosfera oceânica está sendo gerada continuamente. Gradientes nos flancos de cordilheiras de

expansão lenta são mais íngremes que aqueles de cordilheiras de expansão rápida. *Rift-valleys* centrais (ou medianos) são melhor desenvolvidos (amplo e profundo) em cordilheiras de expansão lenta, que nas de expansão rápida.

4. Existe uma relação sistemática entre a profundidade ao topo da crosta e sua idade de formação. Isto é o resultado da subsidência e resfriamento progressivo da litosfera com a distância da margem construtiva. Esta relação permite que a idade da crosta oceânica seja estimada a partir da sua profundidade e vice-versa, trabalhando com uma boa aproximação através das principais bacias oceânicas.
5. Falhas transformantes encontram-se paralelas a pequenos círculos em torno do polo de rotação relativa das placas litosféricas. Elas são sísmicamente ativas e separam placas que se movem em direções opostas. Fora do alcance da região de compensação, elas tornam-se zonas de fraturas e permanecem no interior de uma única placa, desta forma a atividade sísmica é muito menor. Estas falhas e fraturas resultam em escarpas e fissuras no fundo oceânico. Falhas transformantes também são conhecidas como margens de placas conservativas, mas algumas falhas transformantes podem ter uma componente de expansão ou de subducção. Entretanto o sentido predominante do movimento é sempre lateral.
6. Planícies abissais ocupam extensas áreas do fundo oceânico profundo. Elas são muito planas devido ao recobrimento da topografia rugosa da crosta oceânica pelos sedimentos. Os sedimentos são fornecidos por correntes de turbidez a partir de margens assísmicas adjacentes (**ex:** Oceano Atlântico), ou depositados principalmente a partir da suspensão na água marinha (sedimentos pelágicos), especialmente ao longo de margens sísmicas, onde fossas oceânicas impedem que materiais derivados do continente alcancem a planície (**ex:** boa parte do Oceano Pacífico).

7. Montes submarinos, ilhas oceânicas e cordilheiras assísmicas são feições vulcânicas elevando-se a partir do fundo oceânico. Cadeias lineares de montes submarinos e ilhas, bem como cordilheiras assísmicas, pode ser resultado de vulcanismo *hot-spot*, onde a placa oceânica move-se sobre uma fonte de magma do manto profundo, intermitente ou continuamente ativa.
8. Medições altimétricas por satélite podem ser usadas para mapear feições no assoalho oceânico porque a superfície marinha média correlaciona bem com a batimetria oceânica. Observações batimétricas convencionais podem ser refinadas e expandidas usando estes dados.

A criação, evolução e eventual destruição de bacias oceânicas são cíclicas e tem sido denominada de Ciclo de Wilson (Cientista Canadense, Tuzo Wilson, Fig. 7.14). O ciclo inicia quando uma área continental é tensionada, devido a uma fonte de calor subcrustal, causando soerguimento ou devido a geometria do limite de placas circundando o continente. Esta tensão causa o desenvolvimento em profundidade, de falhas normais extensionais em uma crosta rígida e dúctil, levando a um significativo afinamento crustal. Exemplos desta fase, também chamada de incipiente ou embriônica são os *rift valleys* do E-Africano e o *rift valley* do Rio Grande no Novo México (estágio 1).

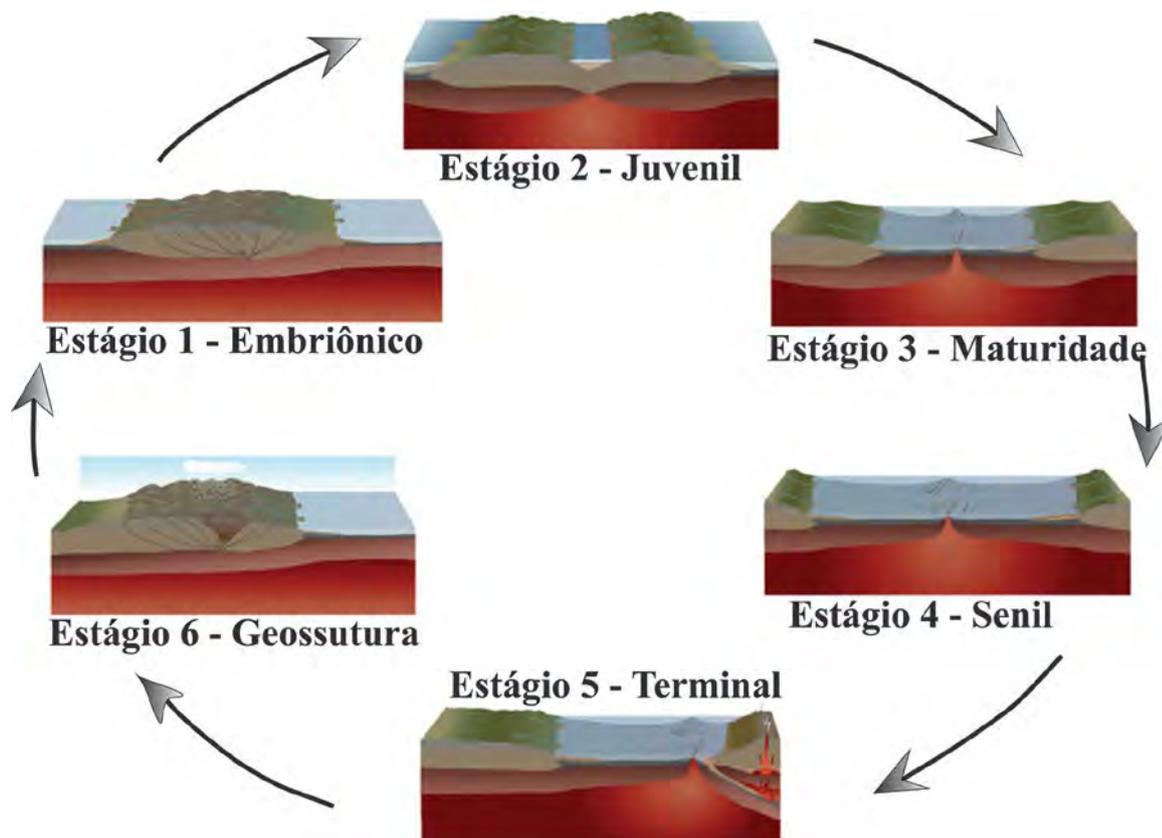
Com a continuação da extensão a crosta é eventualmente afinada (adelgada) de tal forma que o material quente do manto atinge a superfície, inicia-se a formação de crosta oceânica e uma bacia oceânica é gerada (subsidência e expansão). Os flancos continentais soerguidos são gradualmente erodidos e os sedimentos são depositados na nova bacia oceânica. O mar Vermelho é um exemplo de tais rifts oceânicos jovens (estágio 2).

A bacia então expande devido a expansão do assoalho oceânico. O Oceano Atlântico é um exemplo de bacia oceânica madura circundada por margens continentais rifteadas (estágio 3).

O estágio 4 envolve o desenvolvimento de uma ou mais margens de placas destrutivas. As razões para formação de novas margens destrutivas são provavelmente devidas a mudanças em outras partes do globo, tais como colisão continental ou início de um novo rifteamento continental. Se (como é quase certo) a Terra não está expandindo nem contraindo, as taxas líquidas de subducção e expansão em um grande ciclo terrestre devem ser iguais, e os padrões das placas e movimentos das mesmas devem ajustar-se para mantê-los desta forma. O resfriamento da litosfera oceânica continua até que sua densidade excede a da astenosfera originando uma situação potencialmente instável. Uma zona de subducção pode ser formada neste estágio. A subducção da litosfera oceânica pode causar contração da bacia oceânica. O oceano Pacífico é um exemplo atual de um oceano em contração, delimitado por margens de placas ativas (zonas de subducção e falhas transformantes).

O Mediterrâneo, por sua vez, é um oceano no seu estágio final de vida ou terminal (estágio 5), com a placa Africana sendo consumida sob a placa Européia.

Eventualmente, se toda a litosfera oceânica é subduccionada, ocorre a colisão continente-continente, e novas montanhas serão formadas (estágio 6). A colisão da Índia com a Ásia, que levou a formação do Himalaia e do platô Tibetano é o exemplo dramático do fechamento de uma bacia (o oceano Tetis) e colisão continente-continente. Hoje, a Ásia representa uma assembleia complexa de um grande número de pequenos blocos continentais, que colidiram para formar um grande continente, ou supercontinente. Eventualmente, este continente será rifteado, uma nova bacia oceânica irá se formar e o Ciclo de Wilson irá iniciar novamente.



**Figura 7.14** Fases do ciclo de Wilson: A partir da posição das dez horas no sentido horário: (10) extensão pré-deriva inicial, **Estágio 1** (12) fase rift-to-drift, abertura inicial de uma bacia oceânica, **Estágio 2** (2 e 4) expansão do fundo do mar, alargamento da bacia, **Estágios 3 e 4** (6) subducção da litosfera oceânica, fechamento da bacia, **Estágio 5** (8) colisão continente-continente, **Estágio 6**. Fonte Fabirichter- Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79650957>.

## REFERÊNCIAS

- AMANTE, C.; EAKINS, B. W. ETOPO1 **Global Relief Model converted to PanMap layer format**. NOAA-National Geophysical Data Center, PANGAEA, <https://doi.org/10.1594/PANGAEA.769615>. 2009
- ANDERGEO. **Geografia para todos**. [http://andergo2012.blogspot.com/2013/07/qual-origem-do-nome-terra\\_330.html](http://andergo2012.blogspot.com/2013/07/qual-origem-do-nome-terra_330.html), 2012.
- AUMOND, J. **A maior tragédia geoclimática brasileira**. <https://www.slideshare.net/Propex/viso-geoambiental-da-tragdia-do-vale-do-itaja-dr-juarez-aumond>, acesso em novembro 2020.
- BIOGEOGILDE W. **Escala de tempo geológico**. 2008. <https://biogilde.wordpress.com/2008/11/02/a-escala-do-tempo-geologico/>. Acessado em 13 de novembro 2020.
- BOYD, R.; DALRYMPLE, R.; ZAITLIN, B. A. **Classification of clastic coastal depositional environments**. *Sedimentary Geology*, 80:3-4: 39-1501992.
- CALLÈDE, J.; COCHONNEAU, G., RONCHAIL, J., VIEIRA ALVEZ, F., GUYOT, J.-L., SANTOS GUIMARAES, V.; OLIVEIRA, E. **Les apports en eau de l'Amazone a l'ocean Atlantique**. *Revue des Sciences de L'eau*, 23(3), 247-273. 2010.
- CARNEIRO, C. D. R.; GONÇALVES, P. W.; LOPES O. R. **O ciclo das rochas na natureza**. *Terræ Didactica*, 5(1):50- 62. <http://www.ige.unicamp.br/terraedidactica/>, 2009. acessado em 13 de novembro de 2020.
- CORDANI, U. G. **Idade do vulcanismo no Oceano Atlântico Sul**. *Boletim do IGA*, 1:9-75. 1970
- DANTAS, E. L.; VANSCHMUS, W. R. ; HACKSPACHER, P. C. ; NEVES, B. B. B. ; FETTER, A.; CORDANI, U.; NUTMAN, A. ; WILLIAMS, I. S. . The 3.4-3.5 GA **São José do Campestre Massif, NE Brazil : remnants of the oldest crust in South America**. *Precambrian Research, Netherlands*, v. 130, n.1, p. 113-137, 2004.

- Fabirichter - Own work, CC BY-SA 4.0, <https://commons.wikimedia.org/w/index.php?curid=79650957>
- FERREIRA, V. P.; SIAL, A. N. Pico do Cabugi, RN **Registro do mais jovem magmatismo continental do Brasil** SIGEP39. 2006.
- FILIZOLA, N.; GUYOT, J. L. **O fluxo de sedimentos em suspensão nos rios da Amazônia Brasileira**. Revista Brasileira de Geociências. 41(4): 566-576. 2011.
- Folha de São Paulo. **Terremotos no Brasil**- 02/01/2014- Ciência-Fotografia- Folha de S.Paulo (uol.com.br). <https://fotografia.folha.uol.com.br/galerias/21758-terremotos-no-brasil> acesso em 2020
- FRISCH, W.; MESCHDE, M.; BLAKEY, R. **Plate tectonics. Continental Drift and Mountain Building**. Springer Heidelberg Dordrecht London New York. 214p. ISBN 978-3-540-76503-5 e-ISBN 978-3-540-76504-2, DOI 10.1007/978-3-540-76504-2. 2011.
- GERVILLA, F.; GONZALES, J. M.; HIDAS, K.; MARCHESI, C.; PIÑA, R. **Geology and metallogeny of the upper mantle rocks from the Serranía de Ronda**. SEM, 122p. ISBN: 978-84-15588-30-6. 2019.
- HESS H. H. History of Ocean Basins. In: Engel et al (eds). **Petrologic studies: A volume in honor of A.F. Buddington**. Geological Society of America. 599-620. 1962. DOI:<https://doi.org/10.1130/Petrologic.1962.599>
- IUGS 2020. **International chronostratigraphic commission**. <https://stratigraphy.org/chart>. Acessado em 17 de novembro 2020. <http://www.labsis.ufrn.br/noticias/20754905/30-anos-do-terremoto-de-joao-camara>
- LEHNER, B.; VERDIN, K.; JARVIS, A. **New global hydrography derived from spaceborne elevation data**. Eos [serial on the Internet]. 89(10): 93-94. 2008.
- LEPICHON X. **Sea floor spreading and continental drift**. J Geophys Res 73: 3661–3697. 1968
- LIMA, P. H. G.; ALMEIDA, L. Q.; BELCHIOR, A. C. C.; MACEDO, Y. M. **Desastre socioambiental e ordenamento territorial no bairro Mãe Luíza**, Natal – Rio Grande do Norte (RN), Brasil. Territorium, n.º 27 (I) 37-49. Riscos, 2020. ISSN: 0872-8941.
- MENEZES, S. O. **Minerais comuns e de importância econômica**. Oficina de Textos. 2ª ed. 144p. 2012. 978-85-7975-050-2
- MONTGOMERY, C. W. **Environmental Geology**. 4th Edition. WCB Publishers. 496p. 1995
- MORGAN, W. J. **Rises, trenches, great faults, and crustal blocks**. J Geophys Res 73: 1959–1982. 1968.
- MORNER, N. A. **The concept of eustasy**. A redefinition. Journal of Coastal Research, SI-1, 49-51. 1986.
- MORNER, N.-A. **Recorded sea level variability in the Holocene and expected future changes**. In: EISMA, D., (ed.): Climatic Change: Impacts on Coastal Habitation, Boca Rotan, CRC Press, pp. 17-28. 1995.
- MURCK, B.W.; SKINNER, B. J.; PORTET, S. C. **Environmental Geology**. J. Wiley. 1996. 535 p.
- Open University. **The Ocean Basins: Their Structure and Evolution**, 2nd Edition, Butterworth-Heinemann. ISBN: 9780750639835. 1998. 192 p.
- PITARELLO, M. Z.; SANTOS, T. J. S.; ANCELM, M. F. **Syn-to post-depositional processes related to high grade metamorphic BIFs: Geochemical and geochronological evidences from a Paleo to Neoproterozoic (3.5-2.6-Ga) terrane in NE Brazil**. Journal of South American Earth Sciences, v. 96, p. 102312, 2019.
- PRESS, F.; SIEVER, R.; GROETZINGER, J.; JORDAN, T. H. **Para entender a Terra**. 4a. ed. Bookman. ISBN 978-85-363-0611-7. 2006. 656 p.
- READING, H. G.; COLLINSON, D. Clastic coasts In: Reading, H.G (ed). **Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy**. Wiley-Blackwell, ISBN13: 9780632036271, p. 154-231 1996.
- SEILBOLD, E.; BERGER, W. H. **The Sea Floor-An introduction to Marine Geology**. Springer-Verlag. 2017.
- SHORT A. D. (Ed.). **Beach and Shoreface Morphodynamics**. Wiley, Chichester, 379 pp1999
- SIEGERT, M.; ALLEY, R. B.; RIGNOT, E.; ENGLANDER, J.; CORELL, R. **Twenty-first century sea-level rise could exceed IPCC projections for strong-warming futures**. One Earth. 2020.
- SMITH, W. H. F.; SANDWELL, D.T. **Global seafloor topography from satellite altimetry and ship depth soundings**. Science 277: p. 1957–1962, 1997.
- SOUZA, C. R. G.; SOUZA FILHO, P. W. M.; ESTEVES, L. S.; VITAL, H.; DILLENBURG, S. R.; PACHINEELEM, S. M.; ADDAD, J. E. **Praias arenosas e erosão costeira**. In: Souza, C.R.G. et al. ed.; Quaternário do Brasil. Holos Editora, ISBN: 9788586699474. p.130-152. 2005.
- SUGUIO, K.; ANGULO, R. J.; CARVALHO, A. M.; CORRÊA, I. C. S.; TOMAZELLI, R. J.; WILLWOCK, J. A.; VITAL, H. **Paleoníveis do Mar e paleolinhas de costa**. In: Souza, C.R.G. et al. ed.; Quaternário do Brasil. Holos Editora, ISBN: 9788586699474, p. 114-129. 2005.
- VINE, F. J.; MATTHEWS, D. H. **Magnetic anomalies over oceanic ridges**. Nature 199: p. 947–949, 1963.
- VITAL, H.; ESTEVES, L. S.; ARAÚJO, T. C. M.; PATCHINEELAM, S. M. **Oceanografia geológica e geofísica da Plataforma Continental Brasileira**. In: Souza, C.R.G. et al. ed.; Quaternário do Brasil. Holos Editora, ISBN: 9788586699474, p. 153-175. 2005.
- WILDE, S. A.; VALLEY, J. W.; PECK, W. H.; GRAHAM C. M. **Evidence from detrital zircons for the existence of continental crust and oceans on the Earth 4.4 Gyr ago**. Nature. 409 (6817): PMID 11196637. doi:10.1038/35051550, p. 175–178. 2001.
- WILSON, J. T. **Evidence from islands on the spreading of the ocean floor**. Nature 197: p. 536–538, 1963.

# SALINAS: AMBIENTES EXTREMOS NO NORDESTE DO BRASIL

8

Marcos Rogério CAMARA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

## 1. INTRODUÇÃO

A vida em condições ambientais extremas é uma das áreas mais excitantes da ciência. De particular interesse para os pesquisadores é o potencial para a aplicação de metabólitos extremofílicos e enzimas extracelulares na indústria e na biotecnologia (Montgomery et al., 2013). As pesquisas sobre ambientes extremos também tornaram mais plausível a busca de vida fora da Terra, e até mesmo a possibilidade de panspermia (o transporte da vida de um planeta para outro) (Rothschild & Pucinelli, 2001). Exemplos de ecossistemas extremos são as fontes termais e gêiseres; o mar profundo; os ecossistemas hipersalinos; evaporitos; desertos; gelo, permafrost e neve; e a atmosfera (Rothschild & Pucinelli, 2001).

Os ecossistemas hipersalinos são ambientes extremos que têm concentrações de sal bem mais elevadas que a da água do mar. Eles incluem salinas, salares, lagos naturais e bacias hipersalinas do fundo do mar. Os ambientes hipersalinos são os principais habitats da deposição de petróleo. Eles também são de intenso interesse evolutivo e ecológico (Javor, 1989). Os benefícios atuais e potenciais proporcionados pelos ecossistemas hipersalinos incluem extração mineral, produção de *Artemia*, carotenoides, enzimas hidrolíticas, santuário para aves costeiras (e aves aquáticas migratórias), aplicações biotecnológicas, indicações sobre a vida na Terra primitiva, soluções de biorremediação e turismo (Coker, 2016; Dassarma & Dassarma, 2015; De Wit et al., 2019; Javor, 1989; Lopes-dos-Santos et al., 2019; Oren, 2010; Paul & Mormile, 2017).

Os ecossistemas hipersalinos podem ser classificados como

- i) de ocorrência natural e associados a oceanos (talássicos),
- ii) lagos interiores sem associação a uma fonte marinha (atalássicos) ou
- iii) salinas artificiais para a produção de sal (tanques de evaporação e cristalização de sal) (Paul & Mormile, 2017).

A diversificação de ecossistemas hipersalinos na América do Sul varia de salinas costeiras (Macau, Brasil), lagos salgados costeiros (Boca Chica, Venezuela) e lagos salgados interiores (Atacama, Chile) a estuários hipersalinos (Virilla, Peru) (Lenz & Browne, 1991).

As salinas são uma parte relevante dos sistemas de zonas úmidas costeiras no semiárido do Nordeste do Brasil. Apesar de sua extensão geográfica, diversidade e importância econômica, as salinas brasileiras raramente são mencionadas em estudos ambientais, inventários ou pesquisas acadêmicas (Junk et al., 2014). As maiores salinas brasileiras estão localizadas no litoral setentrional do estado do Rio Grande do Norte, onde condições ideais para essa atividade, como longos períodos de seca, ventos fortes, alta incidência solar e altas taxas de evaporação são encontradas. A área total pertencente às indústrias de sal do Rio Grande do Norte é de 41.718 ha, dos

quais 30.642 ha são explorados pelas atividades salineiras. O cenário resultante é que a produção de sal marinho no Brasil (6,2 milhões de toneladas em 2015) provém majoritariamente (> 95,3%) do Rio Grande do Norte (DNPM, 2018).

O objetivo do presente capítulo é apresentar as características e peculiaridades das salinas, inclusive as aplicações biotecnológicas e ambientais atuais e prospectivas de halófilos. Adicionalmente, uma síntese sobre a biologia e ecologia de *Artemia* (Crustacea, Anostraca) ilustrará os desafios da vida em condições hipersalinas.

## 2. SALINAS: BIORREATORES GIGANTES AO AR LIVRE

As salinas podem ser modeladas como biorreatores gigantes ao ar livre, semelhantes a uma série de barragens em um rio lento (Fig. 8.1). Neste processo, a água do mar é usualmente bombeada para uma série de tanques de evaporação rasos e conectados, o que resulta em uma sequência cada vez mais concentrada de salmoura. Os sais menos solúveis,  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{CaSO}_4$ , precipitam em primeiro lugar. O cloreto de sódio ( $\text{NaCl}$ ), o componente dominante da água do mar, é cristalizado nos tanques subsequentes, colhido, frequentemente lavado e exposto ao sol. A salmoura restante, fortemente rica em  $\text{MgCl}_2$  (sal amargo) e  $\text{KCl}$ , segue para tanques adicionais para precipitação após nova evaporação (Javor, 2002).

Quando a salmoura se aproxima do ponto de saturação e o sal começa a cristalizar, as salmouras apresentam coloração avermelhada. Três tipos de microrganismos halofílicos contribuem para esta cor: arqueias extremamente halofílicas (família Halobacteriaceae) que contêm carotenóides de 50 carbonos (bacterioruberina e derivados) e em alguns casos, a proteína retiniana bacteriorodopsina; a alga flagelada verde unicelular rica em  $\beta$ -caroteno *Dunaliella salina*; e a bactéria halofílica vermelha

*Salinibacter ruber*, que contém um acil glicosídeo carotenóide C40 exclusivo. Nos tanques de salinidade mais baixa, onde ocorrem os estágios anteriores de evaporação, densos tapetes microbianos compostos de diferentes tipos de bactérias e outros microrganismos se desenvolvem na camada bentônica (Oren, 2010).

A compreensão dos papéis que os diferentes tipos de micróbios desempenham na determinação da qualidade e quantidade do sal colhido levou ao desenvolvimento de práticas de manejo biológico para a operação das salinas (Javor, 2002).



**Figura 8.1** As salinas podem ser modeladas como biorreatores gigantes ao ar livre nos quais a água do mar flui, evapora pela força do sol e do vento e deposita cloreto de sódio em tanques de cristalização. **Fonte** Marcos R. Camara.

As comunidades planctônicas de microrganismos vermelhos nos tanques de cristalização são geralmente consideradas benéficas ao processo de produção de sal. Os pigmentos carotenóides absorvem a energia da luz e, com isso, aumentam a temperatura da água, levando a um aumento nas taxas de evaporação. Portanto, os tanques oligotróficos que não suportam o desenvolvimento adequado de comunidades microbianas vermelhas são frequentemente fertilizados. Os tapetes microbianos bentônicos nos tanques de evaporação mais antigos também são, de certa forma, desejáveis, uma vez que eles efetivamente vedam o fundo dos tanques, evitando o vazamento de salmoura. No entanto, quando proliferam excessivamente, as cianobactérias (especialmente *Aphanothece halophytica*) podem produzir grandes quantidades de lodo polissacarídico, e quando esse material atinge os tanques de cristalização, resulta na formação de sal de baixa qualidade (Davis & Giordano, 1996).

### 3. APLICAÇÕES BIOTECNOLÓGICAS E AMBIENTAIS DE HALÓFILOS

Os organismos que habitam os ambientes hipersalinos são classificados conforme suas necessidades de sal: os organismos halofílicos requerem altas quantidades de sal para crescimento enquanto os organismos halotolerantes podem crescer em condições de alta ou baixa concentração de sal. Os organismos halofílicos são ainda classificados em halófilos extremos, moderados e leves com base na concentração ideal de NaCl para crescimento.

Os halófilos são encontrados nos três domínios da vida: Archaea, Bacteria, e Eucarya. Bactérias, arqueias, halófitos e algas unicelulares (como *Dunaliella salina*) são capazes de tolerar condições sazonais ou anuais de salinidade elevada. Da mesma forma, *Artemia* (Crustacea, Anostraca) e moscas de

salmoura (família Ephydriidae) podem sobreviver a concentrações extremas de sal, com o primeiro organismo exibindo ampla tolerância à salinidade (6.0–19 M ou 35–110% NaCl) (Vanhaecke et al., 1980).

De modo a resistir às forças osmóticas associadas ao ambiente hipersalino, os halófilos têm dois mecanismos de adaptação principais para impedir que o NaCl se difunda para as células. O primeiro mecanismo é o acúmulo de íons inorgânicos (principalmente KCl) para equilibrar a pressão osmótica. Este mecanismo é utilizado principalmente por arqueias aeróbicas e extremamente halofílicas e algumas bactérias halofílicas anaeróbicas. Em contraste, a maioria das bactérias halofílicas e eucariontes acumulam compostos orgânicos de baixo peso molecular solúveis em água, que são referidos como solutos ou osmólitos compatíveis, de modo a manter a concentração de sal intracelular em níveis adequados (Oren, 2008). Tais solutos compatíveis podem atuar como estabilizadores de estruturas biológicas e permitir que as células se adaptem não apenas aos sais, mas também às condições de calor, dessecação, frio ou congelamento, e permitir que o halófilo cresça em pH alcalino e temperaturas elevadas. Muitas bactérias halofílicas acumulam ectoína ou hidroxietoína como solutos compatíveis predominantes. Outros solutos compatíveis intracelulares incluem aminoácidos, glicina betaína e vários solutos osmóticos acumulados em pequenas quantidades (Yin et al., 2015).

Na maioria dos ambientes hipersalinos, a biodiversidade é limitada, devido não apenas à alta concentração de sal, mas a outros fatores, como baixa disponibilidade de nutrientes e oxigênio, alcalinidade e alta irradiância solar ultravioleta. Portanto, os organismos que vivem nessas condições extremas exibem estratégias de adaptação variadas e complexas que têm sido cada vez mais estudadas para novas aplicações ambientais e biotecnológicas, desde a produção de compostos valiosos e remediação de águas e

solos contaminados a soluções futuras para a crise mundial de combustíveis líquidos (Coker, 2016; Dassarma & Dassarma, 2015; Javor, 1989; Oren, 2010; Paul & Mormile, 2017).

Aplicações biotecnológicas e ambientais de halófilos foram revisadas por vários autores. As aplicações industriais atuais e potenciais de organismos halofílicos variam de processos centenários como a fabricação de sal a partir da água do mar e a produção de alimentos fermentados tradicionais a abordagens biotecnológicas inovadoras (Carvalho, 2017; Coker, 2016; Oren, 2010; Schnoor et al., 2004; Yin et al., 2015). A produção de bacteriorodopsina, cantaxantina e  $\beta$ -caroteno por arqueias e algas halofílicas é um dos processos biotecnológicos de maior sucesso com halófilos (Coker, 2016).

*Halobacterium salinarum* e alguns outros halófilos extremos sintetizam e inserem, em suas membranas citoplasmáticas, uma proteína denominada bacteriorodopsina (de similaridade estrutural e funcional com a rodopsina, o pigmento visual dos olhos). Conjugada à bacteriorodopsina, há uma molécula de retinal capaz de absorver a energia luminosa e bombear um próton através da membrana citoplasmática. O retinal confere à bacteriorodopsina uma tonalidade púrpura avermelhada. Este biocomposto foi adaptado para uso em uma ampla gama de aplicações de holografia, retinas artificiais, corantes fotocromáticos, moduladores de luz espacial e eletrônica molecular (Coker, 2016; Madigan et al., 2016).

A cantaxantina, por sua vez, é um antioxidante lipossolúvel usado como corante e aditivo alimentar. Como aditivo alimentar, é usado em fazendas de peixes, crustáceos e aves. Também é utilizado na indústria de cosméticos e geralmente é o ingrediente principal em pílulas de bronzeamento. Tal como acontece com a bacteriorodopsina, arqueias halofílicas, entre as quais *Haloferox alexandrinus*, são as opções preferencialmente utilizadas nos processos produtivos (Coker, 2016).

$\beta$ -caroteno é um pigmento vermelho/laranja e o corante primário em cenouras, abóboras e microrganismos halofílicos. É uma molécula lipídica presente em abundância na dieta humana e subsequentemente encontrado em todos os tecidos humanos. Devido a sua alta bioatividade, também é amplamente utilizado na medicina. Na indústria alimentícia,  $\beta$ -caroteno é usado como um pigmento laranja avermelhado em muitos produtos, inclusive bebidas não alcoólicas e não tratadas termicamente com sabor de frutas tropicais, gorduras comestíveis, queijo, doces e sorvetes. Na indústria farmacêutica, atua como um agente corante para comprimidos; e na indústria de cosméticos, é usado como ingrediente bioativo de cremes que protegem as lesões da pele contra a oxidação e a exposição à radiação ultravioleta (Bogacz-Radomska & Harasym, 2018).

Os carotenoides utilizados industrialmente são obtidos por via química ou extração de plantas e/ou algas. No entanto, devido à preocupação com o uso de aditivos químicos, há um interesse crescente nos carotenoides obtidos naturalmente por processos biotecnológicos. A microalga halofílica *Dunaliella salina* é a principal fonte comercial de  $\beta$ -caroteno natural de origem microbiológica. Os cultivos são realizados principalmente em sistemas abertos, em água salgada e sob luz solar intensa. A produtividade obtida está na faixa de 30 a 40 g de massa seca por m<sup>2</sup> por dia (Coker, 2016).

A extração de ectoína da bactéria halofílica *Halomonas elongata* é um exemplo adicional de um processo biotecnológico de amplo sucesso com halófilos (Coker, 2016). Ectoína (ácido 1,4,5,6-tetra-hidro-2-metil-4-pirimidinacarboxílico) é o princípio ativo de muitos cosméticos e produtos dermatológicos e crescentemente utilizado em preparações medicinais (Graf et al., 2008). Além disso, ectoína (e/ou seus derivados adequados) é usado como um protetor para biomoléculas e potenciador em aplicações de biologia molecular, tais como técnicas de PCR e microarranjos de DNA (biochips) (Schnoor et al., 2004).

A ectoína é produzida comercialmente a partir de bactérias halofílicas. Processos industriais para produção em massa de ectoína e hidroxietoína foram desenvolvidos para *Halomonas elongata* e *Marinococcus*, respectivamente. O procedimento baseia-se na “ordenha bacteriana” (*bacterial milking*): as bactérias são cultivadas a uma alta densidade celular em um meio com alto teor de sal, de modo que acumulam quantidades massivas de ectoína intracelularmente. Em seguida, um choque hipoosmótico é aplicado. As bactérias reagem secretando a maior parte da ectoína para o meio circundante, a partir do qual o composto pode ser recolhido por técnicas de filtração de fluxo cruzado e purificado. O sal é então adicionado às bactérias, e estas se readaptam à alta salinidade produzindo mais ectoína, de modo que o procedimento de “ordenha” possa ser repetido (Oren, 2010).

Outros produtos químicos produzidos por halófilos incluem os poli-hidróxido-alcanoatos (PHA), biossurfactantes (BS) e bioemulsificantes (BE). Os poli-hidróxido-alcanoatos (PHA) são uma família de poliésteres biodegradáveis e biocompatíveis, acumulados por diversos microrganismos. Tais biocompostos são desenvolvidos em uma cadeia de valor industrial que vai desde bioplásticos, biocombustíveis, produtos químicos finos até medicamentos. Evidências científicas demonstram que os halófilos são uma plataforma de baixo custo para a produção industrial de poli-hidróxido-alcanoatos (Yin et al., 2015). Biossurfactantes (BS) e bioemulsificantes (BE) são compostos anfífilos de fontes biológicas investigados como substitutos potenciais para surfactantes quimicamente sintéticos. Vários estudos recentes demonstram que halófilos de ambientes hipersalinos podem ser usados como uma plataforma de produção de baixo custo para aplicações industriais de biossurfactantes e bioemulsificantes (Yin et al., 2015).

Por último, mas não menos importante, os halófilos podem contribuir no futuro para a produção de biocombustível. Em resumo, o biodiesel é produzido a partir de algas de alto teor lipídico (> 75% em peso

seco), a maioria das quais contém hidrocarbonetos de cadeia longa como aqueles encontrados no petróleo. Atualmente, a tendência geral para uso de algas para a produção de biocombustível (biodiesel) é problemática devido ao alto consumo de água doce. O uso de algas halofílicas pode superar tais obstáculos por meio da eficiente reciclagem de água não potável e abrir um futuro brilhante para a tecnologia halofílica (Ma et al., 2010). Algas halofílicas modificadas geneticamente também são promissoras, pois podem ser cultivadas em recipientes abertos, uma vez que a alta salinidade necessária ao seu crescimento inibe outros microrganismos. Tal abordagem permitirá que as algas halofílicas possam ser cultivadas em ambientes subutilizados, como os oceanos e ambientes áridos e desérticos (Coker, 2016).

Em conclusão, os halófilos têm sido crescentemente utilizados na produção de poliésteres biodegradáveis e biocompatíveis, ectoínas, enzimas, biossurfactantes e bioemulsificantes. Esforços crescentes têm sido aplicados para desenvolver halófilos em uma plataforma de baixo custo para bioprocessamento, com vantagens de baixo consumo de energia, menor consumo de água doce, redução de investimento em ativos fixos, e produção contínua.

#### 4. ARTEMIA: ESTRATÉGIAS DE SOBREVIVÊNCIA EM AMBIENTES HIPERSALINOS

Os desafios da vida em condições hipersalinas são numerosos. O anostráceo *Artemia* (Crustacea) está entre os poucos eucariontes halofílicos multicelulares que habitam ecossistemas hipersalinos em todo o mundo. Um organismo eurihalino equipado com o sistema osmorregulatório mais eficiente do reino animal (Croghan, 1958), *Artemia* pode sobreviver a concentrações extremas de sal (6.0–19 M ou 35–110% NaCl). Não menos importante, graças ao seu comportamento de alimentação por filtração não seletiva, este microcrustáceo retém partículas que

variam de 0,6  $\mu\text{m}$  a menos de 50  $\mu\text{m}$  de tamanho. Assim, bactérias, microalgas, protozoários e pequenas partículas de detritos nos ambientes hipersalinos podem ser convertidas em biomassa de *Artemia* rica em proteínas. Por outro lado, sua capacidade para filtrar as partículas constitui um controle efetivo sobre a matéria orgânica na salmoura: *Artemia* filtrará plâncton, partículas orgânicas e inorgânicas, oxidará a maior parte da matéria orgânica que ingerir e liberará produtos residuais em pelotas fecais delimitadas por membranas que se incorporarão às comunidades bentônicas (Davis & Giordano, 1996).

A história de vida do anostráceo *Artemia* está bem definida. É caracterizada por um curto período de geração, atingindo a maturidade mediante uma série de aproximadamente 15 mudas em menos de 20 dias. As fêmeas apresentam taxas de fecundidade de até 250 embriões por ciclo e podem se reproduzir por ovoviviparidade (produção direta de náuplios livre-natantes) ou oviparidade (produção de embriões encistados ou cistos em diapausa) (Abatzopoulos et al., 2002). Consequentemente, cistos e náuplios estão equipados com um conjunto diferenciado de adaptações para lidar com ambientes relativamente estáveis, no caso de náuplios, ou relativamente imprevisíveis, no caso de embriões encistados (Rode et al., 2011).

Os cistos de *Artemia* podem ainda ser vistos como bancos de genes que armazenam uma memória genética das condições históricas da população. A ocorrência de cistos resulta da capacidade evoluída das fêmeas para “perceber” condições ambientais instáveis. Tal capacidade é expressa pela inversão do modo de reprodução, de modo a produzir cistos em diapausa quando as condições ambientais se tornam nocivas ou náuplios livre-natantes, sob condições adequadas (Gajardo & Beardmore, 2012).

Do ponto de vista prático ou aplicado, uma vez que os embriões encistados (cistos em diapausa) podem permanecer viáveis ou pelo menos carregar informações genéticas por décadas ou mesmo séculos em sedimentos ou em coleções

laboratoriais, eles podem ser utilizados como arquivos naturais dos históricos evolutivos e ecológicos recentes das populações (Lenormand et al., 2018). Adicionalmente, os cistos de *Artemia* são crescentemente demandados pela aquicultura industrial em constante expansão, para utilização sob a forma de náuplios (após incubação e eclosão) como alimento vivo para as larvas da maioria das espécies de peixe e crustáceos cultivados (Lopes-dos-Santos et al., 2019).

A produção mundial de cistos de *Artemia* tem oscilado em torno de 4.000 toneladas por ano. O Grande Lago Salgado (Utah, EUA) e diversos biótopos salinos na Rússia, Cazaquistão e China são os principais fornecedores desta commodity para a indústria da aquicultura (Litvinenko et al., 2015). Há mais de 500 sítios hipersalinos nos quais há relatos de ocorrência de *Artemia* em todo o mundo. Alguns biótopos são costeiros ou talássicos (NaCl é o principal constituinte), enquanto outros são continentais, atalássicos (ricos em ânions diversos do cloreto), tais como aqueles encontrados a 4.500 m acima do nível do mar no Planalto do Tibete. Mais próximo da estratosfera do que qualquer outro sítio de *Artemia*, este é um biótopo especial sujeito a altas radiações ultravioletas e peculiarmente frio por sua latitude. Em contraste, no outro extremo do globo, o deserto de Atacama, no Chile, é uma das áreas mais secas do mundo, e onde *Artemia* é encontrada a cerca de 2.500 m de altitude em um cenário ambiental único (Gajardo & Beardmore, 2012).

O gênero *Artemia* (Crustacea, Anostraca) é constituído por linhagens sexuadas e partenogenéticas. Há seis espécies sexuadas de *Artemia* descritas atualmente. A maioria delas está geograficamente restrita a lagos salgados em regiões específicas da Eurásia (endemismo regional) nas proximidades da área mediterrânea onde as espécies de *Artemia* divergiram das espécies ancestrais há cerca de 80 milhões de anos (Baxevanis et al., 2006). Estas são as chamadas espécies do Velho Mundo: *Artemia urmiana*, encontrada no Lago Urmia, no Irã e na Ucrânia; *Artemia tibetiana*, no Planalto do

Tibete; *Artemia sinica*, na China e Mongólia; e *Artemia salina*, na bacia do Mediterrâneo. Duas espécies sexuadas estão representadas no Novo Mundo: *Artemia persimilis* e *Artemia franciscana*. *Artemia persimilis* é restrita a algumas localidades na Argentina e no Chile, enquanto *Artemia franciscana* é endêmica das Américas e do Caribe, com várias populações estabelecidas nos países da América do Sul, seja por inoculação deliberada ou por dispersão natural (Browne & Bowen, 1991; Camara, 2001; Gajardo & Beardmore, 2012; Lenz & Browne, 1991).

As populações partenogenéticas de *Artemia* estão distribuídas por uma vasta área geográfica, das Ilhas Canárias (no oeste) à Austrália (no leste), inclusive amplas seções da Europa, Ásia e África. O binômio *Artemia parthenogenetica* compreende uma assembléia de linhagens partenogenéticas com diferentes níveis de ploidia (de 2n a 5n). Estas populações partenogenéticas originaram-se em múltiplos eventos na Ásia Central, provavelmente a partir das espécies sexuadas do Velho Mundo indicadas acima (Baxevanis et al., 2016; Muñoz et al., 2010).

A ocorrência do gênero *Artemia* (Crustacea, Anostraca) no Brasil foi relatada pela primeira vez nas salinas costeiras de Cabo Frio, Rio de Janeiro (Costa, 1972). Todavia, a origem dessas populações na costa sudeste do Brasil ainda requer clarificação. Por outro lado, as informações sobre a presença de *Artemia franciscana* no Nordeste do Brasil têm se tornado cada vez mais vívidas (Camara, 2001; Camara et al., 2003; Maniatsi et al., 2009; Muñoz et al., 2010; 2013). *Artemia franciscana*, a espécie dominante e mais estudada no Novo Mundo (Triantaphyllidis et al., 1998), é encontrada no Nordeste do Brasil como resultado de inoculações feitas em uma gigantesca salina costeira em Macau (Rio Grande do Norte) em abril de 1977 com cistos de um estoque proveniente da Baía de São Francisco (Califórnia, EUA) (Camara & Castro, 1983). Ao longo dos anos, a *Artemia* introduzida se dispersou por salinas vizinhas pela ação deliberada do homem (para fins aquícolas e para ajudar na produção de sal), pelo vento e por aves aquáticas, e se tornou um ativo importante no desenvolvimento de uma forte indústria de cultivo de camarão (*Litopenaeus vannamei*) no Brasil (Fig. 8.2).



**Figura 8.2** Cistos de *Artemia franciscana* (Crustacea, Anostraca) são coletados nas salinas do Rio Grande do Norte como um subproduto da indústria salinera e utilizados sob a forma de náuplios (após incubação e eclosão) como alimento vivo na aquicultura. **Fonte** Marcos R. Camara.

A origem dos cistos inoculados em Macau está bem estabelecida. Inicialmente, evidências eletroforéticas (similaridade das amostras de Macau e da Baía de São Francisco) confirmaram a origem proposta, a partir dos cistos da Baía de São Francisco (Califórnia, EUA), da população de Macau (Gajardo et al., 1995). Em seguida, Camara e colaboradores (2003) relataram a diversidade genética molecular de três populações de *Artemia franciscana* (Macau, Galinhos e Areia Branca/Grossos) do nordeste brasileiro, por meio da análise de RFLP (*Restriction Fragment Length Polymorphism*) do DNA mitocondrial. Padrões de fragmentos observados entre estes anostráceos em parte da região 16S do RNA mostraram uma homogeneidade consistente e novamente indicaram que as populações selvagens de *Artemia* encontradas no Rio Grande do Norte, Nordeste do Brasil, pertenciam à espécie *Artemia franciscana*. Adicionalmente, a origem proposta, a partir de cistos da Baía de São Francisco, como anteriormente relatado por Gajardo e outros (1995) com base em evidências alozímicas derivadas da população de Macau, foi claramente demonstrada.

Por sua vez, Maniatsi e colaboradores (2009) compilaram e derivaram dados sequenciais para dois marcadores mitocondriais (16S rRNA, COI) e dois marcadores nucleares (ITS1, p26) em catorze populações americanas de *Artemia franciscana*, inclusive populações brasileiras do Rio Grande do Norte (Macau, Galinhos e Areia Branca). As análises cladísticas revelaram três clados mitocondriais reciprocamente monofiléticos. O primeiro clado consistia das populações norte-americanas da Baía de São Francisco (Califórnia) e do Grande Lago Salgado (Utah), das populações selvagens brasileiras de Macau, Galinhos e Areia Branca, e da população chilena mais setentrional de Iquique. Considerando que as genealogias inferidas refletem padrões históricos de colonização, Maniatsi e outros (2009) forneceram fortes evidências de um estado avançado de congruência filogenética entre locos nas linhagens investigadas. Mais recentemente, Muñoz e colegas (2013) examinaram

a variação da sequência de dois fragmentos de genes mitocondriais (COI e 16S para um subconjunto dos dados) em um grande conjunto de amostras populacionais representativas de toda a faixa nativa de *Artemia franciscana* (do Canadá ao Chile e Argentina, inclusive as ilhas do Caribe e uma população de Cabo Verde). Eles encontraram evidências de introduções mediadas pelo homem em nove das 39 populações analisadas. Adicionalmente, todos os indivíduos amostrados do Brasil (Grossos, Rio Grande do Norte) compartilharam um haplótipo comum com populações norte-americanas de *Artemia franciscana* da Baía de São Francisco (Califórnia) e/ou do Grande Lago Salgado (Utah, EUA).

A dispersão (ou migração) de indivíduos de uma localidade para outra é um processo ecológico fundamental que também pode aumentar o fluxo gênico intra e interpopulacional (Rankin, 1985). O principal mecanismo de dispersão de *Artemia* é o transporte de cistos por aves aquáticas (Muñoz et al., 2013). Muitas espécies de aves migratórias, especialmente aves marinhas, usam habitats de *Artemia* e anostráceos adultos - muitas vezes carregando cistos viáveis - podendo constituir um componente substancial de sua dieta. As aves podem dispersar os cistos entre habitats externamente - aderidos às suas plumagens ou pés - ou internamente em seu trato digestivo (Muñoz et al., 2013). Dados recentes indicam que as movimentações das aves facilitaram a invasão em escala global da espécie *Artemia franciscana*, transportando cistos (ovos em diapausa), e favorecendo expansões rápidas a partir dos locais de introdução (Muñoz et al., 2013). As salinas do Rio Grande do Norte atuam como áreas de invernada ou áreas de passagem para uma avifauna diversa e abundante (Larrazábal et al., 2002). Portanto, é provável que o papel das aves migratórias na dispersão de *Artemia franciscana* no Nordeste do Brasil tenha sido subestimado no passado.

Em resumo, o anostráceo *Artemia* é um dos poucos organismos macrozooplânctônicos capaz de

sobreviver às condições ambientais das salinas do Nordeste do Brasil. Um tema particular de interesse para pesquisa aplicada nas salinas brasileiras é uma melhor compreensão dos processos ambientais e genéticos relacionados à diminuição das coletas de embriões encistados dormentes (cistos em diapausa). A produção de cistos é observada em populações expostas a um ciclo sazonal de temperatura ou salinidade, ou que vivem em habitats efêmeros (Browne & Bowen, 1991; Gajardo et al., 2002; Lenz & Browne, 1991). A ovoviviparidade (produção de náuplios), por outro lado, está associada a condições ambientais estáveis (Dana & Jellison; Melack, 1995; Gajardo et al., 2002; Lenz, 1984; Lopes-dos-Santos et al., 2019; Mura, 1995; Torrentera & Dodson, 2004; Van Stappen et al., 2001; Wear et al., 1986; Wurtsbaugh & Gliwicz, 2001).

As condições ambientais relativamente estáveis encontradas nas salinas do Rio Grande do Norte podem explicar parcialmente por que a maioria das populações locais de *Artemia franciscana* apresenta reprodução por ovoviviparidade. Em tais condições, é seletivamente vantajoso produzir a maioria dos descendentes de forma ovovivípara, a fim de maximizar o sucesso na competição intraespecífica. A esse respeito, a baixa porcentagem de fêmeas ovíparas atualmente observada nas salinas do Rio Grande do Norte pode ser interpretada como uma espécie de seguro incorporado por essas populações contra condições ambientais instáveis ou estressantes. Por último, mas não menos importante, a coleta de cistos nas salinas brasileiras (para uso na aquicultura local) tem exercido forte pressão seletiva sobre *Artemia franciscana* há pelo menos quatro décadas, e possivelmente tem afetado as populações de múltiplas formas (tamanho populacional, fenótipos, características da história de vida e variabilidade genética).

## REFERÊNCIAS

- ABATZOPOULOS, T. J.; BEARDMORE J. A.; CLEGG, J. S.; SORGELOOS, P. **Artemia: Basic and Applied Biology**. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers, 2002.
- BAXEVANIS, A. D.; KAPPAS, I.; ABATZOPOULOS, T. J. **Molecular phylogenetics and asexuality in the brine shrimp Artemia**. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, San Diego, v. 40, p. 724-738, 2006.
- BOGACZ-RADOMSKA, L.; HARASYM, J.  **$\beta$ -Carotene—properties and production methods**. *Food Quality and Safety*, Oxford, v. 2, n. 2, p. 69-74, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/fqsafe/fyy004>. Acesso em: 27 jun. 2019.
- BROWNE, R. A.; BOWEN, S. T. **Taxonomy and population genetics of Artemia**. In: Browne, R. A.; Sorgeloos, P.; Trotman, C. N. A. (eds.). *Artemia Biology*. Boca Raton: CRC Press, p. 221-235, 1991.
- CAMARA, M. R. **Dispersal of *Artemia franciscana* Kellogg (Crustacea; Anostraca) populations in the coastal saltworks of Rio Grande do Norte, northeastern Brazil**. *Hydrobiologia*, Dordrecht, v. 466, p. 145-148, 2001.
- CAMARA, M. R.; CASTRO, E. V. **Artemia salina L. (Anostraca): uma opção para a aquicultura do nordeste do Brasil**. *Revista Brasileira de Zoologia*, São Paulo, v. 1, p. 145-147, 1983.
- CAMARA, M. R.; TRIANTAFYLIDIS, A.; BAXEVANIS, A. D.; ABATZOPOULOS, T. J. **Preliminary characterization of Brazilian *Artemia franciscana* populations by means of mtDNA RFLP analysis**. In: *Regional Workshop on Artemia Biodiversity*, 2003, Puerto Varas. Anais... [...]. Puerto Varas: Universidad de Los Lagos. p. 36-38, 2003.
- CARVALHO, C. C. R. de. **Whole cell biocatalysts: essential workers from Nature to the industry**. *Microbial Biotechnology*, Hoboken, v. 10, n. 2, p. 250-263, 2017.
- COKER, J. A. **Extremophiles and biotechnology: current uses and prospects**. *F1000Research* 2016, 5(F1000 Faculty Review), 396, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.12688/f1000research.7432.1>. Acesso em: 26 jun. 2019.
- COSTA, P. Da. **Nota sobre a ocorrência e biologia de *Artemia salina* (L.) na região de Cabo Frio (RJ)**. *Seç. Publ. Inst. Pesq. Mar.*, Rio de Janeiro, v. 66, p. 1-14, 1972.

CROGHAN, P. C. **The osmotic and ionic regulation of *Artemia salina* (L).** Journal of Experimental Biology, London, v. 35, n. 1, p. 219-233, 1958.

DANA, G. L.; JELLISON, R.; MELACK, J. M. **Effects of different natural regimes of temperature and food on survival, growth and development of *Artemia monica* Verrill.** Journal of Plankton Research, New York, v. 17, p. 2117-2130, 1995.

DASSARMA, S.; DASSARMA, P. **Halophiles and their enzymes: negativity put to use.** Current Opinion in Microbiology, New York, v. 25, p. 120-126, 2015.

DAVIS, J. S.; GIORDANO, M. **Biological and physical events involved in the origin, effects, and control of organic matter in solar saltworks.** International Journal of Salt Lake Research, Dordrecht, v. 4, p. 335-347, 1996.

DE WIT, R.; VINCENT, A.; FOULC, L.; KLESCZEWSKI, M.; SCHER, O.; LOSTE, C.; THIBAUT, M.; POULIN, B.; ERNOUL, L.; BOUTRON, O. **Seventy-year chronology of Salinas in southern France: coastal surfaces managed for salt production and conservation issues for abandoned sites.** Journal for Nature Conservation, Munich, v. 49, p. 95-107, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2019.03.003>. Acesso em: 26 jun. 2019.

DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. **Sumário Mineral 2016.** Brasília: DNPM, 2018.

GAJARDO, G. M.; BEARDMORE, J. A. **The Brine Shrimp *Artemia*: Adapted to Critical Life Conditions.** Frontiers in Physiology, Lausanne, v. 3, p. 185, 2012. Disponível em: 10.3389/fphys.2012.00185. Acesso em: 26 jun. 2019.

GAJARDO, G.; ABATZOPOULOS, T. J.; KAPPAS, I.; BEARDMORE, J. A. **Evolution and speciation.** In: ABATZOPOULOS, T. J.; BEARDMORE, J.; CLEGG, J.; SORGELOOS, P. (eds.). *Artemia: Basic and Applied Biology.* Dordrecht: Kluwer Academic Publishers. p. 225-250, 2002.

GAJARDO, G.; CONCEIÇÃO, M. DA; WEBER, L.; BEARDMORE, J. A. **Genetic variability and interpopulational differences in *Artemia* strains from South America.** Hydrobiologia, Dordrecht, v. 302, p. 21-29, 1995.

GRAF, R.; ANZALI, S.; BÜNGER, J.; PFLÜCKER, F.; DRILLER, H. **The multifunctional role of ectoine as a natural cell protectant.** Clinics in Dermatology, Philadelphia, v. 26, p. 326-333, 2008.

JAVOR, B. J. **Hypersaline Environments. Microbiology and Biogeochemistry.** Berlin: Springer-Verlag, 1989.

JAVOR, B. J. **Industrial microbiology of solar salt production.** Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology, Houndmills, v. 28, p. 42-47, 2002.

JUNK, W. J.; PIEDADE, M. T. F.; LOURIVAL, R.; WITTMANN, F.; KANDUS, P.; LACERDA, L. D.; BOZELLI, R. L.; ESTEVES, F. A.; DA CUNHA, C. N.; MALTCHIK, L.; SCHÖNGART, J.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y.; AGOSTINHO, A. A. **Brazilian wetlands: their definition, delineation, and classification for research, sustainable management, and protection.** Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, Chichester, v. 24, p. 5-22, 2014.

LARRAZÁBAL, M. E.; AZEVEDO JÚNIOR, S. M.; PENNA, O. **Monitoramento de aves limícolas na Salina Diamante Branco, Galinhos, Rio Grande do Norte, Brasil.** Revista Brasileira de Zoologia, São Paulo, v. 19, p. 1081-1089, 2002.

LENORMAND, T.; NOUGUÉ, O.; JABBOUR-ZAHAB, R.; ARNAUD, F.; DEZILEAU, L.; CHEVIN, L. M.; SÁNCHEZ, M. I. **Resurrection ecology in *Artemia*.** Evolutionary Applications, Oxford, v. 11, p. 76-87, 2018.

LENZ, P. H. **Life-history analysis of an *Artemia* population in a changing environment.** Journal of Plankton Research, New York, v. 6, p. 967-983, 1984.

LENZ, P. H.; BROWNE, R. A. **Ecology of *Artemia*.** In: BROWNE, R. A.; SORGELOOS, P.; TROTMAN, C. N. A. (eds.). *Artemia Biology.* Boca Raton: CRC Press. p. 237-253, 1991.

LITVINENKO, L. I.; LITVINENKO, A. I.; BOIKO, E. G.; KUTSANOV, K. ***Artemia* cyst production in Russia.** Chinese Journal of Oceanology and Limnology, Beijing, v. 33, n. 6, p. 1436-1450, 2015.

LOPES-DOS-SANTOS, R. M. A.; GROOT, R.; LIYING, S.; BOSSIER, P.; VAN STAPPEN, G. **Halophilic bacteria as a food source for the brine shrimp *Artemia*.** Aquaculture, Amsterdam, v. 500, p. 631-639, 2019.

MA, Y.; GALINSKI, E. A.; GRANT, W. D.; OREN, A.; VENTOSA, A. **Halophiles 2010: Life in Saline Environments.** Applied and Environmental Microbiology, Washington, v. 76, n. 21, p. 6971-6981, 2010.

MADIGAN, M. T.; MARTINKO, J. M.; BENDER, K. S.; BUCKLEY, D. H.; STAHL, D. A., **Microbiologia de Brock.** 14. ed. Porto Alegre: ArtMed, 2016.

MANIATSI, S.; KAPPAS, I.; BAXEVANIS, A.D.; FARMAKI, T.; ABATZOPOULOS, T. J. **Sharp phylogeographic breaks and patterns of genealogical concordance in the brine shrimp**

**Artemia franciscana.** International Journal of Molecular Sciences, Basel, v. 10, p. 5455-5470, 2009.

MUÑOZ, J.; GÓMEZ, A.; GREEN, A. J.; FIGUEROLA, J.; AMAT, F.; RICO, C. **Evolutionary origin and phylogeography of the diploid obligate parthenogen *Artemia parthenogenetica* (Branchiopoda: Anostraca).** PLoS ONE, San Francisco, v. 5, n. 8, p. e11932, 2010. Disponível em: Acesso em: 26 jun. 2019.

MUÑOZ, J.; AMAT, F.; GREEN, A. J.; FIGUEROLA, J.; GÓMEZ, A. **Bird migratory flyways influence the phylogeography of the invasive brine shrimp *Artemia franciscana* in its native American range.** PeerJ 1:e200, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.7717/peerj.200>. Acesso em: 26 jun. 2019.

MONTGOMERY, K.; CHARLESWORTH, J. C.; LEBARD, R.; VISSCHER, P. T.; BURNS, B. P. **Quorum Sensing in Extreme Environments.** Life, Chicago, v. 3, n. 1, p. 131-148, 2013.

MURA, G. **An ecological study of a bisexual *Artemia* population from Sant'Antioco solar saltworks (south-western Sardinia, Italy).** International Journal of Salt Lake Research, Dordrecht, v. 3, p. 201-219, 1995.

OREN, A. **Microbial life at high salt concentrations: phylogenetic and metabolic diversity.** Saline Systems, London, v. 4, p. 2-13, 2008.

OREN, A., **Industrial and environmental applications of halophilic microorganisms.** Environmental Technology, London, v. 31, p. 825-834, 2010.

PAUL, V. G.; MORMILE, M. R. **A case for the protection of saline and hypersaline environments: a microbiological perspective.** FEMS Microbiology Ecology, Amsterdam, v. 93, n. 8, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1093/femsec/fix091>. Acesso em: 26 jun. 2019.

RANKIN, M. A. **Migration: Mechanisms and Adaptive Significance.** Contributions in Marine Science, 27. Port Aransas: The University of Texas, Marine Science Institute, 1985.

RODE, N. O.; CHARMANTIER, A.; LENORMAND, T. **Male-female coevolution in the wild: evidence from a time series in *Artemia franciscana*.** Evolution, Lancaster, v. 65, n. 10, p. 2881-2892, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1558-5646.2011.01384.x>. Acesso em: 26 jun. 2019.

ROTHSCHILD, L. J.; MANCINELLI, R. L. **Life in extreme environments.** Nature, London, v. 409 p. 1092-1101, 2001.

SCHNOOR, M.; VOSS, P.; CULLEN, P.; BÖKING, T.; GALLA, H. J.; GALINSKI, E. A.; LORKOWSKI, S. **Characterization**

**of the synthetic compatible solute homoectoine as a potent PCR enhancer.** Biochemical and Biophysical Research Communications, New York, v. 322, n. 3, p. 867-872, 2004.

TORRENTERA, L.; DODSON, S. I. **Ecology of the brine shrimp *Artemia* in the Yucatan, Mexico, salterns.** Journal of Plankton Research, New York, v. 26, p. 617-624, 2004.

TRANTAPHYLLIDIS, G. V.; ABATZOPOULOS, T. J.; SORGELOOS, P. **Review of the biogeography of the genus *Artemia* (Crustacea, Anostraca).** Journal of Biogeography, Oxford, v. 25, p. 213-226, 1998.

VAN STAPPEN, G.; FAYAZI, G.; SORGELOOS, P. **International study on *Artemia*. LXIII. Field study of the *Artemia urmiana* (Günther, 1890) population in Lake Urmiah, Iran.** Hydrobiologia, Dordrecht, v. 466, p. 133-143, 2001.

VANHAECKE, P.; SIDDALL, S.; SORGELOOS, P. **International study on *Artemia*. XXXII. Combined effects of temperature and salinity on the survival of *Artemia* of various geographical origin.** Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Amsterdam, v. 80, p. 259-275, 1980.

Yin, J.; CHEN, J. C.; WU, Q.; HEN, G. Q. **Halophiles, coming stars for industrial biotechnology.** Biotechnology Advances, New York, v. 33, n. 7, p. 1433-1442, 2015.

WEAR, R. G.; HASLETT, S. J.; ALEXANDER, N. L. **Effects of temperature and salinity on the biology of *Artemia franciscana* Kellogg from Lake Grassmere, New Zealand. 2. Maturation, fecundity, and generation times.** Journal of Experimental Marine Biology and Ecology, Amsterdam, v. 98, p. 167-183, 1986.

WURTSBAUGH, W. A.; GLIWICZ, Z. M. **Limnological control of brine shrimp population dynamics and cyst production in the Great Salt Lake, Utah.** Hydrobiologia, Dordrecht, v. 466, p. 119-132, 2001.

# DELTA DO PARNAÍBA: ECOLOGIA E CONSERVAÇÃO

9

Cezar A. F. FERNANDES<sup>1</sup>  
Francisca Edna de Andrade CUNHA<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Piauí - UFPI

## 1. INTRODUÇÃO

O Delta do Parnaíba é um ambiente ímpar na América do Sul, o único estuário de formação deltaica a desaguar diretamente no oceano. Além disso, está situado na extrema fronteira com a Amazônia, sua margem esquerda apresenta características de estuários úmidos e com alto regime pluviométrico, enquanto sua margem direita é muito similar a estuários salinizados e áridos do Nordeste do Brasil (Barletta et al., 2017). Este rico ambiente abriga uma elevada biodiversidade, que por sua vez também possui uma alta importância socioeconômica principalmente para as comunidades pesqueiras (Guzzi, 2012).

Dentre os principais recursos pesqueiros se encontram o caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), robalo-flecha (*Centropomus undecimalis*), pescada-amarela (*Cynoscion acoupa*), pescadinha-gó (*Macrodon ancylodon*), camurupim (*Megalops atlanticus*), a ostra-do-mangue (*Crassostrea rhizophorae*), marisco de água doce (*Cyanocyclas brasiliensis*) e os camarões de água doce (*Macrobrachium amazonicum* e *M. acanthurus*) (Farias et al., 2015). Na área marinha adjacente ocorrem também capturas da frota semi-industrial com arrasto de fundo para camarões: Sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*), branco (*Lithopenaeus schimitii*), e rosa (*Farfantepenaeus brasiliensis*); rede de emalhe de fundo para cavala (*Scomberomorus cavalla*) e serra (*S. brasiliensis*); e linha de mão para

os peixes recifais, especialmente o ariacó (*Lutjanus synagris*) e pargo-verdadeiro (*L. purpureus*) (Farias et al., 2015, Fernandes & Cunha, 2017, Fernandes et al., 2019, Fernandes et al., 2020).

A atividade pesqueira se concentra na sua maioria em área de preservação ambiental, sendo observada inclusive uma sobreposição de Reserva Extrativista (RESEX Delta do Parnaíba) que inclui direito exclusivo de pesca, e uma área mais flexível, porém também com controle para uso sustentável (APA Delta do Parnaíba). Para melhor ordenamento e gestão das pescarias na região é extremamente necessário a elaboração de planos de manejo, este último tanto em escala para toda RESEX e APA, quanto em nível específico para o caranguejo-uçá e o camurupim, espécies ameaçadas de extinção, baixa capacidade de resiliência ou em condição de sobrepesca. A elaboração e construção destes planos exigem um formato horizontal de diálogo com os principais envolvidos na pesca, validando-se conjuntamente o conhecimento tradicional e científico para a melhor tomada de decisão pelos gestores. Portanto, a difícil tarefa de conservação e a manutenção do ecossistema do Delta do Parnaíba, não somente traz benefícios diretos a sociedade, mas também garante a preservação de ambientes únicos que permitem avanços em estudos de diversos campos da ecologia.

## 2. CARACTERÍSTICAS DO AMBIENTE

De acordo com o Plano Nacional de Recursos Hídricos (2005), a Região Hidrográfica do Parnaíba foi dividida em três Sub-bacias: Alto Parnaíba, Médio Parnaíba e Baixo Parnaíba, que, por sua vez, é formada por duas macrorregiões: meio norte e toda a macrorregião do litoral localizada na região da foz do Rio Parnaíba, ampliando-se para além da praia (Fig. 9.1).

A Sub-bacia do Baixo Parnaíba é composta, principalmente, pelos rios Longá, o próprio Rio Parnaíba e uma série de pequenos riachos que desembocam no Parnaíba, além do Delta do Rio Parnaíba. Na faixa litorânea do Baixo Parnaíba, os cursos de água se apresentam perenes pela própria influência marítima, e essa influência faz com que as águas sejam salobras. Os rios mais importantes são o Igarçu, margeando a cidade de Parnaíba, Camurupim-Cardoso, Timonha e o Ubatuba (SRH/MMA, 2006).

Segundo a classificação climática de Köppen-Geiger (1948), a região litorânea e Baixo Parnaíba são caracterizados como megatérmica chuvosa, ou seja, quente e úmido, com chuvas entre fevereiro e maio e com temperaturas mais baixas nos meses de março e abril (MMA, 2003). Conforme estudo realizado pela Agência Nacional de Águas (2005), sobre Disponibilidade e Demanda de Recursos Hídricos no Brasil, no trecho denominado Baixo Parnaíba a vazão média anual é de 55,4 m<sup>3</sup>/s podendo alcançar maiores valores de vazão, em torno de 1.000 m<sup>3</sup>/s no mês de abril, valor máximo registrado para a área, quando ocorrem os maiores valores de precipitação, em anos mais chuvosos. Entre o Médio e Baixo-Parnaíba, o rio se comporta como um efetivo rio de planície, com declividade muito baixa (até 50 cm/km), alcançando um reduzido perfil batimétrico na estação seca com baixa velocidade, apresentando em alguns trechos, extensa largura com exposição de grandes bancos de areia em seu leito, depositados pelas próprias águas (SRH/MMA, 2006).



Figura 9.1 Mapa demonstrando a localização do Delta do Parnaíba. Fonte Google imagens.

A característica de baixa declividade deste rio de planície associada a baixa vazão contribui para a formação de um Delta na foz do Rio Parnaíba que se caracteriza por apresentar cinco barras (popularmente chamadas de “braços” ou ‘bocas’) que são, de oeste para leste: Tutóia, Melancieira ou Carrapato, Ilha do Caju e Ilha das Canárias e Igarau, envolvendo mais de 70 ilhas fluviais, considerado o único delta que deságua em mar aberto das Américas (MMA/SDS, 2002; Brasil, 2002). Conforme relatório do Projeto-Piloto Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba (MMA, 2005), o Delta do Parnaíba é integrante do bioma marinho costeiro, caracterizando-se por apresentar extensas planícies flúvio-marinhos, cortadas por uma rede de canais, chamados localmente de igarapés, que formam a diversidade de ilhas no Delta. Estes igarapés podem formar meandros anastomosados, mesmo sob forma de canais abandonados. Nas formações insulares resultantes dos processos de acumulação de sedimentos flúvio-marinhos, desenvolvem-se extensas áreas de manguezais (SRH/MMA, 2006).

No ecossistema do Delta do Parnaíba destacam-se dois componentes: Campos de dunas móveis, resultantes da sedimentação eólica, sujeitos a dinâmica de ações construtivas e destrutivas dos ventos, marés e aporte fluvial, cujas interações os caracterizam como um ambiente fortemente instável. Outro elemento é a extensa área de manguezal que abriga em sua estrutura arquitetônica importantes comunidades vegetais e animais em função da complexidade formada pelas raízes escoras e pneumatóforos constituindo-se anteparos eficazes para a retenção de sedimentos e proteção das margens (Fig. 9.2). Estas características tornam este habitat adequado para várias espécies aquáticas, especialmente os peixes, que dependem dele em período reprodutivo, desenvolvimento larval e juvenil fornecendo proteção, nutrientes e alimentos necessários ao seu ciclo de vida (Blaber, 2000). É um equilíbrio delicado que pode ser ameaçado com a atividade exploratória descontrolada, podendo, a curto prazo, tornar-se um ambiente degradado e sem função econômica (SRH/MMA, 2006).



**Figura 9.2** Delta do Parnaíba e seus manguezais de alto porte e o guará-vermelho (*Eudocimus ruber*) em perfeita harmonia com o ambiente. **Fonte** Google imagens.

No bioma do Delta do Parnaíba está inserido a Área de Proteção Ambiental (APA) Delta do Parnaíba que é uma unidade de conservação de uso sustentável criada pelo Decreto Federal s/nº, de 28 de agosto de 1996. Sua área aproximada é de 313.809 hectares e se situa nos municípios de Parnaíba, Luís Correa, Ilha Grande e Cajueiro da Praia, no Piauí; Araíoses, Água Doce, Paulino Neves e Tutóia, no Maranhão; Chaval e Barroquinha, no Ceará e, nas águas jurisdicionais dos rios Parnaíba; Cardoso e Camurupim; e Timonha e Ubatuba, além de 5 km de mar territorial. A região releva-se por ser área de reprodução de várias espécies que se encontram em alguma categoria de ameaça de acordo com a IUCN (União Internacional para Conservação da Natureza) e Ministério do Meio Ambiente (MMA). Dentre estas, é reconhecida pela importância significativa para a reprodução do peixe-boi-marinho (*Trichechus manatus*), desova de tartarugas marinhas e áreas de alimentação e descanso de aves migratórias, e importantes recursos pesqueiros como caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*), e algumas espécies de peixes de valor comercial, como: *Megalops atlanticus*, *Centropomus undecimalis* e *Cynoscion acoupa* (Mai & Loebmann, 2010; Guzzi, 2012). A área também abriga uma RESEX, também na mesma categoria de uso sustentável, denominada Reserva Extrativista Marinha do Delta do Parnaíba, evidenciando uma sobreposição dos usos e restrições dos recursos naturais no mesmo território da APA.

O Delta do Rio Parnaíba possui uma ictiofauna diversa estudada primeiramente por Oliveira (1974), que registrou 66 espécies de peixes distribuídas em 26 famílias, com destaque em número de espécies para família Sciaenidae. Posteriormente, Lima (2012) identificou a predominância das famílias Sciaenidae e Ariidae; e mais recentemente, a diversidade da Ictiofauna foi ampliada por Guimarães-Costa et al. (2019) que registrou 128 espécies pertencentes a 57 famílias. Neste estudo se manteve a predominância, identificada em estudos anteriores, das Ordens Perciformes e Siluriformes na estrutura da comunidade de peixes marinho/estuarino do Delta do Parnaíba.

A produção pesqueira no Delta do Parnaíba diagnosticada por Farias et al. (2015) está concentrada em algumas populações que recebem maior esforço de pesca em função da demanda e valor comercial nas espécies de caranguejos (*Ucides cordatus*), siris do gênero *Callinectes* e camarões de água doce do gênero *Macrobrachium*, ostra-do-mangue (*Crassostrea mangle*) e marisco (*Cyanocyclas brasiliiana*). Embora ocorra uma grande diversidade de peixes, o esforço ocorre principalmente sobre o robalo da espécie *Centropomus undecimalis*, as taíñas da família Mugilidae e bagres da família Ariidae, perfazendo cerca de 80% da produção (Farias et al., 2015).

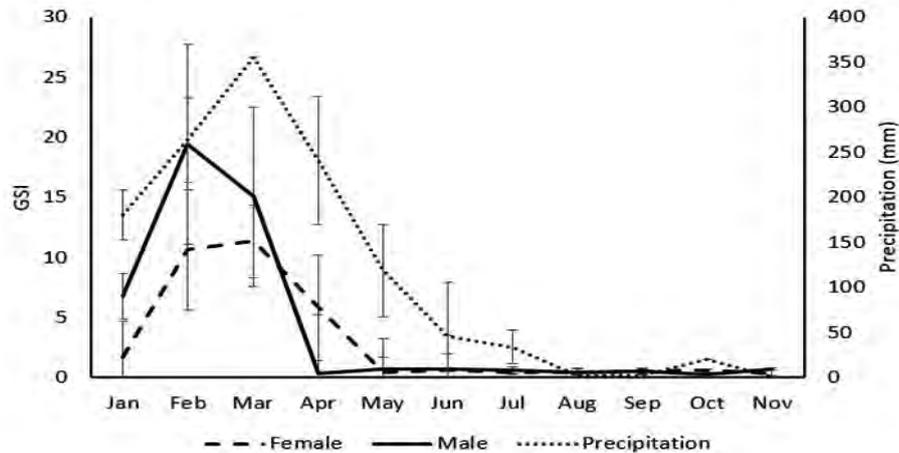
### 3. CICLO REPRODUTIVO DOS PRINCIPAIS RECURSOS PESQUEIROS

Os peixes exibem diferentes estratégias reprodutivas, desde preparação de ninhos e cuidado parental até desova livres com os gametas dispersos nas correntes, desova total e desova parcelada, e até mesmo interrupção das desovas com comportamento de omissão de desova (Fernandes, 2014). No Delta do Parnaíba, a maioria das espécies apresentam uma relação íntima com o ambiente estuarino ao longo do seu ciclo de vida, principalmente para alimentação e crescimento (Fernandes, 2015).

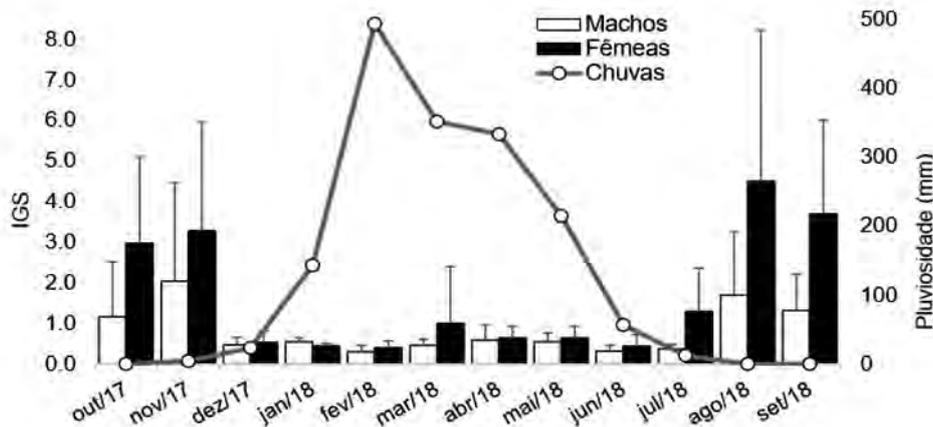
Os estímulos reprodutivos variam para cada espécie, dependendo da disponibilidade de oferta de alimento tanto para os adultos no período pré-desova quanto para prole, e variáveis ambientais favoráveis. O regime de chuvas nesse ambiente deltaico parece ser o precursor do engajamento na atividade reprodutiva, com algumas espécies desovando no período seco entre julho a novembro (< 100 mm), mas com a grande maioria realizando suas desovas no período chuvoso entre dezembro e junho (> 800 mm). Entre as espécies estudadas na APA do Delta do Parnaíba e região adjacente a

tainha *Mugil curema* (Fernandes, 2015), capadinho *Trachelyopterus galeatus* (Pereira, 2018) (Fig. 9.3), bagre-camboeiro *Sciades herzbergii*, bagre-amarelo *Aspistor luniscutis* (Fernandes, 2015), robalo-flecha *Centropomus undecimalis* (Fernandes & Cunha,

2017), coró-marinho *Conodon nobilis* (Costa, 2019) apresentam IGS > 2% e ovários com ovócitos hidratados no período chuvoso, enquanto apenas o camurupim *Megalops atlanticus* exibe desovas no período seco (IGS > 2%) (Silva, 2019) (Fig. 9.4).



**Figura 9.3** Variação do índice gonadossomático do capadinho *Trachelyopterus galeatus* na APA Delta do Parnaíba. **Fonte** Pereira et al., (in prep.).



**Figura 9.4** Variação do índice gonadossomático do camurupim *Megalops atlanticus* na APA Delta do Parnaíba. **Fonte** Silva (2019).

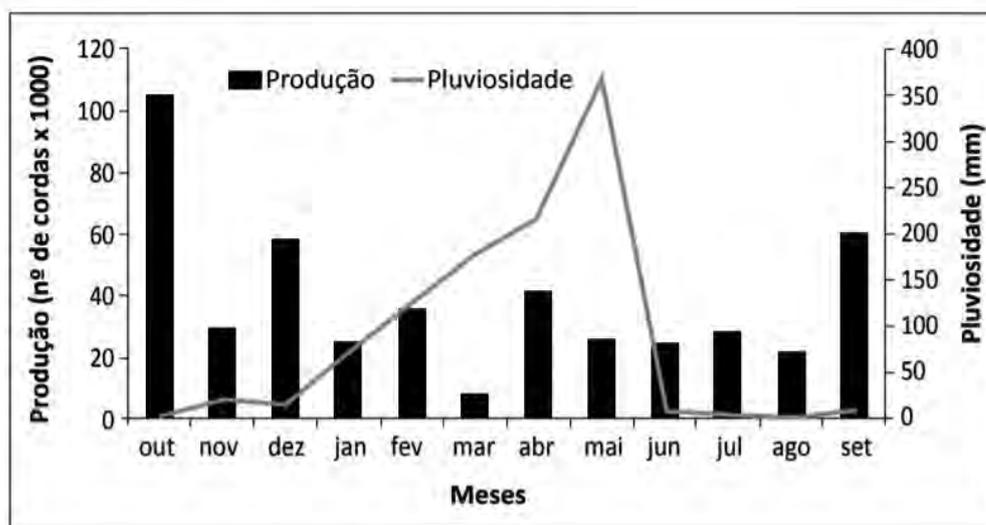
## 4. CARACTERÍSTICAS DAS ATIVIDADES PESQUEIRAS

O regime de chuvas também é importante para a comunidade pesqueira, não somente devido a contribuição com a reciclagem de nutrientes e oferta de alimento para as principais espécies capturadas,

mas influenciam também na abundância dos desembarques pesqueiros (Fernandes, 2015). O caranguejo-uçá é a principal espécie capturada no estuário do Delta (~ 600 t/ano) (Fig. 9.5), seguido do

robalo-flecha (~ 20 t/ano) através de embarcações de propulsão a vela e pescarias diárias de ida e vinda com rede de emalhe (Fig. 9.6), e da tainha (~ 5 t/ano) de acordo com o estudo de Farias et al., (2015).

O camurupim é uma importante espécie capturada no delta, porém com baixo volume de produção (~ 40 indivíduos/ano), mas com um alto valor agregado as ovas (200 reais/kg) (Fernandes et al., 2017).



**Figura 9.5** Produção anual da cata de caranguejo-uçá (*Ucides cordatus*) no Delta do Parnaíba em 2014. **Fonte** Farias et al., (2015) – Cadeia Produtiva da Pesca no Delta do Parnaíba.



**Figura 9.6** Embarcação pesqueira destinada a captura do robalo-flecha (*Centropomus undecimalis*) com rede de emalhe. **Fonte** arquivo pessoal.

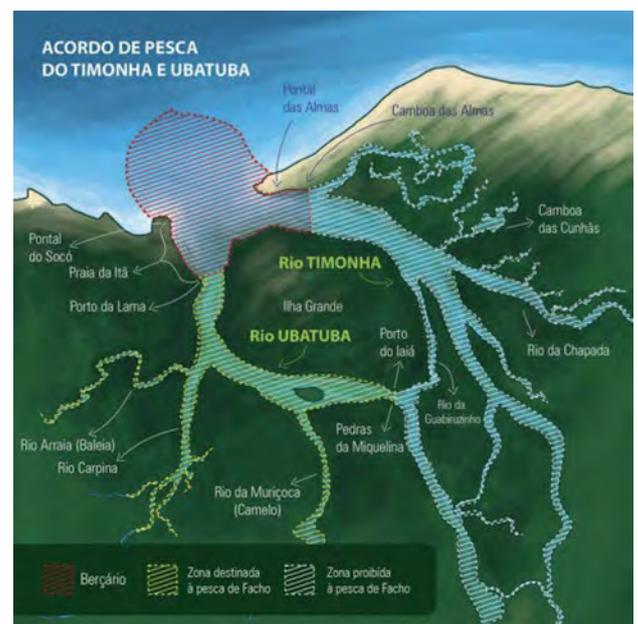
Outros recursos pesqueiros são também importantes no sustento das famílias que vivem e usam os ambientes no Delta, tais como a ostra-do-mangue (*Crassostrea mangle*), marisco de água doce (*Cyanocyclus brasiliana*), e os camarões de água doce *Macrobrachium amazonicum* e *M. acanthurus*. Na área marinha adjacente ocorrem principalmente capturas com pesca de arrasto de fundo para camarão sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*), branco (*Litopenaeus schimitii*), e rosa (*Farfantepenaeus brasiliensis*) com um volume anual de aproximadamente 200 toneladas (Fernandes et al., 2019).

## 5. PLANO DE MANEJO DA RESEX E APA DELTA DO PARNAÍBA

O manejo e ordenamento da pesca são atividades cruciais para manutenção dos estoques pesqueiros e sustentabilidade da atividade, não somente garantindo o lado ecológico, mas também o socioeconômico com a geração de renda e fixação das comunidades pesqueiras. O Delta do Parnaíba abriga uma sobreposição de áreas de proteção, a Resex Delta do Parnaíba com maior rigor de uso do espaço e uma Área de Preservação Ambiental com uma condição mais flexível de uso.

As regras para conservação dos estoques pesqueiros se baseiam hoje basicamente no período de defeso e controle de artes de pesca predatórias. Recentemente, devido a publicação da Portaria 445, em março de 2020, tratando das espécies ameaçadas de extinção, torna-se cada vez mais necessário a elaboração e redação de planos de manejo para estas espécies. Estes planos por sua vez devem ser construídos em conjunto com a comunidade em um diálogo horizontal, e com suporte de dados das pesquisas que ajudem e entender melhor a dinâmica das pescarias e a biologia das espécies comumente capturadas (Figs. 9.7- 9.8).

A exploração do caranguejo-uçá no Delta do Parnaíba foi o primeiro exemplo deste tipo de atividade, sendo incluídas ações tais como: limite de captura por faixa de largura da carapaça em 7 cm, período de defeso e áreas de descanso (exclusão de pesca) para ajudar na manutenção do recrutamento, alimentação, crescimento e desova da espécie, e reduzir o esforço de pesca. Para a APA também está em construção um plano de manejo de maior escala, que inclui todos os tipos de uso do espaço, entre eles o turismo e pesca em maior abrangência, e outras atividades socioeconômicas. Em nível mais específico agora é o caso do camurupim (*Megalops atlanticus*), considerando que a espécie está inserida na lista da portaria 445/2020 que define proibição de pesca, exceto quando salvo a elaboração de planos de manejo. Este é fundamental em casos de pescarias de pequena escala em que a comunidade é dependente do recurso pesqueiro (Silva, 2019, Fernandes et al., 2020).



**Figura 9.7** Zoneamento de acordo de pesca elaborado pela comunidade pesqueira local. **Fonte** Projeto Pesca Solidária – Comissão Ilha Ativa.

Outras ações estão sendo também planejadas, tais como área de uso com esforço de pesca controlado, restrição de aparelhos de pesca, controle do

tamanho mínimo das malhas entre nós opostos, áreas de exclusão parcial de pesca em período de reprodução e/ou crescimento dos indivíduos jovens em lagoas.

No caso do robalo-flecha ou camurim (*Centropomus undecimalis*), se avançou na discussão para elaboração dos acordos de pesca para fixação de um tamanho mínimo de captura em torno de 80 cm e seletividade da rede de pesca (> 100 mm comprimento da malha entre nós opostos), proibição de captura de jovens nas lagoas, e etc. Outros importantes gargalos se tornaram exemplos, tais como o impedimento da especulação imobiliária ou da rede hoteleira, devido o suporte de dados, empoderando a comunidade na defesa do território, especialmente no sentido de manutenção dos seus pesqueiros na garantia de alimento e renda, sendo criada uma área exclusiva de pesca (Fernandes & Cunha, 2017, Fernandes et al., 2019).

## 6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Sabendo-se da peculiaridade do tipo de ambiente que é o Delta do Rio Parnaíba, e da fragilidade diante de atividades antropogênicas, efeitos de variações climáticas e esforço de pesca, é necessário pensarmos em estratégias que garantam a preservação da biodiversidade. Neste sentido, se reconhece a demanda de trabalhos conjuntos entre as universidades, centros de pesquisa, ONGs, comunidades pesqueiras, e órgãos gestores (ICMBio e Secretaria de Meio Ambiente) na construção coletiva de agendas que visem não somente a elaboração das regras de ordenamento, mas incluam também treinamento, orientação, educação ambiental, monitoramento e por fim fiscalização.



**Figura 9.8** Ações de implementação do acordo de pesca do robalo no Delta do Parnaíba, 8 elementos de sucesso Projeto Fish Forever. **Ilustração** Gianfrancisco Schork. Produzida com recursos gráficos do Freepik.com. **Fonte** Projeto Fish Forever – UFPI – Delta do Parnaíba.

## REFERÊNCIAS

- ANA. Agência Nacional de Águas. **Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil**. Brasília: 2005. 134 p.
- BARLETTA, M.; LIMA, A. R. A.; DANTAS, D. V.; OLIVEIRA, I. M.; NETO, J. R.; FERNANDES, C. A. F.; FARIAS, E. G. G.; FILHO, J. L. R.; COSTA, M. F. **How Can Accurate Landing Stats Help in Designing Better Fisheries and Environmental Management for Western Atlantic Estuaries?**. In: Charles W. Finkl; Christopher Makouski. (Org.). Coastal Research Library. 21ed.: Springer International Publishing, v.1, p. 631-703, 2017.
- BLABER, S. J. M. **Tropical estuarine fishes: ecology, exploration and conservation**. Queensland, Blackwell Science, 2000. 372 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. **Zoneamento ecológico-econômico do baixo rio Parnaíba**. Brasília: MMA, 2002.
- FARIAS, A. C. S.; FILHO, A. A. F.; IVO, C. T. C.; FERNANDES, C. A. F.; CUNHA, F. E. A. **Cadeia produtiva no interior do delta do Parnaíba e área marinha adjacente**. Fortaleza: Editora RDS, 2015. 240 p.
- FERNANDES, C. A. F. **Estratégias reprodutivas da Baúna-de-fogo *Lutjanus alexandrei* (Moura e Lindeman, 2007) capturada no litoral do Estado de Pernambuco**. 160pp. Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura. Departamento de Eng. de Pesca, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2014. 174 p.
- FERNANDES, C. A. F. **Aspectos reprodutivos em peixes dos estuários dos rios Timonha e Ubatuba (PI/CE)**. In: Alitieni Moura Lemos Pererira & Francinalda Maria Rodrigues da Rocha. (Org.). A pesca no estuário do Timonha e Ubatuba (PI/CE). 1ed.Parnaíba: Comissão Ilha Ativa, v. 1, p. 55-63, 2015.
- FERNANDES, C. A. F.; CUNHA, F. E. de A. **Relatório final do monitoramento da pesca aspectos reprodutivos e biomassa do robalo-flecha**. 2017. 63p. Acessível em <http://www.comissaoilhaativa.org.br>. (Acessada 01/09/ 2018).
- FERNANDES, C. A. F.; BRITO, C. S. F.; SANTOS, N. M. V.; CUNHA, F. E. A. Projeto Fish Forever (Fase 2)- **Monitoramento da Pesca na RESEX e APA Delta do Parnaíba**. 2019, 57p. Acessível em <http://www.comissaoilhaativa.org.br>. (Acessada 25/09/ 2020).
- FERNANDES, C. A. F.; CUNHA, F. E. A.; ARAUJO, A. C. S.; SILVA, C. E. L. S.; PEREIRA, R. L.; GONDOLO, G. F. **Monitoramento do comportamento migratório do Camurupim (*Megalops atlanticus*) e avaliação da reprodução dessa espécie no Litoral Nordeste-Norte do Brasil** (Objetivos 2- 3), 2020. 42 p.
- CUNHA F. E. de A. **Alimentação dos bagres *Aspistor luniscutis* (amarelo) e *Sciades herzbergii* (Cambueiro) Siluriformes: Ariidae que habitam o estuário Timonha e Ubatuba (PI/CE)**. Pp. 45-53. In: A. M. L. Pereira; F. M. R. da Rocha (organizadores). A Pesca no estuário do Timonha e Ubatuba. Siart. 2015.
- GUIMARÃES-COSTA, A; MACHADO, F. S.; OLIVEIRA, R. R. S.; SILVA-COSTA, V.; ANDRADE, M.; GIARRIZZO, T; SAINT-PAUL, U.; SAMPAIO, I.; SCHNEIDER, H. **Fish diversity of the largest deltaic formation in the Americas - a description of the fish fauna of the Parnaíba Delta using DNA Barcoding**. Scientific Reports , v. 000, p. 1-25, 2019.
- GUZZI, A. **Biodiversidade do Delta do Parnaíba: litoral piauiense. Parnaíba**: EDUFI, 2012. 466 p.
- KÖEPPEN, W. **Climatologia: con un estudio de los climas de la Tierra**. Ciudad de México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.
- LIMA, E. F. Ictiofauna do Delta do Parnaíba, Litoral Piauiensi. p.116. In: GUZZI, A. **Biodiversidade do Delta do Parnaíba: litoral piauiense**. Parnaíba: EDUFI, 2012. 466 p.
- MMA/SDS, 2002 – **Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba: Subsídios Técnicos, Relatório Final**. Brasília, MMA/ SDS ,2002. 92 p.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Recursos Hídricos. Plano Nacional de Recursos Hídricos. **Documento Base de Referência**. Brasília: Cap. 5, p. 125-282. 2003.
- MMA. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Políticas Públicas para o Desenvolvimento Sustentável. **Projeto-Piloto Zoneamento Ecológico-Econômico do Baixo Rio Parnaíba – 1ª Aproximação**. Brasília: 2005. CD-ROM.
- MAI, A. C. G.; LOEBMAN, D. **Biodiversidade do litoral do Piauí**. Ana Cecília Giacometti Mai, Daniel Loebmann editores. Sorocaba: Paratodos Sorocaba. 2010. 272 p.
- OLIVEIRA, A. M. E. **Ictiofauna das águas estuarinas do rio Parnaíba (Brasil)**. Arquivos de Ciências do Mar, 14(1): p. 41-45. 1974.
- SRH/MMA. **Caderno da Região Hidrográfica do Parnaíba/ Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos**. – Brasília: MMA, 2006. 184 p.
- PEREIRA, R. L. **Biologia reprodutiva do capadinho *Trachelyopterus galeatus* no rio Paruá**, Maranhão. Trabalho de conclusão de curso, graduação em Eng. de Pesca, Universidade Federal do Piauí. 2018. 47 p.
- PNRH. **Plano Nacional de Recursos Hídricos**. Informações: Região Hidrográfica do Parnaíba. I Reunião com consultores regionais. Brasília: v 1.1, junho/2005. CD-ROM.
- SILVA, C. E. L. dos S., **Biologia reprodutiva do Camurupim *Megalops atlanticus* e do peixe-espada *Trichiurus lepturus*, duas das principais espécies de peixes ósseos capturados no extremo oeste do Ceará**, Brasil. Departamento de Eng. de Pesca, Universidade Federal do Ceará, 2019. 99 p.

# AMBIENTES RECIFAIS DA REGIÃO NORDESTE: UM OLHAR PARA A INFLUÊNCIA DA ATIVIDADE HUMANA

10

Daniel Brandt GALVÃO<sup>1</sup>

Sara de Castro LOEBENS<sup>2</sup>

Daniele VILA-NOVA

Daniele Laura Bridi MALLMANN

Ananda Marieta Silva TELES<sup>1</sup>

Beatrice Padovani FERREIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Sergipe - UFS

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE



## 1. AMBIENTES RECIFAIS: O QUE SÃO, DISTRIBUIÇÃO E ENDEMISMO NO BRASIL

O Brasil é considerado o país que abriga a maior biodiversidade do planeta, com mais de 20% de todas as espécies conhecidas mundialmente. Levando em consideração somente a zona costeira, com seus aproximados 3,5 milhões de km<sup>2</sup> (de uma área total de 8,5 milhões de km<sup>2</sup> do país), são encontrados ecossistemas como manguezais, restingas, dunas, lagoas, estuários e recifes (MMA, 2020a), os quais abrigam uma diversa biota associada e mantêm uma relevante interdependência.

Os ambientes recifais se destacam entre os ambientes costeiros, sendo formados por estruturas sólidas e tridimensionais, presentes nos oceanos que suportam uma grande biodiversidade, podendo ser de origem biogênica (a partir de organismos construtores, como corais ou algas) ou rochosa (recifes de arenito e costões rochosos). Quando há predominância de organismos associados aos recifes de coral, os ambientes podem ser denominados como coralíneos, mesmo sem uma

origem estrutural biogênica. Outros organismos marinhos que produzem carbonato de cálcio, como algumas espécies de algas calcárias, moluscos, briozoários e foraminíferos, também contribuem para a construção de ambientes recifais biogênicos (Gerahdí & Bosence, 2001; Soares et al., 2009; Bastos et al., 2018), sendo, eventualmente, predominantes em relação aos corais em vários ambientes recifais no Brasil.

Os recifes de corais, assim denominados pela presença e importância destes organismos coloniais na sua construção, necessitam de determinadas condições para se desenvolverem, como baixa turbidez da água, alta salinidade e temperatura variando entre 23-29 graus Celsius (NOAA, 2020). De forma geral, os recifes de corais e coralíneos estão distribuídos em toda a zona tropical dos oceanos no mundo. Porém, ambientes coralíneos também ocorrem nas regiões subtropicais. A diversidade de espécies de corais construtores também é maior nas regiões tropicais.

### Conhecimento e distribuição dos recifes no Nordeste

Os ambientes recifais são uma característica marcante da paisagem no Nordeste do Brasil (Fig. 10.1), tendo sido mencionados por Darwin durante sua viagem a bordo do Beagle (Vitor & Silva, 2017). Estudos detalhados começaram a ser desenvolvidos a partir da criação do então Instituto de Oceanografia da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), na década de 1950, sendo este o segundo centro oceanográfico criado no país e o primeiro da região Nordeste. O Instituto recém criado contou, em seu quadro, com jovens pesquisadores, entre eles Jacques Laborel e Françoise Laborel-Deguen, que na década de 1960 produziram um importante material de referência para os estudos desenvolvidos posteriormente em toda a região Nordeste, apresentando descrições detalhadas dos ambientes recifais, que incluíram a composição de espécies e o seu zoneamento ao longo das estruturas recifais. Os registros de Laborel e seus colaboradores, feitos a partir de sobrevoos da costa e de mergulho autônomo,

além de coletas de espécimes, permitiram que outros pesquisadores aprofundassem questões que não puderam ser elucidadas na época, tanto por limitações financeiras quanto tecnológicas. Uma apresentação bastante minuciosa dos recifes costeiros e rasos, desde Fortaleza (CE) até Cabo Frio (RJ) pode ser verificada na publicação “RECIFES BRASILEIROS: O LEGADO DE LABOREL” (Laborel-Deguen et al., 2019).

Com o passar do tempo, alguns ambientes recifais da região Nordeste foram mais estudados do que outros, por questões estratégicas, logísticas ou pelo alto valor biológico da região. Historicamente, podem ser destacados os ambientes recifais do banco de Abrolhos e da região que hoje compreende a Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (ex: Ferreira & Maida, 2006; Feitosa & Longo, 2018; Laborel-Deguen et al., 2019). Com o avanço tecnológico, regiões antes pouco estudadas estão sendo objetos de pesquisa, ampliando o conhecimento e a



**Figura 10.1** Praia de Porto de Galinhas, em Pernambuco, bastante estudada na década de 1960 por J. Laborel e F. Laborel-Deguen. **Foto** Raquel Marchiori (2020).

percepção sobre a ampla variedade de ambientes recifais da região Nordeste.

Exemplos de descobertas mais recentes incluem os ambientes recifais no estado de Sergipe. O Rio São Francisco é o maior rio totalmente localizado em território brasileiro, além de ser o maior canal fluvial adentrando o Oceano Atlântico entre o Rio de La Plata e o Rio Amazonas, o que levava ao entendimento errôneo de que ele impedia o desenvolvimento de recifes coralíneos na plataforma sergipana. Em estudo realizado por Fontes et al. (2017), sobre a morfologia e sedimentologia da bacia dos estados de Alagoas e Sergipe, foram identificados três conjuntos de recifes submersos alinhados e paralelos à linha de costa na plataforma continental, posicionados em níveis batimétricos entre 10 e 25 m. Na plataforma norte de Sergipe, encontram-se os recifes submersos de Ponta dos Mangues, que constituem um conjunto de elevações recifais descontínuas e alinhadas (Fontes et al., 2017). Cabe observar que os pescadores da região tinham certeza da existência destes recifes anteriormente, tendo inclusive nomeado a estrutura como Pedra do Robalo. Também foi verificada a existência de corais na Pedra do Robalo (*Siderastrea stellata* e *Mussismilia hispida*), o que destoa do entendimento anterior, que apontava o Rio São Francisco como uma efetiva “barreira biológica” (Neves et al., 2005). Outra formação recifal, conhecida como Pedra do Grageru, está localizada na zona de sedimentação lamosa frontal ao Rio Japarutuba, a uma distância de 10 km da costa, próximo ao ponto de quebra da plataforma continental, consistindo em uma formação calcária com floresta de gorgônias e corais negros associados (Fontes, et al., 2017). O coral *Scolymia wellsi* foi registrado em profundidade de 27 m (Paes et al., 2007), sendo a espécie de

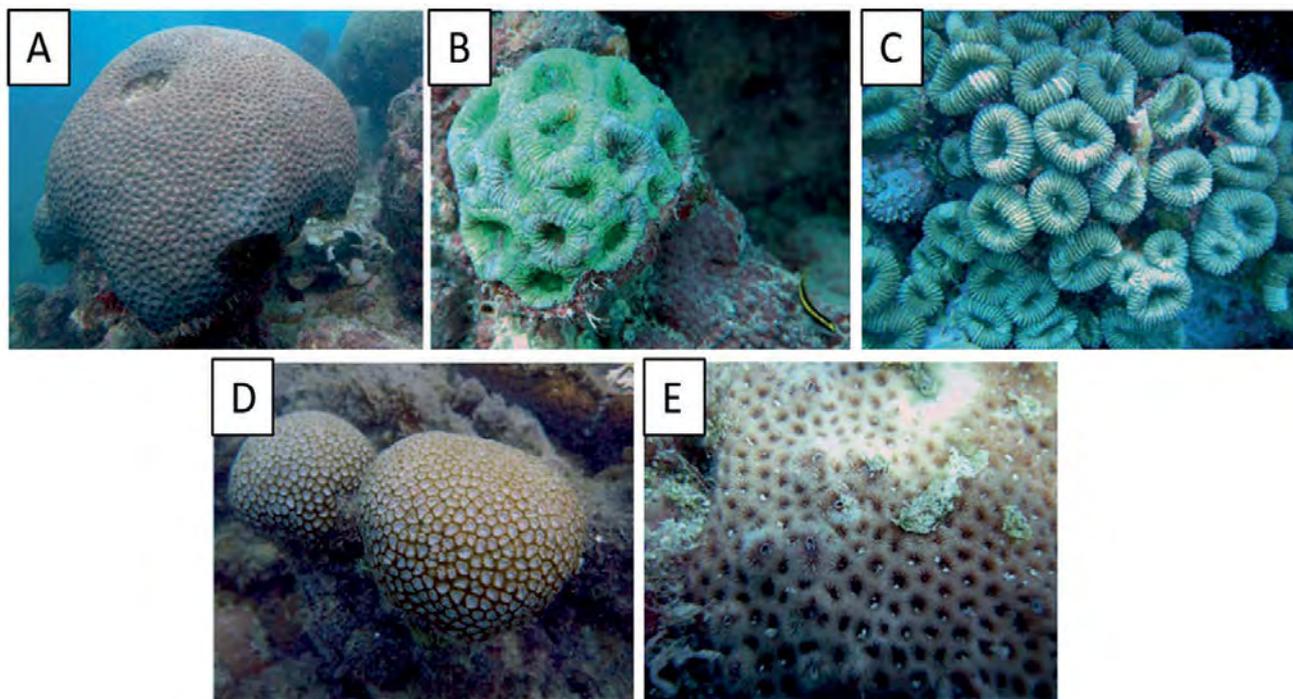
coral que domina a Pedra do Grageru (Neves et al., 2006). Outras espécies identificadas no local são *Montastraea cavernosa* e *Madracis decactis* (Neves et al., 2005).

Trabalhos de mapeamento de paisagem também contribuem com o mapeamento de áreas coralíneas. Em Pernambuco mapeamentos de paleocanais (Camargo, 2005; Camargo et al., 2007) tem contribuído para identificação de feições particulares com avanços tecnológicos mais recentes permitindo escalas mais amplas, como o uso de imagens de satélites com e outras ferramentas espaciais apresentadas como subsídios para o Planejamento Espacial Marinho na APA Costa dos Corais (Silveira, 2019). Outro exemplo de mapeamento recente de ambiente recifal no Nordeste fica no estado do Rio Grande do Norte, nos recifes Açú. A partir de uma abordagem múltipla, que se utilizou de imagens de satélite, batimetria e imagens retroespalhadas, sedimentos superficiais, foraminíferos bentônicos e levantamentos subaquáticos, a região, que fica entre 25-80 m de profundidade, chegou a apresentar até 17% de cobertura coralínea, com ocorrência de seis espécies de corais escleractíneos (*Agaricia agaricites*, *Agaricia fragilis*, *Montastrea cavernosa*, *Porites* sp., *Siderastrea* sp. e *Mussismilia hispida*) e uma de hidrocoral (*Millepora braziliensis*), além do registro de peixes recifais (Gomes et al., 2020).

Trabalhos como estes tem permitido avanços nas mais recentes fronteiras dos ambientes recifais profundos. Com novas tecnologias e maior acessibilidade, pesquisas nestes ambientes têm sido desenvolvidas, mostrando a importância desses recifes como refúgios frente às mudanças climáticas, apesar de já sofrerem impactos antrópicos, principalmente da pesca, da indústria do óleo e gás e da mineração marinha (Amado-Filho et al., 2012; Gomes et al., 2020).

Os únicos recifes coralíneos do Atlântico Sul são encontrados no Brasil (Maida & Ferreira, 1997; Castro & Zilberbeg, 2016), localizados, principalmente, na região Nordeste (da região do Parcel do Manuel Luís, no Maranhão, até a região dos Abrolhos, na Bahia, compreendendo as latitudes 01°S a 18°S). A fauna de corais encontrada na área apresenta três características principais, que lhes conferem diferenciação em relação aos demais sistemas recifais encontrados no mundo: a) uma fauna coralínea de baixa diversidade; b) estruturas formadas, predominantemente, por espécies endêmicas e c) presença de espécies, predominantemente, de crescimento massivo (Leão et al., 2003). Tais características são remanescentes de uma fauna de corais originária que data do Terciário e que é considerada a principal resposta para o elevado endemismo dos corais brasileiros (Maida & Ferreira, 1997; Leão et al., 2003; Laborel-Deguen, 2019).

A costa brasileira possui, até o presente, dezoito espécies conhecidas de escleractíneos (corais-pétreos zooxantelados), dezessete de octocorais, três de antipatários (corais-negros) e cinco de hidrocorais (Castro & Zilberberg, 2016; Maida & Ferreira, 2019) (Tab. 10.1). Dentre os escleractíneos, o Brasil apresenta cinco espécies consideradas endêmicas: *Mussismilia braziliensis*, *Mussismilia hispida*, *Mussismilia harttii*, *Favia leptophylla* e *Siderastrea stellata* (Feitosa & Longo, 2018) (Fig. 10.2). Ademais, onze octocorais, três hidrocorais e um coral-negro são considerados endêmicos do Brasil (Tab. 10.1). As espécies *M. braziliensis* e *F. leptophylla*, por sua vez, ocorrem apenas no litoral baiano e em Abrolhos (também pertencente ao estado da Bahia) (Feitosa & Longo, 2018). Abrolhos possui a mais alta diversidade de corais do Brasil, uma vez que todos os corais escleractíneos zooxantelados e hidrocorais estão presentes no local (Ferreira & Maida, 2006).



**Figura 10.2** Corais zooxantelados endêmicos da costa brasileira: **A)** *Mussismilia braziliensis*; **B)** *Mussismilia hispida*; **C)** *Mussismilia harttii*; **D)** *Favia leptophylla*; **E)** *Siderastrea stellata*. **Adaptado** de Soares et al. (2016). **Fotos** Ruy K. Kikuchi

**Tabela 10.1** Diversidade de corais em recifes e ambientes coralíneos brasileiros. **Adaptado** de Castro e Zilberberg (2016). Em negrito estão as espécies consideradas endêmicas.

Táxon	Total (N)	Endêmicas (N)	Contribuição das espécies endêmicas (%)	Nome científico
Corais-pétreos zooxantelados (ordem Scleractinia)	18	5	28	<i>Agaricia agaricites</i>
				<i>Agaricia fragilis</i>
				<i>Astrangia braziliensis</i>
				<i>Astrangia rathbuni</i>
				<i>Favia gravida</i>
				<b><i>Favia leptophylla</i></b>
				<i>Madracis decactis</i>
				<i>Meandrina braziliensis</i>
				<i>Montastraea cavernosa</i>
				<b><i>Mussismilia braziliensis</i></b>
				<b><i>Mussismilia harttii</i></b>
				<b><i>Mussismilia hispida</i></b>
				<i>Phyllangia americana</i>
				<i>Porites astreoides</i>
				<i>Porites branneri</i>
<i>Scolymia wellsii</i>				
				<b><i>Siderastrea stellata</i></b>
				<i>Stephanocoenia michelini</i>
Corais-negros (ordem Antipatharia)	3	1	33	<i>Antipathes atlantica</i>
				<b><i>Cirripathes secchini</i></b>
				<i>Stichopathes occidentalis</i>
Corais-de-fogo ou hidrocorais (famílias Milleporidae e Stylasteridae)	5	3	60	<i>Millepora alcicornis</i>
				<b><i>Millepora braziliensis</i></b>
				<b><i>Millepora laboreli</i></b>
				<b><i>Millepora nitida</i></b>
				<i>Stylaster roseus</i>
Octocorais (subclasse Octocorallia)	17	11	65	<i>Carijoa riisei</i>
				<i>Ellisella elongata</i>
				<i>Heterogorgia uatumani</i>
				<b><i>Leptogorgia pseudogracilis</i></b>
				<b><i>Leptogorgia violacea</i></b>
				<i>Ellisella barbadensis</i>
				<i>Lophogorgia punicea</i>
				<b><i>Muricea flamma</i></b>
				<b><i>Muriceopsis metaclados</i></b>
				<i>Muriceopsis sulphurea</i>
				<b><i>Neospongodes atlantica</i></b>
				<b><i>Olindagorgia gracilis</i></b>
				<b><i>Phyllogorgia dilatata</i></b>
				<b><i>Plexaurella grandiflora</i></b>
				<b><i>Plexaurella regia</i></b>
<b><i>Stephanogorgia rattoi</i></b>				
<b><i>Trichogorgia brasiliensis</i></b>				
<b>Total</b>	<b>43</b>	<b>20</b>	<b>47*</b>	

\* Percentual referente as espécies endêmicas que compõem o número total de espécies.

Outro grupo extremamente importante dentro do grande endemismo presente nos ambientes recifais são os peixes, uma vez que representam grande parte da diversidade e biomassa, além de serem considerados os maiores agentes transformadores desses ecossistemas (Choat & Bellwood, 1991; De Paula et al., 2016). No Brasil, existem 405 espécies de peixes consideradas residentes recifais, das quais 111 são consideradas endêmicas e 36 ameaçadas (Pinheiro et al., 2018).

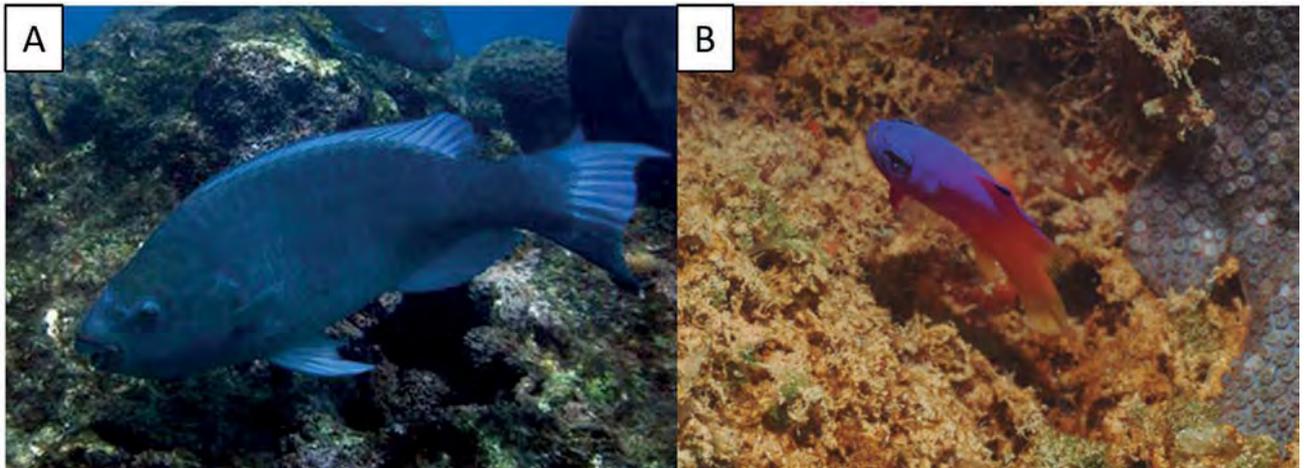
No Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), a formação recifal é diferenciada das demais ilhas oceânicas da região equatorial (Sichel et al., 2009) por ser composta, predominantemente, por macroalgas e algas calcárias e apresentar apenas duas espécies de escleractíneos zooxantelados (*Madracis decactis* e *Scolymia wellsii*), os quais

ocorrem em profundidades abaixo dos 30 metros (Quimbayo et al., 2018). Apesar de ser considerado um local com baixo número de espécies de peixes recifais, apresenta grande endemismo - três espécies de peixes endêmicas (Fig. 10.3 A - C) são encontradas no ASPSP, além da espécie *Holacanthus ciliaris* (Fig. 10.3 D), que possui um morfotipo distinto dos espécimes observados na costa devido ao isolamento geográfico (Quimbayo et al., 2018).

Dentre os peixes endêmicos associados a ambientes recifais no Brasil e que são encontrados no Nordeste, podem ser citados como exemplos as espécies *Gramma brasiliensis* e *Scarus trispinosus* (budião-azul) (Fig. 10.4). O budião-azul é um grande herbívoro encontrado ao longo da costa brasileira, muito apreciado na culinária e, por este motivo, um alvo da pesca (Roos et al.,



**Figura 10.3** Espécies endêmicas de peixes recifais encontradas no ASPSP. **A)** *Prognathodes obliquus*; **B)** *Choranthias salmopunctatus*; **C)** *Stegastes sanctipauli*; e **D)** morfotipo azul de *Holacanthus ciliaris*. **Fonte** Quimbayo et al. (2018). **Fotos** Luiz A. Rocha.



**Figura 10.4** As espécies **A)** *Scarus trispinosus* e **B)** *Gramma brasiliensis*, endêmicas dos ambientes recifais brasileiros. **Adaptado** de Freitas et al., 2019 (Foto de Ronaldo B. Francini-Filho) (A) e De Paula et al., 2016 (Foto de Clovis Castro) (B).

2020). Apesar de ser considerado uma espécie-chave nos recifes, por seu papel no controle de algas, a sobrepesca desse labrídeo fez com que o organismo, atualmente, esteja ameaçado de extinção sob a categoria “em perigo” pelo Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção (ICMBio, 2018). Adicionalmente, das 11 espécies de budiões encontradas no Brasil (SiBBR, 2020), seis (incluindo o budião-azul) são endêmicas (*Scarus trispinosus*, *Scarus zelindae*, *Sparisoma amplum*, *Sparisoma axillare*, *Sparisoma rocha*, *Sparisoma tuiupiranga*) da costa brasileira e/ou ilhas oceânicas, possuem, em sua maioria, dados insuficientes e são consideradas vulneráveis, podendo estar ameaçadas pela sobrepesca (Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção/ICMBio, 2018).

Por fim, a espécie *G. brasiliensis* é um pequeno peixe, herbívoro, que apresenta comportamento interessante, podendo ser encontrado de cabeça para baixo no teto de buracos utilizados como abrigo nos recifes (De Paula et al., 2016). Devido à sua grande procura como espécie ornamental, *G. brasiliensis* foi classificada como ameaçada e sua coleta e venda consideradas crimes ambientais no início dos anos 2000. Entretanto, a espécie é constantemente encontrada em lojas de aquarismo pelo Brasil e, atualmente, não está presente na portaria do MMA Nº 445/2014, que reconhece

espécies da fauna brasileira ameaçadas de extinção, tampouco no Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção (ICMBio, 2018), em detrimento das suas características ecológicas e que não favorecem sua exploração.

## 2. SERVIÇOS ECOSISTÊMICOS DOS AMBIENTES RECIFAIS

Serviços ecossistêmicos ou serviços ambientais dos ecossistemas podem ser definidos como os benefícios oferecidos pela natureza para a sociedade, sendo importantes para o bem-estar humano e para a economia. Tais serviços podem ser identificados, mensurados e avaliados, podendo ser classificados em quatro categorias:

- i)** de provisão ou abastecimento (“produtos que as pessoas obtêm da natureza”);
- ii)** de regulação (“benefícios que as pessoas obtêm da regulação do ambiente feita pelos ecossistemas e/ou seres vivos”);
- iii)** culturais (“benefícios que as pessoas obtêm do contato com a natureza, que contribuem para sua cultura e bem-estar”); e
- iv)** de suporte (“serviços necessários para que outros serviços existam”) (Gerling et al., 2016).

Os recifes coralíneos são ambientes complexos (Melo et al., 2005), que provêm inúmeros serviços ecossistêmicos e, conseqüentemente, diversos benefícios sociais e econômicos para as populações costeiras e insulares. Por estas e outras razões, estão entre os ecossistemas de maior importância, tanto para o funcionamento do ambiente marinho como um todo, quanto para a sociedade. Dentre os inúmeros serviços ecossistêmicos, os recifes são fontes de alimento, servem como habitat para inúmeras espécies, suportam uma valiosa indústria turística, fornecem sedimentos para a formação de praias e atuam como barreiras para a ação das ondas, atenuando sua energia e prevenindo, assim, a erosão costeira e a perda de habitats por este processo (Westmacott et al., 2000). Adicionalmente, tais ecossistemas têm grande potencial na obtenção de fármacos (Moberg & Folke, 1999).

Dois setores que se destacam no Nordeste do Brasil como grandes beneficiários dos serviços ecossistêmicos realizados pelos ambientes recifais são a pesca artesanal e o turismo. Ambos rendem ao país cerca de US\$7,2 trilhões anuais (Reef Check Brasil, 2018). No que se refere à pesca, quando saudáveis, os recifes provêm ambientes apropriados tanto às atividades reprodutivas quanto ao estabelecimento larval de peixes, inclusive daqueles de interesse comercial. Adicionalmente, os recifes dispõem de locais abrigados necessários à proteção de peixes em relação aos seus predadores e abundante fornecimento de alimentos. Somados, tais fatores – condições adequadas para reprodução, abrigo e alimento- resultam em elevadas diversidade e abundância de peixes (Westmacott et al., 2000), crustáceos e moluscos e na associação entre ambientes recifais saudáveis e manutenção das populações pesqueiras, desde que bem manejadas.

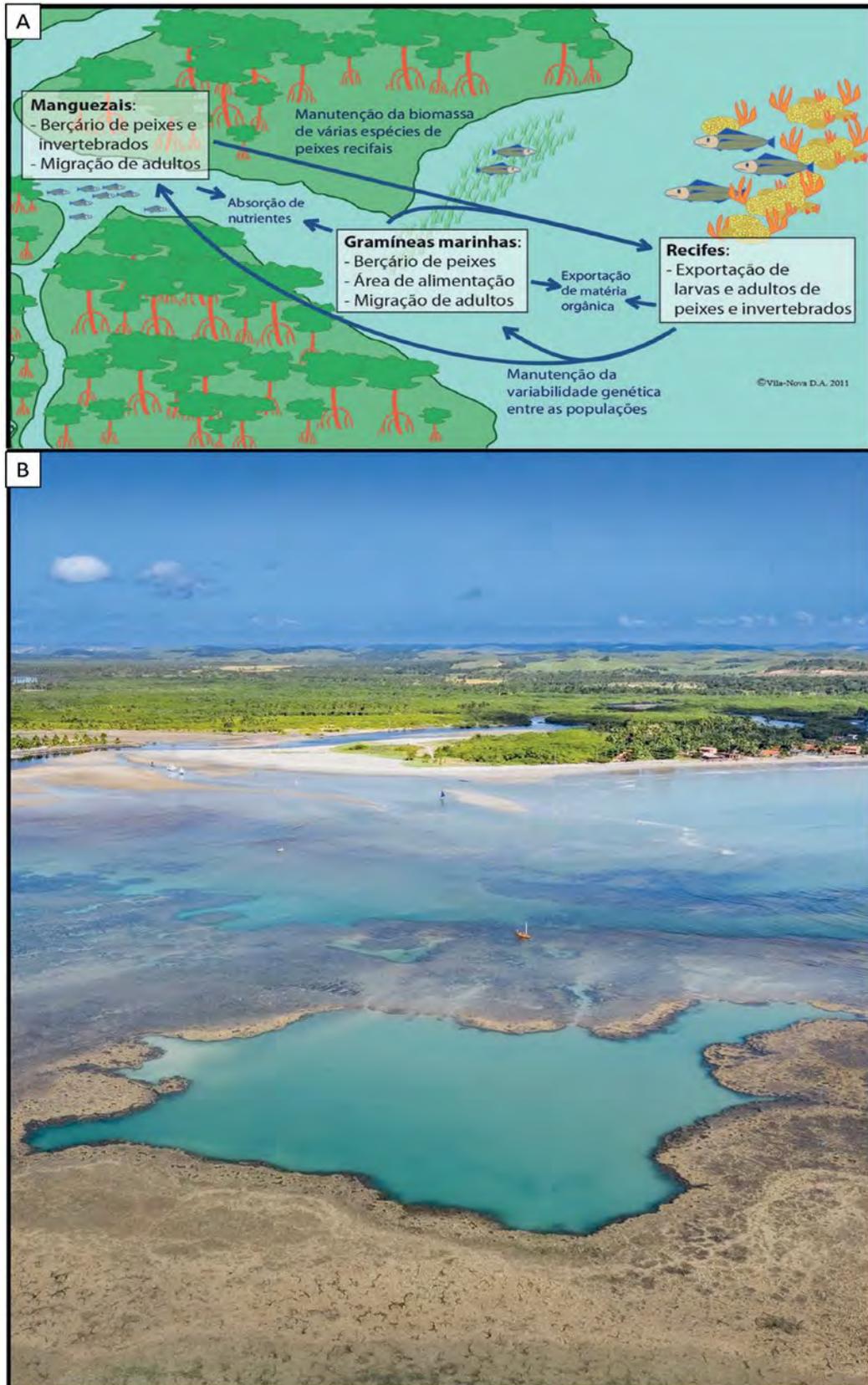
Quanto à indústria do turismo, em virtude da sua complexidade e biodiversidade- a maior entre todos os ambientes marinhos (Gerling et al., 2016)- os recifes coralíneos apresentam grande relevância, não apenas no Nordeste do Brasil, mas em todos

os países da região intertropical, onde ajudam a movimentar a economia e gerar divisas (Melo et al., 2005). O turismo é um dos setores econômicos que mais crescem globalmente (Steiner et al., 2006) e a beleza cênica, somada à extraordinária diversidade de cores, formas e espécies associadas aos recifes (tubarões, peixes, moluscos, crustáceos, entre outros), resulta em grande atrativo turístico, lazer, diversão, esporte, bem-estar e/ou conhecimento acerca da biodiversidade marinha através de mergulho livre e autônomo (Westmacott et al., 2000).

### 3. CONECTIVIDADE

Os ambientes costeiros e marinhos estão interconectados, seja por meio de organismos que migram ou pelo fluxo de águas, matéria orgânica, dispersão de organismos (exportação de larvas e adultos), áreas de alimentação distintas ou ainda para completar o ciclo de vida de algumas espécies (Crowder & Norse, 2008). Os ambientes recifais se beneficiam dessa conectividade para garantir diversidade e resiliência das espécies que os compõem, particularmente com relação às espécies que necessitam de mais de um ambiente distinto para completar seu ciclo de vida (Fig. 10.5). Como exemplos, pode-se mencionar os peixes recifais, como vermelhos e garoupas, que, em sua maioria, precisam de ambientes estuarinos e de mar aberto para finalizar seu ciclo de vida. Manguezais e bancos de gramíneas marinhas, por sua vez, são frequentemente utilizados por espécies de peixes recifais para alimentação, como berçários ou ainda durante sua fase juvenil.

Considerando a conectividade dos recifes com outros ambientes, é notória a necessidade de que pesquisas, ações de conservação e gestão costeira sejam abordadas de forma integrada. Uma visão holística dos sistemas costeiro-marinhos, seja pensando nos problemas como também em suas soluções, pode beneficiar múltiplos ambientes e promover a resiliência a longo prazo.



**Figura 10.5**  
**A)** Esquema apresentando a conectividade de ambientes costeiros e marinhos, incluindo recifes, manguezais, estuários e bancos de gramíneas marinhas. **Fonte** extraído de Vila-Nova (2014).  
**B)** Imagem do Pontal de Maracáipe-PE, mostrando recifes, manguezais e outros ambientes costeiros. **Fotos** Renato Albuquerque (2020).

## 4. AMEAÇAS AOS AMBIENTES RECIFAIS

Ao longo das últimas décadas, a perda de biodiversidade trouxe grande preocupação no contexto dos impactos sobre os biomas brasileiros. Tais impactos são oriundos da busca desenfreada pelo crescimento econômico, muitas vezes de forma totalmente insustentável. Apesar da sua importância para o equilíbrio do ambiente marinho e dos inúmeros benefícios de interesse global em mantê-los íntegros e saudáveis, os ambientes recifais representam, atualmente, um dos ecossistemas mais pressionados e ameaçados do mundo. Estressores globais e impactos locais se combinam em diferentes intensidades e escalas temporais, afetando a resiliência destes ambientes, prejudicando a biota associada e impedindo o bom funcionamento e a prestação dos tão importantes serviços ecossistêmicos.

Por resiliência de um recife de coral, entende-se a capacidade do sistema (e de todos os seus componentes) em amortecer os impactos do ambiente e manter o potencial para a recuperação e o desenvolvimento posterior (Moberg & Folke, 1999). Até recentemente, impactos antrópicos como a poluição marinha e a pesca destrutiva eram consideradas as principais ameaças para os ambientes recifais e para sua resiliência. No entanto, embora tais ameaças persistam, nas últimas décadas passou-se a considerar a emergência climática em curso e todos os estressores a ela associados como uma ameaça potencialmente maior (Westmacott et al., 2000).

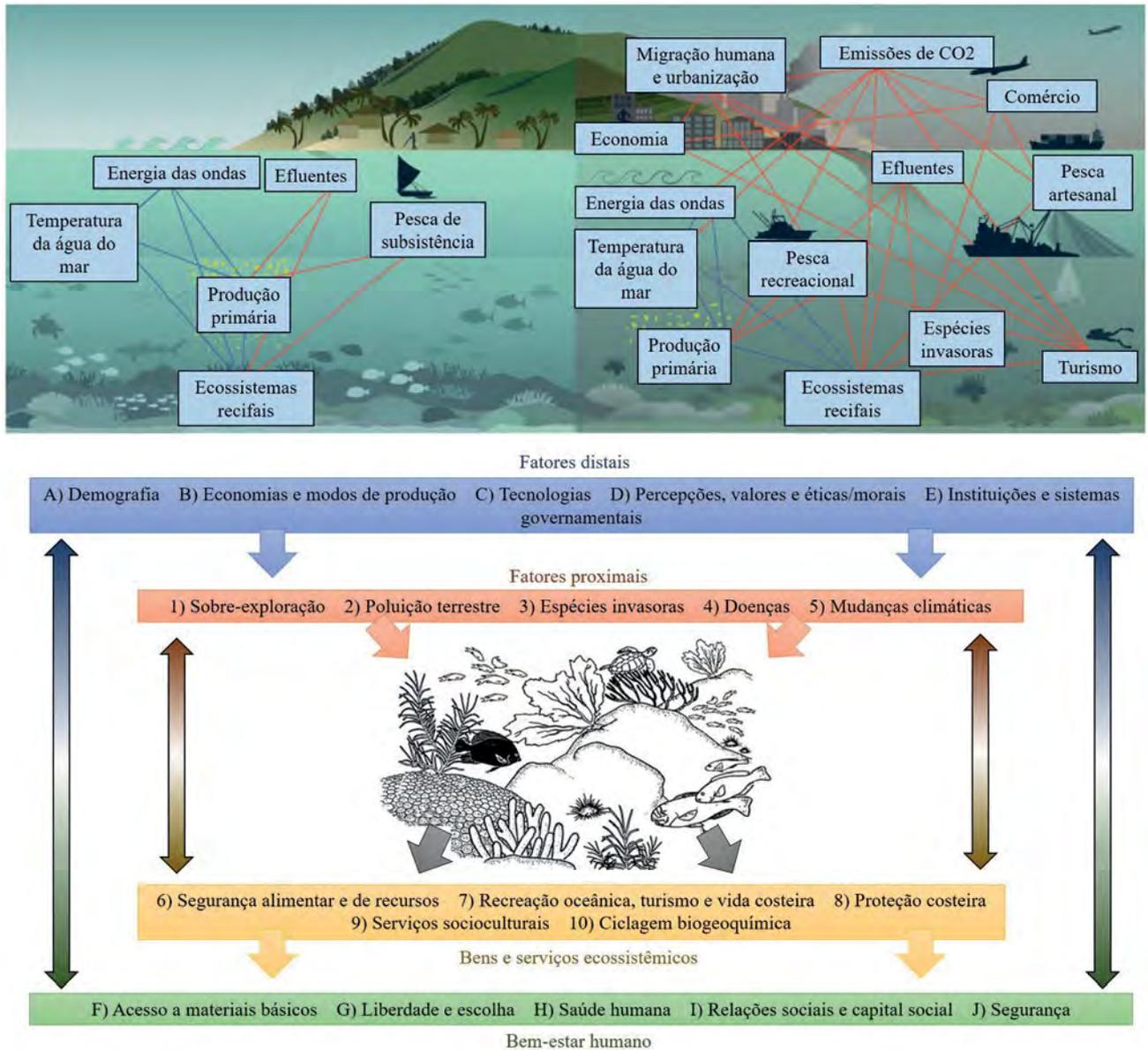
Os impactos da ação humana sobre os ambientes recifais e a dependência da natureza enquanto produtora de bem-estar da sociedade (provisão de água, alimento, serviços ecossistêmicos, valores estéticos e espirituais, entre outros) vem sendo melhor avaliados nos últimos anos, pela chamada “macroecologia socioecológica” (Cinner & Kittinger, 2015; Hughes et al., 2017; Williams et al., 2019). Adicionalmente, os modelos ecológicos preditores

da qualidade ambiental dos recifes, cada vez mais, precisam ser avaliados da perspectiva dos fatores distais. Tais fatores constituem características estruturais no sistema social, que afetam indiretamente os ambientes recifais, mediando os fatores proximais (impactos diretos sobre os recifes, tais como sobrepesca, poluição, introdução de espécies exóticas, entre outros) e incluindo a demografia, os modos de produção e o mercado, por exemplo. Esta análise integrada se justifica pela iminência da pressão da Era Antropocênica sobre os ambientes em questão (Cinner & Kittinger, 2015; Hughes et al., 2017; Williams et al., 2019) (Fig. 10.6).

### 4.1. Pesca

Entre outros fatores de origem antrópica que trazem prejuízos crônicos aos ambientes recifais, destaca-se a exploração excessiva dos recursos pesqueiros (sobrepesca). Tal atividade pode visar espécies “chave”, que possuem um papel específico e relevante na cadeia trófica e em todo o funcionamento do ecossistema recifal (por exemplo, a retirada de peixes herbívoros pela pesca e a coleta de peixes ornamentais marinhos - POMs), provocando desequilíbrio. Além disso, os efeitos a nível de espécie e população podem ser críticos (redução dos estoques, redução de tamanho individual, impactos na reprodução, entre outros) (Chaves & Feitosa, 2018). Por sua vez, a pesca destrutiva, que se utiliza de técnicas e/ou substâncias nocivas (redes, explosivos, químicos, venenos, etc.), além de provocar a mortalidade excessiva e não seletiva dos organismos, pode causar danos físicos consideráveis aos recifes (Westmacott et al., 2000).

De modo geral, a pesca é direcionada, inicialmente, às espécies de peixes predadores (predadores de topo) ou pertencentes aos níveis tróficos mais elevados (Jennings & Kaiser, 1998), capazes de fornecer proteína em maior volume. Entretanto, com o impacto da sobrepesca sobre esses estoques, a pesca tende a visar novos alvos, contemplando espécies de peixes de níveis tróficos



**Figura 10.6 Acima** Fatores dos ecossistemas de recifes coralíneos brasileiros pré-Antropoceno vs. hoje (em azul estão as influências ambientais e em vermelho as humanas). **Adaptado** de Williams et al. (2019). **Abaixo** Estrutura heurística que descreve as ligações entre os sistemas sociais e os ecossistemas de recifes coralíneos. **Adaptado** de Cinner e Kittinger (2015).

inferiores. A partir deste momento, predadores de invertebrados (mesopredadores) passam a sofrer maior impacto pela pressão pesqueira, como por exemplo as cambubas ou xiras (Haemulidae), os pampos (Carangidae) e os cangulos (Balistidae), encontrados em ambientes recifais (Chaves &

Feitosa, 2018). A redução desses mesopredadores faz com que ocorra um aumento na abundância de invertebrados danosos aos recifes em grandes quantidades, como é o caso dos ouriços (*Urchin barrens*) (Chaves & Feitosa, 2018). Com a redução dos predadores pela pressão pesqueira, espécies

de níveis tróficos ainda mais baixos passam a ser visados, o chamado *fishing down food webs* e que ocorre em pescarias pelo mundo e no Brasil, incluindo o Nordeste (Pauly et al., 1998; Freire & Pauly, 2010; Chaves & Feitosa, 2018). Um exemplo da prática consiste na pesca dos peixes-papagaio (Labridae), herbívoros de grande porte considerados um dos maiores controladores de algas dos ambientes recifais (Chaves & Feitosa, 2018).

Os apetrechos de pesca mais utilizados em ambientes recifais da região Nordeste são arpões, bicheiros, varinha (linha e anzol) e tarrafa (Fig. 10.7). Os bicheiros são muito utilizados na pesca de polvo, realizada tanto para subsistência quanto para complementação de renda, sendo praticada por meio do mergulho livre ou da caminhada sobre recifes rasos (Dultra & Schiavetti, 2016). A varinha e a tarrafa, também muito utilizadas, são consideradas técnicas de pesca multi específicas, uma vez que capturam tanto espécies alvo, quanto espécies raras ou vulneráveis (Chaves & Feitosa, 2018). O arpão, apesar de não ser considerado uma técnica de pesca predatória, pode trazer grandes impactos para espécies consideradas vulneráveis ou criticamente ameaçadas, como é o caso do mero (*Epinephelus* spp.) (Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção/ICMBio, 2018).

Por fim, duas outras modalidades de pesca devem ser evidenciadas: a pesca de peixes ornamentais marinhos e a pesca fantasma. Quanto à pesca ornamental, segundo Araújo e Albuquerque

Filho (2005), o Brasil possui 137 espécies recifais comercializadas, sendo os estados do Ceará, Pernambuco e Bahia os grandes responsáveis pelo fornecimento de peixes oriundos da região Nordeste. Já a pesca fantasma, realizada pelos chamados petrechos de pesca abandonados, perdidos ou descartados, é considerada um impacto invisível que pode trazer grandes problemas para os ambientes recifais, uma vez que podem continuar a pescar por anos (apesar de organismos incrustantes poderem atuar como redutores da capturabilidade) (Chaves & Feitosa, 2018), prendendo os animais, que podem morrer de fome ou ainda por asfixia (De Paula et al., 2016), como é o caso das tartarugas (Ver capítulo: *A pesca fantasma e seus impactos invisíveis no Nordeste do Brasil- Vol. 2*).

#### 4.2. Turismo

São diversos os impactos diretos do turismo sobre o ambiente recifal, entre os quais destacam-se os danos físicos provocados pela ancoragem de embarcações, pelo pisoteio e pelo contato de nadadeiras nos corais (muito comum quando turistas, sem experiência com mergulho, se aproximam das colônias), afetando a integridade das estruturas naturais (Melo et al., 2005). A prática da coleta de fragmentos, conchas e outras partes de organismos como *souvenirs*, ainda que realizada em pequena escala, prejudica a integridade e o funcionamento destes ecossistemas. Finalmente, as interações com os organismos, a exemplo da



**Figura 10.7** A) Bicheiro B) linha e anzol e tarrafa C) arpão, utilizados na captura de peixes em ambientes recifais no Nordeste do Brasil. Adaptado A) Dultra e Schiavetti (2016) Foto Manuella Dultra B) Daniel Galvão (2019) C) Daniel Galvão (2020).



**Figura 10.8** Demarcação da zona de sacrifício no recife da praia de Porto de Galinhas. Entre as cordas é permitido o pisoteio e é possível observar que a região não possui algas recobrendo o recife, sendo uma zona praticamente sem vida. Já fora das cordas, onde o pisoteio é proibido, é ainda possível observar a existência de algas recobrendo o recife. **Foto** Salve Maracáipe (2020).

prática de alimentar peixes, podem promover importantes mudanças comportamentais nestes, além de alterações na qualidade da água, ambos com consequências negativas para o ambiente.

A demarcação de áreas por cordas e boias, por exemplo, limitando o uso de uma bancada e os locais de pisoteio, é uma das formas utilizadas na região de Porto de Galinhas, Pernambuco. O pisoteio é liberado, mas limitado a uma área conhecida por ‘zona de sacrifício’ (Fig. 10.8). Embora tal medida promova uma redução dos impactos, o turismo na região é muito intenso, com um fluxo anual de visitantes de cerca de 1,6 milhão de pessoas.

Desta forma, sendo o passeio às piscinas naturais o grande atrativo do destino, tem-se, por um lado, benefícios econômicos e, por outro, prejuízos ambientais cumulativos que demandam atenção.

Finalmente, um dos grandes impactos da cadeia do turismo sobre os ambientes recifais é a expansão da infraestrutura da cidade, por meio de resorts, portos, marinas, prédios, casas e comércios (impactos indiretos) (Melo et al., 2005). Essa infraestrutura causa a perda de áreas verdes, o aumento da temperatura do microclima local, alterações na sedimentação, poluição por falta de saneamento básico e pelo lixo plástico, entre outros

prejuízos ambientais que refletem, negativamente, em toda a biodiversidade marinha.

Por mais difundida que seja a informação sobre a conservação dos ambientes recifais, ainda são raras as ações efetivas a nível local, no intuito de conter os danos relacionados ao turismo. É importante que programas de educação ambiental, regras e fiscalizações sejam implementados e geridos de forma contínua para se criar uma cultura de conservação e valorização dos ambientes costeiros, em especial daqueles ricos em biodiversidade.

### 4.3. Sedimentação

Um estressor local bastante evidente em algumas áreas da costa brasileira é a sedimentação que, conforme mencionado anteriormente, constitui um fator limitante para o crescimento dos corais e de outros organismos construtores de recifes. Tal processo está intimamente relacionado ao desmatamento e poluição na região costeira, principalmente, devido aos efluentes domésticos não tratados, ao uso de fertilizantes na agricultura e à descarga de poluentes industriais. Neste sentido, no Nordeste do Brasil, o desmatamento e a produção de cana-de-açúcar são os fatores de maiores impactos (Feitosa & Longo, 2018). Segundo levantamento realizado por Feitosa e Longo (2018), os recifes encontrados na região de Tamandaré (Pernambuco) sofrem com o alto impacto da sedimentação, com valores de sedimentação bem elevados, alcançando  $99 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  se comparados, por exemplo à região de Abrolhos, com  $20 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ . Costa (2012) estimou uma taxa de  $229,94 \text{ mg.cm}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  para Porto de Galinhas, um valor quase três vezes maior que aquele encontrado em Tamandaré.

A costa pernambucana foi uma das regiões mais castigadas pelos impactos da cana-de-açúcar, uma vez que sua introdução no período colonial e a manutenção do estado como um dos maiores produtores do país contribuíram para o

desmatamento, o empobrecimento do solo e a liberação de resíduos do etanol (vinhoto ou restilo), que impactaram diretamente os ambientes recifais da região com a sedimentação (Correia et al., 2016; Pérez, 2019). O desmatamento dos manguezais e restingas da região do município de Ipojuca- PE, onde se encontra Porto de Galinhas, é considerado um exemplo emblemático do quão graves são estes impactos para os corais. A comunidade recifal descrita por Laborel na década de 1960 para a região sofreu grandes alterações e empobrecimento (Maida & Ferreira, 2019; Laborel-Deguen et al., 2019). O próprio pesquisador, ao retornar ao Brasil em 2002 e mergulhar novamente nos recifes de Porto de Galinhas e de Tamandaré-PE, estimou uma perda de aproximadamente 80% de cobertura de corais, o que mais tarde foi confirmado por estudo de Maida e Ferreira (2006).

Os ambientes recifais podem ser fortemente afetados pelos efeitos da sedimentação, que incluem a asfixia por recobrimento, a diminuição da luminosidade causada pela turbidez, a redução da diversidade de espécies, a inibição do recrutamento e as lesões teciduais (Chaves & Feitosa, 2018). Finalmente, agentes poluidores podem ser carregados, aderidos ao sedimento e causar impactos ainda maiores aos ambientes recifais (Chaves & Feitosa, 2018).

### 4.4. Espécies invasoras

Outra ameaça considerável aos ambientes recifais consiste na introdução e no estabelecimento de espécies exóticas. Dentre as espécies exóticas consideradas atualmente invasoras, duas se destacam no contexto dos ambientes recifais no Brasil: o peixe-leão (*Pterois volitans*) (peixes) e o coral-sol (*Tubastraea* spp.) (zoobentos). Essas duas espécies, por não apresentarem predadores e parasitas naturais, vem se tornando muito danosas nos ambientes recifais, onde conseguiram se estabelecer. Na região Nordeste do país, o coral-sol vem ganhando cada vez mais visibilidade e

causando preocupação em virtude de sua rápida colonização e crescente distribuição.

O coral-sol, ou *Tubastraea* spp. (Fig. 10.9), é uma espécie de coral pétreo produtor de esqueleto calcário pertencente à ordem Scleractinia, ahermatípico (não construtor de recifes) e azooxantelado (não dependente de algas simbiotes). O organismo apresenta coloração variável entre o vermelho-alaranjado e o amarelado (dependendo da espécie) e, atualmente, possui duas espécies introduzidas no Brasil, ambas consideradas invasoras (MMA, 2018a): *Tubastraea coccinea* Lesson (1830) e *Tubastraea tagusensis* Wells (1982).

As espécies representantes do coral-sol são oriundas de águas rasas dos Oceanos Pacífico e Índico, que encontraram, ao longo da costa brasileira, um ambiente propício para se estabelecer e se proliferar, sem predadores naturais (ou com predação reduzida) ou possíveis parasitas que pudessem comprometer sua distribuição. São consideradas engenheiras do ecossistema, uma vez que podem alterar a estrutura da comunidade, possuindo idade de reprodução precoce, alta produção de oócitos, curto tempo de incubação de embriões e hermafroditismo (De Paula, 2007). Ademais, apresentam propriedade para não incrustação, anti-predação e podem

liberar substâncias alelopáticas danosas a corais endêmicos (Silva et al., 2014), sendo bastante eficazes ao competir com espécies nativas, em geral prejudicando-as.

No Brasil, existem relatos da aparição do gênero desde o final da década de 1980, em plataformas de gás e petróleo da Bacia de Campos, Rio de Janeiro, região Sudeste do Brasil (MMA, 2009). Na década de 1990, o coral foi encontrado em costões rochosos da Baía da Ilha Grande, Rio de Janeiro. Apesar disso, seu primeiro registro data de 2001 (para ambas as espécies) (Casares et al., 2020). Atualmente, o coral-sol é encontrado ao longo da costa dos estados do Espírito Santo e São Paulo (Sudeste), Santa Catarina e Paraná (Sul) e no Nordeste do país nos estados da Bahia, Ceará, Sergipe e Pernambuco, incluindo registros em várias Unidades de Conservação (UCs).

No caso específico do litoral de Pernambuco, o coral-sol tem sido observado associado aos recifes artificiais, incluindo portos e naufrágios intencionais (Fig. 10.9). O potencial impacto causado por estruturas artificiais levou o Ibama a publicar, em 2009, a INSTRUÇÃO NORMATIVA IBAMA Nº 22, que dispõe sobre o licenciamento ambiental para instalação de recifes artificiais no Mar Territorial na Zona Econômica Exclusiva brasileiros. Além



**Figura 10.9** **Esquerda** Colônias de coral-sol *Tubastraea* spp. na proa do naufrágio Walsa, Parque dos Naufrágios Artificiais de Pernambuco. **Fonte** Paula Raposo, 2020. **Direita** Presença de coral-sol *Tubastraea* spp. ao longo do casco do naufrágio Virgo, Parque dos Naufrágios Artificiais de Pernambuco. **Fotos** Salve Maracáipe (2020).

do potencial como vetor de introdução de espécies exóticas, impactos associados aos recifes artificiais podem incluir alterações nas condições hidrodinâmicas, na morfologia do fundo e da costa e nas comunidades biológicas. A depender do material utilizado (concreto, materiais e estruturas inservíveis, pneus, entre outros) e do processo de preparação, o recife artificial pode ainda causar a contaminação dos compartimentos ambientais (água e sedimento), com consequências negativas para a biota e até mesmo para o uso recreativo. Sendo assim, toda operação de afundamento de embarcações para criação de recifes artificiais deve seguir rígidos protocolos técnicos e científicos para evitar qualquer tipo de contaminação do ambiente marinho. Em junho de 2020 a IN 22 foi revogada, tendo sido definido que até a publicação da nova regra, os recifes artificiais serão licenciados com base em critérios técnicos do próprio IBAMA, ainda não publicamente disponíveis.

#### 4.5. Mudanças climáticas

Estressores globais, como o nome já diz, afetam os ambientes recifais em larga escala, impactando globalmente na sua saúde e estabilidade. Tais estressores estão intimamente relacionados às mudanças climáticas e incluem: o aumento da temperatura superficial do mar; a acidificação oceânica; o aumento do nível do mar; a alteração de padrões climáticos – com intensificação e aumento da frequência de eventos extremos; a alteração nos padrões de circulação oceânica; a alteração nos regimes pluviométricos, entre outros. Por sua vez, os impactos locais interferem na resiliência dos recifes, reduzindo sua capacidade de adaptação às mudanças impostas pelos estressores globais (Conservation Training, 2020).

Os estressores globais são de difícil manejo, o que requer compromisso global, esforços em múltiplos setores e ações de longo prazo no intuito de desacelerar as mudanças em curso. As mudanças por eles induzidas trazem uma série de

consequências indesejáveis aos ambientes recifais e suas funções, a exemplo da interferência na capacidade de proteção da costa pelos recifes (no caso do aumento do nível do mar), com grandes impactos, que incluem a perda de áreas, habitats e infraestrutura, sobretudo em pequenas ilhas. Por sua vez, com o aquecimento da temperatura superficial do mar, o processo de branqueamento dos corais tende a se intensificar, podendo tornar populações construtoras de recifes inviáveis e alterar os padrões de distribuição geográfica destes ecossistemas em escala global.

O branqueamento é uma resposta natural de defesa dos corais a situações de estresse térmico, mas que pode levá-los à morte em condições extremas. O aumento da temperatura causa a perda de suas algas simbiotas (zooxantelas) e, como consequência, o tecido do coral perde sua cor e exhibe o esqueleto calcário (branco). No início de 2020, um grande evento de branqueamento ocorreu em nível global. Para a região Nordeste do Brasil (do norte da Bahia ao Rio Grande do Norte) grandes extensões coralíneas foram afetadas e recifes de grande importância como os de Fernando de Noronha, Porto de Galinhas e os encontrados na APA Costa dos corais (Pernambuco/Alagoas) foram atingidos (Fig. 10.10).

O aumento da concentração de gases de efeito estufa na atmosfera – nominalmente do dióxido de carbono – com o consequente aumento da concentração no oceano, pode reduzir os níveis de calcificação, afetando a capacidade de crescimento e edificação dos recifes. Já a alteração no padrão de circulação oceânica pode conduzir à alteração na distribuição destes ecossistemas, uma vez que modifica o processo de dispersão larval. Finalmente, com o aumento da frequência e a intensificação dos eventos extremos – a exemplo das tempestades – os danos estruturais aos recifes tendem a aumentar, o que, somado aos efeitos dos demais estressores, tende a reduzir a resiliência destes ecossistemas e comprometer sua estrutura e funcionamento (Westmacott et al., 2000).



**Figura 10.10** Corais durante o evento de branqueamento que ocorreu em 2020 na bancada de Porto de Galinhas, litoral sul do estado de Pernambuco. **Da esquerda para direita** *Mussismilia hispida* 100% branqueada; *Millepora alcicornis* cerca de 60% branqueada. **Foto** Salve Maracáipe (2020).

Cabe observar que todos estes estresses e seus efeitos se dão a longo prazo e que a história geológica demonstra que recifes, de modo geral, são ecossistemas longevos, capazes de se adaptar às perturbações, mantendo suas características enquanto recifes mesmo diante de mudanças consideráveis (Veron, 1995). Como ambientes complexos e dinâmicos, os recifes dispõem de certa capacidade, embora limitada, de evoluir e se adaptar diante de eventos negativos, retornando a um estado funcional. Impactos severos ou prolongados, no entanto, podem reduzir progressivamente sua resiliência, impedindo sua recuperação diante de novos impactos e conduzindo o ecossistema a uma mudança definitiva e irreversível. Assim, uma gestão eficiente dos recifes – mesmo daqueles que foram danificados severamente – é extremamente importante, visto ser determinante para a sua sobrevivência (Westmacott et al., 2000).

#### 4.6. Doenças

As doenças em ambientes recifais são a maior causa de perda de cobertura coralínea no mundo. Os principais estressores ambientais e antrópicos relacionados ao surgimento de doenças em recifes são a poluição, a sobrepesca e as mudanças climáticas (Leite et al., 2016). A pressão pesqueira sobre peixes herbívoros, por exemplo, pode causar a proliferação desenfreada de algas que podem ser nocivas, estimulando a proliferação de microrganismos, liberando substâncias químicas (alelopatia), causando sombreamento, entre outros. A poluição causada pelo excesso de nutrientes pode causar a proliferação, aumento da virulência e agravamento de doenças causadas por microrganismos. Já as mudanças climáticas, que trazem aumentos na temperatura e acidificação dos oceanos, podem impactar no crescimento e calcificação de espécies de corais, potencialmente tornando-se porta de entrada para a proliferação de doenças (Leite et al., 2016).

Dentre as principais doenças que acometem os corais no Brasil, podem ser citadas a doença da banda branca (*Vibrio carchariae*) e a praga branca

(*Aurantimonas coralicida*, um dos três agentes que desencadeiam a doença e o único conhecido) (Leite et al., 2016). É importante deixar claro que o efeito do branqueamento e a doença do branqueamento possuem causas diferentes. O efeito do branqueamento está relacionado à perda de zooxantelas devido, principalmente, ao aumento de temperatura (Marangoni et al., 2016). Por sua vez, a doença do branqueamento pode ser causada por espécies do gênero *Vibrio* e que induzem à perda de coloração dos corais (Leite et al., 2016).

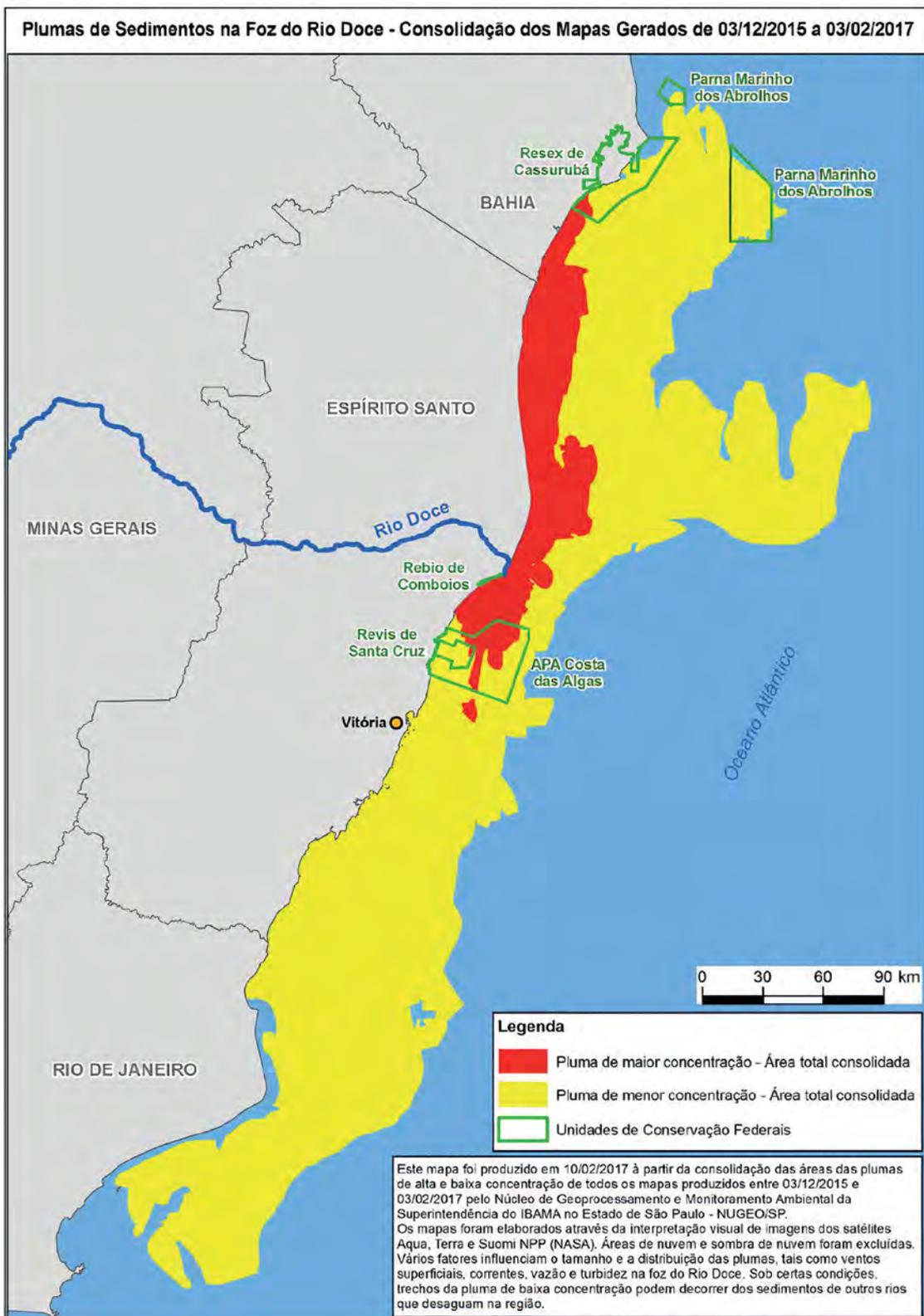
#### 4.7. Outros impactos antrópicos

Considerando que diferentes ambientes sofram impactos localizados, a conectividade existente nos ambientes costeiros e marinhos faz com que os efeitos desses impactos sejam observados até mesmo a centenas de quilômetros de sua origem. Um exemplo desse efeito foi o crime ambiental ocorrido na cidade de Mariana (MG) em 2015, quando o rompimento de uma barragem levou rejeitos de minério ao longo do Rio Doce até sua foz, no estado do Espírito Santo. A partir da foz, a pluma de rejeitos alcançou a região do Arquipélago dos Abrolhos (BA) e duas Unidades de Conservação: o Refúgio de Vida Silvestre (REVIS) de Santa Cruz e a APA Costa das Algas (ES) (Fig. 10.11).

Outro exemplo recente foi o derramamento de óleo que atingiu a costa nordeste do Brasil e alguns estados da região Sudeste, em 2019. Apesar de não ter sido identificada a origem, sabe-se que o óleo foi levado pelas correntes a partir de uma única origem, impactando diversos ambientes como recifes, manguezais, praias e toda a biodiversidade associada, causando um enorme prejuízo ambiental e socioeconômico (Fig. 10.12).

O efeito do óleo nos recifes coralíneos depende do tipo e do nível de exposição ao óleo, bem como do estágio de vida das espécies em contato: estágios iniciais (ovos e larvas), por exemplo, são muito sensíveis ao óleo. As zonas entremarés são, geralmente, as mais expostas, pois, o óleo pode ser depositado quando o nível da água reduz, durante a maré baixa. Uma vez que o óleo entra em contato com os corais, pode matá-los pelo impacto físico ou impedir sua reprodução, crescimento, comportamento e/ou desenvolvimento. Todo o ecossistema pode sofrer os efeitos de um derramamento de óleo, que pode afetar as muitas espécies de peixes, caranguejos e outros invertebrados marinhos que vivem nos ambientes recifais e em torno deles (NOAA, 2019).

Impactos ambientais diversos, ainda que tenham origem geograficamente distante, podem causar efeitos cumulativos aos ambientes recifais, afetando a resiliência desses ambientes com o passar dos anos. Os recifes, estando conectados com outros sistemas (marinhos e terrestres), sofrem os efeitos de impactos históricos oriundos do desenvolvimento de atividades humanas, seja no mar ou no continente (Fig. 10.13).



**Figura 10.11** Consolidação das áreas de pluma de alta e baixa concentração, evidenciando que o impacto do rompimento da barragem em Mariana alcançou ambientes recifais a centenas de quilômetros da sua origem (ICMBio, 2017).



**Figura 10.12** Impacto do derramamento de petróleo ao longo da costa do Nordeste do Brasil. **Fotos** imagem esquerda/superior – Diego Nigro/Reuters (2019) (recifes da praia de Peroba, Maragogi, Alagoas); demais imagens – Marcela Cintra (2019) (região da costa de Pernambuco).



**Figura 10.13** Exemplo de impactos históricos num ambiente recifal costeiro: as imagens da década de 1960 e de 2010 mostram a ocupação costeira em região recifal, onde hoje funciona o complexo portuário de Suape, no estado de Pernambuco. **Fonte** Laborel-Deguen et al. (2019).

## 5. PESQUISA, CONSERVAÇÃO E ESTRATÉGIAS DE GESTÃO

Os ambientes recifais são ecossistemas excepcionalmente biodiversos. Ocorrem em mais de cem países, nos quais a dependência humana em relação aos seus serviços ecossistêmicos pode ser alta. Eles estão sob significativa pressão direta das atividades humanas e são altamente vulneráveis às mudanças climáticas, bem como à acidificação dos oceanos. Em nível global, a

preocupação com o efeito dos impactos na saúde dos recifes coralíneos era clara já na década de 1990 (Ginsbury, 1994), quando a necessidade de monitorar estes efeitos levou à criação da Rede Global de Monitoramento de Recifes de Coral - GCRMN (Ferreira & Maida, 2006). A GCRMN foi estabelecida pela Iniciativa Internacional de Recifes de Coral (ICRI) em 1995. Desde então, o GCRMN produziu uma série de relatórios globais, regionais e temáticos sobre o *status* e as tendências relacionadas às condições dos recifes coralíneos.

Ao contrário dos estressores globais, os impactos locais podem ser gerenciados a nível local e por meio de ações setoriais, ao qual, a resposta ou impacto positivo decorrente de uma boa gestão destes fatores de estresse tende a se dar de forma muito mais rápida e eficiente. Assim, cientistas, técnicos e gestores podem trabalhar no sentido de identificar os principais estressores e minimizar seus efeitos sobre os ambientes recifais por meio de políticas públicas, programas ou até mesmo ações pontuais. Numa economia fortemente baseada no turismo de sol e mar e na qual a pesca artesanal é de grande importância, como é o caso do litoral Nordeste do Brasil, a adoção de medidas neste sentido é uma questão de sustentabilidade, no mais amplo sentido do termo- ambiental, econômico e social.

No Brasil, em 1997 foi realizado o Workshop sobre Recifes de Coral Brasileiros: Pesquisa, Manejo Integrado e Conservação. No evento, reuniu-se um grupo de 106 atores, incluindo segmentos representativos de diferentes áreas de interesse, como cientistas brasileiros e estrangeiros, instituições governamentais federais, estaduais e municipais ligadas a pesquisa, manejo e conservação, organizações não governamentais, associações de pescadores e organizações internacionais. Após a discussão dos temas, recomendou o Governo, nas esferas federais, estaduais e municipais, em conjunto com a sociedade civil e o empresariado brasileiros, reconhecer a importância social, econômica e ambiental dos ecossistemas recifais brasileiros e implementar ações identificadas na Agenda de Ações para a Pesquisa, Manejo Integrado e Conservação dos Recifes Brasileiros.

Em linhas gerais, essas ações eram:

- > Inclusão da problemática sobre os recifes brasileiros nas políticas, planos setoriais e programas existentes nas várias esferas governamentais;

- > Fomento à pesquisa básica e aplicada direcionada para a avaliação e indicação de áreas prioritárias de conservação, subsídio a práticas de uso sustentável de recursos pesqueiros e a implementação de atividades de monitoramento;
- > Criação de instrumentos legais específicos que protejam a biodiversidade e regulamentem o uso dos recifes brasileiros;
- > Adoção de medidas que garantam ampla participação de diferentes segmentos da sociedade brasileira na gestão para a conservação e uso sustentável dos recifes;
- > Promoção de programas de capacitação, divulgação e educação ambiental, utilizando experiências nacionais e internacionais, necessárias para a conservação e uso sustentável dos recifes e para a melhoria da participação da sociedade neste processo;
- > Participação efetiva em compromissos e programas de âmbito internacional referentes ao uso sustentável dos ecossistemas recifais, como a Convenção da Diversidade Biológica, e Programa de Ação para a Proteção do Ambiente Marinho de Atividades Realizadas em Terra, a Iniciativa Internacional para os Recifes de Coral e o Ano Internacional dos Recifes de Coral.

O workshop sobre recifes brasileiros também impulsionou a criação, em 1997, por decreto federal, da APA Costa dos Corais, situada ao longo dos 130 km de costa entre os municípios de Tamandaré-PE e Paripueira-AL (Ferreira & Maida, 2001).

Atualmente, decorridas mais de duas décadas, muitas destas ações já foram implementadas, incluindo leis específicas para a proteção de recifes coralíneos. Alguns exemplos de iniciativas relevantes voltadas aos ambientes recifais no Nordeste do Brasil nos últimos anos são (Prates et al., 2012; MMA, 2018b):

- > Rede Abrolhos;
- > Projeto Recifes Costeiros (desde 1997), iniciativa CEPENE/UFPE;
- > *Reef Check Brasil* (desde 2001) (Reef Check Brasil, 2018);
- > Projeto Coral Vivo (desde 2003) (coralvivo.org.br);
- > Atlas de Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras (MMA, 2006);
- > Campanha de Conduta Consciente em Ambientes Recifais (2007) (última atualização: MMA, 2018b);
- > Projeto Áreas Marinhas e Costeiras Protegidas – GEF Mar (2014-2024) (MMA, 2020b);
- > Projeto TerraMar (2015-2020) (ICMBio, 2015);
- > Plano de Ação Nacional para Conservação dos Ambientes Coralíneos (PAN Corais) (2016-2021) (ICMBio, 2016);
- > Campanha Mares Limpos – ONU (2017-2022) (MMA, 2017);
- > Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição dos Benefícios da Biodiversidade Brasileira (MMA, 2018c).

## 6. O FUTURO QUE DESEJAMOS PARA OS AMBIENTES RECIFAIS: DÉCADA DAS NAÇÕES UNIDAS DA CIÊNCIA OCEÂNICA PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

Para além das demandas de gestão orientadas à proteção dos ambientes recifais, toda a sociedade se encontra diante de uma oportunidade

histórica para unir esforços, mobilizar recursos e estabelecer parcerias em direção ao “Oceano que Precisamos para o Futuro que Queremos”. Trata-se da Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, a ser implementada no período de 2021 a 2030 no intuito de cumprir os compromissos da Agenda 2030, tendo foco no Objetivo de Desenvolvimento Sustentável nº 14 (ODS 14- Vida na Água- Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável) e seus correlatos (MCTIC, 2020).

A principal motivação para a Década é unir esforços dos setores relacionados ao mar para reverter o ciclo de declínio na saúde do oceano e criar condições para a concretização do desenvolvimento sustentável (MCTIC, 2020). Pretende-se, desta forma, alcançar seis principais resultados:

- i)** um oceano limpo, no qual as fontes de poluição possam ser identificadas e removidas;
- ii)** um oceano saudável e resiliente;
- iii)** um oceano seguro;
- iv)** um oceano produtivo e explorado sustentavelmente, que garanta a provisão de alimentos;
- v)** um oceano previsível, no qual a sociedade tenha a capacidade de compreender as suas condições presentes e futuras; e, por fim,
- vi)** um oceano transparente, com acesso aberto aos dados, informações e tecnologias (ONU, 2019).

Uma vez alcançados, os objetivos da Década terão grande impacto positivo não apenas local, mas global, na manutenção da integridade e saúde dos ambientes recifais e demais ecossistemas costeiros e marinhos, garantindo o bom funcionamento do oceano como um todo.

## REFERÊNCIAS

- AMADO-FILHO, G. M.; MOURA, R. L.; BASTOS, A. C.; SALGADO, L. T.; SUMIDA, P. Y.; GUTH, A. Z.; FRANCINI-FILHO R. B.; PEREIRA-PINTO, G. H.; ABRANTES, D.; BRASILEIRO, P.; BAHIA, R.; LEAL, R.; KAUFMAN, L.; KLEYPAS, J.; FARINA, M.; THOMPSON, F. **Rhodolith Beds Are Major CaCO<sub>3</sub> Bio-Factories in the Tropical South West Atlantic**. PLoS ONE, v. 7, n. 4, e35171, 2012.
- ARAÚJO, M. E.; ALBUQUERQUE FILHO, A. C. **Biologia das principais espécies de peixes ornamentais marinhos do Brasil: uma revisão bibliográfica e documental**. Boletim Técnico Científico do CEPENE, v. 13, n. 1, p. 109-154, 2005.
- BASTOS, A. C.; MOURA, R. L.; MORAES, F. C.; VIEIRA, L. S.; BRAGA, J. C.; RAMALHO, L. V.; AMADO-FILHO, G. M.; MAGDALENA, U. R.; WEBSTER, J. M. **Bryozoans are Major Modern Builders of South Atlantic Oddly Shaped Reefs**. Scientific Reports, v. 8, n. 9638, p. 1-11, 2018.
- CAMARGO, J. M. R. **Mapeamento sonográfico da plataforma continental adjacente ao município de Tamandaré**, Pernambuco, Brasil. 2005. 65 p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2005.
- CAMARGO, J. M. R.; ARAÚJO, T. C. M.; MAIDA, M. USHIZIMA, T. M. **Morfologia da plataforma continental interna adjacente ao município de Tamandaré**, sul de Pernambuco - Brasil. Revista Brasileira de Geofísica, v. 25, n. 1, p. 79-89, 2007.
- CASARES, F. A.; CREED, J. C.; OIGMAN-PSZCZOL, S. S. **Plataforma Brasileira de Bioinvasão - Bioinvasão Brasil**, Instituto Brasileiro de Biodiversidade, Rio de Janeiro - RJ. Disponível em: <www.bioinvasaobrasil.org.br>. Acesso em: 27 out. 2020.
- CASTRO, C. B.; ZILBERBEG, C. **Recifes brasileiros, sua importância e conservação**. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. Rio de Janeiro: Museu Nacional - UFRJ, p. 17-26, 2016.
- CHAVES, L. C. T.; FEITOSA, J. L. L. **Impactos diretos e indiretos das atividades humanas sobre ambientes recifais e a ictiofauna associada**. In: ARAÚJO, M. E.; FEITOSA, C. V.; MATTOS, S. M. G. (Org.). **Ecologia de peixes recifais em Pernambuco**. Recife: Editora UFPE, p. 83-142, 2018.
- CHOAT, J. H.; BELLWOOD, D. R. **Reef fishes: their history and evolution**. In: SALE, P. F. (Org.). **The Ecology of Fishes on Coral Reefs**. San Diego: Academic Press, p. 39-66, 1991.
- CINNER, J. E.; KITTINGER, J. N. **Linkages between social systems and coral reefs**. In: MORA, C. (Org.). **Ecology of Fishes on Coral Reefs**. Cambridge: Cambridge Univ. Press, p. 215-220, 2015.
- CONSERVATION TRAINING. **Introduction to Coral Reef Resilience**. Disponível em: <https://www.conservationtraining.org/enrol/index.php?id=86>. Acesso em: 22 out. 2020.
- CORREIA, J. R. M. B.; SANTOS, H. F.; DUARTE, G. A. S.; REIXOTO, R. S.; CHALOUB, R. M.; CASTRO, C. B. **Poluição em recifes de corais por vinhoto da cana-de-açúcar**. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. Rio de Janeiro: Museu Nacional - UFRJ, p. 169-182, 2016.
- CROWDER, L. B.; NORSE, E. A. **Essential ecological insights for marine ecosystem-based management**. Marine Policy, v. 32, n. 5, p. 772-778, 2008.
- DE PAULA, A. F. **Biologia reprodutiva, crescimento e competição dos corais invasores *Tubastraea coccinea* e *Tubastraea tagusensis* (Scleractinia: Dendrophylliidae) com espécies nativas**. 107 p. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2007.
- DE PAULA, Y. C.; CALDERON, E. N.; SCHIAVETTI, A. **Os peixes recifais e o turismo**. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. Rio de Janeiro: Museu Nacional - UFRJ, p. 285-298, 2016.
- DUTRA, M.; SCHIAVETTI, A. **Pesca do polvo: estudo sobre a situação atual no Sul da Bahia**. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. Rio de Janeiro: Museu Nacional - UFRJ, p. 273-284, 2016.
- FEITOSA, J. L. L.; LONGO, G. O. **Ambientes recifais brasileiros, comunidades bentônicas e herbívoria por peixes**. In: ARAÚJO, M. E.; FEITOSA, C. V.; MATTOS, S. M. G. (Org.). **Ecologia de peixes recifais em Pernambuco**. Recife: Editora UFPE, p. 29-82, 2018.
- FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. **Fishing and the future of Brazil's northeastern reefs**. **International Newsletter of Coastal Management**, v. 38, p. 22-23, 2001.
- FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. **Monitoramento dos recifes de coral do Brasil: Situação atual e perspectivas**. Brasília: Série Biodiversidade - MMA, 2006. 120 p.

FONTES, L. C. S.; SANTOS, J. R.; SANTOS, L. A.; OLIVEIRA JUNIOR, E. A. **Geologia da Margem Continental da Bacia de Sergipe - Alagoas**, NE do Brasil. In: CARNEIRO, M. E. R. C. (Org.). Geologia e geomorfologia da bacia de Sergipe-Alagoas. São Cristóvão: Editora UFS, p. 9-23, 2017.

FREIRE, K. M.; PAULY, D. **Fishing down Brazilian marine food webs, with emphasis on the east Brazil large marine ecosystem**. Fisheries Research, v. 105, n. 1, p. 57-62, 2010.

FREIRE, M. O.; PREVIERO, M.; LEITE J. R.; FRANCINI-FILHO, R. B.; MINTE-VERA, C. V.; MOURA, R. L. **Age, growth, reproduction and management of Southwestern Atlantic's largest and endangered herbivorous reef fish, *Scarus trispinosus* Valenciennes**, 1840. PeerJ- Aquatic Biology, v. 30, 7:e7459, 2019.

GERLING, C.; RANIERI, C.; FERNANDES, L.; GOUVEIA, M. T. J.; ROCHA, V. **Manual de Ecossistemas Marinhos e Costeiros para Educadores**. Santos: Editora Comunnicar, 2016. 64p.

GHERARDI, D.; BOSENCE, D. **Composition and community structure of the coralline algal reefs from Atol das Rocas**, South Atlantic, Brazil. Coral Reefs v. 19, p. 205–219, 2001.

GINSBURG, R. N. **Proceedings of the Colloquium on Global Aspects of Coral Reefs, Health, Hazards and History**. Flórida: Rosenstiel School of Marine and Atmospheric Science, 1994. 420 p.

GOMES, M. P.; VITAL, H. SILVA L. L.; EICHLER, P. B.; ROVIRA, D.; LONGO, G. O. **Nature and condition of outer shelf habitats on the drowned Açú Reef, Northeast Brazil**. In: HARRIS P. T; BAKER, E. (Org.). Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat. Holanda: Elsevier Science, v. 2, p. 571-585, 2020.

HUGHES, T.; BARNES, M.; BELLWOOD, D.; CINNER, J. E.; CUMMING, G. S.; JACKSON, J. B. C.; KLEYPAS, J.; VAN DE LEEMPUT, I. A.; LOUGH, J. M.; MORRISON, T. H.; PALUMBI, S. R.; VAN NES, E. H.; SCHEFFER, M. **Coral reefs in the Anthropocene**. Nature, v. 546, p. 82–90, 2017.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Projeto TerraMar vai proteger a costa brasileira**. 2015. Disponível em: <<https://www.icmbio.gov.br/portal/ultimas-noticias/20-geral/6941-projeto-terramar-vai-protetger-a-costa-brasileira>> Acesso em: 01 dez. 2020.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. Portaria Nº 19, de 9 de março de 2016: **Plano de Ação Nacional para a Conservação dos Ambientes Coralíneos - PAN Corais**. Brasília: MMA, 2016.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Monitoramento da Pluma de Sedimentos Proveniente da Barragem de Fundão**. Vitória: Nota técnica, 2017. 44 p. Disponível em: <[https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/Rio\\_Doce/nota\\_tecnica\\_23\\_2017\\_Tamar\\_ICMBio\\_monitoramento\\_pluma.pdf](https://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/Rio_Doce/nota_tecnica_23_2017_Tamar_ICMBio_monitoramento_pluma.pdf)>. Acesso em: 26 out. 2020.

ICMBIO – INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção: Volume VI – Peixes**. Brasília: ICMBio/MMA, 2018. 1232 p.

JENNINGS, S.; KAISER, M. J. **The effects of fishing on marine ecosystems**. Advances in Marine Biology, v. 34, p. 201-352, 1998.

LABOREL-DEGUEN, F.; CASTRO, C. B.; NUNES, F. L.D.; PIRES, D. O. **Recifes brasileiros: o legado de Laborel**. Rio de Janeiro: Stampa, 2019. 376 p.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; TESTA, V. **Corals and coral reefs of Brazil**. In: CORTÉS, J. (Org.). Latin American Coral Reefs. Amsterdam: Elsevier Science, p. 9-52, 2003.

LEITE, D. C. A.; MACHADO, L. F.; ROSADO, A. S.; PEIXOTO, R. S. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. Rio de Janeiro: Museu Nacional- UFRJ, p. 97-110, 2016.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Coral Reefs of Brazil: Overview and Field Guide. In: Lessios, H. A.; Macintyre, I. G. (Org.). **Proceedings of the 8th International Coral Reef Symposium**. Cidade do Panamá: Smithsonian Tropical Research Institute, p. 263–273, 1997.

MAIDA, M.; FERREIRA, B. P. Recifes e/ou ambientes coralíneos da APA Costa dos Corais (de Tamandaré, PE a Paripueira, AL). In: LABOREL-DEGUEN, F.; CASTRO, C. B.; NUNES, F. L.D.; PIRES, D. O. (Org.). **Recifes brasileiros: o legado de Laborel**. Rio de Janeiro: Stampa, p. 168-169, 2019.

MARANGONI, L. F. B.; MARQUES, J. A.; BIANCHINI, A. **Fisiologia de corais - a simbiose coral-zooxantela, o fenômeno de branqueamento e o processo de calcificação**. In: ABRANTES, D. P.; MARQUES, J. A.; MACHADO, L. F.; MARANGONI, L. F. B. (Org.). Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo. Rio de Janeiro: Museu Nacional- UFRJ, p. 55-72, 2016.

MCTIC – MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÕES. **Década da Ciência Oceânica Brasil**. Disponível em: <<http://decada.ciencianomar.mctic.gov.br/>> Acesso em: 25 out. 2020.

MELO, R. S.; CRISPIM, M. C.; LIMA, E. R. V. **O turismo em ambientes recifais: em busca da transição para a sustentabilidade**. Caderno Virtual de Turismo, v. 5, n. 4, p. 34-42, 2005.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Atlas de Recifes de Coral nas Unidades de Conservação Brasileiras**. Brasília: MMA, 2006. 232 p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Informe sobre as espécies exóticas invasoras marinhas no Brasil**. Brasília, MMA/SBF: Série Biodiversidade, 2009. 440 p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Brasil adere à campanha global Mares Limpos**. 2017. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/informma/item/14342-noticia-acom-2017-09-2566.html>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Conduta consciente em ambientes recifais: manual para multiplicadores de campanha**. Brasília: MMA, 2018a. 56 p.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Plano Nacional de Prevenção, Controle e Monitoramento do Coral-sol (*Tubastraea* spp.) no Brasil**. Brasília, 2018b.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. Portaria Nº 463, de 18 de dezembro de 2018. **Áreas Prioritárias para a Conservação, Utilização Sustentável e Repartição de Benefícios da Biodiversidade Brasileira ou Áreas Prioritárias para a Biodiversidade**. Brasília, 2018c.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Biodiversidade Brasileira**. Brasília, 2020a. Disponível em: <<https://www.mma.gov.br/biodiversidade/biodiversidade-brasileira.html#:~:text=Al%C3%A9m%20disso%2C%20o%20Brasil%20possui,a%20maior%20biodiversidade%20do%20planeta>>. Acesso em: 27 out. 2020.

MMA – MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Projeto Áreas Marinhas e Costeiras Protegidas - GEF** Mar. 2020b. Disponível em: <<https://antigo.mma.gov.br/areas-protegidas/programas-e-projetos/projeto-gef-mar#ficha-t%C3%A9cnica>>. Acesso em: 01 dez. 2020.

MOBERG, F.; FOLKE, C. **Ecological goods and services of coral reefs ecosystems**. Ecological Economics, v. 29, p. 215-233, 1999.

NEVES, E. G.; JOHNSON, R.; SAMPAIO, C. L. **An Unexpected Coral Assemblage in Submerged Reefs of the Sergipe State**. In: ANAIS DO II CONGRESSO BRASILEIRO DE OCEANOGRAFIA. Associação Brasileira de Oceanografia, Espírito Santo: AOCEANO, p. 1-2, 2005.

NEVES, E.; JOHNSON, R.; SAMPAIO, C.; PICHON, M. **The occurrence of *Scolymia cubensis* in Brazil: revising the problem of the Caribbean solitary mussels**. Zootaxa, v. 1366, p. 45–54, 2006

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **How Do Oil Spills Affect Coral Reefs?** 2019. Disponível em: <<https://response.restoration.noaa.gov/about/media/how-do-oil-spills-affect-coral-reefs.html#:~:text=Once%20oil%20comes%20into%20contact,in%20and%20around%20coral%20reefs>>. Acesso em: 09 nov. 2020.

NOAA – NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **In what types of water do corals live?** 2020. Disponível em: <<https://oceanservice.noaa.gov/facts/coralwaters.html>> .Acesso em: 8 nov. 2020.

ONU – ORGANIZAÇÃO DAS NAÇÕES UNIDAS. **A Ciência que precisamos para o oceano que queremos: Década das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030)**. 2019. Disponível em: <[https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198\\_por](https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265198_por)>. Acesso em: 26 out. 2020.

PAES, E. T.; ALCANTARA, A. V.; GUIMARÃES, C. R. P.; ARAUJO, H. M. P.; ALVES, J. P. H. **Caracterização ecológica e oceanográfica da plataforma continental do Estado de Sergipe: um ambiente costeiro equatorial sob a influência de águas subantárticas**. In: XII CONGRESSO LATINO-AMERICANO DE CIÊNCIAS DO MAR. Associação Brasileira de Oceanografia, Florianópolis: AOCEANO, 4000176, 2007.

PAULY, D.; CHRISTENSEN, V.; DALSGAARD, J.; FROESE, R.; TORRES, JR. F. **Fishing down marine food webs**. Science, v. 279 p. 860-863, 1998.

PÉREZ, C. D. **Recifes e/ou ambientes coralíneos de Suape a Porto de Galinhas (PE)**. In: LABOREL-DEGUEN, F.; CASTRO, C. B.; NUNES, F. L.D.; PIRES, D. O. (Org.). Recifes brasileiros: o legado de Laborel. Rio de Janeiro: Stampa, p. 156-159, 2019.

PINHEIRO, H. T.; ROCHA, L. A.; MACIEIRA, R. M.; FILHO, A. C.; ANDERSON, A. B.; BENDER, M. G.; DARIO, F. D.; FERREIRA, C. E. L.; FILHO, J. F.; FILHO, R. F.; GASPARINI, J. L.; JOYEUX, J.C.; LUIZ O. J.; MICHAEL.; MINCARONE, M. M.; MOURA, R. L.; NUNES, C. C.; JUAN P. QUIMBAYO, J. P.; ROSA, R. S.; SAMPAIO, C. L. S.; IVAN

SAZIMA, I.; SIMON, T. DANIELE A. VILA-NOVA, D. A.; FLOETER, S. R. **South-western Atlantic reef fishes: Zoogeographical patterns and ecological drivers reveal a secondary biodiversity centre in the Atlantic Ocean. Diversity and Distributions**, v. 24, p. 951–965, 2018.

PRATES, A. P. L.; GONÇALVES, M. C.; ROSA, M. R. **Panorama da conservação dos ecossistemas costeiros e marinhos no Brasil**. 2. ed. rev. ampliada. Brasília: MMA, 2012. 152 p.

QUIMBAYO, J. P.; THIAGO C. MENDES, T. C.; CORDEIRO C. A. M.; LONGO, G. O.; VINICIUS J. GIGLIO, V. J.; VERGARA, D. C.; FLOETER, S. R.; ROBERTO VILLAÇA, R.; ANDREA S. FREIRE, A. S.; RONALDO B. FRANCINI-FILHO, R. B.; FERREIRA, C. E. L. **Varição Temporal das Comunidades Recifais no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: ações do Projeto de Monitoramento de Longa Duração (Peld)**. In: OLIVEIRA, J. E. L.; VIANA, D. L.; SOUZA, M. A. C. (Org.). Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 20 anos de pesquisa. Recife: Via Design Publicações, p. 111-127, 2018.

REEF CHECK BRASIL. **Manual de monitoramento Reef Check Brasil**. Brasília: MMA, 2018. 108 p.

ROOS, N. C.; TAYLOR, B. M.; CARVALHO, A. R. LONGO, G. O. **Demography of the largest and most endangered Brazilian parrotfish *Scarus trispinosus* reveals overfishing**. Endangered Species Research, v. 41, p. 319-327, 2020.

SIBBr – SISTEMA DE INFORMAÇÃO SOBRE A BIODIVERSIDADE BRASILEIRA. **Lista de espécies**. Brasília, 2020. Disponível em: <<https://specieslist.sibbr.gov.br/public/speciesLists>>. Acesso em: 06 nov. 2020.

SICHEL, S. E.; MOTOKI, A.; VARGAS, T.; SAVI, D. C.; CAMPOS, T. F. C.; SIMÕES, L. S. A. **Rocha ultramáfica do manto abissal**. In: VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V.; SOUZA, M. A. C. (Org.). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de estação científica. Brasília: SECIRM, p. 65-74, 2009.

SILVA, A. G.; DE PAULA, A. F.; FLEURY, B. G.; CREED, J. C. **Eleven years of range expansion of two invasive corals (*Tubastraea coccinea* and *Tubastraea tagusensis*) through the Southwest Atlantic (Brazil)**. Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 141, p. 9-16, 2014.

SILVEIRA, C. B. L. **Diversidade de habitats, conectividade e impactos humanos em recifes costeiros: uma análise integrada para o Planejamento Espacial Marinho**. 2019. 124 p. Tese (Doutorado em Oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019.

SOARES, M. O.; DA LOTUFO, T. M. C.; VIEIRA, L.M.; SALANI, S.; HAJDU, E.; MATTHEWS-CASCON, H.; LEÃO, Z. M.; DE KIKUCHI, R. K. P. **Brazilian marine animal forests: a new world to discover in the southwestern Atlantic**. In: ROSSI, S.; BRAMANTI, L.; GORI, A.; OREJAS, C. (Org.). Marine animal forests: the ecology of benthic biodiversity hotspots. Nova York: Springer International Publishing, p. 73–110, 2007.

SOARES, M. O.; LEMOS, V. B.; KIKUCHI, R. K. P. **Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial: considerações sobre a classificação do recife biogênico**. Revista Brasileira de Geociências, n. 39, v. 2, p. 238-243, 2009.

STEINER, A. Q.; ELOY, C. C.; AMARAL, J. R. B. C.; AMARAL, F. D.; SASSI, R. **O turismo em áreas de recifes de coral: Considerações acerca da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais (Estados de Pernambuco e Alagoas)**. OLAM Ciência & Tecnologia, v. 6, n. 2, p. 281-296, 2006.

VERON, J. E. N. **Corals in Space and Time: The Biogeography and Evolution of the Scleractinia**. Nova York: Cornell University Press, 1995. 321 p.

VILA NOVA, D. A. **Ferramentas espaciais e de planejamento sistemático na avaliação de áreas marinhas protegidas em ambientes recifais da costa brasileira**. 2014. 105 p. Tese (Doutorado em Ecologia e Conservação) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

VITOR, F. C.; DA SILVA, A. P. **Uma barreira de arenito de Pernambuco descrita por Charles Darwin**. Filosofia e História da Biologia, v. 12, n. 1, p. 65-80, 2017.

WESTMACOTT, S.; TELEKI, K.; WELLS, S.; WEST, J. **Gestão de recifes de coral branqueados ou severamente danificados**. Gland, Switzerland and Cambridge: IUCN, 2000. 36p.

WILLIAMS, G. J.; GRAHAM, N. A. J.; JOUFFRAY, J. B.; NORSTRÖM, A. V.; NYSTRÖM, M.; GOVE, J. M.; HEENAN, A.; WEDDING, L. M. **Coral Reef Ecology in the Anthropocene**. Functional Ecology, v. 33, n. 6, p. 1014–22, 2019.

# MAR PROFUNDO: REGISTRO DA HISTÓRIA E ORGANISMOS DO NORDESTE DO BRASIL

Pollyana Christine Gomes ROQUE<sup>1</sup>  
Alessandra Maria Advíncula PIRES<sup>1</sup>  
Rômulo Costa Pires FERREIRA<sup>1</sup>  
Diogo Martins NUNES<sup>1</sup>  
Ralf Tarciso Silva CORDEIRO<sup>1</sup>  
Jorge Eduardo LINS OLIVEIRA<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

<sup>2</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN



## 1. INTRODUÇÃO

A vastidão dos oceanos sempre foi fruto de curiosidade e desafios para o homem, sendo a origem de diversos mitos e lendas sobre os seus habitantes. Por muito tempo o oceano profundo foi tido como um ambiente inexpugnável, lar de monstros e seres fantasiosos. Essa visão começou a mudar com as primeiras expedições oceanográficas realizadas há cerca de 200 anos, e transformou-se definitivamente com a Expedição *Challenger*, entre 1872 e 1876.

Mundialmente os esforços pela busca de recursos em águas profundas têm crescido vigorosamente, sendo cada vez mais explorado em atividades industriais relacionadas à pesca, extração de petróleo e seus derivados, e mineração de manganês e calcário (Tyler, 2003; Koslow, 2007). Mesmo que a maior parte da população não tenha consciência, o oceano profundo faz parte do nosso cotidiano no *sashimi* de peixe-prego (*Ruvettus pretiosus*), no filé de merluza (Gadiformes), na gasolina, plásticos e gás natural, além de ser primordial na regulação da temperatura global.

As últimas décadas de pesquisas focadas nos oceanos profundos têm revelado resultados excepcionais e enfatizado cada vez mais que esses ambientes são únicos e ricos em biodiversidade. Apesar dos organismos estarem sujeitos à escuridão parcial ou total, escassez alimentar, baixíssimas

temperaturas e altíssimas pressões, os processos evolutivos proporcionaram adaptações fantásticas para colonizar esses ambientes (Ellis, 1996; Randall & Farrell, 1997; Merrett & Haedrich, 1997). Embora o foco primário seja a exploração dos recursos naturais, algumas empresas têm fomentado colaborações com a comunidade acadêmica beneficiando também o aumento do conhecimento científico a cerca dessa biodiversidade (Lins Oliveira et al., 2015).

Ambiente inóspito e de difícil acesso, o conhecimento atual relativo ao mar profundo chama atenção para a vulnerabilidade desse ecossistema. Apesar do pouco conhecimento acumulado, há indícios que o mar profundo já sofre com os impactos das atividades humanas (Merrett & Haedrich, 1997; Tyler, 2003). Além das ações antrópicas com impactos diretos, como a pesca e mineração, os ecossistemas profundos também sofrem alterações na composição e abundância de suas espécies em função das flutuações ambientais sofridas nas camadas eufóticas (D'Onghia et al., 2004).

Neste sentido, devido ao alto grau de endemismo e à fragilidade desses ambientes, estudos de natureza ecológica são indispensáveis, a fim de identificar os potenciais riscos que a pesca exploratória pode ter sobre esses ecossistemas. Essas informações devem

servir para nos alertar que os mares profundos não estão isentos de nossas atividades e devem ser alvo de políticas públicas urgentes para o uso sustentável de seus recursos sem abrir mão da conservação da fauna.

## 2. O AMBIENTE EM ÁGUAS PROFUNDAS

O ambiente marinho é o maior ecossistema do planeta, ocupando aproximadamente 70% da superfície da Terra. Sua região pelágica (coluna de água) pode ser dividida horizontalmente em província nerítica, que se estende desde a linha da maré alta até ao final da plataforma continental, e oceânica, para além da quebra do talude continental (Ver capítulos: [Introdução à oceanografia química](#); [Ciências do mar: origem, conceitos e fundamentos](#)).

O ambiente oceânico, por sua vez, pode ser classificado de acordo com a penetração de luz solar. Na zona epipelágica (do grego *epí* = em cima e *pélagos* = mar aberto), também conhecida como zona fótica (0–200 m), a luz penetra em intensidade e proporciona a realização da fotossíntese. Na zona mesopelágica (Gr.: *meso* = meio) ou região de penumbra (200–1.000 m), a luz solar diminui consideravelmente, limitando a produção primária. Na zona afótica (>1.000 m) não há mais luz solar e ocorre uma subdivisão em zonas batipelágica (Gr.: *bathys* = profundidade; 1.000–2.000 m), abissopelágica (Gr.: *abyssos* = sem fundo; 2.000–6.000 m) e hadalpelágica (Gr.: *hades* = submundo; 6.000–11.000 m) (Gage & Tyler, 1991).

Embora o conceito de mar profundo possa variar de acordo com o princípio adotado (profundidade, temperatura, penetração de luz, etc.), consensualmente, seu início é definido pelo fim da plataforma e começo do talude continental, a partir dos 200 m de profundidade (Gage & Tyler, 1991). Essa região equivale a mais de 90% de todo volume ocupado pelo mar e corresponde ao limite

inferior da zona fótica, também conhecido como profundidade de compensação, a qual recebe apenas 10% da luz solar da superfície e a taxa de fotossíntese (produção) é igual a de respiração (consumo). A escassez da luz com o aumento da profundidade coincide com a transição de padrões fisiográficos, características ambientais e componentes da fauna.

### 2.1. Zonações marinhas

A geomorfologia do fundo oceânico é tão complexa e heterogênea quanto a dos continentes, com cadeias de montanhas e fossas submarinas que superam em extensão e altura as suas contrapartes terrestres. As complexas feições geomorfológicas (Tab. 11.1) moldam a distribuição dos organismos, com uma topografia tridimensional que oferece uma grande diversidade de habitats e nichos ecológicos para uma ampla variedade de ecossistemas marinhos.

A fisiografia do fundo marinho brasileiro é marcada por uma plataforma continental com amplitudes de comprimento variando entre 8 km, ao largo de Salvador, e 330 km, na foz do Rio Amazonas, e limite externo situando-se habitualmente entre 40 e 80 m de profundidades; talude continental com declividade média de 4 a 5°, sendo alguns trechos profundamente escavados (cânions e vales) e outros com grandes extensões aplainadas (platôs marginais); e elevação continental cuja transição do talude decorre suavemente a partir do intervalo 2.800–3.600 m de profundidade (Fig. 11.1). A partir daí inicia a planície abissal propriamente dita (Coutinho, 2000; Goes & Junior, 2017).

A margem continental da região Nordeste estende-se do Maranhão até a Bahia e apresenta formas de relevo com dominante influência tectônica e vulcânica. Segundo Zembruiski e França (1979), a largura da plataforma continental desta região é de 160 km próximo a Baía de São Marcos-MA, estreita-se até 30 km na circunvizinhança da capital potiguar, volta a se alargar progressivamente em direção ao

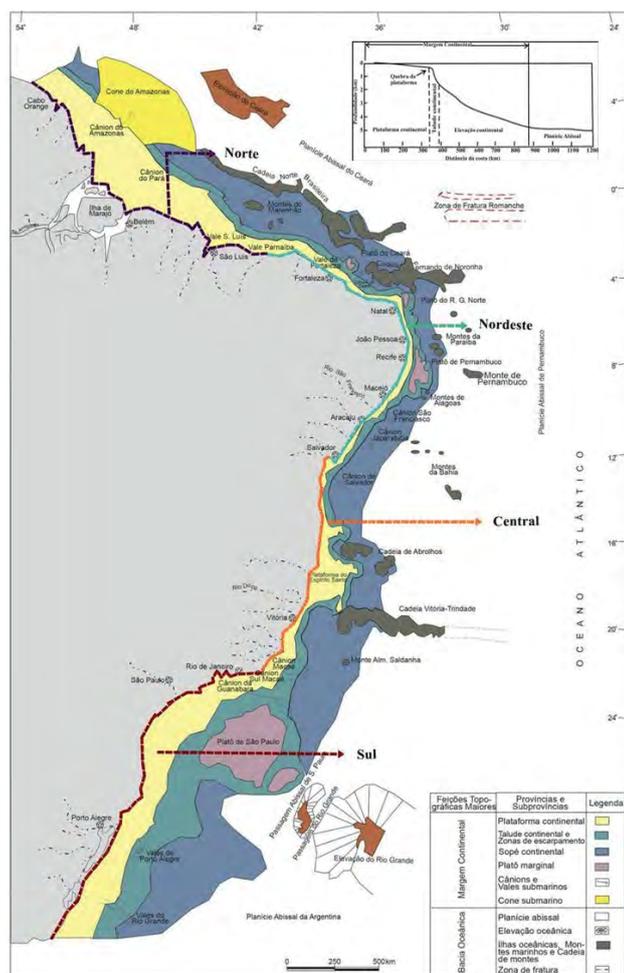
**Tabela 11.1** Principais Feições Geomorfológicas do Mar Profundo. **Adaptado** de UNEP (2007).<sup>a</sup> Palma (1984);<sup>b</sup> Corrêa e Weschenfelder (2015);<sup>c</sup> Coutinho (2000).

FEIÇÃO	DESCRIÇÃO
Margem Continental <sup>a</sup>	Representam a zona de transição entre os continentes e as bacias oceânicas e incluem as províncias plataforma, talude e elevação continental.
Plataforma Continental <sup>b</sup>	Continuação marítima de continentes subaquáticos, normalmente estende-se desde a linha da maré mais alta até as profundidades máxima de 200 metros, local onde ocorre uma mudança abrupta da declividade. No entanto, a profundidade que termina esta província é bastante variável, ficando, na média, em torno de 130 metros.
Talude Continental	Região além da quebra da plataforma, frequentemente interrompida por deslizamentos de terra submarinos. Encostas mais íngremes frequentemente cortadas por cânions.
Cânions Submarinos	Vales esculpidos na margem continental, onde fazem uma incisão na plataforma continental e na encosta, geralmente perto de estuários de rios. Atuam como condutos para o transporte de sedimentos do continente para o fundo do oceano. Sua formação tem sido relacionada à erosão subaerial durante a baixa altitude do mar e à erosão submarina.
Canais Submarinos	Canais largos e profundos que podem continuar dos canyons e se estender por centenas a milhares de quilômetros no fundo do oceano.
Platô e Terraço Marginais <sup>b,c</sup>	Feições com gradientes semelhantes às plataformas continentais, que ocorrem a profundidades maiores (entre 200 e 3.000 m), sendo separado da mesma por meio de um talude continental incipiente.
Elevação Continental <sup>c</sup>	A área de transição entre a encosta continental e a planície abissal é representada pela cunha de sedimentos que mergulha suavemente a partir da base do talude até se confundir com o piso das grandes bacias oceânicas.
Montes Submarinos	Montanhas subaquáticas de pelo menos 1.000 metros acima do fundo do mar circundante, geralmente cônicas com uma base circular, elíptica ou mais alongada e seus picos frequentemente atingem as camadas superiores da zona mesopelágica. Normalmente de origem vulcânica, os montes submarinos podem formar cadeias e, às vezes, apresentam atividade de ventilação.
Planícies Abissais	Áreas planas do fundo do mar que se estendem além da base da elevação continental.
Dorsais Meso-oceânicas	Cordilheira subaquática de origem tectônica comumente formada quando duas placas principais se separam. Eles costumam hospedar fontes hidrotermais.
Fendas Hidrotermais	Fissuras no fundo do mar comumente encontradas perto de locais vulcanicamente ativos que liberam água geotérmica superaquecida e rica em minerais.
Trincheiras ou Fossas Marinhas Profundas	Depressões estreitas, profundas e íngremes formadas pela convergência de placas tectônicas abaixo da zona hadal, atingindo profundidades de 11 km; as partes mais profundas dos oceanos.

sul alcançando 42 km em frente a Maceió - AL, e depois diminui, atingindo o valor mínimo para a costa brasileira de 8 km em frente ao Cânion de Salvador. Na porção mais ao sul do Nordeste, a plataforma retorna a crescer até atingir o máximo de 246 km, no largo de Caravelas- BA (Fig. 11.2).

Os valores mínimos da profundidade da linha de quebra da plataforma correspondem às frentes dos

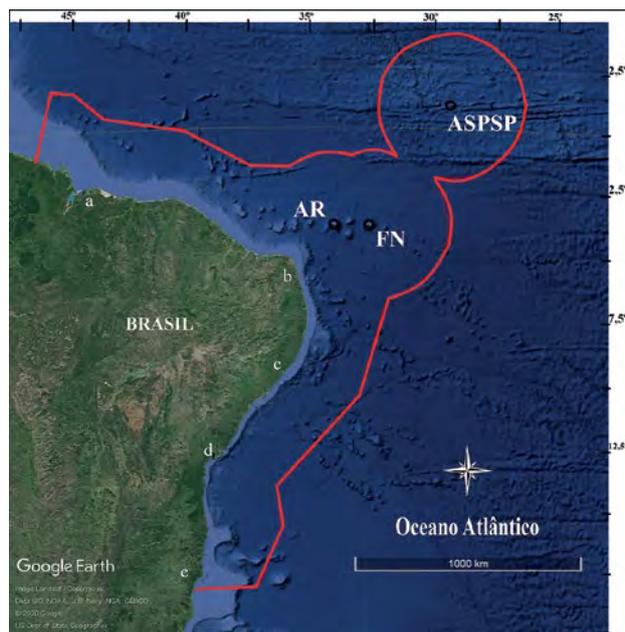
grandes canais e cânions presentes na região, como os de Natal, Maceió, São Francisco, Japarutuba e Salvador. Província da margem continental que apresenta relevo mais íngreme, o talude continental na região Nordeste-Leste exibe sensíveis variações de gradientes (3°–6° de declividade) com inclinação média de 75 m/km e largura variando de 10 a 200 km, quando não são descontinuados por platôs marginais.



**Figura 11.1** Características morfológicas da Margem Continental Brasileira. **Adaptado** de Neto e Silva (2004); Góes e Junior (2017).

Além dos platôs, como o do Ceará (230–260 m), do Rio Grande do Norte (800–1.200m), e de Pernambuco (700–2.400 m); os terraços marginais, como o do Ceará (2.000–2.500 m), de Natal (2.000–2.400 m) e de Maceió (Norte 400–2.000 m e Sul 2.800–3.200 m) e os montes submarinos são feições que interpolam essa província.

A elevação continental do Nordeste brasileiro situa-se entre 4.800 e 5.200 m de profundidade, tendo sua largura mais suavizada nas proximidades do Platô de Pernambuco (280 km) e mais amplificada



**Figura 11.2** Mapa da costa nordeste do Brasil com destaque para a zona econômica exclusiva – ZEE, delimitada pela linha vermelha, incluindo o entorno do Atol das Rocas (AR) e dos arquipélagos de Fernando de Noronha (FN) e São Pedro e São Paulo (ASPSP). As letras referenciam os principais pontos de transição na largura da plataforma: **a)** São Marcos-MA, **b)** Natal-RN, **c)** Macéio-AL, **d)** Salvador-BA, **e)** Caravelas-BA. **Fonte** Google Earth. **Adaptado** por José Araújo.

ao largo do Platô do Rio Grande do Norte e de Salvador (600 km). Feições que emergem do talude e elevação continental, as cadeias Norte-Brasileira e de Fernando de Noronha; os montes submarinos do Rio Grande do Norte, da Paraíba e de Alagoas; e os bancos Royal Charlotte e de Abrolhos, ambos na Bahia, regulam a morfologia e a sedimentação destas regiões. O fundo da bacia oceânica desenvolve-se a partir da base da elevação continental até o flanco ocidental da Cordilheira Meso-Atlântica, onde predominam as planícies abissais (Coutinho, 2000).

Globalmente, montes marinhos estão entre as feições mais extensas e menos exploradas do fundo oceânico. Constituindo-se como obstáculos as correntes marinhas e propiciando o fenômeno de ressurgência, aumentando assim a produção primária local, os montes marinhos agregam diversas espécies desde a sua base até os picos das cristas. A alta diversidade e densidade tantos dos organismos sésseis suspensívoros e filtradores, como corais, quanto dos organismos nectônicos, a exemplo dos peixes, contrasta com as comunidades biológicas do oceano aberto (Clark et al., 2006) tornando-os especialmente interessantes para a indústria pesqueira, como demonstrado por Hazin et al. (1998) em estudo realizado na cadeia do arquipélago de Fernando de Noronha.

Embora muito do que se sabe sobre ambientes profundos seja tendenciado por maiores amostragens no Hemisfério Norte, estudo de genética de populações conduzido por Clark et al. (2010) demonstrou conectividade entre montes submarinos e regiões adjacentes, o que enfraquece a hipótese de alto endemismo desses ambientes, como análogos às ilhas nos ambientes terrestres. Seu endemismo estaria limitado, portanto, àquelas espécies de capacidade de dispersão bastante reduzida, principalmente os peixes recifais. Durante o máximo glacial do Pleistoceno (ca. 2,58 MA), o nível do mar ficou até 150 m abaixo do atual, já que grande parte da água disponível ficou retida no gelo das calotas polares que se estenderam consideravelmente. Desta forma, os montes submarinos ficaram expostos, formando ilhas que serviram de trampolim para que as espécies continentais colonizassem as ilhas oceânicas mais distantes e o fluxo gênico entre as populações. Com o aquecimento da Terra, esses montes voltaram a ficar submersos e as populações se isolaram, resultando na diferenciação entre as espécies, um processo conhecido como especiação (**ex:** *Elacatinus figaro* no continente e *E. phthirophagus* em Fernando de Noronha e Abrolhos).

## 2.2. Características ambientais

O mar profundo é um ambiente extremo caracterizado por apresentar:

**Luz solar >** A partir dos 200 m, dependendo das características das massas de água (densidade, turbidez, partículas dissolvidas), tem-se uma zona de penumbra que pode estender-se até os 1.000 m. Com o aumento da profundidade, a penetração da luz diminui, deixando de ser energeticamente utilizável pelos produtores primários. Após essa região a luz solar torna-se inexistente.

**Pressão >** A pressão hidrostática aumenta 1 atmosfera (1 kg/cm<sup>2</sup>) a cada 10 metros de profundidade, sendo assim, a pressão varia de 20 atm, na quebra da plataforma e borda do talude continental, até mais de 1.000 atm, nas fossas marinhas.

**Salinidade >** Em profundidades superiores a 1.000 m, se estabiliza entre 34 e 35 ‰.

**Temperatura >** Diminui abruptamente em profundidades mais rasas, formando uma termoclina. A partir de 1.000 m de profundidade, a temperatura se estabiliza em torno de 6°C e passa a variar, de acordo as massas d'água, até 2°C na planície abissal.

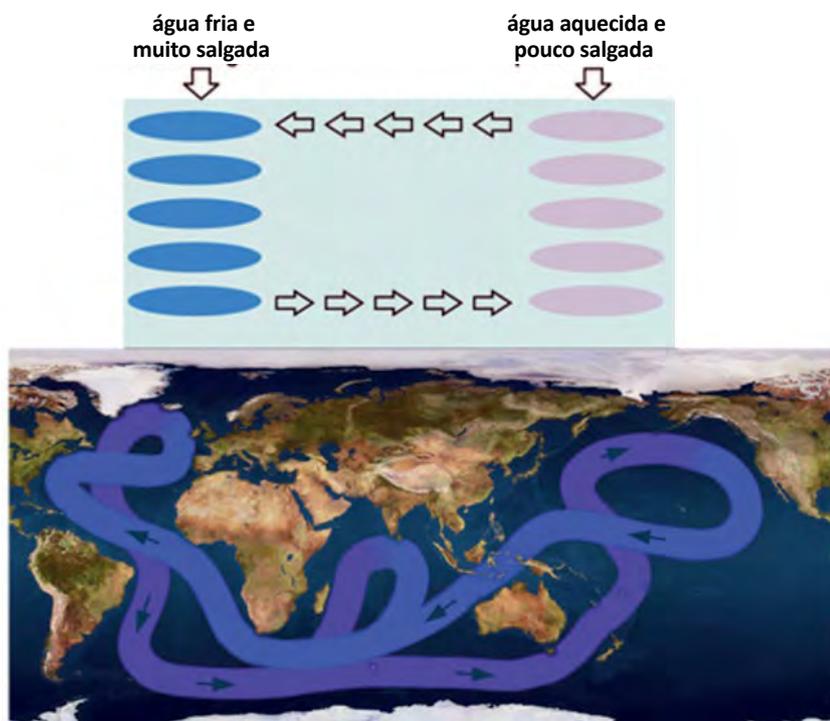
**Oxigênio dissolvido >** Nos trópicos, a camada superficial quente é uma característica constante com água oxigenada fria abaixo. Entre 200 e 1.000 m de profundidade a concentração de oxigênio dissolvido cai originando a Zona de Oxigênio Mínimo (ZOM) que, apesar de níveis próximos ao zero em várias partes do mundo, apresenta um valor relativamente elevado na maior parte do Oceano Atlântico. Logo após a ZOM, correntes profundas aumentam a concentração de oxigênio dissolvido, não o constituindo como fator limitante (Priede, 2017). O conteúdo relativamente rico em oxigênio das águas profundas, em relação as águas rasas, é decorrente de sua origem nos polos (Mendes & Soares-Gomes, 2007). Sem fonte superficial de oxigênio, as águas

profundas dos oceanos podem esgotar o oxigênio, oxidando a matéria orgânica contida no fundo do mar.

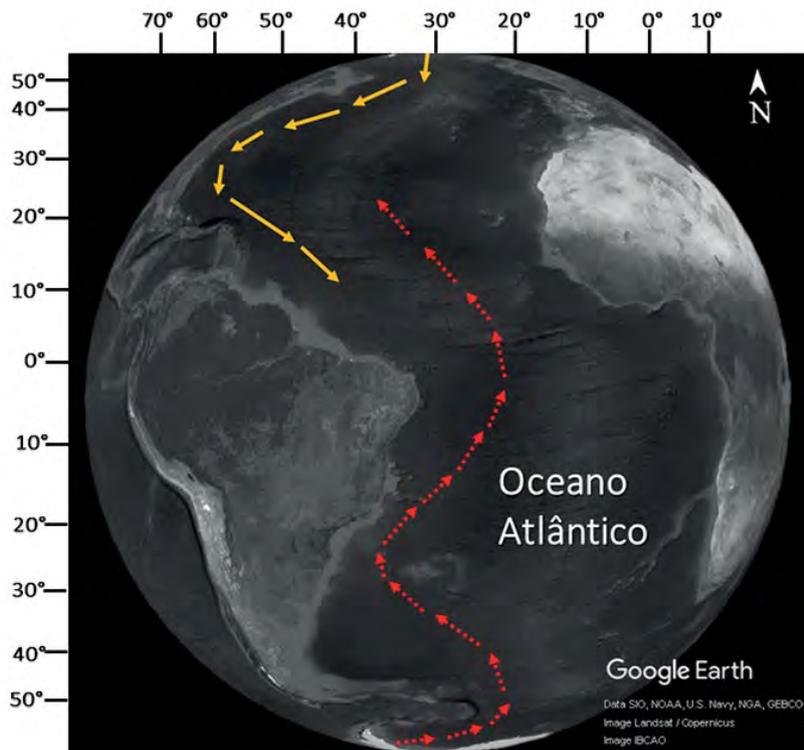
**Distribuição de biomassa** > A biomassa diminui com o aumento da profundidade, mas, ao aproximar-se do fundo, ela tende a aumentar novamente. A quantidade de nutrientes exportada para as profundezas, proveniente da matéria orgânica particulada (chuva de detritos) e do afundamento de carcaças, é limitada pela decomposição bacteriana ao longo da extensa coluna d'água e pelos padrões espaciais e temporais na produtividade primária, o que provoca diferenças regionais nos aportes de alimento, e são essas diferenças que determinam a biomassa e a abundância de organismos. Na ausência de luz, as fontes hidrotermais alicerçam verdadeiros oásis no meio dos oceanos mediante a produção primária por bactérias quimiossintetizantes, compondo um ecossistema ainda mais singular.

**Circulação oceânica** > As correntes profundas, também denominadas termoalinas, são formadas pela diferença de densidade da água do mar, que por sua vez tem relação direta com a temperatura e salinidade da água. Como o processo de formação

de água densa está relacionada principalmente à diminuição da temperatura ou aumento da salinidade ocasionada pela formação de gelo, o fluxo de água fria geralmente origina-se nas latitudes elevadas. Portanto, a origem do ciclo é o fluxo vertical da água superficial, que dependendo da densidade da água, mergulha a uma profundidade intermediária ou próximo ao fundo (Fig. 11.3), e flui lentamente em direção ao equador (Randall & Farrell, 1997). Nas regiões abissais do Oceano Atlântico verifica-se a predominância de duas massas de águas: a Água Profunda do Atlântico Norte (2-4 °C, ~ 34,9‰) e a Água Antártica de Fundo (-2 °C, ~ 34,8‰) (Neto et al., 2004). Segundo Garrison (2010), a Água Antártica de Fundo possui as maiores densidades entre todos os oceanos (1,0279 g/cm<sup>3</sup>) e é conhecida por migrar em direção norte. Esta massa de água margeia a América do Sul e, portanto, a zona do talude brasileiro (Fig. 11.4). A velocidade das correntes termoalinas (1 cm/s) é baixa, porém muito importante já que se constitui como principal processo de renovação da qualidade das águas profundas. Além disso, seu forte fluxo é suficiente para promover a erosão do fundo do mar e a redistribuição de sedimentos, controlando a deposição de matéria orgânica e inorgânica (Koslow, 2007).



**Figura 11.3** Processo de formação da circulação termoalina: a água fria, mais salgada e densa afunda, enquanto a água mais quente e menos densa, aflora à superfície, formando um fluxo circulatório. Adaptado de CC BY-SA 3.0, Wikimedia. Acesso em 31/10/2020.



**Figura 11.4** Representação esquemática da corrente Antártica de Fundo (seta vermelha) e corrente profunda do Atlântico Norte (seta amarela). **Adaptado** de Neto et al. (2004).

### 3. PROSPECÇÕES DE MAR PROFUNDO

No início do século XIX não era fácil acreditar que, com a escuridão intensa, baixas temperaturas e alta pressão, fosse possível existir vida a muitos metros abaixo da superfície do mar. Em 1843, o cientista britânico Edward Forbes, após prospecções a bordo do *HMS Beacon* (*Her/His Majesty's Ship* navio de sua majestade) nos Mares Mediterrâneo e Egeu, observou que a abundância da vida era inversamente proporcional ao aumento da profundidade e, a partir disto, deduziu que deveria existir pouca ou nenhuma vida abaixo dos 550 m de profundidade, postulando assim, a Hipótese Azóica (Gr.: *a* = negação e *zôion* = ser vivo).

Apesar da Hipótese Azóica, que persistiu por cerca de duas décadas, na metade do século XVIII já haviam evidências que provavam o contrário. Em 1810 o francês Antoine Risso (1777–1845) deu início a uma geração de taxonomistas, dos quais

também se destacam o zoólogo alemão Albert Günther (1830–1914) e os estadunidenses Samuel Garman (1843–1927) e Charles Gilbert (1859–1928), que contribuíram efetivamente para as primeiras descobertas de peixes de profundidade.

Günther foi o responsável por analisar as amostras obtidas durante a Expedição *Challenger* (1872–1876), que percorreu 127.600 km nos oceanos Atlântico, Pacífico, Índico e Antártico e coletou informações abióticas nas Fossas Marianas — Oceano Pacífico — em uma profundidade de 8.184 m, tornando-se um marco para a oceanografia. Ele também descreveu cerca de 25% dos 610 novos táxons coletados nesta expedição, demonstrando que a diversidade diminuiu com o aumento da profundidade ao registrar 232 espécies na faixa de profundidade entre 183 e 500 metros e apenas 23 espécies entre 3.660 e 5.300 metros (Priede, 2017).

No Brasil, as iniciativas relacionadas as prospecções de profundidade datam justamente desta época, na passagem da expedição *Challenger* (1873) pelo Oceano Atlântico. Os relatórios da expedição mencionam coletas de amostras abióticas nos arredores do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e de Fernando de Noronha-PE e bióticas entre Pernambuco e Bahia (Lopes, 2018).

A segunda metade do século XX testemunhou uma explosão extraordinária no desenvolvimento de métodos científicos e instrumentações. Nos anos após a Segunda Guerra Mundial, em razão dos avanços nas tecnologias dos sistemas de sondagens do assoalho oceânico juntamente com o aprimoramento das técnicas de captura, navios de diversas nacionalidades passaram a investigar os ecossistemas de águas profundas. Foi então que, após um intervalo de quase um século, navios estrangeiros de pesquisa começaram a explorar melhor os oceanos profundos em territórios brasileiros. A exemplo do *M/V (Motor Vessel) Oregon II*, navio exploratório da *United States Fish and Wildlife Service* (USFWS), que alcançou o largo da foz do Rio Amazonas e realizou coletas até 400 m de profundidade (Grace, 1998; Iwamoto & Arai, 1987).

Na década de 1960, com a criação da Superintendência para o Desenvolvimento do Nordeste (SUDENE), uma série de convênios entre o setor público, universidades e empresas privadas de pesca impulsionou diversos trabalhos no sentido de melhorar o conhecimento sobre a biodiversidade marinha, sendo a prospecção dos recursos pesqueiros de profundidade (150–1.000 m) no Nordeste e ilhas oceânicas uma das ações principais. Objetivando obter informações sobre a avaliação da abundância dos recursos prospectados e tecnologia pesqueira de sua captura, a pesca experimental de profundidade foi realizada utilizando diversas embarcações, dentre elas o navio de pesquisa (NPq.) “Akaroa” atuando entre Alagoas e Sergipe, o NPq. “Canopus” atuando nos montes submersos da Cadeia Norte do Brasil com o emprego de linha de mão, e algumas embarcações menores adaptadas

como o “Serro Azul” utilizando redes de emalhar, e o “Ilha de Itamaracá I” utilizando redes de emalhar e atração luminosa.

Na década seguinte, a Superintendência para Desenvolvimento da Pesca (SUDEPE) estabeleceu bases para as atividades dos NPq.s “Riobaldo” e “Diadorim” ao largo do Rio Grande do Norte e Bahia empregando corrico, espinhel, redes de emalhar, linhas de fundo e pesca exploratória em suas prospecções. Neste período foi construída a primeira embarcação para pesquisas pesqueiras na região, o NPq. “Pesquisador IV”, que empregou espinhel de fundo e corrico.

Após essa iniciativa em âmbito local com a SUDENE, a comunidade internacional implementou esforços e pactuou normas para a conservação e exploração racional das regiões costeiras, plataformas continentais e grandes fundos marinhos. A Convenção da Nações Unidas sobre o Direito do Mar (CNUDM ou UNCLOS, referente ao acrônimo em inglês *United Nations Convention on the Law of the Sea*) e o capítulo 17 da “Agenda 21” constituem os documentos básicos que definem a moldura jurídica global e balizam as ações que cada país deve implementar para que seja alcançada a meta comum de uso sustentável do mar. Como signatário da UNCLOS, tendo participado ativamente da elaboração de ambos os documentos e revelado seu grande interesse e preocupação sobre o assunto, o Brasil assumiu compromissos relacionados à exploração, aproveitamento, conservação e gestão dos recursos vivos na Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

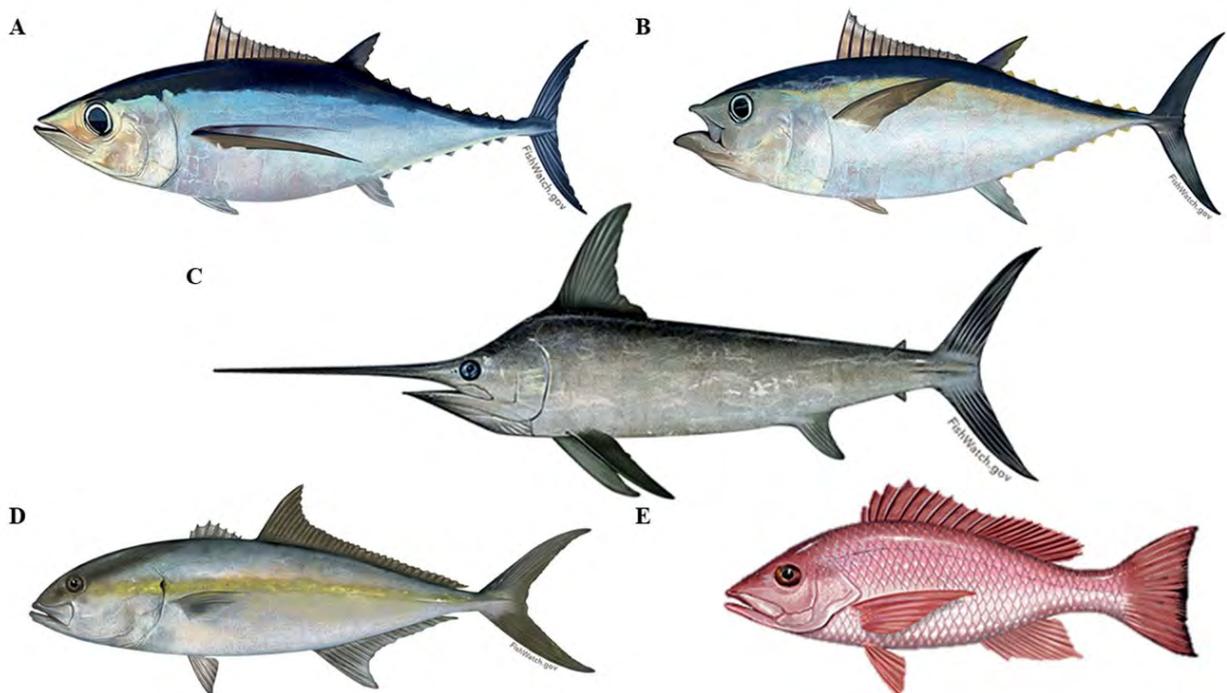
O Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE) resultou de um detalhamento desses compromissos assumidos, implicando no conhecimento dos recursos disponíveis e na avaliação de seus potenciais sustentáveis, sob coordenação e execução de Universidades e Institutos de Pesquisa. Baseado nas características oceanográficas, o REVIZEE definiu o score ZEE Nordeste como se estendendo da foz do Rio Parnaíba-PI até a Baía de

Todos os Santos-BA (2°–13° S, 34°–41° W), incluindo também a área de 200 milhas em torno do Atol das Rocas (AR) e dos arquipélagos de Fernando de Noronha (FN) e São Pedro e São Paulo (ASPSP), ocupando uma área de aproximadamente 1.450.000 km<sup>2</sup> de extensão (Fig. 11.2).

As prospecções de recursos pesqueiros realizadas na área de estudo da ZEE-Nordeste através do Programa REVIZEE incluíram o NPq.s “Natureza”, “Riobado”, “Prof. Martins Filho”, o barco de pesquisa (BPq.) “Sinuelo” e o navio oceanográfico (NOc.) “Atlântico Sul”. Nessas campanhas, armadilhas de fundo (covos) para captura de recursos demersais - crustáceos, peixes, moluscos e equinodermos- e espinhel de fundo para captura de peixes ósseos e cartilagosos, foram utilizadas nas profundidades de 50 a 850 m. Já os espinheis de fundo vertical e pelágicos de mono e de multifilamento, operaram

para captura de peixes ósseos e cartilagosos em profundidades de 25,5 a 220 m.

O levantamento do REVIZEE sobre a atuação da frota artesanal da região Nordeste indicou que as profundidades de captura não ultrapassavam, em sua maioria, 250 metros, com exceção da frota potiguar direcionada a pesca da albacora-branca *Thunnus alalunga*, albacora-bandolim *Thunnus obesus* e espadarte *Xiphias gladius* que atuava até os 1.000 m. Outras espécies indicadas como alvo foram o olho-de-boi *Seriola dumerili* — capturada no Rio Grande do Norte utilizando linha de mão em profundidades maiores que 400 m — e o vermelho olho-amarelo *Lutjanus vivanus* — capturada em Pernambuco e no Ceará em profundidades de até 250 m utilizando espinhel vertical e linha de mão, assim como utilizando covos em profundidades maiores (Fig. 11.5) (Nóbrega et al., 2009).



**Figura 11.5** Principais espécies de peixes de profundidade capturadas pelo REVIZEE Score Nordeste: **A)** albacora-branca *Thunnus alalunga*, **B)** albacora-bandolim *T. obesus*, **C)** espadarte *Xiphias gladius*, **D)** olho-de-boi *Seriola dumerili* e **E)** vermelho olho-amarelo *Lutjanus vivanus*. **Fonte** www.fisheries.noaa.gov.

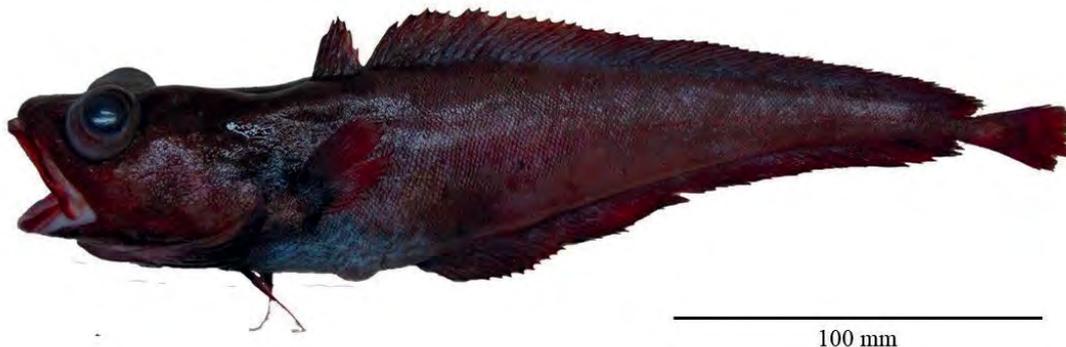
Além das prospecções com aparelhos de pesca, o NOc. “Atlântico Sul” realizou, em 2004, uma campanha de sondagem hidroacústica no Arquipélago de São Pedro e São Paulo e nos bancos rasos em frente ao estado do Ceará, contudo, não foram observadas estruturas características de cardumes em praticamente toda área varrida.

Após as prospecções realizadas pelo Programa REVIZEE, trabalhos recentes foram desenvolvidos em parceria com as Universidades Federais de Pernambuco (UFPE), Rural de Pernambuco (UFRPE), do Rio Grande do Norte (UFRN) e empresas privadas.

Desde 2010, a Fundação Projeto TAMAR, na esfera da exposição Submarino Amarelo, realiza coletas

de animais que habitam os 500 metros abaixo da superfície do mar utilizando covos e espinheis verticais de profundidade na costa da Praia do Forte-BA e Aracaju-SE.

A partir de 2012, projetos desenvolvidos pela UFRPE (“Ilhas Oceânicas” e “Ecologia e Pesca de Espécies Pelágicas Oceânicas e Demersais de Profundidade Na Costa Nordeste e Ilhas Oceânicas Do Brasil”) efetuaram prospecções de profundidade com covos e espinheis verticais no talude de Pernambuco (200–600 m) e entorno do ASPSP (200–1.100 m). Com estes trabalhos foi possível ampliar o conhecimento da fauna profunda, trazendo novos registros para a região bem como a descoberta de novas espécies, como é o caso do *Physiculus cirm* que ocorre no ASPSP (Pires et al. 2019) (Fig. 11.6).



**Figura 11.6** *Physiculus cirm*, espécie de peixe de profundidade descrita do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP).  
**Foto** Alessandra Pires.

Em 2015, a Petrobrás em colaboração com diversas universidades brasileiras desenvolveu o projeto de “Monitoramento Ambiental Marinho da Bacia Potiguar”, com o objetivo de caracterizar a biodiversidade do talude continental do estado em profundidades entre 150 e 2.000 m. Os resultados deste estudo estão apresentados no livro Biodiversidade Marinha da Bacia Potiguar - RN (Lins Oliveira et al., 2015), e podem ser considerados inéditos, não somente para o Rio Grande do Norte, como também para todo o Brasil, visto que contribuíram com um rico inventário e elevada riqueza de espécies de peixes de águas profundas, registrando novas ocorrências de

espécies para a região Nordeste, para o Brasil e para o Atlântico sudoeste, além das potenciais novas espécies que ainda estão em fase de descrição. Foram identificadas 166 espécies, distribuídos em 71 famílias e 21 ordens. Em termos de número de espécies, a família Macrouridae foi a mais representativa, seguida por Ophidiidae, Myctophidae e Serranidae.

Em 2015 e 2017, expedições do projeto “Acoustics along the BRAZilian COaSt” (ABRACOS), realizado em parceria entre o Brasil (UFRPE e UFPE) e a França (*Institut de Recherche pour le Développement* – IRD), consistiram em traçar uma

caracterização 3D dos compartimentos abióticos e bióticos e suas respectivas interações, visando melhorar a compreensão do grau de conectividade entre as ilhas oceânicas e a margem continental no Nordeste do Brasil (ex: Assunção et al., 2020). Nesta conjuntura, amostragens *in situ* de organismos planctônicos, pelágicos e demersal-bentônicos foram combinadas com observações acústicas (ex: Eduardo et al., 2019; 2020) (Bertrand, 2015, 2017).

Estes estudos de prospecção destacam a importância e a necessidade de evidências científicas para apoiar as medidas de gestão dos recursos pesqueiros, bem como, ampliar o entendimento acerca das espécies que habitam esse ecossistema. Tal esclarecimento, juntamente com estudos de dinâmica das correntes, topografia e tipo de substrato, será o primeiro passo para o conhecimento do ambiente de profundidade e estimar o grau de complexidade e diversidade presente, e, portanto, dar suporte a medidas de conservação.

## 4. BIODIVERSIDADE DE MAR PROFUNDO

A biodiversidade em mares profundos depende de parâmetros relacionados à profundidade, dentre outros podemos citar a temperatura, pressão e disponibilidade de alimentos. Fatores abióticos extremos levaram às adaptações na maneira como organismos se reproduzem e se alimentam. As espécies que predominam em uma determinada área vinculam-se às características do fundo e apresentam diferentes modos de vida. As que vivem na coluna de água e não dependem do fundo são denominadas pelágicas; já as que vivem associadas ao substrato, são denominadas bentônicas; aquelas que vivem na coluna d'água, mas próximas ao fundo são as espécies bentopelágicas.

Neste tópico, focamos nas espécies bentônicas e bentopelágicas que ocorrem no Nordeste brasileiro,

assim como, nas principais adaptações que elas apresentam.

### 4.1. Adaptações

As evidências científicas baseadas em hipóteses de relações evolutivas das espécies de peixes sugerem que os diferentes grupos animais colonizaram o mar profundo em momentos diferentes e em múltiplos eventos. Esses eventos só foram possíveis graças ao surgimento de características genéticas, fisiológicas e de morfologia que permitiram às espécies colonizar um ambiente tão hostil.

Nos invertebrados sésseis como corais verdadeiros (Scleractinia), por exemplo, houve uma tendência de diversificação das formas solitárias em detrimento das coloniais, o que provavelmente representa uma economia energética. As esponjas (Porifera), embora filtradores, possuem estratégias de captura de presas em mar profundo, como é o caso das esponjas carnívoras da família Cladorhizidae. Crustáceos, poliquetas e outros invertebrados planctônicos também possuem pigmentação (ou ausência desta), e são capazes de gerar luz através de uma reação química denominada bioluminescência.

Tal qual alguns invertebrados, algumas espécies de peixes ósseos e cartilagosos de ecossistema de mar profundo também possuem órgãos luminosos, além da presença de poros e adaptações fisiológicas e anatômicas para lidar com a pressão.

#### 4.1.1. Estratégias alimentares

Em razão da dependência da matéria orgânica produzida na zona eufótica, a maior parte dos organismos de mar profundo tem uma baixa especialização da dieta, podendo utilizar estratégias alimentares do tipo suspensívora (principal estratégia dos invertebrados sésseis), detritívora, necrófaga, raspagem, predação e simbiose (Fig. 11.7). Esta última sendo mais observada nos ambientes quimiossintéticos.



**Figura 11.7** Espécies necrófagas devorando uma carcaça de baleia, uma fonte de nutrição para muitos seres de águas profundas. Santuário Marinho Nacional da Baía de Monterey- *Ocean Exploration Trust 2019 Expedition (OET)*, *National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA)*. **Fonte** <https://twitter.com/sanctuaries>. **Acesso** 03/11/2020.

A dependência da chuva de detritos também atua como determinante na formação de habitats de corais profundos, que, comumente, coincidem com áreas de grande produtividade primária superficial. No entanto, este não é o único fator. Correntes de fundo, responsáveis pelo fluxo de matéria orgânica, plâncton e ressuspensão de detritos desempenham papel importante no suprimento trófico dessas comunidades, especialmente considerando que a produtividade da zona fótica obedece a padrões sazonais (Buhl-Mortensen et al., 2016).

#### 4.1.2. Estratégias reprodutivas

O sucesso da ocupação e permanência das espécies num dado ecossistema está amplamente associado a um processo de reprodução bem-sucedido. A combinação de habitats, hábitos, fisiologia e comportamentos reprodutivos determina a estratégia reprodutiva.

A diversidade de estratégias reprodutivas nos organismos de mar profundo é tão grande quanto naqueles que habitam águas rasas. As espécies podem ser gonocóricas (Gr.: *gónos* = sexos e *chorikós* = separados) ou hermafroditas (Gr.: *hermaphoditos* = que contém ambos os sexos), apresentar fecundação interna ou externa, realizar ou não a autofecundação e exibir um padrão de desova (postura de ovos ou filhotes) com periodicidade sazonal ou contínua.

Invertebrados bentônicos de profundidade, como os corais, podem apresentar clonalidade via brotamento ou fragmentação, além de outros arranjos, como larvas lecitotróficas (Gr.: *lekithos* = vitelo e *trophos* = que se alimenta).

Os teleósteos de águas profundas também desenvolveram estratégias reprodutivas notáveis. Devido à dificuldade de encontrar alimento no mar profundo, algumas espécies apenas

investem energia na reprodução após assegurar o crescimento, levando à maturação tardia; do mesmo modo, a falta de energia é capaz de moldar a fecundidade, reduzindo-a; enquanto o maior tamanho dos ovos seria uma alternativa para aumentar a sobrevivência e viabilidade das larvas. Apesar de informações sobre a reprodução de muitas espécies permanecerem desconhecidas, já foi possível observar cuidado parental, semelparidade, hermafroditismo e proporções sexuais extremas em teleósteos de ambientes profundos.

Espécies semélparas são conhecidas por possuir um único evento reprodutivo na vida, muitas vezes seguido de morte. A espécie de peixe mais famosa detentora dessa estratégia é o salmão, mas algumas espécies de congros (*Conger* sp.), como as do Atlântico Norte, parecem ser semélparas, pois elas param de se alimentar, descalcificam, perdem seus dentes, migram para águas profundas para desovar e após a desova morrem. Comumente conhecidos também por alcançarem grandes tamanhos, acredita-se que os congros seriam capazes de interromper o processo reprodutivo sem alcançar a fase final de maturação das gônadas e sem sofrer desgaste físico, tornando a se alimentar e crescer vigorosamente, alcançando assim mais de 1 m de comprimento (Fig. 11.8).

No Brasil, pesquisas indicaram evidências de semelparidade para o *Conger orbginianus*, como degradação corporal durante a migração reprodutiva. Outras espécies de congros também são capturadas no Nordeste, como o *Conger esculentus*, no entanto, nenhuma informação sobre sua reprodução foi publicada até o momento.

As espécies presentes nos ecossistemas de águas profundas são especialmente vulneráveis e pouco resilientes, em sua maioria, as características biológicas são do tipo K-estrategistas e incluem alta longevidade, baixa taxa de crescimento, maturidade sexual tardia e baixa fecundidade, que resultam em uma reduzida capacidade de recuperação.



**Figura 11.8** Fotografia exibindo o gigantismo no *Conger orbginianus*. **Fonte** Figueroa et al. (2010).

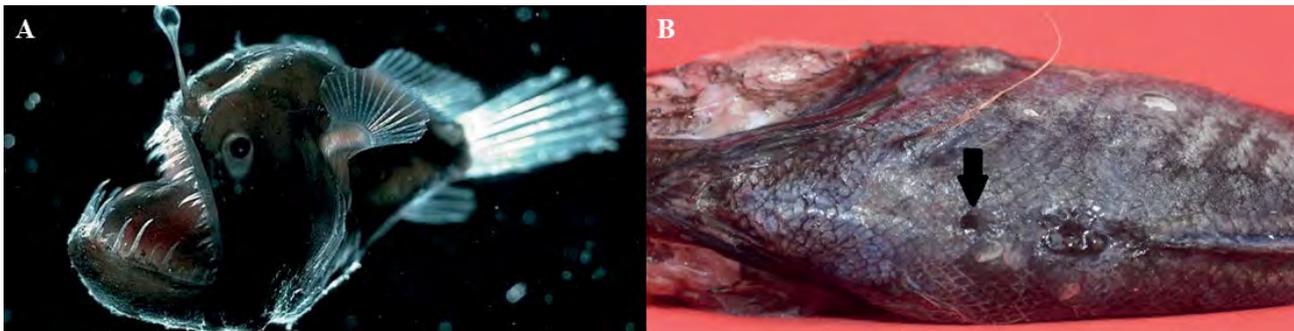
#### 4.1.3. Órgãos luminosos

No mar profundo peixes de pelo menos 46 famílias desenvolveram de forma independente a capacidade de bioluminescência, apesar dessa característica ocorrer em maior quantidade em peixes de ambientes rasos. A bioluminescência pode acontecer através da simbiose com bactérias luminosas ou ser intrínseca, produzida por tecidos luminosos. Algumas raras exceções são os peixes pescadores, que possuem os dois tipos de luminescência em diferentes partes do corpo.

A luz gerada pode ser usada para se comunicar com seus congêneres, incluindo a formação de cardumes e comportamentos de acasalamento; iluminar seu entorno ou o substrato ou atrair presas (Fig. 11.9A); detectar, evitar e assustar predadores, através de flashes brilhantes que podem atordoá-los ou pela secreção de um líquido bioluminescente na água para distraí-los enquanto foge. Outra técnica, chamada de contrailuminação, corresponde à uma luminosidade produzida no ventre do peixe que anula o sombreamento causado pela luz que vem da superfície do mar, impedindo assim que

predadores enxerguem o peixe bioluminescente de uma posição inferior.

Espécies como *Physiculus kaupi* e *Physiculus cirm*, encontrados respectivamente na costa do Nordeste e no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, possuem pequenos órgãos luminosos no ventre, em uma pequena estrutura escura, circular e sem escamas logo acima do ânus. Tais órgãos luminosos perdem sua capacidade de iluminação assim que os peixes morrem ou são retirados da água (Fig. 11.9B).



**Figura 11.9 A)** Órgão luminoso possivelmente usado para atrair presas num peixe-pescador da ordem Lophiiformes e **B)** na contrailuminação num *Physiculus cirm* (indicado pela seta). **Fonte A)** Mundoanimalforever; **B)** Alessandra Pires.

## 4.2. Organismos bentônicos

### 4.2.1. Corais de água frias

O termo coral se refere às espécies de cnidários (Gr.: *knide* = urticante e *aria* = conectado com) capazes de secretar esqueletos, sejam eles de carbonato de cálcio ou proteicos. Das cerca de 5.300 espécies de corais conhecidas atualmente, mais da metade ocorre ou é exclusiva de mar profundo. Tal como em águas rasas, esses animais também desempenham papel de engenheiros ecossistêmicos nesses ambientes, formando prados em substratos inconsolidados e jardins e recifes de coral em fundos duros. Esses cnidários agregam

complexidade estrutural aos substratos que ocupam e, por consequência, proveem abrigo para diversos grupos em várias etapas de desenvolvimento. Desta forma, ambientes coralíneos de mar profundo, por definição, aumentam a diversidade local de vertebrados e invertebrados.

Corais estruturam ao menos três tipos de ecossistemas conhecidos: prados, jardins e recifes. Todos estes, em algum grau, desempenham papel importantíssimo na modulação de correntes, ciclagem de nutrientes e minerais e na criação de micro-habitats. Os prados são formados por corais flageliformes (em forma de chicote) e pelas chamadas “canetas do mar”, ocorrem sobre

fundos lamosos e provem área de berçário para espécies de peixes associados. Os jardins, por sua vez, se comportam como verdadeiras florestas que filtram os nutrientes e detritos trazidos pelas correntes profundas; sendo composto por formas arborescentes típicas das gorgônias e corais negros em substrato duro. No Brasil, agregações menores semelhantes aos jardins também têm participação massiva de esponjas na sua estruturação, sendo muitas vezes dominados por elas. Os recifes profundos, embora formados pelos mesmos representantes de água rasa, os corais duros ou escleractínios, são estruturalmente mais frágeis possuindo áreas de coral morto, responsáveis pelo acúmulo de matéria orgânica e abertas à colonização, e áreas de coral vivo, onde se dá o crescimento do arcabouço recifal. Este último é o principal habitat coralíneo em termos de agregação de diversidade e fixação de carbonato de cálcio em mar profundo.

Não há registros confirmados de prados ou jardins no Brasil, embora espécies constituintes já tenham sido coletadas em grandes densidades na Bacia Potiguar (RN) e próximo à cadeia Vitória-Trindade (BA-ES). Agregações de espécies formadoras de recifes são comuns no talude do Sudeste e Sul do país, mas também já foram registradas na região Nordeste da ZEE, sem, contudo, confirmação de recifes extensos. A dificuldade desse tipo de mapeamento reside na pouca infraestrutura logística disponível para sua exploração, assim como pelo fato de estruturas recifais serem evitadas em campanhas, devido ao risco de perda de equipamentos de prospecção.

No ambiente marinho raso (até os 200 m), desembocaduras de grandes rios podem representar barreiras à dispersão de organismos bentônicos, especialmente quando o assunto é ambiente recifal. O Brasil, por exemplo, tem sua costa norte marcada pela influência da Foz do Amazonas que, embora permita a presença de recifes, atua como um filtro de espécies entre a região do Caribe e o Atlântico Sul, demarcando

o limite norte da chamada Província Brasileira (PvB). Assim, a plataforma continental brasileira é considerada uma unidade biogeográfica distinta, composta por um mosaico de ecossistemas, marcados pela influência continental.

Por outro lado, utilizando corais como exemplo, se a PvB apresenta uma diversidade reduzida, com um forte endemismo; em mar profundo, os padrões de distribuição vão no sentido oposto, com alta diversidade e baixo endemismo. Profundidades a partir do talude, portanto, se inserem em contextos biogeográficos mais globais, das grandes províncias batiais do Atlântico Norte e Atlântico Sul, moduladas por fatores como temperatura e oxigênio dissolvido.

No Atlântico Sul, a identificação e o mapeamento de *hotspots* de corais de mar profundo é incipiente. Ainda que a ZEE do Brasil ocupe uma área territorial de mais de 3,6 milhões de km<sup>2</sup>, mais de 80% dos registros de corais de mar profundo concentram-se ao largo das costas do Sul e Sudeste do país, onde atividades de exploração de óleo, gás e a pesca industrial são mais intensas. Por exemplo, ao passo que 32 espécies de octocorais de mar profundo são conhecidas para a Bacia de Campos-RJ, apenas 10 são registradas nas costas de Pernambuco e Ceará. Longe de indicar padrões de distribuição, a carência de registros na margem continental do Norte e Nordeste do Brasil reflete um menor esforço amostral. Este argumento é reforçado por estudos de mapeamento preditivo e levantamentos no sul da Bahia e na Bacia Potiguar-RN, que estimam uma riqueza superior àquelas de latitudes mais austrais. Em números absolutos, o ambiente profundo da ZEE do Nordeste abriga 132 espécies de corais já registradas até o momento. Tratando apenas os corais verdadeiros, a região possui 60 espécies registradas, em contraste com 42 no Sul e Sudeste.

Três pontos do Nordeste concentram atenção dos estudos com corais de mar profundo das últimas décadas: a região que se estende do talude baiano até a Cadeia Vitória-Trindade (conhecida como Região Central da ZEE), a Bacia Potiguar

(parte da plataforma e talude cearense até o Rio Grande do Norte) e o ASPSP. Os dois primeiros foram amostrados por campanhas oceanográficas extensas e são responsáveis pela maioria dos registros de corais de mar profundo publicados no

Brasil até o momento. O ASPSP, por sua vez, embora frequentemente acessado, tenha apenas nove espécies coralíneas conhecidas (Fig. 11.10). Algumas delas, com registros ainda oriundos da expedição *Challenger*.



**Figura 11.10** Colônia de coral negro *Tanacetipathes* sp. Espécie de coral mais frequente em levantamentos de fauna bentônica mesofótica e profunda no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP). **Fonte** Ralf Cordeiro.

#### 4.2.2. Crustáceos

O subfiló Crustacea é considerado o quarto grupo animal em termos de diversidade geral, compreendendo aproximadamente 70.000 espécies descritas, com 2.500 espécies registradas para o Brasil, das quais 84% são marinhas e as mais conhecidas, uma vez que incluem recursos pesqueiros

de interesse econômico e bastante populares, como camarões, siris, caranguejos e lagostas. Embora os mares e oceanos sejam os habitats mais comuns deste grupo, estudos sobre os crustáceos associados a águas profundas ainda são incipientes, especialmente na costa nordeste do Brasil.

O primeiro estudo sobre a fauna de crustáceos realizada na região Nordeste do Brasil foi conduzido na costa da Bahia, através da expedição de circunavegação oceanográfica comandada por Charles Darwin a bordo da embarcação *H.M.S Challenger*. Deste então, na plataforma continental nordestina, os crustáceos se apresentam como um célebre grupo entre os animais do macrozoobentos, ou seja, organismos bentônicos maiores que 0,5 mm representados principalmente por poliquetas, crustáceos, equinodermos e moluscos.

O gradiente batimétrico, de maneira geral, exerce uma grande influência na distribuição vertical das espécies bentônicas de águas profundas. A característica mais bem estabelecida na estrutura dessas comunidades é a distribuição do estoque (biomassa e abundância) desde as plataformas continentais até as planícies abissais, refletindo distintas adaptações bioquímicas e fisiológicas com consequentes implicações ecológicas e evolutivas. Isto é principalmente impulsionado pelo declínio na taxa de entrada de carbono orgânico com a profundidade. Outro padrão bem conhecido é a zonação, **ex:** a mudança na composição das espécies com a profundidade, de forma que a fauna do talude continental é distinta daquela presente na plataforma acima e na planície abissal abaixo.

As espécies de crustáceos presentes nos ecossistemas de águas profundas são especialmente vulneráveis à sobrepesca devido às suas características biológicas, incluindo, em sua maioria, alta longevidade, baixa taxa de crescimento, maturidade sexual tardia e baixa fecundidade (Morato et al., 2006; Follesa et al., 2011), o que resulta em uma reduzida capacidade de recuperação dos seus estoques. Além disso, o seu comportamento de formar agregações na época de reprodução ou para alimentação, aumenta muito a sua vulnerabilidade à pesca (Koslow et al., 2000; Devine et al., 2006). O desenvolvimento de novas pescarias direcionadas à esses recursos, portanto, requer um conhecimento detalhado da história de vida das espécies e de sua ecologia, bem como

da biodiversidade associada aos ecossistemas marinhos de profundidade (FAO, 2003; Munro, 2011).

Estudos sobre os crustáceos de águas profundas despertam grande interesse entre os pesquisadores em recursos marinhos uma vez que as espécies apresentam ampla distribuição, além de possuírem, em muitos casos, elevado valor comercial (Taisoun, 1973; Perez, 2009; Anastasopoulou et al., 2017). Investigações de habitats em águas profundas e sua fauna estão sendo cada vez mais desenvolvidas em todo o mundo, em razão dos recentes avanços nas tecnologias de captura (Pauly et al., 2003; Perez, 2009; Ramirez-Llodra et al., 2010), contribuindo com novas descobertas e, assim, para uma melhor compreensão da vida no planeta.

### 4.3. Organismos bentopelágicos

#### 4.3.1. Teleósteos

A realização de amostragens de peixes de profundidade é escassa em todo o mundo, fazendo com que a comparação entre a distribuição das espécies e os fatores que influenciam sua composição permaneça limitada. Contudo, já sabemos que a distância, a quantidade de regiões e/ou a metodologia usada para comparação (presença/ausência; peso das capturas por área) influenciam nos resultados entre populações de diferentes locais.

Em uma escala de bacia oceânica, com coletas realizadas em montes submarinos nos oceanos Pacífico, Atlântico e Índico, os resultados indicam que a composição da fauna de peixes demersais de profundidade não é globalmente homogênea, entretanto padrões regionais de composição de espécies mostram algumas semelhanças entre locais amplamente separados. Analisando diversas variáveis, o mesmo estudo aponta que a salinidade seria o fator que mais influencia tal composição. Por sua vez, é provável que a salinidade seja resultado

da origem das correntes de fundo, que são formadas por águas muito frias nos polos, afundam e lentamente fluem pelo assoalho marinho em direção ao equador (Clark et al., 2010).

Bergstad et al. (2012) reavaliaram os padrões mundiais de distribuição dos peixes demersais encontrados por Koslow (1993), cujo estudo englobou a margem continental do Atlântico Norte, a cordilheira meso-atlântica e o talude de diversas ilhas oceânicas e montanhas subaquáticas. Seus resultados apontam para uma nítida diferença faunística entre as diferentes bacias oceânicas, contudo, eles observaram uma maior semelhança faunística para as espécies que não são separadas pela cordilheira meso-oceânica. Esta informação nos leva a considerar que as propriedades oceanográficas, geomorfológicas e climatológicas que predominam em cada oceano podem explicar as diferentes composições ictiofaunísticas observadas para cada bacia oceanográfica.

Comparações entre os teleósteos de profundidade do Atlântico Norte e do Mediterrâneo, regiões com forte atividade pesqueira em áreas profundas, exibem diferenças muito claras em relação as famílias dominantes. No Mediterrâneo, uma família diferente domina cada uma das zonas batimétricas: Gadidae na encosta superior, Moridae na encosta média e Alepocephalidae na encosta inferior; no Atlântico, a família Macrouridae é dominante em toda a profundidade. Essa diferença pode ser explicada pela partição dos recursos tróficos. No Atlântico Norte as águas possuem maior produção primária e pequenos peixes se alimentam diretamente do macroplâncton, enquanto que no Mediterrâneo esse recurso trófico é utilizado por decápodes bentopelágicos que, por sua vez, alimentam os peixes maiores (Massutí et al., 2004).

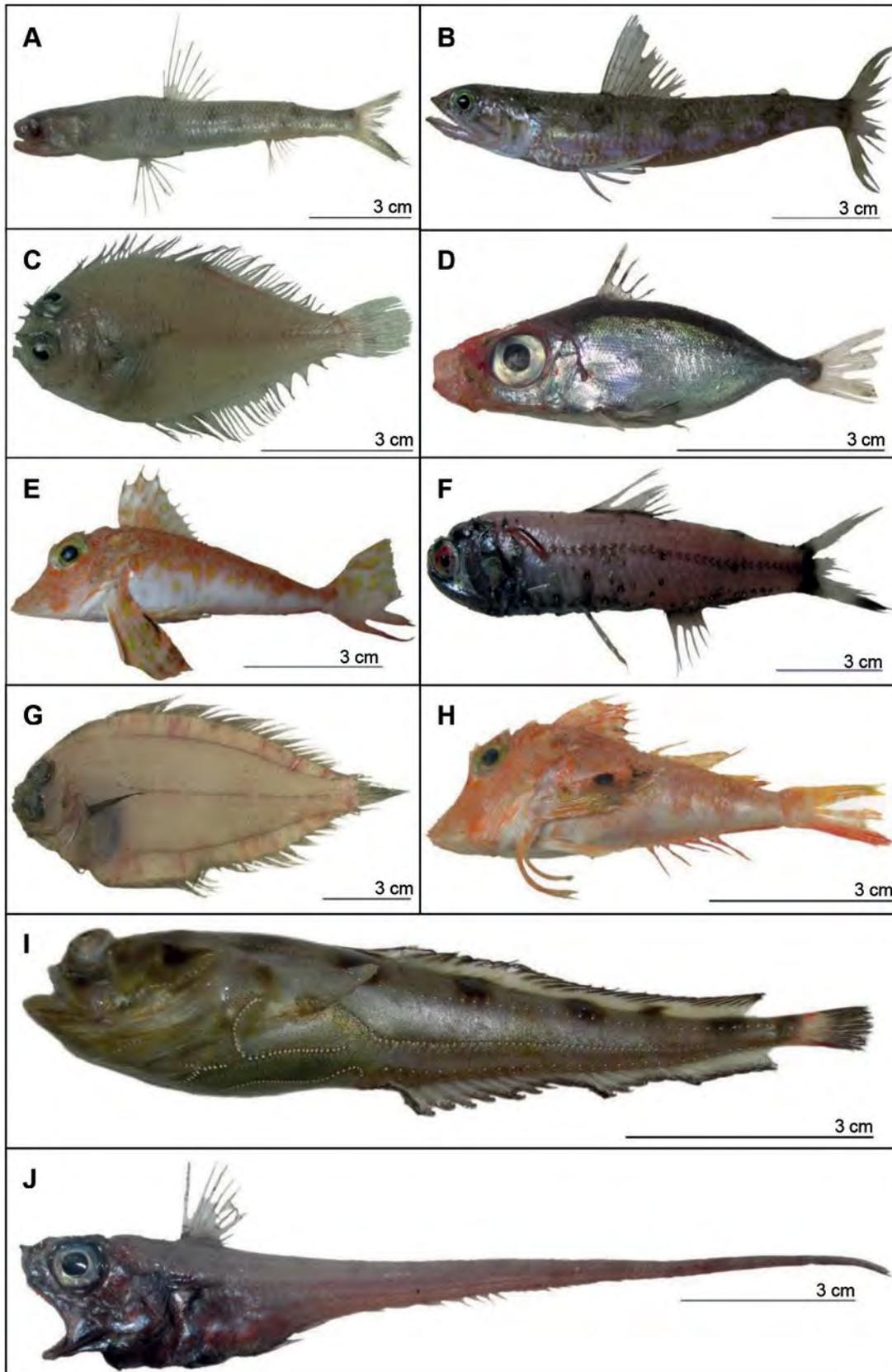
A riqueza do talude continental da Bacia Potiguar-RN, analisada por Lins Oliveira et al. (2015) em até 2.000 m de profundidades, foi de 166 espécies, distribuídas em 71 famílias e 21 ordens. Em termos de número de espécies, a família Macrouridae foi

a mais representativa, seguida por Ophidiidae, Serranidae e Myctophidae. As espécies *Synodus saurus*, *Citharichthys cornutus*, *Zenion hololepis*, *Bellator brachychir*, *Diaphus problematicus*, *Monolene atrimana*, *Bellator egretta*, *Porichthys plectrodon* e *Malacocephalus okamurai* apresentaram as maiores abundâncias (Fig. 11.11). Resultados semelhantes foram obtidos em estudos realizados em águas profundas da região Sul do Brasil (Séret & Andreatta, 1992; Haimovici et al., 1994).

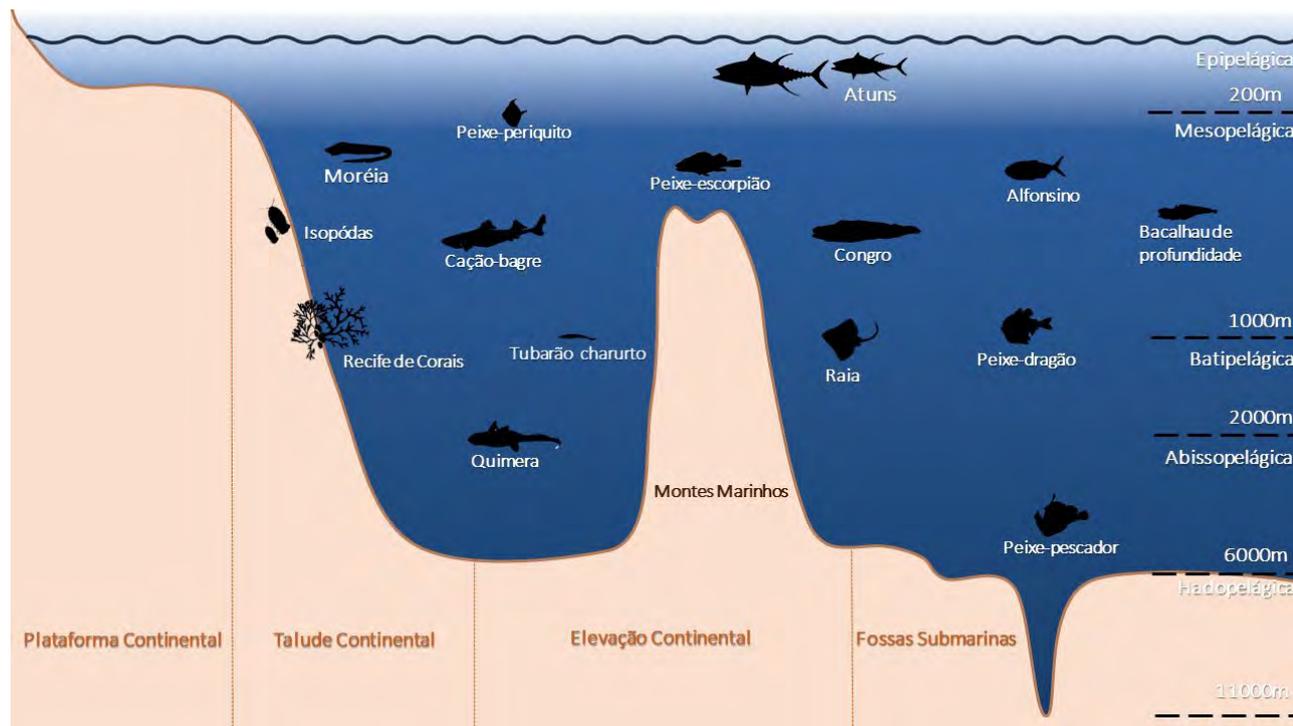
Quando a composição de espécies é analisada em relação a outras regiões do Brasil, verifica-se que a zona do talude, em profundidades de até 2.000 m, possui uma ictiofauna relativamente rica quando comparada a da região Sul (Séret & Andreatta, 1992; Haimovici et al., 1994). Por outro lado, tomando-se por base os estudos realizados na costa oeste do Atlântico Sul e Norte (Anderson et al., 1985; Séret & Andreatta, 1992; Haimovici et al., 1994; Powell et al., 2003; Paramo et al., 2012), percebe-se uma equivalência relativamente grande no número de espécies que ocorrem em águas profundas do talude da região Nordeste do Brasil. Segundo Lins Oliveira et al., (2015), nesta região o número de espécies e indivíduos diminuiu significativamente a partir de 1.000 m, sendo que maior valor de diversidade de espécies de peixes foram observados em profundidades entre 150 e 400 m (Fig. 11.12).

#### 4.3.2. Chondrichthyes

A classe *Chondrichthyes* (Gr.: *Chondros* = cartilagem e *ichthys* = peixe), subclasse *Holocephali* (quimeras) e *Elasmobranchii* (tubarões e raias), engloba os peixes de esqueleto cartilagenoso que ocupam uma vasta gama de habitats, incluindo os mares profundos. Os condrictes de mares profundo, ou seja, que tem seu ciclo de vida prioritariamente abaixo dos 200 m de profundidade, correspondem há mais de 50% do total de espécies e possuem adaptações fisiológicas e anatômicas.



**Figura 11.11**  
 Espécies mais abundantes na zona de Talude (RN), em profundidades compreendidas entre 150 e 2.000 metros: **A)** *Saurida caribbaea*; **B)** *Synodus saurus*; **C)** *Citharichthys cornutus*; **D)** *Zenion hololepis*; **E)** *Bellator brachyichir*; **F)** *Diaphus problematicus*; **G)** *Monolene atrimana*; **H)** *Bellator egretta*; **I)** *Porichthys plectrodon*; **J)** *Malacocephalus okamurai*. **Fonte** Acervo do LABIPE-DOL – UFRN.



**Figura 11.12** Distribuição vertical de espécies de profundidade registradas no talude continental do Nordeste do Brasil. **Corais de águas frias** coral negro *Tanacetipathes* sp. **Crustáceo** Isopóda *Bathynomus* sp. **Teleósteos** alfonsino *Beryx splendens* (400 m, ASPSP), atuns *Thunnus* sp. (>250 m, NE)<sup>1</sup>, bacalhau de profundidade do ASPSP *Physiculus cirm* (600 m, ASPSP), congro *Coloconger meadi* (600 m, ASPSP), moréia *Gymnothorax conspersus* (300 m, PE), peixe-dragão *Argyropelecus aculeatus* (200 – 1.000 m, cadeia Fernando de Noronha)<sup>2</sup>, peixe-escorpião *Pontinus nigropunctatus* (600 m, ASPSP), peixe-periquito *Antigonia capros* (238 m, PE), peixe-pescador Lophiiformes. **Condrictes** cacão-bagre *Squalus bahiensis* (200 – 400 m, PE), tubarão-charuto *Isitius brasiliensis* (150 – 600 m, ASPSP)<sup>3</sup>, raia de Bigelow *Rajella bigelowi* (1.000 m, RN)<sup>4</sup>, quimera *Hydrolagus affinis* (1.000 – 2.000 m, RN)<sup>4</sup>. **Fonte** <sup>1</sup>Nóbrega et al. (2009); <sup>2</sup>Eduardo et al. (2020); <sup>3</sup>Pinheiro et al. (2020); <sup>4</sup>Oliveira et al. (2015).

Amostragens realizadas com rede de arrasto, espinhel e câmeras submersas, revelam que os peixes cartilaginosos são muito raros em profundidades maiores que 3.000 m, enquanto que os peixes ósseos são encontrados além dos 8.000 m de profundidade (**ex:** Musick & Cotton, 2014; Priede et al., 2006). Treberg e Speers-Roesch (2016) atribuíram características fisiológicas e bioquímicas exclusivas dos condrictes como principais potenciais de restrição da colonização em regiões mais profundas.

A necessidade do uso de trimetilamina-N-óxido (TMAO) para manter o equilíbrio osmótico e conferir tolerância à pressão em proteínas vitais, estratégia osmorregulatória baseada na ureia

e elevada concentração de lipídios corporais para obtenção de flutuabilidade neutra são uma combinação de fatores biológicos que podem influenciar nas restrições a competitividade e potencial adaptativo dos condrictes no abismo. Este último, entretanto, implicaria em uma inclinação mais próxima daqueles que também ocorrem em outras classes de peixes. Por exemplo, elevadas quantidades de esqualeno no fígado das espécies de elasmobrânquios de profundidade, principalmente da ordem Squaliformes como o *Squalus acanthias*, corresponde ao acúmulo de gordura nos ossos e músculos de *Ruvettus pretiosus* (Perciformes) (Colaço et al., 2017; Musick & Cotton, 2014; Priede et al., 2006).

O acúmulo de lipídios, cujo custo energético é único, pode limitar cada vez mais o crescimento e a produção reprodutiva conforme a disponibilidade de alimentos, o que leva a um fígado rico em óleo para flutuabilidade (20 a 25% do peso total), que não pode ser sustentado em condições oligotróficas extremas (Colaço et al., 2017). Além disso, de maneira geral, os condrictes investem todo o seu esforço reprodutivo em alguns ovos com vitelo suficiente para apoiar o desenvolvimento direto seja ele por viviparidade ou oviparidade (Ver capítulo [Elasmobrânquios marinhos do Nordeste do Brasil - Vol. 2](#)).

O comprimento total médio máximo, ultrapassando os 100 cm, também pode ser um fator limitante para a colonização dos condrictes em águas mais profundas quando comparados aos teleósteos. Priede e Froese (2013), no estudo *Colonization of the deep sea by fishes*, destacaram as profundidades máximas de 3.000 m, 3.700 m e 4.156 m registradas respectivamente para quimera *Hydrolagus affinis*, tubarão *Isotius brasiliensis* e raia *Rajella bigelowi*. Apesar das capturadas em menores profundidades, estas espécies também tiveram sua ocorrência registradas no Nordeste do Brasil (Fig. 11.13).

Atualmente, foram contabilizadas 78 espécies de tubarões, raias e quimeras de profundidade, o que corresponde a 45% do total de condrictes marinhos registrado para o país.



**Figura 11.13** Espécies de condrictes com as maiores profundidades de ocorrência registradas por Priede e Froese (2013) e que ocorrem no Nordeste do Brasil. **A)** Quimera *Hydrolagus affinis*<sup>1</sup>, **B)** tubarão *Isotius brasiliensis*<sup>2</sup> e **C)** raia *Rajella bigelowi*<sup>1</sup>. **Fonte** <sup>1</sup>Oliveira et al. (2015); <sup>2</sup>Danielle Viana (2017).

## 5. AÇÕES E IMPACTOS ANTRÓPICOS NO MAR PROFUNDO

### 5.1. Pesca

A pesca tem sido realizada pelo homem em diferentes culturas e épocas da nossa escala temporal, estando intimamente ligada com o conhecimento sobre as correntes, marés, navegação, estações do ano, luas e ocorrência de espécies. Naturalmente esta atividade é mais intensa em regiões nas quais a oferta de luz e nutrientes agem em sinergia sustentando uma elevada abundância de peixes e outros organismos.

Com a consequente diminuição dos principais alvos da pesca e decréscimo do rendimento, a indústria pesqueira redireciona seus esforços para novas áreas e estoques, como ambientes marinhos de profundidade e peixes de menor tamanho, revelando-se como uma das atividades antrópicas mais impactantes sobre as espécies e os ecossistemas marinhos vulneráveis (VMEs- *Vulnerable Marine Ecosystems*).

No Brasil, entre as décadas de 1960 e 1990, incentivos fiscais e financiamentos por parte do governo federal estimularam o crescimento do setor pesqueiro, triplicando a produção em pouco mais de 20 anos, mas também, levando o sistema à sobrepesca e, por conseguinte, a diminuição dos estoques. A partir da década de 1990, no advento do Projeto REVIZEE, foi observado que estoques explorados em todas as regiões já estavam no limite, e os únicos que poderiam sustentar um aumento de esforço seriam as espécies pelágicas migratórias de atuns e afins — espadarte, agulhões e tubarões capturados pela pesca oceânica além da isóbata de 200 m no talude continental — e os recursos demersais de profundidade — peixe sapo (*Lophius gastrophisus*), merluza (*Merluccius hubbsi*), abrótea (*Urophycis cirrata*), congro rosa (*Genypterus brasiliensis*), calamar argentino (*Illex argentinus*), caranguejos de profundidade (*Chaceon*

sp.) e camarão carabineiro (Aristiidae). Atualmente, espécies que exibiam captura expressiva para a pesca de profundidade na região Nordeste (albacora-branca, albacora-bandolim, espadarte e vermelho olho-amarelo) já mostram tendências de declínio populacional para os estoques no Atlântico (Pivetta, 2003).

Muitas dessas espécies se agregam nas áreas dos montes marinhos das cadeias Norte-Brasileira e de Fernando de Noronha. Essas agregações são mais vulneráveis à sobrepesca e esgotamento, e quando são formadas em períodos de reprodução, os efeitos podem ser potencializados devido à possível interrupção dos processos de desova e redução do sucesso reprodutivo. As espécies do tipo K-estrategistas (com alta longevidade, baixa taxa de crescimento, maturidade sexual tardia e baixa fecundidade) são especialmente ameaçadas. Quando os espécimes mais velhos são continuamente removidos pela pesca, em algum ponto haverá poucos animais sexualmente maduros para sustentar a população.

A pesca de arrasto de profundidade, apesar de não ser registrada no Nordeste ainda é tolerada no Sul do Brasil e em alguns países vizinhos. Entretanto, existe um esforço global no intuito de cessar esta prática, que é capaz de devastar em minutos habitats que levaram milênios para se formar.

### 5.2. Mineração do assoalho marinho

O assoalho marinho se apresenta como a última fronteira da mineração mundial. A expansão de tal mineração parece ser uma questão de tempo, que avança conforme a progressão das pesquisas sobre a presença de minérios no fundo do mar e a diminuição das fontes dos recursos nos continentes. Contudo, experimentos de pequena escala e ensaios com veículos operados remotamente (ROVs - *Remotely Operated Vehicles*) tem mostrado que a mineração pode alterar as comunidades do mar profundo por milênios.

No Brasil, segundo dados da Agência Nacional de Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) o petróleo é o mineral marinho mais explorado, com 92% da produção nacional produzidos a partir de campos submarinos. No Nordeste, a rota do petróleo em água profundas passa pelas bacias Camamu-Almada e Jequitinhonha (BA), Sergipe-Alagoas (SE/AL) e Potiguar (PB/RN/CE). A bacia Pernambuco-Paraíba é a única bacia sedimentar brasileira sem poços perfurados em sua porção marinha (Petrobras, 2020).

Pesquisas também vêm sendo desenvolvidas para encontrar e calcular a quantidade de minérios como potássio, minério de ferro, ilmenita, sal-gema localizados na ZEE brasileira (Fig. 11.14). Na Elevação do Rio Grande, a 1.500 km do Rio de Janeiro, calcula-se a retirada de manganês, cobalto, ferro, cobre, níquel, platina e outras metais mais valiosos numa profundidade de 600 a 2.800 metros (CPRM, 2020).

Os métodos de estudo para identificar impactos ambientais causados pela mineração do assoalho marinho visam determinar se estas atividades produzem poluentes, estabelecer a biodisponibilidade dos poluentes, verificar se o ambiente produz respostas mensuráveis e indicar a relação causal entre resposta e poluentes. Para constatação de tais impactos podem ser utilizadas três abordagens: mensuração de concentrações de poluentes no meio físico (água e sedimento) e biótico (bioacumulação); avaliação toxicológicas dos organismos aos poluentes; e avaliação das modificações na estrutura e processos dos ecossistemas.

As ameaças geradas pela mineração abrangem poluição por substâncias tóxicas com possibilidade de bioacumulação e biomagnificação trófica; destruição de *hotpots* de diversidade como fontes hidrotermais, corais de profundidade e demais habitats; aumento do efeito estufa por mineração de algas calcárias; diminuição da produção primária local e, conseqüentemente, redução ou até mesmo



**Figura 11.14** Pontos de pesquisa de minérios e produtos de interesse da construção civil que estão sendo investigados no assoalho marinho brasileiro. **Fonte** www.cprm.gov.br.

extinção dos organismos marinhos de profundidade. A mineração nos substratos pode ainda remover a infauna e a epifauna local, alterar a diversidade bentônica de fundos consolidados e produzir uma pluma de sedimentos (aumento da turbidez) que, por sua vez, pode sofrer deriva pela ação das correntes de fundo e causar impactos em áreas que não sofreram distúrbios primários (Gomes et al., 2000). Recentemente um artigo publicado na Nature (2019) advertiu sobre o primeiro animal de profundidade a ser declarado em perigo devido à ameaça da mineração, um caracol que vive próximo a fontes hidrotermais a leste de Madagascar (Sigwart et al., 2019).

### 5.3. Contaminação por microplásticos

Microplásticos, um dos principais poluentes dos oceanos, são partículas plásticas pequenas demais (< 5 mm) para serem filtradas pelas estações de tratamento de resíduos. Classificados em dois tipos principais, eles podem ser primários — produzidos intencionalmente em pequenos tamanhos como as microesferas usadas em produtos de higiene pessoal e as esferas utilizadas na fabricação de plásticos — ou secundários — formados em consequência da durabilidade dos plásticos, fragmentos maiores são quebrados em partículas cada vez menores que podem se perpetuar por séculos no ambiente.

Em razão da semelhança com pequenos organismos plânctônicos, microplásticos são comumente confundidos com itens alimentares, a exemplo da espécie recém descrita de anfípode *Eurythenes plasticus* (Crustacea), coletada nas Fossas Marianas — Oceano Pacífico — a 6.900 m de profundidade, cujo exemplar examinado continha uma nano partícula de microplástico no estômago. Essas partículas podem ocasionar obstrução do sistema digestório e levar à inanição já que não possuem valor nutricional.

Estudos em peixes revelaram que os microplásticos podem afetar o sistema reprodutivo, impedir o crescimento, reduzir o apetite, causar inflamação tecidual, danos hepáticos e alterar o comportamento alimentar. Além disso, também podem causar intoxicação, devido a sua capacidade de absorver produtos tóxicos encontrados nos oceanos como pesticidas, metais pesados e outros tipos de poluentes orgânicos persistentes (POPs), fazendo com que os danos à biodiversidade sejam muito maiores. Seguindo a sequência da cadeia trófica, peixes maiores, animais topo de cadeia e até seres humanos, também acabam ingerindo o plástico e os poluentes acumulados. Apesar dos efeitos dos microplásticos para a saúde humana ainda não serem totalmente conhecidos, disfunções hormonais, imunológicas, neurológicas

e reprodutivas estão relacionadas a ingestão de POPs (ex: Alonso et al., 2017; Cascaes et al., 2014; Neto et al., 2020).

Segundo a *Breaking the Plastic Wave* (Quebrando a Onda dos Plásticos) o volume de plástico que entrou no oceano em 2016 foi de 11 milhões de toneladas, e a projeção é de que essa quantidade triplique nos próximos 20 anos. Cientistas admitem há muito tempo que o fundo do mar se tornou um grande depósito de microplásticos. Assim como as “zonas de acúmulos de lixo flutuantes” formadas por correntes oceânicas de superfície, regiões específicas com alta concentração de microplásticos ocorrem devido à ação de correntes profundas. Como, por exemplo, no fundo do mar Mediterrâneo, a oeste da Itália, onde grandes quantidades de microplásticos (1,9 milhão de partículas/m<sup>2</sup>) foram encontradas até mesmo em fossas marinhas. Esponjas, corais de águas frias e ascídias seriam especialmente vulneráveis aos microplásticos por serem organismos filtradores.

Apesar do cenário atual, a boa notícia é que existem organismos como a bactéria *Idionella sakaiensis*, o bicho da farinha e a traça da cera que são capazes de digerir alguns tipos de plástico. Outras maneiras de conter a poluição plástica é reduzir o uso de plástico, optando por materiais reutilizáveis, como sabonete em barra, garrafas de metal, tecidos orgânicos, bolsas de tecido e plásticos produzidos com a inserção de ingredientes naturais, como o látex da seringueira, que são biodegradáveis.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Apresentado como a nova fronteira, o oceano profundo não pode ser encarado como algo alheio aos outros ecossistemas marinhos. O entendimento sistêmico das diversas interações e funcionalidades entre esses ambientes e a ação humana é de fundamental importância para

atingirmos um nível de conhecimento adequado para garantir e planejar o uso sustentável dos recursos vivos e não vivos.

Esses desafios são identificados como necessários para atingir os objetivos de desenvolvimento sustentável (ODS) e metas da Década dos Oceanos (2021-2030) lançada pela Organização das Nações Unidas (ONU). Nesse sentido o futuro aponta para a maximização do potencial de interlocução e articulação em rede que os cientistas, governos e sociedade devem ter para promover um futuro sustentável para os oceanos e, especificamente, mares profundos (**ex:** *Deep Sea Conservation Coalition* – DSCC).

Estima-se que essas zonas profundas além de terem características extremas que sugerem diferentes formas de vida, evidenciando que a exploração e observação desses ambientes é fundamental para geração de novas descobertas para ciência e para a vida na Terra, também possuem um valor monetário na ordem de 24 trilhões de dólares, projetado através do uso energético e pesca nessas áreas. Por outro lado, o oceano profundo sofre constantemente com a poluição, contaminação e lixo marinho provenientes das atividades antrópicas.

Diante desse cenário precisamos nos fazer algumas perguntas essenciais: qual o papel do oceano profundo no fluxo de calor, de nutrientes, de carbono e de oxigênio? Qual a função desse ambiente no equilíbrio/desequilíbrio global de energia e da distribuição de água na Terra? Como as variações naturais e antropogênicas afetam o clima global? Como os impactos das indústrias que extraem óleo e gás atuam nos organismos bentônicos? Essas e tantas outras perguntas são primordiais para avançarmos no conhecimento da vida na Terra, e devem guiar as pesquisas e inovações para o futuro.

Muito deve ser empenhado para desenvolver e operar equipamentos que consigam mensurar em detalhes as variáveis oceanográficas e ambientais

para respondermos com precisão aos desafios que deverão ser impostos nos próximos anos. Investimentos em sensores, predições, geração e desenvolvimento de modelos, promovendo informações para engenharia e principalmente para variáveis físicas e de risco associado, devem estar alinhados entre a comunidade científica, indústria, governo e organizações não governamentais para que esses objetivos possam ser atingidos.

Um exemplo clássico é todo investimento que a indústria de extração de óleo e gás faz na coleta de dados, através de varreduras acústicas e eletromagnéticas de alta resolução, gerando mapas de leito submarino nos campos de petróleo e ainda monitorando essas estruturas como requisito para licenças de operação. Essas parcerias, pelo reconhecido impacto dessas operações, têm gerado muitas respostas interessantes sobre as variações causadas através das ações antropogênicas provenientes desses tipos de atividades até a recuperação de habitats, servindo de parâmetro inclusive para avaliar os custos de uma intervenção como essa no assoalho marinho.

Outra questão que somente a criação de uma rede com participação assídua dos envolvidos resolverá é a temática relativa à pesca. Além de promoverem uma plataforma de pesquisa, os barcos de pesca são uma alternativa para a observação e coleta de dados, utilizando inclusive a experiência da tripulação para efetivar as pesquisas. Nesse âmbito uma ferramenta fundamental é o rastreamento dessas embarcações através de um sistema de monitoramento por satélite indicando onde essas frotas que atuam nas águas profundas estão, produzindo uma ideia da distribuição das principais espécies comerciais. Esses resultados podem gerar a proposição de áreas de proteção marinhas, para garantir a sustentabilidade não apenas dos estoques pesqueiros e da biodiversidade, mas também da pesca de maneira geral.

Adicionalmente, estudos de genética de população tem dado subsidio a programas de conservação

de ecossistemas marinhos vulneráveis. A partir de análises moleculares de amostras de componentes bióticos e abióticos (**ex:** DNA e e-DNA) é possível responder questões relativas à filogenia das espécies, estrutura, conectividade e resiliência de populações, sistemas reprodutivos, realização de migrações e elucidação da capacidade visual de tais seres. Com o advento de novas análises e metodologias, várias questões começam a ser melhor esclarecidas através de análises moleculares, além de possibilitar investigações com um número bem menor de amostras, o que é muito relevante quando se leva em consideração os elevados custos e dificuldades em realizar amostragem no mar profundo.

De forma incontestável, as descobertas científicas têm relação direta com os avanços tecnológicos e, a cada década, o desenvolvimento de novos veículos robóticos e tecnologias para coleta e processamento de dados, revolucionam o nosso entendimento sobre esse ambiente tão singular.

O aperfeiçoamento constante dos submersíveis tripulados tem possibilitado levar os pesquisadores até as regiões mais profundas, permitindo-os observar em tempo real o ambiente assim como a conduzir seus experimentos *in situ*. Considerados como fortes candidatos à nova Era da Exploração aos Oceanos Profundos, os veículos submersíveis autônomos são ferramentas tecnológicas de última geração, e permitem aos pesquisadores a realização de registros fotográficos e mapeamento do fundo marinho. Esses esforços resultaram em diversas iniciativas ao redor do mundo na criação de programas voltados para gerar informações sobre a biodiversidade e o potencial de recursos exploráveis nessas áreas, além de produzir dados sobre mudanças climáticas, acidificação dos oceanos e produção de oxigênio.

## REFERÊNCIAS

- ALONSO, M. B.; MARUYA, K. A.; DODDER, N. G.; LAILSON-BRITO, J.; AZEVEDO, A.; SANTOS-NETO, E.; TORRES, J. P. M.; MALM, O.; HOH, E. **Nontargeted Screening of Halogenated Organic Compounds in Bottlenose Dolphins (*Tursiops truncatus*)** from Rio de Janeiro, Brazil. *Environ. Sci. Technol.* 51, 1176–1185. 2017. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b04186>
- ANASTASOPOULOU, A.; MAKANTASI, P.; KAPIRIS, K.; SMITH, C.J.; MARAVELIAS, C. & KALOGIROU, S. **Reproductive biology of *Plesionika narval* in the SE Aegean Sea (Eastern Mediterranean)**. *Medit. Mar. Sci.* 18(3): 454 – 4667. 2017.
- ANDERSON, M. E.; CRABTREE, R. E.; CARTER, H. J.; SULAK, K. J.; RICHARDSON, M. D. **Distribution of demersal fishes of the Caribbean Sea found below 2,000 meters**. *Bulletin of Marine Science*, v.37, n. 3, p.794-807. 1985.
- ASSUNÇÃO, R.V.; SILVA, A.C.; ROY, A.; BOURLÈS, B.; SILVA, C.H.S.; TERNON, J-F.; ARAUJO, M.; BERTRAND, A. **3D characterisation of the thermohaline structure in the southwestern tropical Atlantic derived from functional data analysis of in situ profiles**. *Progress in Oceanography*, Volume 187, 102399, 2020. ISSN 0079-6611. <https://doi.org/10.1016/j.pocean.2020.102399>
- BERGSTAD, O. A.; MENEZES, G. M. M.; HOINES, A. S.; GORDON, J. D. M.; GALBRAITH, J. K. **Patterns of distribution of deepwater demersal fishes of the North Atlantic, mid-ocean ridge, continental slopes, islands and seamounts**. *Deep-Sea Research I*, v.61, p.74-83. 2012.
- BERTRAND ARNAUD. **ABRACOS 2 cruise**, R V Antea. 2017. <https://doi.org/10.17600/17004100>
- BERTRAND ARNAUD. **ABRACOS cruise**, R V Antea. 2015. <https://doi.org/10.17600/15005600>
- BUHL-MORTENSEN, P.; BUHL-MORTENSEN, L.; PURSER, A. **Trophic ecology and habitat provision in cold-water coral ecosystems**. In: Rossi, S. (Ed.), *Marine Animal Forests*. Springer International Publishing Switzerland, p. 1366. 2016. [https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5\\_20-1](https://doi.org/10.1007/978-3-319-17001-5_20-1).
- CASCAES, M. J.; OLIVEIRA, R. T.; UBARANA, M. M.; SATO, R. M.; BALDASSIN P.; COLABUONO, F. I.; LEONEL, J.; TANIGUCHI, S.; WEBER, R R. **Persistent organic pollutants in liver of Brazilian sharpnose shark (*Rhizoprionodon lalandii*) from southeastern coast of Brazil**. *Marine pollution bulletin*. 86(1-2):591-3, 2014.

CLARK, M. R.; ALTHAUS, F.; WILLIAMS, A.; NIKLITSCHKE, E.; MENEZES, G.M.; HAREIDE, N.R.; SUTTON, P.; O'DONNELL, C. **Are deep-sea demersal fish assemblages globally homogenous? Insights from seamounts.** *Marine Ecology*, 31, pp.39-51, 2010.

CLARK, M. R.; TITTENSOR, D.; ROGERS, A. D.; BREWIN, P.; SCHLACHER, T.; ROWDEN, A.; STOCKS, K.; CONSALVEY, M. **Seamounts, deep-sea corals and fisheries: vulnerability of deep-sea corals to fishing on seamounts beyond areas of national jurisdiction.** UNEPWCMC, Cambridge, UK. 2006. Site acessado em 01/10/2020. [www.unep-wcmc.org/resources/publications/UNEP\\_WCMC\\_bio\\_series/](http://www.unep-wcmc.org/resources/publications/UNEP_WCMC_bio_series/)

COLAÇO, A.; CARREIRO E SILVA, M.; GIACOMELLO, E.; GORDO, L.; VIEIRA, A.; ADÃO, H.; GOMES-PEREIRA, J. N.; MENEZES, G.; BARROS, I. **Ecosistemas do Mar Profundo.** DGRM, Lisboa, Portugal. 2017. E-book disponível em [www.sophia-mar.pt](http://www.sophia-mar.pt).

CORRÊA, I.; WESCHENFELDER, J. **Fisiografia do Fundo Oceânico. Introdução às Ciências do Mar.** Pelotas: Ed. Textos, 602p, 2015.

COUTINHO, P.N. **Levantamento do Estado da Arte da Pesquisa dos Recursos Vivos Marinhos do Brasil - PROGRAMA REVIZEE-Oceanografia Geológica.** 2000.

CPRM. **Serviço Geológico do Brasil.** 2020. <http://www.cprm.gov.br/> Site acessado em 5 de outubro de 2020.

D'ONGHIA, G.; POLITOU, C.; BOZZANO, A.; LLORIS, D.; ROTLLANT, G.; SION, L.; MASTROTOLARO, F. **Deep water fish assemblages in the Mediterranean Sea.** *Scientia Marina*, Bari, v.68, n.3, p.87-99, 2004.

DEVINE, J.A.; BAKER, K.D. & HAEDRICH, R.L. **Deep-sea fishes qualify as endangered.** *Nature*. 439: 29. 2006.

EDUARDO, L. N.; BERTRAND, A.; MINCARONE, M. M.; SANTOS, L. V.; FRÉDOU T.; ASSUNÇÃO, R. V.; SILVA, A.; MÉNARD, F.; SCHWAMBORN, R.; LE LOC'H, F.; LUCENA-FRÉDOU, F. **Hatchetfishes (Stomiiformes: Sternoptychidae) biodiversity, trophic ecology, vertical niche partitioning and functional roles in the western Tropical Atlantic,** *Progress in Oceanography*, Volume 187, 102389, 2020. ISSN 0079-6611

EDUARDO, L. N.; VILLARINS, B. T.; MARTINS, J. R.; LUCENA-FRÉDOU, F.; FRÉDOU T.; LIRA, A. S.; TRAVASSOS, P. E.; BERTRAND, A.; MINCARONE, M. M. **Deep-sea oceanic basslets (Perciformes, Howellidae) from Brazil: new records and range extensions.** *Check List*, 15(6), 965-971. 2019. Publisher's official version: <https://doi.org/10.15560/15.6.965>

ELLIS, R. **Deep Atlantic: life, death and exploration in the abyss.** New York: The Loyal Press, 395 p, 1996.

FIGUEROA, D. E.; MACCHI, G.; HAIMOVICI, M. **News about the reproductive ecology of the southern conger eel *Conger orbignianus*.** *Marine Biological Association of the United Kingdom. Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom.* 90(3):461, 2010.

FOLLESA, M.C.; PORCU, C.; CABIDDU, S.; MULAS, S.; DEIANA, A.M. & CAU, A. **Deep-water fish assemblages in the central-western Mediterranean (south Sardinian deep-waters).** *J. Appl. Ichth.* 27: 129 – 135. 2011.

FOOD AND AGRICULTURAL ORGANIZATION OF THE UNITED NATIONS (FAO). **Fisheries management 2. The ecosystem approach to fisheries.** FAO Technical Guidelines for Responsible Fisheries Nº 4, Suppl. 2, Rome, 112 p., 2003.

GAGE, J. D.; TYLER, P. A. **Deep-sea biology: a natural history of organisms at the deep-sea floor.** Cambridge University Press. 1991.

GARRISON, T. **Fundamentos de Oceanografia.** São Paulo: Cengage Learning, 2010. 426p.

GOES E.; JUNIOR A. **Caracterização Morfofossedimentar da Plataforma Continental Brasileira.** *Revista Brasileira de Geografia Física.* V.10.5. p1595-1613, 2017.

GOMES, A. S.; PALMA, J. J. C.; SILVA, C. G. **Causas e consequências do impacto ambiental da exploração dos recursos minerais marinhos.** *Revista Brasileira de Geofísica*, 18(3), 2000. <http://dx.doi.org/10.1590/S0102-261X2000000300016>

GRACE, M. **Cruise Results: Coastal Shark Assessment.** NOAA Ship Oregon-II. Cruise OT-98-02 (231). Pascagoula, MS: NOAA, NMFS Southeast Fisheries Science Center. 1998.

HAIMOVICI, M.; MARTINS, A. S.; LIMA DE FIGUEIREDO, J.; VIEIRA, P. C. **Demersal bony fish of the outer shelf and upper slope of the Southern Brazil Subtropical Convergence Ecosystem.** *Marine Ecology Progress Series*, Rio Grande, v.108, p.59-77, 1994.

HAZIN, F. H.; ZAGAGLIA, J. R.; BROADHURST, M. K.; TRAVASSOS, P. E. P.; BEZERRA, T. R. Q. **Review of a small-scale pelagic longline fishery off northeastern Brazil.** *Marine Fisheries Review*, 60(3), pp.1-8, 1998.

IWAMOTO, T.; ARAI, T. A. **New Grenadier *Malacocephalus okamura* (Pisces: Gadiformes: Macrouridae) from the Western Atlantic**. Copeia. 1987. 204. 10.2307/1446054.

KOSLOW, J. A. **Community structure in North Atlantic deep-sea fishes**. Progress in Oceanography, v.31, n.3, p.321-338, 1993.

KOSLOW, J.A.; BOEFLERT, G.W.; GORDON, J.D.; HAEDRICH, R.L.; LORANCE, P. & PARIN, K.A. **Continental slope and deep-sea fisheries: implications for a fragile ecosystem**. J. Mar. Sci. 57: 548 – 557. 2000.

KOSLOW, T. **The Silent Deep: The Discovery, Ecology, and Conservation of the Deep Sea**. Chicago: The University of Chicago Press, 270 p, 2007.

LINS OLIVEIRA, J. E.; NÓBREGA, M. F.; GARCIA-JÚNIOR, et al. **Biodiversidade Marinha da Bacia Potiguar-RN: Peixes do Talude Continental**. Rio de Janeiro: Museu Nacional. 2015.

LOPES, M. M. **The Challenger Deep–Sea Expedition (1872-1876) in Brazil: the circulation of news and knowledge**. In: ABDON M.; AMILHAT A.; BADCOCK S.; BEAUREPAIRE P.; BERTRAND G.; BLAIS H.; BOUTIER J.; BRIZAY F.; BUCCARO A.; BURKARDT A.; FEDELE M.; FIORELLI V.; INFELISE M.; ISABELLA M.; MANTELLI B.; MASCILLI L.; MILANI G.; MINUTI R.; PEROCCO D.; RAINA D.; SABBA F.; SACAREAU I.; SCILLITANI L.; TAMISARI F.; TYLUSIŃSKA-KOWALSKA A.; VENAYRE S.; VIAL E. The scientific dialogue linking America, Asia and Europe between the 12<sup>th</sup> and the 20<sup>th</sup> Century: Theories and techniques travelling in space and time. Fabio D'Angelo Naples, Associazione culturale Viaggiatori, Ebook/Collection Curatele, 2018. ISBN 9788894361209 doi.org/10.26337/2532-7623/LOPES Pgs 118 – 132.

MASSUTÍ, E.; GORDON, J. D.; MORATA, J.; SWAN, S. C.; STEFANESCU, C.; MERRETT, N. R. **Mediterranean and Atlantic deep-sea fish assemblages: differences in biomass composition and size-related structure**. Scientia Marina. 68(S3):101-15, 2004.

MENDES C. L. T.; SOARES-GOMES A. **Circulação nos Oceanos: Correntes oceânicas e massas d'água**. Monografia. Universidade Federal Fluminense. 26p, 2007.

MERRETT, N. R.; HAEDRICH, R. L. **Deep-sea demersal fish and fisheries**. 1. ed. London: Chapman & Hall. 282p, 1997.

MORATO, T.; WATSON, R. PITCHER, T.J. & PAULY, D. **Fishing down the deep**. Fish. Fish. 7: 24 – 34. 2006.

MUNRO, J.L. **Assessment of exploited stocks of tropical fishes: an overview**. In: Christensen V, Maclean J (eds). Ecosystem approaches to fisheries. Cambridge, 145 – 1170. 2011.

MUSICK, J. A.; COTTON, C. F. **Bathymetric limits of chondrichthyans in the deepsea: A re-evaluation**. Deep-sea Research II. 2014. <http://dx.doi.org/10.1016/j.dsr2.2014.10.010>

NETO, B. M.; COMBI, T.; TANIGUCHI, S.; ALBERGARIA-BARBOSA, A. C.; RAMOS, R. B.; FIGUEIRA, R. C.; MONTONE, R. C. **Persistent organic pollutants (POPs) and personal care products (PCPs) in the surface sediments of a large tropical bay (Todos os Santos Bay, Brazil)**. Marine Pollution Bulletin. 161:111818, 2020.

NETO, J. A. B.; SILVA, C. G. **Morfológica dos oceanos**, in: NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. (orgs.). Introdução à Geologia Marinha. Ed. Interciência, Rio de Janeiro, pp. 31-52. 2004.

NETO, J. A. B.; PONZI, V. R. A.; SICHEL, S. E. **Introdução à Geologia Marinha**. 1. ed. Rio de Janeiro: Editora Interciência. 279 p, 2004.

NÓBREGA, M. F.; LESSA, R.; SANTANA, F. **Peixes Marinhos da Região Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro (Programa REVIZEE- Score Nordeste) 208p, 2009. ISBN 978-85-99121-15-3

PALMA, J. J. C. **Fisiografia da área oceânica**. In: SCHOBENHAUS, Carlos et al. (Coords.). Geologia do Brasil. Brasília: Departamento Nacional da Produção Mineral, p. 429-441, 1984.

PARAMO, J.; WOLFF, M.; SAINT-PAUL, U. **Deep-sea fish assemblages in the Colombian Caribbean Sea**. Fisheries Research, v.125-126, p.87-98, 2012.

PAULY, D.; ALDER, J.; BENNET, E.; CHRISTENSEN, V.; TYEDMERS, P. & WATSON, R. **The future for fisheries**. Science. 21: 1359 – 1361. 2003.

PEREZ, J.A.A.; PEZZUTO, P.R.; WAHRLICH, R. & SOARES, A.L.S. **Deep-water fisheries in Brazil: history, status and perspectives**. Lat. Am. J. Aquat. Res. 37 (3): 513-541. 2009.

PETROBRAS. **Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis – ANP**. 2020. <https://petrobras.com.br/pt/nossas-atividades/principais-operacoes/bacias/> Site acessado em 25 de setembro de 2020.

PIRES, A. M.; CARVALHO-FILHO, A.; FERREIRA, R. C.; VIANA, D.; NUNES, D.; HAZIN, F. H. **Review of the Brazilian species of *Physiculus* (Gadiformes: Moridae), with description of a new species from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, equatorial Atlantic.** *Zootaxa*, 4671(1), 67-80, 2019.

PIVETTA, M. **Os limites do mar.** Ed. 833. 2003. <https://revistapesquisa.fapesp.br/os-limites-do-mar/>

POWELL, S. M.; HAEDRICH, R. L.; MCEACHRAN, J. D. **The deep demersal fish fauna of the Northern Gulf of Mexico.** *Journal of Northwest Atlantic Fisheries Science*, v.31, p.19-33, 2003.

PRIEDE, I. G.; FROESE, R. **Colonization of the deep sea by fishes.** *Journal of Fish Biology*, 83, 1528–1550, 2013. doi:10.1111/jfb.12265, available online at [wileyonlinelibrary.com](http://wileyonlinelibrary.com)

PRIEDE, I. G.; FROESE, R.; BAILY, D. M.; BERGSTAD, O. A.; COLLINS, M. A.; DYB, J. E.; HENRIQUES, C.; JONES, E. G.; KING, N.; **The absence of sharks from abyssal regions of the world's oceans.** *Proc. R. Soc. (Biol. Sci.)* 273 (1592), 1435–1441, 2006.

PRIEDE, I.G. **Deep-sea Fishes: Biology, Diversity, Ecology and Fisheries.** 2017

RAMIREZ-LLODRA, E.; BRANDT, A.; DANOVARO, R.; DE MOL, B.; ESCOBAR, E.; GERMAN, C.R.; LEVIN, L.A.; MARTINEZ ARBIZU, P.; MENOT, L.; BUHL-MORTENSEN, P.; NARAYANASWAMY, B.E.; SMITH, C.R.; TITTENSOR, D.P.; TYLER, P.A.; VANREUSEL, A. & VECCHIONE, M. **Deep, diverse and definitely different: unique attributes of the world's largest ecosystem.** *Biogeosciences*, 7: 2851-2899. 2010.

# GESTÃO DE ÁREAS COSTEIRAS E MARINHAS PROTEGIDAS NO NORDESTE DO BRASIL

12

Ilka Branco NUNES<sup>1</sup>  
Natalia Alves BEZERRA<sup>1</sup>  
Carolina Neves SOUZA<sup>2</sup>  
Diogo Martins NUNES<sup>3</sup>  
Fábio Hissa Vieira HAZIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

<sup>2</sup> Universidade Federal de Alagoas - UFAL

<sup>3</sup> Unidade Acadêmica de Serra Talhada - UAST/UFRPE



## 1. CARACTERIZAÇÃO E CONSERVAÇÃO DOS ECOSISTEMAS COSTEIROS E MARINHOS

Em razão das mudanças globais que comprometeram as relações humanas com o meio ambiente, impactos ambientais e conflitos socioambientais passaram a ocorrer de forma mais intensa a partir do início do século XX. Fundamentados em uma política de desenvolvimento econômico que negligenciava grandemente a proteção dos ambientes naturais, que prevaleceu até meados do século passado, foi somente do final da década de 1950 em diante, em um cenário pós segunda guerra mundial, que a sociedade civil e governos passaram a discutir e aprimorar os instrumentos e ferramentas para buscar uma relação mais harmoniosa entre os seres humanos e os ecossistemas terrestres.

Nesse sentido, as primeiras tentativas mundiais de regular o uso dos espaços costeiros e marinhos foram elaboradas a partir de duas Convenções realizadas pela Organização das Nações Unidas (ONU) em 1958 e 1960, que culminaram na Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos do Mar (CONVEMAR), aprovada em Montego

Bay, na Jamaica, em 10 de dezembro de 1982. A CONVEMAR define não apenas a delimitação dos espaços marítimos, mas principalmente declara que o mar e todo seu leito submarino, além dos limites das jurisdições nacionais, são um patrimônio de toda a humanidade e que a sua exploração, portanto, deve ser realizada visando o bem comum.

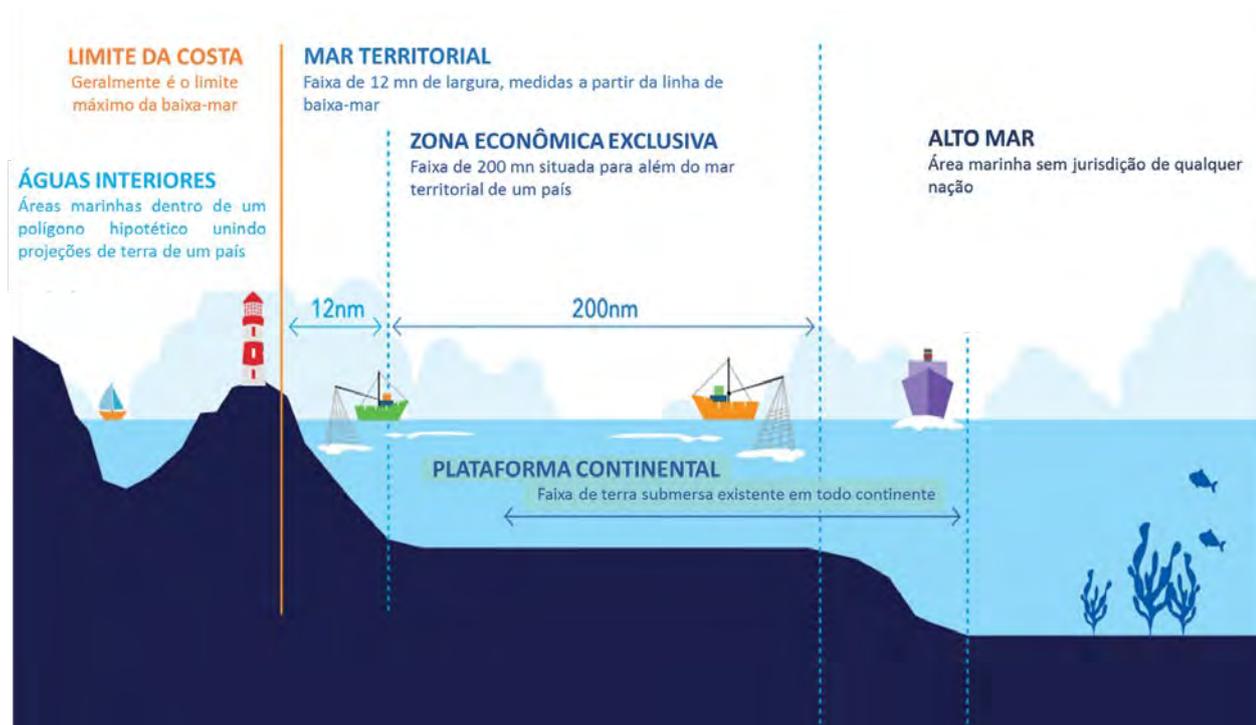
Apesar da CONVEMAR ter entrado em vigor somente em novembro de 1994, desde a década de 1970 já havia um decreto legislativo sobre a delimitação dos espaços marítimos nacionais, estabelecendo 200 milhas de mar territorial. A partir da internalização pelo país, através do decreto nº 1.530 de 22 de junho, de 1995 da CONVEMAR, o mar territorial foi restrito a 12 milhas, estabelecendo-se, entre 12 e 200 milhas náuticas, a Zona Econômica Exclusiva (ZEE), entre outros espaços, como zona contígua, plataforma continental e alto-mar (Fig. 12.1). Na convenção, constam 320 artigos que versam sobre a salvaguarda da vida no mar, proteção do ambiente marinho, pesquisa científica, cooperação internacional, etc.

A linha de costa do Brasil apresenta uma extensão de 8.500 km, desde o Oiapoque, no Amapá, até o Chuí, no Rio Grande do Sul. Geograficamente, a Zona Costeira se estende até o limite do mar territorial (12 milhas náuticas) e contém uma elevada diversidade de ambientes de importância fundamental para o equilíbrio da biodiversidade, a exemplo dos manguezais e estuários, restingas, marismas, dunas, costões rochosos, lagoas e recifes costeiros e profundos. A despeito da sua imensurável diversidade biológica e da consequente importância dos seus ecossistemas, a zona costeira do Brasil, desde o norte equatorial até o sul temperado, é uma das dimensões biogeográficas mais impactadas no País, em razão da elevada densidade de ocupação humana, abrigando a vasta maioria das grandes cidades brasileiras (Ribeiro et al., 2019).

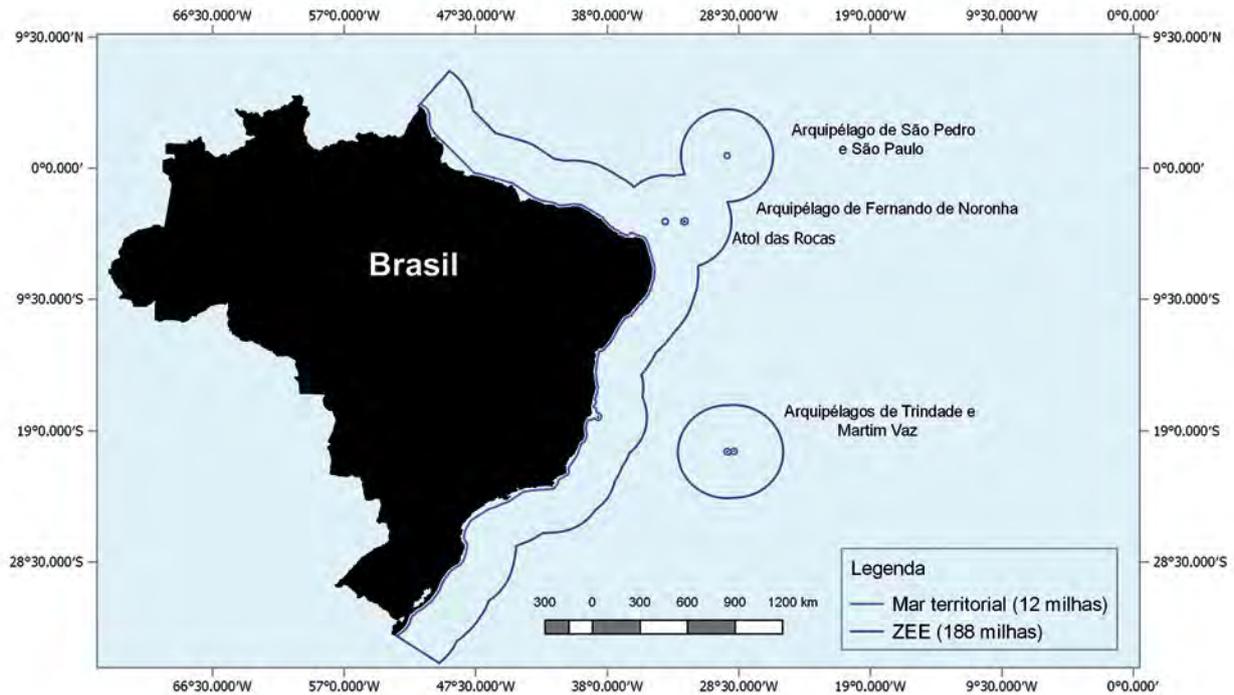
A Zona Econômica Exclusiva (ZEE), se estende do mar territorial (12 milhas) até as 200 milhas náuticas (mn), não apenas a partir do continente,

mas também no entorno das ilhas oceânicas. A plataforma continental, porém, pode se estender para além da ZEE, dependendo de suas características geológicas. Nesse sentido, o Brasil pleiteou um acréscimo de 900 mil km<sup>2</sup> de extensão de nossa plataforma continental, além da área total da nossa Zona Econômica Exclusiva, o que totalizaria uma extensão próxima de 4,5 milhões de km<sup>2</sup>, denominada pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) de Amazônia Azul (Fig. 12.2).

A CONVEMAR consagrou vários direitos dos países costeiros em relação ao uso sustentável dos recursos vivos e não vivos presentes na sua plataforma continental, no seu mar territorial e na sua zona econômica exclusiva, da mesma forma que definiu, também, uma série de deveres, entre os quais a obrigação de conservar os recursos marinhos vivos e a biodiversidade e de gerar conhecimento sobre esses ecossistemas. Essa obrigação foi reforçada pelo avanço nos fóruns



**Figura 12.1** Delimitação das Zonas marítimas definidas pela Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos do Mar (CONVEMAR). Adaptado European Commission (2015).



**Figura 12.2** Detalhamento do espaço marítimo do Brasil, com ênfase no Mar Territorial e na Zona Econômica Exclusiva (ZEE).

internacionais dos debates relativos à necessidade de assegurar a conservação da biodiversidade, em particular a partir da Convenção sobre a Diversidade Biológica das Nações Unidas (CBD), assinada no Rio de Janeiro, em 1992.

No Brasil, embora os debates sobre os conceitos de preservação e conservação do meio ambiente tenham se iniciado há quase um século, houve um significativo progresso acerca do tema após 1934, quando foi realizada a I Conferência Brasileira para a Proteção da Natureza, na cidade do Rio de Janeiro (Menarin, 2010). Nesse evento, a criação de reservas naturais foi alvo de discussões, tendo em vista o êxito de experiências mundiais, a exemplo da iniciativa pioneira dos Estados Unidos na criação do parque nacional de Yellowstone, em 1872. Seguindo os avanços mundiais no estabelecimento de políticas públicas relacionadas ao meio ambiente, no ano de 1967 foi criado o Instituto Brasileiro para o Desenvolvimento Florestal (IBDF), por meio do Decreto-lei de nº 289, ao qual, entre outras

atribuições, cabia conservar os recursos naturais. Um pouco mais de duas décadas depois da criação do IBDF, através da lei nº 7.735 de 22 de fevereiro de 1989, que unificou diversos órgãos ambientais, foi criado o Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis (IBAMA), que tinha como finalidade “formular, coordenar, executar e fazer executar a política nacional do meio ambiente e da preservação, conservação e uso racional, fiscalização, controle e fomento dos recursos naturais renováveis” (Sátyro, 2008).

Prosseguindo com os avanços relacionados ao desenvolvimento de políticas do meio ambiente, ao longo de vários anos de intensas discussões sobre a sistematização das áreas protegidas marinhas e terrestres, em julho de 2000, foi promulgada a Lei Federal nº 9.985 que instituiu o Sistema Nacional de Unidades de Conservação (SNUC), no qual vigoram 12 categorias de manejo ecológico e ambiental distribuídas em dois grandes grupos, a saber: Unidades de Proteção Integral e Unidades de Uso

Sustentável, com objetivos específicos e normas a serem seguidas na criação e gestão das Unidades de Conservação (UCs).

Avançando na gestão dessas áreas, um Plano Nacional de Áreas Protegidas (PNAP) foi instituído pelo Decreto nº 5.758 de 13 de abril de 2006, como resultado dos compromissos internacionais assumidos pelo país após a Sétima Conferência das Partes (COP) da CDB, realizada em 2004, em Kuala Lumpur, na Malásia. Já em 2010, durante a COP-10 foi adotado um Plano Estratégico para Biodiversidade, a ser desenvolvido entre os anos de 2010 e 2020, contemplando um conjunto de 20 metas, denominadas de Metas de Aichi para Biodiversidade, a serem alcançadas nesse período. Após aprovação dessas metas cada País ficou responsável por definir suas necessidades e prioridades nacionais para contribuir com as metas globais.

Na expectativa de se elaborar uma estratégia integrada de monitoramento da biodiversidade marinha, o Ministério do Meio Ambiente, juntamente com o Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade- ICMBio, criado pela lei nº 11.516, de 28 de agosto de 2007, implementou o Projeto Áreas Marinhas e Costeiras Protegidas- GEF Mar, pela Portaria do MMA nº349/2014, tendo como principal objetivo promover a conservação da biodiversidade marinha e costeira, por meio da ampliação das áreas marinhas protegidas. O GEF Mar prevê ainda um esforço de pesquisa relacionado ao monitoramento de espécies ameaçadas e ao uso sustentável dos recursos naturais (Ribeiro et al., 2019).

Diante do exposto, o presente capítulo tem como objetivo ressaltar os principais aspectos históricos, relacionados ao desenvolvimento de políticas públicas ambientais no Brasil, que culminaram no desenvolvimento das unidades de conservação costeiras e marinhas, através da criação do SNUC, e como a criação de Áreas de Preservação Ambiental (APA) pode ser uma importante ferramenta na gestão

e manejo dos recursos naturais desses ecossistemas. Nesse sentido, serão abordadas as complexidades intrínsecas que permeiam uma APA costeira (Costa dos Corais) e uma APA oceânica (Fernando de Noronha- Rocas- São Pedro e São Paulo), além de ressaltar a importância do desenvolvimento de pesquisas científicas em ambas as unidades.

## 2. ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL COSTA DOS CORAIS (APACC)

Criada em 1997, para conservar o exuberante trecho da costa e do mar entre os litorais norte dos estados de Alagoas e o sul de Pernambuco, a APA Costa dos Corais é constituída por cerca de 135 km de linha de costa, avançando no mar por 18 mn. Sob gestão do ICMBio, compreende uma área total de 413.563 hectares de área marinha protegida, contemplando todos os ecossistemas marinhos: manguezais, praias, recifes, prados de fanerógamas e plataforma continental.

Seu território está situado exclusivamente em áreas sob o domínio da União e Áreas de Preservação Permanente- APP (Lei nº 12.651/2012), representada pelos manguezais. Fazendo parte da APA Costa dos Corais, destaca-se o estuário do Rio Tatuamunha, inserido no município de Porto de Pedras, Alagoas. Suas margens são colonizadas por manguezais, com quatro espécies de vegetais consideradas típicas da região: *Rhizophora mangle* (mangue-vermelho); *Laguncularia racemosa* (mangue-branco), *Avicennia germinans* e *Avicennia schaueriana* (mangue de siriúba), além de uma vegetação característica das restingas observadas no Nordeste do Brasil (Paiva, 2018). O estuário do Rio Tatuamunha (Fig. 12.3), inserido no interior da APA Costa dos Corais, apresenta elevada produtividade, biodiversidade e abundância de recursos naturais, características intrínsecas ao ecossistema manguezal, além de servir de refúgio para espécies ameaçadas, como o peixe-boi marinho, *Trichechus manatus*.



**Figura 12.3** Foz do Rio Tatuamunha. Porto de Pedras, Alagoas. **Foto** Rafael Lustosa.

Além do ecossistema manguezal, abundante na região, a presença de uma longa linha costeira de ambientes recifais caracteriza a APA Costa dos Corais, sendo esta particularidade certamente uma das principais motivações para a criação da referida UC, tendo em vista a sua elevada biodiversidade e, ao mesmo tempo, o alto risco ao qual essa biodiversidade se encontra sujeita, resultante dos vários impactos antrópicos, em razão da forte presença humana ao longo de todo o litoral. Por se tratar de uma UC de uso sustentável, onde é permitida a exploração sustentável dos recursos naturais, a APA Costa dos Corais é marcada por intensa utilização dos seus recursos, a exemplo da pesca artesanal, que extrai produtos pesqueiros dos ecossistemas marinho e do manguezal, e de atividades turísticas amplamente realizadas, especialmente durante o verão, relacionadas à vasta área de ambientes recifais encontrados nessa UC.

Considerando a extensão da APA Costa dos Corais e as dificuldades inerentes à gestão das UCs de uso sustentável em áreas litorâneas do Nordeste, é possível consorciar a conservação dos ecossistemas e biodiversidade associada com a geração de renda, propiciando uma efetiva melhoria na qualidade de vida das populações locais. Alguns objetivos foram considerados, na expectativa de melhor gerir a unidade, entre os quais podem ser destacados:

- > Conservar os recifes de corais e arenito, com sua fauna e flora;
- > Preservar o habitat e a população do peixe-boi-marinho (*Trichechus manatus*);
- > Proteger os manguezais em toda a sua extensão, com sua fauna e flora;
- > Ordenar o turismo, a pesca e demais atividades compatíveis com a conservação;

- > Incentivar as manifestações culturais e contribuir para o resgate da diversidade cultural regional.

Para a consecução desses objetivos e gestão efetiva da APA Costa dos Corais, algumas ferramentas foram desenvolvidas no intuito de regulamentar, organizar e fiscalizar as atividades realizadas no interior da unidade. A exemplo do Plano de Manejo da APACC, a criação de um Conselho Gestor, bem como o desenvolvimento de diversas pesquisas científicas apoiadas em especial pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), a partir do Departamento de Oceanografia, pelo Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade Marinha do Nordeste (CEPENE) e pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), entre outros colaboradores como o Instituto Recifes Costeiros (IRCOS).

## 2.1. Instrumentos de gestão

### 2.1.1. Conselho gestor da APA Costa dos Corais

No intuito de auxiliar a gestão dessa unidade de conservação e a criação e implementação de um Plano de Manejo, um Conselho Gestor da APA Costa dos Corais (CONAPACC) foi criado, em 2011, pela Portaria ICMBio nº 62. De maneira geral, o CONAPACC é um instrumento que garante a participação social na gestão da UC, além de ter a importante função de, a cada reunião, aconselhar a gestão da UC no desenvolvimento de estratégias que assegurem a conservação ambiental sem prejudicar a qualidade de vida das populações locais.

Desde o ano de sua criação, o Conselho Gestor passou por duas renovações, nos anos de 2014 e 2016. Atualmente conta com a participação de 47 instituições e 80 conselheiros, representando uma ampla gama de setores da região, como entidades públicas, pesquisas científicas, pesca, turismo, organizações não governamentais educativas, organizações comunitárias, agricultura,

além da indústria e comércio. Segundo o Art. 4º do Regimento do CONAPACC/ ICMBio, aprovado em julho de 2020, é objetivo e competência do Conselho Gestor:

“Promover a gestão participativa e integrada do território da APACC, por meio de ações que assegurem a proteção da diversidade biológica e cultural, a sustentabilidade dos usos dos recursos naturais, além do gerenciamento participativo e integrado com as políticas nacional, estaduais e municipais, no que diz respeito à sua área de atuação, em consonância com o plano de manejo e demais instrumentos de gestão”.

### 2.1.2. Plano de Manejo e Zoneamento

Um segundo instrumento de gestão da APA Costa dos Corais, criado em 2013 (Portaria ICMBio nº 144), é o Plano de Manejo da APA Costa dos Corais. Em linhas gerais, o Plano de Manejo de uma UC é a ferramenta através da qual é possível zonedar a unidade, estabelecendo normas, restrições de uso e ações a serem desenvolvidas para o manejo sustentável dos recursos naturais. O Plano de Manejo da APACC foi desenvolvido a partir de reuniões internas de preparação com integrantes do ICMBio e do IBAMA, reuniões técnicas com a comunidade científica envolvida com o tema, além de seis audiências públicas ao longo de toda a costa norte de Alagoas e sul de Pernambuco (ICMBio, 2013). Essa ferramenta de gestão também define os objetivos da APACC e o seu zoneamento marinho.

Visando a consolidação dos objetivos da APA Costa dos Corais e seguindo as recomendações da lei do SNUC, a gestão da unidade dedicou-se em conjunto com outras instituições à definição do zoneamento, de uso direto e indireto, tendo como principal objetivo a organização de “zonas” no interior da UC, sendo sete ao todo, para a prática de atividades de pesca, turismo, visitação, pesquisa, preservação, entre outros (Tab. 12.1).

### 2.1.3. Projetos de pesquisa inspiradores desenvolvidos na APA Costa dos Corais

Considerando que as unidades de conservação não devem ser geridas sem considerar a participação social e que a sustentabilidade e conservação dos recursos naturais destas áreas dependem da forma como são utilizados, a sua governança requer arranjos funcionais formais e/ou até mesmo informais que permitam que a comunidade aborde

os problemas encontrados na gestão (Souza, 2017). Desta maneira, existem diversos projetos de parcerias público-privadas que vêm sendo executados na APA Costa dos Corais, e aqui serão destacados, ampliando assim o conhecimento e a comunicação entre o poder público e a sociedade, a conservação dos recursos naturais e melhorando a qualidade de vida dos moradores da região.

**Tabela 12.1** Zonas que compõem o zoneamento da APA Costa dos Corais, com suas respectivas definições, objetivos e delimitações.

**Fonte** Plano de Manejo APA Costa dos Corais (2013).

Zoneamento	Definição	Objetivos principais	Delimitação
Zona de uso sustentável	Áreas destinadas ao uso geral, todavia sujeitas às normas gerais da unidade.	Compatibilizar o uso dos recursos com sua sustentabilidade, aumentando a produção de renda local.	Toda a área da APACC, exceto as demais zonas.
Zona de praia	Da linha de preamar média até a linha de baixa mar média.	Conservar o ambiente natural de praia; Garantir o pleno e natural fluxo das marés e da deposição de sedimentos; Proteger habitat e fauna local; Proteger o ambiente de desova dos quelônios; Proteção de aves migratórias; Minimizar a poluição.	Se inicia na foz do Rio Meirin (Maceió-AL), seguindo pela linha de praia até a Rio Formoso, na praia dos Carneiros (Tamandaré-PE).
Zonas de conservação da vida marinha	Áreas destinadas ao manejo específico de espécies e/ou habitats dentro dos ecossistemas da UC.	Proteger os habitats essenciais para sobrevivência de espécies ameaçadas e aquelas importantes para garantir a segurança alimentar.	As zonas a serem criadas terão seus limites estabelecidos a partir de documentos legais.
Zona de Conservação da Vida Marinha (ZCVM) do peixe-boi		Proteger os sítios de fidelidade de espécies ameaçadas, como o peixe-boi; Compatibilizar o uso dos recursos com a Sustentabilidade ambiental da UC; Permitir o desenvolvimento de alternativa de renda para a população; Aumentar a produção pesqueira local.	Totalizando um perímetro aproximado de 82,2 km e uma área aproximada de 4.561,9 hectares, a ZCVM do peixe boi passa pela foz direita do rio Riacho, na praia do Riacho, município de São Miguel dos Milagres; ao Pontal do Boqueirão em Japaratinga, incluindo os manguezais em toda a sua extensão (acompanhando os limites da APACC).

Zoneamento	Definição	Objetivos principais	Delimitação
Zona exclusiva de pesca	Áreas destinadas ao uso dos recursos pesqueiros por pescadores profissionais.	Garantir a sustentabilidade do uso dos recursos pesqueiros. Contribuir para a sustentabilidade econômica de diferentes grupos do setor pesqueiro.	Suas características, objetivos específicos, localização e regras de uso serão definidas através de consulta pública e estudos técnicos.
Zona de visitação	Áreas destinadas ao uso turístico empresarial ou de base comunitária, conforme a vocação local, e de conservação de habitat.	Preservar as características naturais do ambiente marinho de recife de coral, onde estão inseridas as piscinas naturais; Preservar as espécies da fauna e flora marinha associadas ao ambiente; Recuperar as áreas recifais degradadas; Ordenar o uso da área pública onde estão inseridas as piscinas naturais; e Possibilitar o desenvolvimento de pesquisa científica e programas de educação ambiental.	A delimitação de novas zonas se dará através de levantamentos técnicos e processos participativos com as comunidades locais.
Zona de preservação da vida marinha	Áreas de proteção, onde não é permitida nenhuma atividade antrópica, exceto pesquisa autorizada. Nessa área o ambiente permanece o mais preservado possível, representando o mais alto grau de preservação da UC. Tem importante papel como matriz de repovoamento de diversas espécies da fauna e flora marinha estuarina.	Preservar e garantir a evolução natural dos ambientes da UC; proteger a biodiversidade. Recuperar e renovar os estoques pesqueiros; Aumentar a produção pesqueira nas áreas adjacentes (exportação de biomassa); Facilitar as atividades de pesquisa científica e monitoramento ambiental (Área Controle).	Passa pelos municípios de Tamandaré; São José da Coroa Grande e Maragogi, no recife conhecido como “Pedra do Meio”, entre as piscinas de Taocas e Galés.
Zona de transição	Área destinada a ser “tampão” da Zona de Preservação da Vida Marinha (ZPVM).	Minimizar os impactos negativos nas ZPVM; Facilitar as ações de fiscalização das ZPVM; Não sendo permitida a pesca com redes e pesca de mergulho subaquático.	Cem (100) metros ao redor das ZPVM.

### 2.1.3.1. Projeto Peixe-boi

Globalmente, os peixes-boi marinhos, *Trichechus manatus*, são classificados como “vulneráveis”, segundo a Lista Vermelha de Espécies Ameaçadas da União Internacional para Conservação da

Natureza (IUCN, 2020). A despeito da espécie ser considerada extremamente dócil e de no passado apresentar, na costa do Brasil, ampla distribuição geográfica, a captura excessiva, juntamente com a degradação dos habitats essenciais e características biológicas específicas da espécie,

como a baixa fecundidade e maturação tardia, promoveram um forte declínio populacional em diversas localidades do país (Normande, 2014). Considerada extinta nos estados do Espírito Santo, Bahia e Sergipe, atualmente a espécie apresenta populações extremamente reduzidas, além de baixa variabilidade genética (Luna et al., 2012). Tais características enquadraram a espécie, no Brasil, como “Em Perigo (EN)”, pelo Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção (ICMBio, 2018), apesar de ser protegida pela legislação brasileira desde a década de 1960 (Lei de Proteção à Fauna Nº 5.197) (Luna et al., 2010).

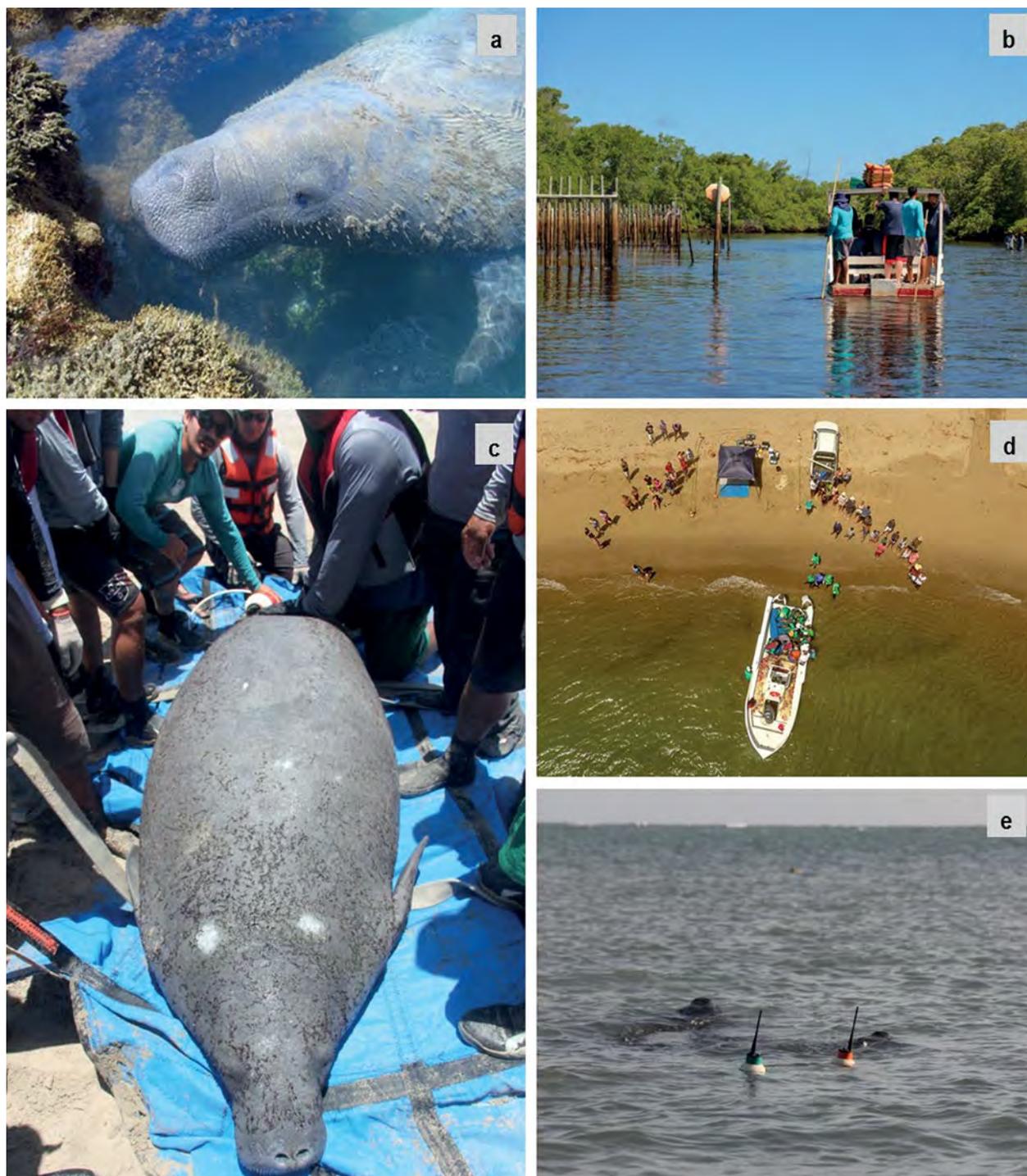
No litoral do Nordeste, a perda dos habitats naturais, utilizados pelo peixe-boi marinho, provocada pela ocupação desordenada, poluição ambiental, pesca e atividade turística tem colocado a espécie em risco, incentivando esforços de pesquisa, por diversos centros e instituições, objetivando se obter um melhor entendimento da biologia e ecologia da espécie e, conseqüentemente, reduzir o seu risco de extinção. Entre as ações existentes, destaca-se o Plano de Ação Nacional (PAN) para a Conservação dos Sirênios (2011) e, mais recentemente, ainda em preparação, um Plano de Ação Nacional para Conservação do Peixe-boi Marinho, coordenado pelo ICMBio (2018).

O Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Mamíferos Aquáticos (CMA/ ICMBio), através do Programa de Reintrodução de Peixe-boi Marinho no Brasil, desde 1994, realiza a soltura de espécimes na costa do Nordeste, especificamente na APA Costa dos Corais e na APA da Barra do Rio Mamanguape, localizada no estado da Paraíba. A APA Costa dos Corais possui ambientes favoráveis para a sua conservação, como rios e estuários, pradarias de capim-agulha e recifes que fornecem alimento e abrigo para este gigante gentil. O resgate de filhotes órfãos, sua reabilitação em cativeiro e posterior devolução para a natureza são as principais ações do Projeto Peixe-boi, que iniciou suas atividades em Alagoas no início da

década de 1990, com a reintrodução dos peixes-boi Astro e Lua. Desde então, outros 45 peixes-boi já retornaram para a natureza em um dos maiores esforços de longo prazo para conservação da fauna brasileira.

Entre as diversas atividades do Projeto Peixe-boi, a reintrodução da espécie, através do Programa de Soltura, que visa conectar as populações isoladas, é certamente uma das mais importantes. Antes da sua liberação no ambiente natural, os espécimes são marcados com radiotransmissores, de forma a permitir o seu monitoramento, identificação da movimentação horizontal e uso do habitat, bem como o acompanhamento de sua adaptação ao ambiente (Fig. 12.4). O monitoramento é realizado com diferentes transmissores, do tipo VHF, e via satélite, através do sistema ARGOS, o qual permite a localização (GPS) dos animais marcados e o rastreamento da movimentação realizada pelos mesmos (Normande, 2014). Os resultados gerados a partir do uso desses transmissores auxiliam o entendimento do comportamento natural do *Trichechus manatus*, após diferentes períodos de reabilitação em cativeiro, contribuindo, assim, para a elaboração de possíveis medidas de manejo para conservação da espécie a partir da APA Costa dos Corais.

Considerando-se ainda, o objetivo da APA Costa dos Corais de preservar o habitat e as populações de *Trichechus manatus* e de ordenar as atividades econômicas como o turismo, de forma compatível com a conservação ambiental, um importante trabalho desenvolvido pela comunidade local, a partir da Associação Peixe-boi, é o turismo de base comunitária. A associação realiza atividades de cunho socioambiental no Rio Tatuamunha (AL), a partir da observação do peixe-boi em ambiente natural, garantindo, assim, o sustento de cerca de 50 famílias de ex-pescadores das comunidades do entorno. A atividade não só movimenta a economia local, como possibilita que a comunidade participe diretamente do processo de conservação dos peixes-boi.



**Figura 12.4** **A)** Espécime de peixe-boi-marinho, *T. manatus*, em ambiente natural dos recifes da APA Costa dos Corais. **Foto** Cláudio Sampaio; **B)** Recinto de reabilitação de peixes-boi marinhos, na Base da APA Costa dos Corais/ICMBio, localizada no estuário do Rio Tatuamunha, Porto de Pedras-AL, onde é realizado o manejo dos espécimes que estão em cativeiro. **Foto** Rafael Munhoz; **C)** Procedimentos de coleta de material biológico e implantação de transmissor eletrônico em espécime de peixe-boi marinho nativo, na praia de Paripueira-AL. **Foto** Ana Emília Alencar; **D)** Vista aérea da expedição de pesquisa e monitoramento de peixes-boi nativos, na praia de Porto de Pedras-AL. **Foto** Thiago Hara; **E)** Espécimes de peixe-boi liberados em ambiente natural, após marcação com transmissores eletrônicos, para monitoramento via satélite. **Foto** Ana Emília Alencar.

### 2.1.3.2. Projeto Recifes Costeiros

O Projeto Recifes Costeiros foi criado em 1998, a partir de um esforço conjunto do Departamento de Oceanografia da UFPE, Centro Nacional de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade Marinha do Nordeste (CEPENE) e Banco Internacional de Desenvolvimento (BID), com o objetivo de realizar monitoramento, experimentos e pesquisas de recuperação desses ambientes. Ao longo de seu desenvolvimento o Projeto Recifes Costeiros promoveu a importante recuperação da abundância das espécies de corais da área, através da contenção das infestações de ouriços os quais colocavam em risco o ambiente recifal de Tamandaré, município do extremo norte da APA Costa dos Corais. Em 1999 foi criada a Reserva Marinha de Tamandaré, também conhecida por área fechada ou Zona de Preservação da Vida Marinha (ZPVM), onde a pesca e turismo são proibidos, possibilitando o desenvolvimento de diversos estudos em relação aos processos ecológicos de recuperação dos recifes de coral, de forma pioneira no Atlântico Sul.

Desde sua criação, inúmeros trabalhos científicos realizados pelo Projeto Recifes Costeiros descrevem o processo de recuperação da biodiversidade marinha na região após a proibição da visitação e extração de recursos naturais, além do ordenamento do tráfego de embarcações. Além da recuperação desse ambiente recifal, foi constatado a exportação de espécies para as áreas adjacentes à ZPVM proporcionando o aumento da pesca artesanal no seu entorno, a exemplo da pesca de polvo, e, em especial, a conservação do peixe mero (*Epinephelus itajara*), espécie ameaçada de extinção, demonstrando o sucesso no fechamento de uma área para recuperação e conservação marinha, bem como a importância da realização de monitoramentos a longo prazo.

A eficiência do experimento tornou o projeto modelo para a replicação nas áreas ao norte de Pernambuco, como exemplo da APA Marinha Recifes de Serrambi e outras áreas ao sul da APA

Costa dos Corais, no estado de Alagoas. Atualmente o monitoramento acontece através do apoio da Fundação SOS Mata Atlântica no âmbito do Projeto Toyota APA Costa dos Corais, além de parcerias do Programa *Reef Check*, Projeto Ecológico de Longa Duração (PELD) e outras pesquisas coordenadas pelo Departamento de Oceanografia da UFPE.

### 2.1.3.3. Projeto Maravilhosos Manguezais do Brasil

O Projeto Maravilhosos Manguezais do Brasil é um projeto de educação ambiental formal que acontece em redes municipais de ensino. Na APA Costa dos Corais, o projeto é norteador pelo “Guia Didático-Os Maravilhosos Manguezais do Brasil”, que está sendo difundido no Brasil pelo Instituto Bioma Brasil (IBB). Trata-se de importante ferramenta didática para uma cidadania ativa. Com 273 páginas e 42 atividades de fácil desenvolvimento e baixíssimo custo, apresenta questões teóricas e práticas, de maneira contextualizada, na expectativa de promover a conscientização ambiental nas escolas, no que diz respeito à necessidade da preservação dos manguezais (ICMBio, 2020).

O guia foi originalmente desenvolvido para o Caribe, América Central, já tendo sido testado por mais de sete países. O guia, adaptado para o Brasil, foi testado inicialmente em Cariacica (ES) e avaliado em 2009 pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), incorporando atividades demonstrativas sobre as UCs. Após a passagem em alguns municípios, em 2012 culminou em um programa específico para a APA Costa dos Corais, formando 247 profissionais da educação, de 50 escolas da rede pública, em sua grande maioria do Ensino Fundamental. Os resultados obtidos pelo projeto confirmam que o fortalecimento de agentes multiplicadores, a partir da educação formal, é uma forte estratégia para conservação dos ecossistemas costeiros, com ênfase nos manguezais da APACC (Fig. 12.5).



**Figure 12.5 A)** Manguezal da APA Costa dos Corais. **Foto** Clemente Coelho. **B)** Atividade prática na APA Costa dos Corais no âmbito do Projeto Maravilhosos Manguezais do Brasil. **Foto** Lais Muniz.

### 3. CRIAÇÃO E GESTÃO DAS UCS EM AMBIENTE OCEÂNICO

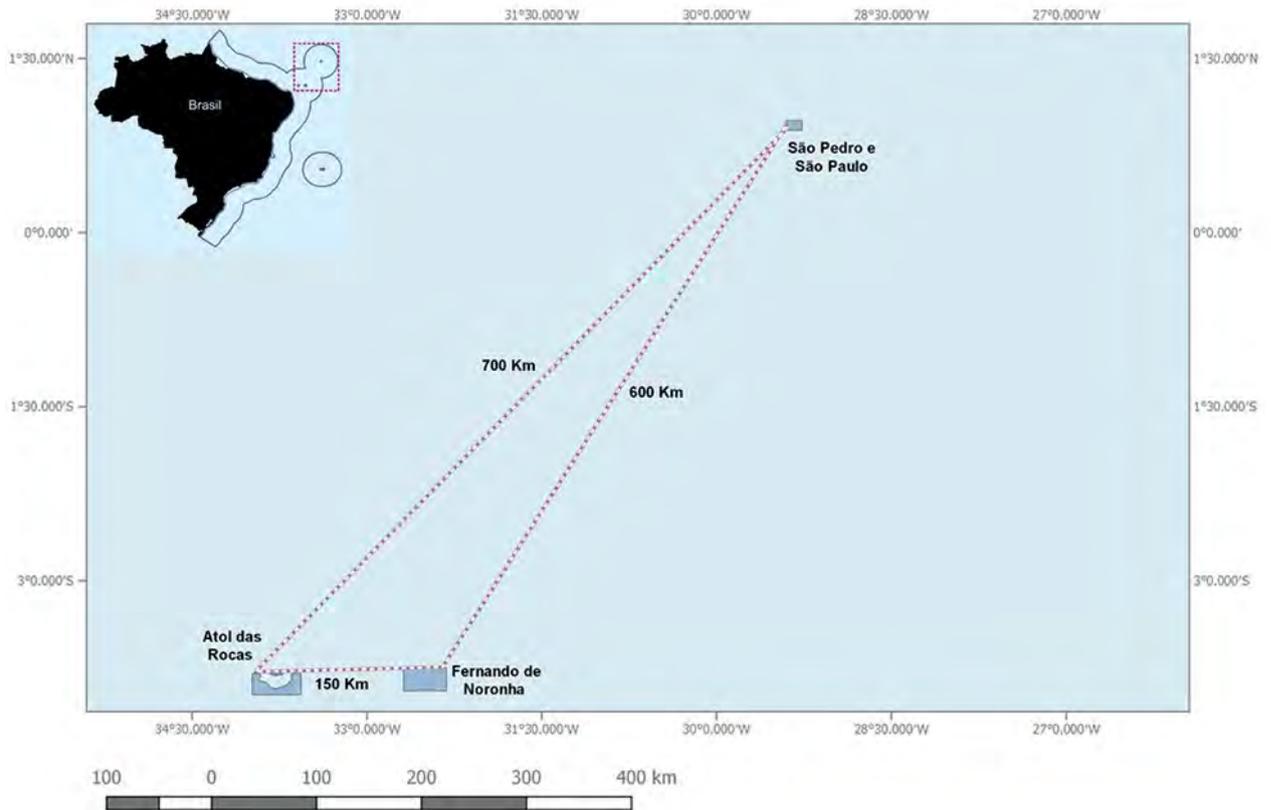
A despeito dos arcabouços legais que respaldam as políticas nacionais para o meio ambiente, a exemplo da lei das UCs, dos Planos de Ação para a Conservação de Espécies, Acordos Internacionais dos quais o país é signatário, entre outros, as deficiências relacionadas à gestão, manejo e fiscalização das UCs são os principais desafios para a consecução dos seus objetivos, desafios que se tornam ainda muito maiores quando se referem às UCs situadas no ambiente oceânico.

Um exemplo são as ilhas oceânicas do Nordeste do Brasil, que passaram a ter políticas específicas para a conservação dos seus ecossistemas altamente produtivos, em termos de biodiversidade e biomassa. Em junho de 1979, através do Decreto de nº 83.549, foi criada a primeira Área Marinha Protegida (AMP) brasileira, a Reserva Biológica (REBIO) Atol das Rocas, no mesmo ano em que o IBDF apresentou o Plano do Sistema de Unidades de Conservação do Brasil, que previa a criação de um conjunto integrado de áreas protegidas no país (IBDF/FBCN, 1979). Embora a REBIO Atol das Rocas tenha sido criada na categoria mais restritiva entre as UCs, apenas a partir de janeiro de 1991, foram

iniciadas as ações efetivas para implantação da REBIO sob a responsabilidade do IBAMA.

Em junho de 1986, sete anos após haver sido constituída a primeira AMP no Brasil, foi criada, por meio do Decreto nº 92.755, a extensa APA Fernando de Noronha - Rocas - ASPSP, abrangendo uma área total de 154.409,03 hectares (Fig. 12.6), cujo ponto mais longínquo da costa brasileira corresponde ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), único território insular brasileiro ao norte da linha do equador.

A criação da APA Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo teve por principais objetivos “proteger e conservar a qualidade ambiental e as condições de vida da fauna e da flora, compatibilizar o turismo organizado com a preservação dos recursos naturais e conciliar, no Território Federal de Fernando de Noronha, a ocupação humana com a proteção ao meio ambiente.” Nesse sentido, o desenvolvimento de pesquisas científicas nesses ecossistemas insulares são consideradas importantes ferramentas para identificação de possíveis problemas ambientais, monitoramento e conservação da biodiversidade.

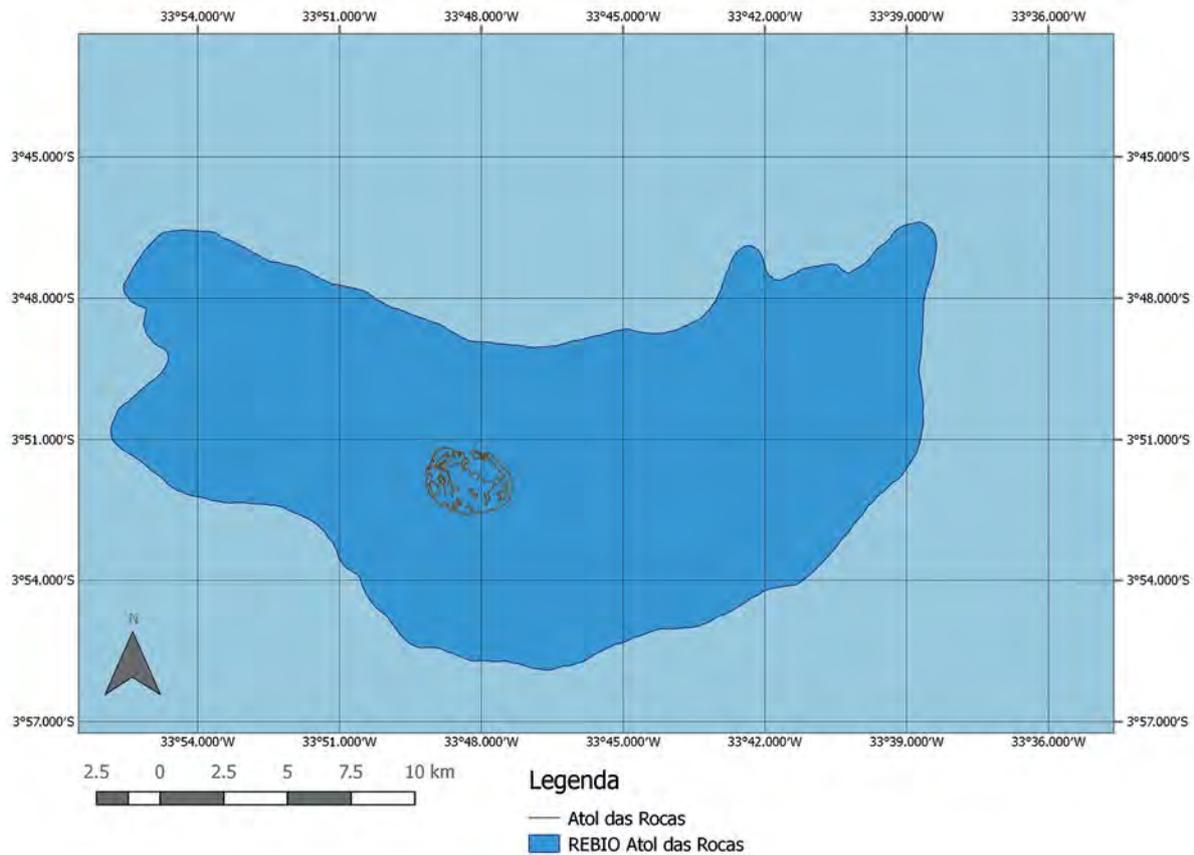


**Figura 12.6** Localização geográfica e detalhamento da APA Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo.

### 3.1. Gestão e atividades científicas no entorno da REBIO Atol das Rocas

A área da REBIO Atol das Rocas possui uma dimensão de 37.820 hectares, delimitada a partir da ilha do Farol até a isóbata de 1.000 m (Fig. 12.7), abrangendo um quadrante cujas coordenadas limitantes estão entre as latitudes de 03°45' a 03°56'S e longitudes de 33°37'W a 33°56'W (Fischer, 2007). Embora tenha sido criada sob a responsabilidade do IBAMA, atualmente a unidade gestora é o ICMBio. Reconhecido como o único atol presente no Oceano Atlântico Sul, a REBIO Atol das Rocas, além de ser a primeira AMP brasileira, onde ocorrem exclusivamente atividades com finalidade científica, é notoriamente um exemplo entre as UCs marinhas do Brasil.

O elevado nível de preservação do Atol das Rocas proporciona oportunidades únicas de pesquisa científica, cujos resultados são importantes não apenas para a REBIO, mas para a gestão de outros ecossistemas oceânicos semelhantes (Gomes, et al., 2001). Contudo, desde sua criação e implementação, são inúmeras as dificuldades enfrentadas pela REBIO, indo desde a pesca ilegal no interior da REBIO, até ao orçamento restrito para manutenção da estação científica e desenvolvimento das pesquisas. Atualmente, porém, a Reserva conta com o forte apoio financeiro da Fundação SOS Mata Atlântica, a qual proporciona os recursos necessários para gestão e manutenção desse importante ecossistema insular.



**Figura 12.7** Localização e delimitações da REBIO Atol das Rocas.

Considerado um santuário ecológico e um berçário natural, o Atol das Rocas é reconhecido por abrigar um grande número de aves marinhas, tanto migratórias como residentes; tartarugas, que utilizam o local para desova (tartaruga-verde, *Chelonia mydas*) e alimentação (tartaruga-de-pente, *Eretmochelys imbricata*); além de diversas espécies de peixes, moluscos e crustáceos, algumas das quais são endêmicas desse ecossistema insular (Kikuchi, 2002). Diversas espécies utilizam o Atol das Rocas como local específico de reprodução de suas populações, sendo, portanto, considerado uma importante área para dispersão da biodiversidade e repovoamento de bancos oceânicos dos estados do Rio Grande Norte, Ceará e Maranhão.

No platô recifal do Atol das Rocas são observadas piscinas naturais, as quais podem ter comunicação ou não com o oceano profundo adjacente. A reduzida

profundidade das piscinas, com médias máximas de três metros, nas marés baixas (Plano de Manejo da REBIO Atol das Rocas, 2007), propicia e facilita o desenvolvimento de pesquisas científicas com variados grupos taxonômicos, mas particularmente com tubarões e raias, considerados mais vulneráveis a qualquer tipo de ação antrópica, em função de suas características biológicas intrínsecas, como crescimento lento e maturação sexual tardia.

Entre as espécies da fauna de elasmobrânquios que são constantemente observadas no interior do Atol e áreas adjacentes, destacam-se o tubarão-limão, *Negaprion brevirostris*, e o tubarão-lixia, *Ginglymostoma cirratum*, além da raia prego, *Hypanus berthallutzae*. Diversas pesquisas científicas, com métodos não letais, foram desenvolvidas com essas espécies (Oliveira, 2001; Castro & Rosa, 2005; Agra, 2009; Branco-Nunes,



**Figura 12.8** Estação científica da REBio Atol das Rocas, com detalhamento da Baía da Lama, local de águas rasas de grande importância para os juvenis de tubarão-limão, *Negaprion brevirostris*. **Foto** Ilka Branco Nunes.

2015). A Baía da Lama (Fig. 12.8), área de baixa profundidade e abrigada, por exemplo, foi identificada como local de berçário para juvenis de tubarão-limão, espécie classificada como “Vulnerável” pelo ICMBio/MMA (2018). O Atol das Rocas abriga ainda uma dezena de espécies ameaçadas, de distintos grupos taxonômicos, ressaltando a importância particular desse ecossistema insular para essas populações.

### 3.1.1. Projeto Raias na REBIO Atol das Rocas

Além de pesquisas científicas voltadas para as espécies que são classificadas em algum tipo de vulnerabilidade, no Atol das Rocas são conduzidas também pesquisas sobre espécies que são comumente capturadas em outros locais da costa brasileira, sobre as quais, porém, ainda se conhece

muito pouco. Nesse contexto, o monitoramento realizado pelo Projeto Raias teve como principal objetivo identificar a estrutura populacional da *Hypanus berthallutzae* (Petean, Naylor & Lima, 2020), que ocorre no interior do atol, a sazonalidade das avistagens, além do uso do habitat, a partir de métodos não letais. Em um segundo momento, através do uso de transmissores eletrônicos, foi realizado um monitoramento da movimentação vertical da raia prego no interior e fora da reserva (Fig. 12.9).

No decorrer de aproximadamente uma década de monitoramento das raias, foi possível verificar que a população da espécie, no interior do atol é predominantemente de fêmeas adultas, sendo raros os registros de indivíduos juvenis. O padrão diário de movimentação vertical evidenciou que a raia prego, apresentou preferência por águas mais rasas na maior parte do dia, acima dos 5 m de profundidade,



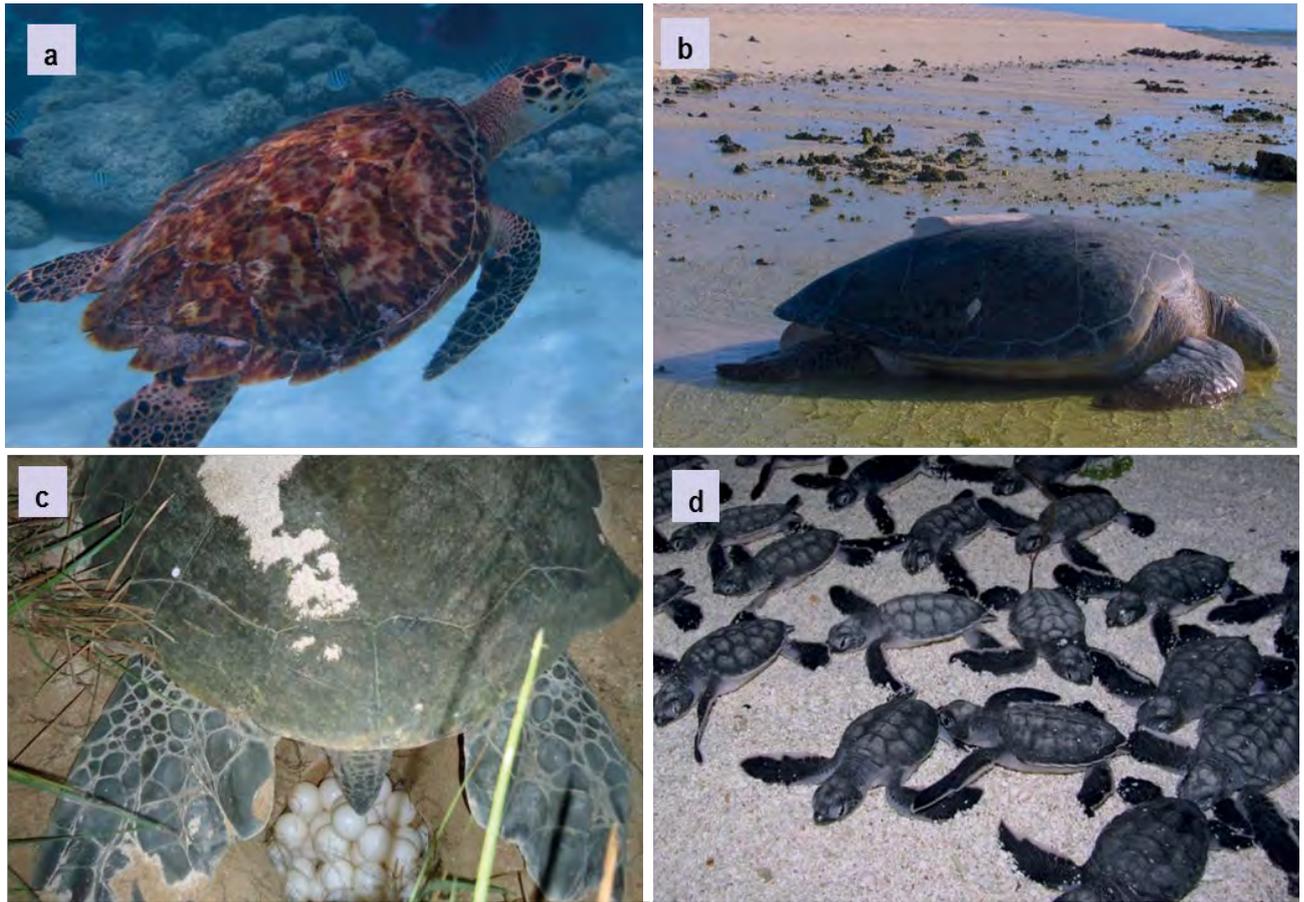
**Figura 12.9** Fêmea adulta de raia prego, *Hypanus berthalutzae*, marcada nas águas rasas da REBIO Atol Rocas com transmissor eletrônico, modelo MiniPat, no âmbito do Projeto Raias. **Foto** Dráusio Vêras.

ao passo que frequentou águas mais profundas em grande parte do período noturno, realizando mergulhos esporádicos nas adjacências do atol de até 77 m.

Esse padrão de comportamento pode estar intimamente associado ao fato da *Hypanus berthalutzae* ser uma espécie com hábitos naturalmente noturnos, forrageando especialmente durante este período (Gilliam & Sullivan, 1993). A vulnerabilidade natural dos tubarões e raias e a escassez de informações, no que diz respeito ao status populacional da espécie, que se encontra classificada na categoria de Vulnerável (VU) pela IUCN (2021), tornam os resultados de um monitoramento prolongado de sua população na REBIO Atol das Rocas de considerável relevância, particularmente a identificação das áreas de baixa profundidade da reserva como um dos seus habitats essenciais.

### 3.1.2. Monitoramento de tartarugas na REBIO Atol das Rocas

Em águas brasileiras, o Atol das Rocas é considerado um ecossistema de grande importância para as tartarugas marinhas *Chelonia mydas* e *Eretmochelys imbricata* (Fig. 12.10), sendo esta região, particularmente, identificada como o segundo maior sítio de desova da tartaruga-verde no Brasil, estando o primeiro deles na Ilha da Trindade (Almeida et al., 2011). As atividades de pesquisa e monitoramento das tartarugas do Atol das Rocas tiveram início, efetivamente, no ano de 1990, tendo como principais objetivos: a identificação da estrutura populacional, a partir de informações de biometria e sexagem dos espécimes, identificação da estação reprodutiva, distribuição temporal do número total de ninhos para cada temporada, número de ovos, taxa de sucesso de eclosão,



**Figura 12.10** **A)** Representante de tartaruga-de-pente, *Eretmochelys imbricata* e **B)** de tartaruga-verde, *Chelonia mydas*, no Atol das Rocas. **C)** Espécime de tartaruga-verde durante desova noturna, **D)** e corrida dos filhotes em direção às águas do Atol das Rocas, após eclosão. **Foto** Ilka Branco Nunes (Monitoramento realizado pelo ICMBio).

período de incubação, intervalo entre as ninhadas e período de remigração (Bellini et al., 2013).

O período da estação reprodutiva da tartaruga-verde ocorre entre os meses de dezembro e maio, com o pico da atividade ocorrendo entre os meses de fevereiro e abril. Em cada temporada reprodutiva uma equipe de pesquisadores realiza a busca de espécimes, durante a noite, que estejam formando ninhos e desovando seus ovos. No intuito de expandir e melhorar o monitoramento das tartarugas-verdes no Atol das Rocas, a REBIO/ICMBio passou a realizar, desde 2015, a implantação microchips nas tartarugas, permitindo, conseqüentemente, a identificação de todos os

espécimes que utilizem as águas do Atol das Rocas a cada estação reprodutiva.

### 3.2. Gestão e atividades científicas no entorno do Arquipélago de Fernando de Noronha

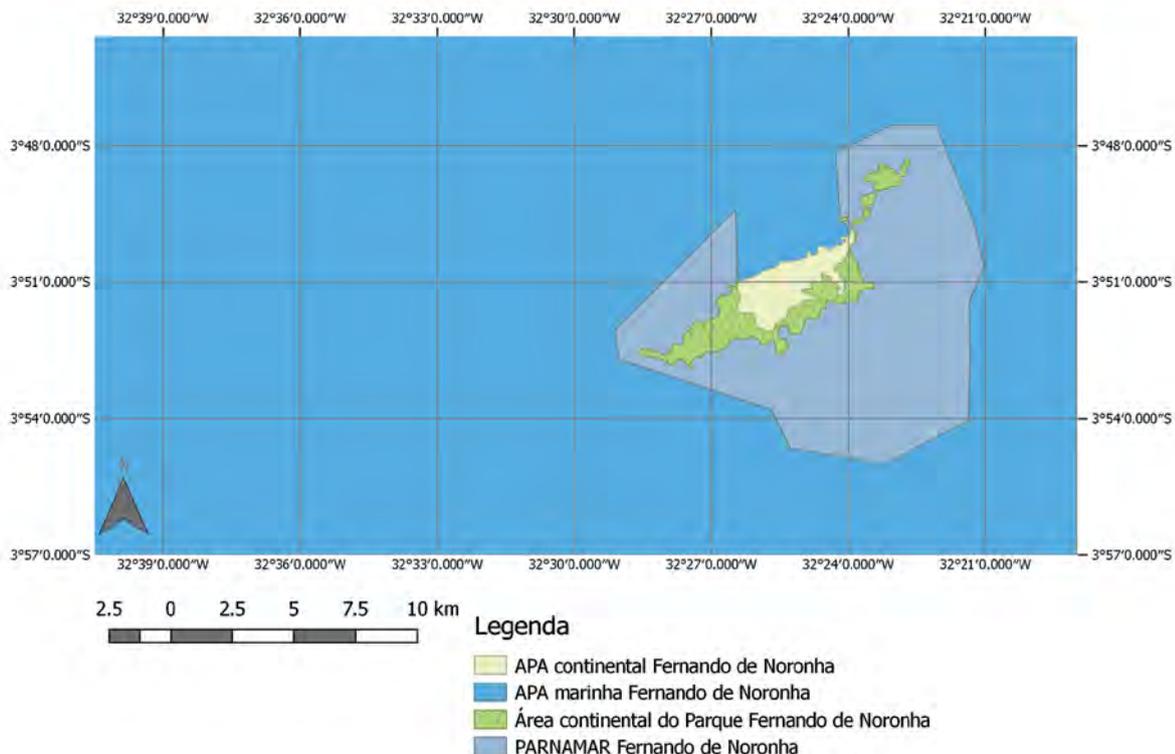
Em setembro de 1988, foi constituído o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha (PARNAMAR-FN) pelo decreto nº 96.693, com área de ocupação correspondendo a aproximadamente 60% do Arquipélago de Fernando de Noronha e suas ilhotas adjacentes até a isóbata de 50 m, localizado entre as coordenadas de 3°45' a 3°56'S de latitude e 032°19' W a 032°41'W de longitude. Cerca de

10.929 hectares pertencentes ao PARNAMAR-FN são uma área de proteção integral, que tem por objetivo valorizar os ambientes naturais e de beleza cênica, sendo admitido apenas o uso indireto dos seus recursos naturais, a fim de preservar os ambientes marinhos e terrestres da região.

No PARNAMAR-FN são permitidas atividades de visitas de forma ordenada com finalidade educativa, científica ou turística (ecoturismo). Os 40% restantes do arquipélago constituem a APA, na qual é permitida a ocupação humana e o uso sustentável de uma parcela dos seus recursos naturais, a exemplo da atividade pesqueira tradicional desenvolvida pelos habitantes (ICMBio, 2017). Pouco tempo após a promulgação do decreto que criou o Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha, foi publicado, em 1990, o Plano de Manejo do parque que delimitou o zoneamento da área e estabeleceu diretrizes para o seu uso. Toda

a costa oriental da ilha, o chamado mar de fora, e as Baías dos Golfinhos e do Sancho, localizadas na porção ocidental da ilha, estão inseridas no perímetro do Parque e correspondem a uma zona protegida integralmente (Fig. 12.11).

Embora a criação da APA Fernando de Noronha - Rocas - São Pedro e São Paulo anteceda a implantação do PARNAMAR-FN, o Plano de Manejo da APA foi elaborado apenas entre os anos de 2003 a 2005, tendo sido aprovado pela Portaria do IBAMA de nº36, em 2005, quase vinte anos após a criação da UC. Uma revisão do plano de manejo da APA Fernando de Noronha – Rocas – São Pedro e São Paulo foi publicada em 2017, no intuito de tornar o planejamento e a gestão desses espaços mais efetivos, considerando-se as peculiaridades de cada território. O atual gerenciamento da APA e do Parque é realizado pelo ICMBio.



**Figura 12.11** Arquipélago de Fernando de Noronha: Área de Proteção Ambiental (APA) continental e marinha, Área continental do parque e Parque Nacional Marinho (PARNAMAR) de Fernando de Noronha.

O arquipélago de Fernando de Noronha é o único ecossistema insular oceânico brasileiro com população residente e aberta à visitação turística. É considerada uma importante zona de reprodução e alimentação para diversas espécies, integrando a rota migratória de peixes, mamíferos, quelônios e aves (Soto, 2001; Teixeira et al., 2003). Por se tratar de um ecossistema insular com características singulares, elevado grau de biodiversidade e espécies endêmicas, diversas pesquisas científicas têm sido realizadas na ilha, com os mais distintos grupos taxonômicos, na expectativa de se obter um melhor entendimento da biodiversidade local e acompanhar possíveis alterações desse ambiente natural, ao qual é permitido o acesso e a realização de algumas atividades.

### 3.2.1. Projeto TAMAR no Arquipélago de FN

Atuando no Arquipélago de Fernando de Noronha desde 1984, o Projeto Tartarugas Marinhas (TAMAR) é certamente um dos projetos de maior representatividade na ilha, buscando conscientizar a população local, turistas e navegantes sobre a importância da conservação das tartarugas marinhas e esclarecendo as principais ameaças que podem impactar as populações das cinco espécies que ocorrem no Brasil: tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), tartaruga-cabeçuda (*Caretta caretta*), tartaruga-de-pente (*Eretmochelys imbricata*), tartaruga-oliva (*Lepidochelys olivacea*) e tartaruga-de-couro (*Dermochelys coriacea*).

Com o crescimento anual do número de turistas na ilha, em 1996 foi inaugurado o Museu do TAMAR de Fernando de Noronha, na expectativa de proporcionar a disseminação das ações de conservação para as tartarugas marinhas realizadas no Brasil pelo projeto TAMAR, bem como promover a divulgação dos principais resultados da biologia e ecologia das espécies. O Arquipélago de FN é considerado o terceiro principal sítio de desova da tartaruga-verde (*Chelonia mydas*), ocorrendo

intensa atividade reprodutiva em período semelhante ao Atol das Rocas (Almeida et al., 2011), além de ser ainda uma importante área de alimentação, crescimento e repouso para os juvenis de tartaruga-verde e da tartaruga-de-pente.

Anualmente, o Projeto TAMAR de FN protege aproximadamente 170 ninhos de tartaruga-verde, além de realizar pesquisas de marcação e recaptura das espécies que utilizam a ilha em alguma etapa do seu ciclo de vida. Após algumas décadas de pesquisa e monitoramento, existe uma tendência no Brasil de recuperação das populações de tartarugas marinhas, provavelmente, como reflexo de uma série de ações mitigadoras em áreas de extrema importância no ciclo de vida dessas espécies (TAMAR, 2020).

### 3.2.2. Projeto Golfinho Rotador

Iniciado em 1990, o Projeto Golfinho Rotador teve como principal objetivo investigar os aspectos relacionados à história de vida do golfinho-rotador *Stenella longirostris* (Fig. 12.12), além da ecologia comportamental exercida pela espécie, no entorno da Ilha de FN. A Baía dos Golfinhos, área de águas claras e rasas, é a região de maior ocorrência da espécie em FN, local em que representantes se reúnem regularmente por grupos de até 2.000 indivíduos, incluindo adultos e jovens de ambos os sexos (Silva Jr. et al., 1996). Dentre os principais comportamentos observados, a espécie utiliza a Baía dos Golfinhos para descansar, acasalar e amamentar seus filhotes. Ao decorrer de 30 anos de pesquisa e monitoramento da espécie em FN foi possível verificar que, desde 1990, o número de espécimes que frequentam o arquipélago é consideravelmente constante, indicando que as ações desenvolvidas no arquipélago para conservação, promovidas pelo projeto, são eficientes.



**Figura 12.12** Agrupamento de *Stenella longirostris* no Arquipélago de Fernando de Noronha. **Fonte** Projeto Golfinho Rotador.

### 3.2.3. Monitoramentos subaquático da ictiofauna de FN por meio de BRUVS

Monitoramentos subaquáticos da ictiofauna de Fernando de Noronha foram realizados com equipamentos conhecidos como BRUVs (*Baited Remote Underwater Video Survey*). BRUVS são estruturas em forma de trapézio, na qual são acopladas uma câmera de vídeo subaquática e uma caixa vazada com iscas, com o objetivo de atrair os predadores para que sejam registrados pela câmera (Struthers et al., 2015; Schmid et al., 2020). Por ser uma técnica de amostragem não letal, os BRUVs vêm sendo empregados com sucesso em estudos de identificação, abundância e estrutura populacional de peixes e elasmobrânquios em todo o mundo. Em AMP inseridas na categoria de proteção integral, a exemplo do PARNAMAR-FN, os BRUVs têm sido amplamente utilizados por serem uma alternativa de amostragem de baixo impacto ambiental (Espinoza et al., 2014).

De acordo com os estudos de Schmid et al. (2020) realizados em Fernando de Noronha, durante 122,5 horas de gravações em 81 estações de coleta, foram registrados 4.398 indivíduos, distribuídos em 70 táxons, pertencentes a 28 famílias e 10 ordens, distribuídos em 66 táxons. A família mais representativa foi a Carangidae com 9 espécies e 407 indivíduos avistados. Grandes peixes predadores pelágicos também foram registrados, a exemplo da barracuda (*Sphyraena barracuda*) 68, do dentão (*Lutjanus jocu*) 74, além de um único indivíduo de mero (*Epinephelus itajara*). O tubarão bico-fino (*Carcharhinus perezi*) 45 (Fig. 12.13), o tubarão-limão (*Negaprion brevirostris*) 45 e a raia prego (*Hypanus berthallutzae*) 42, foram as espécies de elasmobrânquios registradas em maior número no arquipélago de Fernando de Noronha. A pesquisa com os BRUVs teve início em meados de 2016, como parte da cooperação internacional entre o Projeto Global FinPrint e pesquisadores brasileiros.



**Figura 12.13** Quatro tubarões bico-fino (*Carcharhinus perezii*), sargentinhos (*Abudefduf saxatilis*) e cangulos preto (*Melichthys niger*) registrados pelos BRUV no arquipélago de Fernando de Noronha. **Foto** Global FinPrint e Ricardo Garla.

### 3.2.4. Monitoramento da movimentação de tubarões

A utilização do arquipélago de Fernando de Noronha pelos tubarões tem sido avaliada a partir do monitoramento das principais espécies com o uso de transmissores eletrônicos acústicos e via satélite. A marcação eletrônica, tanto por telemetria acústica como por satélite, tem se tornado uma das principais ferramentas para elucidar a migração em curta e larga escala, deslocamentos verticais, padrões diários de movimentação e uso do habitat por espécies marinhas, tendo aportado resultados particularmente satisfatórios em pesquisas com tubarões e raias (Branco-Nunes et al., 2016; Afonso et al., 2017; Bezerra et al., 2019).

Em estudo realizado por Afonso et al. (2017), foram marcados 10 tubarões tigre (*Galeocerdo cuvier*) com transmissores via satélite: quatro com marcas do tipo PSAT (*Pop-up satellite archival transmitter*) e seis com transmissores SPOT (*Smart position*

*and temperature transmitting*) nas imediações do arquipélago de Fernando de Noronha (Fig. 12.14). Os tubarões monitorados em Fernando de Noronha apresentaram comprimento total entre 202 e 310 cm e exibiram comportamentos migratórios distintos. Três tubarões tigre permaneceram nas circunvizinhanças do arquipélago durante todo o período de monitoramento, o que indica uma possível fidelidade à ilha.

Apenas um indivíduo migrou para costa da África, onde foi capturado por pescadores na Costa do Marfim, 474 dias após receber o transmissor do tipo SPOT, sugerindo que a espécie é capaz de realizar migrações em larga escala a partir de arquipélago. O monitoramento com a telemetria acústica teve início em 2016, com a marcação dos tubarões com transmissores V16, apresentando um código distinto que permitirá o reconhecimento individual dos espécimes monitorados pela rede de 16 receptores acústicos instalados no entorno do arquipélago. Os resultados preliminares sugerem que os tubarões



**Figura 12.14** Procedimento de marcação do tubarão tigre (*Galeocerdo cuvier*) com o transmissor SPOT no arquipélago de Fernando de Noronha. **Foto** Ocearch e Robert Snow.

monitorados se deslocam entre as áreas da APA de Fernando de Noronha e do PARNAMAR-FN, embora exista um maior número de detecções desses animais no mar de fora, ou seja, na área que corresponde ao parque, o que pode ser justificado devido a maior oferta de alimentos nessa região.

### 3.3. Gestão e atividades científicas no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Na expectativa de expandir a porcentagem de áreas totais de preservação ambiental no ambiente marinho, em 2018, o governo brasileiro criou quatro novas UCs marinhas através do decreto de nº 9.313, das quais duas estão inseridas no mais remoto território nacional: o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) (Brasil, 2018). Na menor ilha oceânica brasileira, foram implementadas uma APA com extensão de 40.705.236 hectares que

compreende o raio de duzentas milhas náuticas ao redor do ASPSP e um Monumento Natural (MONA), com área aproximada de 4.726.318 hectares, que circundam parte das ilhotas que compõe a porção oeste da ilha (Fig. 12.15). Com a criação das novas UCs, o percentual brasileiro de áreas marinhas protegidas foi ampliado de 1,5% para 25%, superando a Meta 11 de Aichi e a meta dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável 14, que preveem conservar ao menos 10% das águas costeiras e marinhas até 2020.

Anteriormente à criação das UCs supracitadas (APA e MONA do ASPSP) o ASPSP já era protegido, como unidade de conservação de uso sustentável, desde a criação da APA Fernando de Noronha- Rocas- São Pedro e São Paulo, em 1986. No ano de 1996 a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM) instituiu o Programa PROARQUIPÉLAGO, garantindo o desenvolvimento de diversas

pesquisas nos mais variados ramos das ciências como a geologia e geofísica, recursos pesqueiros e ecologia. Nos anos de 2009 e 2018 foram publicadas as consolidações de 10 e 20 anos de pesquisas científicas no ASPSP, no âmbito do Programa PROARQUIPELAGO (Viana et al., 2009, Lins Oliveira et al., 2018). Entre os vários temas tratados, inclui-se o intenso trabalho de pesquisas relacionado ao monitoramento de elasmobrânquios no ASPSP (Hazin et al., 2018).

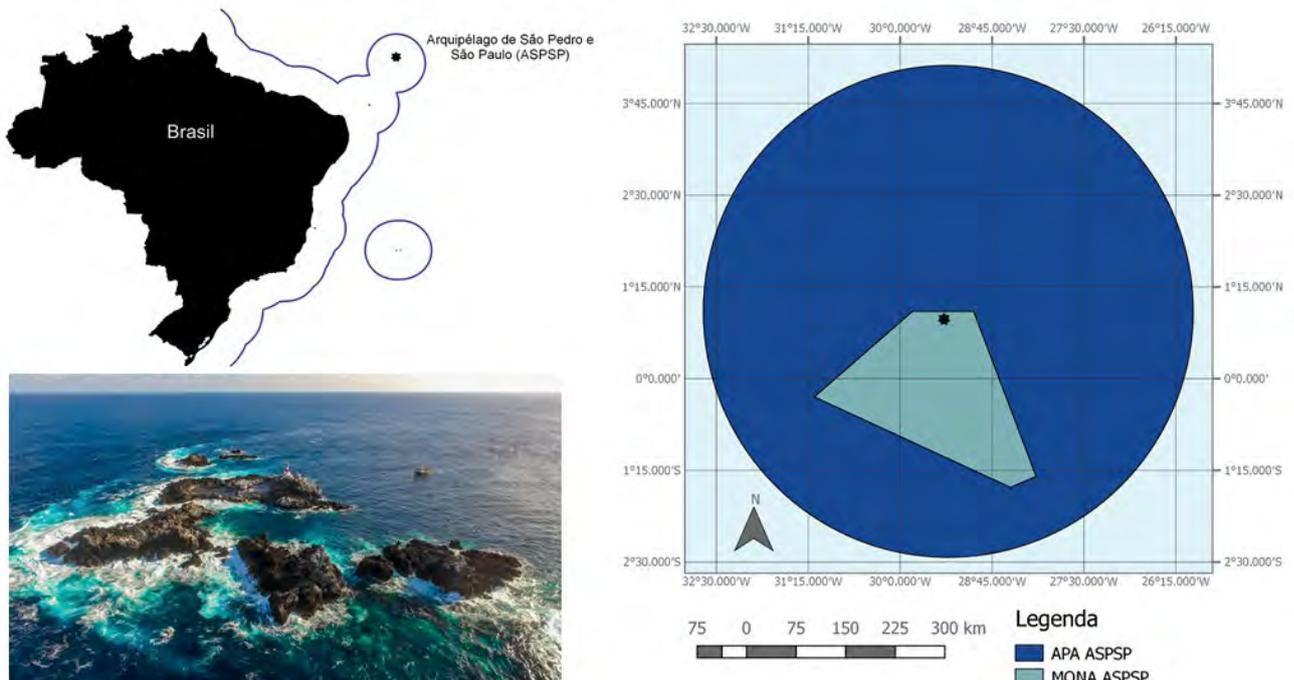
### 3.3.1. Monitoramento e mapeamento das pescas no ASPSP

Um dos maiores desafios relacionados à conservação dos recursos naturais no ambiente marinho é a realização de uma gestão sustentável da atividade pesqueira. Nesse sentido, como medida de manejo, a delimitação de áreas protegidas, diminuição do esforço de pesca, proibição de determinadas artes de

pesca, bem como o desenvolvimento de programas de monitoramento da atividade pesqueira são exemplos de ações muitas vezes necessárias para uma atividade sustentável (Dutra et al., 2011).

Considerando-se que o Arquipélago de São Pedro e São Paulo pertence à APA Fernando de Noronha-Rocas- São Pedro e São Paulo, além da mais recente APA do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, unidades categorizadas como de uso sustentável, a exploração dos recursos naturais pode ser realizada de maneira gerenciada. Nesse sentido, ao decorrer de aproximadamente duas décadas, um monitoramento das capturas realizadas no entorno do ASPSP vem sendo desenvolvido, no âmbito do PROARQUIPELAGO, no intuito de se avaliar a abundância relativa das principais espécies capturadas, incluindo as suas possíveis tendências anuais e variações sazonais.

A atividade pesqueira nas circunvizinhanças do ASPSP se iniciou em meados da década de 1950, a partir de embarcações da frota japonesa espinheleira, tendo



**Figura 12.15** Área de Proteção Ambiental (APA) e Monumento Natural (MONA) criados em 2018 no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. **Foto** Marinha do Brasil.

os atuns como espécies-alvo (Wise, 1968). Barcos pesqueiros brasileiros, porém, só começaram a pescar na região em meados da década de 1970 pela frota sediada em Natal-RN (Paiva & Gall, 1975). Em função da considerável distância entre o ASPSP e a região costeira do Brasil, entretanto, foi apenas a partir de meados dos anos 80 que embarcações pesqueiras passaram a atuar regularmente nessa região.

A pesca comercial que ocorre no entorno do ASPSP tem como principal objetivo a captura da albacora-laje (*Thunnus albacares*) e da cavala impigem (*Acanthocybium solandri*) (Vaske-Jr. et al., 2008; Viana et al., 2008 e Viana et al., 2015), seguidas do peixe-voador (*Cheilopogon cyanopterus*), utilizado como isca, e do peixe-rei (*Elagatis bipinnulata*). Além da captura de espécies com elevado valor, outros estoques de menor relevância econômica ainda são explorados em volumes reduzidos, incluindo capturas do *Coryphaena hippurus*, *Sphyrna barracuda*, *Caranx lugubris* e *Ruvettus pretiosus* (Viana, 2012; Viana et al., 2015).

Ao decorrer do monitoramento da pesca praticada no entorno do ASPSP, os desembarques de pescado, no período de 21 anos, entre 1998 e 2019, totalizaram 3.211,7 toneladas, com os maiores valores entre os anos de 2002 e 2004, especialmente em 2003 quando foi registrado o pico de produção próximo a 250 t capturadas.

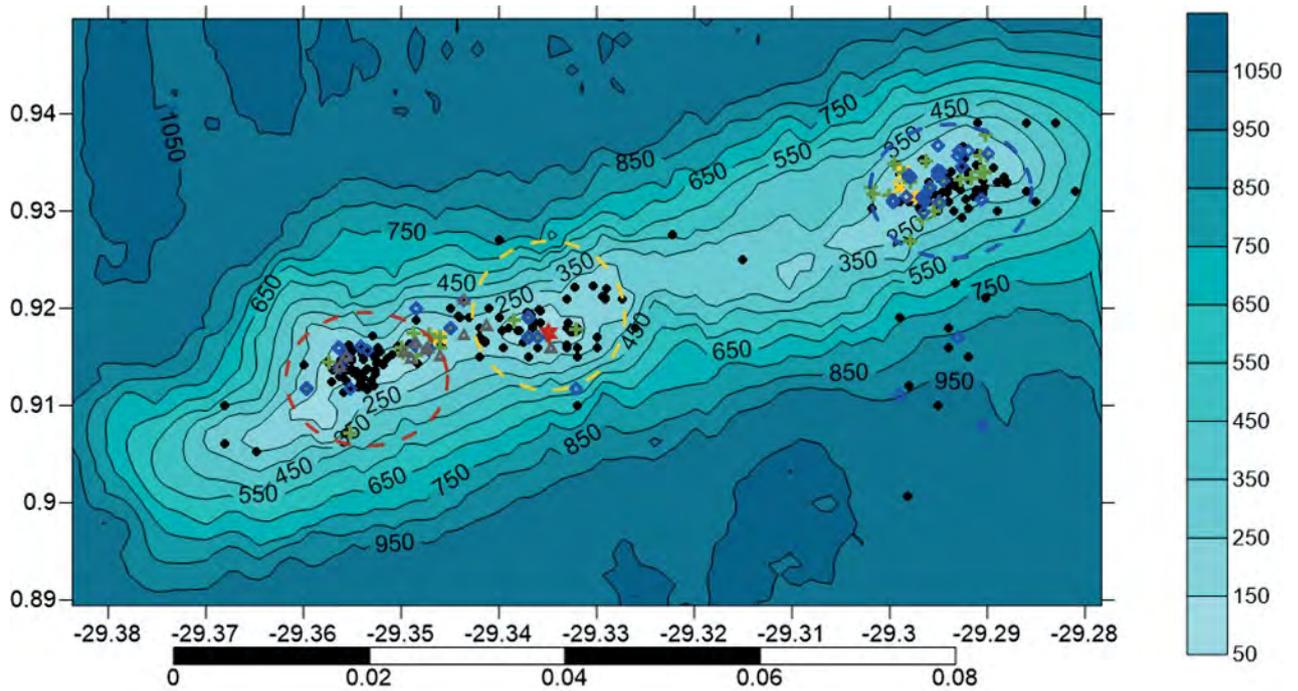
Após 2003, houve uma queda quase contínua das capturas até 2013, quando foram registradas capturas próximas a 100 t (106 t), passando a oscilar, a partir de então, entre este patamar e as 182 t desembarcadas em 2014. A partir do ano de 2016 (158,3 t) foi registrada uma queda acentuada das capturas totais até o ano de 2019 (63 t). Apesar de não existir um padrão claro na variação interanual do índice de captura por unidade de esforço (CPUE), para os atuns, os dados do monitoramento indicam uma significativa diminuição das capturas a partir do ano de 2011.

A pesquisa científica contou mais recentemente, com um mapeamento da atividade pesqueira, a

partir de 2018, por meio do preenchimento de Mapas de Bordo por pesquisadores embarcados, associada a informações relatadas pelos mestres das embarcações. Nessa etapa, além de serem avaliadas as capturas totais, juntamente com o esforço de pesca utilizado, foram identificadas as artes de pesca empregadas (linha de mão de fundo e de superfície, corrico múltiplo e puçá) e a localização dos lançamentos de pesca, no intuito de se verificar a sua distribuição, cujas posições se situam em isóbatas bastante próximas do ASPSP, ocorrendo em profundidades entre 50 e 350 m. Após o georeferenciamento dos pontos de pesca obtidos dos mapas de bordo foi evidenciado o uso de três bancos de pesca, pela frota comercial no entorno do ASPSP, sendo eles os bancos de oeste, do ASPSP e de leste (Fig. 12.16).

A redução significativa da captura dos atuns de 2011 em diante, diferentemente da relativa estabilidade anteriormente reportada (Viana et al., 2015), muito mais do que uma variação na abundância real dos estoques, parece ter sido o resultado do forte crescimento na população local de tubarões. No ano de 2012, em atendimento a uma determinação da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM), foi suspenso o uso do espinhel como aparelho de pesca pelas embarcações da frota comercial que atuavam nas adjacências do ASPSP, sendo, portanto, proibida a pesca de tubarões e agulhões no entorno da ilha.

A partir dessa proibição e conforme relato dos pescadores que atuam no local, incluindo o testemunho dos pesquisadores participantes da pesquisa, foi possível notar que a densidade desses animais, em especial dos tubarões da família Carcharhinidae (Oliveira, 2017), a exemplo do *Carcharhinus galapagensis*, aumentou fortemente. O crescimento significativo na abundância dos tubarões praticamente inviabilizou a pesca noturna da albacora-laje com atração luminosa (Fig. 12.17). No momento em que os peixes-voadores, utilizados como isca viva para a captura dos atuns, começam a se concentrar atraídos pela luz da embarcação, densos cardumes de dezenas de tubarões se aproximam das embarcações para se alimentarem tanto dos peixes-voadores atordoados pela luz como das albacoras-laje,



**Figura 12.16** Localização dos pontos de pesca, a partir de todas as artes de pesca em conjunto (linha de mão de fundo e de superfície, corrico múltiplo e puçá), no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, entre janeiro de 2018 e novembro de 2019. Detalhamento dos símbolos: vermelho (ASPSP), preto (corrico), verde (linha de mão de superfície), azul (linha de mão de fundo) e cinza (puçá).



**Figura 12.17** Interação de tubarões do gênero *Carcharhinus* com a atividade pesqueira realizada no entorno do ASPSP.  
**Fonte** Cláudio Vedova (2018).

eventualmente capturadas (Comunicação pessoal: Jorge Lins- UFRN 2016-2017), sendo este o fator da forte redução da capturabilidade dessa espécie, que é o principal alvo da pesca no ASPSP.

É fundamental que o mapeamento e o monitoramento da atividade pesqueira no entorno do ASPSP seja um programa contínuo, para permitir que sejam verificadas possíveis alterações nas tendências atuais, particularmente em razão das fortes variações sazonais observadas nesse remoto ecossistema insular. Essa ressalva é particularmente importante tanto para as possíveis variações na composição das capturas, como na distribuição geográfica dos lances de pesca.

## 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

É certamente desafiador vencer as complexidades naturais relacionadas à organização e estabelecimento de um amplo sistema de unidades de conservação no ambiente marinho, na expectativa de conservar a biodiversidade local, manter a produtividade e preservar os habitats essenciais para diversas espécies. É incontestável que as diferentes categorias do Sistema Nacional de Unidades de Conservação do Brasil, seja de uso sustentável ou de proteção integral, são consideravelmente essenciais no sentido de manter o equilíbrio socioambiental em território brasileiro, haja vista a extensão da costa do Brasil e a dimensão populacional existente nessas localidades. Ressalta-se que estratégias relativamente simples a exemplo da delimitação de áreas de pesca, suspensão do uso de determinados apetrechos de captura, bem como ampliação de UCs já estabelecidas, são ferramentas importantes e eficientes no processo de gestão de unidades costeiras e oceânicas.

## REFERÊNCIAS

- AFONSO, A.S.; GARLA, R.; HAZIN, F.H.V.; **Tiger Sharks Can Connect Equatorial Habitats and Fisheries Across the Atlantic Ocean Basin**. PLoS ONE 12(9): e0184763. 2017.
- AGRA, Gisele. **Organização social de elasmobrânquios na Reserva Biológica do Atol das Rocas**, Brasil. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil 64p. 2009.
- BEZERRA, N. P. A.; MACENA, B. C. L.; TRAVASSOS, P.; AFONSO, P.; HAZIN, F. H.V. **Evidence of site fidelity and deep diving behaviour of scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) around the Saint Peter and Saint Paul Archipelago**, in the equatorial MidAtlantic ridge. Marine and Freshwater Research, 71(6) 708-718. 2019.
- BRANCO-NUNES, Ilka Siqueira Lima Branco. **Ecologia da raia, *Dasyatis americana*** (Hildebrand & Schroeder, 1928), na Região Metropolitana do Recife- PE e na ReBio Atol das Rocas- Brasil. 129 f. Tese (Programa de Pós-Graduação em Recursos Pesqueiros e Aquicultura)- Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2015.
- BRASIL. Decreto n. 9.313, de 19 de março de 2018. **Cria a Área de Proteção Ambiental do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e o Monumento Natural do Arquipélago de São Pedro e São Paulo**. Diário Oficial da União, 2018.
- CASTRO A.L.F. & ROSA R.S. **Use of natural marks on population estimates of the nurse shark, *Ginglymostoma cirratum*, at Atol das Rocas Biological Reserve, Brazil**. Environmental Biology of Fishes 72, 213–221. 2009.
- DUTRA, G.F.; CAMARGO, E.; SANTOS, C.A.P.; CEOTTO, P. **Abrolhos: desafios para a conservação e o desenvolvimento sustentável na área com a maior biodiversidade marinha do Atlântico Sul**. Field Actions Science Reports. Special Issue 3. 2011.
- ESPIÑOZA, M.; CAPPO, M.; HEUPEL, M.R.; TOBIN, A.J. & SIMPFENDORFER, C.A. **Quantifying Shark Distribution Patterns and Species-Habitat Associations: Implications of Marine Park Zoning**. PLoS ONE 9(9): e106885. doi:10.1371/journal.pone.0106885. 2014.
- EUROPEAN COMMISSION. **International ocean governance infographics**. Retrieved from [https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/2015-international-ocean-governance\\_en.pdf](https://ec.europa.eu/maritimeaffairs/sites/maritimeaffairs/files/docs/body/2015-international-ocean-governance_en.pdf). 2015.
- FISCHER, C.F., AVELAR, J.C.L., BRITO, M., GROSMAN, A., CARVALHO, D.A., CARNEIRO, C.L. & ARRUDA, M.B. **Plano de manejo para a reserva biológica Atol das Rocas**. 235p., Ministério do Meio Ambiente/ Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, Brasília, DF, Brasil. 2007.
- GOMES, A.S., VILLAÇA, R. PEZZELLA, C.A.C. **O Atol das Rocas. Ecossistema único no Oceano Atlântico sul**. Ciência Hoje 29(172):33-39. 2001.
- HAZIN, F.H.V., ROCHA, B.C.L.M., VIANA, D., LANA, F., OLIVEIRA, L., BEZERRA, N.P.A., MENDONÇA, S.A. **Elasmosbrânquios do Arquipélago de São Pedro e São Paulo**, in: OLIVEIRA, J., VIANA, D., SOUZA, M. (Eds.), Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 20 Anos de Pesquisa. Recife, pp. 143–159. 2018.
- ICMbio, 2017. **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental de Fernando de Noronha - Rocas – São Pedro e São Paulo**. ICMbio/MMA. 156 p.

ICMBIO. **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental Costa dos Corais**. ICMBio/MMA. 2013.

Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade. **Livro Vermelho da Fauna Brasileira Ameaçada de Extinção: Volume VI – Peixes** /-- 1. ed.-- Brasília- DF : ICMBio/MMA. 7 v. : il. 2018.

KIKUCHI R.K.P. **Atol das Rocas, Litoral do Nordeste do Brasil - Único atol do Atlântico Sul Equatorial Ocidental**. In: Schobbenhaus C., Campos D.A., Queiroz E.T., WINGE M., BERBERT-BORN M.L.C. (eds.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. Brasília, DNPM/CPRM, p.379-390. 2002.

LINS OLIVEIRA, J., VIANA, D., SOUZA, M. (Eds.), **Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 20 Anos de Pesquisa**. Recife, pp. 143–159. 2018

LUNA, F.O. ARAÚJO, J.P. OLIVEIRA, E.M. HAGE, L.M. PASSAVANTE, J.Z.O. **Distribuição do peixe-boi marinho, *Trichechus manatus manatus*, no litoral norte do Brasil**. Arq. Ciên. Mar, Fortaleza, 43(2): 79 – 86. 2010.

LUNA, F.O. **Phylogeographic implications for release of critically endangered manatee calves rescued in Northeast Brazil**. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems, 22: 665-672. 2012.

MENARIN, C.A.; FRANCO, J.L.A. e DRUMMOND, J.A. **Proteção à natureza e identidade nacional no Brasil, anos 1920-1940**. Rio de Janeiro: Ed. Fiocruz, 2009, 272p. *Varia Historia*, v. 26, n. 43, p. 327-330. 2010.

NORMANDE, Iran Campello. **Manejo para conservação de peixes-bois marinhos (*Trichechus manatus*, LINEAUS, 1758) no Brasil: programas de soltura e monitoramento**. Universidade Federal de Aagoas. Dissertação de mestrado, 115f. 2014.

OLIVEIRA P.G.V. 2001. **Levantamento da fauna de elasmobrânquios e estudos da biologia comportamental do tubarão-limão, *Negaprion brevirostris* (Poey, 1868) e tubarão-lixia *Ginglymostoma cirratum* (Bonnaparte, 1788) na Reserva Biológica do Atol das Rocas - RN - Brasil**. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFPE), Recife - PE, Brasil 114p. 2001.

OLIVEIRA, L.P.P. **Abundância relativa e uso do habitat por tubarões do gênero *Carcharhinus* (*C. falciformis*, *C. galapagensis* e *C. obscurus*) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo - Brasil** / Luíza Paoliello Pacheco de Oliveira. 105 f., il., gráfs., tabs. 2017.

PAIVA, Laís Muniz. **Variabilidade estrutural da floresta de mangue do estuário do rio Tatuamunha, Porto de Pedras, Alagoas, Brasil**. / Laís Muniz Paiva- 2018. 85f. II. Dissertação (Programa de PósGraduação em Oceanografia) Universidade Federal de Pernambuco, 2018.

PAIVA, M. P. e GALL, J. **Catches of tunas and tuna like fishes in the longline fishery areas off the cost of Brazil**. Arquivos de Ciências do Mar, 15(1):1-18. 1975.

**Plano de ação nacional para a conservação dos sirênios: peixe-boi-da Amazônia: *Trichechus inunguis* e peixe-boi-marinho: *Trichechus manatus***. Organizadores: Maurício

Carlos Martins de Andrade, Fábía de Oliveira Luna, Marcelo Lima Reis. Brasília: Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade, ICMBio, 80 p. : il. color. ; 29,7 cm. (Série Espécies Ameaçadas). 2011

RIBEIRO, K.T; LAURA, S.M.M.; MIYASHITA, L.K. **Estratégia integrada de monitoramento marinho costeiro: Programa Nacional de Monitoramento da Biodiversidade do ICMBio (MONITORA)- subprograma Marinho e Costeiro**. /- 1 ed-Brasília: ICMBio,. 97 pp.: il. Color. ISBN: 978-65-5024-011-0. 2019.

SÁTYRO, Péricles B. **Surgimento, evolução e divisão do IBAMA**. 34 p. Trabalho de Graduação (Engenharia Florestal) – Setor de Ciências Agrárias. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. 2008.

SCHMID, K.; Fábio Renan Silva MIRANDA; Bárbara Janaína Vieira dos SANTOS; Natalia Priscila Alves BEZERRA; Ricardo Clapis GARLA; Tommaso GIARRIZZO. **First fish fauna assessment in the Fernando de Noronha Archipelago with BRUVS: Species catalog with underwater imagery**. Biota Neotropica, no prelo. 2020.

SOTO, J. M. R. **Peixes do arquipélago Fernando de Noronha**. Mare Magnum, 1(2): 147-169. 2001.

SOUZA, C.N. **A governança na implantação de zoneamentos em áreas de proteção ambiental marinhas**. Universidade Federal de Alagoas. Diss. Mestr. 152. 2017.

STRUTHERS, D.; DANYLCHUK, A.; WILSON, A. & COOKE, S. J. **Action Cameras: Bringing Aquatic and Fisheries Research into View**. *Fisheries*, 40:502-512. 2015.

TEIXEIRA, W.; CORDANI, U.G.; MENOR, E.A.; TEIXEIRA, M.G. & LINSKER, R. **Arquipélago de Fernando de Noronha, o paraíso do vulcão**. São Paulo, Terra Virgem, 168p. 2003.

VASKE-JR., T.; LESSA, R.P.T.; RIBEIRO, A.C.B.; NOBREGA, M.F.; PEREIRA, A.A.; Andrade, C.D.P. **A pesca comercial de peixes pelágicos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil**. *Tropical Oceanography*, 36(1/2): 47- 54. 2008.

VIANA, D.,HAZIN, F. SOUZA, M. (Eds.), **Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 Anos de Pesquisa**. Recife, p. 348, 2009.

VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V.; NUNES, D. M.; CARVALHO, F. C.; VERAS, D.; TRAVASSOS, P. E. **Fishery in the vicinity of saint peter and Saint Paul Archipelago, Brazil**, from 1998 to 2006. *Collective Volume of Scientific Papers- International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas*, v. 62, p. 1662-1670, 2008.

VIANA, D.; HAZIN, F. H. V.; HUMBER. A.A; NUNES, D. M. ; VIANA, D. L. **Fisheries in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago: 13 years of monitoring**. *Boletim do Instituto de Pesca (Online)*, v. 42, p. 239-248. 2015.

VIANA, Daniele de Lima. **Pesca e Dinâmica Populacional do peixe-prego, *Ruvettus pretiosus* (Cocco, 1829) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo**. Tese de Doutorado, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Brasil. 2012.

WISE, J.P. **The Japanese Atlantic longline fishery, 1964, and the status of the yellowfin tuna stocks**. United States Fisheries and Wildlife Service Special Scientific Report-Fisheries. 568: 1-5. 1968.

# O PANORAMA DA ARQUEOLOGIA SUBAQUÁTICA NO NORDESTE DO BRASIL

13

Carlos Celestino Rios e SOUZA<sup>1</sup>  
Marilia Perazzo Valadares do AMARAL<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

<sup>2</sup> Fundação Paranã-buc - Universidade de São Paulo - USP



## 1. INTRODUÇÃO

A **Arqueologia** é uma ciência que estuda o passado do homem por meio dos seus vestígios materiais (Renfrew & Bahn, 1993). Nesse contexto, em se tratando do Brasil, pode-se subdividir a Arqueologia em Pré-histórica e Histórica. A **Arqueologia Pré-histórica** é uma área voltada para o estudo dos povos ágrafos, tendo como fontes materiais de estudos os registros rupestres, os materiais líticos e cerâmicos, bem como os vestígios alimentares (animais e vegetais) e demais artefatos (embarcações monóxilas, remos, tacapes etc.). A **Arqueologia Histórica** trata do estudo arqueológico de culturas documentadas historicamente.

A Arqueologia Subaquática, em regra, encontra-se inserida no âmbito da Arqueologia Histórica. No entanto, alguns trabalhos com cronologia Pré-histórica foram executados, tais como o estudo de grafismos rupestres na região Amazônica (Pereira et al., 2009) e de canoas monóxilas no Rio Grande do Norte (Rios et al., 2015; Rios & Lins, 2016).

Segundo o olhar de Georg Fletcher Bass, a **Arqueologia Subaquática** é a mesma arqueologia desenvolvida em terra, mas com uma série de aparelhos e acessórios adaptados ao trabalho subaquático. É um ramo da Arqueologia que tem menos de cinquenta anos de existência no Oriente, cujos precursores, desenvolveram métodos e técnicas adaptados para a pesquisa submersa no sítio de naufrágio Cabo Gelidônia, em Yassi Ada, Turquia (Bass, 1969; 2006).

Com esse conceito formado surgiram debates acerca dos variados ambientes de estudo da Arqueologia Subaquática e dos domínios açambarcados pela disciplina. As discussões teóricas visavam, mormente, sobre os termos **Arqueologia Marítima, Arqueologia Náutica e Arqueologia Naval**. Tais denominações são complementares, mesmo possuindo abordagens específicas (Alves & Mantas, 2015).

Segundo Muckelroy (2004), a **Arqueologia Marítima** é o estudo dos vestígios da cultura material marítima englobando todas as questões referentes aos sistemas econômicos, sociais e políticos, no qual embarcações, seus aparelhos e acessórios, cargas, passageiros, tripulações e utensílios estejam relacionados. De acordo com a Convenção sobre o Patrimônio Cultural Subaquático, a **Arqueologia Náutica** estuda especificamente os métodos e técnicas construtivas dos navios e sua utilização no universo aquático (UNESCO, 2001). No tocante a **Arqueologia Naval**, esta é mais abrangente que o estudo das embarcações, pois envolve técnicas e estruturas de apoio da navegação, tais como boias de sinalização náutica, trapiches, molhes e cais, além de estudos das rotas marítimas, dentre outros (Alves & Mantas, 2015).

Neste contexto, torna-se imprescindível deixar claro que, desde que haja testemunhos do contato do homem com o meio aquático, as arqueologias marítima, naval e náutica podem ser realizadas em

meio terrestre, diferentemente da Arqueologia Subaquática. Os arqueólogos da Universidade Federal de Sergipe, Leandro Domingues Duran, Gilson Rambelli e Paulo Fernando Bava de Camargo já utilizam “Arqueologia de Ambientes Aquáticos” para englobar todas as denominações (Duran, 2008).

## 2. A ARQUEOLOGIA SUBAQUÁTICA NO NORDESTE DO BRASIL

A Arqueologia Subaquática brasileira começou a ser desenvolvida no Nordeste do Brasil, na década de 1970, com os trabalhos efetuados pela Marinha do Brasil (MB) nos estados da Bahia e de Pernambuco, recuperando artefatos dos galeões Sacramento (BA) e São Paulo (PE), sob a orientação do arqueólogo Ulisses Pernambucano, que não é mergulhador, mas ensinou os protocolos de trabalho aos mergulhadores da MB (Mello Neto, 1977; 1981; Cunha, 1990; 1994).

O trabalho seguinte realizado em Pernambuco, pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), só teve lugar no primeiro decênio do presente século, com o estudo de um naufrágio na área de fundeio externo do porto do Recife (Rios, 2007).

Em 2002 a Universidade Federal de Pernambuco já possuía os cursos de Mestrado e Doutorado em Arqueologia. Em 2008 passou a existir como Curso de Graduação em Arqueologia e em 2010 abriu o primeiro concurso para docente na área de Arqueologia Subaquática no Brasil. A Universidade Federal do Piauí, cerca de um ano depois, foi a segunda universidade do país a contratar especificamente um arqueólogo subaquático, ficando o Nordeste com a hegemonia nessa área.

Em 2007 a Universidade Federal de Sergipe criou o Curso de Graduação em Arqueologia. Nesse contexto foram contratados três arqueólogos com

formação em Subaquática. No ano de 2013 os primeiros alunos do curso de Pós-Graduação em Arqueologia se formaram e veem desenvolvendo pesquisas, em sua maioria teórica, tanto em Sergipe quanto na Bahia e em Pernambuco.

A Universidade Federal do Rio Grande do Norte, por meio dos componentes da Sociedade de Arqueologia Norte Rio-Grandense (ANA), já ofereceu um Curso de Especialização em Arqueologia em 2013 e estava desenvolvendo um novo para 2020, no qual em sua grade curricular constavam aulas teóricas e práticas em Arqueologia Subaquática, despontando assim como a primeira universidade nordestina que, apesar de não possuir Curso de Graduação em Arqueologia, estaria oferecendo essa modalidade para alunos da área das Ciências Sociais, entretanto, devido à pandemia global, o curso foi suspenso temporariamente.

A Marinha do Brasil já tinha em seu quadro de servidores civis, desde os anos 1980, dois arqueólogos graduados pela antiga Faculdade Integradas Estácio de Sá, atual Universidade Estácio de Sá, RJ, que já atuavam na Arqueologia Subaquática, desde 1985, na Divisão de Arqueologia Subaquática do Serviço de Documentação da Marinha (Cunha, 2009).

No primeiro decênio do século XXI, ela já possuía um civil com mestrado (Cunha, 2008) e dois oficiais em seu Quadro Técnico com mestrado em Arqueologia Subaquática (Guimaraes, 2009; Gusmão, 2015). Em 2015, a Marinha do Brasil ofereceu a primeira vaga para Oficial, específica para arqueólogo subaquático, contando, na atualidade, com quatro servidores, sendo um civil e três militares.

A Marinha do Brasil, por meio dos Distritos Navais e das Capitânicas dos Portos, Delegacias e Agências vêm intensificando as ações de fiscalização referentes aos bens submersos com Patrulhas Navais e Inspeções Navais. Por outro lado, a Diretoria do Patrimônio Histórico e Documentação

da Marinha (DPHDM) vêm desenvolvendo trabalhos voltados para a proteção do Patrimônio Cultural Subaquático por meio de palestras para o público interno e externo, além de um projeto intitulado Atlas sobre os naufrágios de interesse histórico da costa do Brasil.

### 3. AS PESQUISAS NO NORDESTE DO BRASIL

Devido ao pouco tempo de existência, a Arqueologia Subaquática ainda está em fase de desenvolvimento e muito ainda precisa ser feito. Os trabalhos desenvolvidos pelas universidades brasileiras fora do circuito nordestino foram poucos, mas dignos de nota (USP e UFRJ – Museu Nacional) e pelo Museu Emílio Goeldi (PA) na área de Arqueologia Subaquática são voltados para Fortificações Submersas, Sambaquis de áreas intertidais, Sítios Depositários, Antropologia Biológica, Sítios de Naufrágios e Sítios com Gravuras Rupestres (Bava de Camargo, 2002; 2009; Calippo, 2004; 2010; Cunha, 2008; Duran, 2008; Guimaraes, 2009; Rambelli, 1998; 2003; Pereira et al., 2009).

No ano de 2011 a UFPI deu início aos trabalhos de Arqueologia Subaquática por meio do projeto Arqueologia no litoral do Piauí, tendo desenvolvido 5 Trabalhos de Conclusão de Curso (Gaspar, 2011; Neiva, 2011; Silva, 2013; Ferreira, 2015; Gonçalves, 2016) e 1 de Iniciação Científica (Amorim, 2013).

Em 2008 a Universidade Federal Rural de Pernambuco, UFRPE, começou a atuar na Arqueologia Subaquática com trabalhos teóricos voltados para o patrimônio submerso do litoral Pernambucano (Oliveira et al., 2008) e sobre transporte marítimo na Ilha de Itamaracá nos séculos XVI e XVII (Oliveira et al., 2010).

A UFS, desde a criação do Curso de Pós-Graduação em 2013, vem trabalhando com Arqueologia da Paisagem (Silva, 2017), com Arqueologia Marítima

(Novaes, 2018; Porto, 2013; Silveira, 2017; Amarante, 2015; Silva Amarante, 2019;), sítios de naufrágio (Gusmão, 2015; Moreira, 2017), além de sítios rituais (Ribeiro Júnior, 2015; Novaes, 2018), trabalhos metodológicos (Costa, 2013; Santos, 2013; Jesus, 2014; Rosa, 2015; Carvalho, 2017), bem como um viés patrimonial (Ferreira, 2013).

As pesquisas desenvolvidas pela UFPE, no âmbito da Pós-Graduação, abordam sítios de naufrágios (Rios, 2007; 2010; Barbosa, 2013), Carta Arqueológica de Naufrágios (Rios & Valls, 2008), trabalho teórico sobre fatores causadores de naufrágios (Rios, 2010), Arqueologia Marítima (Lins, 2014), Arqueologia Marítima na Pré-história (Rios & Lins, 2016), Datação de canoas envolvendo o contexto Pré-histórico e Histórico (Rios et al., 2015), Arqueologia da Paisagem, no caso o relevo submarino da área portuária adjacente ao porto do Recife (Rios & Santos Júnior, 2015) e Transporte Aquaviário (Rios & Lins, 2017).

Na atualidade o Programa de Pós-Graduação da UFPE (conceito 5 da Capes) desenvolve, dentre outras áreas da Arqueologia, trabalhos voltados para a Arqueologia Subaquática, sendo três no Mestrado e um no Doutorado, nas áreas relacionadas ao Arqueoturismo Subaquático (Vieira, 2018), ao estudo de naufrágios (Ferreira, 2017), aos sítios rituais ou de oferenda (Barbosa, 2017) e outro voltado para Arqueologia Naval (Lins, 2016).

Como é uma ciência interdisciplinar, expande o conhecimento a sua acessibilidade por meio da musealização em terra e no mar de artefatos arqueológicos, da Educação Patrimonial junto às comunidades onde desenvolve pesquisas, bem como do Turismo Cultural levando a população à visitação de circuitos de sítios arqueológicos diversos (fortificações, igrejas, engenhos, navios, entre outros).

A área de trabalho do arqueólogo abrange universos distintos, desde a autonomia- abrindo a sua própria empresa de consultoria, mormente voltada

para a Arqueologia de Contrato (trabalhando com prospecção terrestre ou subaquática, EIA/RIMA, Aerofotogrametria 3D terrestre ou subaquática, laudos, pareceres, projetos) – até para aqueles que têm o pendor para ensino e ou pesquisa, a desenvolver suas habilidades em instituições de ensino particulares ou públicas, em laboratórios de pesquisa, em áreas governamentais voltados ao gerenciamento e ou preservação de patrimônios pré-históricos/históricos.

## 4. OS SÍTIOS ARQUEOLÓGICOS SUBAQUÁTICOS

A Arqueologia Subaquática (AS) é caracterizada pelas pesquisas sistemáticas desenvolvidas em sítios submersos em área marítima, estuarina, ribeirinha e lacustre ou em zonas intertidais (as zonas de praia existentes entre as preamares e baixa-mares de sigízia).

No começo os naufrágios eram o principal objeto de pesquisa, isto porque existia e, nos dias atuais, ainda persiste, a ideia equivocada de se ficar milionário encontrando um tesouro. Para os que desconhecem as Leis, Normas e Portarias afetas ao assunto, qualquer soçobro que for declarado pelo dono ou que o dono tenha considerado o bem perdido e tenha transcorrido 5 anos do naufrágio passa a ser da União. Como os artefatos arqueológicos estão protegidos por lei, a venda, troca, permuta etc. não têm amparo legal, ficando o vendedor ou colecionador passível de prisão ou outras sanções (Lei Federal nº 7.542/86; Lei Federal nº 10.166/00; Normam-10/03 e Portaria Interministerial nº 69/89).

Os sítios de naufrágios (Fig. 13.1) representam a cultura material de diversos povos marítimos, estuarinos, ribeirinhos ou lacustres expressa na forma de navios e embarcações dos mais variados tipos que soçobraram ao redor do mundo.



**Figura 13.1** Treinamento subaquático no sítio de naufrágio Vapor de Baixo, Recife-PE. **Fonte** Dolphin Eye (2011).



**Figura 13.2** Panorama subaquático de alijamento/descarte de cargas (sítio de Abandono). **Fonte** Max Glegiston (2017).

Com o desenvolvimento dos estudos científicos da Arqueologia Subaquática, apesar de não existir uma política pública voltada ao assunto, passou-se a estudar outros tipos de sítios, tais como: os de **Abandono** ou **Depositários**, os **Rituais** ou **Santuários** e os **Terrestres Submersos**. Neste contexto, os trabalhos da Arqueologia Subaquática, assim como os realizados na Terrestre, acompanham o próprio desenvolvimento humano, integrando as superfícies com ou sem lâmina de água contínua.

Os sítios de **Abandono** ou **Depositários** (Fig. 13.2) são formados pelos vestígios de cargas mercantis ou de guerra quaisquer perdidas em fainas de transbordo, palamentas diversas que foram descartadas por quebra, defeito ou desuso, bem como aparelhos e acessórios de navios

ou embarcações de tipologias diferentes que foram perdidas ou alijadas por motivos diversos, normalmente em áreas de fundeio (marítima, estuarina, ribeirinha ou lacustre).

No que concerne aos sítios **Rituais** ou de **Oferendas** (Fig. 13.3), também conhecidos como sítios **Santuários**, são formados pelo depósito intencional de artefatos diversos em corpos d'água como oferendas a deuses ou entidades, em ritos próprios e com especificidade de vestígios.

Os sítios **Terrestres Submersos** (Fig. 13.4) caracterizam-se como edificações quaisquer ou expressões de gravuras rupestres efetuadas em terra firme, mas por motivos diversos, naturais ou antrópicos, passaram a ficar inundadas de forma definitiva ou periódica.



^

**Figura 13.3** Vasos cerâmicos do sítio Porto de Galinhas, Ipojuca-PE. **Fonte** Fundação Paranã-buc (2018).



< **Figura 13.4** Sítio Terrestre Submerso de uma ruína colonial em zona intertidal, Ipojuca-PE. **Fonte** Rios (2007).

## 5. METODOLOGIAS DE TRABALHOS

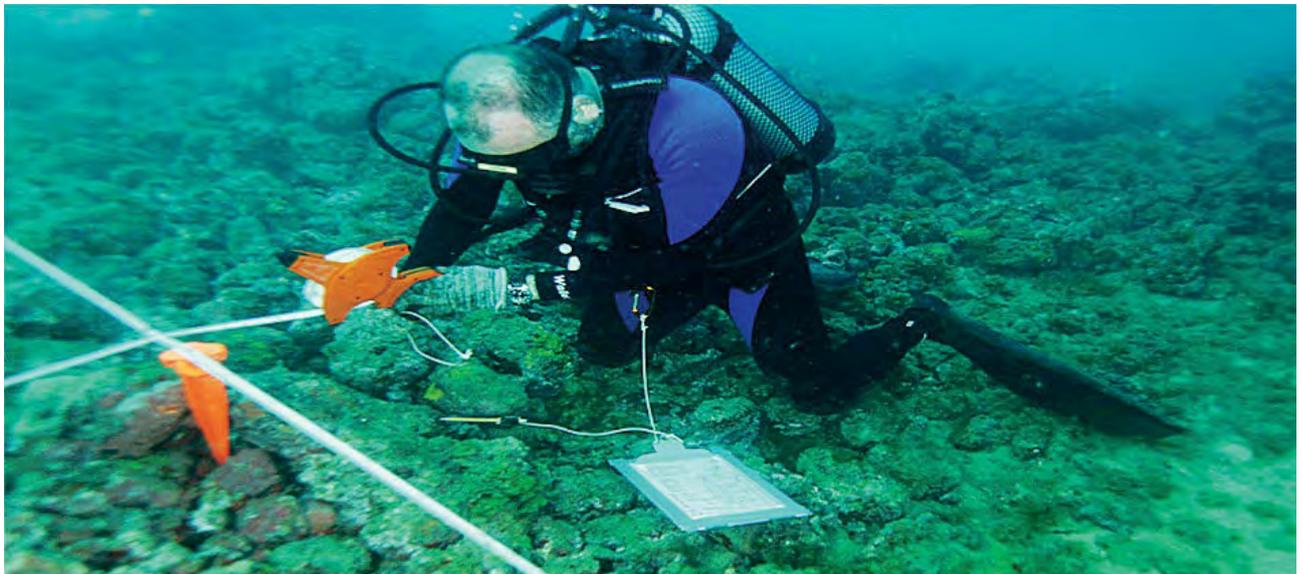
Os métodos utilizados na Arqueologia Subaquática dividem-se em dois: o **Registro Sistemático Direto** (com o uso do mergulhador) e o **Registro Sistemático Indireto** (com o uso de aparelhos geofísicos). Nos dois tipos de registros serão exemplificados apenas duas técnicas de forma sucinta. No primeiro as técnicas mais empregadas na localização ou planimetria de sítios são: círculos concêntricos; retângulos; linhas direcionais e triângulos equiláteros. No segundo os aparelhos geofísicos dominam o setor com o Sonar de Varredura Lateral (SideScan Sonar); o Magnetômetro de Prótons (MP); o Veículo Remotamente Controlado (ROV) e a Imagem Satélite (IS) (adaptado de Dean et al., 2000).

Os Círculos Concêntricos são utilizados quando se faz uma pesquisa de uma dada área, onde há algum artefato arqueológico evidenciado. Assim marca-se o ponto zero, próximo ao material identificado, inserindo um piquete no solo, contendo uma argola em sua extremidade que, por sua vez, estará talingada a um cabo de náilon

e, na outra extremidade (superfície), ficará uma boia sinalizadora no local facilitando a obtenção do ponto com GPS (adaptado de Dean et al., 2000).

A dupla de arqueólogos mergulhadores, por meio de um arganéu, fixará uma fita de fibra de vidro ao piquete (Fig. 13.5), em altura compatível com a acuidade visual e transparência da água, para visualizar objetos dispostos no leito marinho, estuarino ou dulcícola, distanciando-se um do outro, de acordo com a área perceptível de cada um. Será realizada uma prospecção em círculo, marcando a distância do achado em relação ao ponto zero e o rumo formado pela linha entre o ponto zero e o vestígio, bem como o seu azimute contrário (adaptado de Dean et al., 2000).

Os retângulos são empregados em áreas que são prospectadas para localização de vestígios que poderão redundar em sítios submersos (Fig. 13.6). A primeira medida é delimitar a área com um aparelho de sistema de posicionamento global GPS e inserir em cada aresta uma boia contendo a bandeira de mergulho (Alfa) em uma extremidade (superfície) ligando-a, por meio de um cabo com folga (uma vez que normalmente existe correnteza), a uma poita (adaptado de Dean et al., 2000).



**Figura 13.5** Arqueólogo efetuando planimetria de sítio arqueológico. **Fonte** Rodrigo Torres (2013).

Os quatro pontos serão unidos por cabos talingados às poitas que, por sua vez, serão mantidos rente ao solo por meio de pesos de chumbo de 1 kg. Se a área tiver 100 m de largura ou de comprimento, pode-se criar raias de 10 m, onde uma dupla de arqueólogos mergulhadores, nadando lado a lado, mas separados por 5 m de distância, de preferência, no sentido da corrente, farão a prospecção em distância do solo coerente com a transparência da água, acompanhados do fotógrafo mergulhador e de um auxiliar de mergulho (adaptado de Dean et al., 2000).

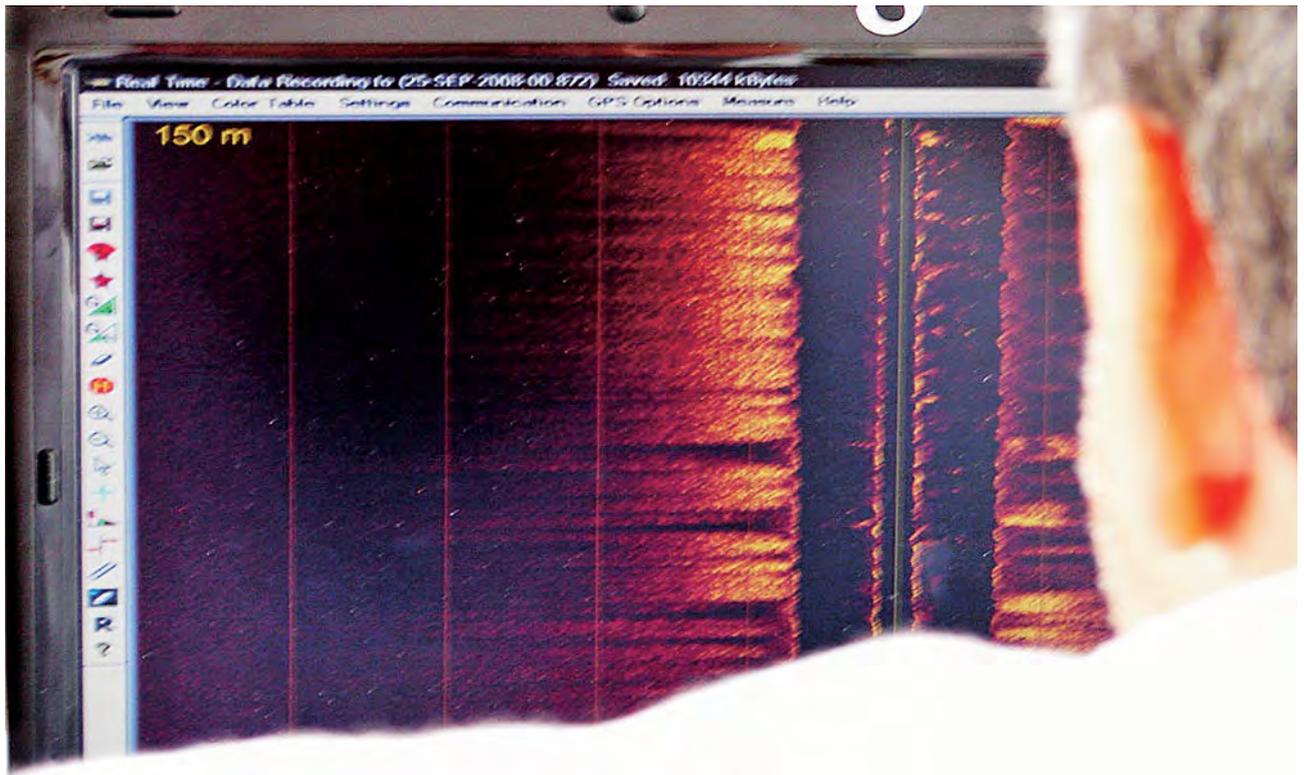
Em cada vestígio localizado o auxiliar de mergulho deixará um peso de chumbo com um cabo

talingado a uma boia de isopor, em cor previamente combinada para cada tipo de artefato, marcando assim a sua localização. A equipe seguirá o percurso até um dado ponto, marcando o mesmo com uma boia na cor vermelha, assumindo outra equipe a partir daquele ponto, sucessivamente, até a sua finalização (adaptado de Dean et al., 2000).

Em se tratando do Registro Sistemático Indireto, o mesmo é utilizado para cobrir grandes áreas onde há possibilidade da existência de sítios arqueológicos. É utilizado também nos trabalhos de Arqueologia de Contrato em que o cronograma é apertado ou porque a região é



**Figura 13.6** Arqueólogos efetuando trabalho subaquático em sítio arqueológico de naufrágio do galeão Utrecht, Salvador-BA. **Fonte** Rodrigo Torres (2013).



**Figura 13.7** Leitura de dados de SideScan Sonar em Porto de Galinhas-PE. **Fonte** Rios (2009).

adversa ao mergulho. Utiliza-se normalmente em profundidades superiores a 30 m ou em áreas que, por motivos quaisquer, ofereçam risco a equipe de mergulho. Nesses casos, efetuado o registro, só será empregada a equipe de mergulho para confirmar alterações do campo magnético obtido pelo Magnetômetro de Prótons, para confirmar Imagens Satélites, efetuar planimetria ou identificação detalhada de artefatos.

O Sonar de Varredura Lateral é empregado para a detecção de variações no relevo subaquático, onde um aparelho, rebocado a baixa velocidade (2 a 3 nós) por uma embarcação, emite feixes de ondas de tamanho variado, que seguem em direção ao fundo, são refletidas e captadas por um aparato e enviadas para a tela de computador (Fig. 13.7), onde são analisadas por especialistas no assunto (adaptado de Dean et al., 2000). O Magnetômetro de Prótons é empregado para a detecção de variações do

campo magnético do relevo subaquático local, em virtude da presença de materiais ferrosos, tais como âncoras, canhões, correntes e cascos de aço de navios.

## 6. PERSPECTIVAS FUTURAS

Os trabalhos científicos- que foram ou estão sendo desenvolvidos pela UFPE nos últimos cinco anos, utilizando a Arqueologia Subaquática como ferramenta- são voltados para Turismo Arqueológico, onde o naufrágio é um viés para o desenvolvimento da Educação Patrimonial e disseminação de uma mentalidade marítima junto à população que faz uso do mar (Souza et al., 2014; Ferreira et al., 2017; Vieira, 2018). Outras linhas de pesquisa dizem respeito às técnicas construtivas, tipologia e datação de canoas Pré-históricas e

Históricas (Lins, 2014; Lins & Rios, 2016), bem como a continuidade da construção de cartas arqueológicas de sítios Rituais, Depositários, Terrestres Submersos e de Naufrágios (Barbosa, 2019; Sobral, 2012; Ferreira, 2019; Silva, 2018; Coimbra, 2018).

A UFS tem diversificado bastante em termos de Arqueologia Subaquática com pesquisas voltadas para Arqueologia da Paisagem (Silva, 2017), Arqueologia Marítima (Porto, 2013; Amarante, 2015; Silva Amarante, 2019), sítios de naufrágio (Gusmão, 2015; Moreira, 2017), além de sítios rituais (Novaes, 2018), trabalhos metodológicos (Costa, 2013; Santos, 2013; Jesus, 2014; Rosa, 2015; Carvalho, 2017), bem como um viés patrimonial (Ferreira, 2013). Segundo o Prof. Gilson Rambelli, a perspectiva futura da pesquisa subaquática na UFS está voltada para o potencial que o Rio São Francisco oferece, nos vários vieses arqueológicos.

Em se partindo da premissa que em cada estado costeiro brasileiro existe no mínimo um porto, algumas marinas e iates clubes que necessitam de autorização da Marinha para construção de píeres, cais e trapiches (Marinha do Brasil, 2003), bem como licenciamento do órgão ambiental pertinente, a tendência natural é que, pelo menos, os 17 estados costeiros venham a ter, em um futuro não muito distante, o seu próprio Curso de Arqueologia com disciplinas voltadas para a Arqueologia Subaquática para suprir tal demanda da Arqueologia de Contrato mormente como ao advento da energia eólica no mar adjacente ao litoral nordestino.. Por outro lado, os estados providos de navegação interior e, conseqüentemente de portos e demais sistemas de esporte e lazer náuticos, também vão necessitar de arqueólogos subaquáticos para os propósitos descritos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, T.; MANTAS, V. **Arqueologia Marítima, Naval, Náutica e Subaquática: uma proposta conceitual**. Al – Madan (*Online*), Almada, n. 20, t. 1, p. 50-55, jul. 2015. Disponível em: [http://issuu.com/almadan/docs/al-madanonline20\\_1](http://issuu.com/almadan/docs/al-madanonline20_1). Acesso em: 15 out. 2018.
- AMARANTE, C. E. **Arqueologia marítima na Praia do Francês – Alagoas**. Tese (Doutorado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe. 2015.
- AMORIM, A. M. **Mapeamento e caracterização dos sítios arqueológicos costeiros do Piauí**. Iniciação Científica; (Graduando em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí, 2013. 17 p.
- BARBOSA, M. S. **Desvendando o naufrágio do Vapor Bahia, PE, Brasil (1887): o olhar da arqueologia subaquática**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. 104 p.
- BARBOSA, M. B. G. **Estudo de Caso de um Sítio Arqueológico Subaquático em Porto de Galinhas: Interações e Materialidade**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. 142 p.
- BASS, G. F. **Arqueologia Subaquática**. Lisboa: Editorial Verbo, 1969. 238 p.
- \_\_\_\_\_. *Bajo lossiete mares*. Barcelona: ArtBlume, 2006. 256 p.
- BAVA DE CAMARGO, P. F. **Arqueologia das fortificações oitocentistas da planície costeira Cananéia/ Iguape, SP**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas, Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2002. 208 p.
- \_\_\_\_\_. **Arqueologia de uma cidade portuária: Cananéia, séculos XIX-XX**. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 192 p.
- BRASIL. Lei nº 7.542, de 26 de setembro de 1986. **Dispõe sobre a pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas ou bens afundados, submersos, encalhados e perdidos em águas sob jurisdição nacional, em terreno de marinha e seus acrescidos e em terrenos marginais, em decorrência de sinistro, alijamento ou fortuna do mar, e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 1986. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L7542.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L7542.htm). Acesso em: 06. dez. 2018

BRASIL. Lei nº 10.166, de 28 de dezembro de 2000. Altera a Lei nº 7.542/86, que **dispõe sobre a pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas ou bens afundados, submersos, encalhados e perdidos em águas sob jurisdição nacional, em terreno de marinha e seus acrescidos e em terrenos marginais, em decorrência de sinistro, alijamento ou fortuna do mar, e dá outras providências**. Brasília, DF: Presidência da República, 2000. Disponível em: [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L10166.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L10166.htm). Acesso em: 06 dez.2018.

BRASIL. Ministério da Marinha e da Cultura. Portaria Interministerial nº 69, de 23 de janeiro de 1989. **Aprova as normas comuns sobre pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas e bens de valor artístico, de interesse histórico ou arqueológico, afundados, submersos, encalhados e perdidos em águas sob jurisdição nacional, em terrenos marginais, em decorrência de sinistro, alijamento ou fortuna do mar**. Brasília, DF: Ministério da Marinha e da Cultura, 1989. Disponível em: <http://memoria.cnpq.br/documents/10157/3daaedfe-de2c-4130-8ebe-cdf8d94bb64a>. Acesso em: 06 dez. 2018.

CALIPPO, F. R. **Os sambaquis submersos de Cananéia: um estudo de caso de arqueologia subaquática**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2004. 151 p.

\_\_\_\_\_. **Sociedade sambaqueira, comunidades marítimas**. Tese (Doutorado em Arqueologia), Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010. 311p.

CARVALHO, J. B. A. **Um barco esquecido na praia: Arqueologia e Simbologia do barco da Galileia**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2017. 92 p.

COIMBRA, L. C. **Fatores Causadores de Naufrágios no Litoral de Pernambuco**, Brasil, Século XVII. Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 71 p.

COSTA, M. J. N. **Arqueologia de Ambientes Aquáticos no Egito: uma proposta de pesquisa das sociedades dos oásis do período faraônico**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2013. 106 p.

CUNHA, L. F. C. **De volta ao passado, mergulhando sobre o Galeão Sacramento**. Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, v. 110, n. 4/5, p.31-40, 1990.

CUNHA, L. O. C. **Sítio do Galeão São Paulo: pesquisa arqueológica não é caça ao tesouro**. Revista Marítima Brasileira, Rio de Janeiro, v. 114, n 1/3, p.15-22, 1994.

\_\_\_\_\_. **Análise dos remanescentes esqueléticos recuperados em naufrágios da costa Brasileira: Galeão São Paulo (1652) e sítio PAPI – 01 – SC (Nau N. S. del Pillar – séc. XVII)**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2008. 106 p.

\_\_\_\_\_. **Manual de Arqueologia Subaquática: enfoque Brasil**. Rio de Janeiro: Nova Razão Cultural, 2009. 200 p.

DEAN, M.; FERRARI, B.; OXLEY, I.; REDKNAP, M.; WATSON, K. **ArchaeologyUnderwater: The NAS GuidetoPrinciplesandPractice**. London: Henry LingLtd./Dorset Press, 2000. 332 p.

DURAN, L. D. **Arqueologia Marítima de um Bom Abrigo**. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2008. 338 p.

FERREIRA, A. A. **Mergulhando no passado e desvelando o presente: A musealização do patrimônio subaquático revelando as matrizes culturais nas águas de Sergipe**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2013. 100 p.

FERREIRA, I. C. **Arqueologia Subaquática: estudo de caso do vapor de Baixo**, Recife, PE, Brasil. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2019. 91 p.

FERREIRA, I. C.; SOUZA, C. C. R. **Arqueologia Subaquática: linhas de pesquisa científica no Brasil de 1970 a 2014**. Cadernos do LEPAARQ, Pelotas, v. 14, n. 27, p. 219-234, jan./jun. 2017.

FERREIRA, I. C.; SILVA, J. J. S.; NASCIMENTO, E. S.; SOUZA, C. C. R. **Vapor Pirapama: uma perspectiva museológica**. Revista Noctua: Arqueologia e Patrimônio, Recife, v.1, p. 84-95. 2017.

FERREIRA, M. M. **Arqueologia Marítima do Rio Parnaíba, Piauí, Brasil**. Trabalho de Conclusão de Curso; (Graduação em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí; 2015. 61 p.

GASPAR, P. H. S. **Processos formativos de um sítio costeiro no Piauí: Geoarqueologia e zooarqueologia do sambaqui da baía**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí, 2011. 56 p.

GOLÇALVEZ, L. P. **Estudo tecnológico dos artefatos cerâmicos dos sítios arqueológicos do litoral do Piauí**. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí, 2016. 58 p.

GUIMARÃES, R. S. **Arqueologia em sítios submersos: estudo do sítio depositário da enseada da praia do Farol da ilha do Bom Abrigo, SP**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009. 291 p.

GUSMÃO, D. M. **Sítios arqueológicos de naufrágio na Baía de Todos os Santos, Salvador/BA: Estudo de caso do Clipper Blackadder**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras, 2015. 192 p.

JESUS, L. B. G. **Processos de formação arqueológicos de sítios de naufrágios: uma proposta sistemática de estudos**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2014. 101 p.

LINS, M. A **Arqueologia Marítima: a evolução da canoa monóxila em Pernambuco, Brasil (Séculos XV ao XX)**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2014. 152 p.

LINS, M.; RIOS, C. **Canoas monóxilas da Lagoa de Extremoz, RN, Brasil**. Revista Fumdhamentos, São Raimundo Nonato, v. 13, p. 94-107. 2016.

MARINHA DO BRASIL. Diretoria de Portos e Costas. Portaria nº 108/DPC, de 16 dezembro de 2003. **Normas da Autoridade Marítima para pesquisa, exploração, remoção e demolição de coisas e bens afundados, encalhados e perdidos (NORMAM - 10/DPC.)**. Rio de Janeiro: Marinha do Brasil, 2003. 20 p.

MELLO NETO, U. P. **O cabo de Santo Agostinho e a baía de Suape: Arqueologia e História**. Revista do Instituto Arqueológico, Histórico e Geográfico Pernambucano, Recife, v. 53, 1981. 327 p.

\_\_\_\_\_. **O galeão Sacramento (1668): um naufrágio do século XVII e os resultados de uma pesquisa de Arqueologia Subaquática na Bahia (Brasil)**. Revista Navigator- Subsídios para a História Marítima do Brasil, Rio de Janeiro, nº 13, p. 7-40, jun. /dez. 1977. 138 p.

MOREIRA, A. R. O. **O mar da Bahia: estudo do naufrágio da nau Nossa Senhora do Rosário e Santo André, Século XVII, Salvador, Bahia**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2017, 159 p.

MUCKELROY, K. **Maritime Archaeology**. London: Cambridge University Press, 2004. 272 p.

NEIVA, D. M. **A fauna arqueomalacológica dos sítios Seu Bode e Sambaqui da baía: uma abordagem zooarqueológica dos sítios dos conchíferos do litoral do Piauí (NE, Brasil)**.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí, 2011. 65 p.

NOVAES, L. C. N. **A morte visível e a vida invisível: um estudo sobre o assentamento de Exu e a Paisagem Sagrada da Enseada de Água de Meninos, Salvador (Bahia)**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras, 2013. 113 p.

NOVAES, L. C. **A borda do mar como um lugar cultural: Arqueologia de praias e a dialética étnico-marítima do patrimônio imaterial no sítio da Preguiça, Salvador/Bahia**. Revista de Arqueologia. v. 31, n 1, p 215-218. 2018.

OLIVEIRA, A. L. N.; CAVALCANTE, L.; AMORIM, D. A **arqueologia subaquática e o patrimônio submerso do litoral Pernambucano: breve história transatlântica**. Clio. Série Arqueológica (UFPE), Recife, v. 23, p. 65-81, 2008. 373 p.

OLIVEIRA, A. L. N.; SANTOS, J. L.; LUNA, S. C. A. de. **Na rota das navegações: análise do transporte marítimo na Ilha de Itamaracá nos séculos XVI e XVII**. Clio. Série Arqueológica (UFPE), Recife, v. 25, p. 119-138, 2010. 291 p.

PEREIRA, E. S.; RAMBELLI, G.; BAVA DE CAMARGO, P. F.; CALIPPO, F.R.; BARBOSA, C. A. P. **Arqueologia Subaquática na Amazônia – documentação e análise das gravuras rupestres do sítio Mussurá, rio Trombetas, Pará, Brasil**. Revista de História da Arte e Arqueologia, Belém, n. 11, jan./jun. p.109-126. 2009. 159 p.

PORTO, O. A. **Arqueologia Marítima/Subaquática da II Guerra Mundial: sua aplicabilidade no Brasil**; Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2013. 138 p.

RAMBELLI, G. **Arqueologia Subaquática: proposta para o Baixo Vale do Ribeira**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1998. 192 p.

\_\_\_\_\_. **Arqueologia subaquática do baixo vale do Ribeira, SP**. Tese (Doutorado em Arqueologia) – Museu de Arqueologia e Etnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003. 298 p.

RENFREW, C.; BAHN, P. **Arqueología. Teorías, Métodos y Práctica**. Madrid: Akal, 1993. 571 p.

RIOS, C. **Identificação arqueológica de um naufrágio localizado no lamarão externo do porto do Recife, PE, Brasil**. Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2007. 147 p.

\_\_\_\_\_. **Arqueologia subaquática: identificação das causas de naufrágios nos séculos XIX e XX na costa de Pernambuco.** Tese (Doutorado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. 295 p.

\_\_\_\_\_. **Subsídios para arqueologia subaquática: fatores causadores de naufrágios.** Revista Navigator, Rio de Janeiro, v. 6, p. 90-104, 2010. 139 p.

RIOS, C.; LAVALLE, H.; LINS, M.; SANTOS JÚNIOR, V. **A canoa monóxila pré-histórica da lagoa de Extremoz, RN, Brasil.** Revista Clio Arqueológica (UFPE), Recife, v. 30, n. 1, p. 78-91, 2015.

RIOS, C.; LINS, M. **A evolução da canoa monóxila em Pernambuco, Brasil (séculos XV ao XX).** Clio. Série Arqueológica (UFPE), Recife, v.31, p.58-80, 2016.

RIOS, C.; LINS, M. **Transporte Aquaviário na Sesmaria Jaguaribe nos séculos XVI E XVII.** 1 ed. Arqueologia de Engenheiros. Recife: Editora: UFPE. v. 2, p. 151-168, 2017.

RIOS, C.; SANTOS JUNIOR, V. **Arqueologia da Paisagem: a influência dos fatores cartográficos e hidrometeorológicos nos naufrágios do século XVI no mar adjacente ao porto do Recife, PE, Brasil.** Fundamentos, São Raimundo Nonato, v.12, p. 74-99, 2015. 210 p.

RIOS, C; VALLS, M. **Carta arqueológica dos naufrágios do litoral de Pernambuco: de 1503 a 1600.** Clio. Série Arqueológica (UFPE), Recife, v. 23, p. 10-24, 2008. 363 p.

ROSA, R. S. **Sergipe no contexto da segunda guerra mundial (1942): uma abordagem da arqueologia de ambientes aquáticos.** Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2015. 168 p.

SANTOS, L. F. F. D. **Nas águas do velho Chico: por uma arqueologia de ambientes aquáticos no Baixo Rio São Francisco - Sergipe/Alagoas.** Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2013. 118 p.

SANTOS, L. F. F. D. **Vapor de transporte de madeira: arqueologia marítima histórica da Revolta da Armada de 1893.** Tese (doutorado em Arqueologia- Universidade Federal de Sergipe, 2020, 319 p.

SILVA AMARANTE, C. E. **Relações marítimas na Baía de Todos os Santos no período do açúcar: os vestígios materiais submersos e seu contexto arqueológico.** Tese (Doutorado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2019. 160 p.

SILVA, F. J. L. **Naufrágios do litoral piauiense: cavoucando informações.** Trabalho de Conclusão de Curso; (Graduação em Arqueologia e Conservação de Arte Rupestre)- Universidade Federal do Piauí; 2013. 53 p.

SILVA, F. N. **Construção da Paisagem Aracajuana: Modernidade e suas redes marítimas em Sergipe.** Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe, 2017. 106 p.

SILVA, N. J. P. **Fatores Causadores de Naufrágios do Arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco, Brasil, Séc. XVI ao XXI.** Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Arqueologia) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018. 66 p.

SILVEIRA, C. F. **Arqueologia do Porto de Pelotas - Rio Grande do Sul: (1876-1940).** Dissertação (Mestrado em Arqueologia)- Universidade Federal de Sergipe- Aracajú. 2019. 285 p.

SOBRAL, P. P. D. **Localização de sítios depositários em mar aberto, estuários e rios litorâneos de Pernambuco entre 1516 e 2000.** Iniciação Científica. (Arqueologia)- Universidade Federal de Pernambuco, 2012. 60 p.

SOUZA, C. C. R.; HUTHER, A. F. M.; LINS, L. B.; MOURA, E. H. S. **Arqueoturismo na Corveta Camaquã: um museu em mar aberto.** Fundamentos, São Raimundo Nonato, v. 1, p. 134 – 145, 2014. 296 p.

UNESCO. **La convención de la Unesco sobre la protección del Patrimonio Cultural Subacuático.** Paris: UNESCO, 2001. 31 p.

VIEIRA, P. B. **Arqueoturismo Subaquático: estudo de viabilidade de implantação de um museu em mar aberto do vapor Pirapama, Recife, PE, Brasil.** Encontro Regional da Sociedade de Arqueologia Brasileira, Salvador-BA, (Comunicação oral). 2018.

# POLUIÇÃO AQUÁTICA

14

Maria Christina B. de ARAÚJO<sup>1</sup>  
Monica Ferreira da COSTA<sup>2</sup>  
Jacqueline S. SILVA-CAVALCANTI<sup>3</sup>  
Nilson SANT'ANNA JR<sup>3</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN

<sup>2</sup> Universidade Federal de Pernambuco - UFPE

<sup>3</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE



## 1. FONTES E TIPOS DE POLUIÇÃO DOS AMBIENTES AQUÁTICOS

*“Poluição da água é a alteração de suas características por quaisquer ações ou interferências, sejam elas naturais ou provocadas pelo homem (antropogênica) de forma direta ou indireta que resulte em efeitos adversos como prejuízo aos recursos vivos; prejuízos à saúde humana; impedimento da utilização da água para os fins adequados e redução das amenidades”* (Braga, 2002)

A definição formal de poluição é essencial na criação de regulamentos e no desenvolvimento de trabalhos preventivos e corretivos de suas consequências. No Brasil, a qualidade das águas é regida por Resoluções do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA Resoluções nºs 357 de 17/03/2005 e 430 de 13/05/2011). Nessas resoluções são estabelecidos os padrões mínimos de qualidade para as águas continentais, costeiras e marinhas, que são definidos em classes. Outros instrumentos legais de âmbito estadual e municipal também garantem a manutenção da integridade dos corpos hídricos costeiros e marinhos no Brasil. O país é, ainda, signatário de acordos internacionais com força de lei, como a Convenção Internacional para a Prevenção da Poluição por Navios (MARPOL 73/78). Outros instrumentos que asseguram a

integridade dos corpos hídricos são: a Constituição Federal de 1988, a Agenda 21 Brasileira e outras leis federais que cobrem o assunto – como a que estabelece as competências da Agência Nacional de Águas (ANA), por exemplo.

Segundo Pereira (2004), a qualidade dos ecossistemas aquáticos tem sido alterada em diferentes escalas, sobretudo nas últimas décadas, e o registro da poluição das águas continentais, costeiras e marinhas é sempre crescente. A chegada de poluentes nos ambientes aquáticos pode acontecer de forma direta ou indireta (Fig. 14.1). As principais vias de acesso da poluição são:

- > **Via atmosférica:** trocas gasosas, precipitação seca e úmida;
- > **Aporte continental:** escoamento superficial, rios/estuários, aporte pluvial e advecção da plataforma continental;
- > **Atividades produtivas e de lazer:** embarcações com e sem propulsão de carga e passeio, embarcações pesqueiras, despejo diretos e exploração mineral.

## Fontes de poluição para ambientes aquáticos

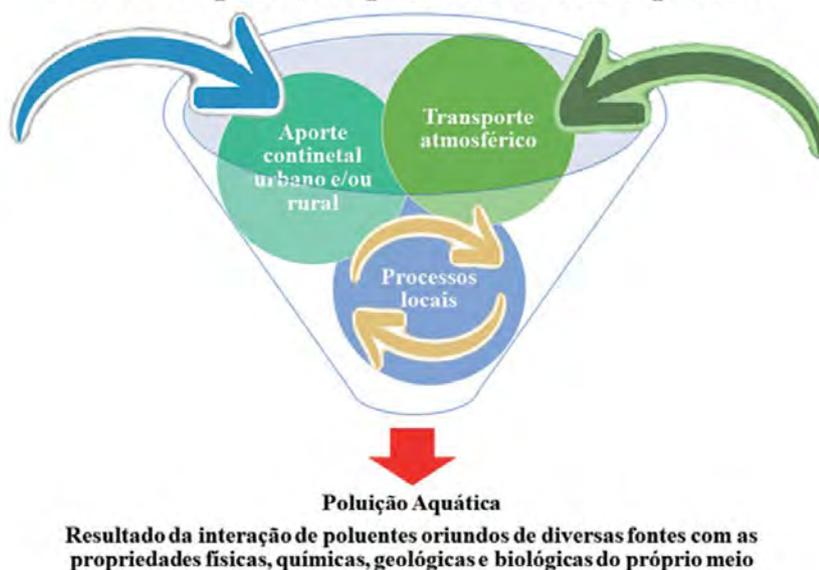


Figura 14.1 Fontes de poluição para os ambientes aquáticos.

Essas fontes de poluição também podem ser classificadas em:

**a) Pontuais:** são aquelas que têm origem definida e geralmente são mais fáceis de serem identificadas, avaliadas e controladas, pois os poluentes delas advindos se espalham de acordo com gradientes mensuráveis de concentração. Alguns exemplos: esgoto industrial e esgoto doméstico.

**b) Dispersas ou difusas:** se dá quando os poluentes atingem os corpos d'água de modo aleatório, não havendo possibilidade de estabelecer qualquer padrão de lançamento, seja em termos de quantidade, frequência ou composição. São facilmente identificadas e reguladas. No entanto, sua amplitude não permite que sejam contidas e remediadas facilmente. Muitas vezes fontes difusas são originadas através de diversas fontes pontuais cujas plumas de espalhamento se fundem formando uma área maior de influência. Alguns exemplos de poluição difusa são os lançamentos das drenagens urbanas, escoamento de água de chuva sobre campos

agrícolas e acidentes com produtos químicos ou combustíveis.

**c) Mistas:** aquelas que englobam características de cada uma das fontes anteriormente descritas.

A ação de cada uma das fontes de poluição resulta em certo grau de poluição no corpo hídrico atingido, que é mensurado através de características físicas, químicas e biológicas dos resultados das interações dos poluentes com a água doce, salobra ou salina ali existente. Esses, por sua vez, são descritos por parâmetros de qualidade das águas (geralmente padronizados). Em relação ao tempo de ação, as fontes de poluição podem ainda ser classificadas como:

**a) Agudas:** são aquelas de efeito pontual, restrito no tempo e/ou no espaço, mas de efeitos instantaneamente graves, e que levam a uma diminuição severa da qualidade ambiental em um curto período de tempo. Essa fonte geralmente cessa e dá aos ambientes aquáticos a oportunidade de recuperação, que pode ou não ser assistida pelo homem.

**b) Crônicas:** por serem de caráter contínuo são mais danosas, pois causam efeitos subletais que podem ser difíceis de detectar e tratar. Na maioria das vezes são mais comuns que as agudas e despejam contaminantes em pequenas taxas, porém continuamente.

Os poluentes podem seguir uma grande variedade de caminhos após sua chegada no ambiente aquático. Quando sofrem transformação apenas parcial, são denominados de conservativos. Poluentes conservativos causam graves problemas como a contaminação de sedimentos, animais e plantas. São exemplos de poluentes persistentes o DDT (diclorodifeniltricloroetano) e outros poluentes orgânicos sintéticos e o mercúrio. Os poluentes que decaem completamente são classificados como não conservativos, ou degradáveis. Frequentemente os poluentes degradáveis são produtos químicos que ao final de um tempo, são decompostos pela ação da luz solar, de outros componentes químicos presentes na água (**ex:** oxigênio dissolvido) ou de bactérias. São exemplos de poluentes degradáveis a matéria orgânica, algumas frações do petróleo, alguns sais inorgânicos.

Os principais compartimentos ambientais que acumulam os contaminantes são água, material particulado em suspensão, biota, sedimentos e atmosfera. Dependendo das características químicas do poluente e seu comportamento perante as características físicas, químicas e biológicas do compartimento ambiental contaminado, ele pode se acumular ali ou ser remobilizado para outro compartimento onde encontre maior afinidade química – muitas vezes determinada pela polaridade ou apolaridade.

A poluição de origem continental (escoamento superficial) é basicamente formada pelo aporte oriundo das bacias hidrográficas e o aporte pluvial (urbano e rural). Os rios atuam como vias de transporte de poluentes orgânicos e inorgânicos por longas distâncias. Especialmente ao atravessar cidades, esses cursos de água frequentemente

recebem uma grande diversidade de dejetos de origem doméstica, industrial ou através do aporte urbano sem prévio tratamento que finalmente chegarão aos ambientes costeiros e marinhos (SOS Mata Atlântica, 2017). Ou, ainda, ao percorrerem áreas rurais onde há modificação do ecossistema original por desmatamento ou para produção pecuária, agrícola ou agro-industrial, recebem cargas significativas de sólidos (erosão), nutrientes e poluentes. Essa falta de cuidados com o solo e de tratamento prévio dos dejetos compromete a saúde dos rios e introduz poluentes como metais pesados, poluentes orgânicos persistentes (POPs), resíduos sólidos entre outros. Ao chegar às regiões estuarinas, muitos rios já se encontram completamente comprometidos por altos índices de poluição.

O escoamento de chuvas, neblinas, garoas, geadas, furacões, precipitações de granizo formam as águas de drenagem superficial ou o aporte pluvial, cujos possíveis transtornos deveriam ser neutralizados pelos sistemas de drenagem ou esgotos pluviais. Os sistemas de drenagem pluvial são sistemas preventivos de inundações. Eles são classificados de acordo com suas dimensões em:

**a) Sistemas de microdrenagem ou sistemas iniciais de drenagem:**

incluem a coleta e afastamento das águas superficiais ou subterrâneas através de pequenas e médias galerias.

**b) Sistemas de macrodrenagem:** destinam-se ao escoamento final das águas escoadas superficialmente incluindo a coleta e condução das águas superficiais ou subterrâneas através de galerias e corpos receptores tais como canais e rios canalizados, inclusive as captadas pelas estruturas de microdrenagem.

O aporte pluvial em condições naturais alimenta os ecossistemas aquáticos através da lixiviação e percolação das águas da chuva. Com o crescimento urbano, esse sofre constantemente alterações na sua composição e no desvio do seu trajeto

natural em função da impermeabilização da infraestrutura urbana, desmatamento, erosão dos solos e ineficiência de outros sistemas de esgoto e resíduos sólidos. Esse fato provoca graves problemas nos próprios centros urbanos e nos ecossistemas aquáticos através de inundações, doenças, desoxigenação, eutrofização, danos tóxicos e estéticos. O que deveria ser somente chuva encontra elementos contaminantes no seu trajeto pelas cidades e terras agriculturáveis que terminam por atingir os corpos d'água adjacentes.

A composição do aporte pluvial, conseqüentemente, pode ser bastante diversificada, bem como o seu volume pode ser variável, pois apresenta um caráter intermitente, implicando em riscos ambientais difíceis de serem previstos, e não menos importantes do que lançamentos de esgoto doméstico e/ou industrial. O aporte pluvial urbano e o rural diferenciam-se pela especificidade de sua composição:

**a) Aporte pluvial urbano:** caracterizado pela contaminação por matéria orgânica, sólidos em suspensão e efluentes domésticos não tratados. Além de sedimento, pode conter alta concentração de nutrientes, despejos orgânicos que exigem alta DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), patógenos e substâncias tóxicas tais como pesticidas e fertilizantes de áreas residenciais, metais pesados e óleo, resíduos de indústrias e coliformes fecais de descarga animal, sendo classificado como fonte não pontual de diversos tipos de poluentes e contaminantes.

**b) Aporte pluvial rural:** geralmente é composto por pesticidas e nutrientes decorrentes dos excessos de práticas agrícolas equivocadas, da lixiviação e erosão do solo provocada pelo desmatamento.

Em toda a costa brasileira, a redução da vegetação de restinga, manguezal e de mata atlântica deu espaço ao histórico plantio da cana-de-açúcar que até hoje desnuda a zona costeira brasileira. Essa substituição da vegetação pelo plantio de cana-de-açúcar

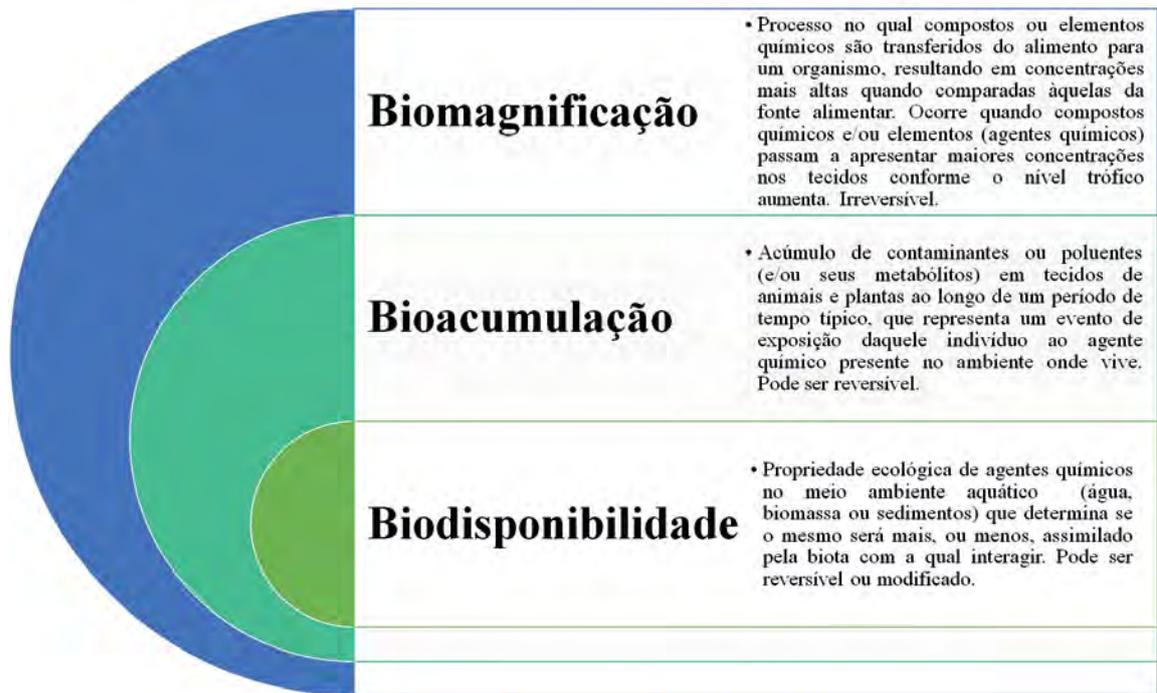
permite o carreamento de pesticidas e nutrientes que poluem e eutrofizam os corpos d'água (Telles, 2001). Dados demonstram que os problemas de drenagem são ampliados pela própria ineficiência, mau planejamento e defasagem dos sistemas de rede urbana, quando existentes, e dos outros sistemas de saneamento básico que incluem coleta e destino do lixo, que de forma inadequada circulam alcançando os canais, entupindo-os e contaminando suas águas. O crescimento desordenado das cidades e a falta de proteção das encostas pelo desmatamento e o uso limitado de instrumentos reguladores, importantes para o planejamento dos sistemas, são outros agravantes.

A maioria das cidades brasileiras densamente urbanizadas é caracterizada pela ineficiência de drenagem do aporte pluvial e, portanto, são comuns cenas dramáticas de enchentes a cada inverno, com um grande número de desabrigados e de vítimas. No entanto, apesar dos problemas e onerosos paliativos, a maioria das capitais e grandes cidades brasileiras não possui nenhum tipo de instrumento regulador que permita uma discussão coerente e sensata para o planejamento dos sistemas de drenagem. Permanece ainda um sistema insuficiente e obsoleto.

## 2. METAIS

Metais são elementos químicos encontrados na natureza que podem ser essenciais, quando na dose correta, ou tóxicos, quando em excesso. Sua chegada aos sistemas aquáticos ocorre naturalmente através de processos geoquímicos na superfície da Terra. Entretanto, a maior contribuição atual em termos de metais é atribuída às atividades humanas. Entre os metais mais tóxicos estão o mercúrio (Hg), o cádmio (Cd) e o chumbo (Pb).

Metais são descartados nos cursos d'água, na atmosfera e no solo após participarem em algum processo produtivo, desde sua mineração até o



**Figura 14.2** Metais presentes nos ambientes aquáticos, tanto na coluna d'água quanto nos sedimentos, podem estar em formas químicas **biodisponíveis**. Essas vão se **bioacumular** e algumas podem sofrer **biomagnificação** ao longo da teia trófica.

descarte inadequado de baterias de celular, por exemplo (Hatje et al., 2017). Essas quantidades se somam as naturalmente existentes na água e nos sedimentos. A poluição das águas por metais traço preocupa por ter caráter acumulativo (bioacumulação) e capacidade de biomagnificação ao longo da teia trófica (Fig. 14.2).

Todas as formas de vida são afetadas pela presença de metais, dependendo da dose (quantidade ingerida ao longo de um tempo determinado) e da forma química disponível. Muitos metais são essenciais à vida, desde bactérias até o ser humano, mas eles são requeridos em pequeníssimas concentrações, e podem danificar sistemas biológicos quando presentes em taxas maiores do que as necessárias. Quando no ambiente, ocorrem diversas reações químicas com os metais cujos produtos podem ser muito mais tóxicos, como é o caso do mercúrio. A capacidade desse elemento em formar espécies químicas diferentes é responsável

por sua distribuição geoquímica no ambiente, sua biodisponibilidade e o nível de toxicidade (Barletta et al., 2012).

O mercúrio é um contaminante global, com alto potencial de bioacumulação na cadeia alimentar. Apresenta grande toxicidade, e sofre biomagnificação em quase todas as cadeias alimentares costeiras e marinhas. Ele pode ser transportado pela atmosfera, água e biota, afetando áreas remotas longe de fontes poluidoras. A poluição das águas por mercúrio está associada especialmente à possibilidade de sua forma inorgânica  $Hg^{2+}$  ser metilada por bactérias e à complexação com compostos orgânicos dissolvidos que possibilita a manutenção de concentrações relativamente elevadas na coluna d'água e acesso preferencial à biota. Por ser lipossolúvel, o metilmercúrio atravessa membranas biológicas em geral, assim o trato digestivo de todos os animais (Costa et al., 2012). O mercúrio é, portanto, fortemente regulado por agências ambientais e de saúde.

### 2.1. Relato de caso: variação espaço-temporal dos níveis de contaminação por mercúrio em *Anomalocardia brasiliiana* (Gmelin, 1791) do estuário do Rio Goiana (PE/PB)

O estuário do Rio Goiana está localizado na divisa dos estados de Pernambuco e Paraíba (~7°S), e apresenta características paisagísticas bem preservadas que suportam atividades de pesca artesanal e extração dos mais diferentes recursos naturais (Barletta & Costa, 2009; Silva-Cavalcanti & Costa, 2009). As principais pressões antrópicas sobre este estuário são a sobrepesca de peixes (Barletta & Costa, 2009), crustáceos e moluscos (Silva-Cavalcanti & Costa, 2009), além da concentração de indústrias que despejam seus efluentes no estuário. Soma-se a isso, o intenso cultivo de cana-de-açúcar nas margens do rio, a aquicultura e a ausência de saneamento básico que também comprometem a qualidade ambiental deste estuário. A *Anomalocardia brasiliiana* (molusco pedra) é um molusco bivalve que ocorre nos sedimentos costeiros e estuarinos superficiais desde o Caribe até o Uruguai (Rios, 1985). Este bivalve representa um importante elemento da cozinha brasileira. Devido ao seu hábito filtrador, a espécie denota um grande potencial para investigação da contaminação por metais traço, em especial mercúrio.

O estudo desenvolvido por Silva-Cavalcanti (2011) objetivou determinar a distribuição da biodisponibilidade espaço-temporal do mercúrio total em uma planície de marés do estuário do Rio Goiana (PE/PB), utilizando a *A. brasiliiana* como bioindicadora, bem como avaliar a influência do tamanho e índice de condição desses organismos na absorção desse poluente. Segundo os resultados obtidos, a concentração de mercúrio total (Hg-T) encontrada nos tecidos dos organismos de *A. brasiliiana* do estuário do Rio Goiana variou de 0,06 a 0,18 mg/Kg<sup>-1</sup> de peso seco. Esses valores foram 100 vezes maiores que os encontrados por outros autores

para a mesma espécie. No estuário, diferenças na granulometria do sedimento podem ser um indicativo do aumento do valor da concentração do mercúrio total durante o final da chuva (meses de junho, julho e agosto), período no qual sedimentos de granulometria mais fina foram encontrados. A relação entre a poluição por mercúrio e a granulometria do sedimento já foi relatada em trabalhos anteriores; a concentração de mercúrio era maior nos locais onde havia a predominância da fração silte-argila do que nos sedimentos arenosos mais grosseiros. Os organismos que ocorrem em locais de sedimentos predominantemente arenosos absorvem metais da solução e de partículas em suspensão.

A contaminação de *A. brasiliiana* por mercúrio total foi  $4 \times 10^3$  vezes menor que os valores reportados para organismos aquáticos pertencentes a níveis tróficos superiores capturados no estuário do Rio Goiana por Barbosa et al. (2011). Apesar de ter sido registrada a contaminação de *A. brasiliiana* por mercúrio total neste trabalho, os valores reportados não representam perigo para a população que utiliza a carne esporadicamente como fonte de proteína. No entanto, para aqueles que a consomem diariamente, ao longo dos anos, a dose ingerida pode vir a causar prejuízos à saúde.

## 3. COMPOSTOS ORGÂNICOS

Atualmente, poluentes orgânicos têm despertado interesse especial em grande parte de pesquisadores e grupos de pesquisa, principalmente no Brasil onde a complexa logística de laboratórios bem como mão de obra especializada é bem reduzida. Este interesse reside no fato de se tratarem de compostos dos quais se tem pouco conhecimento a respeito do seu comportamento, de suas propriedades, e dos efeitos que pode causar em determinados compartimentos ambientais, como os encontrados em rios, lagos e estuários, de grande dinamismo.

Estudos sobre a origem, distribuição e comportamento de poluentes orgânicos, despertam um interesse especial. Esses estudos podem ser baseados em determinações de vários compartimentos ambientais como a coluna d'água, sedimento superficial ou mais profundo caso se deseje obter um histórico, na biota e também na atmosfera. Isto pode ser realizado de forma isolada ou conjunta, no entanto os sedimentos têm despertado maior atenção por ser um compartimento natural de deposição e acumulação destes compostos.

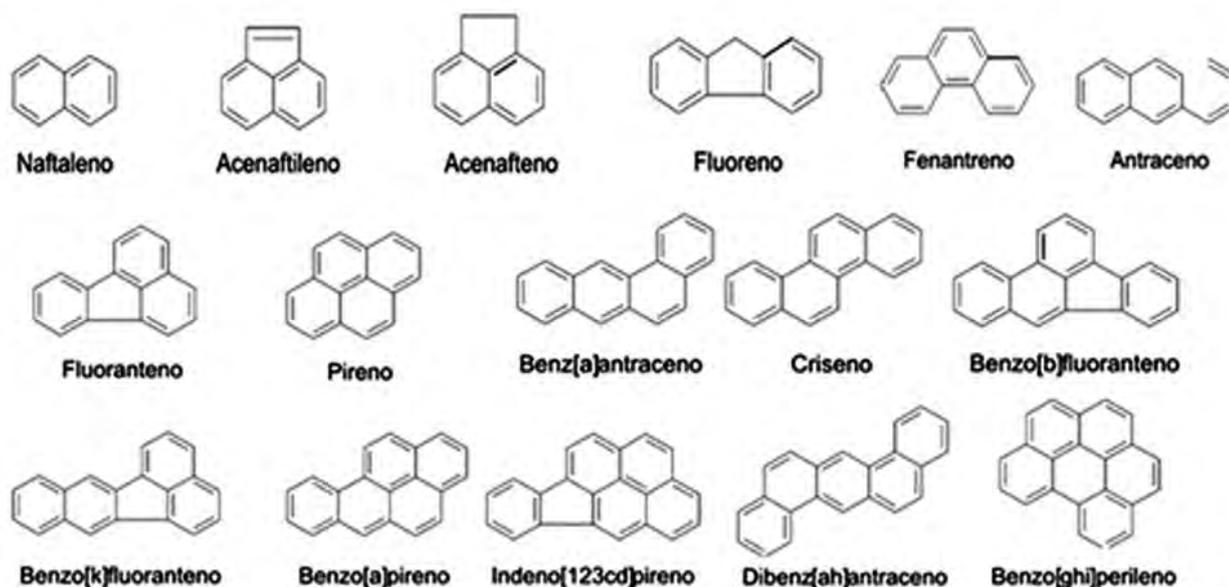
Existem várias fontes e formas de introdução de hidrocarbonetos no meio ambiente. Entre as principais fontes antropogênicas podem-se citar os derrames crônicos ou agudos de petróleo e seus derivados, produção de petróleo, navegação, combustão de combustíveis fósseis, queimada de florestas, lixiviação terrestre de regiões urbanas e agrícolas, efluentes domésticos e industriais, precipitação atmosférica e descargas de rios. Os hidrocarbonetos são encontrados frequentemente nos sedimentos marinhos na forma de misturas complexas originárias de múltiplas fontes, cuja identificação torna-se possível através da utilização de moléculas específicas, chamadas de hidrocarbonetos marcadores geoquímicos.

No ambiente aquático, os poluentes orgânicos podem sofrer diversas transformações físico-químicas. Estas transformações estão sujeitas as características do ambiente, da forma e da quantidade dos hidrocarbonetos introduzidos. Os principais processos envolvidos são a transferência para o sedimento, a incorporação pela biota, a degradação biológica e química, a solubilização, a dispersão física e a evaporação dos compostos. Poluentes químicos orgânicos lançados no ambiente podem causar efeitos adversos no homem e em outros organismos (Mittra et al., 1999). Dentre os poluentes orgânicos podemos destacar os Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos (HPAs), os Tensoativos e os Desreguladores Endócrinos (Defensivos Agrícolas).

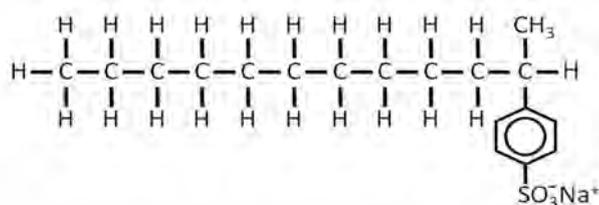
Os HPAs são constituídos por uma numerosa e diversa classe de moléculas orgânicas e constituem uma família de compostos caracterizada por possuírem dois ou mais anéis aromáticos condensados. Estas substâncias, bem como seus derivados nitrados e oxigenados, têm ampla distribuição e são encontrados como constituintes de misturas complexas em todos os compartimentos ambientais. HPAs possuem alta persistência no ambiente, baixa biodegradabilidade e são lipofílicos (Moreda et al., 1998). A Agencia de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA – *Environmental Protection Agency*) agrupou os 16 HPAs que apresentam comprovadas características mutagênicas e carcinogênicas (Meire et al., 2007) (Fig. 14.3).

Alguns fatores ambientais podem contribuir para a presença e/ou mobilização dos HPAs em determinados compartimentos ambientais. As características de determinados sedimentos podem influenciar na distribuição e concentração dos HPAs. Importantes fatores como composição química da matéria orgânica e a presença da fração mais fina do sedimento podem ser relevantes para um aumento da concentração destes compostos (Sant'Anna Jr. et al., 2010; Tavares et al., 2018).

Os Tensoativos, também chamados de surfactantes, são substâncias que provocam a diminuição da tensão superficial ou podem interferir na superfície de contato entre dois líquidos. Quando utilizados para fins domésticos são chamados de emulsionantes ou emulgentes, ou seja, substâncias que permitem conseguir ou manter a emulsão. São feitos de moléculas nas quais uma das partes é solúvel em água e a outra não. Um dos tensoativos aniônicos mais usados é o Alquilbenzeno Sulfonato Linear (LAS) (Fig. 14.4) (Scott & Jones, 2000)



**Figura 14.3** Os 16 HPA's prioritários classificados de acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (EPA 1987) com comprovadas características mutagênicas e carcinogênicas.



**Figura 14.4** Estrutura do alquilbenzeno sulfonato de sódio linear (LAS), biodegradável.

Também podem ser classificados de acordo com a carga hidrofílica em aniônicos, catiônicos, não-aniônicos, e zwitter-aniônicos. O principal tensoativo aniônico sintético surgiu na década de 1940, o alquilbenzeno sulfonato (ABS), a partir de precursores derivados do petróleo (benzeno e tetrâmero de propileno) (Penteado et al., 2006). O ABS teve grande aceitação no mercado de detergentes devido ao melhor desempenho quando comparado ao do sabão, sendo consumido mundialmente em larga escala. O uso deste produto provocou um problema sério nas estações de tratamento de esgoto, devido à formação de camadas densas de espumas. As espumas dificultam

os processos de aeração nos tanques de tratamento de efluentes, e levam ao transporte de inúmeros poluentes e bactérias a longas distâncias (Penteado et al., 2006) chegando a provocar estragos de enormes magnitudes (econômico e social) nas cidades, como a que frequentemente aparece no Rio Tietê, em São Paulo (<https://organicsnewsbrasil.com.br/meio-ambiente/analise-revela-que-espuma-do-rio-tiete-e-toxica/>).

De acordo com a *Environmental Protection Agency* (EPA), desregulador endócrino pode ser definido como “agente exógeno que interfere na síntese, secreção, transporte, ligação, ação ou eliminação de hormônio natural nos corpos que são responsáveis pela manutenção, reprodução, desenvolvimento e/ou comportamento dos organismos” (Petrovic et al., 2001). Uma classe de compostos considerados desreguladores endócrinos são alguns produtos utilizados na agricultura como pesticidas e fungicidas. Estes produtos, também conhecidos como agrotóxicos, são defensivos agrícolas de ação tóxica que têm como ingredientes ativos compostos químicos formulados para controlar ou erradicar

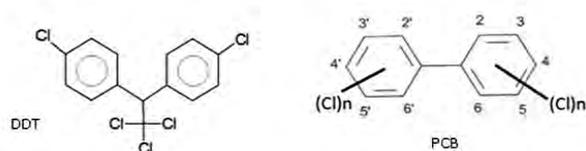
vetores de doenças animais, vegetais ou humanas, pragas (insetos, fungos, bactérias, ácaros) e ervas daninhas.

Os defensivos agrícolas são classificados em grupos, de acordo com o tipo de praga que combatem e muitos destes agentes são produtos químicos sintéticos. Dentre estas criações estão os denominados compostos organoclorados (OCs).

Os OCs são estruturas predominantemente cíclicas com elevado peso molecular, bastante empregadas em práticas agrícolas, no controle de vetores e em atividades industriais. Incluem alguns inseticidas, fungicidas, herbicidas, químicos industriais. A saga dos OCs teve início no período da Segunda Grande Guerra, com a utilização do Diclorodifeniltricloroetano (DDT) (Fig. 14.5), o praguicida mais conhecido e empregado no mundo, usado no passado para conter as pragas na agricultura e também para combater alguns vetores de doenças.

Outros praguicidas OCs foram criados depois do DDT, e os mais conhecidos são hexaclorobenzeno (HCB), toxafeno e a família dos ciclodienoclorados (Clordano, Aldrin, Dieldrin, Endrin, entre outros), considerados os mais tóxicos entre os OCs além das Bifenilas Policloradas (PCBs) – utilizado como óleo isolante em transformadores elétricos (Silva, 2009).

Os PCBs possuem uma estrutura química formada por dois anéis benzênicos com um número variado de átomos de cloro ligados aos carbonos. A fórmula química dos PCBs pode ser representada como  $C_{12}H_{10-n}Cl_n$ , onde  $n$  é o número de átomos de cloro entre 1 e 10 (Fig. 14.5).



**Figura 14.5** Estruturas químicas de um DDT e um PCB.

Os principais pesticidas OC são chamados Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs) devido a sua persistência aos processos naturais de degradação. Eles foram reunidos numa lista de 12 substâncias altamente persistentes e tóxicas ao meio ambiente, são eles: Aldrin, Endrin, Dieldrin, Clordano, DDT, Heptacloro, Hexaclorobenzeno, Mirex, Toxafeno, PCB, Dioxina e Furano.

O uso do DDT foi banido na maioria dos países a partir da década de 1970, quando foram constatados alguns impactos negativos em organismos vivos. A maioria dos outros praguicidas organoclorados veio a sofrer o banimento ou teve seu uso restringido também a partir da década de 1970. No Brasil, vários dos pesticidas clorados foram proibidos desde 1985, no entanto, o uso indiscriminado associado à importação clandestina de alguns produtos não permite que esses produtos desapareçam definitivamente de nossas lavouras.

### 3.1. Relato de caso: hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em sedimentos superficiais na Baía de Todos os Santos – Nordeste do Brasil

Na zona costeira da Bahia (a mais extensa do litoral brasileiro) destaca-se a Baía de Todos os Santos (BTS); uma das maiores do Brasil, com 1.086 km<sup>2</sup> de extensão. A BTS possui uma grande importância econômica e histórica regional. Está submetida a fortes impactos, sendo receptora de grande carga de compostos químicos atmosféricos e continentais resultantes das atividades industriais instaladas no seu litoral. Sant'Anna Jr. et al. (2010) investigaram a presença de 24 HPAs em 18 amostras de sedimentos superficiais de ambiente marinho, nas zonas de infra e mesolitoral da BTS, para identificar as possíveis fontes desses compostos e avaliar os impactos causados.

Os resultados indicaram que os HPAs encontrados nos sedimentos superficiais coletados na BTS são prioritariamente de origem pirolítica (processos

de combustão), sugerindo uma forte influência de processos industriais e urbanos para a área de estudo. A presença de HPAs de Baixa Massa Molecular e metilados também sugere que atividades de produção, transporte e refino de petróleo contribuem para a contaminação do ambiente. A maior concentração do total de HPAs encontrada foi na área de Saubara (7221,3 ng/g massa seca), e a menor concentração foi verificada na Ilha de Cajuíba (48,6 ng/g massa seca). Apesar das regiões entre marés serem mais vulneráveis ao aporte de contaminantes oriundos do continente os resultados encontrados em sedimentos de infralitoral apresentaram características de contaminação semelhantes aos verificados no mesolitoral indicando que o movimento das marés exerce grande influência na distribuição de HPAs na BTS.

De acordo com critérios estabelecidos pela literatura científica internacional, os sedimentos da BTS apresentam um grau de contaminação que vai de baixo a alto, o que pode comprometer a sua qualidade toxicológica podendo causar efeitos adversos nos organismos que dependam deste substrato para o seu desenvolvimento ou sua sobrevivência.

#### 4. EFLUENTES INDUSTRIAIS

Qualidade de água é uma medida que informa se uma determinada fonte de água será capaz de suprir as necessidades de uso às quais se destina. As indústrias, assim como muitos outros usos da água requerem fornecimento de água relativamente limpa para seus processos internos (Soares et al., 2006). No entanto, após o uso, nem sempre devolvem essa água com qualidade compatível aos corpos d'água receptores. Os efluentes industriais entram nos mananciais a partir de vários tipos de fontes: fontes pontuais (especialmente descargas de águas residuais), fontes não pontuais, fontes difusas e também deposição atmosférica (Soldan, 2003).

A origem do efluente define bem sua composição. De acordo com a NBR 9800/1987 da ABNT (1987) e a Resolução Nº 430/11 do CONAMA, efluente industrial pode ser definido como: *“despejo líquido proveniente do estabelecimento industrial, compreendendo efluentes de processo industrial, águas de refrigeração poluídas, águas pluviais poluídas e esgoto doméstico”*.

Os efluentes industriais possuem características próprias e vão depender dos processos industriais ao qual estão associados. Suas características químicas, físicas e biológicas variam de acordo com o ramo de atividade da indústria a que estão associados, o tipo de manufatura, matérias-primas utilizadas, etc. O exemplo claro é o da indústria da carcinicultura, intensa no litoral do Rio Grande do Norte, onde os efluentes possuem uma composição predominantemente de matéria orgânica, onde 65% do Nitrogênio se dissolvem quando atingem o ambiente aquático e 65% do Fósforo se aderem ao material particulado da coluna d'água (Henry-Silva & Camargo, 2008). Este excesso de nutrientes traz consequências graves para o equilíbrio do ambiente.

Os efluentes industriais também são a principal fonte de contaminação por metais pesados. Indústrias metalúrgicas, de tintas, têxteis, cerâmicas, químicas, alimentícias, de cloro, de plástico, dentre outras, utilizam uma gama de metais em suas linhas de produção e acabam lançando parte deles em cursos de água. Os metais pesados não podem ser destruídos e são altamente reativos do ponto de vista químico, podendo ser incorporado ao tecido biológico presente nos ambientes contaminados. Normalmente apresentam-se em concentrações muito pequenas (Farias et al., 2007) e podem estar associados a compostos organometálicos. Os recentes casos acontecidos nas cidades de Mariana e Brumadinho, ambas em Minas Gerais, atingidas por rejeitos da indústria mineradora nos mostra o quão perigoso é (para o meio ambiente e a sociedade) um tratamento inadequado para os efluentes.

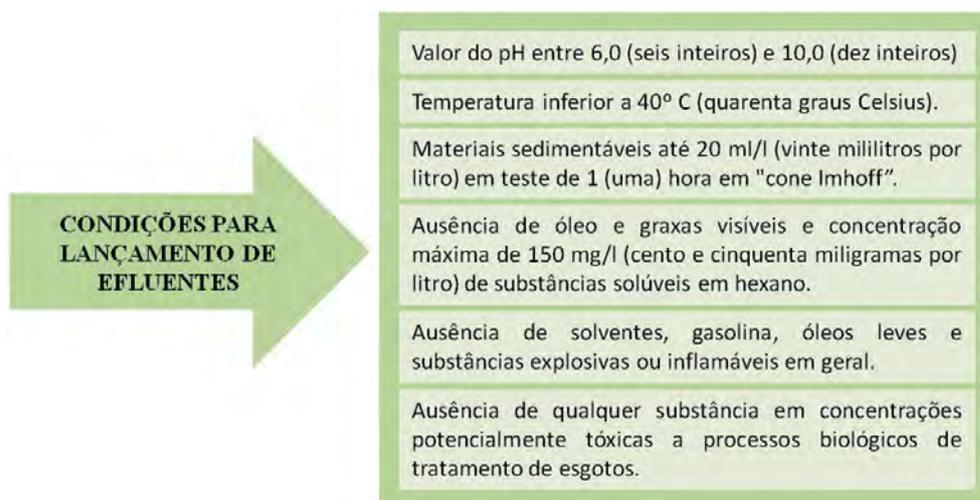
Para caracterizar um efluente é importante um levantamento de índices, necessários para definir o estado do ambiente. Os parâmetros a serem avaliados podem variar dependendo da região e do órgão regulamentador. A resolução Nº 357, de 17 de março de 2005 do CONAMA dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. Outro exemplo, o artigo 19A do Decreto 8468/76 que regulamenta a Lei Nº 997, de 31 de maio de 1976, que dispõe sobre a prevenção e o controle da poluição do meio ambiente no estado de São Paulo, impõe que os efluentes de qualquer fonte poluidora somente poderão ser lançados em sistema de esgotos, provido de tratamento e obedecendo a determinadas condições (Fig. 14.6).

O tratamento de efluente industrial ideal é aquele indicado de acordo com o tipo de carga poluidora e a presença de contaminantes presentes no mesmo. Os processos de tratamento de efluentes podem ser classificados em físicos, químicos e biológicos, e seu emprego depende da natureza dos poluentes a serem removidos.

Os processos físicos utilizam o método de filtração em areia ou membranas para remover a matéria orgânica e inorgânica em suspensão e reduzir ou eliminar a presença de microrganismos. Os processos físicos também são utilizados com a finalidade de desinfecção, tais como a radiação ultravioleta e podem remover os sólidos em suspensão sedimentáveis e flutuantes utilizando o gradeamento, peneiramento, caixas separadoras de óleos e gorduras, sedimentação e flotação.

Nos processos químicos são utilizados produtos para retirada de poluentes, tais como: agentes de coagulação, floculação, neutralização de pH, oxidação, redução e desinfecção em diferentes etapas dos sistemas de tratamento. Conseguem remover os poluentes por meio de reações químicas, além de condicionar a mistura de efluentes que será tratada nos processos subsequentes. Seus principais processos são:

- > Clarificação química (remove matéria orgânica coloidal, incluindo coliformes);
- > Eletrocoagulação (remove matéria orgânica, incluindo compostos coloidais, corantes e óleos/gorduras);



**Figura 14.6** Alguns padrões físico-químicos determinados pelo governo de São Paulo para o lançamento de efluentes.

- > Precipitação de fosfatos e outros sais (remoção de nutrientes), pela adição de coagulantes químicos compostos de ferro e ou alumínio;
- > Cloração para desinfecção;
- > Oxidação por ozônio, para a desinfecção;
- > Redução do cromo hexavalente;
- > Oxidação de cianetos;
- > Precipitação de metais tóxicos;
- > Troca iônica.

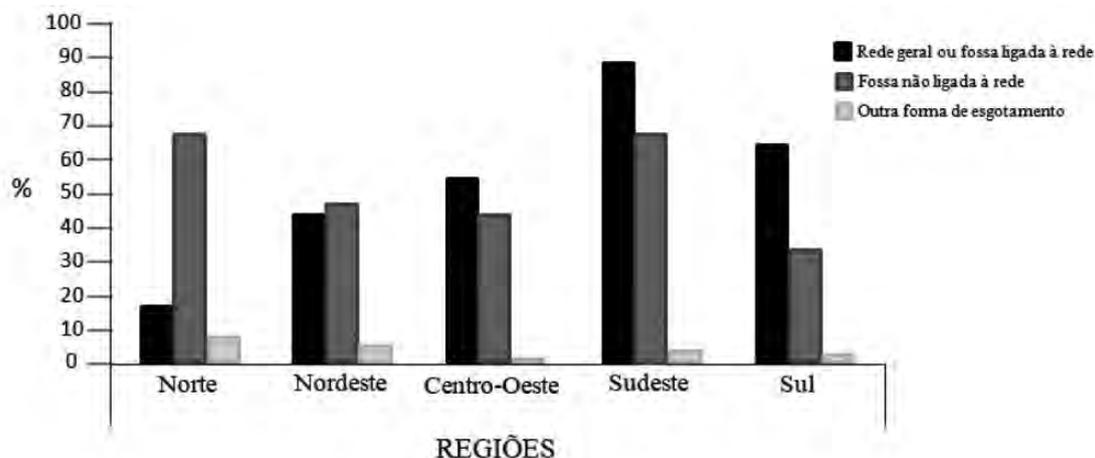
O principal objetivo do tratamento biológico é remover a matéria orgânica dissolvida e em suspensão e transformá-la em sólidos sedimentáveis (flocos biológicos) e gases. Basicamente, é utilizado em efluentes provenientes de residências, edifícios comerciais, indústrias, instituições ou quaisquer edificações que contenham banheiros e/ou cozinhas, dispostos em fossas ou tanques de acúmulo. A composição desses efluentes inclui sólidos suspensos, sólidos dissolvidos, matéria orgânica, nutrientes (nitrogênio e fósforo) e organismos patogênicos (vírus, bactérias, protozoários e helmintos). Os

principais processos são o aeróbico, o anaeróbico e processos facultativos (filtros biológicos, biodiscos e biocontactores).

## 5. ESGOTOS

O Brasil possui 17 estados costeiros. A maioria das capitais desses estados são cidades litorâneas, algumas com elevada densidade populacional. O país não conta com saneamento básico adequado; as melhores condições são encontradas apenas nas regiões Sudeste e Sul (Fig. 14.7). A maior parte dos esgotos, tanto urbanos quanto industriais, é lançada diretamente nos rios que cortam as cidades brasileiras, atingindo facilmente estuários e praias.

No Nordeste, e mais precisamente em Pernambuco, a situação não é diferente. Segundo a Companhia Pernambucana de Meio Ambiente (CPRH) cada uma das 13 bacias hidrográficas perenes do estado (todas litorâneas) apresenta algum nível de poluição. Os rios pernambucanos considerados mais poluídos são o Beberibe, o Jaboatão, o Igarassu (depois que atravessam a área urbana) e o Capibaribe. O Rio Capibaribe, cuja bacia hidrográfica atravessa 42 municípios (dez núcleos urbanos), vem



**Figura 14.7** Percentual de domicílios segundo a forma de esgotamento sanitário. **Fonte** PNAD Contínua (IBGE) (2016).

sendo afetado pesadamente tanto pelo lançamento de esgotos domésticos, como pelo acúmulo de lixo jogado diretamente nele, ou levado até ele pela chuva. Só em Recife existem cerca de 20 canais que cortam a cidade em diversos pontos e alimentam o rio com toda sorte de resíduos. Para se ter uma idéia da dimensão do problema, vale ressaltar que apenas em um pequeno trecho no centro da cidade, a EMLURB retira mensalmente 4,5 toneladas de detritos que ficam encalhados nas margens do rio.

O esgoto consiste em uma mistura complexa de detritos humanos, água e compostos químicos derivados de produtos de uso doméstico e/ou industrial (Montone & Bicego, 2008). A poluição orgânica decorrente do lançamento de esgotos próximo ao litoral pode gerar a ocorrência de processos de eutrofização, pelo qual as águas se tornam mais ricas em nutrientes dissolvidos, utilizados no crescimento de plantas aquáticas, como algas. Os nutrientes têm origem na decomposição da matéria orgânica oriunda dos esgotos e de atividades agropecuárias e agrícolas que muitas vezes também ocorrem em áreas costeiras. Entre os principais componentes da matéria orgânica estão o nitrogênio e o fósforo.

Os ecossistemas naturais têm uma capacidade própria de decompor até certo limite a matéria orgânica gerada pelas atividades humanas. O problema começa a existir quando a entrada de compostos orgânicos passa a ser maior que a capacidade que os ecossistemas aquáticos possuem para degradá-los. O excesso de nutrientes pode gerar proliferação maciça de algas e dinoflagelados cuja morte e decomposição consomem o oxigênio dissolvido na água e liberam grandes quantidades de toxinas, capazes de causar a mortandade de peixes e outros organismos (Oliveira & Molica, 2017). Esse problema pode resultar em prejuízos econômicos para populações ribeirinhas que utilizam a pesca como meio de sobrevivência. A quantidade de esgoto lançado pode ou não ser assimilado pelo corpo d'água, dependendo da quantidade lançada, vazão, e outros fatores.

A quantificação do consumo de oxigênio em um ambiente poluído pelo lançamento de esgotos normalmente é determinada através da Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), a qual representa a quantidade de oxigênio consumida por microrganismos que realizam a degradação de compostos orgânicos. A DBO é um método indireto para quantificação da matéria orgânica presente no corpo d'água, sendo um parâmetro de fundamental importância na caracterização do grau de poluição de um corpo hídrico.

Além de problemas relacionados com a eutrofização dos corpos hídricos, esgotos também podem introduzir organismos patogênicos diretamente nos ambientes aquáticos ou terrestres.

### 5.1. Patógenos em águas naturais

Uma grande variedade de organismos considerados patogênicos (vírus, muitas bactérias, além de vários protozoários e vermes) é encontrada em fezes e urina de humanos, assim como de outros animais. Quando introduzidos no ambiente, o contágio depende do encontro com o patógeno, de sua entrada no corpo e de que sua dose seja suficiente para superar os mecanismos de defesas naturais do organismo. Dentro dessas circunstâncias, uma infecção pode se desenvolver. As chamadas “doenças de veiculação hídrica” ocorrem principalmente pela ingestão dos patógenos que estão presentes na água utilizada para beber. Mas a ingestão pode ser também acidental, por exemplo, em atividades de contato primário, como o banho em rios ou no mar. Dados da Organização Mundial de Saúde (OMS) indicam que 70% das doenças são provenientes do contato com a água contaminada. Essa vulnerabilidade é aumentada principalmente nas metrópoles densamente povoadas nos países em desenvolvimento, onde vive a maior parte da população mundial.

No Brasil é frequente a ocorrência de ligações clandestinas de esgotos às tubulações



**Figura 14.8** Línguas negras em praias no litoral brasileiro. **Fontes A)** <https://www.bandnewsfmrio.com.br/editorias-detahes/orlas-da-zona-sul-amanhecem-com-lingua-negra>. **B)** <https://g1.globo.com/rn/rio-grande-do-norte/noticia/2020/11/09/lingua-negra-invade-areia-da-praia-do-meio-em-natal.ghtml>.

destinadas ao escoamento de água pluvial. Esse fato é exemplificado pelo aparecimento das conhecidas “línguas negras” em praias do país (Fig. 14.8). Essa prática propicia a entrada de patógenos no ambiente costeiro, acarretando o comprometimento da água e da areia das praias, com consequências óbvias para os usuários.

A avaliação da qualidade da água balnear (utilizada para recreação) é realizada através da presença de coliformes em amostras de água. As bactérias do grupo coliformes não são normalmente patogênicas, mas são organismos de presença obrigatória e em grande quantidade, nos intestinos humanos e, portanto, na matéria fecal. Calcula-se que um ser humano adulto elimina de 50 a 400 bilhões dessas bactérias. Assim sendo, sua presença permite detectar a presença de fezes na água em concentrações extremamente diluídas, dificilmente verificáveis pelos métodos químicos correntes, e consequentemente pode se inferir nos riscos desse corpo d’água a saúde humana.

No entanto, mesmo para a água classificada como de uso recreacional, os níveis que a consideram segura não implicam na ausência completa de patógenos, e muitas vezes suas concentrações têm estado acima dos limites, causando diversos problemas de saúde mesmo nas nações economicamente desenvolvidas, onde as condições sanitárias e práticas de descarte de esgoto são superiores as usadas em nações de

segundo e terceiro mundo. A maioria das empresas de tratamento de esgoto não são designadas para remover esses organismos das águas descartadas, o que requer, por sua vez, instalações caras.

## 5.2. Patógenos na areia das praias

O mesmo esgoto que causa contaminação da água das praias também pode contaminar a areia. Fatores como efeitos das marés, descarga de esgoto sanitário, mudança de estação do ano, presença de animais e o número de banhistas têm sido apontados como contribuintes para a sobrevivência e dispersão de microrganismos patogênicos em areia de praia (WHO, 2003). Entre as doenças que podem ser causadas pela areia contaminada estão o bicho geográfico, a hepatite, a toxoplasmose, distúrbios gastrintestinais, verminoses e micoses. Fungos são frequentemente encontrados na areia e sua sobrevivência é maior do que bactéria entérica, devido à sua capacidade de formar esporos resistentes (WHO, 2003). Há sugestões de que a presença de fungos está relacionada com resíduos sólidos deixados pelos banhistas.

Em um estudo realizado com areia de 33 praias da costa de Portugal ocorreu o isolamento de leveduras em 25% das amostras de areia coletadas, sendo que destas 67% pertenciam a espécies do gênero *Candida*. Destas, 60% foram positivas para as espécies consideradas como potencialmente

patogênicas, especialmente para indivíduos imunocomprometidos (Sabino et al., 2011). Em outro estudo que avaliou a qualidade sanitária de água e areia das praias da Baía de Guanabara, no estado do Rio de Janeiro, foram encontrados fungos em 88% das amostras de areia úmida e areia seca, sendo que para as leveduras a ocorrência foi de 44%, das quais 60% foram encontradas nos pontos de areia seca e 40% encontradas nos pontos de areia úmida (Rego, 2010).

### 5.3. Relato de caso: isolamento e identificação de leveduras na areia da praia de Ponta Negra, Natal-RN

A praia de Ponta Negra é o principal cartão postal da cidade de Natal (RN), concentrando uma elevada atividade turística (Furtado, 2005). A orla de Ponta Negra possui em toda a sua extensão um grande número de hotéis, bares e restaurantes. Nessa praia há poucas e ineficientes medidas por parte do Poder Público no que se refere ao saneamento da região, uma vez que são visíveis os escoamentos de água escura que descem por tubulações em frente aos prédios localizados na orla.

Um estudo desenvolvido por Zuza-Alves (2016), avaliou a presença de leveduras na areia da Praia de Ponta Negra. Amostras de areia foram coletadas no verão e no inverno.

Os resultados apontaram alta incidência desses organismos. Um total de 185 leveduras ambientais foi obtido, sendo 85 (46%) coletadas no verão e 100 (54%) no inverno. O gênero *Candida* foi o que apresentou maior ocorrência (78,62%), seguido pelo gênero *Trichosporon* (7,58%). Várias espécies patogênicas do gênero *Candida* foram isoladas, entre elas, *C. albicans*, *C. tropicalis*, *C. parapsilosis*, *C. glabrata*, *C. krusei*, *C. catenulata* e *C. guilliermondi*. Dentre as espécies do gênero *Candida* identificadas, *C. albicans* é a que mais se destaca como agente etiológico de infecções, que vão desde dermatites simples até infecções

invasivas. Considerando-se o fato de que crianças pequenas passam grande parte do tempo de lazer em contato direto (inclusive oral) com as areias das praias, há um alto risco de desenvolvimento de infecções.

A Resolução CONAMA Nº 274/2000, que dispõe sobre a balneabilidade de praias, recomenda aos órgãos ambientais a avaliação das condições parasitológicas e microbiológicas da areia para futuras padronizações. No entanto, estudos focando a poluição da areia das praias são bem mais recentes do que os relativos à balneabilidade da água; dessa forma, há um consenso entre os pesquisadores sobre as dificuldades para o estabelecimento de padrões de qualidade sanitária da areia. Ainda não existe legislação consolidada sobre a qualidade sanitária de areia de praia que esteja em vigor em algum país (Boukai, 2005). No entanto, se algumas normas vigentes fossem cumpridas, principalmente no que diz respeito à proibição da presença de animais domésticos e ao manuseio adequado do lixo, haveria uma redução na poluição de areia das praias, com minimização do risco de transmissão de doenças aos seus frequentadores.

## 6. LIXO

De uma forma geral, o lixo corresponde a todos os resíduos manufaturados ou processados gerados pelas atividades humanas e que aparentemente perderam a utilidade. Esses materiais, tipicamente inertes, chegam aos ambientes naturais por inúmeras fontes, normalmente após o descarte irregular. Os rios são os principais sistemas de transporte de resíduos, especialmente quando atravessam áreas urbanas sem sistemas de saneamento adequados. Estima-se que, em escala global, até 80% do lixo encontrado em praias chega à costa através dos rios próximos, dependendo dos padrões de circulação das águas costeiras (CMIO, 1999).

A questão do gerenciamento dos resíduos sólidos, tanto nos continentes quanto no mar, é um desafio mundial. No Brasil, foi implementada em 2010 a Política Nacional dos Resíduos Sólidos (PNRS) sob a Lei 12.305/2010, uma antiga exigência que preenche as lacunas de legislações anteriores (**ex:** Resoluções do CONAMA, Lei do Saneamento Básico, entre outras) que tratavam do tema de forma esparsa e subjetiva. No entanto, a versão atual do Sistema Nacional de Informações sobre a Gestão de Resíduos dos Sólidos (SINIR) não contém informações suficientes e atualizadas para auxiliar na formulação dos planos, conforme decreto regulamentador da PNRS (Decreto 7404/2010).

A presença de lixo nos ambientes naturais depende de questões complexas que envolvem desde a infraestrutura de cada região, o que engloba a existência ou não de uma coleta de lixo eficiente associada a programas de reciclagem e sistemas de drenagem, até aspectos menos específicos que se relacionam com o nível educacional e poder aquisitivo da população. Em muitos municípios, a coleta é precária e o lixo se acumula em locais inadequados, podendo chegar aos rios e ambientes costeiros, como praias, manguezais e recifes, entre outros (Ivar do Sul e Costa, 2007). No caso das praias, os próprios usuários desses ambientes contribuem na poluição costeira e marinha, quando descartam na areia os resíduos gerados durante sua permanência no local (Becherucci et al., 2017; Silva et al., 2008).

O rápido aumento, nos últimos 50 anos, da produção de materiais sintéticos persistentes mudou significativamente o tipo e a quantidade do lixo gerado. O lixo encontrado em ambientes naturais é muito variado (Figs. 14.9 e 14.11) e tem origem em diversas fontes (Tab. 14.1). Uma vez na água, esses resíduos podem se deslocar por grandes distâncias, levados pelo vento ou por correntes, disseminando a poluição, inclusive para áreas remotas ou desabitadas (Monteiro et al., 2018; Costa & Barletta, 2015; Ivar do Sul & Costa, 2007).

A presença de lixo nos ambientes aquáticos naturais gera prejuízos econômicos, sociais e ambientais. Esses prejuízos incluem gastos para a limpeza por órgãos públicos (verba que poderia ser destinada a outras finalidades), perdas do potencial estético e turístico do local, desenvolvimento de microrganismos patogênicos e atração de vetores de doenças, além de sérios danos à biota (Fig. 14.10), entre esses danos, os mais evidentes são o emaranhamento e a ingestão. No emaranhamento, diferentes tipos de itens enroscam-se nos membros, maxila e/ou corpo ou armadilham animais vertebrados e invertebrados. Na alimentação, itens são ingeridos, ficando retidos por um período de tempo variável no trato gastrointestinal do animal (Laist, 1997). Organismos também se fixam nos objetos e podem ser levados para outros locais (Figs. 14.9C e 14.10)

Os plásticos tornaram-se os principais itens presentes no lixo (Becherucci et al., 2017; Moore, 2008). Plásticos e outros materiais sintéticos derivados do petróleo foram incluídos por especialistas em poluição entre os tipos mais perigosos de poluentes no Século XXI, por apresentarem certas características como custo reduzido e elevada utilização, baixo poder de degradação e fácil dispersão, quando se encontram nos ambientes naturais.

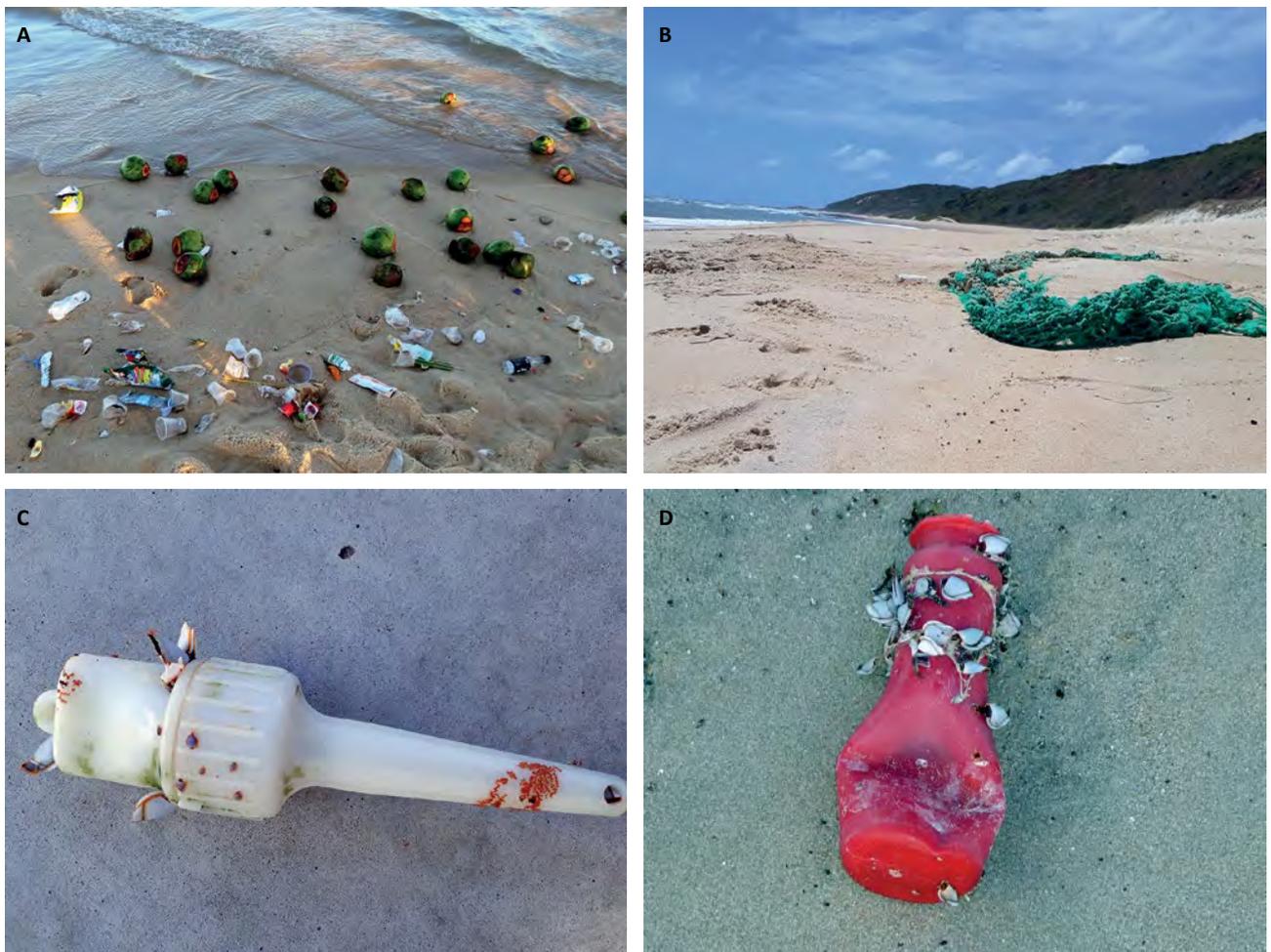
Atualmente, além dos plásticos, as bitucas de cigarro (Fig. 14.9D), cujo filtro é composto por acetato de celulose (um polímero sintético), tem se destacado em quantidade nos ambientes costeiros (Becherucci et al., 2017). Dados quantitativos gerados nos eventos de limpeza costeira realizados anualmente pela *Ocean Conservancy* colocam as pontas de cigarro no topo dos itens mais frequentes em praias comprovando a prevalência global desse tipo de resíduo. Na campanha de 2015, voluntários atuaram em praias de mais de 100 países, coletando um total de 13.806.887 itens de lixo, dos quais, 2.127.565 foram pontas de cigarro, quantidade que colocou este tipo de resíduo no topo da lista dos mais abundantes (Ocean Conservancy, 2016).

Bitucas são também descartadas em grandes quantidades nos centros urbanos, passando daí para os sistemas de esgoto, chegando até rios e mar.

O lixo observado nos ambientes naturais como praias, por exemplo, corresponde à parte superficial do problema. Uma imensa quantidade de fragmentos ou itens muito pequenos está soterrada ou misturada nos sedimentos e sua visualização

torna-se dificultada pelo tamanho, o que limita sua retirada por ações de limpeza.

O macrolixo (Fig. 14.9) é constituído por itens com dimensão muito variada, no entanto, a maior parte possui entre 5 e 30 cm, o que inclui itens como garrafas, tampas, canudos, etc. Já itens menores (5 mm a 5 cm) incluem fragmentos e bitucas de cigarro, entre outros.



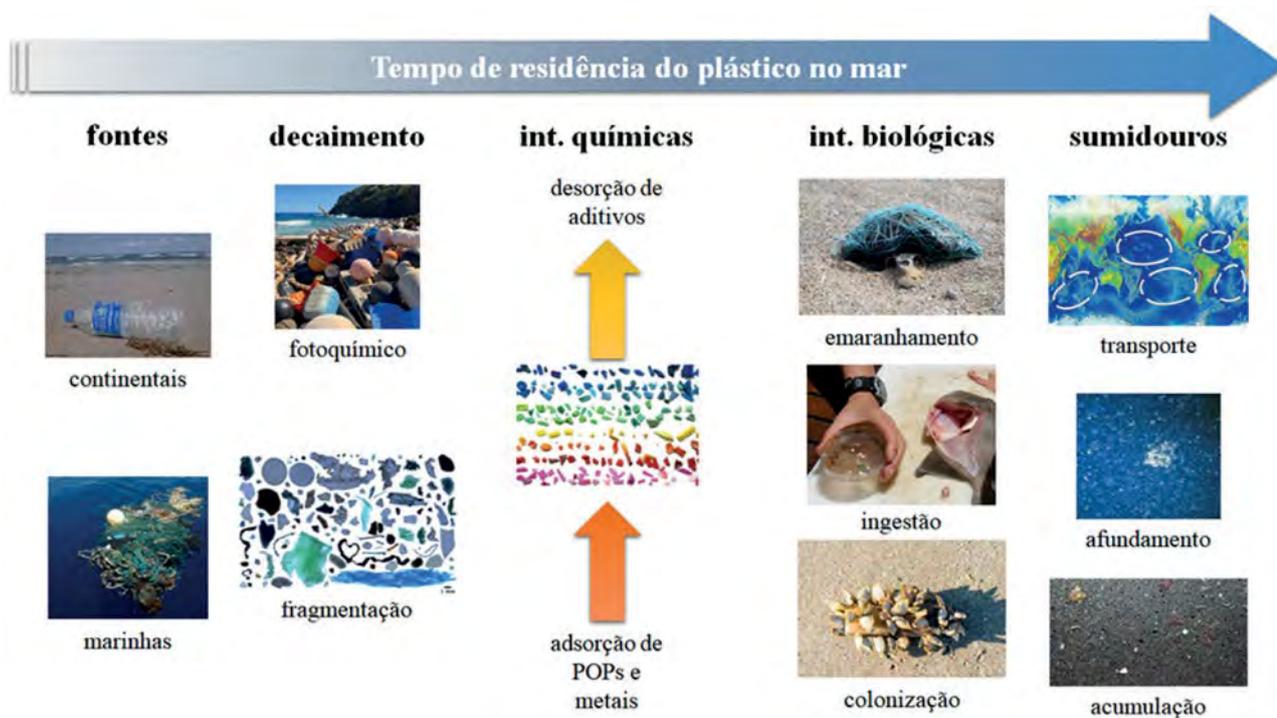
**Figura 14.9** Variedade do macro lixo encontrado em ambientes costeiros. **A)** itens comuns deixados por usuários de praias. **B)** corda de nylon se fragmentando na praia. **C)** e **D)** colonização de itens plásticos.

**Tabela 14.1** Exemplos de itens do macrolixo encontrado em ambientes costeiros e suas fontes mais prováveis, categorizadas pelo tipo de uso. **Adaptado** de Araújo e Costa (2006).

CATEGORIAS	ITENS MAIS COMUNS
Usuários de praias	Embalagens de alimentos, canudos, copos, pratos e talheres de plástico, palitos de pirulito e picolés, garrafas PET de refrigerantes, garrafas de água mineral, tampas de refrigerantes, embalagens de bronzeadores, protetores e descolorantes, chinelos de borracha, óculos de sol, bitucas de cigarro e fraldas descartáveis.
Atividades de pesca	Cabos e cordas de nylon, redes, boias, atratores luminosos, isopor, embalagens de óleo combustível.
Resíduos perigosos	Seringas hipodérmicas (com e sem agulhas), frascos de remédio, aplicadores ginecológicos, embalagens de pesticidas.
Uso doméstico	Embalagens de produtos de limpeza, embalagens de shampoo e desodorantes, utensílios de cozinha, brinquedos, baldes, escovas de todos os tipos, anéis de segurança de botijões de gás, lacres diversos, canetas e cotonetes.

No ambiente, os plásticos se fragmentam em um processo contínuo, gerando partículas cada vez menores (Figs. 14.10 e 14.11A), aumentando a disponibilidade para praticamente todos os níveis de teias tróficas. A partir do descarte, e graças a sua

característica de elevada durabilidade, o plástico (fragmentado ou não), permanece por períodos indefinidos nos ambientes, além de frequentemente interagir com compostos químicos ou com a biota, gerando extensos impactos (Fig. 14.10)



**Figura 14.10** Processos físicos, químicos e biológicos relacionados ao plástico presente nos ambientes aquáticos, podendo ser transferidos dos rios para o mar.

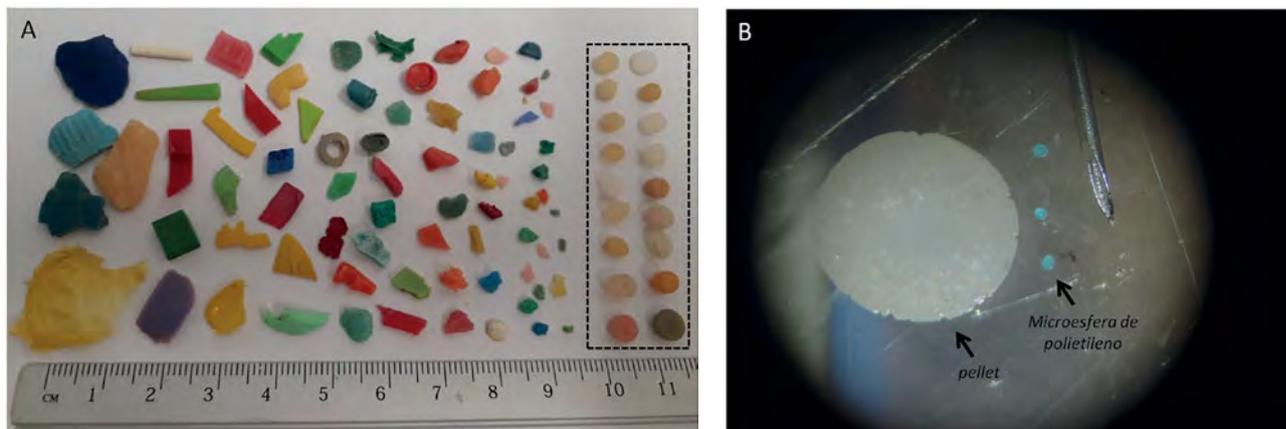
São considerados microlixo, itens cujos tamanhos variam principalmente entre 500  $\mu\text{m}$  a 5 mm. Esses itens são quase sempre compostos por plástico. O microplástico representa atualmente mais da metade da contaminação por microlixo registrada nos oceanos. Nos últimos anos, a ocorrência de microplásticos vem sendo cada vez mais relatada para ambientes aquáticos, como rios, estuários e praias (Free et al., 2014; Castaneda et al., 2014; Silva-Cavalcanti et al., 2017). Os primeiros relatos da contaminação por microplásticos marcam a década de 1970, os quais foram coletados acidentalmente em uma amostra de plâncton. Isso tem gerado interesse e preocupação da comunidade científica pelo seu alto poder danoso à vida aquática (Ivar do Sul, 2014) e grande potencial para impactos prejudiciais à saúde ambiental e humana (Vandermeersch et al., 2015). Seu tamanho reduzido resulta em alta biodisponibilidade e torna-o um dos poluentes mais pervasivos da superfície do planeta (Collignon et al., 2014).

De acordo com sua fonte, o microlixo está subdividido em primário e secundário. Por exemplo, microplásticos primários incluem os pellets (Fig. 14.11A), pequenos grânulos em forma cilíndrica ou de disco, compostos por uma diversidade de polímeros, como o poliestireno (PS), polipropileno (PP), poliamida (Nylon), polietileno (PE), policloreto

de vinila (PVC), polietileno tereftalato (PET), entre outros (Andrady, 2011). Eles servem de matéria-prima na indústria de produção de plásticos. Só nos Estados Unidos, são produzidas em torno de 27 milhões de toneladas por ano. Esses itens chegam às praias e ao mar em virtude de perdas no transporte; como em geral são muito claros ou transparentes, tornam-se quase imperceptíveis nesses locais.

Além desses itens muito pequenos, como os pellets, há alguns ainda menores, que podem medir menos de 1 mm. Essa categoria é encontrada em muitos produtos cosméticos (esfoliantes faciais e pastas de dente) na forma de microesferas de polietileno (Fig. 14.11B). Eles chegam aos ambientes aquáticos por perdas durante a fabricação, transporte ou pelo esgoto. Desta forma, eles podem chegar ao meio marinho pelo escoamento de canais, rios e riachos.

Já o microlixo secundário é aquele formado através da fragmentação de materiais maiores (Fig. 14.11A), através da ação de processos físicos e químicos sofridos quando expostos ao ambiente. Os principais processos responsáveis pela fragmentação desses materiais são a abrasão física e a foto-degradação (Barnes et al., 2009). Uma única peça de roupa quando lavada pode liberar mais de 1.900 microfibras que vão para o esgoto e depois para o mar, na forma de itens secundários (Browne et al., 2011).



**Figura 14.11 A)** fragmentos plásticos e pellets. **B)** microesferas de polietileno vistas com uma lupa; comparação com um pellet. **Fonte** LEGECE-UFPE.

Apesar dos microplásticos no mar serem uma preocupação científica e social crescente em todo o mundo, os impactos de sua presença em ambientes continentais de água doce ainda são relativamente pouco estudados. Essa falta de informação torna a poluição desses ambientes por microplástico ainda mais grave (Agostinho et al., 2005). Mesmo assim, já sabemos que os ambientes de água doces (rios) são as principais fontes de microplásticos para os oceanos (Jambeck et al., 2015). Os microplásticos podem trilhar uma longa jornada, alcançando habitats distantes das suas fontes originais (Ivar do Sul, 2014). Uma vez no oceano, eles podem ser ingeridos por diferentes tipos de animais (filtradores, detritívoros, carnívoros). Os organismos aquáticos não conseguem diferenciar o microplástico das partículas em suspensão (sua comida). Acredita-se que a ingestão desse poluente provoque a sensação de saciedade, levando os organismos a inanição e, finalmente, a morte. Além disso, a ingestão pode trazer sérios danos físicos (perfurações internas) e químicos aos animais, já que os microplásticos podem carregar substâncias cancerígenas, na forma de contaminação por poluentes químicos adsorvidos (Kuhn et al., 2015).

Um número relevante de organismos está sendo utilizado para estudo dos impactos causados pelos microplásticos (Ascer, 2015). Esses registros vão desde a grande baleia azul até o plâncton (Coley, 2014), incluindo invertebrados e suas larvas, sendo estas espécies particularmente suscetíveis por se alimentarem indiscriminadamente, e terem capacidade limitada para diferenciar as partículas plásticas das partículas alimentares (Moore, 2008).

### **6.1. Relato de caso: avaliação da poluição por lixo em trechos do estuário do rio Potengi (Natal-RN)**

O estuário do rio Potengi possui uma grande importância ambiental e socioeconômica. Em seus manguezais, cerca de 1.200 famílias sobrevivem da coleta de crustáceos e moluscos. Porém, de acordo com estudos locais (Cunha, 2004), o estuário está sendo prejudicado por intensas modificações ocorridas no decorrer do último século, agravadas principalmente em função do crescimento desordenado da cidade de Natal, e, de forma mais específica, do lançamento de grande carga de esgotos domésticos sem tratamento prévio e resíduos sólidos. Belarmino et al. (2014) realizaram uma avaliação da poluição por resíduos sólidos em duas áreas de manguezais associadas ao estuário do rio Potengi (a área 1 mais interna e a área 2 na foz do rio, próxima à praia do Forte), estabelecendo sua relação com a localização e os níveis de utilização e exploração dessas áreas. Nos seis meses de amostragem de resíduos sólidos, foi registrado um total de 1.381 itens, 77 para a área 1 e 1.304 para a área 2 (a área 2, portanto, apresentou aproximadamente 17 vezes mais itens que a área 1). Em ambas as áreas, a categoria mais frequente de resíduos foi o plástico. A Área 2 sofre um elevado impacto antrópico, basicamente decorrente de dois fatores: a atividade turística e comercial agregada ao Forte dos Reis Magos, que recebe um grande número de visitantes durante o ano inteiro, e a proximidade com a praia do forte, fato que favorece a entrada de um grande número de pessoas na área do manguezal, pois durante a maré baixa os canais propiciam piscinas naturais. Estes fatores podem ser os responsáveis pela elevada quantidade de resíduos.

Sendo ambientes extremamente sensíveis e propensos ao acúmulo de resíduos sólidos, áreas de manguezal, especialmente aquelas próximas às praias muito frequentadas, devem receber atenção especial, no sentido de controlar os possíveis impactos gerados pela presença humana.

A poluição da água, seja ela continental ou marinha, tem sido um problema desafiador, que compromete a qualidade ambiental dos recursos naturais, traz danos à biota, prejuízos econômicos para as populações, e riscos à saúde das pessoas, afetando sua qualidade de vida. A solução para o problema ainda é difícil e requer uma série de abordagens, que depende tanto de mudanças de hábitos da população, quanto de envolvimento do poder público e privado. O desenvolvimento de protocolos, que permita uma abordagem padronizada das principais fontes e dos poluentes, também será importante para monitorar sua distribuição, impactos em diferentes escalas espaciais e sua participação no desenvolvimento de processos ecológicos. Todos esses pontos serão questões a serem respondidas por futuras pesquisas.

## REFERÊNCIAS

- AGOSTINHO, A.; THOMAZ, S. M.; GOMES, L. **Conservação da biodiversidade em águas continentais do Brasil**. Maringá – PR: Editora Mega diversidade, v.1, n.1, p.70-78. 2005.
- ANDRADY, A. **Microplastics in the marine environment**. Marine Pollution Bulletin. v. 62, p. 1596-1605. 2011.
- ARAÚJO, M. C. B.; COSTA, M. **The significance of solid wastes with land-based sources for a tourist beach: Pernambuco, Brazil**. Pan- American Journal of Aquatic Sciences, v. 1 n. 1, 28–34. 2006.
- ASCER, L. G. **Efeitos de Microplásticos na fisiologia do Mexilhão *Perna perna* (Bivalvia: Mytilidae)**. São Paulo, Dissertação de Mestrado – Mestrado em Fisiologia Geral, Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo. 2015. 88 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. ABNT NBR 9800: **critérios para lançamento de efluentes líquidos industriais no sistema coletor público de esgoto sanitário - procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- BARBOSA, S. C. T.; COSTA, M. F.; BARLETTA, M.; DANTAS, D. V.; KEHRIG, H. A.; MALM, O. **Total Mercury in the fish *Trichiurus lepturus* from a tropical estuary in relation to length, weight and season**. Neotropical Ichthyology. 9 (1): 183-190, 2011.
- BARLETTA, M.; LUCENA, L. R. R.; COSTA, M. F.; BARBOSA-CINTRA, S. C. T.; CYSNEIROS, F. J. A. **The interaction rainfall vs weight as determinant of total mercury concentration in fish from a tropical estuary**. Environ. Pollut., v. 167 p. 1-6, 2012.
- BARLETTA, M.; COSTA, M. F. **Living and non-living resources exploitation in a tropical semi-arid estuary**. Journal of Coastal Research SI 56: p. 371 – 375, 2009.
- BARNES, D.; GALGANI, F.; THOMPSON, R.; BARLAZ, M. **Accumulation and fragmentation of plastic debris in global environments**. Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences, v. 364, n. 1526, p. 1985-1998, 2009.
- BECHERUCCI, M. E.; ROSENTHAL, A. F.; PON, J. P. S. **Marine debris in beaches of the Southwestern Atlantic: an assessment of their abundance and mass at different spatial scales in northern coastal Argentina**. Mar. Pollut. Bull. v. 119, p. 299–306, 2017.
- BELARMINO, P. H.; SILVA, S. M.; RUFENER, M. C.; ARAÚJO M. C. B. **Resíduos sólidos em manguezal no rio Potengi (Natal, RN, Brasil): relação com a localização e usos** Journal of Integrated Coastal Zone Management, v 14, n. 3, p. 447-457, 2014.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à engenharia ambiental**. São Paulo: Prentice Hall. 2002. ISBN 85-87918-05-2.

BROWNE, M. A.; CRUMP, P.; NIVEN, S.; TEUTEN, E.; TONKIN, A.; GALLOWAY, T.; THOMPSON, R. **Accumulation of Microplastic on Shorelines Worldwide: Sources and Sinks - Environmental Science & Technology**. p. 9175–9179, 2011.

BOUKAI, N. **Qualidade Sanitária da Areia das Praias do Município do Rio de Janeiro: Diagnóstico e Estratégia para Monitoramento e Controle**. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental (FEN/ UERJ), 2005. 160 p.

CASTAÑEDA, R.; AVLIJAS, S.; SIMARD, A.; RICCIARDI, A. **Microplastic pollution in St. Lawrence River sediments**. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 71, n. 12, p. 1767–1771, 2014.

Comissão Mundial Independente sobre os Oceanos (CMIO). **O Oceano... Nosso Futuro: Relatório da Comissão Mundial Independente sobre os Oceanos**; traduzido do inglês por Andréia Crespo; adaptado para a edição brasileira por Lucimar Luciano de Oliveira. Rio de Janeiro. Comissão Nacional Independente sobre os Oceanos, 1999. 248 p.

COLEY, I. C. A.; **Caracterización de microplásticos primários em el ambiente marino de una playa urbana en Cartagena de Indias**. Cartagena de Indias, Tese de Doutorado. Universidad de Cartagena. 2014. 115 p.

COLLIGNON, A.; HECQ, J. H. H.; GALGANI, F.; COLLARD, F.; GOFFART, A. **Annual variation in neustonic micro- and meso-plastic particles and zooplankton in the Bay of Calvi (Mediterranean-Corsica)**. Marine Pollution Bulletin, v. 79, n. 1-2, p. 293-298, 2014.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 357 de 17 de março de 2005. **Dispõe sobre a Classificação de águas, doces, salobras e salinas do Território Nacional**.

CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução nº 430, de 13 de maio de 2011 **Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005**.

COSTA, M. F.; BARLETTA, M. **Microplastics in Coastal and Marine Environments of the Western Tropical and Sub-Tropical Atlantic Ocean**. ENVIRON SCI-PROC IMP, v. 17, p. 1868-1879, 2015.

COSTA, M. F.; LANDING, W. M.; KEHRIG, H. A.; BARLETTA, M.; HOLMES, C. D.; BARROCAS, P. R. G.; EVERS, D. C.; BUCK, D. G.; VASCONCELOS, A. C.; HACON, S. S. MOREIRA, J. C.; MALM, O. **Mercury in tropical and subtropical coastal environments**. Environmental Research, v. 119, p. 88-100, 2012.

CUNHA, E.M.S. **Evolução atual do litoral de Natal-RN (Brasil) e suas aplicações à gestão integrada**. Tese de Doutorado, Departament d’Estratigrafia i Paleontologia, Universitat de Barcelona, Barcelona, Espanha. 2004. 381 p.

FARIAS, M. S. S.; NETO, J. D.; LIMA, V. L. A.; LIRA, V. M.; FRANCO, E. S. **Riscos sociais e ambientais devido a presença de metais pesados nas águas superficiais no Distrito Industrial de Mangabeira**. QUALIT@S Revista Eletrônica. v. 6, n. 2, p. 1677-4280, 2007.

FREE, C.; JENSEN, O.; MASON, S.; ERIKSEN, M.; WILLIAMSON, N.; BOLGDIV, B. **High-levels of microplastic pollution in a large, remote, mountain lake**. Marine Pollution Bulletin, v. 85, n. 1, p. 156–163, 2014.

FURTADO, E. M. **A onda do turismo na cidade do sol: a reconfiguração urbana de Natal**. Tese (Doutorado). Natal: UFRN, CCHLA, Programa de Pós-Graduação em Ciências Sociais, , 2005. 301 p.

HATJE, V.; PEDREIRA, R. M. A.; REZENDE, C. E.; SCHETTINI, C. E. F.; SOUZA, G. C.; MARIN, D. C.; HACKSPACHER, P. C. **The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide**. Scientific Reports. v. 7, Article number: 10706. 2017.

HENRY-SILVA, G. G.; CAMARGO, A. F. M. **Impacto das atividades de aquicultura e sistemas de tratamento de efluentes com macrófitas aquáticas – relato de caso B**. Inst. Pesca, São Paulo, v. 34, n. 1, p. 163 – 173, 2008.

IVAR DO SUL, J. A.; COSTA, M. F. **The present and future of microplastic pollution in the marine environment**. Environmental Pollution v. 185, p. 352-364, 2014.

IVAR DO SUL, J. A.; COSTA, M. F. **Marine debris review for Latin America and the wider Caribbean region: from the 1970s until now, and where do we go from here?** Mar. Pollut. Bull. v. 54, p. 1087-1104, 2007.

JAMBECK, J.; GEYER, R.; WILEOX, C.; SIEGLER, T.; PERRYMAN, M.; ANDRADY, A.; NARAYAN, R. **Plastic waste inputs from land into the ocean**. Science, 347(6223): 768-771. 2015.

KÜHN, S.; REBOLLEDO, E. B.; FRANEKER, J. A. **Deleterious Effects of Litter on Marine Life**. In Bergmann, M.; Gutow, L.; Klages, M. Marine Anthropogenic Litter Berlin: Springer. 2015.

LAIST, D. W. **Impacts of Marine Debris: Entanglement of Marine Life in Marine Debris Including a Comprehensive List of Species with Entanglement and Ingestion Records**, in: *Marine Debris*. Springer, p. 99-139, 1997.

MEIRE, R. O.; AZEVEDO, A.; TORRES, J. P. M. Aspectos **Ecotoxicológicos dos Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos**. *Oecologia Brasiliensis*, v. 11, n. 2, p. 188 – 201, 2007.

MITRA, S.; DICKHUT, R. M. **Three-phase modelling of polycyclic aromatic hydrocarbon association with pore-water-dissolved organic carbon**. *Environmental Toxicology and Chemistry*. v. 18, p. 1144-1148. 1999.

MOREDA, J. M.; ARRANZ, A., F.; DE BETOÑO, S.; CID, A.; ARRANZ, J. F. **Cromatographic determination of aliphatic hydrocarbons and polyaromatic hydrocarbons (PAHs) in a sewage ludge**. *The Science of the Total Environment*. v. 220, p. 33-43, 1998.

MONTEIRO, R. C. P.; Ivar do Sul, J. A.; COSTA, M. F. **Plastic pollution in islands of the Atlantic Ocean**. *Environmental Pollution*, v. 238, p. 103-110, 2018.

MONTONE, R. C.; BÍCEGO, M. C. **Indicadores químicos de esgoto**. In: BAPTISTA-NETO, J. A.; WALLNER-KERSANACH, M.; PATCHINEELAM, S.M. (Org.) *Poluição marinha*. Rio de Janeiro: Interciência. p 397-412, 2008.

MOORE, C. J. **Synthetic polymers in the marine environment: a rapidly increasing, long-term threat**. *Environ. Res.* v. 108, n. 2, p. 131-139, 2008.

**OCEAN CONSERVANCY**, 2016. (International Coastal Cleanup) <https://oceanconservancy.org/wp-content/uploads/2017/04/2016-Ocean-Conservancy-ICC-Report.pdf> /. Acesso em: 21 nov 2018.

OLIVEIRA, E. J. A.; MOLICA, R. J. R. **A poluição das águas e as cianobactérias**. Recife: IFPE. 32 p; Apostila. ISBN 978-85-67452-08-1. 2017.

PENTEADO, J. C. P.; EL SEOUD, O. A.; CARVALHO, L. R. F. **Alquilbenzeno Sulfonato Linear: Uma Abordagem Ambiental e Analítica**. *Química Nova*, v. 29, n. 5, p. 1038-1046, 2006.

PETROVIC, M.; ELJARRAT, E.; LOPEZ DE ALDA, M. J.; BARCELÓ, D. **Analysis and environmental levels of endocrine disrupting compounds in freshwater sediments**. *Trends in Analytical Chemistry*, v. 20, n.1, p. 637-648. 2001.

**PNAD Contínua (IBGE)**, 2016 Disponível em: [https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com\\_mediaibge/arquivos/a7d023687b221aafb0364f56cad94367.pdf](https://agenciadenoticias.ibge.gov.br/media/com_mediaibge/arquivos/a7d023687b221aafb0364f56cad94367.pdf). Acesso em 02 de Nov 2018.

PEREIRA, R. S. **Identificação e caracterização das fontes de poluição em sistemas hídricos**. *Revista Eletrônica de Recursos Hídricos*. IPH-UFRGS v.1, n. 1. p. 20-36, 2004.

REGO, J. C. V. **Qualidade Sanitária de Água e Areia de Praias da Baía de Guanabara**. (Mestrado em Ciência na área de saúde pública). Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública. Fundação Oswaldo Cruz, RJ. 2010. 132 p.

SABINO, R.; VERÍSSIMO, C.; CUNHA, M. A; WERGIKOSKI, B.; FERREIRA, F. C.; RODRIGUES, R.; PARADA, H.; FALCÃO, L.; ROSADO, L.; PINHEIRO, C.; PAIXÃO, E.; BRANDÃO, J. **Pathogenic fungi: an unacknowledged risk at coastal resorts? New insights on microbiological sand quality in Portugal**. *Mar Pollut Bull*, v. 62, n. 7, p. 1506-1511. 2011.

SANT'ANNA Jr, N.; SILVA, S. M. T.; BERETTA, M.; TAVARES, T. M. **Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos em sedimentos superficiais na Baía de Todos os Santos – Nordeste do Brasil**. *Tropical Oceanography*. v. 38, n. 2, p. 42 – 58, 2010.

SCOTT, M. J; JONES, M. N. **Biochimica et Biophysica**. *Acta*, v. 1508, n. 1-2, p. 235-251, 2000.

SILVA-CAVALCANTI, J. S.; SILVA, J. D. B.; FRANÇA, E. J.; ARAÚJO, M. C. B.; GUSMÃO, F. **Microplastics ingestion by a common tropical freshwater fishing resource**. *Environmental Pollution* v. 221, p. 218-226, 2017.

SILVA-CAVALCANTI, J. S.; COSTA, M. F. **Fisheries in Protected and Non-Protected areas: is it different? The case of *Anomalocardia brasiliensis* at tropical estuaries of Northeast Brazil**. *Journal of Coastal Research* 56, 1454-1458, 2009.

SILVA-CAVALCANTI, J. S. **Biologia e exploração da *Anomalocardia brasiliensis* por populações de ribeirinhos no estuário do Rio Goiana (PE-PB), Nordeste do Brasil**. Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFPE. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil, 2011. 177 p.

SILVA, R. R. da. **Biorremediação de solos contaminados com organoclorados por fungos basidiomicetos em biorreatores**. São Paulo SP, Instituto de Botânica da Secretaria de Estado do Meio Ambiente. Tese (Doutorado). 2009. 186 p.

SILVA, J. S.; BARBOSA, S. C.T.; COSTA, M. F. **Flag Items as a Tool for Monitoring Solid Wastes from Users on Urban Beaches** *Journal of Coastal Research*, v. 24 n. 4, p. 890–898, 2008.

SOARES, A.; MOZETO, A. A. **Water quality in the Tietê Reservoirs (Billings, Barra Bonita, Bariri and Promissão, SP-Brazil and nutrient fluxes across sediment-water interface (Barra Bonita)**. *Acta Limnologica Brasiliensis*, v. 18, n. 3, p. 247-266, 2006.

SÓLDAN, P. **Toxic risk of surface water pollution—six years of experience.** *Environment International*, v. 28, p. 677–682, 2003.

SOS Mata Atlântica. Observando os Rios 2017: **O retrato da qualidade da água nas bacias da Mata Atlântica. Relatório Técnico**, disponível em [https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2017/03/SOSMA\\_Observando-os-Rios-2017\\_online.pdf](https://www.sosma.org.br/wp-content/uploads/2017/03/SOSMA_Observando-os-Rios-2017_online.pdf). Acesso em 21/11/2018. 2017

TAVARES, T. M.; SILVA, S. M. T.; OLIVA, S. T.; SANT'ANNA Jr, N.; LOCKWOOD, D.; GUTIERREZ – RUIZ, M.; QUEIROZ – VIVANCO, D. AGUIRRE – GOMES, A. **Evolution of the Quality of the Sediments of the Todos os Santos Bay: Role of Biogeochemical Conditions and Actions of Main Stakeholders.** 6th I2SM – CHIAPAS (Mexico), Jun 19 – 23, v. 34, p 275 – 279, 2018.

TELLES, D. L. **Inseticidas organoclorados e bifenilopoliclorados (PCBs) na região estuarina de Itamaracá/PE: aspectos analíticos e ambientais.** Tese de Doutorado. Programa de Pós-Graduação em Oceanografia da UFPE. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Brasil. 2001. 167 p.

VANDERMEERSCH, G.; VAN, C. L.; JANSSEN, C.; MAQUES, A.; GRANBY, K.; FAIT, G.; KOTTERMAN, M.; DIOGENE, J.; BEKAERT, K.; ROBBENS, J.; DEVRIESE, L. **A critical view on microplastic quantification in aquatic organisms.** *Environmental Research*, v. 143, p. 46–55, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION – WHO. **Guidelines for Safe Recreational Water Environments.** Volume 1, Coastal and Freshwaters, Chapter 6: “Microbiological Aspects of Beach Quality”. 2003.

ZUZA-ALVES, D. L.; MEDEIROS, S. S. T. Q.; SOUZA, L. B. F. C.; SILVA-ROCHA, W. P.; FRANCISCO, E. C.; ARAÚJO, M. C. B.; LIMA-NETO, R. G.; NEVES, R. P.; MELO; A. S. A.; CHAVES, G. M. **Evaluation of Virulence Factors In vitro, Resistance to Osmotic Stress and Antifungal Susceptibility of Candida tropicalis Isolated from the Coastal Environment of Northeast Brazil.** *Frontiers in Microbiology*. v 7, article 1783, p 1-13. 2016.



Ao nosso querido professor e amigo Dr. FÁBIO HAZIN, dedicamos esta publicação, feita por tantas mãos, em reconhecimento e gratidão a todo empenho na busca e transmissão de conhecimento sobre os ambientes e seres marinhos, além de toda contribuição vinda disso para o desenvolvimento de ferramentas sustentáveis de utilização de seus recursos e manejo dos ecossistemas.

Sua genialidade e dedicação incessante à pesquisa geraram contribuições preciosíssimas para a ciência e gestão marinha no Brasil e no mundo. Fortalecendo nossa ciência e abrindo caminhos para a pesquisa brasileira no cenário mundial.

Seu comprometimento com a transmissão deste conhecimento e capacidade extraordinária de transbordar o amor pela ciência em sua oratória encantou e inspirou seus alunos e a todos que o ouviam.

Sua humanidade, compaixão e generosidade acolheram, incentivaram e fortaleceram a todos que tiveram o imenso privilégio de compartilhar da sua existência.

O seu legado segue inspirando e orientando, e será sempre lembrado como uma referência na formação de futuras gerações de pesquisadores das Ciências do Mar.

Na certeza de que sua ausência será sempre apenas física. Ele permanece vivo em tudo que enriqueceu na pesquisa e gestão pesqueira e na vida de todos que com ele conviveram, assim como sua oração que ficará para sempre eternizada em nossos corações.

***“Obrigado por mais esse dia, que eu possa ao longo de todo esse dia, permanecer desperto e atento ao momento presente para ajudar a todos os outros seres a serem mais felizes e livres de todo o sofrimento”***



Este livro foi diagramado na fonte Calibri light, corpo 11.  
Impresso em papel couché fosco 115g (miolo) e capa dura





The first part of the document discusses the importance of maintaining accurate records of all transactions. It emphasizes that every entry, no matter how small, should be recorded to ensure the integrity of the financial data. This includes not only sales and purchases but also expenses, income, and transfers between accounts.

Next, the document outlines the process of reconciling bank statements with the company's internal records. This involves comparing the bank's record of transactions with the company's ledger to identify any discrepancies. Common reasons for these differences include timing issues, such as deposits in transit or outstanding checks, as well as potential errors in recording or bank fees.

The document then provides a detailed guide on how to properly record and categorize transactions. It stresses the importance of using consistent accounting codes and descriptions to facilitate accurate reporting and analysis. Proper categorization is essential for determining the company's financial health and for preparing tax returns.

Finally, the document discusses the role of internal controls in preventing fraud and ensuring the accuracy of financial records. It suggests implementing a system of checks and balances, such as requiring dual authorization for significant transactions and conducting regular audits of the accounting process. These measures are crucial for maintaining the trust of stakeholders and ensuring the long-term success of the organization.

