

ACIDIFICAÇÃO OCEÂNICA: UMA QUESTÃO NEGLIGENCIADA

Nogueira, S. M. S.^{a*}, Viana, A. F.^b & Santos, P. F.^b

^aUniversidade Federal do Ceará, Fortaleza, Brasil.

^bUniversidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, Brasil.

*saramsnogueira@gmail.com (Corresponding author).

ABSTRACT

Cite as: Nogueira, S. (2023). Acidificação oceânica: uma questão negligenciada. *Braz. J. Aquatic. Sci. Technol.* 27(2):02-07. ISSN 1983-9057. DOI: 10.14210/bjast.v27n2.18505

Received: 17/03/22. **Revised:** 05/07/23. **Accepted:** 05/07/23. **Published:** 18/10/23.

Document type: Review article.

Funding: The authors received no specific funding for this work.

Competing interest: The authors declare no competing interest.

Copyright: This document is under the Creative Commons Attribution License (CC BY 3.0 DEED).

Oceans play a crucial role in many natural processes, such as oxygen production and climate regulation. Ocean acidification (OA) is a phenomenon caused, among other factors, by the dissolution of certain gases in water, such as carbon dioxide (CO₂). It is estimated that by 2100, the partial atmospheric pressure of carbon dioxide (pCO₂) will double from pre-industrial levels, aggravating this process. The negative consequences of OA are not yet fully understood, in part due to the limitations of laboratory experiments. However, it is known that they include increased concentrations of CO₂ in the atmosphere, structural and functional modifications of ecosystems, changes in richness, diversity and geographic distribution of species, impairment of ecosystem goods and services, and commercial activities, such as fishing and aquaculture, as well as global warming. OA, in principle, is considered irreversible, as it depends on the reduction of emissions of the gases involved in the process, especially CO₂, and the slow natural process of neutralization. However, some mitigation measures, allied with adaptation measures, can mitigate the effects of OA. These and other issues related to ocean vulnerability caused by climate change will be raised in this review.

Keywords: OA. Climate Change. Vulnerability. Carbon Cycle.

1 Introdução

Os oceanos cobrem mais de 70% da superfície da Terra, retêm 97% da água do mundo, abrigam diversos ecossistemas e são fontes importantes de oxigênio atmosférico e alimentos (IPCC, 2022). Ao absorverem mais de 90% do excesso de calor liberado no ambiente terrestre e quase um terço das emissões de dióxido de carbono (CO₂), eles retardam o aquecimento do planeta e estabilizam o clima global. Apesar disso, estão muito vulneráveis às atividades humanas (Landrigan et al., 2020).

A vulnerabilidade é, de maneira geral, uma medida das ameaças sofridas por um sistema (IPCC, 2022). Pode, também, ser definida como o grau de probabilidade que um sistema, subsistema ou um componente do sistema tem de sofrer danos devido à exposição a um perigo, uma perturbação ou um estresse (Turner et al., 2003).

Uma das principais vulnerabilidades enfrentadas pelos oceanos atualmente é a acidificação oceânica (AO) (IPCC, 2022). Um fenômeno em que seu pH (potencial hidrogeniônico) é reduzido quando uma alta concentração de dióxido de carbono (CO₂) dissolve-se na água do mar, aumentando a concentração de íons H⁺ na água, tornando seu pH menor e a acidez maior (Branch et al., 2013).

A acidificação oceânica também pode ser causada por outros processos, como o intemperismo químico dos solos, a produção de carbono orgânico dissolvido pela decomposição de vegetação, a entrada de aerossóis marinhos e a oxidação de enxofre e nitrogênio reduzidos, além da chuva ácida (Norton et al., 2014). No entanto, hoje, os principais indícios da acidificação da água compreendem a diminuição do pH e da alcalinidade, decorrente do aumento da concentração de CO₂ atmosférico provocado, principalmente, pela combustão humana de combustível fóssil e mudanças no uso do solo (Doney et al., 2020).

Os oceanos cumprem uma função basal na regulação do clima, em especial, pela neutralização dos efeitos do aumento dos níveis de gases de efeito estufa (GEEs) na atmosfera e da temperatura global. Essas funções decorrem, principalmente, do fato de os oceanos serem responsáveis pela absorção e pelo armazenamento do CO₂; estima-se que esses corpos d'água tenham fixado cerca de 30% a 40%

das emissões antropogênicas desse gás, desde o início da Revolução Industrial (Doney et al., 2009; Reid et al., 2009; Bijma et al., 2013).

Segundo o último boletim da Organização Meteorológica Mundial, o WMO Greenhouse Gas Bulletin n. 16, as frações molares de superfície médias globais dos gases de efeito estufa – dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e óxido nitroso (N₂O) – atingiram novos máximos em 2019, apesar da pandemia, com CO₂ em 410,5 ± 0,2 ppm, CH₄ em 1877 ± 2 ppb e N₂O em 332,0 ± 0,1 ppb; valores que constituem, respectivamente, 148%, 260% e 123%, em relação aos níveis registrados na era pré-industrial (em 1750) (WMO, 2020).

Entre a Revolução Industrial e o ano de 2011, aproximadamente 375 bilhões de toneladas de carbono foram emitidas pelos seres humanos na atmosfera, especialmente pela queima dos combustíveis fósseis, desmatamento e outras mudanças no uso da terra (WMO, 2012). E em 2020, a concentração do CO₂ na atmosfera alcançou 413,2 partes por milhão (ppm), o que significa 48,6% a mais que nos níveis pré-industriais, em que a concentração era de 278 ppm (WMO, 2020).

Grande parte do CO₂ emitido nesse período foi absorvida pelos oceanos. Devido ao papel que esses corpos d'água exercem nos ciclos biogeoquímicos, sequestrando e estocando carbono, a concentração desse gás na atmosfera está acima de 410 ppm (Doney et al., 2020).

Não há uma única organização ou programa específico para o monitoramento das concentrações de CO₂ absorvidos pelos oceanos e da respectiva redução de pH, a nível global. Na realidade, desde a década de 1980, estudos e experimentos são realizados por diversos pesquisadores por todo o mundo. Há também programas internacionais, expedições científicas e estações permanentes de amostragens globais, monitorando as concentrações e fluxos de carbono e o nível do pH dos oceanos, com o auxílio de modernos equipamentos, como satélites, marcadores geoquímicos, instrumentos geradores de perfis, aparelhos de medições *in situ*, boias e flutuadores, e navios de observação, entre outros.

A partir dos dados coletados, são publicados artigos científicos e relatórios, e organizados painéis e conferências mundiais que, somados a outros meios de comunicação social, expõem e

divulgam as causas e consequências das ações antrópicas que vêm modificando o planeta.

Essas iniciativas vêm alertando a população sobre os perigos que o homem e o meio ambiente podem correr, caso nada seja feito para remediar processos potencialmente destrutivos, como as alterações provocadas pelas mudanças climáticas e pelo aumento dos níveis de CO₂. Este artigo buscou realizar uma revisão sobre questões relacionadas à uma das principais vulnerabilidades atuais dos oceanos, a acidificação oceânica (AO), resultante das mudanças do clima.

2 O Ciclo do Carbono

Segundo Cole et al. (2021) o carbono é trocado entre a biosfera, pedosfera, geosfera, hidrosfera e atmosfera da Terra. O elemento entra na biosfera em grande parte pelo processo de fotossíntese, no qual as plantas absorvem energia solar e CO₂ da atmosfera, produzindo oxigênio e hidratos de carbono (i.e., açúcares, como a glicose). Os animais e as plantas utilizam os hidratos de carbono pelo processo de respiração, aproveitando a energia contida nos hidratos de carbono e emitindo CO₂. Juntamente com a decomposição orgânica, a respiração aeróbica e anaeróbica devolve o carbono, biologicamente fixado nos estoques terrestres (i.e., nos tecidos da biota, na camada de solo e na turfa), para a atmosfera (Nybakken & Bertness, 2004; Schmitz et al., 2018).

No mar, o fitoplâncton, produtor primário basal da cadeia alimentar, converte o CO₂ (inorgânico) em matéria orgânica e O₂ (Libes, 2009). O CO₂ também é sequestrado da atmosfera, combinado com a água, forma o ácido carbônico, que reage lentamente, pelo processo de intemperismo, com o cálcio (Ca) e o magnésio (Mg) da crosta terrestre, formando carbonatos insolúveis. Estes, então, por meio de erosão, são arrastados para os oceanos, onde, eventualmente, se assentam no fundo ou são assimilados por organismos marinhos que, após morrerem, também se depositam no fundo do mar. Tais sedimentos, por sua vez, vão-se acumulando ao longo de milhares de anos, formando as rochas sedimentares, que, por sua vez, são arrastadas para o manto da Terra, pelo processo de subdução e, então, o carbono é devolvido para a atmosfera na forma de CO₂ pelas erupções vulcânicas, completando o ciclo (Cole et al., 2021).

Os oceanos são os maiores reservatórios de carbono no planeta, armazenando aproximadamente 38 mil gigatoneladas (Gt) de carbono, enquanto a biosfera terrestre (considerando especialmente solos, vegetação, matéria orgânica e combustíveis fósseis) armazena cerca de 6 mil Gt e a atmosfera, apenas 800 Gt (Baird & Cann, 2011).

Desde o início da era industrial, a quantidade de carbono que entrou na atmosfera e, por consequência, nos oceanos, é colossal. Conforme mencionado na seção anterior, as causas são o grande crescimento da queima de combustíveis fósseis (aproximadamente, 6,4 Gt C por ano na década de 1990, e mais de 8 Gt C ao ano desde 2006) e das práticas de mudanças no uso do solo, como o corte e a queima de florestas tropicais para a criação de áreas de cultivo agrícola (1,6 Gt C por ano; Bollmann et al., 2010) e pastagens.

Segundo Bollmann et al. (2010), desde o início do século XIX até o final do século XX, o homem liberou cerca de 400 Gt C sob a forma de CO₂. Isso criou um sério desequilíbrio no ciclo do carbono atual. A entrada adicional de carbono produz deslocamentos entre os reservatórios de carbono, o que gera diferenças no fluxo entre reservatórios, comparando-se aos tempos pré-industriais (Bollmann et al., 2010).

Ainda de acordo com esse autor, nos últimos anos, o ciclo do carbono sofreu a perda de 140 Gt C da biosfera terrestre pelas emissões de CO₂ provocadas pela mudança no uso da terra, e mais 244 Gt C emitidos pela queima de combustíveis fósseis, em um total de 384 Gt C. No entanto, houve também a acumulação das emissões antropogênicas de CO₂ nos solos (101 Gt C), na atmosfera (165 Gt C) e nos oceanos (118 Gt C, referente à soma dos valores da superfície do oceano com as camadas intermediária e profunda) (Bollmann et al., 2010). Foi essa grande quantidade de CO₂ acumulada pelos oceanos que promoveu a acidificação oceânica acelerada durante as últimas décadas (Doney et al., 2020; Kolbert, 2011; Norton et al., 2014).

3 O Processo de Acidificação

A superfície dos oceanos e a atmosfera realizam constantemente trocas passivas (por difusão) de gases e, por isso, o gás carbônico (CO₂) liberado na atmosfera é dissolvido na água do mar. A reação desse gás com a água (H₂O) forma o ácido carbônico (H₂CO₃). Esse ácido pode se dissociar, gerando os íons bicarbonato (HCO₃⁻), os quais também podem se dissociar, formando o carbonato (CO₃²⁻) (Lenzi & Favero, 2019), como pode ser visto na [Figura 1](#).

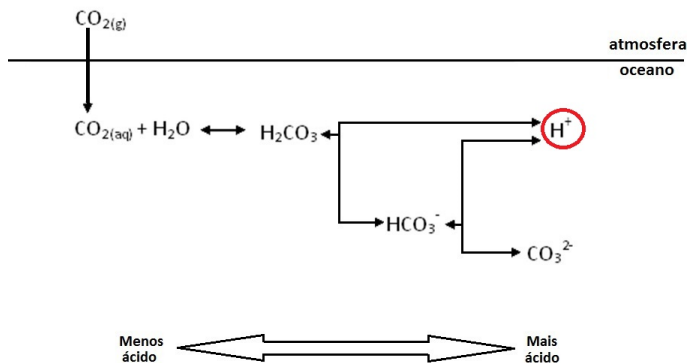


Figura 1 - Resumo do sistema carbonato que ocorre nos oceanos.

Esse processo é denominado sistema carbonato (Libes, 2009; Riebesell et al., 2010), e é quimicamente expresso pela [Equação 01](#) (Nikinmaa, 2013).



Os íons carbonato têm grande importância, pois junto com os íons cálcio formam o carbonato de cálcio (CaCO₃), estrutura básica de esqueletos e conchas de muitos organismos marinhos, e o sistema carbonato regula o ciclo do carbono, controlando, assim, a acidez da água do mar (Baird & Cann, 2011). Graças a esse processo, o oceano pode absorver grande parte das emissões antropogênicas do CO₂; porém, essa absorção não é capaz de acompanhar o mesmo ritmo das emissões atuais dos GEEs na atmosfera (Bollmann et al., 2010).

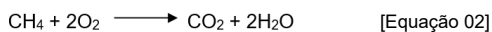
O aumento na liberação de CO₂ interfere nesse processo, pois altera o equilíbrio existente no oceano. O aumento da concentração desse gás na atmosfera leva ao aumento dos níveis do gás dissolvido na água e, consequentemente, eleva a quantidade de H⁺ liberado, diminuindo o pH e, portanto, aumentando a acidez da água (Bollmann et al., 2010).

Naturalmente, as principais espécies químicas presentes na água do mar são os íons bicarbonato (HCO₃⁻) e carbonato (CO₃²⁻), que atuam alcalinizando o sistema, mantendo seu pH elevado (cerca de 8,2). Com o aumento dos níveis de H⁺, o processo de tamponamento é afetado, reduzindo a alcalinidade e o pH da água. Com isso, a quantidade de carbonato disponível no sistema diminui, interferindo na formação do carbonato de cálcio (Morel, 1983). Dessa maneira, até 2100, a quantidade de carbonato disponível nos oceanos estará em níveis baixos ou extremamente baixos para os organismos marinhos (Kolbert, 2011).

Além disso, esse processo diminui a lisoclina, que é a profundidade em que maior parte dos carbonatos se dissolve. Assim, os organismos abaixo dessa camada terão dificuldade de produzir suas carapaças de carbonato de cálcio. Comparando-se dados de 1800 e 2006, as camadas de saturação de aragonita e calcita (mais detalhes abaixo) encontram-se de 50 m a 200 m menos profundas (Doney, 2006). Isso representa um maior volume dos oceanos em que as condições de produção de carapaças não são adequadas.

O carbonato de cálcio possui duas formas que compõem o esqueleto de muitos organismos aquáticos – a calcita e a aragonita – que se diferenciam quanto à sua estrutura. A aragonita é menos estável e, por isso, é 50% mais solúvel que a calcita (Doney et al., 2009). Assim, os organismos que secretam esqueletos de aragonita, como moluscos e corais, estarão ainda mais suscetíveis à sua dissolução (IGBP/IOC/SCOR, 2013).

O metano (CH₄) também pode contribuir para a acidificação oceânica. A decomposição do CH₄ pode ocorrer por oxidação aeróbia na coluna d'água ou por oxidação anaeróbia no fundo oceânico. Na oxidação aeróbia, ocorre a reação química conforme [Equação 02](#).



Nesse processo, bactérias são responsáveis por realizar a degradação do metano, consumindo oxigênio e produzindo dióxido de carbono (Bollmann et al., 2010). Como mostrado anteriormente, o dióxido de carbono produzido na oxidação aeróbia vai aumentar a liberação de H⁺ no ambiente, contribuindo para a acidificação da água.

Estima-se que, atualmente, os oceanos captam cerca de um milhão de toneladas de CO₂ a cada hora (Kolbert, 2011) e que, até 2100, a pressão atmosférica parcial de dióxido de carbono (pCO₂) duplicará em relação aos níveis pré-industriais (Hall-Spencer et al., 2008). Além disso, é previsto que o pH médio da água da superfície do oceano, que já caiu aproximadamente 0,1 unidade de pH (de aproximadamente 8,21 no período pré-industrial para 8,10 neste início de século) (Doney et al., 2009), caia para cerca de 7,8 até o final deste século (Branch et al., 2013). Como a escala de pH é logarítmica, uma queda de 0,1 unidade no pH significa que a água se tornou cerca de 30% mais ácida. Se a previsão de redução de 0,4 do pH dos oceanos se confirmar, isso significa que essas águas poderão se tornar até 150% mais ácidas que seu estado normal (Kolbert, 2011).

4 Efeitos Biológicos da Acidificação Oceânica

Com o aumento da temperatura média global e das concentrações de CO₂ na atmosfera, projeta-se que haja modificações significativas na estrutura e na função dos ecossistemas, nas interações ecológicas e na distribuição geográfica das espécies, com consequências negativas para a biodiversidade e para bens e serviços ecossistêmicos, como a oferta de água e de alimento (CBD, 2014).

A acidificação oceânica traz grandes riscos aos ecossistemas marinhos, sobretudo às regiões polares e aos recifes de corais. No Alasca, por exemplo, a economia é altamente dependente do setor pesqueiro, e este já vem sentindo os efeitos da AO. Essa região possui uma das taxas de variação do pH mais evidentes e aceleradas do mundo. Isso se deve, principalmente, à existência de um único padrão de circulação oceânica e às baixas temperaturas da água (IPCC, 2022).

Além disso, a acidificação das águas do Alasca varia em intensidade, duração e extensão, devido a processos regionais, como a redução da quantidade de gelo no mar, o escoamento glacial e as descargas dos rios que potencializam a saturação do CO₂ na água (Frisch et al., 2015).

Segundo Hall-Spencer et al. (2008), a acidificação dos oceanos nos próximos 100 anos, combinada com o processo de aquecimento global, pode levar os recifes de coral ao colapso. O IPCC (2022) expôs em seu relatório, um aumento da temperatura média global da atmosfera de aproximadamente 1,5°C em relação às temperaturas pré-industriais (antes de 1750), ocasionando as mudanças climáticas que observadas atualmente. No entanto, independentemente do aumento das temperaturas atmosféricas e oceânicas globais, os efeitos negativos da AO, por si só, são danosos para muitas espécies aquáticas e põem em xeque todo o ecossistema marinho.

Sabe-se que as maiores variações de pH ocorrem na superfície do oceano. Contudo, diversos organismos em toda a coluna d'água estão sensíveis à mudança do pH. Os recifes de coral, o plâncton calcário e outros organismos cujos esqueletos ou conchas contêm carbonato de cálcio são diretamente afetados pela AO (Caldeira, 2013; Caldeira & Wickett, 2003; Doney et al., 2020). Os recifes de coral, são formados, principalmente, por corais duros. Eles fornecem alimento e a estrutura tridimensional que formam habitats para uma multiplicidade de organismos associados aos recifes, especialmente de comunidades bênticas, que contribuem para o funcionamento geral do ecossistema (Ceccarelli et al., 2019). Diversos experimentos realizados com importantes grupos de organismos calcários, como corais (Comeau et al., 2014; Iguchi et al., 2014; Movilla et al., 2014), ouriços-do-mar

(Yu et al., 2011; Courtney et al., 2013; Moulin et al., 2014; Moulin et al., 2015), mexilhões (Range et al., 2012; Bressan et al., 2014; Fitzer et al., 2014) e algas coralinas (Johnson & Carpenter, 2012; Comeau et al., 2014), demonstraram que estes grupos são sensíveis a elevadas quantidades de CO₂. Dentre os efeitos negativos relatados, estão a descalcificação, a incapacidade de regeneração, o subdesenvolvimento de larvas e juvenis, e o aumento da suscetibilidade à predação. Assim, a acidificação das águas provoca a redução quantitativa destes grupos de organismos (Hall-Spencer et al., 2008).

Experimentos realizados na ilha de Ísquia, Itália, nas áreas de respiradouros vulcânicos, onde o pH é mais baixo, mostraram uma redução significativa no número de espécies de alguns organismos, como algas Corallinaceae e corais Caryophyllia, Cladocora e Balanophyllia. Ademais, alguns organismos, como ouriços-do-mar, cracas e gastrópodes, sofreram redução da resistência de seus esqueletos e carapaças (Hall-Spencer et al., 2008). Brench et al. (2013) citam que o aumento de pCO₂ suscitou alteração ou perda dos sentidos de visão, audição e olfato e na percepção da presença/ausência de predadores no ambiente, em experimentos realizados com peixes de recife tropicais, como peixes-palhaço (*Ocellaris clownfish*) e donzelas (*Pomacentrus wardi*). Estes autores relatam, ainda, a redução dos níveis de sobrevivência de pós-eclosão do peixe estuarino *Menidia beryllina*. Os elevados níveis de CO₂ podem, também, interferir no funcionamento do cérebro dos peixes, aumentando sua vulnerabilidade à predação, como demonstrado no estudo de Domenici et al. (2012).

Richards et al. (2015) relataram que a AO influencia negativamente na pesca e aquicultura comercial de camarões e vieiras. Há, também, centenas de relatos quanto à descalcificação das conchas de diversos tipos de mariscos e gastrópodes, e da descalcificação dos recifes de coral, ocasionando a alteração de toda a biota que deles depende, como peixes, tartarugas, tunicatos, poliquetas e anêmonas (Hall-Spencer et al. 2008; Anthony et al., 2011; Kolbert, 2011; Caldeira, 2013; Ricke et al., 2013; IPCC, 2022).

Hall-Spencer et al. (2008) observaram que a AO pode beneficiar algumas espécies de algas que parecem suportar o aumento das concentrações de pCO₂, como os gêneros *Caulerpa*, *Cladophora*, *Asparagopsis*, *Dictyota* e *Sargassum*, sendo algumas destas não nativas e altamente invasivas, de forma que começaram a alterar ecossistemas marinhos, predominando-os. Assim, a AO pode afetar a distribuição e a dinâmica das populações de muitos organismos marinhos, podendo levar até mesmo à extinção de algumas espécies. Processos de pré-vida (como a fertilização) e estágios iniciais (i.e., ovos, larvas, juvenis) podem ser relativamente mais vulneráveis aos impactos potenciais da AO, com implicações para o recrutamento em populações marinhas (Bromhead et al., 2014).

A compreensão dos efeitos da redução do pH sobre a biota marinha ainda é limitada, pois experimentos laboratoriais que tentam simular as condições de campo são impedidos pela dificuldade de imitar as condições naturais de AO por períodos suficientemente longos para afetar as comunidades, em especial de macroorganismos (Hall-Spencer et al., 2008).

5 Outras Consequências da Acidificação Oceânica

O processo de AO também pode potencializar o aquecimento global, através da redução de emissão do dimetilsulfeto (DMS) pelo fitoplâncton. O DMS ajuda na formação de nuvens, que representam um bloqueio à entrada de raios solares na atmosfera, reduzindo a absorção pela superfície da Terra. Assim, esse composto orgânico contribui para que os raios solares sejam refletidos, ajudando a controlar o aquecimento global (Kloster et al., 2007; Six et al., 2013).

Não somente o meio ambiente sofre com a AO. Importantes setores socioeconômicos também são afetados, como o turismo, a recreação e a pesca, tanto a de captura, quanto a de produção em cativeiro marinho (Rodrigues et al., 2013; IPCC, 2022). Adicionalmente, há alterações dos custos associados aos diversos tipos de serviços ecossistêmicos, como o sequestro de carbono, os de valor patrimonial e cultural, dentre

outros (Tabela 1), sem considerar o valor de não uso dos bens naturais (Rodrigues et al., 2013; CBD, 2014).

Tabela 1 - Classificação de bens e serviços dos ecossistemas marinhos e costeiros (Rodrigues et al., 2013).

Tipos de serviços ecossistêmicos	Exemplos
Serviços de provisionamento	Fornecimento de alimentos, matérias-primas, recursos ornamentais e outros recursos marinhos.
Serviços de regulação	Regulação da emissão de gases, do clima e da água; proteção costeira contra inundações e tempestades; prevenção de erosão; biorremediação de resíduos; sequestro de carbono.
Serviços culturais	Suporte para atividades recreativas; valores estéticos, patrimoniais e culturais, cognitivos e educacionais, de existência (de habitats e espécies).
Serviços de apoio	Resiliência e resistência; habitats biologicamente estruturados (habitats cuja estrutura é formada pelos próprios organismos marinhos); ciclagem de nutrientes.

Com a redução dos bens e serviços ecossistêmicos, a acidificação dos oceanos pode provocar perdas de um trilhão de dólares por ano, até 2100, caso não sejam tomadas medidas urgentes para impedir a acidificação dos oceanos (CBD, 2014).

6 Mitigação e Adaptação

A análise de vulnerabilidade, em qualquer aspecto (como a climática e a hidrológica), gera invariavelmente a proposição de medidas de mitigação e adaptação. As ações de mitigação incluem o uso de tecnologias e a implementação de políticas; e as de adaptação, maneiras de reduzir sua vulnerabilidade e aumentar sua resiliência. Ambas são complementares e seus resultados são igualmente importantes para as mudanças em processos sociais e ambientais, e se alcançar a desejada redução de riscos (IPCC, 2022).

A recuperação da acidificação dos oceanos é um processo complexo e difícil de ser alcançado, pois envolve a redução das emissões de CO₂, enxofre e nitrogênio (Norton et al., 2014). Assim, no que concerne às medidas de mitigação, a única ação conhecida e realista em escala global é agir em prol da redução das concentrações desses gases (IGBP/IOC/SCOR, 2013), seja pela redução das emissões, seja pelo seu sequestro da atmosfera. Uma solução para aumentar a captura de carbono atmosférico está na vegetação e nos solos, através do manejo adequado do uso do solo e de mudanças nesses usos, como a restauração de terras úmidas, o plantio de novas florestas e o reflorestamento.

A transformação do dióxido de carbono em bicarbonato funciona como uma neutralização da AO, disponibilizando mais carbonato de cálcio nas conchas dos organismos marinhos. Porém, os processos naturais de neutralização, como a erosão de rochas em terra firme (Kolbert, 2011), são muito lentos para compensar a acidificação (Norton, 2011).

Assim, para que essa seja uma medida de mitigação, o método de neutralização a ser aplicado é o acréscimo de minerais alcalinos na água dos oceanos, como calcário em pó. Norton (2011) afirma que essa medida é viável, porque, além de ser barata e efetiva, os oceanos têm capacidade para absorver grandes quantidades de cal e nenhum efeito colateral foi relatado.

Porém, de acordo com o relatório do IGBP/IOC/SCOR (2013), essa opção é economicamente viável e efetiva somente em regiões costeiras e em pequena escala, pois envolve alterações massivas da composição química dos oceanos, além de os efeitos colaterais para os ecossistemas serem, na verdade, largamente desconhecidos. Ainda, de acordo com Kolbert (2011), a neutralização dos efeitos do CO₂ exige grandes quantidades de produtos químicos. Por exemplo, para compensar uma tonelada de CO₂, seriam necessárias duas toneladas de cal e, considerando a escala de emissão de 30 bilhões de toneladas anuais, a quantidade necessária se torna inviável.

Segundo Bollmann et al. (2010), outra alternativa, porém controversa, é a fertilização das águas dos oceanos com ferro. Alguns cientistas

defendem a ideia de que a introdução deste íon aumentaria a produtividade do fitoplâncton, já que o ferro pode ser um nutriente escasso e, portanto, limitante, em algumas regiões. A fertilização promoveria o sequestro de carbono atmosférico através de sua conversão em biomassa. No entanto, nesse processo, a matéria orgânica produzida, posteriormente seria decomposta, diminuindo o O₂ local e aumentando o CO₂, podendo intensificar o processo da acidificação e causar distúrbios de nutrientes em outras regiões do oceano. Além disso, não se sabe ao certo quais seriam seus efeitos, principalmente para a biota marinha e toda a cadeia produtiva (Bollmann et al., 2010). Com isso, essa opção passou a ser rejeitada pela comunidade científica.

Tendo em vista tais medidas de mitigação, alguns pesquisadores consideram, até o momento, que o processo de AO é irreversível, alegando que estas são, aparentemente, inviáveis, seja devido a custos, seja devido à escala temporal em que os processos ocorrem. Por outro lado, medidas de adaptação podem surtir efeito. Muitas delas vêm sendo debatidas nas convenções internacionais. Apesar das questões relativas à AO não serem, de fato, governadas por tratados internacionais, algumas conferências já foram realizadas, como o Protocolo de Londres (1972); a Convenção das Nações Unidas Sobre o Direito do Mar (1982); a Convenção sobre a Diversidade Biológica – CDB e a Convenção Quadro da ONU sobre Mudanças Climáticas (da sigla em inglês, UNFCCC), ambas estabelecidas durante a Eco-92; o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC, estabelecido em 1988); a Declaração de Mônaco (2008); e a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (2012), a Rio+20; e a Conferência do Clima das Nações Unidas COP 27 (2022).

O papel de adaptação das convenções internacionais é promover o diálogo entre os diferentes atores da sociedade. Porém, muitas delas têm um forte viés de mitigação. Por exemplo, a Declaração de Mônaco representou uma ação coordenada da comunidade científica internacional e tomadores de decisão, e a Rio+20, além de reconhecer a AO como uma ameaça para ecossistemas econômica e ecologicamente importantes e para o bem-estar humano, anunciou a criação do Centro de Coordenação Internacional da Acidificação dos Oceanos, em Mônaco, com o intuito de promover a integração e a comunicação das ações globais sobre AO.

Contudo, ainda não se pode afirmar que haja mecanismos internacionais ou fundos adequados para tratar especificamente nem da mitigação, nem da adaptação (IGBP/IOC/SCOR, 2013). Por fim, mesmo que as emissões de gases que contribuem para a AO fossem interrompidas, levaria milhares de anos para que a composição química dos oceanos retornasse aos níveis anteriores à Revolução Industrial.

É importante ressaltar que as vulnerabilidades estão intimamente relacionadas em muitos dos casos. A vulnerabilidade hidrológica, tratada no presente estudo, está diretamente relacionada à vulnerabilidade climática, mediada pela ascensão das emissões e, conseqüentemente, das concentrações atmosféricas de carbono. Entretanto, a vulnerabilidade dos oceanos proveniente da condição de acidificação é negligenciada. Os seres humanos parecem notar somente os problemas diretamente relacionados ao ambiente onde vivem (atmosférico), sendo-lhes difícil perceber os enormes riscos ambientais, sociais e econômicos que essa negligência pode acarretar.

7 Considerações Finais

Importantes grupos de organismos marinhos estão sendo afetados pelo impacto negativo causado pela AO, incluindo impactos diretos a organismos de pequeno porte e alterações em teias alimentares de peixes maiores, alguns deles comerciais. Mesmo sem considerar as questões relativas ao aquecimento global, o aumento na concentração de pCO₂ representa uma ameaça, já que possivelmente resultará em diminuição da biodiversidade marinha e em drásticas alterações desses ecossistemas.

Tendo em vista as conseqüências concretas e potenciais da AO, é premente que o tema ganhe mais visibilidade, tanto em publicações quanto na tomada de decisão e na sociedade, da mesma maneira que o aquecimento global – tema largamente debatido no meio acadêmico,

político e na mídia. Nesse contexto, é notório o papel do poder público e privado na tomada de decisões em prol de ações de mitigação e de adaptação. Devem ser incentivadas não somente as ações diretas de mitigação, como também a adoção de medidas de adaptação, como a continuidade da realização de conferências e acordos internacionais.

Referências

- Anthony, K. R. N., Maynard, J. A., Diaz-Pulido, G., Mumby, P. J., Marshall, P. A., Cao, L. & Hoegh-Guldberg, O. (2011). Ocean acidification and warming will lower coral reef resilience. *Global Change Biology*. 17(5):1798-1808. DOI: 10.1111/j.1365-2486.2010.02364.x.
- Baird, C.; & Cann, M. (2011). *Química ambiental*. 4th Edition. Bookman. ISBN: 8577808483.
- Bijma, J., Pörtner, H. O., Yesson, C., & Rogers, A. D. (2013). Climate change and the oceans – What does the future hold? *Marine Pollution Bulletin*. 74(2):495-505. DOI: doi.org/10.1016/j.marpolbul.2013.07.022.
- Bollmann, M., Bosch, T., Colijn, F., Ebinghaus, R., Froese, R., Güssow, K., Khalilian, S., Krastel, S., Körtzinger, A., Langenbuch, M., Latif, M., Matthiessen, B., Melzner, F., Oschlies, A., Petersen, S., Proelß, A., Quaa, M., Reichenbach, J., Requate, T., Reusch, T., Rosenstiel, P., Schmidt, J. O., Schrotke, K., Sichesmidt, H., Siebert, U., Soltwedel, R., Sommer, U., Statterger, K., Sterr, H., Sturm, R., Treude, T., Vafeidis, A., Van Bernem, C., Van Beusekom, J., Voss, R., Visbeck, M., Wahl, M., Wallmann, K., & Weinberger, F. (2010). *World ocean review – Living with oceans*. Hamburg: Maribus. 232.
- Branch, T. A., DeJoseph, B. M., Ray, L. J., & Wagner, C. A. (2013). Impacts of ocean acidification on marine seafood. *Trends in Ecology & Evolution*. 28(3):178-186. DOI: 10.1016/j.tree.2012.10.001.
- Bressan, M., Chinellato, A., Munari, M., Matozzo, V., Mancini, A., Marčeta, T., Finos, L., Moro, I., Pastore, P., Badocco, D., & Marin, M. G. (2014). Does seawater acidification affect survival, growth and shell integrity in bivalve juveniles? *Marine Environmental Research*. 99:136-148. DOI: 10.1016/j.marenvres.2014.04.009.
- Bromhead, D., Scholey, V., Nicola, S., Margulies, D., Wexler, J., Stein, M., Hoyle, S., Lennert-Cody, C., Williamson, J., Havenhand, J., Ilyina, T., & Lehodey, P. (2014). The potential impact of ocean acidification upon eggs and larvae of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*). *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*. In press.
- Caldeira, K. & Wickett, M. E. (2003). Anthropogenic carbon and ocean pH – The coming centuries may see more ocean acidification than the past 300 million years. *Nature*. 425:365. DOI: https://doi.org/10.1038/425365a.
- Caldeira, K. (2013). Coral Bleaching: Coral “refugia” amid heating seas. *Nature Climate Change*. 3:444-445. DOI: 10.1038/nclimate1888
- CBD. Convention on Biological Diversity (2014). *An Updated Synthesis of the Impacts of Ocean Acidification on Marine Biodiversity* (Eds: S. Hennige, J.M. Roberts & P. Williamson). Montreal, Technical Series. 99.
- Cole, J. J., Hararuk, O., & Solomon, C. T. (2021). Chapter 7 - The Carbon Cycle: With a Brief Introduction to Global Biogeochemistry. In: Kathleen C. Weathers, David L. Strayer, Gene E. Likens. *Fundamentals of Ecosystem Science*, Academic Press. 2nd ed. 131-160.
- Comeau, S., Carpenter, R. C. & Edmunds, P. J. (2014). Effects of irradiance on the response of the coral *Acropora pulchra* and the calcifying alga *Hydrolython reinboldii* to temperature elevation and ocean acidification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 453:28-35. DOI: 10.1016/j.jembe.2013.12.013
- Courtney, T., Westfield, I. & Ries, J. B. (2013). CO₂-induced ocean acidification impairs calcification in the tropical urchin *Echinometra viridis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 440:169-175. DOI: 10.1016/j.jembe.2012.11.013.
- Domenici, P., Allan, B., McCormick, M. I. & Munday, P. L. 2012. Elevated CO₂ affects behavioral lateralization in a coral reef fish. *Biology Letters*. 8(1):78-81. DOI: 10.1098/rsbl.2011.0591.
- Doney, S. C., Fabry, V. J., Feely, R. A., & Kleypas, J. A. (2009). Ocean Acidification: The other CO₂ Problem. *Marine Science*. 1:169-192. DOI: 10.1146/annurev.marine.010908.163834.
- Doney, S. C., Busch, D. S., Cooley, S. R., & Kroeker, K. J. (2020). The impacts of ocean acidification on marine ecosystems and reliant human communities. *Annual Review of Environment and Resources*. 45:83-112. DOI: 10.1146/annurev-environ-012320-083019.
- Fitzer, S. C., Cusack, M., Phoenix, V. R., & Kamenos, N. A. (2014). Ocean acidification reduces the crystallographic control in juvenile mussel shells. *Journal of Structural Biology*. 188(1):39-45. DOI: 10.1016/j.jsb.2014.08.007.
- Frisch, L. C., Mathis, J. T., Kettle, N. P., & Trainor, S. F. (2015). Gauging perceptions of ocean acidification in Alaska. *Marine Policy*. 53:101-110. DOI: 10.1016/j.marpol.2014.11.022.
- Hall-Spencer, J. M., Rodolfo-Metalpa, R., Martin, S., Ransome, E., Fine, M., Turner, S. M., Rowley, S. J., Tedesco, D., & Buia, M. (2008). Volcanic carbon dioxide vents show ecosystem effects of ocean acidification. *Nature*. 454:96-99. DOI: https://doi.org/10.1038/nature07051.
- IGBP/IOC/SCOR. The International Geosphere-Biosphere Programme/ Intergovernmental Oceanographic Commission/Scientific Committee On Oceanic Research. (2013). *Ocean Acidification Summary for Policymakers – Third Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World*. International Geosphere-Biosphere Programme:Stockholm. 22.
- Iguchi, A., Kumagai, N. H., Nakamura, T., Suzuki, A., Sakai, K., & Nojiri, Y. (2014). Responses of calcification of massive and encrusting corals to past, present, and near-future ocean carbon dioxide concentrations. *Marine Pollution Bulletin*. 89(1-2):348-335. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2014.09.037.
- IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Pörtner, H. O., Roberts, D.C., Tignor, M., Poloczanska, E. S., Mintenbeck, K. Alegria, A., Craig, M., Langsdorf, S., Löschke, S. Möller, V. Okem, A. & Rama, B. (eds.). Cambridge University Press. Cambridge University Press:Cambridge. 3056. DOI: 10.1017/9781009325844.
- Johnson, M. D., & Carpenter, R. C. (2012). Ocean acidification and warming decrease calcification in the crustose coralline alga *Hydrolython onkodes* and increase susceptibility to grazing. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 434-435:94-101. DOI: 10.1016/j.jembe.2012.08.005.
- Kloster, S., Six, K.D., Feichter, J., Maier-Reimer, E., Roeckner, E., Wetzel, P., Stier, P., & Esch, M. (2007). Response of dimethylsulfide (DMS) in the ocean and atmosphere to global warming. *Journal of Geophysical Research*. 112(3). DOI: 10.1029/2006JG000224.
- Kolbert, E. (2011). *Mar Ácido*. National Geographic. 11(133):68-87.
- Landrigan, P. J., Stegeman, J. J., Fleming, L. E., Allemand, D., Anderson, D. M., Backer, L. C., Brucker-Davis, F., Chevalier, N., Corra, L., Czerucka, D., Bottein, M. D., Demeneix, B., Depledge, M., Deheyn, D. D. & Dorman, C. J. (2020). Human Health and Ocean Pollution. *Annals of Global Health*. 86(1):1-64. DOI: 10.5334/aogh.2831.
- Lenzi, E. & Favero, L. O. B. (2019). *Introdução à Química da Atmosfera: Ciência, Vida e Sobrevivência*. 2nd ed. LTC:São Paulo. ISBN: 8521634846.
- Libes, S. (2009). *Introduction to Marine Biogeochemistry*. 2nd Edition. Elsevier: Oxford. 909 p. ISBN: 9780120885305.
- Morel, F. M. M. (1983). *Principles of Aquatic Chemistry*. John Wiley & Sons Inc:New York. 456. ISBN: 0471548960.
- Moulin, L., Grosjean, P., Leblud, J., Batigny, A., & Dubois, P. (2014). Impact of elevated pCO₂ on acid-base regulation of the sea urchin *Echinometra mathaei* and its relation to resistance to ocean acidification: A study in mesocosms. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 457:97-104. DOI: 10.1016/j.jembe.2014.04.007.
- Moulin, L., Grosjean, P., Leblud, J., Batigny, A., Collard, M., & Dubois, P. (2015). Long-term mesocosms study of the effects of ocean acidification on growth and physiology of the sea urchin *Echinometra mathaei*. *Marine Environmental Research*. 103:103-114. DOI: j.marenvres.2014.11.009.
- Movilla, J., Calvo, E., Pelejero, C., Coma, R., Serrano, E., Fernández-Vallejo, P., & Ribes, M. (2012). Calcification reduction and recovery in native and non-native Mediterranean corals in response to ocean acidification. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 438(30):144-153. DOI: 10.1016/j.jembe.2012.09.014.
- Nikinmaa, M. 2013. Climate change and ocean acidification: Interactions with aquatic toxicology. *Aquatic Toxicology*. 126:365-372. DOI: 10.1016/j.aquatox.2012.09.006.
- Norton, J. M. 2011. *Ocean Acidification: Cause, Effect, and Potential Mitigation Approaches*. *Marine Science*. 201:40-42.
- Norton, S. A., Kopáček, J., & Fernandez, I. J. (2014). *Acid Rain – acidification and recovery. earth systems and environmental sciences, from treatise on geochemistry*. 2nd Edition. 379-414.
- Nybakken, J. W. & Bertness, M. D. (2004). *Marine Biology: An Ecological Approach*. 6th Edition. Pearson:São Francisco. 592. ISBN: 0805345825.
- Range, P., Piló, D., Ben-Hamadou, R., Chicharo, M. A., Matias, D., Joaquim, S., Oliveira, A. P., & Chicharo, L. (2012). Seawater acidification by CO₂ in a coastal lagoon environment: Effects on life history traits of juvenile mussels *Mytilus galloprovincialis*. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 424-425(1):89-98. DOI: 10.1016/j.jembe.2012.05.010.
- Reid, P. C., Fischer, A. C., Lewis-Brown, E., Meredith, M. P., Sparrow, M., Andersson, A. J., Antia, A., Bates, N. R., Bathmann, U., Beaugrand, G., Brix, H., Dye, S., Edwards, M., Furevik, T., Gangstø, R., Hátún, H., Hopcroft, R. R., Kendall, M., Kasten, S., Keeling, R., Le Quéré, C., Mackenzie F. T.,

- Malin, G., Mauritzen, C., Olafsson, J., Paull, C., Rignot, E., Shimada, K., Vogt, M., Wallace, C., Wang, Z., & Washington, R. (2009). Impacts of the oceans on climate change. *Advances in Marine Biology*. 56:1-150. DOI: 10.1016/S0065-2881(09)56001-4.
- Richards, R. G., Davidson, A. T., Meynecke, J., Beattie, K., Hernaman, V., Lynam, T., & Van Putten, I. E. (2015). Effects and mitigations of ocean acidification on wild and aquaculture scallop and prawn fisheries in Queensland, Australia. *Fisheries Research*. 161:42-56. DOI: 10.1016/j.fishres.2014.06.013.
- Ricke, K. L., Orr, J. C., Schneider, K., & Caldeira, K. (2013). Risks to coral reefs from ocean carbonate chemistry changes in recent earth system model projections. *Environmental Research Letters*. 8(3):034003. DOI: 10.1088/1748-9326/8/3/034003.
- Riebesell, U., Fabry, V. J., Hansson, L., & Gattuso, J.-P. (2010). Guide to best practices for ocean acidification research and data reporting. Luxembourg: Publications Office of the European Union. 260 p.
- Rodrigues, L. C., Van Den Bergh, J. C. J. M., & Ghermandi, A. (2013). Socio-economic impacts of ocean acidification in the Mediterranean Sea. *Marine Policy*. 38:447-456. DOI: 10.1016/j.marpol.2012.07.005.
- Schmitz, O. J., Wilmers, C. C., Leroux, S. J., Doughty, C. E., Atwood, T. B., Galetti, M., Davies, A. B., & Goetz, S. J. (2018). Animals and the zoogeochemistry of the carbon cycle. *Science*. 362(6419). DOI: 10.1126/science.aar3213.
- Six, K. D., Kloster, S., Ilyina, T., Archer, S. D., Zhang, K., & Maier-Reimer, E. (2013). Global warming amplified by reduced sulphur fluxes as a result of ocean acidification. *Nature Climate Change*. 3(975-978). DOI: 10.1038/nclimate1981.
- Turner, B. L., Kaspersen, R. E., & Christensen, L. (2003). A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 100(14):8074-8079. DOI: 10.1073/pnas.1231335100.
- WMO. World Meteorological Organization (2012). WMO Greenhouse Gas Bulletin – The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through, 2011.
- WMO. World Meteorological Organization (2020). WMO Greenhouse Gas Bulletin (GHG Bulletin) - n. 16: The State of Greenhouse Gases in the Atmosphere Based on Global Observations through 2019.
- Yu, P. C., Matson, P. G., Martz, T. R. & Hofmann, G. E. (2011). The ocean acidification seascape and its relationship to the performance of calcifying marine invertebrates: Laboratory experiments on the development of urchin larvae framed by environmentally-relevant pCO₂/pH. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 400(1-2):288-295. DOI: 10.1016/j.jembe.2011.02.016.