



**Centro Universitário de Brasília
Instituto CEUB de Pesquisa e Desenvolvimento - ICPD**

BÁRBARA SEGATO MONTEIRO

**ACIDIFICAÇÃO OCEÂNICA: IMPACTOS E MECANISMOS DE
MUDANÇA**

Brasília
2021

BÁRBARA SEGATO MONTEIRO

**ACIDIFICAÇÃO OCEÂNICA: IMPACTOS E MECANISMOS DE
MUDANÇA**

Trabalho apresentado ao Centro Universitário de Brasília (UniCEUB/ICPD) como pré-requisito para obtenção de Certificado de Conclusão de Curso de Pós-graduação *Lato Sensu* em Análise Ambiental e Desenvolvimento Sustentável.

Orientadora: Profa. MSc. Ana Karl

Brasília
2021

BÁRBARA SEGATO MONTEIRO

**ACIDIFICAÇÃO OCEÂNICA: IMPACTOS E MECANISMOS DE
MUDANÇA**

Trabalho apresentado ao Centro
Universitário de Brasília (UniCEUB/ICPD)
como pré-requisito para a obtenção de
Certificado de Conclusão de Curso de Pós-
graduação *Lato Sensu* Análise Ambiental e
Desenvolvimento Sustentável

Orientadora: Profa. MSc. Ana Karl

Brasília, 16 de dezembro de 2021.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Luiz Carlos Bhering Nasser

Prof. Dr. Gilson Ciarallo

Coastal people never really know what the ocean symbolizes to land-locked inland people—what a great distant dream it is, present but unseen in the deepest levels of subconsciousness, and when they arrive at the ocean and the conscious image are compared with the subconscious dream there is a sense of defeat at having come so far to be stopped by a mystery that can never be fathomed. The source of it all.

Robert M. Pirsig

RESUMO

A partir do aumento das emissões de CO₂ antropogênico de forma mais intensa e acelerada desde a revolução industrial, a acidificação dos oceanos se tornou um dos principais problemas marinhos. Este trabalho realizou uma revisão da literatura nacional e estrangeira existente sobre o tema de acidificação para compreender como se dá a acidificação, quais são seus impactos sob a biota marinha (fauna, flora e corais) e para delimitar possíveis mecanismos de mudança do atual panorama negativo. Para isto, o trabalho passa também pelos conceitos chave de “antropoceno”, nova era geológica inaugurada recentemente e de “limites planetários”, importante estudo que propõe limites seguros de operação das atividades humanas. A partir da literatura revisada, pôde-se perceber que os impactos da acidificação sobre organismos calcificadores e não-calcificadores já são uma realidade grave para os dias atuais e tendem a se intensificar no futuro. Os mecanismos de mudança base são globais (diminuição imediata da emissão de CO₂) e locais (melhorias na gestão de áreas costeiras e marinhas e maior insumo para pesquisas na área).

Palavras-chave: Acidificação oceânica. Emissão de CO₂. Impactos sob biota marinha. Mecanismos de mudança.

ABSTRACT

The industrial revolution emissions of anthropogenic CO₂ are more accelerated and intense than ever before, which created a serious marine problem called ocean acidification. This paper conducted a literary review of national and foreign research about ocean acidification to better comprehend how it occurs, what are its impacts on marine biota (fauna, flora and corals) and to determine possible mechanisms to impose change in this current negative scenario. With that end, this paper also focus on two key concepts: "Anthropocene", the new geologic era soon unveiled and "planetary boundaries", an important study that determines a safe space for human operations. From revised literature, it was concluded that the impacts of ocean acidification on calcifying and non-calcifying organisms is already a major reality and tend to be more intense in the future. The change mechanisms identified are global (immediate decrease of CO₂ emissions) and local (improvements on the marine and coastal management and higher support to research in the area).

Key words: Ocean acidification. CO₂ emissions. Impacts on marine biota. Change mechanisms.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Escala de pH e níveis de acidificação passados, atuais e futuros.....	11
Figura 2 – Esquema das reações químicas da acidificação oceânica.....	12
Figura 3 – Coluna geológica do planeta terra.....	14
Figura 4 – Estimativa quantitativa dos limites planetários.....	16
Figura 5 – Status atualizado da estimativa quantitativa dos limites planetários.....	17
Figura 6 – Fisionomia de rodólitos em um mesmo local sem flora abundante (A) e com abundante espécies de algas (B).....	22
Figura 7 – Antes e depois do branqueamento de corais na Grande Barreira de Corais (Austrália).....	26
Figura 8 – Tanques do sistema de mesocosmo marinho em Arraial d’Ajuda (BA).....	30
Figura 9 – Economia donut.....	31

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	08
1 A ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS	10
1.1 Ações antrópicas e limites planetários	13
2 IMPACTOS SOB A BIOTA MARINHA	19
2.1 Flora Marinha	19
2.2 Fauna Marinha	22
2.3 Corais	24
3 MECANISMOS DE MUDANÇA	27
CONCLUSÃO	33
REFERÊNCIAS	34
ANEXO A – Metas e indicadores da ODS 14, Vida na Água	40

INTRODUÇÃO

O oceano é fonte expressiva de diversidade biológica, água, produção de biomassa, oxigênio e outros aspectos importantes para a saúde humana. Mantê-lo saudável é indispensável para a manutenção do planeta, e, por conseguinte, da vida humana (NRC, 1999). A vastidão do oceano o fez parecer ser fonte ilimitada de comida, transporte, recreação e fascínio. No entanto, esta mesma vastidão ocasionou dificuldades em criar políticas para protegê-lo, deixando-o suscetível à exploração. O oceano também possui papel crucial na regulação do clima e no ciclo de gases atmosféricos importantes, como o dióxido de carbono (CO₂). Ações antrópicas também ocasionaram graves mudanças entre o ciclo desses gases e a saúde oceânica (COSTANZA, 1999).

A partir da Revolução Industrial, atividades antropogênicas aceleraram o aumento da concentração de CO₂ atmosférico predominantemente através da queima de combustíveis fósseis e o uso da terra, como indústria, agricultura e desmatamento (FEELY; DONEY; COOLEY, 2009). O oceano absorve até 30% do CO₂ atmosférico, o que ocasionou o desequilíbrio químico das águas marinhas superficiais, que vem sofrendo os graves impactos da acidificação oceânica, que em dias atuais já alcançou a diminuição de 0,1 no pH do oceano (BERGSTROM, 2016).

Tabela 1 – Emissões passadas, presentes e futuras de CO₂ e pH marinho

	Período Glacial	Período pré-industrial	Presente	2x mais CO ₂	3x mais CO ₂	Mudança do período pré-industrial para 3x mais CO ₂
Concentração de CO ₂ (ppm)	180	280	380	560	840	200%
pH	8,32	8,16	8,05	7,91	7,76	-0,4

Fonte: Adaptado de Feely, Doney e Cooley (2009).

O aumento do CO₂ atmosférico está alterando a química da água do mar, visto que os oceanos absorvem atualmente cerca de um quarto do CO₂ antrópico. Quando o CO₂ é dissolvido na água do mar, ele forma ácido carbônico e diminui o pH da água e a concentração de íons carbonato (CaCO₃), o elemento base para a

formação de conchas e esqueletos de diversos organismos marinhos (ORR et al., 2009).

O presente estudo se propõe a compreender como se dá o processo de acidificação oceânica, os possíveis impactos deste fenômeno sob a biota marinha e alguns dos mecanismos de mudança disponíveis. O objetivo geral deste trabalho é entender como ocorre a acidificação dos oceanos e de qual forma ela está ligada às ações antrópicas. De maneira específica, o estudo pretendeu compreender o papel das emissões de CO₂ na acidificação, demonstrar os impactos da acidificação oceânica já estudados sob a biota marinha e desenvolver possíveis soluções para mitigar estes impactos com a finalidade de criar uma perspectiva de mudança.

Durante a realização deste estudo, foi realizada uma revisão narrativa da literatura existente sobre as diversas abordagens ao tema da acidificação oceânica, com a finalidade de evidenciar os principais conceitos e sintetizar os resultados e processos envolvidos na acidificação dos oceanos.

A relevância deste trabalho está pautada na necessidade primordial de tornar a agenda oceânica um assunto central nas discussões sobre mudança climática, sustentabilidade e meio ambiente, sobretudo no tema de acidificação oceânica, além de trazer este tema mais próximo da compreensão de todos. Academicamente, esta pesquisa pretende contribuir para novas reflexões em torno da acidificação oceânica e apresenta o diálogo entre diversos autores, nacionais e estrangeiros, que outrora abordaram o assunto.

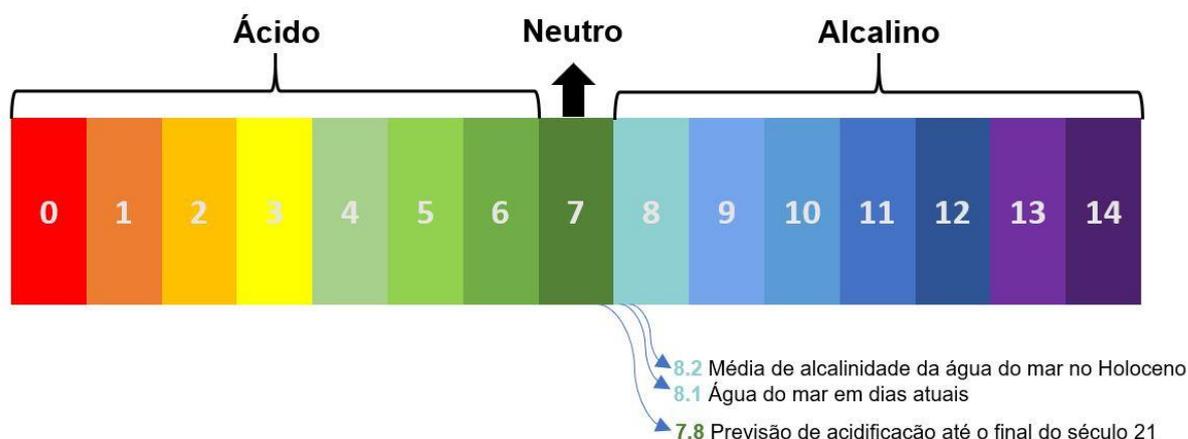
O presente trabalho foi então estruturado em três capítulos. O primeiro capítulo, apresentam-se os achados sobre o processo da acidificação oceânica e como as ações antrópicas estão conectadas a este processo. O segundo capítulo proporciona uma análise sobre os impactos da acidificação sob a biota marinha e subdividiu-se em três subcapítulos: fauna marinha, flora marinha e corais. No terceiro capítulo apresentam-se as elaborações quanto aos mecanismos de mudança globais e locais que auxiliarão no processo de mitigação da acidificação oceânica.

1 A ACIDIFICAÇÃO DOS OCEANOS

O aumento contínuo das emissões antropogênicas de dióxido de carbono (CO_2) para a atmosfera desde o início da Revolução Industrial elevou a concentração de CO_2 na atmosfera a níveis 40% superiores aos encontrados no período pré-industrial (HOOD et al., 2009). Atualmente, os oceanos absorvem todo ano até 25% das emissões de CO_2 antropogênico, o que vem reduzindo o impacto deste gás de efeito estufa sobre as mudanças climáticas em nosso planeta a um altíssimo custo ambiental que possui profundo impacto sob a química e a biota marinha (KERR et al., 2012). De acordo com Sabine et al. (2004), aproximadamente um terço do dióxido de carbono antropogênico produzido nos últimos 200 anos foi absorvido pelos oceanos.

O sistema de carbono inorgânico é um dos equilíbrios químicos mais importantes no oceano e é o principal responsável por controlar o nível de pH da água do mar (FABRY et al., 2008). A escala de pH é logarítmica e mede o quão ácida ou alcalina é uma substância. A escala vai de 0 (acidez alta) à 14 (alcalinidade alta), onde 7 indica neutralidade. Os oceanos são naturalmente alcalinos, com uma média de pH de 8,2 na superfície oceânica. Atualmente, a acidez das águas oceânicas superficiais aumentou cerca de 30%, resultando na redução de 0,1 na média de pH dos oceanos, medindo hoje 8,1 na escala logarítmica (UNEP, 2010). Além disso, há estudos que indicam que se continuar o ritmo atual de emissões de CO_2 , o pH da água do mar sofrerá um declínio de 0,3 até o final do século 21, aumentando o nível de acidificação oceânica em 150% (CALDEIRA; WICKETT, 2003 & RAVEN et al., 2005).

Figura 1 - Escala de pH e níveis de acidificação passados, atuais e futuros

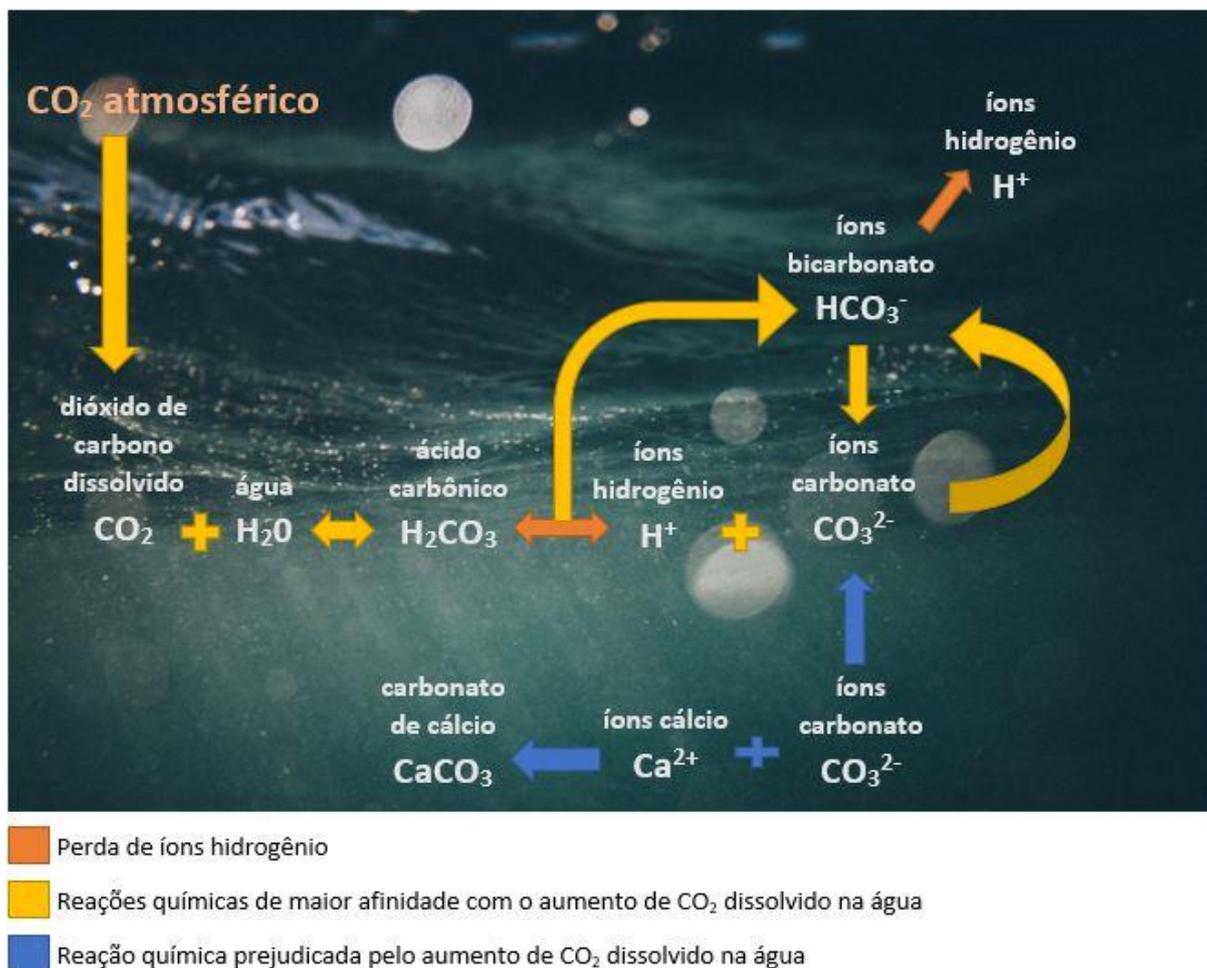


Fonte: Elaborado pela autora.

Entende-se por acidificação a redução do pH dos oceanos, cuja principal causa é a dissolução do CO_2 atmosférico na água marinha. Após sua absorção pela água do mar, a reação química entre a água (H_2O) e o dióxido de carbono (CO_2) produz ácido carbônico (H_2CO_3). O ácido carbônico é uma molécula instável e perde íons hidrogênio (H^+), deixando íons bicarbonato (HCO_3^{1-}) que por sua vez, também perde íons hidrogênio (H^+), deixando íons carbonato (CO_3^{2-}) em menor quantidade. O aumento da concentração de H^+ é o grande responsável pela redução do pH da água (SODRE; SILVA; MONTEIRO, 2016).

A quantidade reduzida de CO_3^{2-} disponíveis na água do mar combinada a quantidade extra de H^+ livres na água, proporciona o ambiente ideal para que esta reação ocorra ($\text{CO}_3^{2-} + \text{H}^+$), comprometendo a reação de CO_3^{2-} com íons de cálcio (Ca^{2+}) diminuindo a produção de carbonato de cálcio (CaCO_3), molécula crucial para indivíduos calcificadores (moluscos, equinodermos, corais e uma variedades de algas) do oceano (DONEY, 2006), que produzem seus esqueletos e conchas a partir de CaCO_3 (HOFMANN; BISCHOF, 2014).

Figura 2 - Esquema das reações químicas da acidificação oceânica



Fonte: Elaborada pela autora.

A distribuição espacial do CO_2 antropogênico dissolvido e as taxas de armazenamento e captação reportadas até os dias de hoje ainda são incertas (KHATIWALA; PRIMEAU; HALL, 2009). No entanto, estima-se que até 34% da absorção oceânica global de CO_2 antropogênico ocorra na superfície do Oceano Atlântico, tornando-o particularmente suscetível aos efeitos da acidificação (GRUBER, 1998; LEE et al., 2003).

Além disso, a segunda Avaliação Oceânica Mundial (*World Ocean Assessment*), lançada neste ano, chama a atenção para os estudos que combinam a acidificação e a desoxigenação das águas marinhas nos estudos sobre o desequilíbrio químico (ONU, 2021). A eutrofização, o aumento de nutrientes em um corpo d'água que causa a acumulação de biomassa das algas e a degradação microbiana, e a acidificação oceânica estão interligadas, visto que a degradação de matéria orgânica

produz CO₂, diminuindo o pH natural da água, enquanto também diminui a disponibilidade de oxigênio (WALLACE et al., 2014).

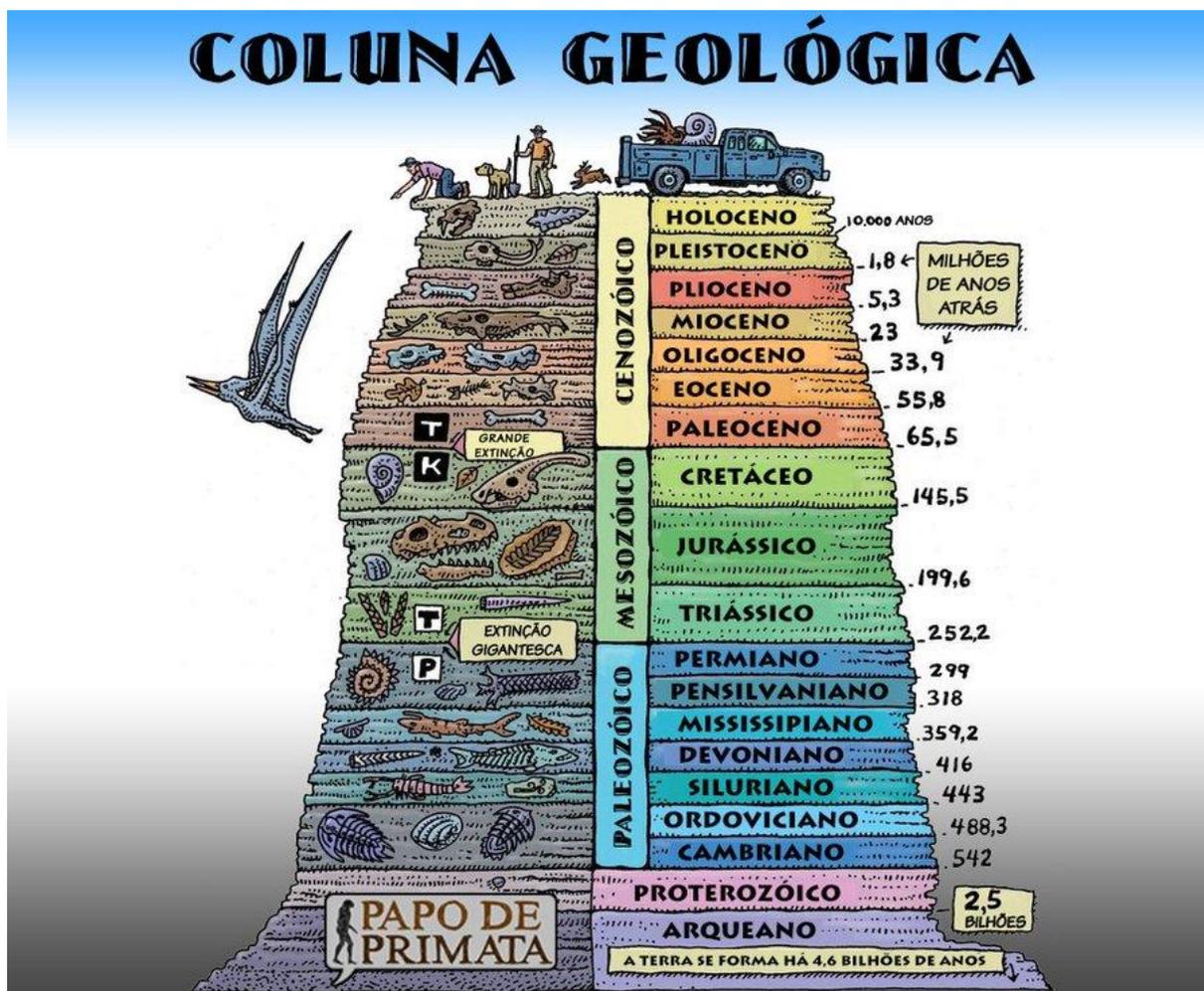
1.1 Ações antrópicas e limites planetários

As atividades humanas se tornaram o motor das mudanças globais por meio da combinação de duas forças principais: o crescimento populacional e o aumento per capita no uso de recursos naturais (HATJE; CUNHA; COSTA, 2018). Os processos naturais e antrópicos regulam o funcionamento e os serviços ecológicos promovidos pelos ecossistemas. As pressões antrópicas são mais conhecidas e estudadas nos ecossistemas terrestres, visto que a maior parte das pesquisas está voltada para identificar e medir as mudanças globais destes ecossistemas. No entanto, o oceano também está sendo impactado significativamente (HALPERN et al., 2012).

Algumas dessas forças antrópicas impactam exclusivamente os oceanos, como a acidificação oceânica, tema deste trabalho, porém também causam outras consequências que afetam ecossistemas terrestres e marinhos, como: aquecimento global, hipóxia, eutrofização, poluição, etc. (HATJE; CUNHA; COSTA, 2018).

Considerando a escala global e contínua do impacto das atividades antrópicas, os seres humanos, possuem papel central na ecologia do planeta. Como resultado, o termo Antropoceno foi cunhado para caracterizar o período a partir do qual as alterações antrópicas são tão substanciais quanto os processos geológicos e naturais do planeta (CRUTZEN; STOERMER, 2000). Os avanços tecnológicos do Antropoceno permitiram o acesso aos mais diversos recursos naturais do planeta, que inclui o petróleo, minerais do fundo dos oceanos, uso da água do mar através da dessalinização, conversão de dinitrogênio (N₂) em nitrogênio reativo para fertilização, entre vários outros (DUARTE, 2014). A utilização destes recursos naturais alavancaram um modelo de desenvolvimento que causa poluição, mudanças no uso da terra, exploração pesqueira, perda de habitats, introdução de espécies exóticas etc., o que impacta negativamente a qualidade do ambiente, e também da segurança alimentar e hídrica da sociedade (HATJE; CUNHA; COSTA, 2018).

Figura 3 - Coluna geológica do planeta terra



Fonte: Papo de primata, 2016.

Apesar de não haver consenso sobre a data de início do Antropoceno (STEFFEN; CRUTZEN; MCNEILL, 2007; ROCKSTRÖM et al., 2009a), há concordância entre a maioria de autores de que o período de aceleração do crescimento populacional, econômico e industrial se deu a partir de 1950, quando a sociedade desenvolveu tecnologias de exploração de combustíveis fósseis, de manufatura de novos materiais (como o plástico), e o surgimento dos grandes centros urbanos, a maioria localizada na zona costeira (HATJE; CUNHA; COSTA, 2018).

A partir de 1950, a alteração do funcionamento do sistema terrestre (inclusive a interface continente-oceano) começou a ocorrer de forma tão profunda e acelerada, que, em 2009, Johan Rockström liderou uma equipe de 28 cientistas em uma pesquisa para delimitar o espaço seguro para que as atividades humanas ocorram, criando o conceito de Limites Planetários. Com base nos processos biofísicos que regulam a estabilidade do sistema terrestre, os limites planetários

definem o espaço seguro em que a humanidade poderá continuar operando sob a pena de desencadear mudanças ambientais abruptas e irreversíveis que seriam catastróficas para o bem-estar humano (ROCKSTRÖM et al., 2009b).

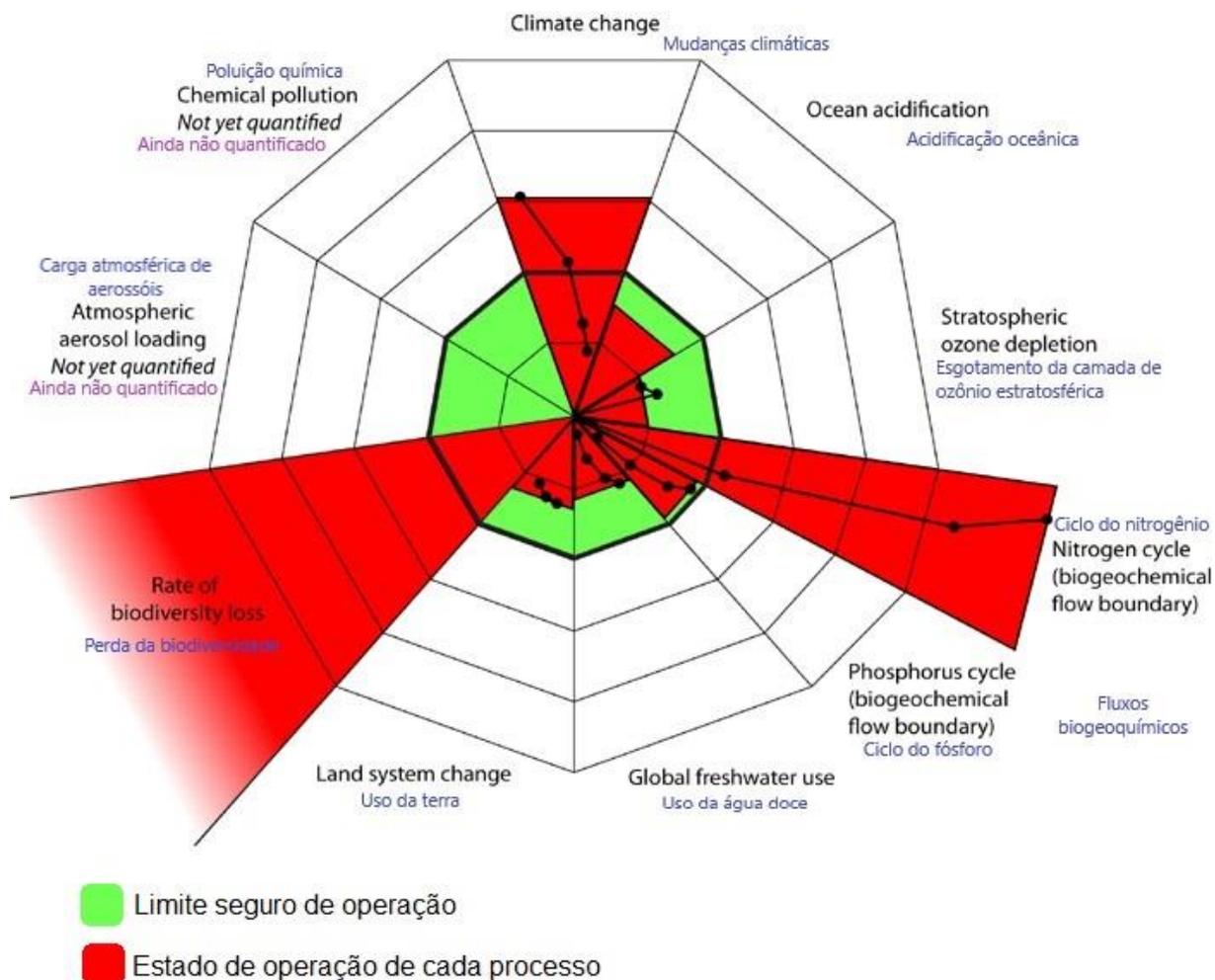
Nas palavras de Rockström et al. (2009b, p. 2):

Here, we present a novel concept, planetary boundaries, for estimating a safe operating space for humanity with respect to the functioning of the Earth System. We make a first preliminary effort at identifying key Earth System processes and attempt to quantify for each process the boundary level that should not be transgressed if we are to avoid unacceptable global environmental change. Unacceptable change is here defined in relation to the risks humanity faces in the transition of the planet from the Holocene to the Anthropocene. The relatively stable environment of the Holocene, the current interglacial period that began about 10 000 years ago, allowed agriculture and complex societies, including the present, to develop and flourish [...].

Neste trabalho, apresentamos um novo conceito, os limites planetários, para estimar um espaço seguro em que as atividades humanas possam operar respeitando o funcionamento do Sistema Terrestre. Realizamos o trabalho preliminar de identificar processos chave do Sistema Terrestre e então uma tentativa em quantificar o nível limite de cada processo que não poderá ser ultrapassado para evitar mudanças ambientais globais inaceitáveis. Mudanças inaceitáveis são definidas através dos riscos que a humanidade enfrenta na transição do planeta do Holoceno para o Antropoceno. O ambiente relativamente estável do Holoceno, o atual período interglacial que começou há 10 000 anos, permitiu que a agricultura e sociedades complexas, incluindo o momento presente, se desenvolvessem e prosperassem [...].

Foram identificados nove limites planetários: (1) Mudanças climáticas, (2) Acidificação oceânica, (3) Esgotamento da camada de ozônio estratosférico, (4) Fluxos biogeoquímicos: ciclos de fósforo (P) e nitrogênio (N), (5) Carga atmosférica de aerossóis, (6) Uso da água doce, (7) Uso da terra, (8) Perda de biodiversidade e (9) Poluição química. Entre os nove limites planetários, a pesquisa estimou os valores para apenas sete limites planetários, deixando a Poluição química e a Carga atmosférica de aerossóis sem valores quantificados.

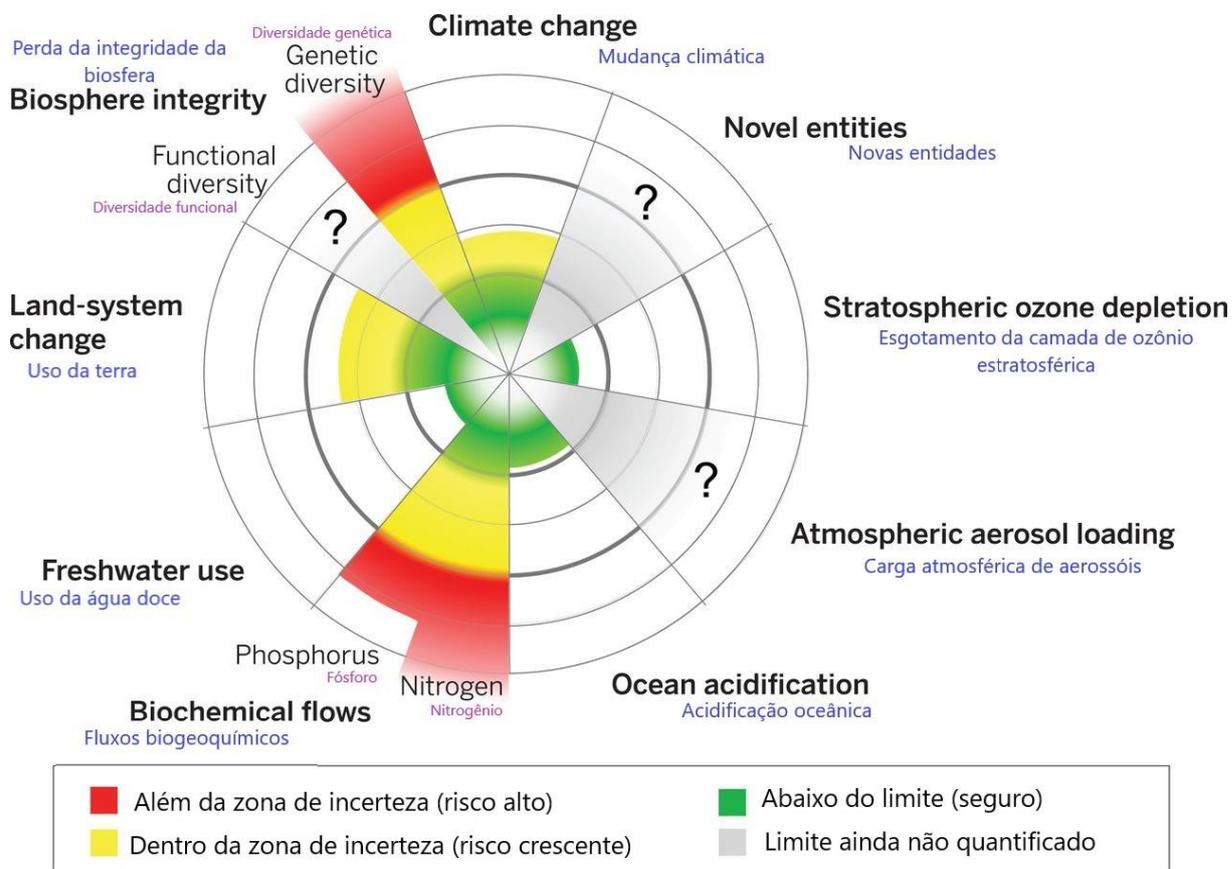
Figura 4 - Estimativa quantitativa dos limites planetários



Fonte: ROCKSTRÖM et al., 2009b

Na figura 4, a área verde do eneágono representa o espaço seguro para as operações das atividades humanas de cada seção. A área vermelha representa a extensão de cada limite planetário na estimativa atual. Ou seja, é evidente que três dos limites planetários já ultrapassaram a sua barreira segura: mudanças climáticas, ciclo do nitrogênio e perda de biodiversidade. Steffen et al. (2015) fornecem uma análise atualizada e mais extensa do quadro de limites planetários. Entre os nove limites originalmente propostos, são identificados três (incluindo mudanças climáticas) que tem o potencial de levar o sistema terrestre ao um novo estado se ultrapassados, e que também teriam uma influência profunda e perigosa sob os outros limites planetários (STEFFEN et al., 2015).

Figura 5 - Status atualizado da estimativa quantitativa dos limites planetários



Fonte: STEFFEN et al., 2015.

A figura 5 revela a atualização da estimativa dos limites planetários de acordo com Steffen et al. (2015). No novo estudo, mantiveram-se os processos originais, porém dois passaram a ter novos nomes para melhor refletir o que de fato representam. A fronteira de “perda de biodiversidade” agora é chamada de “perda de integridade da biosfera” e é proposta uma abordagem dividida em dois componentes, a primeira, “diversidade genética”, captura o papel vital de materiais genéticos únicos como o banco de informações que determina o potencial de continuarmos a coevolução da vida a partir de componentes abióticos do sistema terrestre da maneira mais resiliente possível. O segundo, “diversidade funcional”, busca capturar o papel da biosfera no funcionamento do sistema terrestre e medir a perda de componentes de biodiversidade em nível global e ecossistêmico. O limite “poluição química” é referido como “novas entidades”, para refletir o fato de que o Antropoceno pode influenciar o sistema terrestre de muitas maneiras através de novas tecnologias, como novas substâncias, novas formas de vida modificadas que tem o potencial para causar efeitos biológicos e geofísicos indesejados (STEFFEN et al., 2015).

A medição do processo de acidificação oceânica ocorre através, do estado de saturação da aragonita¹. Durante as medições do novo estudo, não há novas evidências de que o valor estimado da fronteira de acidificação oceânica foi alterado em comparação aos valores originais. Este processo permanece dentro do limite seguro de operação. Porém, o estudo evidencia dois pontos de atenção: (1) a heterogeneidade geográfica da saturação da aragonita é importante no monitoramento desta fronteira nos oceanos ao redor do mundo, e (2) esta fronteira está intimamente conectada ao limite planetário de mudança climática, visto que elas possuem uma variável em comum que é a medição do CO₂ atmosférico. O estudo afirma que a fronteira de acidificação oceânica não seria ultrapassada se a fronteira de mudança climática de 350 partes por milhão (ppm) de CO₂ fosse respeitada (STEFFEN et al., 2015).

¹ A concentração de íons de hidrogênio (H⁺) livres na superfície dos oceanos aumentou cerca de 30% nos últimos 200 anos, devido ao aumento do CO₂ atmosférico (RAVEN et al., 2005). Isto, por sua vez, influencia na química do carbonato presente nas águas oceânicas diminuindo o estado de saturação da aragonita, uma forma de carbonato de cálcio (CaCO₃) formada por diversos organismos marinhos. A aragonita dissolverá quando o estado de saturação é menor que 1.

2 IMPACTOS SOB A BIOTA MARINHA

Estudos sobre os impactos da acidificação oceânica sob a biota marinha ainda são escassos, e em sua maioria não incluem a combinação com outros fatores ambientais como: temperatura, condições de iluminação, fatores locais (como a concentração de nutrientes), etc. (HORTA et al., 2016). Apesar de haver avanços recentes na produção de conhecimento nesta área, este processo está ocorrendo de forma isolada no ambiente. No entanto, grande parte dos oceanos está submetido a estressores antropogênicos múltiplos (HALPERN et al., 2008). É crucial que haja investigações de efeitos combinados entre diferentes estressores para que seja possível ter a real magnitude dos impactos nos ecossistemas e sua biota, de forma mais próxima à realidade (STYF; SKÖLD; ERIKSSON, 2013). Por este motivo, buscou-se trazer estudos que analisam o impacto da acidificação oceânica atrelada a outros fatores importantes.

Além do impacto sob a biota marinha, os impactos da acidificação oceânica poderão alcançar todas as áreas do oceano, afetando desde o oceano profundo até estuários e costas (ORR et al., 2005). O rápido crescimento do corpo de estudos e pesquisas sobre o impacto biológico da acidificação revela uma ampla gama de respostas das espécies afetadas: menores taxas de calcificação de ostras (GAZEAU et al., 2007), diminuição da disponibilidade de abrigo para peixes recifais (MUNDAY et al., 2010) e o aumento da taxa de crescimento das macroalgas (KOCH et al., 2013).

Apesar de ainda haver muitas incertezas sobre o impacto da acidificação oceânica sob a biota marinha, a comunidade científica busca ampliar pesquisas e formas de entender a resposta de cada organismo individualmente para fornecer previsões mais significativas dos efeitos da acidificação oceânica na cadeia alimentar marinha e indústria pesqueira, ecossistemas marinhos, erosão costeira e turismo (ORR et al., 2009).

2.1 Flora Marinha

A literatura científica sobre a flora marinha releva que os ecossistemas em bancos de gramas marinhas, bancos de macroalgas e áreas de recifes de corais são

cruciais para a remoção e sequestro de carbono através de processos metabólicos naturais como a fotossíntese e a calcificação (KOCH et al., 2013). Os sistemas marinhos costeiros de águas rasas, presente em zona entremarés da plataforma continental, são de extrema importância ecológica e socioeconômica (HARLEY et al., 2006), pois servem de interface entre a atmosfera e o oceano, assim como as regiões costeiras densamente urbanizadas e o mar aberto.

Os produtores primários, calcário e não calcários, são extremamente diversos em regiões de abundante radiação solar e são responsáveis por transformar a energia solar em energia química, e pela remoção de grandes quantidades de carbono inorgânico da água para assimilação em plantas e sedimentos (FABRY et al., 2008). Os impactos da acidificação oceânica sob os produtores primários são significativos, sobretudo quando há a combinação de diferentes estressores.

Bergstrom (2016) combinou a acidificação oceânica e o aumento de temperatura do oceano para analisar mudanças de fisiologia e o rendimento fotossintético de alga calcária (*Halimeda cuneata*) e da grama marinha (*Halodule wrightii*). O resultado de sua pesquisa demonstrou que a alga calcária foi negativamente afetada pela alta de CO₂ dissolvido na água. Porém, a grama marinha não mostrou mudanças em sua fisiologia e capacidade fotossintética, assim sua presença reduziu o potencial efeito negativo da acidificação oceânica sob a calcificação da alga calcária. Sem a presença desta interação, as algas calcárias poderão ter maiores dificuldades em manter seus níveis de calcificação.

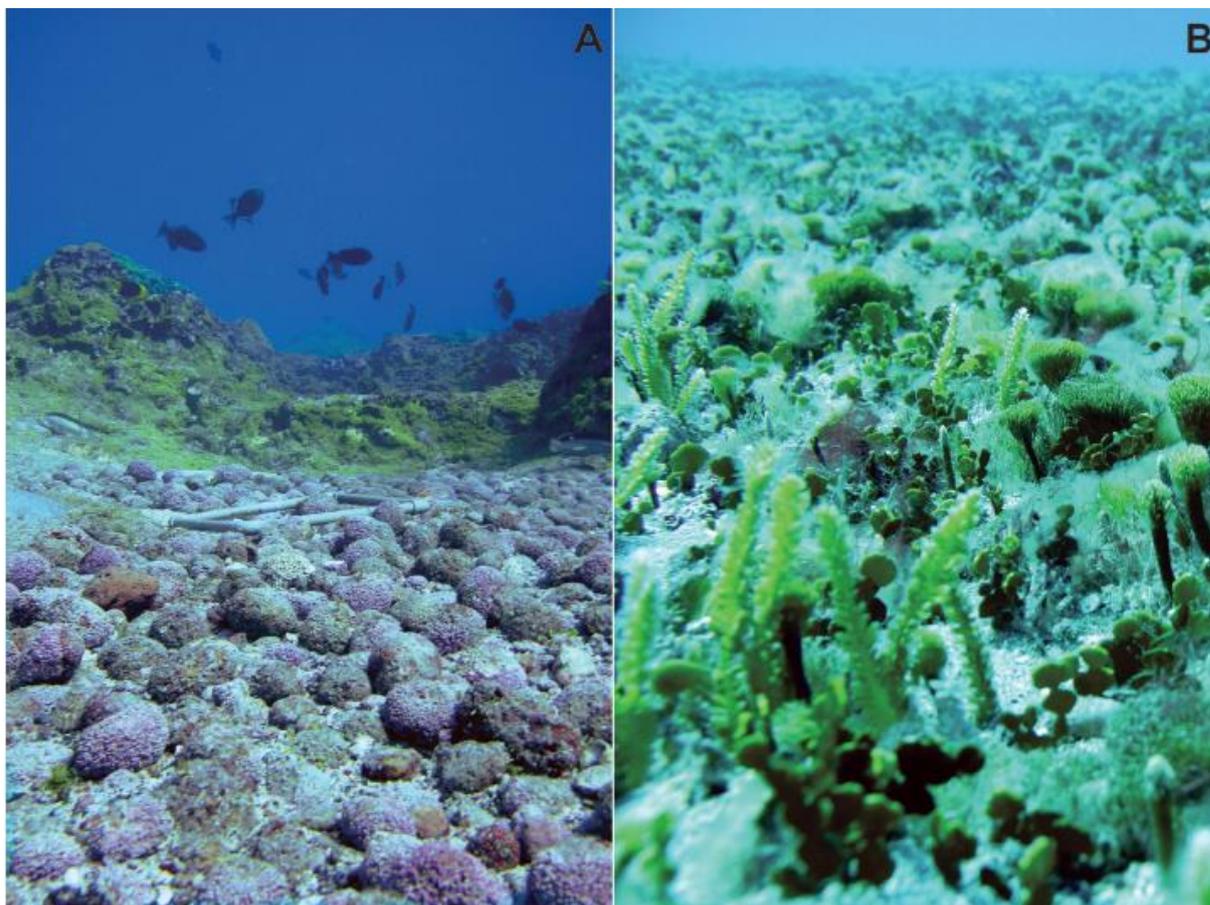
As algas calcária, sobretudo do gênero *Halimeda*, são de extrema importância nos ambientes costais tropicais e subtropicais devido a sua produção de carbonato de cálcio (CaCO₃) e consequente contribuição para os sedimentos biogênicos. O estudo de Campbell et al. (2014) analisa a influência da acidificação oceânica no crescimento de três espécies de alga calcária verde (*Halimeda opuntia*, *Halimeda incrassata* e *Halimeda simulans*), e examina os componentes de defesa destas algas contra predadores herbívoros. Cada espécie obteve resultados específicos. O estudo sugere que algumas espécies de algas podem ser mais suscetíveis ao ambiente acidificado (a *H. incrassata* teve seu conteúdo de CaCO₃ reduzido, porém as outras duas espécies não sofreram alterações), e essa suscetibilidade pode enfraquecer suas respostas de defesa contra herbívoros (CAMPBELL et al., 2014).

Além disso, a composição bioquímica dos produtores primários pode ser alterada em resposta a um ambiente acidificado, o que afeta sua qualidade nutricional para os consumidores herbívoros. Como consequência, o crescimento e o sucesso reprodutivo de consumidores podem ser prejudicados em função da alimentação (ROSSOL et al., 2012).

Hofmann e Bischof (2014) adicionam ainda que as macroalgas calcificadoras são sensíveis à acidificação oceânica, porém, há variações nas respostas observadas de cada espécie devido aos diferentes mecanismos de calcificação, mineralogia do esqueleto, mecanismos de absorção de carbono e condições ambientais locais. Ademais, além da calcificação, outros processos fisiológicos também são afetados nas algas: como a fotossíntese, o crescimento, absorção e assimilação de nutrientes etc. Assim, as consequências do CO₂ elevado são complexas para esses organismos e serão também influenciadas pela temperatura, incidência de luz, disponibilidades de nutrientes e ciclos sazonais (HOFMANN; BISCHOF, 2014).

Outro ente calcificador muito importante da flora marinha são os rodolitos. Os rodolitos são algas vermelhas calcárias de origem biogênica e que crescem soltos do substrato a no máximo 150 metros de profundidade (HOLZ et al., 2020). São organismos bentônicos móveis com capacidade de criar complexos ecossistemas que podem se estender por longos espaços no leito oceânico formando bancos de rodolitos. Os bancos de rodolitos são cruciais pois servem de abrigo, refúgio, alimentação e local de reprodução para diversas espécies marinhas, inclusive peixes de importância econômica, além de possuírem elevada taxa de produção de CaCO₃ (HORTA et al., 2016). Na figura 6 abaixo, é possível ver um exemplo de banco de rodolitos sem flora bentônica abundante (A) e banco de rodolitos abrigando abundante espécies de algas (B).

Figura 6 - Fisionomias de rodolitos em um mesmo local sem flora abundante (A) e com abundante espécies de algas (B)



Fonte: HORTA et al., 2016.

Apesar de haver muitas lacunas no mapeamento dos bancos de rodolitos, Amado-Filho et al. (2012) constatou que o maior banco de rodolitos contínuo do mundo fica localizado em Abrolhos (BA), cobrindo cerca de 20,900 km² e produzindo aproximadamente 25 milhões de toneladas de CaCO₃ ao ano (5% da produção total de carbonato de cálcio em todo o mundo), tornando-se o maior depósito biogênico de carbonato de cálcio do mundo. O mesmo estudo demonstrou que os efeitos da acidificação oceânica causará o aumento da dissolução do carbonato dentro dos banco de rodolitos, resultando na perda de habitats de diversas espécies (incluindo importantes espécies endêmicas) (AMADO-FILHO et al., 2012).

2.2 Fauna Marinha

As mudanças químicas, que resultaram na redução do pH da água do mar, são evidentes e bem caracterizadas em todo o oceano. No entanto, os impactos biológicos sob a fauna marinha estão apenas começando a serem entendidos. Todavia, atualmente, há informações suficientes para declarar que há impactos profundos inevitáveis sob algumas espécies marinhas e que a alteração substancial dos ecossistemas marinhos é uma realidade do próximo século (FABRY et al., 2008).

O impacto mais evidente da acidificação oceânica sob a comunidade da fauna marinha é sob os organismos calcificadores, como os corais, moluscos, equinodermos e crustáceos, visto que este grupo depende do CaCO_3 para produzir suas conchas e esqueletos (FABRY et al., 2008). Para esses organismos, será cada vez mais difícil manter suas conchas calcificadas, e em condições de baixos estados de saturação do carbonato, a água se tornará corrosiva a estes minerais (UNEP, 2010).

O ambiente acidificado gera impactos também sob espécies não calcificadoras, como é o caso dos peixes. Filipe (2015) realizou um estudo acerca do efeito da acidificação sobre os estágios iniciais de desenvolvimento de três espécies comercialmente importantes: Linguado (*Solea senegalensis*), Sargo (*Diplodus sargus*) e Corvina (*Argyrosomus regius*). Os resultados sugerem que a exposição a níveis altos de H^+ de duas das espécies testadas, Linguado e Sargo, são mais suscetíveis à acidificação do que a Corvina, e que os níveis de acidificação previstos para os próximos 50-100 anos poderão agravar a sobrevivência das fases embrionárias e larvais das três espécies. Ishimatsu et al. (2004) completa que os efeitos da alta de CO_2 dissolvido na água do mar pode causar insuficiência cardíaca em peixes marinhos em fase larval e adulta através da hipercapnia (aumento da concentração de CO_2 no sangue) e hipoxia (baixa concentração de O_2 no sangue).

Além disso, a sobrevivência dos peixes marinhos que estão expostos aos elevados níveis (atuais e do futuro próximo) de CO_2 está ameaçada devido ao impactos em suas respostas sensoriais. A alteração de comportamento de peixes marinhos se dá através da perda de eficiência do sistema olfatório para detectar alimentos ou predadores (os peixes precisam estar até 42% mais próximos da fonte de odor para detectá-lo). A pressão de um ambiente acidificado gera alterações no sistema olfatório e em funções cerebrais centrais (PORTEUS et al., 2018).

O caso do salmão prateado (*Oncorhynchus kisutch*), que depende do olfato durante todos os aspectos de sua vida, incluindo na migração do oceano para suas correntes natais, é estudado por Williams et al. (2019), que investiga os impactos do CO₂ elevado no comportamento com base no olfato, na sinalização neural e na expressão genética dentro do sistema olfatório periférico e central. Seus resultados indicam que o salmão prateado é sensível à água marinha acidificada, e que esta espécie poderá sofrer deficiências significativas em seu comportamento (WILLIAMS et al., 2019).

A maioria dos organismos marinhos multicelulares desenvolveram um sistema regulatório para manter o equilíbrio de H⁺ de seus fluidos internos, onde há um gasto de energia associado para que esta atividade ocorra (PÖRTNER et al., 2005). Com o aumento de H⁺ na água do mar, estes organismos necessitam retirar energia de processos importantes, como crescimento e reprodução, para alocar mais energia ao sistema de equilíbrio. Porém, estudos de algumas espécies (mexilhão, caranguejo e ouriço do mar) demonstraram que estes não possuem um mecanismo de compensação, ou apenas um mecanismo parcial, tornando-os mais vulneráveis à acidificação oceânica do que outras espécies (TURLEY et al., 2010).

Os efeitos da acidificação oceânica combinados aos da mudança climática têm o potencial de enfraquecer a cadeia alimentar marinha devido a redução do fluxo de energia dos níveis tróficos mais altos e a transição para uma cadeia alimentar de detritos, o que acarreta diversas mudanças na dinâmica dos consumidores e em uma nutrição mais simplificada (ULLAH et al., 2018). Neste sentido, a acidificação dos oceanos e a contínua e crescente emissão de CO₂ antropogênico também ameaça uma importante fonte de alimentação para bilhões de pessoas em todo o mundo (UNEP, 2010).

2.3 Corais

Os recifes de corais formam um ecossistema marinho altamente biodiverso. Recifes de corais localizados nos trópicos fornecem abrigo e alimentação para cerca de 25% das espécies conhecidas de peixes marinhos. A perda destes ecossistemas poderá impactar severamente a diversidade biológica dos mares e oceanos e a

sobrevivência das comunidades costeiras, através da redução da disponibilidade de alimentos (CARPENTER et al., 2008).

No Brasil, os recifes de corais ocupam uma área extensa, ao longo de 3 mil quilômetros da costa do Atlântico Sul e são os únicos recifes desta região. Estima-se que a degradação dos recifes e o aumento populacional das zonas costeiras sejam dois grandes motores dos impactos severos que estes ecossistemas vem sofrendo (FERREIRA; MAIDA, 2006).

Hoegh-Guldberg et al. (2007) evidenciam que a ação da acidificação junto a outros estressores concomitantes, como o aquecimento da água do mar, a sobrepesca e a poluição, estabelecem um cenário desafiador para os recifes de corais, que já demonstram sua susceptibilidade através do branqueamento. Até mesmo estudos que levam em consideração os cenários mais otimistas do IPCC² sobre a emissão de CO₂ e o aumento da temperatura já demonstram resultados com ramificações devastadoras para os recifes de corais e, conseqüentemente, para as enormes populações costeiras.

Além do enorme impacto da alteração das estruturas de carbonato, advindas da acidificação, na produção e utilização de CaCO₃ pelos corais (ANDERSSON; GLEDHILL, 2013), o branqueamento se tornou um enorme problema do aumento da temperatura associado ao aumento de CO₂ na água do mar. O branqueamento ocorre através do processo de perda das algas fotossintetizantes presentes nos corais, conhecidas como zooxantelas. Estas estão presentes nos tecidos dos corais e participam de uma delicada simbiose vital que beneficia ambos os organismos (FAUTIN; BUDDEMEIER, 2004). Além de darem a cor do coral, elas produzem componentes orgânicos que servem de alimento para o coral, e em contrapartida, o coral provê abrigo e elementos químicos cruciais para estas algas (STANLEY Jr., 2006). Pequenas variações de temperatura podem desencadear um distúrbio alimentar que causa a dissociação entre a alga e os corais, revelando o esqueleto calcário branco do coral (LEÃO; KIKUCHI; OLIVEIRA, 2008).

² Igualmente importante é o fato de que os cenários do IPCC já são cautelosos devido as “reservas” científicas e a natureza inerentemente conservadora da busca por consenso nos processos do IPCC (HANSEN, 2007).

Figura 7 - Antes e depois do branqueamento de corais na Grande Barreira de Corais (Austrália)



Fonte: ONU, 2020.

Apesar de ainda não haver estudos suficientes sobre como a acidificação interage com o aquecimento da água do mar, Anthony et al. (2008) realizou um estudo de comparação entre o branqueamento, a produtividade e a calcificação de três espécies de corais: *Acropora intermedia*, *Porites lobata* e *Porolithon onkodes*, em resposta à acidificação e aquecimento oceânicos. Os resultados indicam que o ambiente rico em CO₂ (acidificação) é um grande fator causador do branqueamento para as três espécies estudadas e, a acidificação impactou de forma mais intensa o branqueamento e a produtividade dos corais do que a calcificação, apesar de o ambiente acidificação diminuir a quantidade disponível de CaCO₃ (ANTHONY et al., 2008).

As concentrações de CO₂ atmosférico previstas para este século não garantem um futuro promissor aos recifes de corais e espécies que dele dependem (HOEGH-GULDBERG et al., 2007). A crescente temperatura da água superficial associada ao aumento de CO₂ atmosférico proporcionará eventos de branqueamento de corais com maior frequência e severidade com diversas consequências negativas para a sobrevivência, crescimento e reprodução dos corais (HOEGH-GULDBERG, 1999).

3 MECANISMOS DE MUDANÇA

A única solução integral para a acidificação oceânica é a rápida diminuição das emissões de CO₂ antropogênico e outros gases de efeito estufa para a atmosfera. No entanto, devido ao legado atual da infraestrutura com base em combustíveis fósseis e o rápido crescimento da demanda por energia, é esperado que a acidificação oceânica permaneça uma realidade mesmo sob os cenários mais otimistas (IPCC, 2013).

Visto que a mudança climática e a acidificação oceânica possuem pouca abordagem local, Albright et al. (2016) recomenda que a ação prioritária de os organismos regulatórios e de gestão seria mitigar estressores locais, como as fontes de poluição do território e a sobrepesca. O raciocínio base é que a gestão intensificada sob as pressões locais auxilia a resiliência do ecossistema marinho, pois reduz sua exposição à estressores múltiplos, diminuindo os impactos negativos da acidificação e do aquecimento. No entanto, a gestão local alcançará apenas resultados limitados, os impactos da acidificação oceânica ainda estarão presentes enquanto a emissão de CO₂ antropogênico continuar em níveis elevados (ANTHONY et al., 2015).

Neste sentido, outro mecanismo de mudança crucial é o reconhecimento nacional dos sistemas marinhos (incluindo mangues, plantas marinhas e pântanos) como importantes sumidouros de carbono. Apesar de haver uma enorme preocupação em proteger os estoques terrestres de carbono, através da correta proteção à floresta amazônica, por exemplo, o Brasil tem perdido a oportunidade de valorizar e proteger também os estoques marinhos de carbono (COPERTINO, 2011).

Os sistemas marinhos podem estocar até 15 vezes mais carbono por hectare que os solos terrestres, além de sequestrarem carbono de 10 a 50 vezes mais rápido que sistemas terrestres. A degradação dos sistemas de carbono azul resulta em emissão de carbono imediata (COPERTINO, 2011). Contabilizar o carbono em sistemas costeiros e marinhos de forma eficaz tem o potencial de transformar a gestão e a conservação das áreas costeiras e marinhas em níveis locais e globais. De acordo com Copertino (2011), esta é uma peça vital do complexo quebra cabeça da mudança climática.

Tratando-se de um esforço global, Orr et al. (2009) afirma que há a necessidade de desenvolver um conjunto de melhores práticas para pesquisas no ramo da acidificação oceânica, para que as pesquisas realizadas por diferentes investigadores possam ser facilmente comparadas e verificadas. Além disso, a gestão de dados também é imprescindível para que as informações sejam reportadas e arquivadas de maneira a permitir fácil acesso agora e futuramente (ORR et al., 2009). Essas recomendações dialogam diretamente com as metas do Objetivo de Desenvolvimento Sustentável (ODS) de Vida na Água (ODS 14), lançado pela Organização das Nações Unidas (ONU) e adotada pelo Brasil e por diversos outros países (ONU, 2015).

Após a adaptação das metas ao cenário brasileiro, foram criados indicadores de medição para acompanhar o desempenho de cada meta. A meta 14.3, diz respeito diretamente aos impactos da acidificação oceânica, conforme quadro abaixo (IPEA, 2018). O quadro completo com todas as metas e indicadores propostos pela ODS 14 está no anexo A.

Quadro 1 – Meta e indicador sobre acidificação oceânica no ODS 14

	
Meta 14.3	Indicador 14.3.1
Minimizar e enfrentar os impactos da acidificação dos oceanos, inclusive por meio do reforço da cooperação científica em todos os níveis.	Acidez média marinha (pH) medida num conjunto representativo de estações de coleta.

Fonte: Elaborada pela autora.

No entanto, há também outras metas cobrindo áreas como sobrepesca e pesca ilegal, planos de gestão com base científica, conservação de zonas costeiras e marinhas, subsídios à pesca e aumento do conhecimento científico e desenvolvimento de capacidades de pesquisa e transferência de tecnologia marinha (IPEA, 2018). Além dos ODS, a ONU também proclamou a década atual (de 2021 a 2030), a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável, criando o momento ideal para

a união de esforços de todos os setores relacionados ao mar para reverter o ciclo de declínio na saúde dos oceanos e criar melhores condições para que o desenvolvimento sustentável se torne uma realidade (UNESCO, 2019).

A ciência oceânica no Brasil tem evoluído e garantido presença importante na ciência nacional. Os desafios da Agenda 2030 e da Década do Oceano impõem desafios amplos, mas, ao mesmo tempo, trazem maior atenção e relevância ao tema. Será necessário garantirmos financiamento e encontrar novas estruturas e novas formas de fazer e apoiar uma ciência sob forte influência deste processo global (PINHO; TURRA; ANDRADE, 2021).

Neste sentido, é importante citar o importante marco no desenvolvimento de ciência marinha no Brasil, através da instalação de um novo mesocosmo marinho, criada com a finalidade de realizar pesquisas e estudos sobre o aquecimento global nos sistemas marinhos, qualidade da água e acidificação oceânica (DUARTE et al., 2015). Há numerosas dificuldades associadas à realização de estudos que medem efeitos de longo prazo em saídas de campo embarcadas. O mesocosmo provê um ambiente controlado que imita as condições reais do ambiente marinho para a realização de estudos laboratoriais de pequena escala, mas que podem durar longos períodos (STEWART et al., 2013). O mesocosmo marinho brasileiro foi criado em 2012 e fica localizado no distrito de Arraial d'Ajuda, (Porto Seguro, BA), na Estação de Pesquisa do Instituto Coral Vivo. Os tanques e aquários do sistema do mesocosmo recebe um fluxo contínuo de água do mar e consegue simular estressores climáticos globais como: aumento da temperatura da água, aumento de CO₂ na água (acidificação), incidência de luz etc. (DUARTE et al., 2015).

Duarte et al. (2005) ressalta ainda que esta instalação é inovadora, moderna e envolve relativamente baixos custos de implementação para entregar resultados e avanços significativos na pesquisa sobre efeitos de estressores conjuntos na qualidade da água do mar. Visto que a replicabilidade deste sistema é altamente viável, é crucial identificar outros pontos chave da costa brasileira para receber instalações parecidas no futuro.

Figura 8 - Tanques do sistema de mesocosmo marinho em Arraial d'Ajuda (BA)



Fonte: Duarte et al. (2005)

Além da atenção ao desenvolvimento da ciência marinha, é necessário também abordar os esforços globais de atenção ao clima e ao meio ambiente, como é o caso da Conferência das Nações Unidas sobre Mudança Climática (COP26), ocorrida em novembro deste ano com a participação de cerca de 200 países (ONU, 2021). O documento do acordo final da COP26 reflete os interesses e acordos finais firmados entre os países para endereçar o aquecimento global. No entanto, o próprio Chefe das Nações Unidas, António Guterres, declara que o acordo não será suficiente para frear o aquecimento e mantê-lo abaixo de 2 graus celsius (ONU, 2021).

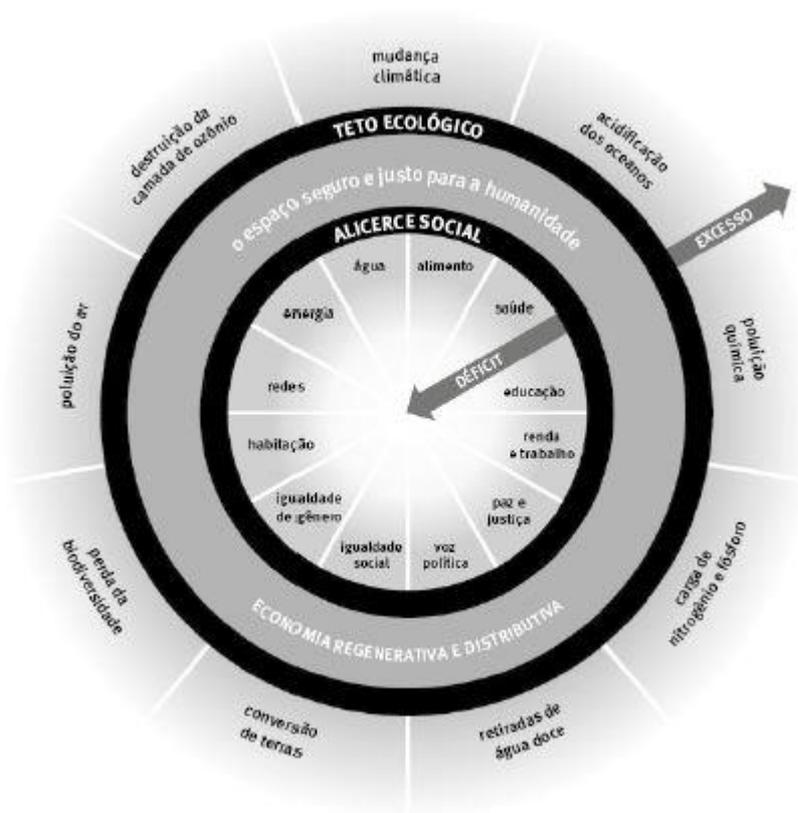
A presença de pautas oceânicas na COP26 contou com um dia dedicado ao tema e estava fortemente representada na agenda durante todo o evento, com inúmeros eventos paralelos e exposições de soluções climáticas com base nos oceanos, pesca, emissões, energias renováveis e finanças. O principal assunto abordado estava focado na criação de linhas de financiamento para a conservação e proteção de ambientes marinhos (sobretudo corais) (ALDRED, 2021).

Apesar de as pautas sobre o oceano e a mudança climática estarem em maior evidência desde o Acordo de Paris, em 2015, a COP26 não utilizou esta

oportunidade para delinear diretrizes globais e gerar maior atenção ao tema da acidificação oceânica. Há um limite claro sobre as emissões de CO₂ (abaixo de 2 graus celsius), o que de fato tem um impacto sobre a acidificação, porém, não foram delimitados uma meta limite para a mudança de pH das águas marinhas (DALEY, 2021).

Finalmente, de um ponto de vista mais amplo, um mecanismo de mudança relevante para as pautas ambientais é reformular o modo de vida moderno. Neste sentido, Raworth (2017) propõe uma alternativa ao crescimento a qualquer custo através da Economia Donut. Se trata de uma nova forma de economia e de relação do ser humano com o mundo ao redor, incluindo aspectos ambientais e sociais. Raworth (2017) afirma que é através da nossa proximidade, colaboração, interdependência e nossos reais valores em contato com o mundo vivo, que teremos a melhor chance de entrar no espaço justo e seguro do donut.

Figura 9 - Economia donut



Fonte: Raworth (2017)

O donut é onde todos no planeta deveriam estar. É o espaço justo e seguro. Se há alguém no buraco de dentro, esta pessoa não está com as condições mínimas de vida. Esse é o alicerce social, que representa os elementos básicos da vida dos quais ninguém deveria sofrer escassez, como por exemplo acesso a água potável, saneamento básico etc. Fora da rosca, no anel externo, está a degradação planetária [onde podemos ver os limites planetários de Rockström et al. (2009b)]. Entre esses dois anéis está o donut em si, que é onde há possibilidade de atender todo mundo e contar com os recursos do planeta de forma saudável (RAWORTH, 2017).

CONCLUSÃO

O estudo permitiu compreender os impactos da acidificação dos oceanos sob a biota marinha e delimitou alguns mecanismos de mudança passíveis de serem adotados no cenário nacional. O estudo sobre limites planetários demonstra que a acidificação oceânica ainda está dentro do limite seguro de operação das atividades humanas. No entanto, este limite está intrinsicamente ligado ao limite de mudança climática, que mede a emissão de CO₂ antropogênico, e poderá ser ultrapassado caso o limite de 350 ppm (partes por milhão) não seja respeitado. Os impactos sob entes calcificadores é profundo devido à menor disponibilidade de carbonato de cálcio (CaCO₃), efeito da acidificação, e atinge espécies chave da fauna e da flora. Organismos não calcificadores, como os peixes, também sofrem o impacto da acidificação, sobretudo durante a fase larval. Recifes de corais estão perdendo produtividade e enfrentando desafios além da acidificação, como o aquecimento das águas, que resultam em branqueamento de corais. Os mecanismos de mudança para o problema da acidificação estão pautados sobretudo na diminuição global de emissões de CO₂, e em outras questões locais: maior insumo para pesquisas sobre o assunto e melhoramento da gestão marinha e costeira, incluindo a acidificação oceânica como tema central.

REFERÊNCIAS

- ALBRIGHT, R. et al. Ocean acidification: Linking science to management solutions using the Great Barrier Reef as a case study. **Journal of Environmental Management**, v. 182, p.641-650, 2016.
- ALDRED, J. **COP26 deal sees progress on ocean protection**. China Dialogue Ocean. China, 2021.
- AMADO-FILHO, G. M. et al. Rhodolith beds are major CaCO₃ bio-factories in the tropical South West Atlantic. **PloS one** 7.4: e35171, 2012.
- ANDERSSON, A. J.; GLEDHILL, D. Ocean acidification and coral reefs: effects on breakdown, dissolution, and net ecosystem calcification. **Annual review of marine science**, v. 5, p. 321-348, 2013.
- ANTHONY, K. R. N. et al. Operationalizing resilience for adaptive coral reef management under global environmental change. **Global change biology**, v. 21, n. 1, p. 48-61, 2015.
- ANTHONY, K. R.N. et al. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 105, n. 45, p. 17442-17446, 2008.
- BERGSTROM, E. **Efeitos do aumento da temperatura e acidificação oceânica na fisiologia das algas calcárias e gramas marinhas**. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2016.
- CALDEIRA, K.; WICKETT, M. E. Anthropogenic carbon and ocean pH. **Nature**, v. 425, n. 6956, p. 365-365, 2003.
- CAMPBELL, J. E. et al. Responses of calcifying algae (*Halimeda spp.*) to ocean acidification: implications for herbivores. **Marine Ecology Progress Series**, v. 514, p. 43-56, 2014.
- CARPENTER, K. E. et al. One-third of reef-building corals face elevated extinction risk from climate change and local impacts. **Science**, v. 321, n. 5888, p. 560-563, 2008.
- COPERTINO, M. .S. Add coastal vegetation to the climate critical list. **Nature News**, v. 473, n. 7347, p. 255-255, 2011.
- COSTANZA, R. The ecological, economic, and social importance of the oceans. **Ecological economics**, v. 31, n. 2, p. 199-213, 1999.
- CRUTZEN, P.J.; STOERMER, E.F. The “Anthropocene”. **Global Change Newsletter**, 41, 17, 2000.

DALEY, B. **COP26 failed to address ocean acidification, but the law of the seas means states must protect the world's oceans**. The Conversation. USA, 2021.

DONEY, S. C. Dangers of ocean acidification. **Scientific America Brasil**. P. 58-65, 2006.

DUARTE, C. M. Global change and the future ocean: a grand challenge for marine sciences. **Frontiers in Marine Science**, Volume 1, pp. 63, 2014.

DUARTE, G. et al. A novel marine mesocosm facility to study global warming, water quality, and ocean acidification. **Ecology and Evolution**. Doi: 10.1002/ecec3.1670, 2015.

FABRY, V. J. et al. Impacts of ocean acidification on marine fauna and ecosystem processes. **ICES, Journal of Marine Science** 65.3: 414-432, 2008.

FAUTIN, D.G.; BUDDEMEIER, R.W. Adaptive bleaching: a general phenomenon. **Hydrobiologia** 530/531(1-3):459-467, 2004.

FEELY, R. A.; DONEY, S. C.; COOLEY, S. R. Ocean acidification: Present conditions and future changes in a high-CO₂ world. **Oceanography**, v. 22, n. 4, p. 36-47, 2009.

FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. **Monitoramento dos recifes de coral do Brasil**. Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA), 2006.

FILIPE, S. A. C. **Impacto da acidificação dos oceanos no desenvolvimento embrionário e larvar de peixes marinhos**. Tese de Doutorado. Instituto Politécnico de Leiria (IPL). Portugal, 2015.

GAZEAU, F. et al. Impact of elevated CO₂ on shellfish calcification. **Geophysical Research Letters**, 34, L07603, 2007.

GRUBER, N. Anthropogenic CO₂ in the Atlantic Ocean. **Global Biogeochemical Cycles** 12, 165, 1998.

HALPERN, B. S. et al. A global map of human impact on marine ecosystems. **Science** v. 319, p. 948-952, 2008.

HALPERN, B. S. et al. An index to assess the health and benefits of the global ocean. **Nature** 488, 615–620, 2012.

HANSEN, J. E. Scientific reticence and sea level rise. **Environmental Research Letters**. 2 024002, 2007.

HARLEY, C. D. et al. The impacts of climate change in coastal marine systems. **Ecology letters** 9: 228-241, 2006.

HATJE, V.; CUNHA, L. C.; COSTA, M. F. Mudanças globais, impactos antrópicos e o futuro dos oceanos. **Revista Virtual de Química**, v. 10, n. 6, p. 1947-1967, 2018.

HOEGH-GULDBERG, O. et al. Coral reefs under rapid climate change and ocean acidification. **Science**, 318, 1737-1742, 2007.

HOEGH-GULDBERG, O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. **Marine and Freshwater Research**, 50:839-866, 1999.

HOFMANN, L. C.; BISCHOF, K. Ocean acidification effects on calcifying macroalgae. **Aquatic Biology**. Vol. 22: 261-279, 2014.

HOLZ, V. L. et al. Structure of Rhodolith Beds and Surrounding Habitats at the Doce River Shelf (Brazil). **Diversity**, 12: 75, 2020.

HOOD, M. et al. **Acidificação Oceânica - Sumário para formuladores de políticas públicas** - Segundo Simpósio sobre oceanos em um mundo com elevado CO₂. 8, 2009.

HORTA, P. A. et al. Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change. **Brazilian Journal of Oceanography**. 64: 117–136, 2016.

IPCC. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex and P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 1535 pp, 2013.

IPEA. **Metas Nacionais dos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Proposta de adequação. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), 2018.

ISHIMATSU, A. et al. Effects of CO₂ on marine fish: larvae and adults. **Journal of oceanography**, v. 60, n. 4, p. 731-741, 2004.

KERR, R. et al. **1st Report of the Brazilian Ocean Acidification Research (BrOA)** in: Workshop on Studying Ocean Acidification and its Effects on Marina Ecosystems. Brazilian Ocean Acidification Research (BROA), 2012.

KHATIWALA, S.; PRIMEAU, F.; HALL, T. Reconstruction of the history of anthropogenic CO₂ concentrations in the ocean. **Nature**, v. 462, n. 7271, p. 346-349, 2009.

KOCH, M. et al. Climate change and ocean acidification effects on seagrasses and marine macroalgae. **Global Change Biology** 19: 103-132, 2013.

KOCH, M. et al. Marine macro-autotrophs and climate change. **Global Change Biology**, 19, 103–132, 2013.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; OLIVEIRA, M. D. M. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia e sua relação com eventos de anomalias térmicas nas águas superficiais do oceano. **Biota Neotrópica**, v. 8, n. 3, jul.-set., p. 69-82, 2008.

LEE, K. et al. An updated anthropogenic CO₂ inventory in the Atlantic Ocean. **Global Biogeochemical Cycles** 17, 2003.

MUNDAY, P. L. et al. **Replenishment of fish populations is threatened by ocean acidification**. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 107, 12930–12934, 2010.

NRC (National Research Council). **From monsoons to microbes: understand the ocean's role in human health**. Washington: National Academic Press, 1999.

ONU. **Objetivos de Desenvolvimento Sustentável**. Como as Nações Unidas Apoiam os ODS no Brasil. Organização das Nações Unidas (ONU), 2015.

ONU. **Branqueamento de corais**. Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente (PNUMA), 2020.

ONU. **The Second World Ocean Assessment**. Volume II. Nova York, 2021.

ORR, J. C. et al. Anthropogenic ocean acidification over the twenty-first century and its impact on calcifying organisms. **Nature**, 437, 681–686, 2005.

ORR, J. C. et al. Research Priorities for Understanding Ocean Acidification: Summary From the Second Symposium on the Ocean in a High-CO₂ World. **Oceanography**, 22(4), 182-189, 2009.

PAPO DE PRIMATA. **Coluna geológica do planeta**. Website, 2016.

PINHO, R. D.; TURRA, A.; ANDRADE, J. B. D. A ciência oceânica no Brasil e desafios transversais para a produção do conhecimento. **Ciência e Cultura**, 73(2), 07-11, 2021.

PORTEUS, C. S. et al. Near-future CO₂ levels impair the olfactory system of a marine fish. **Nature Climate Change**, v. 8, n. 8, p. 737-743, 2018.

PÖRTNER, H. O., et al. Synergistic effects of temperature extremes, hypoxia, and increases in CO₂ on marine animals: from Earth history to global change. **Journal Geophysical Research: Oceans**, 110 C09S10, 2005.

RAVEN, J. et al. Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide. **The Royal Society**, London, 2005.

RAWORTH, K. Doughnut economics: seven ways to think like a 21st-century economist. **Chelsea Green Publishing**, 2017.

ROCKSTRÖM, J. et al. A safe operating space for humanity. **Nature**. Sep 24;461(7263):472-5. PMID: 19779433, 2009a.

ROCKSTRÖM, J. et al. Planetary boundaries: Exploring the safe operating space for humanity. **Ecology and Society**. 14, 32, 2009b.

ROSSOLL, D. et al. Ocean acidification-induced food quality deterioration constraints trophic transfer. **PLoS ONE** v. 7, n. 4: e34737, 2012.

SABINE, C. L. et al. The oceanic sink for CO₂. **Science**, 305: 367-371, 2004.

SODRÉ, C. F. L.; SILVA, Y. J. A.; MONTEIRO, I. P. Acidificação dos Oceanos: fenômeno, consequências e necessidades de uma governança ambiental global. **Revista Científica do Centro de Estudos em Desenvolvimento Sustentável da UNB**, 1(4), 2016.

STANLEY, J. G.D. Photosymbiosis and the evolution of modern coral reefs. **Science**. 312(5775):857-858, 2006.

STEFFEN, W.; CRUTZEN, P. J.; MCNEILL, J. R. The Anthropocene: Are Humans Now Overwhelming the Great Forces of Nature? **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, v. 36, n. 8, p. 614-621, 2007.

STEFFEN, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, 347, 80, 2015.

STEWART, R. I. et al. Mesocosm experiments as a tool for ecological Climate-change research. **Advances in Ecological Research**. 48:71-181, 2013.

STYF, H. A.; SKÖLD, H. N.; ERIKSSON, S. P. Embryonic response to long-term exposure of the marine crustacean *Nephrops norvegicus* to ocean acidification and elevated temperature. **Ecology and Evolution**. V. 3, n. 15, p. 5055-5065, 2013.

TURLEY, C. et al. 2010. Carbon Uptake, Transport and Storage by Oceans and the Consequences of Change In Carbon Capture and Storage (CCS). Issues in Environmental Science and Technology (IEST), **Royal Society of Chemistry**, Volume 29, p. 240-284, 2010.

ULLAH, H. et al. Climate change could drive marine food web collapse through altered trophic flows and cyanobacterial proliferation. **PLoS biology**, v. 16, n. 1, p. e2003446, 2018.

UNEP. **Emerging Issues: Environmental Consequences of Ocean Acidification: A Threat to Food Security**. United Nations Environment Programme, 2010.

UNESCO. **A ciência que precisamos para o oceano que queremos: a Década**

das Nações Unidas da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030). Paris. IOC/BRO/7 Rev, 2019.

WALLACE, R. B. et al. Coastal ocean acidification: The other eutrophication problem. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, V. 148, pp. 1-13, 2014.

WILLIAMS, C. R. et al. Elevated CO₂ impairs olfactory-mediated neural and behavioral responses and gene expression in ocean-phase coho salmon (*Oncorhynchus kisutch*). **Global change biology**, v. 25, n. 3, p. 963-977, 2019.

ANEXO A – Metas e indicadores da ODS 14, Vida na Água

ODS 14 – Vida na Água			
Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável			
Metas da ONU adaptadas ao cenário brasileiro		Indicadores	
14.1	Conservação e uso sustentável dos oceanos, dos mares e dos recursos marinhos para o desenvolvimento sustentável.	14.1.1	Índice de eutrofização das águas costeiras e índice de densidade de detritos plásticos flutuantes.
14.2	Até 2020, gerir de forma sustentável e proteger os ecossistemas marinhos e costeiros para evitar impactos adversos significativos, inclusive por meio do reforço da sua capacidade de resiliência, e tomar medidas para a sua restauração, a fim de assegurar oceanos saudáveis e produtivos.	14.2.1	Proporção da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) nacional gerenciada com base no uso de abordagens ecossistêmicas.
14.3	Minimizar e enfrentar os impactos da acidificação dos oceanos , inclusive por meio do reforço da cooperação científica em todos os níveis.	14.3.1	Acidez média marinha (pH) medida num conjunto representativo de estações de coleta.
14.4	Até 2020, efetivamente regular a coleta, e acabar com a sobrepesca, ilegal, não reportada e não regulamentada e as práticas de pesca destrutivas, e implementar planos de gestão com base científica, para restaurar populações de peixes no menor tempo possível, pelo menos a níveis que possam produzir rendimento máximo sustentável, como determinado por suas características biológicas.	14.4.1	Proporção da população de peixes (<i>fish stocks</i>) dentro de níveis biologicamente sustentáveis.
14.5	Até 2020, conservar pelo menos 25% das zonas costeiras e marinhas, principalmente áreas de especial importância para a biodiversidade e serviços ecossistêmicos, assegurada e respeitada a demarcação, regularização e a gestão efetiva e equitativa, visando garantir a interligação, integração e representação ecológica em paisagens marinhas mais amplas, de acordo com a legislação nacional e internacional, e com base na melhor informação científica disponível.	14.5.1	Cobertura de áreas marinhas protegidas em relação às áreas marinhas.
14.6	Até 2020, avaliar certas formas de subsídios à pesca, que contribuem para a sobrecapacidade e a sobrepesca, considerando a eliminação dos subsídios que contribuam para a pesca INN, e abstendo-se de introduzir novos subsídios como estes, reconhecendo que o tratamento especial e diferenciado adequado e eficaz	14.6.1	Progresso dos países, relativamente ao grau de implementação dos instrumentos internacionais visando o combate da pesca ilegal, não

	para os países em desenvolvimento e os países menos desenvolvidos deve ser parte integrante da negociação sobre subsídios à pesca da OMC.		registrada (declarada) e não regulamentada (IUU fishing).
14.7	Até 2030, aumentar os benefícios econômicos para todos os países, em especial os pequenos Estados insulares em desenvolvimento e os países menos desenvolvidos, a partir da gestão sustentável dos recursos marinhos, inclusive a pesca, aquicultura e turismo.	14.7.1	Pesca sustentável como uma proporção do Produto Interno Bruto (GDP) de pequenos Estados insulares em desenvolvimento, (<i>Small Islands Developing States</i>), de países menos desenvolvidos e todos os países.
14.a	Aumentar o conhecimento científico, desenvolver capacidades de pesquisa e transferir tecnologia marinha, tendo em conta os critérios e orientações sobre a Transferência de Tecnologia Marinha da Comissão Oceanográfica Intergovernamental, a fim de melhorar a saúde dos oceanos e aumentar a contribuição da biodiversidade marinha para o desenvolvimento dos países em desenvolvimento, em particular os pequenos Estados insulares em desenvolvimento e os países menos desenvolvidos.	14.a.1	Proporção do total do orçamento de pesquisas alocado para pesquisas na área da tecnologia marinha.
14.b	Proporcionar o acesso dos pescadores artesanais de pequena escala aos recursos marinhos e mercados.	14.b.1	Progresso dos países relativamente ao grau de aplicação de uma estrutura (enquadramento) legal/regulamentar/político e institucional que reconheça e proteja os direitos de acesso dos pescadores de pequena escala.
14.c	Assegurar a conservação e o uso sustentável dos oceanos e seus recursos pela implementação do direito internacional, como refletido na UNCLOS [Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar], que provê o arcabouço legal para a conservação e utilização sustentável dos oceanos e dos seus recursos, conforme registrado no parágrafo 158 do "Futuro Que Queremos".	14.c.1	Número de países com progressos na ratificação, aceitação e implementação, através de quadros legais, políticos e institucionais, de instrumentos relacionados com o oceano que implementam o direito internacional, tal como refletido na Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar, para a conservação

			e uso sustentável dos oceanos e seus recursos.
--	--	--	--

Fonte: IPEA, 2019