



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**INSTITUTO DE CIÊNCIAS DO MAR**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS MARINHAS TROPICAIS**

**ANNE LARISSA ALVES REBOUÇAS GURGEL**

**RESERVA BIOLÓGICA DO ATOL DAS ROCAS (ATLÂNTICO SUL) SOB  
PRESSÃO DE IMPACTOS HUMANOS: SUBSÍDIOS PARA A CONSERVAÇÃO**

**FORTALEZA**

**2023**

ANNE LARISSE ALVES REBOUÇAS GURGEL

RESERVA BIOLÓGICA DO ATOL DAS ROCAS (ATLÂNTICO SUL) SOB PRESSÃO  
DE IMPACTOS HUMANOS: SUBSÍDIOS PARA A CONSERVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

G987r Gurgel, Anne Larisse Alves Rebouças.  
RESERVA BIOLÓGICA DO ATOL DAS ROCAS (ATLÂNTICO SUL) SOB PRESSÃO DE  
IMPACTOS HUMANOS: SUBSÍDIOS PARA A CONSERVAÇÃO / Anne Larisse Alves  
Rebouças Gurgel. – 2023.  
57 f. : il. color.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Instituto de Ciências do Mar,  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais, Fortaleza, 2023.  
Orientação: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares.

1. Ilhas oceânicas. 2. Mudanças climáticas. 3. Recifes de corais. I. Título.

CDD 551.46

---

ANNE LARISSA ALVES REBOUÇAS GURGEL

RESERVA BIOLÓGICA DO ATOL DAS ROCAS (ATLÂNTICO SUL) SOB PRESSÃO  
DE IMPACTOS HUMANOS: SUBSÍDIOS PARA A CONSERVAÇÃO

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Marinhas Tropicais da Universidade Federal do Ceará, como requisito à obtenção do título de Mestre em Ciências Marinhas Tropicais. Área de concentração: Ciência, tecnologia e gestão costeira e oceânica.

Orientador: Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares.

Aprovada em: 22/03/2023.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dra. Sandra Vieira Paiva  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Dr. Antônio Rodrigues Ximenes Neto  
Universidade Federal do Espírito Santo (UFES)

À Anne que se encontrou perdida, nesse mundo cheio de gente procurando, e acabou chegando até aqui.

Nós conseguimos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNQp, pelo financiamento de minha pesquisa.

Ao Instituto de Ciências do Mar e ao Laboratório de Plâncton e Análise Ambiental, minhas raízes, e ao Instituto de Geociências da UFBA, por me receberem tão bem na Bahia.

Ao Prof. Dr. Marcelo de Oliveira Soares, pela orientação, apoio, compreensão e amizade. Lhe admiro muito, principalmente como ser humano, e me espelho na sua dedicação e compromisso com o trabalho. Os recifes de corais são melhores com profissionais como você cuidando deles.

Ao meu esposo, José Roberto, que cuidou de mim e esteve ao meu lado durante todo esse árduo processo. Obrigada pela escuta empática, pelo acolhimento e reciprocidade, por construirmos juntos um lar cheio de serzinhos de quatro patas e plantas resilientes. Arigatô por me apresentar os animes, em especial o Narutinho que me ensina sobre a importância de não desistir. Agora eu sou mestre dattebayou! Obrigada por esse chá calmante que você acabou de me entregar pra eu dormir bem às 7h da manhã. Sou muito grata pela história que estamos escrevendo juntos e aqui, nesta dissertação, assim como em cada parte dessa minha nova vida, tem um pedacinho de você. Te amo, moção.

À minha mãe, Anne Luise, que sempre esteve ao meu lado, desde a minha matrícula, até deixar sua única filha pra morar sozinha em outro estado. Nosso reencontro como mãe e filha foi o que me deu forças para seguir nesses tempos difíceis. Me enche de orgulho ver a senhora indo atrás da sua felicidade, fazendo de cada instante, um motivo para celebrar. Basta ter um celular para tirar foto.

À Mônica, minha psicóloga perfeita e maravilhosa. Obrigada por me guiar nessa jornada do autoconhecimento, por me encorajar a seguir, mesmo desanimada. Por ter fé em mim.

Ao meu grupo de constelação familiar, por todos os momentos de cura e alegria nas segundas-feiras, especialmente à Rosália. Obrigada à Liz, Lia, Cláudia,

Karol, João Vicente, Diego, Socorro, Tati, Patrícia e todos os que participaram das minhas constelações e lançaram um novo olhar sobre meu caminho.

Às minhas amigas Julyanne, Mariana, Msc Stephanie e Giselle. Obrigada por estarem ao meu lado. Vocês me deram muita força num momento de extrema vulnerabilidade. Sou profundamente grata por ter mulheres tão incríveis, sábias e terapeutizadas correndo na minha matilha.

À Deus e a toda a minha força ancestral que me guia e zela por mim.

“Caminho se conhece andando então vez em quando é bom se perder. Perdido fica perguntando, vai só procurando e acha sem saber. Perigo é se encontrar perdido, deixar sem ter sido, não olhar, não ver. Bom mesmo é ter sexto sentido, sair distraído, espalhar bem-querer.” (Chico César - Deus me proteja).

## RESUMO

Os recifes de corais estão entre os ecossistemas marinhos tropicais de maior relevância ecológica e socioeconômica devido sua abundante biodiversidade e inúmeros serviços ecossistêmicos. Suas características em ambientes remotos e oceânicos, como os atóis (estruturas biogênicas carbonáticas circulares ou elípticas), têm notáveis implicações na geração de *hotspots* marinhos onde, a partir de sua elevada produtividade, possibilitam a existência de uma complexa e rica teia trófica, com alto grau de endemismo. Atualmente, as mudanças climáticas globais (por exemplo, acidificação dos oceanos, aumento de *marine heatwaves* e do nível do mar), e as pressões regionais e locais (e.q. pesca ilegal e lixo marinho) têm causado severos impactos a nível espacial e temporal, tornando essencial a elaboração de pesquisas que busquem compreender os efeitos a nível cumulativo, mesmo em sistemas oceânicos isolados, considerados como “áreas pristinas” e supostamente livres de impacto humano. Dessa forma, o objetivo dessa dissertação é discutir os efeitos de pressões globais, locais e regionais na unidade de conservação de proteção integral Reserva Biológica do Atol das Rocas (único atol do Atlântico Sul). Os resultados indicam que a região está sendo impactada por pressões a nível global, especialmente com a ocorrência mais frequente, intensa e de maior durabilidade de *marine heatwaves* nas últimas décadas, além de processos erosivos na estrutura biogênica em determinadas partes da ilha. Esses fatores promovem fortes riscos à comunidade coralina, ocasionando um maior número e intensidade de eventos de branqueamento; assim como à fauna dependente da área emersa das ilhas, como aves e tartarugas marinhas, vulneráveis à elevação do nível do mar. Apesar de possuir uma efetividade razoável de manejo, o risco de introdução de espécies exóticas invasoras através da presença de lixo marinho é muito alto, visto a vulnerabilidade da posição do atol à influência de correntes oceânicas vindas da África. Outro fator que intensifica essa ameaça é a conectividade, através de uma cadeia de montanhas submarinas, que torna o atol suscetível ao mesmo sistema oceânico do Arquipélago de Fernando de Noronha, destino com alto influxo turístico e onde já foi registrada a presença do peixe leão *Pterois* spp. Com o diagnóstico realizado aqui e novos dados de futuras pesquisas será possível realizar projeções mais realistas de impactos em decorrência das múltiplas pressões antropogênicas.

**Palavras-chave:** Ilhas oceânicas; Mudanças climáticas; Recifes de corais.

## ABSTRACT

Coral reefs are among the tropical marine ecosystems of greatest ecological and socioeconomic relevance due to their abundant biodiversity and numerous ecosystem services. Their characteristics in remote oceanic environments, such as atolls (circular or elliptical carbonate biogenic structures), have remarkable implications in the generation of marine hotspots where, from their high productivity, they enable the existence of a complex and rich trophic web, with a high degree of endemism. Currently, global climate changes (e.g. ocean acidification, increase in heat waves and sea level rise), and regional and local pressures (e.g. illegal fishing and marine debris) have caused severe impacts at spatial and temporal levels, making essential the development of research that seeks to understand the effects at cumulative level, even in isolated oceanic systems, considered as "pristine areas" and supposedly free of human impact. Thus, the objective of this dissertation is to discuss the effects of global, local and regional pressures on the fully protected conservation unit Atol das Rocas Biological Reserve (the only atoll in the South Atlantic). The results indicate that the region is being impacted by global pressures, especially with the more frequent, intense and longer lasting occurrence of marine heat waves in recent decades, as well as erosive processes in the biogenic structure in certain parts of the island. These factors promote strong risks to the coral community, causing a higher number and intensity of bleaching events; as well as to the fauna dependent on the islands emerged area, such as seabirds and turtles, vulnerable to the sea level rise. Despite having a reasonable effectiveness of management, the risk of introducing invasive alien species through the presence of marine debris is very high, given the vulnerability of the atoll's position to the influence of ocean currents coming from Africa. Another factor that intensifies this threat is connectivity, through a chain of seamounts, which makes the atoll susceptible to the same oceanic system of the Fernando de Noronha Archipelago, a destination with high tourist influx and where the presence of the lionfish *Pterois* spp. has already been recorded. With the diagnosis made here and new data from future research it will be possible to make more realistic projections of impacts due to multiple anthropogenic pressures.

**Key-words:** Coral Reefs; Climate Change; Ocean Islands.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Emissões de CO <sub>2</sub> em gigatoneladas dos cenários SSPs.....	18
Figura 2 – Comparação dos riscos ao ambiente marinho associado a diferentes projeções de aumento da temperatura média global.....	22
Figura 3 – Fluxograma retratando as pressões antrópicas e naturais com enfoque na reserva biológica do Atol das Rocas.....	24
Figura 4 – A) Oceano Atlântico Sul com destaque para as B) ilhas oceânicas do Atol das Rocas (AR) e Fernando de Noronha (FN) na Zona de fratura de Fernando de Noronha, C) imagem de satélite do Atol das Rocas e D) modelo digital de elevação do Atol das Rocas elaborado por Costa <i>et al.</i> , (2019). .....	28
Figura 5 – A) Atol das Rocas (visão aérea) no Atlântico Sul Equatorial (Brasil). Fonte: Maurizélia Brito da Silva; B) Ocorrência de corais massivos e endêmicos nas formações recifais do Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil). Fonte: Marcelo Soares; e C) Colônias do coral <i>Siderastrea stellata</i> (cor laranja à direita) no substrato recifal do Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil).....	29
Figura 6 – Avaliação do percentual de efetividade da Reserva Biológica do Atol das Rocas entre 2018-2022.....	31
Figura 7 – Série histórica da variação anual das propriedades de <i>marine heatwaves</i> no período entre 1982 e 2020 no Atol das Rocas. A) Mostra a frequência de ocorrência (MHWs/ano); B) a média de variação de duração anual (dias) e C) a média de intensidade (linhas azuis) de MHW e a intensidade máxima (linhas vermelhas).....	35

- Figura 8 – Série temporal da TSM e DHW para o período entre 1985 e 2022. A linha vermelha representando o ano de 2020 mostra um elevado e prolongado pico de calor acumulado acima de 8 °C/week, sob forte indício de branqueamento severo e generalizado na área..... 36
- Figura 9 – Vegetação insular de gramíneas adaptadas a solos salinos com grande presença de aves na ilha do Farol no Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil) a qual é sujeita a eventos de inundação por ondas de alta energia e elevação do nível do mar..... 39
- Figura 10 – Fluxograma das pressões globais, locais e regionais que afetam o Atol das Rocas..... 40
- Figura 11 – Sistema de correntes oceânicas do Atlântico Sul, com destaque (estrela vermelha) para a área correspondente ao Atol das Rocas..... 41

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Projeções de aumento da temperatura da superfície do mar (C°) e do aumento do nível médio do mar (m) sob diferentes RCPs até o ano de 2100.....	20
Tabela 2 – Casos documentados de detritos encontrados no Atol das Rocas (AR) e no Arquipélago de Fernando de Noronha (FN).....	42

## LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

%	Porcentagem
AMP	Área Marinha Protegida
CaCO <sub>3</sub>	Carbonato de Cálcio
CH <sub>4</sub>	Metano
CO <sub>2</sub>	Dióxido de Carbono
DHW	<i>Degree Heating Weak</i> (Grau de Aquecimento Semanal)
ICMBio	Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
ENSO	<i>El Niño-Southern Oscillation</i>
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i> (Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas)
GEE	Gases do Efeito Estufa
MHWs	<i>Marine heatwaves</i> (Ondas de Calor Marinha)
POPs	Poluentes orgânicos persistentes
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i> (Caminhos Representativos de Concentração)
SLR	<i>Sea Level Rise</i> (Aumento da Superfície do Mar)
SSP	<i>Shared Socioeconomic Pathways</i> (Caminhos Socioeconômicos Compartilhados)
TSM	Temperatura da Superfície do Mar

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	16
<b>1.1</b>	<b>Mudanças climáticas e ações governamentais</b> .....	16
<b>1.2</b>	<b>Interação oceano-atmosfera</b> .....	19
<b>1.3</b>	<b>Recifes de corais</b> .....	21
<b>2</b>	<b>OBJETIVOS</b> .....	25
<b>2.1</b>	<b>Objetivo geral</b> .....	25
<b>2.2</b>	<b>Objetivos específicos</b> .....	25
	<b>CAPÍTULO ÚNICO – Impactos globais e locais na reserva biológica do Atol das Rocas (Atlântico Sul)</b> .....	26
<b>1</b>	<b>Introdução</b> .....	27
<b>2</b>	<b>Materiais e métodos</b> .....	31
<b>3</b>	<b>Resultados e discussões</b> .....	32
<b>3.1</b>	<b>Pressões globais</b> .....	32
<b>3.2</b>	<b>Pressões locais e regionais</b> .....	41
<b>4</b>	<b>Conclusões e considerações finais</b> .....	45
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	46
	<b>APÊNDICE A - DADOS DE ANOMALIA TÉRMICA POSITIVA</b> .....	57

## 1 INTRODUÇÃO

A dissertação foi elaborada na forma de capítulo visando publicação em revista científica (a ser submetido), a qual é intitulada: “Impactos globais e locais na reserva biológica do Atol das Rocas (Atlântico Sul)”, onde serão analisados os efeitos de pressões globais, locais e regionais. Portanto, nesse capítulo discutiremos como efeito das mudanças climáticas globais: o aumento da TSM; a elevação do nível do mar; o aumento na intensidade e frequência de eventos meta-oceanográficos, como *swell* e MHWs; e a acidificação da água do mar (Figura 3). Além desses, temos como pressões locais e regionais: a ocorrência de resíduos sólidos, como o lixo proveniente de correntes oceânicas e da atividade de pesca no Arquipélago de Fernando de Noronha (ambos pertencentes à mesma formação de cadeias montanhosas submarinas), *pellets* e microplásticos, além da perspectiva e do risco de introdução de espécies invasoras (por exemplo, coral sol *Tubastraea* spp. e peixe-leão *Pterois* spp.) no ambiente. Compreender essas pressões e o efeito cumulativo que causam ao ambiente, mesmo em uma reserva protegida como o Atol das Rocas, é importante para discutir possíveis projeções futuras de impacto e estratégias de conservação.

### 1.1 Mudanças climáticas e ações governamentais

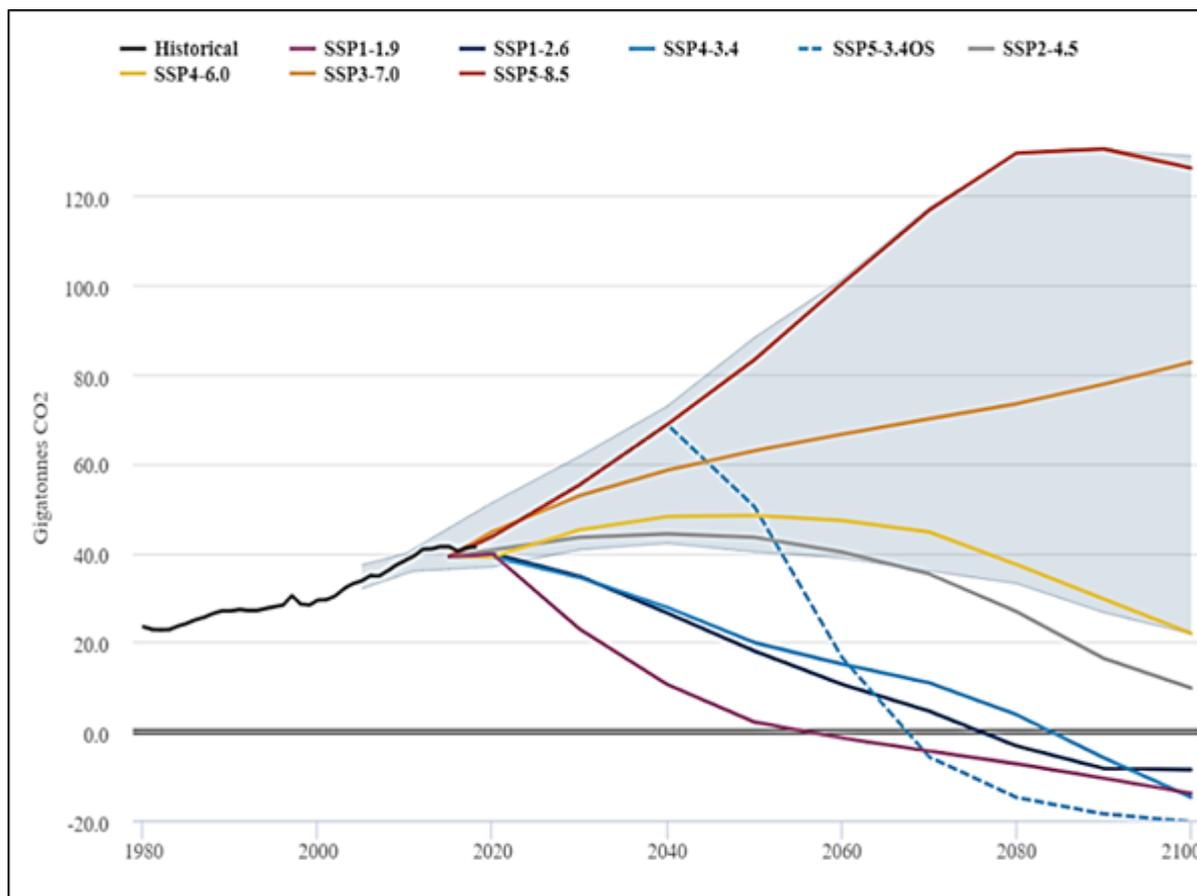
Enquanto as mudanças geradas na economia e na política mundial desde a Revolução Industrial impulsionaram um novo estilo de vida para a humanidade, uma grande concentração de gases poluentes passaram a ser acumulados na atmosfera, em especial o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) e o metano (CH<sub>4</sub>), a partir da queima de combustíveis fósseis (WATERS e TURNER, 2022). Lenta e progressivamente, o crescimento dos chamados gases do efeito estufa (GEE) levaram à intensificação da tendência natural de aquecimento do planeta, causando o aumento da temperatura média global, alterações do ciclo hidrológico da água,

ameaças à segurança alimentar, assim como diversos impactos socioeconômicos (IPCC, 2013, 2022).

A comunidade científica discute mudanças climáticas por influência humana desde o início do século XIX (ANDERSON *et al.*, 2016), porém apenas em meados da década de 70 o movimento ambiental atingiu forte influência a nível global, com a publicação do Relatório do Clube de Roma sobre a extrapolação dos recursos naturais e a criação da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), principal financiador de pesquisas climáticas nos Estados Unidos da América. Em 1988, foi formado pelo Programa das Nações Unidas para o Meio Ambiente e pela Organização Meteorológica Mundial, o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC), com o objetivo de fornecer aos formuladores de políticas, avaliações científicas regulares sobre a mudança do clima, suas implicações e possíveis riscos futuros, bem como para propor ações de adaptação e mitigação.

Na formulação dos relatórios gerados pelo IPCC, os modelos climáticos passaram a ser utilizados como ferramenta na simulação de cenários futuros, projetando mudanças ecológicas sob diferentes cenários acerca do que ocorreria com o Planeta – do otimista ao pessimista de acordo com as emissões dos GEE. No quinto relatório (IPCC, 2013), foram apresentados os Caminhos Representativos de Concentração (*Representative Concentration Pathway* - RCP), que são calculados com base no número de reflexão de radiação, ou seja, a capacidade de dissipar calor em cada um dos cenários. Cada RCP provê conjuntos de dados, especialmente distribuídos e especifica as concentrações anuais de GEE e as emissões antropogênicas até o ano 2100. Os principais cenários RCPs são: RCP 2.6 (baixas emissões), RCPs 4.5 e 6.0 (estabilização de médias emissões de GEE) e o RCP 8.5 (altas emissões) (figura 1).

Figura 1 – Emissões de CO<sub>2</sub> em gigatoneladas dos cenários SSPs.



Fonte: IPCC (2022).

Com a ratificação dos Acordos Climáticos de Paris em 2016, cerca de 200 líderes mundiais assumiram o compromisso de adoção de medidas de mitigação, adaptação, financiamento e redução da emissão de GEE a fim de limitar o aumento da temperatura média global para abaixo de 1,5 °C acima dos níveis pré-industriais. Segundo o sexto e mais recente relatório até o momento (IPCC, 2022), em 2021 estudos apontavam que a temperatura média global estaria 1,1 °C acima dos níveis estipulados. O mesmo relatório também apresentou outros novos cenários de RCPs 1.9, 3.4 e 7.0 (figura 1), como forma de incluir nas projeções as metas estipuladas nos Acordos Climáticos de Paris; assim como os Caminhos Socioeconômicos Compartilhados (*Shared Socioeconomic Pathways - SSP*), modelos de cenários de emissões de GEE onde são adotadas diferentes políticas climáticas no sequestro de carbono projetadas até 2100 (figura 1). São eles o SSP1 (sustentabilidade), SSP2

(meio do caminho), SSP3 (rivalidade regional), SSP4 (desigualdade) e SSP5 (desenvolvimento com combustível fóssil).

## 1.2 Interação oceano-atmosfera

Na zona de interface entre oceano e atmosfera, mudanças foram provocadas nos padrões de circulação devido à intensificação da tendência de aquecimento pelos GEE, como a distribuição de calor pela ação dos ventos, centros de pressão, eventos extremos, *El Niño-Southern Oscillation* (ENSO), entre outros (FOX-KEMPER *et al.*, 2021; GULEV *et al.*, 2021). A maior incidência de raios ultravioletas na região oceânica passou a causar o aumento da temperatura da superfície do mar (TSM) assim como das camadas inferiores que penetram na coluna d'água, o que, com a redução na troca de calor pela ação do vento, têm provocado a estratificação das massas d'água e afetado o padrão de circulação oceânica (CAPOTONDI *et al.*, 2012; FU *et al.*, 2016; BINDOFF *et al.*, 2019a; KWIATKOWSKI *et al.*, 2020; FOX-KEMPER *et al.*, 2021). O conteúdo de calor do oceano global tem aumentado desde 1970 (FOX-KEMPER *et al.*, 2021) e provavelmente continuará até pelo menos 2300 (IPCC, 2022), mesmo para cenários de baixas emissões, devido à lenta circulação do oceano profundo. Pelo menos 83% da superfície do oceano provavelmente aquecerá ao longo do século 21 em todos os cenários de SSP (IPCC, 2022).

Concomitantemente, esse aquecimento causa a expansão térmica das moléculas de água (GREGORY *et al.*, 2019) que, em conjunto com a grande perda da cobertura de gelo da Groenlândia (NOËL *et al.*, 2021) e Antártica (MEREDITH *et al.*, 2019), contribuem de forma significativa para o aumento do nível do mar. Esse crescimento se deu mais rapidamente no século XX do que em qualquer século nos últimos 3 milênios (0.20m no período de 1901-2018) (IPCC, 2022). Até 2050, espera-se que o nível do mar suba mais 10 a 25 cm, independentemente de as emissões de gases de efeito estufa serem ou não reduzidas. Esse fenômeno aumentará a frequência e a gravidade dos eventos extremos do nível do mar nas costas como tempestades, inundações de maré e *swell*. Na tabela 1, estão listados,

segundo projeções do IPCC, as expectativas de aumento da TSM (C°) e do nível do mar (m) sob diferentes RCPs até o ano de 2100.

Tabela 1 – Projeções de aumento da temperatura da superfície do mar (C°) e do aumento do nível médio do mar (m) sob diferentes RCPs até o ano de 2100.

		2046–2065		2081–2100	
	Scenario	Mean	Likely range <sup>c</sup>	Mean	Likely range <sup>c</sup>
Global Mean Surface Temperature Change (°C) <sup>a</sup>	RCP2.6	1.0	0.4 to 1.6	1.0	0.3 to 1.7
	RCP4.5	1.4	0.9 to 2.0	1.8	1.1 to 2.6
	RCP6.0	1.3	0.8 to 1.8	2.2	1.4 to 3.1
	RCP8.5	2.0	1.4 to 2.6	3.7	2.6 to 4.8
	Scenario	Mean	Likely range <sup>d</sup>	Mean	Likely range <sup>d</sup>
Global Mean Sea Level Rise (m) <sup>b</sup>	RCP2.6	0.24	0.17 to 0.32	0.40	0.26 to 0.55
	RCP4.5	0.26	0.19 to 0.33	0.47	0.32 to 0.63
	RCP6.0	0.25	0.18 to 0.32	0.48	0.33 to 0.63
	RCP8.5	0.30	0.22 to 0.38	0.63	0.45 to 0.82

Fonte: IPCC (2013).

Associado a esses fenômenos, também passou a ocorrer uma maior absorção de CO<sub>2</sub> pelo oceano, este que é dissolvido e alterado localmente pelos processos de respiração e fotossíntese e, indiretamente, pelo de calcificação (TAMBUITÉ *et al.*, 2011). O CO<sub>2</sub> combina com água gerando ácido carbônico (H<sub>2</sub>CO<sub>3</sub>), que dissocia-se rapidamente formando íon bicarbonato (HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>) e íon hidrogênio (H<sup>+</sup>). O íon bicarbonato, por sua vez, dissocia-se formando íon carbonato (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>) e íon hidrogênio (DONEY *et al.*, 2009). Em decorrência do aumento da liberação de íons H<sup>+</sup>, o pH da água do mar tem reduzido, originando o fenômeno de acidificação (CANADELL *et al.*, 2021; GULEV *et al.*, 2021). Com essa alteração do balanço iônico da água do mar, diversos prejuízos comprometem a biota marinha em relação a problemas fisiológicos por alteração na disponibilidade e captação de íons e, nos organismos calcificadores, na capacidade de deposição de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>) (RAVEN, 2005; COHEN e HOLCOMB, 2009).

Com as mudanças climáticas, eventos extremos de anomalia térmica positiva, como *marine heatwaves* (MHWs), com duração mínima de cinco dias até

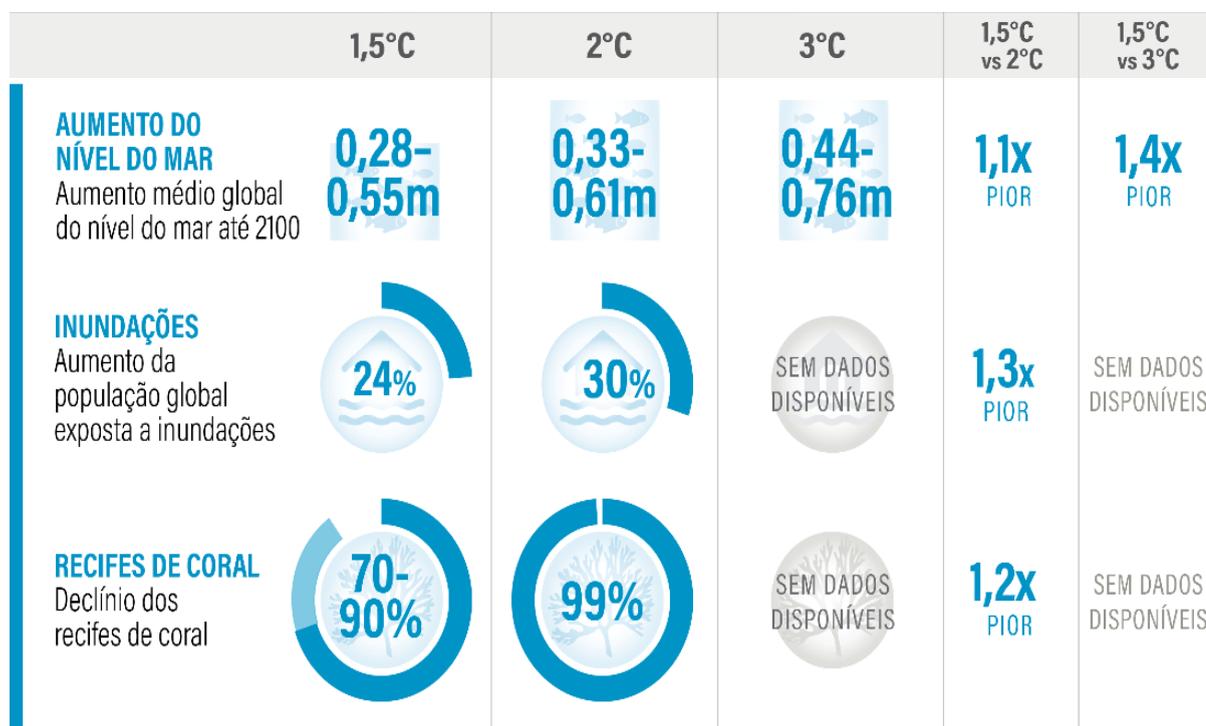
vários meses (HOBDDAY *et al.*, 2016), praticamente dobraram de frequência desde a década de 1980, tornando-se mais intensos e mais longos e abrangendo uma extensão espacial cada vez maior (IPCC, 2022). Os oceanos tropicais, em particular, têm aquecido mais rapidamente do que em outras regiões desde a década de 50, expondo espécies e ecossistemas-chave, como recifes de corais, a condições ambientais além de seus limites de tolerância e aclimatação, afetando a área do habitat, a biodiversidade, a função e os serviços do ecossistema (IPCC, 2022).

### 1.3 Recifes de corais

Os recifes de corais, com sua rica biodiversidade e produtividade, proporcionam diversos bens e serviços ecossistêmicos, onde estima-se que mais de 500 milhões de pessoas que vivem em países tropicais possuam alguma dependência a esses serviços, como a pesca, o turismo, a proteção costeira e de matéria-prima para a indústria farmacológica (WILKINSON, 2002; GRAHAM e NASH, 2013; COSTANZA *et al.*, 2014; SPALDING *et al.*, 2017). Devido a sua elevada relevância socioeconômica, diversos são os estudos a fim de compreender os mecanismos de resposta desses ecossistemas frente às mudanças climáticas globais (e.g. aumento da TSM, acidificação, aumento do nível do mar) e como seus serviços serão afetados nas próximas décadas (ALTIERI *et al.*, 2017; HUGHES *et al.*, 2017).

Em escalas locais e regionais, as pressões climáticas pioram os impactos na vida marinha de pressões antropogênicas não climáticas, como degradação do habitat, poluição marinha, sobrepesca e introdução de espécies exóticas (HUGHES *et al.*, 2017, 2018; ROSSI *et al.*, 2019). Espera-se, segundo previsões do sexto relatório do IPCC, que a cobertura de corais em recifes tropicais apresente um declínio em até 90% com o aquecimento de 1,5°C (figura 2), levando a sistemas com biodiversidade e complexidade estrutural reduzidas, e seja praticamente extinta com o aquecimento de 2 °C ou mais (figura 2).

Figura 2 – Comparação dos riscos ao ambiente marinho associado a diferentes projeções de aumento da temperatura média global.



Fonte: Adaptada de IPCC (2022).

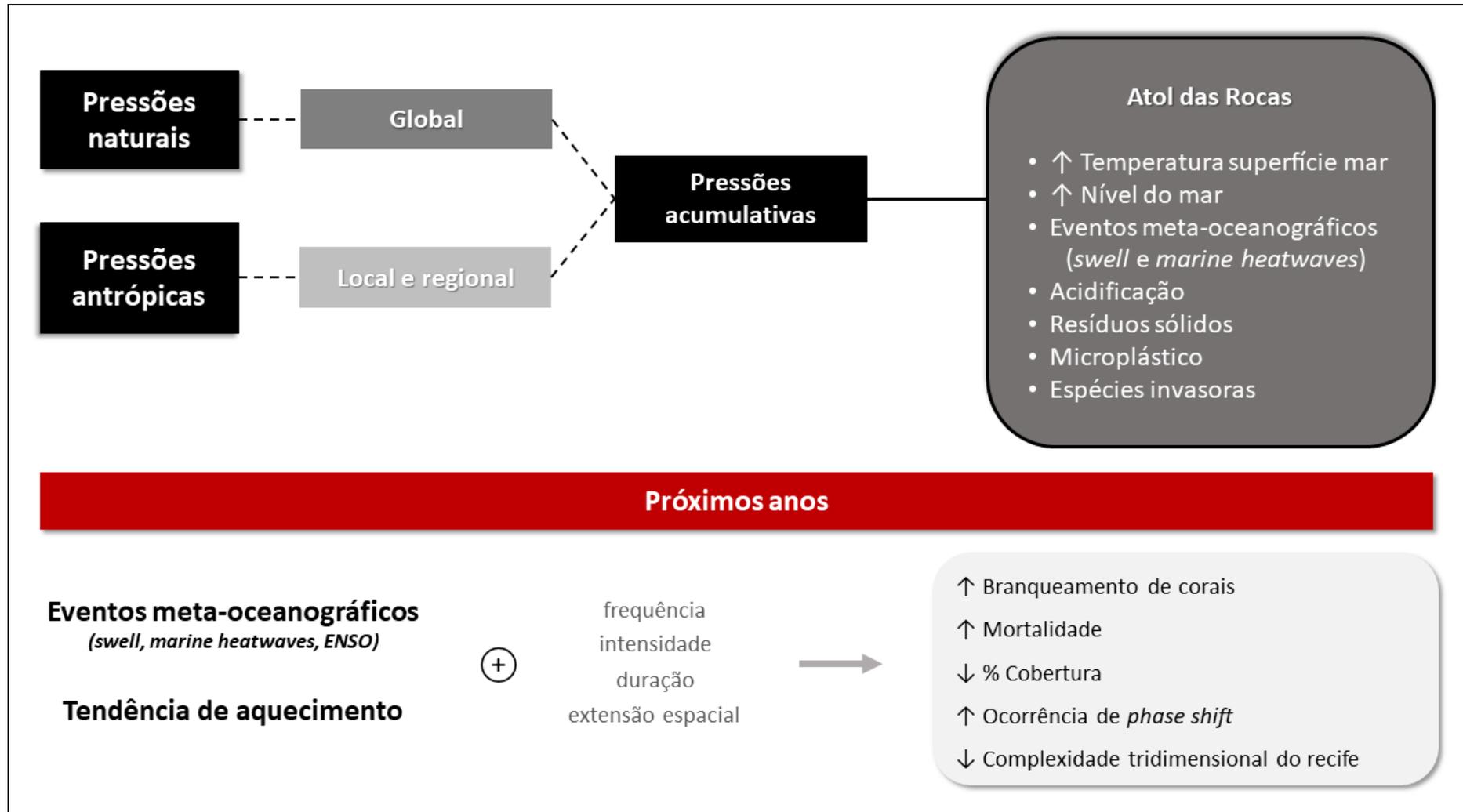
Dentre os diversos sistemas recifais, as ilhas oceânicas são altamente vulneráveis ao aumento da temperatura, aos impactos crescentes de ciclones tropicais, tempestades, mudanças nos padrões de precipitação, aumento do nível do mar, branqueamento de corais e espécies invasoras (IPCC, 2022). Quando em localizações remotas, apresentam características distintas como elevado grau de endemismo e formação de *hot spots* de produtividade marinha, possibilitando uma complexa e rica teia trófica no recife (PAIVA *et al.*, 2015; MILLER, 2020; CAPITANI *et al.*, 2021). Na história geológica do planeta, essas ilhas sofreram grandes modificações em suas características morfológicas naturais (STODDART, 1965). A exemplo disso, há a formação de atóis, estruturas biogênicas circulares ou elípticas de carbonato de cálcio (CaCO<sub>3</sub>), construídas a partir da sequência evolutiva ao redor de vulcões ou montanhas submarinas erodidas ou submersas com o tempo (DICKINSON, 2004; BARRY *et al.*, 2007). Das mais de 400 formações de atóis presentes no mundo, a maioria delas se situa nos mares tropicais do Indo-Pacífico e no Caribe, onde se fazem presentes uma laguna recifal profunda, um platô

biogênico, constituído essencialmente por corais escleractíneos, e ilhas arenosas à sotavento (WIENS, 1962). Em comparativo, apenas uma formação de atol é encontrada no Atlântico Sul, na costa nordeste do Brasil.

O Atol das Rocas é uma Reserva Biológica Marinha e se diferencia dos demais atóis por apresentar uma laguna rasa de profundidade máxima de 3 m (COSTA *et al.*, 2019) e estrutura constituída principalmente por algas coralinas incrustantes, gastrópodes vermetídeos, corais e foraminíferos incrustantes (KIKUCHI e LEÃO, 1997). Seus recifes são dominados pela espécie de coral *Siderastrea stellata*, um coral massivo, endêmico da costa atlântica e de maior resiliência a estresses térmicos (Figura 5) (ECHEVERRÍA e PIRES, 1997; LONGO *et al.*, 2015; TUNALA *et al.*, 2019). Contudo, eventos de MHWs, mais frequentes e intensos nos últimos anos, têm tornado esses recifes mais suscetíveis ao fenômeno de branqueamento e ao desenvolvimento de doenças nos corais (FERREIRA *et al.*, 2013; GASPAR *et al.*, 2021). Esse aspecto aumenta a vulnerabilidade quanto à perda da complexidade tridimensional do ambiente, gerando perda na capacidade de prestação de serviços ecossistêmicos (figura 3) (COSTA *et al.*, 2017; SOARES *et al.*, 2021).

As áreas marinhas protegidas (AMPs), conforme implementadas atualmente, não conferem resiliência contra as mudanças climáticas (MAGRIS *et al.*, 2015) e não se espera que forneçam proteção substancial contra esses impactos após 2050 (IPCC, 2022). Apesar de possuir alta efetividade de manejo dentre unidades de conservação que protegem recifes no Atlântico Tropical Sul (SOARES, 2018), pesquisas recentes revelam que a ecorregião marinha do Atol das Rocas mostra um crescente impacto tanto antrópico, quanto de pressões naturais (Figura 3) (SOARES, 2018; COSTA *et al.*, 2019; CAPITANI *et al.*, 2021; GASPAR *et al.*, 2021).

Figura 3 – Fluxograma retratando as pressões antrópicas e naturais com enfoque na reserva biológica do Atol das Rocas.



Fonte: Elaborado pela autora, com base nos trabalhos de Soares (2018) e Soares *et al.*, (2021).

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 Objetivo geral**

Analisar os efeitos de pressões antropogênicas globais, locais e regionais no Atol das Rocas (Atlântico Sul).

### **2.2 Objetivos específicos**

- Discutir os impactos causados por pressões a nível global, tais como aumento da temperatura da superfície do mar, elevação do nível do mar, maior frequência de eventos meta-oceanográficos e acidificação oceânica;
- Discutir os impactos causados a nível local e regional, tais como, dentre outros, os resíduos sólidos e o risco de introdução de espécies invasoras;

## **CAPÍTULO ÚNICO – Impactos globais e locais na reserva biológica do Atol das Rocas (Atlântico Sul)**

### **Resumo**

Os recifes tropicais estão entre os ecossistemas marinhos de maior relevância ecológica e socioeconômica, cujas características em ambientes remotos, como as ilhas oceânicas, as tornam *hotspots* de biodiversidade. A partir de sua alta produtividade bentônica, os recifes têm uma rica diversidade e complexa teia trófica. Os atóis, estruturas biogênicas de carbonato de cálcio construídas a partir da sequência evolutiva ao redor de ilhas oceânicas, estão espalhados ao longo do mundo com mais de 400 registros. Destes, apenas um se encontra no oceano Atlântico Sul, na porção sudoeste equatorial: o Atol das Rocas. Foi a primeira unidade de conservação marinha criada no Brasil e apresenta um dos mais altos níveis de efetividade de manejo. Nesse artigo revisamos os impactos globais e locais que afetam esse ambiente único. As mudanças climáticas globais (e.g. acidificação dos oceanos, temperatura da superfície do mar e elevação do nível do mar), cada vez mais ocorrentes desde o último século, e as pressões a nível regional e local (e.g. pesca, navegação, lixo) causam severos impactos espacial e temporal nesses ambientes. O aumento na duração e frequência de eventos de anomalia térmica, como marine heatwaves, representa grande risco na manutenção de ecossistemas recifais, sujeitos ao fenômeno de branqueamento e mortalidade. O aumento do nível do mar, assim como de eventos de alta energia, tipo swell, sujeita o atol a erosão e instabilidade nas rotas migratórias e tartarugas e aves marinhas. Mesmo se tratando de um sistema oceânico isolado, o Atol está sob forte influência de correntes marítimas vindas da África e sujeito à introdução de espécies exóticas através da presença de lixo marinho, assim como a conectividade com o Arquipélago de Fernando de Noronha. Compreendendo a importância na conservação de *hot spots* de produtividade como o Atol das Rocas, o objetivo deste artigo foi analisar os efeitos cumulativos de pressões globais, locais e regionais, e discutir projeções futuras de impacto para esse ecossistema.

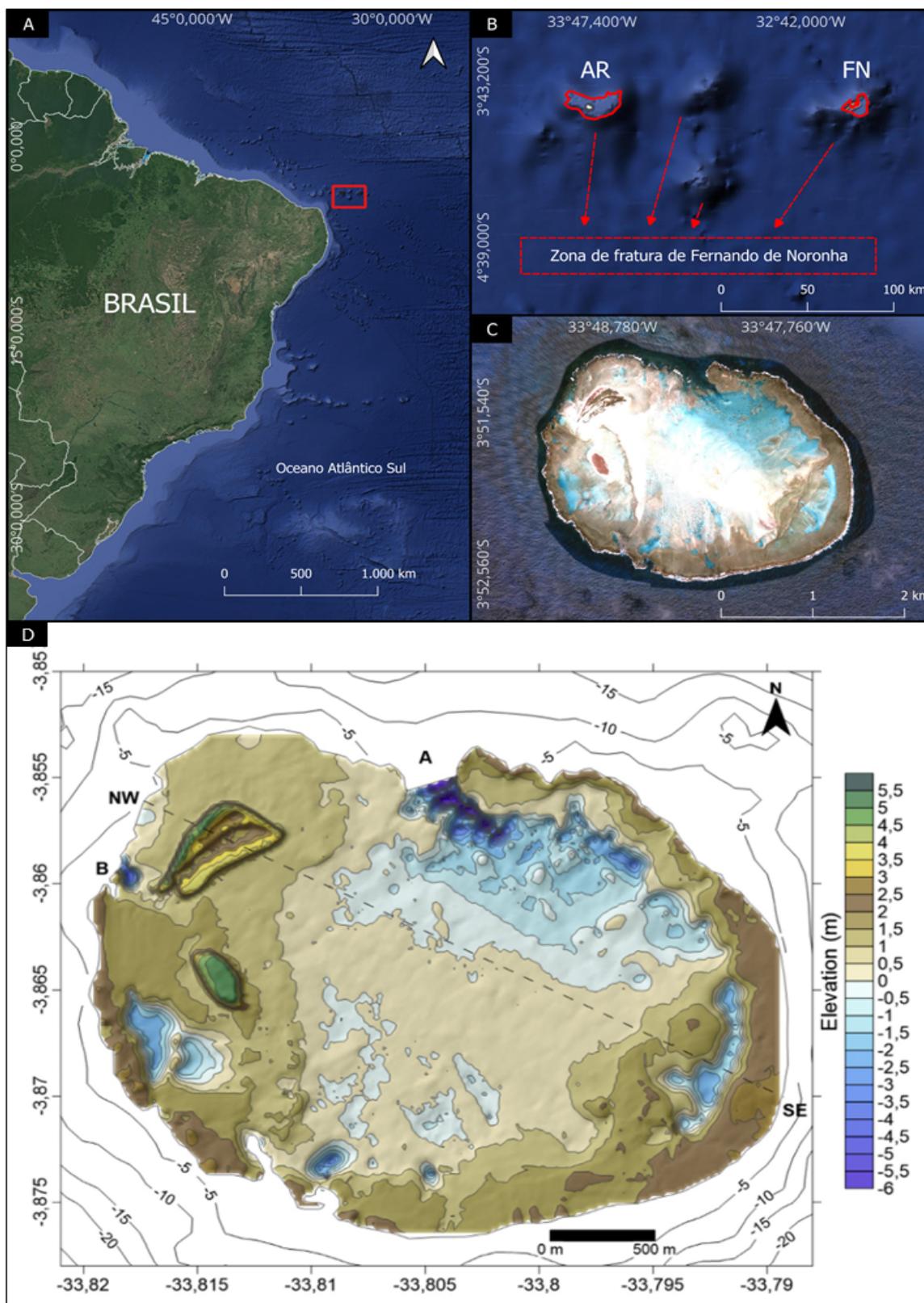
**Palavras-chave:** Mudanças climáticas; *Marine heatwaves*; Aumento do nível do mar; Recifes de corais.

## 1 Introdução

Os recifes de coral são ecossistemas marinhos com uma vasta diversidade de organismos, possuindo grande importância ecológica e econômica (GRAHAM e NASH, 2013; COSTANZA *et al.*, 2014; SPALDING *et al.*, 2017). Essas características em ambientes remotos, como ilhas oceânicas, possibilitam a presença de *hot spots*, onde, a partir de sua alta produtividade, possibilitam a existência de uma rica diversidade e complexa teia trófica recifal (TCHAMABI *et al.*, 2017; MORAIS *et al.*, 2017; CAPITANI *et al.*, 2021). Dentre os diversos sistemas oceânicos, as ilhas na história geológica do planeta, sob os efeitos isostáticos da variação do nível do mar (DICKINSON, 2004), sofreram grandes modificações em suas características morfológicas naturais (STODDART, 1965). A exemplo disso, existem os atóis, estruturas biogênicas de carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) construídas a partir da sequência evolutiva de recifes biogênicos ao redor de ilhas oceânicas, onde o movimento de subsidência das ilhas e a eustasia do nível do mar resultaram na construção de um platô com bioconstruções (BARRY *et al.*, 2007). Dos mais de 400 atóis existentes no mundo, apenas 27 se encontram no Atlântico, com sua maioria (26) no mar do Caribe e apenas um no Atlântico sudoeste equatorial (BRYAN, 1953).

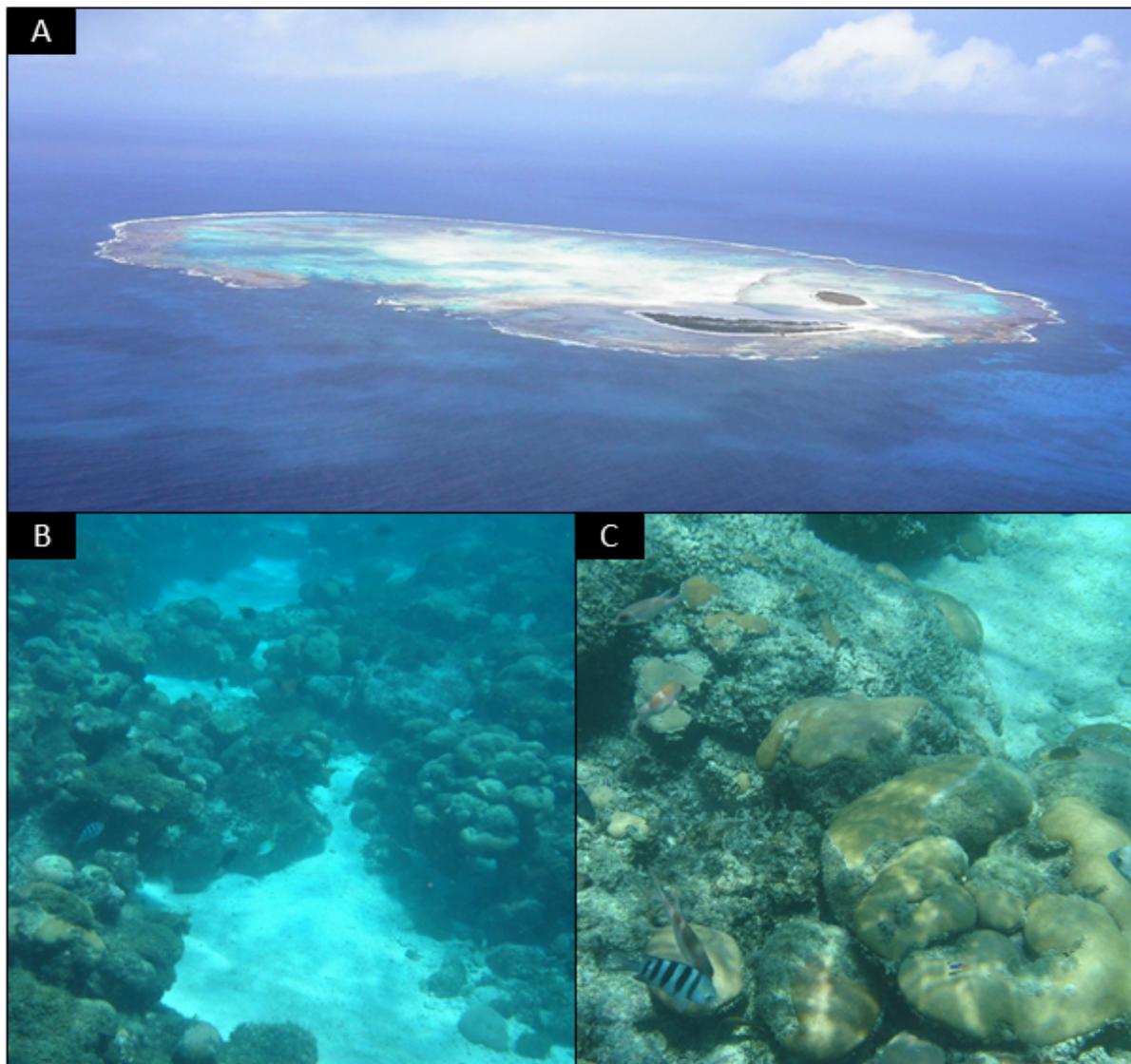
Com uma área de 360 km<sup>2</sup> e localizado a cerca de 230 km da costa nordeste do Brasil (03°50'S, 33°49'W), o Atol das Rocas (Figura 4) é a única formação de atol do Oceano Atlântico Sul, situado no topo de um vulcão submarino a 4.000 m de profundidade, que faz parte da zona de fratura de Fernando de Noronha (ALMEIDA, 1955). O Atol é uma unidade de conservação marinha (categoria de Reserva Biológica) desde 1979, e atualmente é administrado pelo Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio). Em 2001, foi designado pela UNESCO (Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura) como Patrimônio da Humanidade. Dentro do anel recifal há a ocorrência de duas ilhas emersas, Ilha do Farol e Ilha do Cemitério, e de uma laguna rasa com profundidade média de 3 m (COSTA *et al.*, 2017) (Figura 5).

Figura 4 – A) Oceano Atlântico Sul com destaque para as B) ilhas oceânicas do Atol das Rocas (AR) e Fernando de Noronha (FN) na Zona de fratura de Fernando de Noronha, C) imagem de satélite do Atol das Rocas e D) modelo digital de elevação do Atol das Rocas elaborado por Costa *et al.*, (2019).



Fonte: Elaborado pela autora com base no trabalho de Costa *et al.*, (2019).

Figura 5 – A) Atol das Rocas (visão aérea) no Atlântico Sul Equatorial (Brasil). Fonte: Maurizélia Brito da Silva; B) Ocorrência de corais massivos e endêmicos nas formações recifais do Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil). Fonte: Marcelo Soares; e C) Colônias do coral *Siderastrea stellata* (cor laranja à direita) no substrato recifal do Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil).



Fonte: Marcelo Soares.

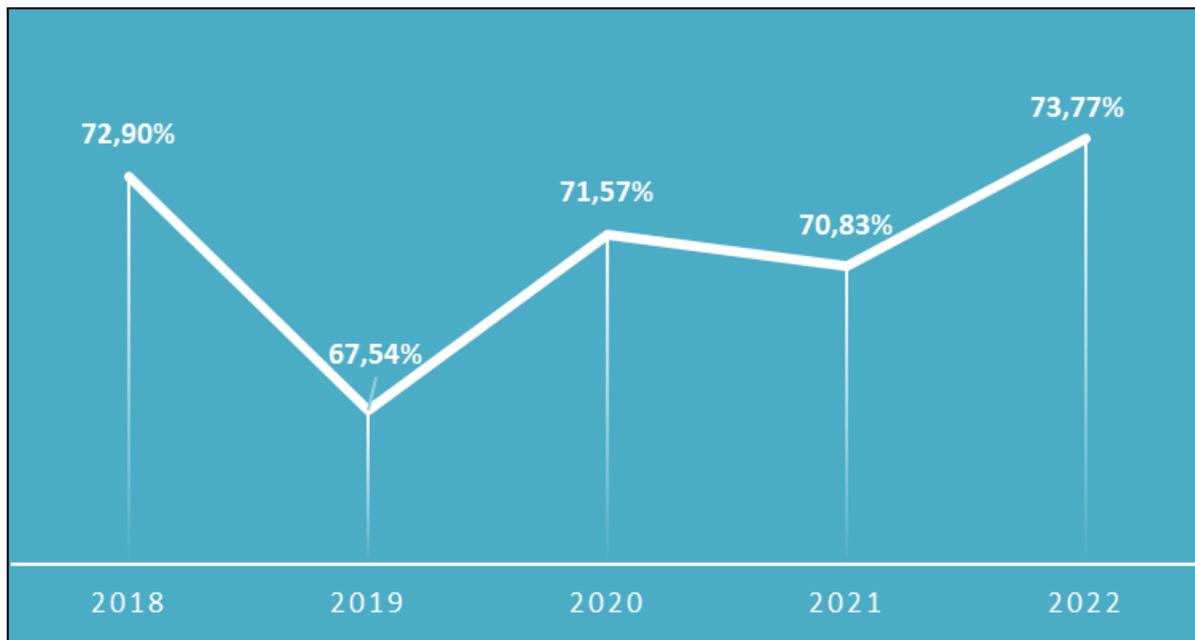
Sob um regime semidiurno e mesotidal (KIKUCHI e LEÃO 1997), é possível, durante as marés baixas, distinguir dois habitats principais (segundo COSTA *et al.*, (2017, 2019): I) as piscinas fechadas, que permanecem completamente isoladas na área do platô do recife, e II) as piscinas abertas que, por meio de passagens de comunicação direta com o ambiente *offshore*, recebem maior energia das ondas, influenciando na circulação da lagoa que converge à sotavento (Figura 4). O substrato recifal é formado principalmente pela alga coralina *Porolithon*

cf. *pachydermum*, além de gastrópodes vermetídeos, corais massivos e foraminíferos incrustantes (KIKUCHI e LEÃO, 1997), ocorrendo também sete espécies de corais escleractíneos e uma de hidrocoral (LEÃO *et al.*, 2016) (Figura 5). O sedimento é de origem bioclástica, constituído majoritariamente por alga coralina, caracterizado por uma baixa porcentagem de material particulado fino, devido ao alto hidrodinamismo local, e com o tamanho médio do grão variando de acordo com as diferentes características geomorfológicas do ambiente recifal (PEREIRA *et al.*, 2013).

As características morfológicas e ambientais únicas do Atol das Rocas, como a sua localização geográfica isolada e taxas significativas de espécies endêmicas (PAIVA *et al.*, 2015; BARROSO *et al.*, 2016), permitem a aplicação de pesquisas como uma área pristina (QUIMBAYO *et al.*, 2019), ou seja, um ambiente onde existe impacto humano reduzido (SOARES, 2018). Contudo, esses ambientes únicos ainda carecem de estudos que demonstrem a resistência e/ou resiliência sob efeito das crescentes mudanças ambientais globais (SOARES *et al.*, 2021).

Apesar de possuir efetividade razoável de manejo (figura 6) (SOARES, 2018), pesquisas recentes revelam que a unidade de conservação marinha do Atol das Rocas está sob um crescente impacto tanto humano (por exemplo, lixo), quanto de pressões das mudanças climáticas (e.q. acidificação dos oceanos, aumento da temperatura da superfície do mar e elevação do nível do mar) (SOARES, 2018; COSTA *et al.*, 2019; CAPITANI *et al.*, 2021). Compreendendo a importância na conservação de *hot spots* de biodiversidade e produtividade como o Atol das Rocas, esse capítulo tem como objetivo analisar os efeitos cumulativos de pressões globais, locais e regionais, e discutir projeções futuras de impacto para esse ecossistema, propiciando informações atualizadas e inéditas sobre os atuais impactos nessa área de grande importância biológica.

Figura 6 – Avaliação do percentual de efetividade da Reserva Biológica do Atol das Rocas entre 2018-2022.



Fonte: SAMGe (2023).

## 2 Materiais e métodos

Foi realizada uma análise qualitativa onde, por meio do levantamento bibliográfico, com combinações das palavras-chave “*Rocas Atoll*” e/ou “*Coral reefs*”, e/ou “*Ocean Islands*”, e/ou “*Marine heatwaves*”, e/ou “*Sea level rise*”, e/ou “*Marine debris*”, e/ou “*Microplastics*”, e/ou “*Exotic species*”, e/ou “*Non-indigenous Species*”, e/ou “*Invasive Species*”, foram utilizadas para triar os artigos publicados. Os mecanismos de pesquisa on-line acadêmicos utilizados foram *Google Scholar*, *Science Direct*, *Web of Science* e *Scopus*. Logo em seguida, os resultados foram separados em “Pressões globais” e “Pressões locais e regionais”. Um total de 104 publicações foram selecionadas, envolvendo artigos, *short communications*, capítulos de livro, dissertações e teses. Foram aceitos trabalhos publicados em língua inglesa e portuguesa, entre os anos de 2000 e 2023, em que 30 atenderam aos critérios estabelecidos.

O estresse térmico foi avaliado a partir de indicadores como temperatura da superfície do mar (TSM), anomalias da temperatura da superfície do mar (TSMa),

semana de aquecimento de graus (DHW), *marine heatwaves* (MHWs), média mensal máxima (MMM) e limiar de branqueamento (BT). Essas informações foram adquiridas através de séries temporais extraídas do Global Coral Reef Watch (NOAA) na estação de observação permanente de “Fernando de Noronha, Brazil”, cuja área também engloba a Reserva Biológica do Atol das Rocas (distantes cerca de 150 km). A TSMa é calculada a partir da diferença entre a TSM média, com base em valores prévios para determinada época do ano, onde um valor positivo indica que a temperatura está mais quente do que o esperado. Com aumento de 1 °C na MMM, um princípio de estresse associado à anomalia térmica positiva passa a prejudicar a funcionalidade dos organismos coralinos, obtendo-se, com isso, o BT. Já o DHW corresponde ao acúmulo de calor nas últimas 12 semanas (3 meses), medindo não só o quanto a temperatura está acima da MMM, mas quanto tempo ela permaneceu acima desse ponto. Quando o DHW atinge valores de 4 °C/week, é esperado um branqueamento significativo na área de cobertura (alerta nível 1), e quando se ultrapassa 8 °C/week, um evento de branqueamento severo e generalizado com altas taxas de mortalidade pode ser documentado (alerta nível 2). MHW é um indicador produzido a partir da temperatura diária da superfície do mar, com interpolação otimizada da NOAA, onde são adquiridos dados de frequência, duração e intensidade. Disponível em: <http://www.marineheatwaves.org/tracker.html>.

### **3 Resultados e discussões**

Os resultados foram subdivididos de acordo com as principais pressões a nível global (por exemplo, aumento da temperatura da superfície do mar e elevação do nível do mar), local e regional (petrechos de pesca, lixo e espécies exóticas) que afetam o Atol das Rocas e posteriormente agrupados em mapas sintéticos (fluxogramas de mapas mentais).

#### **3.1 Pressões globais**

Em razão da crescente tendência de aquecimento a nível global e maior absorção de calor pelos oceanos, episódios recorrentes de anomalia térmica positiva

têm gerado o aumento da TSM, como em consequência do El Niño oscilação Sul (ENOS) ou da ocorrência de MHWs (figura 10) (HUGHES *et al.*, 2018; OLIVER *et al.*, 2018; DALTON *et al.*, 2020; HOLBROOK *et al.*, 2020). Impactos resultantes desses eventos podem ocorrer em uma variedade de escalas de tempo, com algumas espécies apresentando efeitos após alguns dias e outras respondendo apenas após vários meses de temperaturas elevadas, além da duração do próprio evento (MAGRIS *et al.*, 2015). Nos corais, condições ambientais adversas geram um estresse oxidativo, cuja ruptura das relações fisiológicas com seus simbiossitos, dinoflagelados da família *Symbiodiniaceae*, sucede a um fenômeno conhecido como “branqueamento” (GLYNN, 1993). A previsão é de que, nas próximas décadas, o aumento na duração, frequência, intensidade e extensão espacial dessas condições possa levar a altos níveis de branqueamento e consequente aumento das taxas de mortalidade entre os corais, incluindo na costa brasileira (MAGRIS *et al.*, 2015).

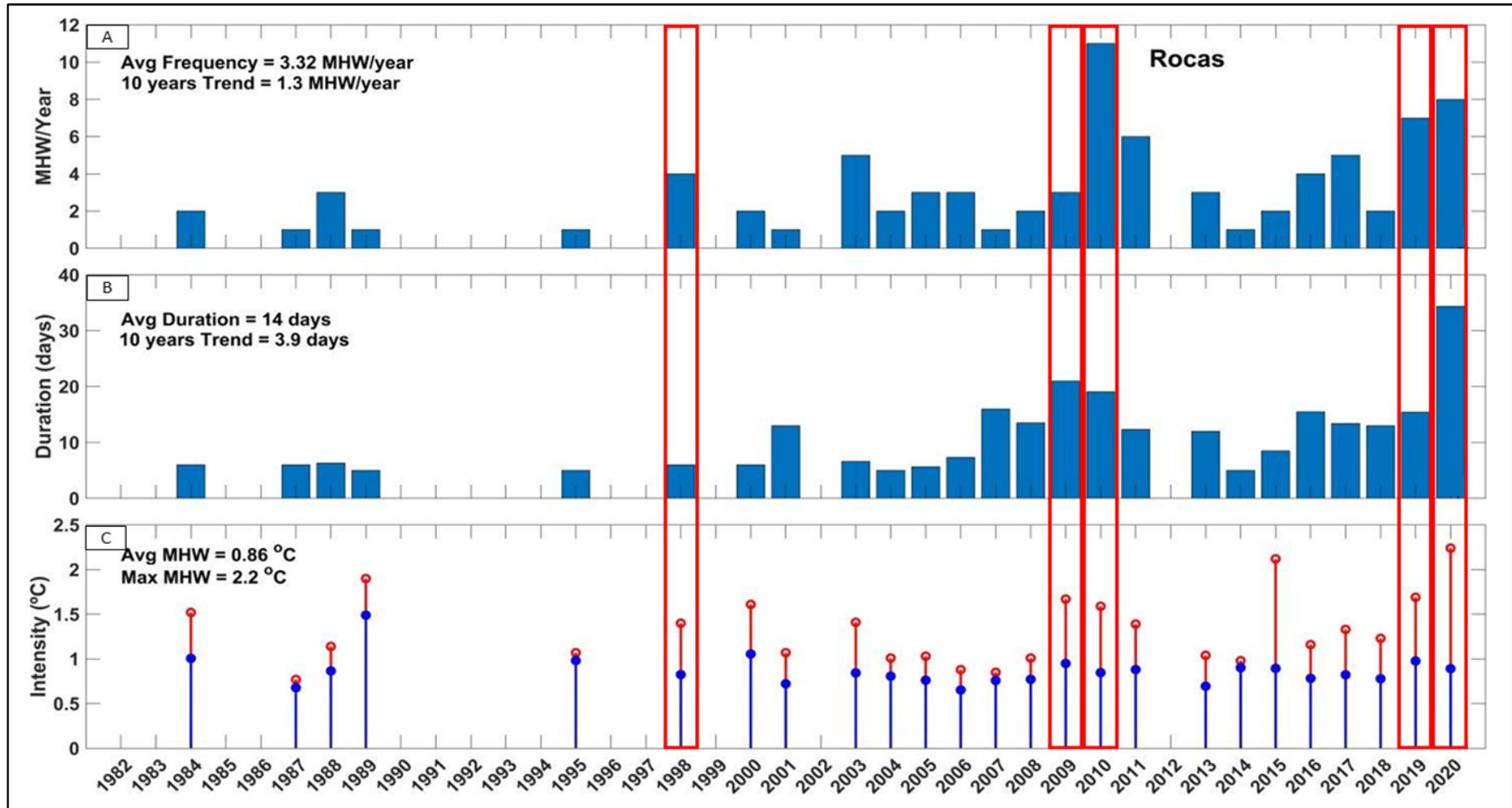
A comunidade coralina do Atol das Rocas tem sua dominância marcada por *Siderastrea stellata* (figura 5), uma espécie considerada resistente aos eventos positivos de anomalia térmica passados e atuais (TUNALA *et al.*, 2019; LONGO *et al.*, 2020). Nos últimos 40 anos, um aumento de 0.2 °C por década na TSM foi observado na área equivalente à Reserva Biológica do Atol das Rocas (SOARES *et al.*, (em publicação)), considerado como um dos maiores da costa brasileira devido sua localização na região equatorial (03°50'S, 33°49'W), onde a média de temperatura costuma ser mais elevada e sua variabilidade, ao longo do ano, mínima (KIKUCHI e LEÃO, 1997; COSTA *et al.*, 2019). Como resultado disso, projeções recentes do Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC), estimam que o coral *S. stellata* tenha sua biomassa consideravelmente reduzida e esteja ecologicamente extinto até o ano de 2075 em Rocas, sob os cenários RCP 4.5 e RCP 8.5, respectivamente (CAPITANI *et al.*, 2021). Por outro lado, essa espécie de coral pode ter ganhos de áreas em outras regiões subtropicais ao longo da costa brasileira, na busca por temperaturas mais amenas dentro de sua faixa de tolerância (PRINCIPE *et al.*, 2021).

Comparativamente, eventos de ENOS, como os ocorridos em 1998 e 2010 (figura 7), apresentam condições distintas de anomalia térmica na zona equatorial, resultando em um acúmulo de calor mais intenso ao longo do tempo (3.42 °C/week e 9.88 °C/week, respectivamente) (figura 8). Em 2010, por exemplo,

uma diferença significativa na frequência (11 eventos) e média de duração (19 dias) foi observada no Atol das Rocas, correspondendo a 8,5 vezes mais dias de MHWs que em 1998 (4 eventos com durabilidade média de 6 dias) (anexo I). Por outro lado, a predisposição crescente na ocorrência de MHWs nos últimos anos tem prolongado condições de temperatura mais severas (figura 7). Os anos de 2019 e 2020, em especial, se destacaram pelo considerável aumento da duração de MHWs (15,5 e 34 dias, respectivamente), com 2020 apresentando o maior DHW já registrado no Atol, 13.03 °C/week (figura 8). Sob essas condições, é seguro esperar, como resultado, consideráveis impactos sobre a biota residente do Atol, especialmente organismos sésseis como os corais. Estudos com a espécie *Siderastrea stellata* sob aumento da TSM foram registrados por Ferreira *et al.*, (2013) em 2010 e de Gaspar *et al.*, (2021) em 2016, 2017 e 2019 na reserva biológica do Atol das Rocas.

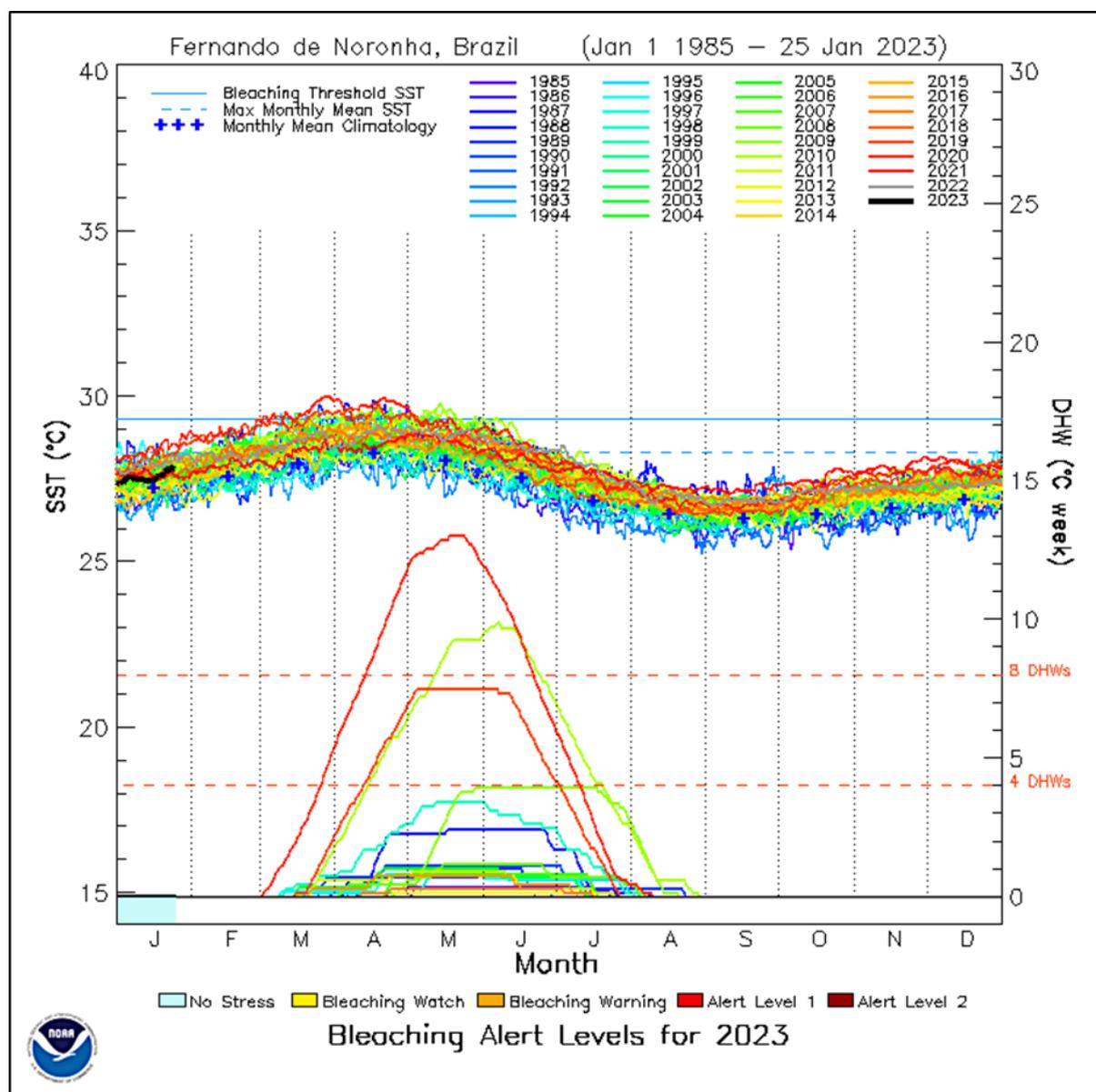
No estudo de Ferreira *et al.*, (2013), as temperaturas elevadas no ano de 2010 em decorrência do ENOS, desencadearam até 20% de branqueamento na espécie *Siderastrea stellata*, intensificando o surto de doenças que atingiram 60% das colônias. Após esse registro, Gaspar *et al.*, (2021) avaliaram as taxas de branqueamento e mortalidade da mesma espécie de coral (Figura 5) nos anos de 2016, 2017 e 2019. O estudo aponta, para o ano de 2019, uma maior durabilidade (31.5 dias) e intensidade de MHWs (até 1.5°C) e aumento da TSM (30.0°C), submetendo, dessa forma, os organismos a um estresse térmico prolongado, com taxas de branqueamento chegando a 88%. Essa taxa é 60 vezes maior se comparado ao ano de 2017, que chegou a apenas 1,52%, e a 11.71% de colônias branqueadas em 2016. Em ambos os estudos, apesar das altas taxas de branqueamento em 2010 e 2019, os índices de mortalidade permaneceram baixos com valores abaixo de 4% (GASPAR *et al.*, 2021). Devido a pandemia da COVID-19 em 2020 que provocou, como medida preventiva, o isolamento da população, expedições científicas ao Atol das Rocas foram canceladas durante esse período, portanto não há dados que informem se houve o branqueamento nas colônias de coral, embora se trate do ano de maior ocorrência de MHWs já registrado.

Figura 7 – Série histórica da variação anual das propriedades de *marine heatwaves* no período entre 1982 e 2020 no Atol das Rocas. A) Mostra a frequência de ocorrência (MHWs/ano); B) a média de variação de duração anual (dias) e C) a média de intensidade (linhas azuis) de MHW e a intensidade máxima (linhas vermelhas).



Fonte: Soares *et al.*, (dados não publicados).

Figura 8 – Série temporal da TSM e DHW para o período entre 1985 e 2022. A linha vermelha representando o ano de 2020 mostra um elevado e prolongado pico de calor acumulado acima de 8 °C/week, sob forte indício de branqueamento severo e generalizado na área.



Fonte: <https://coralreefwatch.noaa.gov> - NOAA Coral Reef Watch (2023).

Com a crescente elevação do nível do mar (HARARI *et al.*, 1994) e eventos extremos de ondas com alta energia, tipo *swell* (COSTA e SIEGLE, 2022), habitats únicos como os encontrados nas ilhas do Cemitério e do Farol no Atol das Rocas (Figura 4) apresentam uma grande vulnerabilidade a erosão e perda de habitats, visto o impacto que a inundação dessas áreas causaria nos processos de nidificação de tartarugas e aves marinhas (figura 10) (SEMINOFF, 2004;

SCHULZ-NETO, 2004). Além disso, será afetada a vegetação terrestre (Figura 9) e outras espécies permanentes, algumas endêmicas de ilhas oceânicas do Atlântico Sul (Trindade e Fernando de Noronha), como o caranguejo *Johngarthia lagostoma* (GODLEY *et al.*, 2009; COSTA *et al.*, 2019). Em estudo realizado por Garcia *et al.*, (2022), por meio de abordagem multi-temporal, foi possível observar um aumento de 19 km<sup>2</sup> para 70 km<sup>2</sup> na cobertura sedimentar interna nas ilhas arenosas do Atol, entre 2001 e 2019, respectivamente. Esse aumento de sedimentação ocorreu principalmente entre 2001-2002 e 2009-2010, anos associados a eventos de anomalia térmica (ENOS), conforme abordado. A pesquisa hipotetiza (GARCIA *et al.*, 2022) esse aumento à erosão e formação de sedimento de corais mortos em decorrência do estresse térmico. Contudo, segundo estudos anteriores (FERREIRA *et al.*, 2006, 2013; GASPAR *et al.*, 2021) não houve uma mortalidade significativa de corais após o branqueamento. Além disso, o sedimento é constituído, predominantemente, por alga calcária (SOARES *et al.*, 2011) o que denota que essa hipótese pode ser refutada.

A dinâmica interna que regula as características direcionais e energéticas do clima de ondas na laguna, assim como a deposição de sedimentos e estabilidade das ilhas, se dá pela morfologia do recife e pelo regime de marés (COSTA e SIEGEL, 2022). Em decorrência dos ventos alísios permanentes de sudeste, o clima de ondas predominante na região advém dessa mesma direção, sendo refratadas pela elevação da crista do recife à barlavento, com entrada na laguna pela passagem mais larga (figura 4) (COSTA *et al.*, 2019; COSTA e SIEGEL, 2022). Dessa forma, grande parte da energia da onda é dissipada, devido à fricção com o fundo rochoso, resultando em um clima interno de ondas mais homogêneo, com altura significativa da onda cerca de 60% menor, comparada ao ambiente *offshore* (COSTA e SIEGEL, 2022). Sob um regime mesotidal, o efeito das ondas é limitado tanto em área quanto em magnitude ao longo de um ciclo de maré, onde exerce forte influência sob a remobilização de sedimentos durante a maré alta, quando ondas mais energéticas penetram na laguna e a água cobre os limites das praias das ilhas do Farol e do Cemitério (COSTA e SIEGEL, 2022).

Por estar localizada próxima à região equatorial, esta região está exposta a um regime de ondas geradas por ventos distantes (*swell*) em ambos os hemisférios (INNOCENTINI *et al.*, 2005), não havendo, porém, nenhuma indicação

de direção predominante desses eventos extremos (COSTA e SIEGLE, 2022). Num contexto de elevação do nível do mar, considerando a parte mais baixa da formação recifal à sotavento (figura 4), o período de incidência de onda tipo *swell* de direção norte é o que apresenta maior modificação na localização das ilhas, segundo projeções de RCP realizadas por Costa *et al.*, (2019), devido a diferenças no padrão de dissipação de energia da onda pela irregularidade da morfologia recifal. Por outro lado, eventos extremos de direção sul que afetam diretamente a borda sudeste do atol (barlavento) podem contribuir para o desprendimento e remobilização de frações grosseiras do recife e a disponibilidade de sedimentos (COSTA e SIEGLE, 2022). Essa talvez seja a causa mais provável para o aumento da cobertura sedimentar documentada por Garcia *et al.*, (2022).

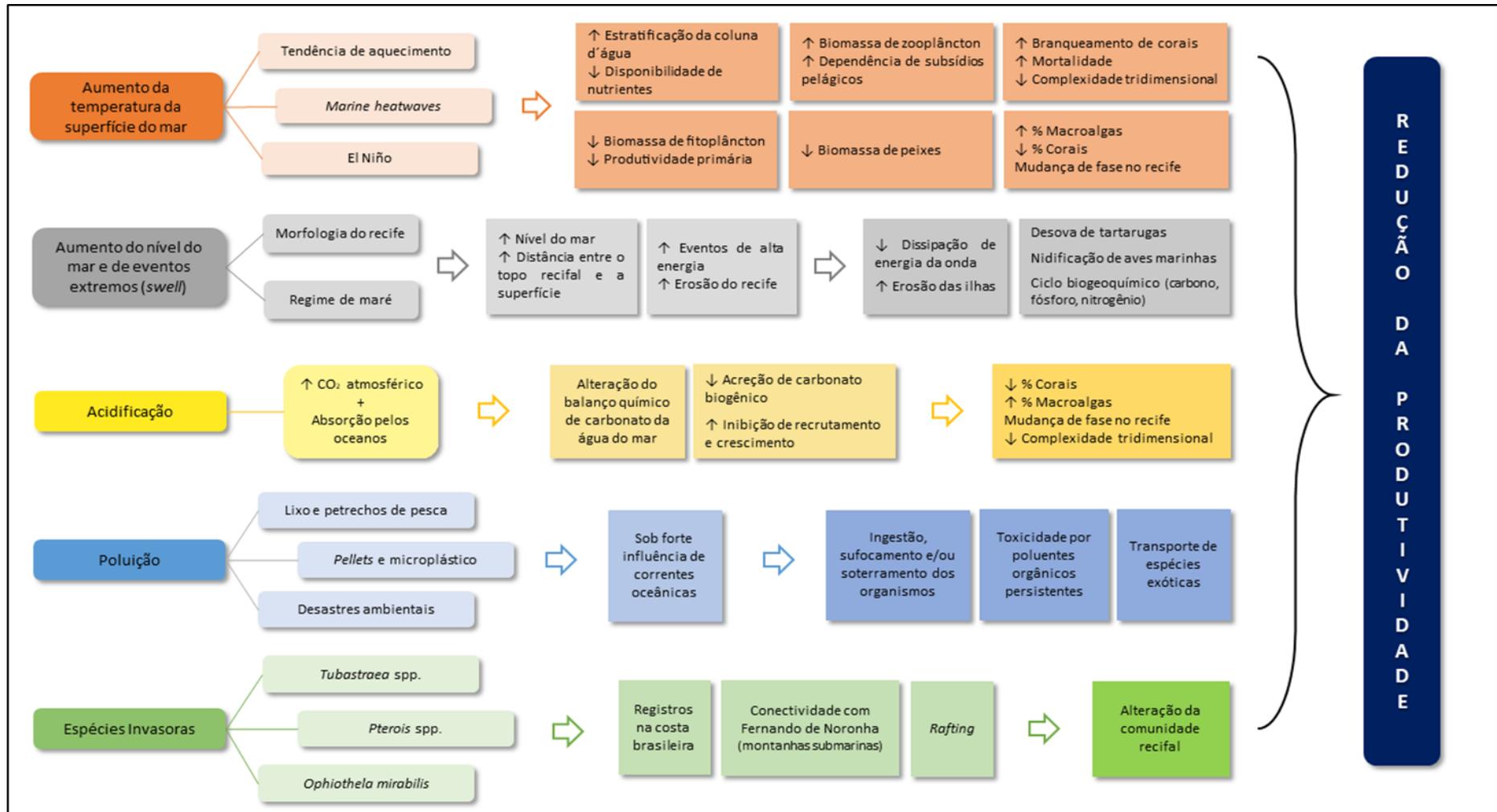
De ano para ano e de um lugar para outro, mudanças na circulação oceânica e no vento podem levar a mudanças locais no nível do mar (IPCC, 2022). Taxas elevadas de erosão na costa se dão em decorrência do aumento da distância entre o topo recifal e a superfície do mar pelo aumento da profundidade, levando a uma redução dos mecanismos de dissipação de energia da onda e consequente deposição de sedimento (HEBERGER *et al.*, 2009; COSTA *et al.*, 2017; 2019). Algas calcárias crostosas, principal constituinte da estrutura do atol, podem ser resistentes ao aquecimento da água do mar, mesmo sob as condições mais pessimistas do IPCC (CORNWALL *et al.*, 2019), contudo, o aumento da frequência de eventos extremos tipo *swell* conferem grande impacto sobre a resiliência e permanência desses ambientes. Dessa forma, Soares (2009) destaca a necessidade de estudos que quantifiquem as taxas de processos biogeomorfológicos ocorrentes na estrutura biogênica da reserva a fim de agregar aos modelos de projeção do nível do mar a capacidade de acreção dos organismos construtores do recife.

Figura 9 – Vegetação insular de gramíneas adaptadas a solos salinos com grande presença de aves na ilha do Farol no Atol das Rocas (Atlântico Sul, Brasil) a qual é sujeita a eventos de inundação por ondas de alta energia e elevação do nível do mar.



Fonte da imagem: Marcelo Soares.

Figura 10 – Fluxograma das pressões globais, locais e regionais que afetam o Atol das Rocas.

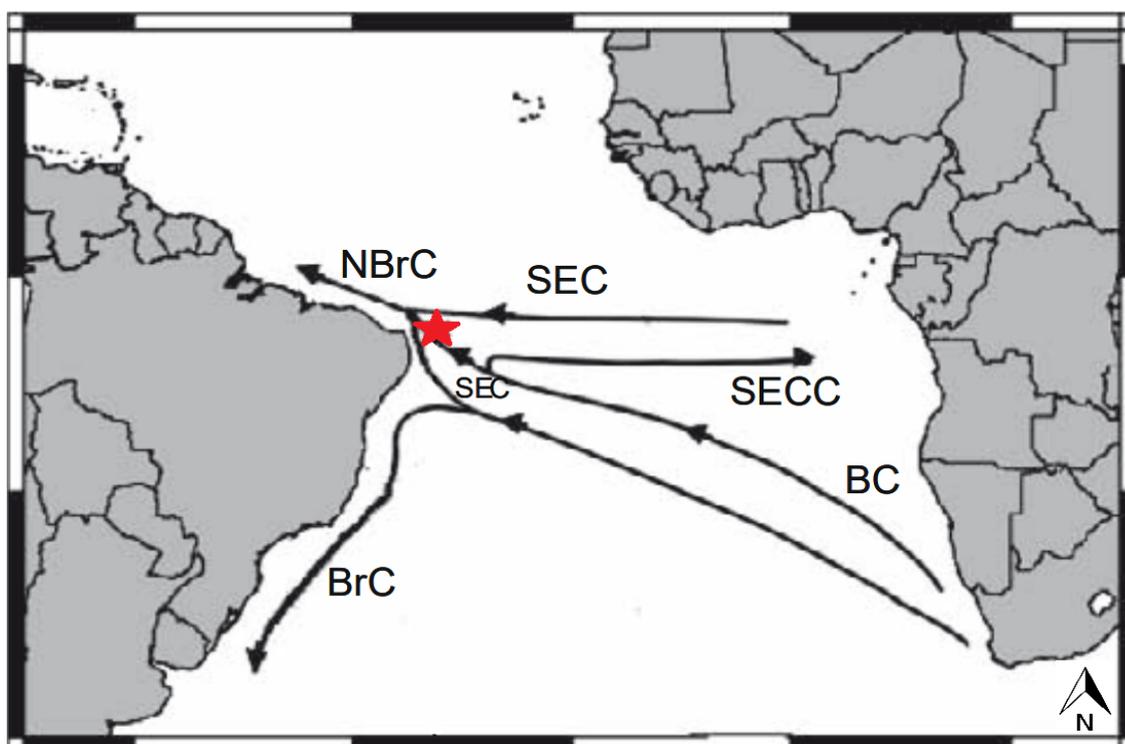


Fonte: Elaborado com base nos trabalhos de Soares *et al.*, (2011); Costa *et al.*, (2019); Capitani *et al.*, (2021); Monteiro *et al.*, (2021); Gaspar *et al.*, (2021); Luiz *et al.*, (2021); Derviche *et al.*, (2021).

### 3.2 Pressões locais e regionais

Mesmo com a baixa incidência de pressões a nível regional e local, a reserva biológica do Atol das Rocas é, apesar de sua localização geográfica isolada, um sistema oceânico sob forte influência de correntes marítimas, com destaque especial para a Corrente Sul Equatorial (SEC), que flui de leste para oeste, assim como da Corrente Norte Brasileira (NBrC), que flui para norte (figura 11) (KIKUCHI, 2002; LUMPKIN e GARZOLI, 2005; CIRANO *et al.*, 2006; TESCHIMA *et al.*, 2016). Por pertencerem à mesma cadeia de montanhas submarinas (ALMEIDA, 1955), o atol também é influenciado pela conectividade da circulação oceânica que advém do Arquipélago de Fernando de Noronha, distante cerca de 150 km na direção leste (SOARES *et al.*, 2010; TCHAMABI *et al.*, 2017, 2018). Dessa forma, ambientes insulares, como o Atol e o Arquipélago, são bastante suscetíveis à introdução de detritos e poluentes (tabela 2), assim como de espécies exóticas, transportados por longas distâncias na área tropical entre a África e o Brasil sob influência de correntes oceânicas e ventos fortes (figura 10) (IVAR DO SUL *et al.*, 2018).

Figura 11 – Sistema de correntes oceânicas do Atlântico Sul, com destaque (estrela vermelha) para a área correspondente ao Atol das Rocas.



Fonte: Adaptado de Ivar do Sul *et al.*, (2009).

Tabela 2 – Casos documentados de detritos encontrados no Atol das Rocas (AR) e no Arquipélago de Fernando de Noronha (FN).

Ano	Local	Tipo	Trabalho
1996-2011	AR e FN	Redes de pesca	Santos <i>et al.</i> , (2012)
2008	FN	Microplástico	Ivar do Sul <i>et al.</i> , (2009)
2009	AR	Resíduos sólidos	Soares <i>et al.</i> , (2011)
2011-2013	FN	Microplástico	Ivar do Sul <i>et al.</i> , (2014)
2011-2013	FN	Microplástico	Ivar do Sul <i>et al.</i> , (2017)
2014	AR	Resíduos sólidos	Santos e Reimer (2018)
2016-2018	FN	Resíduos sólidos	Grillo e Mello (2021)
	FN	Microplástico	Monteiro <i>et al.</i> , (2020)
2019	FN	Microplástico	Carvalho <i>et al.</i> , (2021)
2021	FN	Resíduos sólidos e óleo	Magalhães <i>et al.</i> , (2021)
2021	FN	Óleo	Bastos <i>et al.</i> , (2022)

Fonte: Elaborada pela autora.

Por se tratar de um destino com alto influxo turístico, muitas são as precauções que cercam o Arquipélago de Fernando de Noronha, que em 2022 bateu recorde de visitação, com cerca de 130.000 pessoas (ICMBio, 2023). Visto o alto impacto ambiental de resíduos plásticos no ambiente marinho, em 2019 entrou em vigor o Decreto Distrital 02/2018, que proíbe a entrada, o uso e a comercialização de descartáveis plásticos de uso único em Fernando de Noronha (Diário de Pernambuco, 2019). Contudo, estudos prévios indicam que a maior parte dos resíduos plásticos coletados em Noronha são encontrados na área de barlavento, parte do Parque Nacional Marinho, portanto, área sem acesso aos turistas e habitantes da ilha (GRILLO e MELLO, 2021). Esses dados, associados ao conteúdo identificado de embalagens com rótulos em língua estrangeira em estados de decomposição precoce (SOARES *et al.*, 2011; GRILLO e MELLO, 2021), sugerem que a maior parte do lixo marinho nas margens da ilha possa vir de outros lugares, influenciada pela exposição a ventos e correntes oceânicas (IVAR DO SUL *et al.*, 2018).

Casos recentes, como o documentado por Magalhães *et al.*, (2022), trouxeram luz à vulnerabilidade do Arquipélago a eventos agudos como o ocorrido em 2021, que culminou na retirada de 1.3 toneladas de resíduos plásticos da faixa de areia à barlavento da ilha, além de manchas de óleo (BASTOS *et al.*, 2022). Os detritos marinhos ameaçam gravemente a vida selvagem marinha (SHEAVLY e REGISTER, 2007), pois podem enredar e/ou ser ingeridos por organismos como mamíferos, peixes, aves marinhas e tartarugas, afetando sua aptidão, reprodução e sobrevivência (KÜHN *et al.*, 2015). No caso dos microplásticos, essas partículas podem estar biodisponíveis para organismos em todos os níveis tróficos e têm a capacidade de absorver produtos químicos tóxicos da água circundante, como poluentes orgânicos persistentes (POPs) e metais pesados (AUTA *et al.*, 2017). Quando ingeridos, podem afetar gravemente a saúde dos organismos, causando danos físicos e químicos (ou seja, danos ao trato gastrointestinal, interrupção dos principais processos fisiológicos e distúrbios comportamentais), potencialmente perturbando os ecossistemas naturais (KHALID *et al.*, 2021).

O desastre ambiental de derramamento de óleo que acometeu o litoral brasileiro nos anos de 2019 e 2020 não atingiu o Arquipélago de Fernando de Noronha (SOARES *et al.*, 2022). Contudo, em 2021 novas manchas apareceram no litoral de Noronha, onde, apesar de rapidamente removidas pela população, atingiram áreas de difícil acesso, como os bancos de rodolitos, pradarias de seagrass, além do único mangue de ambiente insular do Atlântico Sul (MAGALHÃES *et al.*, 2022). A extensão dos danos ecológicos aos serviços ecossistêmicos e à biodiversidade ainda precisa ser acessada e monitorada (MAGALHÃES *et al.*, 2022). Investigações geoquímicas (BASTOS *et al.*, 2022) demonstraram que, apesar dos recentes eventos, o óleo derramado em Fernando de Noronha em 2021 não é o mesmo óleo do grande desastre ocorrido no Brasil em 2019/2020 (OLIVEIRA *et al.*, 2020).

Detritos marinhos, como plásticos e pedaços de madeira, flutuam e podem ser usados como substratos e vetores de dispersão por uma infinidade de espécies marinhas não nativas (GREGORY, 2009; KIESSLING *et al.*, 2015). Dentre esses casos, o coral sol (*Tubastraea* spp.) com sua capacidade de fixação (*rafting*), juntamente com o uso da navegação local como vetor secundário (CREED *et al.*, 2017a), modos reprodutivos paralelos (partenogênese, resgate de pólipos e extrema

capacidade de regeneração) qualificam esse coral como potencial expansionista dentro de suas faixas não nativas até o Atol das Rocas (MANTELLATO *et al.*, 2020). A dispersão através da incrustação em boias e plataformas de gás (NATÁLIO *et al.*, 2022) e em lixo marinho (MANTELLATO *et al.*, 2020), tornam o porto presente no Arquipélago Fernando de Noronha, um potencial vetor na introdução dessa espécie. Seus registros mais recentes ocorreram na costa do Ceará (SOARES *et al.*, 2016, 2020; BRAGA *et al.*, 2021), no litoral de Pernambuco (MIRANDA *et al.*, 2021) e no estado do Rio Grande do Norte.

O peixe leão *Pterois* spp. também apresenta alto risco de introdução no Atol das Rocas, especialmente devido a relatos prévios da presença do peixe em Fernando de Noronha, podendo se locomover através dos montes submarinos e das correntes oceânicas que ligam as duas localidades. A possível chegada do peixe leão ao atol ameaça a existência de espécies endêmicas da região insular, incapazes de competir por recursos devido à ampla variedade alimentar, eficiência de predação, alta fecundidade, crescimento rápido, resistência a parasitas e ausência de predadores (CÔTÉ e SMITH, 2018), que podem garantir o sucesso do peixe leão como espécie invasora.

Outra espécie sob risco de invasão no Atol das Rocas, é a do ofiuróide *Ophiothela mirabilis*, uma espécie exótica e epizóica, normalmente presente nos ramos de octocorais, também registrada na costa do Ceará e de Pernambuco (DERVICHE *et al.*, 2021). Esses organismos estão presentes em diversos pontos, desde a região de Santa Catarina até o estado da Flórida, nos Estados Unidos da América (EUA) (DERVICHE *et al.*, 2021). A alta capacidade de disseminação e a manutenção de abundâncias densas nos hospedeiros levantam questões sobre seus efeitos na biodiversidade e nos sistemas receptores (DERVICHE *et al.*, 2021) com impactos negativos ainda em debate (GLYNN *et al.*, 2021a, b), estes que incluem a obstrução de estruturas de alimentação e extensão de pólipos, a restrição do fluxo de água ou a ter suas forças de arrasto aumentadas (MANTELLATO *et al.*, 2016).

## Conclusões e considerações finais

Por conta de sua alta relevância econômica e ecológica, a maioria dos estudos conduzidos na unidade de conservação de proteção integral Reserva Biológica do Atol das Rocas tem como objetivo analisar os impactos de pressões em decorrência das mudanças climáticas. Contudo, pouco se sabe sobre os impactos a nível cumulativo, da mesma forma que é escasso o conteúdo quanto às pressões locais e regionais no atol. Modelagens de projeções futuras, normalmente, se restringem aos cenários de aumento da TSM e elevação do nível do mar (CAPITANI *et al.*, 2021 e COSTA *et al.*, 2019; respectivamente). Sob o crescente impacto de MHWs, o aumento da duração desses eventos parece ser o fator determinante no acúmulo de energia térmica na água do mar, embora a frequência também atue de forma significativa, especialmente nas últimas duas décadas. Não há, até o presente momento, dados a respeito da capacidade de acreção da estrutura biogênica recifal e sua consequente capacidade de prestação dos serviços ecossistêmicos. Soares (2009) ressalta a importância da realização de estudos que quantifiquem as taxas de processos biogeomorfológicos ocorrentes no Atol das Rocas. As correntes oceânicas representam um forte fator de risco na introdução de espécies exóticas no Atol, uma vez que transporta uma grande quantidade de lixo marinho, além da conectividade com o sistema oceânico do Arquipélago de Fernando de Noronha, o qual já registro para ocorrência do peixe leão *Pterois* spp. Compreender essas pressões e o efeito cumulativo que causam ao ambiente, mesmo em uma reserva protegida como o Atol das Rocas, é importante para discutir possíveis projeções futuras de impacto para esse ecossistema.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M. **Geologia e Petrologia do Arquipélago de Fernando de Noronha. Rio de Janeiro: Departamento Nacional de Produção Mineral/ Departamento de Geologia e Mineralogia, DNPM/DGM, 1955, 181p. (relatório, 13).**

ALTIERI, A. H.; HARRISON, S. B.; SEEMANN, J.; COLLIN, R.; DIAZ, R. J.; KNOWLTON, N. **Tropical dead zones and mass mortalities on coral reefs.** 114 (14) 3660-3665. 2017. <https://doi.org/10.1073/pnas.1621517114>

ANDERSON, T. R., HAWKINS, E. D.; JONES, P. D. **CO<sub>2</sub>, the greenhouse effect and global warming: from the pioneering work of Arrhenius and Callendar to today's Earth System Models.** Endeavour, Volume 40, Issue 3, 2016, Pages 178-187, ISSN 0160-9327, <https://doi.org/10.1016/j.endeavour.2016.07.002>.

AUTA, H. S.; EMENIKE, C. U.; FAUZIAH, S. H. **Screening of Bacillus strains isolated from mangrove ecosystems in Peninsular Malaysia for microplastic degradation.** Environmental Pollution, vol 231, Part 2, 2017, pp. 1552-1559. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2017.09.043>.

BARROSO, C.X., LOTUFO, T.M.C., BEZERRA, L.E.A., MATTHEWS-CASCON, H., 2016. **A biogeo-graphic approach to the insular marine prosobranch gastropods from the southwestern Atlantic Ocean.** J. Molluscan Stud. 82, 558–563. <http://dx.doi.org/10.1093/mollus/eyw015>.

BARRY, S.J.; COWELL, P.J.; WOODROFFE, C.D. **A morphodynamic model of reef-island development on atolls.** Sedimentary Geology, v.197, p.47-63, 2007.

BASTOS, L.P.H.; CAVALCANTE, D.C.; ALFERES, C.L.F.; SILVA, D.B.N.; FERREIRA, L.O.; RODRIGUES, R.; PEREIRA, E. **Fingerprinting an oil spill event (August of 2021) in the oceanic Fernando de Noronha archipelago using biomarkers and stable carbon isotopes.** Marine Pollution Bulletin, (2022), 185. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2022.114316.

BINDOFF, N.L., *et al.*, 2019a: **Changing Ocean, Marine Ecosystems, and Dependent Communities.** In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. [Pörtner, H.-O., D. C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. S. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama and N. Weyer (eds.)](In press).

BRAGA, M. D. A.; PAIVA, S. V. ; GURJÃO, L.M ; TEIXEIRA, C. E. P. ; GURGEL, A. L. A. R. ; PEREIRA, P. H. C. ; SOARES, M. O. **Retirement risks: Invasive coral on old oil platform on the Brazilian equatorial continental shelf.** MARINE POLLUTION BULLETIN, v. 165, p. 112156, 2021.

BRYAN, E.H., 1953. **Check list of atolls.** Atoll Res. Bull. 19, 1–38

BURT, J.A., CAMP, E.F., ENOCHS, I.C., JOHANSEN, J.L., MORGAN, K.M., RIEGL, B., HOEY, A.S., 2020. **Insights from extreme coral reefs in a changing world.** Coral Reefs 39, 495–507. <https://doi.org/10.1007/s00338-020-01966-y>.

CAMP, E.F., SCHOEPF, V., MUMBY, P.J., HARDTKE, L.A., RODOLFO-METALPA, R., SMITH, D.J., SUGGETT, D.J., 2018. **The future of coral reefs subject to rapid climate change: lessons from natural extreme environments.** *Front. Mar. Sci.* 5, 1–21. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00004>.

CANADELL, J.G., *et al.*, 2021: **Global Carbon and other Biogeochemical Cycles and Feedbacks.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

CAPEL, K.C.C.; CREED, J.C.; KITAHARA, M.V. **Invasive corals trigger seascape changes in the southwestern Atlantic.** *BULLETIN OF MARINE SCIENCE*, v. 96, p. 217-218, 2020. <https://doi.org/10.1007/s11270-014-2004-z>

CAPITANI, L.; DE ARAÚJO, J. N.; VIEIRA, E. A.; ANGELINI, R.; LONGO, G. O. (2021) **Ocean Warming Will Reduce Standing Biomass in a Tropical Western Atlantic Reef Ecosystem.** *Ecosystems*. DOI: 10.1007/s10021-021-00691-z.

CAPOTONDI, A., *et al.*, 2012: **Enhanced upper ocean stratification with climate change in the CMIP3 models.** *J. Geophys. Res. Oceans*, 117(C4), doi:10.1029/2011jc007409.

CARVALHO, J.P.S.; SILVA, T.S.; COSTA, M.F. **Distribution, characteristics and short-term variability of microplastics in beach sediment of Fernando de Noronha Archipelago, Brazil.** *Marine Pollution Bulletin*, (2021), 166. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112212.

CIRANO, M.; MATA, M. M.; CAMPOS, E. J. D.; DEIRÓ, N. F. R. 2006. **A Circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação global OCCAM.** *Revista Brasileira de Geofísica*, 24, 209-230.

COHEN, A.L.; HOLCOMB, M. 2009. **Why corals care about ocean acidification: Uncovering the mechanism.** *Oceanography*, 22(4):118-127.

CORNWALL, C.E.; REVILL, A.T.; HALL-SPENCER, J.M.; MILAZZO, M.; RAVEN, J.A.; HURD, C.L. **Inorganic carbon physiology underpins macroalgal responses to elevated CO<sub>2</sub>.** *Scientific Reports*, (2017), 7. DOI: 10.1038/srep46297.

COSTA, M.B.; MACEDO, E.C.; SIEGLE, E. **Wave refraction and reef island stability under rising sea level.** *Global and Planetary Change* 172 (2019) 256–267. DOI: 10.1016/j.gloplacha.2018.10.015.

COSTA, M.B., MACEDO, E.C., VALLE-LEVINSON, A., SIEGLE, E., 2017. **Wave and tidal flushing in a near-equatorial mesotidal atoll.** *Coral Reefs* 36, 277–291. <https://doi.org/10.1007/s00338-016-1525-x>.

COSTA, M.B.; SIEGLE, E. **Wave climate and extremes on a mesotidal atoll lagoon.** *Ocean and Coastal Research*, (2022), 70. DOI: 10.1590/2675-2824070.22033mbc.

COSTANZA, R.; GROOT, R.; SUTTON, P.; SANDER, V. D. P.; ANDERSON, S. J.; KUBISZEWSKI, I.; FARBER, S.; TURNER, R. K. **Changes in the global value of ecosystem services.** *Global Environmental Research* 26 (2014) 152-158. <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

CÔTÉ, I.M., SMITH, N.S. (2018) **The lionfish *Pterois* sp. invasion: Has the worst-case scenario come to pass?** *J Fish Biol* 92:660–689. <https://doi.org/10.1111/jfb.13544>

CREED, J.C., FENNER, D., SAMMARCO, P., CAIRNS, S., CAPEL, K., JUNQUEIRA, A.O.R., CRUZ, I., MIRANDA, R.J., CARLOS-JÚNIOR, L., MANTELLATO, M.C., OIGMAN-PSZCZOL, S., 2017. **The invasion of the azooxanthellate coral *Tubastraea* (Scleractinia: Dendrophylliidae) throughout the world: history, pathways and vectors.** *Biol. Invasions* 19 (1), 283–305. <http://dx.doi.org/10.1007/s10530-016-1279-y>.

DALTON, S. J.; CARROLL, A. G.; SAMPAYO, E.; ROFF, G.; HARRISON, P. L.; ENTWISTLE, K.; HUANG, Z.; SALIH, A.; DIAMOND, S. L. **Successive marine heatwaves cause disproportionate coral bleaching during a fast phase transition from El Niño to La Niña.** *Science of the Total Environment* 715 (2020) 136951. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136951>.

DERVICHE, P.; SAUCSEN, A.; SPIER, D.; LANA, P. **Distribution patterns and habitat suitability of the non-native brittle star *Ophiothela mirabilis* Verrill, 1867 along the Western Atlantic.** *Journal of Sea Research* 168 (2021) 101994. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2020.101994>.

DICKINSON, W.R. **Impacts of eustasy and hidro-isostasy on the evolution and landforms of Pacific atolls.** *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, v. 213, p. 251-269, 2004.

ECHEVERRÍA, C.A.; PIRES, D.O. **Cnidarians of the Atol das Rocas.** In: PROC. 8TH. INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, Proceedings...Panamá:PICRS. 1997, v.1, p. 443- 446.

FERREIRA, B. P., COSTA, M. B. S. F., COXEY, M. S., GASPAR, A. L. B., VELEDA, D., ARAÚJO, M. 2013. **The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic.** *Coral Reefs*, v.32, n. 2, p.441-454.

FERREIRA, B.P.; MAIDA, M.; CASTRO, C.B.; PIRES, D.O.; D'AMICO, T.M.; PRATES, A.P.L.; MARX, D. **The Status of Coral Reefs in Brazil.** *Proceedings of 10th International Coral Reef Symposium*, 1011-1015 (2006).

FOX-KEMPER, B., et al., 2021: **Ocean, Cryosphere and Sea Level Change.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press

FU, W.W., RANDERSON, J.T.; MOORE, J.K. 2016: **Climate change impacts on net primary production (NPP) and export production (EP) regulated by increasing stratification and phytoplankton community structure in the CMIP5 models.** *Biogeosciences*, 13(18), 5151–5170, doi:10.5194/bg-13-5151-2016.

GARCIA, K.B.L.; GOMESA, M.P.; VITALA, H.; ANGULO, R.J.; SOUZA, M.C.; CARONC, F.; ROSA, M.L.C.C.; FERREIRA, A.L.; RIBEIRO, C.V.A. **Modern sedimentation and morphology of the Rocas Atoll shelf, and the role of Quaternary sea-level changes.** *Regional Studies in Marine Science*, (2022), 102354, 53. DOI: 10.1016/j.rsma.2022.102354.

GASPAR, T. L.; QUIMBAYO, J. P.; OZEKOSKI, R.; NUNES, L. T.; AUED, A. W.; MENDES, T. C.; GARRIDO, A. G.; SEGAL, B. **Severe coral bleaching of *Siderastrea stellata* at the only atoll in the south atlantic driven by sequential marine heatwaves.** *Biota Neotropica* 21(2):e20201131, 2021. DOI: 10.1590/1676-0611-bn-2020-1131.

GLYNN, P. W.; COFFMAN, B.; DETTLOFF, K.; DOMINGUEZ, J.; GILLETTE, P. R.; MARTINEZ, N.; JONES, N. P.; RIEGL, B. M. **Non-native brittle star interactions with native octocoral epizoots: an endemic benthic ctenophore in peril?** *Marine Biology* (2021b) 168:142 <https://doi.org/10.1007/s00227-021-03927-7>.

GLYNN, P. W.; GILLETTE, P. R.; DETTLOFF, K.; DOMINGUEZ, J.; MARTINEZ, N.; GROSS, J.; RIEGL, B. M. (2021a) **Experimental evidence of minimal effects on octocoral hosts caused by the introduced ophiuroid *Ophiothela mirabilis*.** *Coral Reefs*, vol. 40 (2) 323-334. <https://doi.org/10.1007/s00338-021-02067-0>.

GLYNN, P.W. **Coral reef bleaching: ecological perspective.** *Coral Reefs*, v.12, p. 1-17, 1993.

GODLEY, B.J., SAUNDERS, K.E., HARTNOLL, R.G., BRODERICK, A.C., 2009. **Population Structure of the Land Crab *Johngarthia Lagostoma* on Ascension Island.** *J. Crustac. Biol.* 29, 57–61. <https://doi.org/10.1651/08-2992.1>.

GRAHAM, N. A. J., & NASH, K. L. 2013. **The importance of structural complexity in coral reef ecosystems.** *Coral Reefs*, v.32, n. 2, p.315-326.

GREGORY, J.M. *et al.*, 2019: **Concepts and Terminology for Sea Level: Mean, Variability and Change, Both Local and Global.** *Surveys in Geophysics*, 40(6), 1251–1289, doi:10.1007/s10712-019-09525-z.

GRILLO, A.C.; MELLO, T.J. **Marine debris in the Fernando de Noronha Archipelago, a remote oceanic marine protected area in tropical SW Atlantic.** *Marine Pollution Bulletin*, (2021), 164. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2021.112021.

GULEV, S.K., et al., 2021: **Changing State of the Climate System.** In: *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.* [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S. L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M. I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J. B. R. Matthews, T. K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press.

HARARI, J., CAMARGO, R., GORDON, M. 1994. **On tides and mean sea level of Recife (83.3'S 34 51.9'W) and Belem (1 26.2'S 48 29.6'W)**. Afro-America Gloss News, Global Sea Level Observing System 1(2). (<http://www.mares.io.usp.br/aagn/ind.html>).

HEBERGER, M., COOLEY, H., HERRERA, P., GLEICK, P.H., MOORE, E., 2009. **The impacts of sea level rise on the california COAST** prepared by: California climate change center.

HOBDDAY, A.J., *et al.*, 2016a: **A hierarchical approach to defining marine heatwaves**. Prog. Oceanogr., 141, 227–238, doi:10.1016/j.pocean.2015.12.014.

HOLBROOK, N.J. *et al.* (2020) **Keeping pace with marine heatwaves**. Nat. Rev. Earth Environ.1, 482–493.

HUANG, W.; CHEN, M.; SONG, B.; DENG, J.; SHEN, M.; CHEN, Q.; ZENG, G.; LIANG, J. **Microplastics in the coral reefs and their potential impacts on corals: A mini-review**. Science of the Total Environment 762 (2021) 143112.

HUGHES, T.P., ANDERSON, K.D., CONNOLLY, S.R., HERON, S.F., KERRY, J.T., LOUGH, J.M., BAIRD, A.H., BAUM, J.K., BERUMEN, M.L., BRIDGE, T.C., CLAAR, D.C., EAKIN, C.M., GILMOUR, J.P., GRAHAM, N.A.J., HARRISON, H., HOBBS, J.P.A., HOEY, A.S., HOOGENBOOM, M., LOWE, R.J., MCCULLOCH, M.T., PANDOLFI, J.M., PRATCHETT, M., SCHOEPF, V., TORDA, G., WILSON, S.K., 2018. **Spatial and temporal patterns of mass bleaching of corals in the Anthropocene**. Science (80- 359, 80–83). <https://doi.org/10.1126/science.aan8048>.

HUGHES, T.P., BARNES, M.L., BELLWOOD, D.R., CINNER, J.E., CUMMING, G.S., JACKSON, J.B.C., KLEYPAS, J., VAN DE LEEMPUT, I.A., LOUGH, J.M., MORRISON, T.H., PALUMBI, S.R., VAN NES, E.H., SCHEFFER, M., 2017. **Coral reefs in the anthropocene**. Nature 546, 82–90. <https://doi.org/10.1038/nature22901>.

INNOCENTINI, V., ARANTES, F. O., FERREIRA, R. J. & MI-CHELETO, R. G. 2005. **A agitação marítima no litoral Nordeste do Brasil associada aos distúrbios africanos de leste**. Revista Brasileira de Meteorologia, 20(3), 367-374.

IPCC 2013: **The Physical Science Basis**. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change Cambridge, UK and New York, USA, 1552 pp. (2013).

IPCC, 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. Cambridge University Press. Cambridge University Press, Cambridge, UK and New York, NY, USA, 3056 pp., doi:10.1017/9781009325844.

IVAR DO SUL, J.A.; COSTA, M. F.; FILLMANN, G. **Microplastics in the pelagic environment around oceanic islands of the Western Tropical Atlantic Ocean**. Water, Air and Soil Pollution, v. 225, p. 2004, 2014.

IVAR DO SUL, J.A.; COSTA, M. F.; FILLMANN, G. **Occurrence and characteristics of microplastics on insular beaches in the Western Tropical Atlantic Ocean.** PeerJ. 2017. DOI: 10.7287/peerj.preprints.2901v1

IVAR do SUL, J.A.; SPENGLER, A.; COSTA, M.F. **Here, there and everywhere. Small plastic fragments and pellets on beaches of Fernando de Noronha (Equatorial Western Atlantic).** Marine Pollution Bulletin, v. 58, p. 1229-1244, 2009.

IVAR DO SUL, J.A.; TAGG, A.S.; LABRENZ, M. **Exploring the common denominator between microplastics and microbiology: a scientometric approach.** SCIENTOMETRICS, v. 117, p. 2145-2157, 2018.

KHALID, N., AQEEL, M., NOMAN, A., HASHEM, M., MOSTAFA, Y.S., ALHAITHLOUL, H.A.S., ALGHANEM, S.M., 2021. **Linking effects of microplastics to ecological impacts in marine environments.** Chemosphere 264, 128541. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.128541>.

KIKUCHI RKP; LEÃO ZMAN. 1997. **Rocas (Southwestern Equatorial Atlantic, Brazil): na atoll built primarily by coralline algae.** in: INT. CORAL REEF SYM, 8th, Panama 1: 731-736.

KIKUCHI, R.K.P. (2002) - **Atol das Rocas, Litoral do Nordeste do Brasil - Único atol do Atlântico Sul Equatorial Ocidental.** In: Schobbenhaus, C., Campos, D.A., Queiroz, E.T., Winge, M. & Berbert-Born, M.L.C. (eds.), Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil, pp.379-390, DNPM/CPRM, Brasília, DF, Brasil. <http://vsites.unb.br/ig/sigep/sitio033/sitio033.pdf>

KÜHN, S.; REBOLLEDO, E.L.B.; van FRANEKER, J.A. **Deleterious Effects of Litter on Marine Life** (2015) pp 75-116 In: Bergmann, M., Gutow, L., and Klages, M. (eds). Marine Anthropogenic Litter. Springer, Berlin. DOI:10.1007/978-3-319-16510-3\_4

KWIATKOWSKI, L., et al., 2020: **Twenty-first century ocean warming, acidification, deoxygenation, and upper-ocean nutrient and primary production decline from CMIP6 model projections.** Biogeosciences, 17(13), 3439–3470, doi:10.5194/bg-17-3439-2020.

LEÃO, Z.M.A.N., KIKUCHI, R.K.P., FERREIRA, B.P., NEVES, E.G., SOVIEROSKI, H.H., OLIVEIRA, M. D., MAIDA, M., CORREIA, M.D., JOHNSON, R., 2016. **Brazilian coral reefs in a period of global change: a synthesis.** Braz. J. Oceanogr. 64 (2), 97–116. <https://doi.org/10.1590/S1679-875920160916064sp2>.

LONGO, G. O., MORAIS, R. A., MARTINS, C. D. L., MENDES, T. C., AUED, A. W., CÂNDIDO, D. V., OLIVEIRA, J. C., NUNES, L. T., FOUNTOURA, L. SISSINI, M. N., TESCHIMA, M. M., SILVA, M. B., RAMLOV, F., GOUEVA, L. P., FERREIRA, C. E. L., SEGAL, B., HORTA, p.A., FLOETER, S. R. 2015. **Between habitat variation of benthic cover, reef fish assemblage and feeding pressure on the benthos at the only atoll in South Atlantic: Rocas Atoll, NE Brazil.** PLoS One, v.10, n. 6, p.e0127176.

LUIZ, O. J.; DOS SANTOS, W. C.R.; MARCENIUK, A. P.; ROCHA, L. A.; FLOETER, S. R.; BUCK, C. E.; DE KLAUTAU, A. G.C.M.; FERREIRA, C. E.L. **Multiple lionfish (Pterois spp.) new occurrences along the Brazilian coast confirm the invasion**

pathway into the Southwestern Atlantic.  
<https://doi.org/10.1007/s10530-021-02575-8>.

LUMPKIN, R., GARZOLI, S.L., 2005. **Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean.** Deep. Res. I Oceanogr. Res. Pap. 52, 495–518.  
<https://doi.org/10.1016/j.dsr.2004.09.001>.

MAGALHÃES, K.M.; ROSA-FILHO, J.S.; TEIXEIRA, C.E.P.; COELHO-JR, C.; LIMA, M.C.S.; SOUZA, A.M.C.; SOARES, M.O. **Oil and plastic spill: 2021 as another challenging year for marine conservation in the South Atlantic Ocean.** Marine Policy, (2022), 140. DOI: 10.1016/j.marpol.2022.105076.

MAGRIS, R.A.; HERON, S.F.; PRESSEY, R.L. **Conservation Planning for Coral Reefs Accounting for Climate Warming Disturbances.** PLoS ONE (2015), 1-26, 10(11). Doi: 10.1371/journal.pone.0140828

MANTELATTO, M.C., PÓVOA, A.A., SKINNER, L.F., DE ARAUJO, F.V., CREED, J.C. **Marine litter and wood debris as habitat and vector for the range expansion of invasive corals (*Tubastraea* spp.).** Marine Pollution Bulletin, Volume 160, 2020, 111659, ISSN 0025-326X,  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111659>.

MANTELATTO, M.C., VIDON, L.F., SILVEIRA, R.B., MENEGOLA, C., DA ROCHA, R.M., CREED, J.C., 2016. **Host species of the non-indigenous brittle star *Ophiothela mirabilis* (Echinodermata: Ophiuroidea): an invasive generalist in Brazil?** Mar. Biodivers. Rec. 9, 8. <https://doi.org/10.1186/s41200-016-0013-x>.

MEREDITH, M. *et al.*, 2019: **Polar Regions.** In: IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate [Pörtner, H.-O., D.C. Roberts, V. Masson-Delmotte, P. Zhai, M. Tignor, E. Poloczanska, K. Mintenbeck, M. Nicolai, A. Okem, J. Petzold, B. Rama, and N. Weyer (eds.)]. In Press, pp. 203–320, [www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2](http://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2).

MIES, M., FRANCINI-FILHO, R.B., ZILBERBERG, C., GARRIDO, A.G., LONGO, G.O., LAURENTINO, E., GÜTH, A.Z., SUMIDA, P.Y.G., BANHA, T.N.S., 2020. **South Atlantic coral reefs are major global warming refugia and less susceptible to bleaching.** Front. Mar. Sci. 7, 1–13. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00514>.

MILLER, T. (2020) **The Effect of Sea Level Rise on Islands and Atolls.** Encyclopedia of the World's Biomes, vol. 1.  
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.12038-X>.

MIRANDA, A.A., ALMEIDA, A.C.S., VIEIRA, L.M., 2018. **Non-native marine bryozoans (Bryozoa: Gymnolaemata) in Brazilian waters: assessment, dispersal and impacts.** Mar. Pollut. Bull. 130, 184–191.  
<https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2018.03.023>.

MIRANDA, R.J.; NUNES, J.A.C.C.; CREED, J.C.; BARROS, F.; MACIEIRA, R.M.; SANTOS, R.G.; LIMA, G.V.; PONTES, A.V.F.; SILVA, L.G.F.C.; CORDEIRO, R.T.; SAMPAIO, C.L.S.; PINTO, T.K.; MALHADO, A.C.M.; LADLE, R.; PEREIRA, P.H.C. **Brazil policy invites marine invasive species.** SCIENCE, v. 368, p. 481.1-481, 2020. DOI: 10.1126/science.abb7255.

MONTEIRO, R.C.P.; IVAR do SUL, J.A.; COSTA, M.F. **Small microplastics on beaches of fernando de noronha island, tropical atlantic ocean.** Ocean and Coastal Research, (2020), 1-10, 68. DOI: 10.1590/S2675-28242020068235

MORAIS, R.A., FERREIRA, C.E.L., FLOETER, S.R., 2017. **Spatial patterns of fish standing biomass across Brazilian reefs.** J. Fish Biol. 91 (6), 1642–1667. <https://doi.org/10.1111/jfb.13482>.

NATÁLIO, L. F.; CHERNIESKI, D.; TOMIDA, L.; CAPEL, K. C. C. **Alien corals in a Brazilian seaport and perspectives for improving marine bioinvasion detection and management in commercial ports.** Ocean and Coastal Management 218 (2022) 106021. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.106021.

NEWTON, K., CÔTÉ, I.M., PILLING, G.M., JENNINGS, S., AND DULVY, N.K. (2007). **Current and future sustainability of island coral reef fisheries.** Curr. Biol. 17, 655–658.

NOËL, B., L. van KAMPENHOUT, J.T.M. LENAERTS, W.J. van de BERG, M.R. van den BROEKE, 2021: **A 21st Century Warming Threshold for Sustained Greenland Ice Sheet Mass Loss.** Geophysical Research Letters, 48, e2020GL090471, doi:10.1029/2020gl090471.

OLIVEIRA, O.M.C.; QUEIROZ, A.F.S.; CERQUEIRA, J.R.; SOARES, S.A.R.; GARCIA, K.S.; FILHO, A.P.; ROSA, M.L.S.; SUZART, C.M.; PINHEIRO, L.L.; MOREIRA, I.T.A. **Environmental disaster in the northeast coast of Brazil: forensic geochemistry in the identification of the source of the oily material.** Mar. Pollut. Bull. 160 (2020), 111597. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111597>

OLIVER, E. C.J.; DONAT, M. G.; BURROWS, M. T.; MOORE, P. J.; SMALE, D. A.; ALEXANDER, L. V.; BENTHUYSEN, J. A.; FENG, M.; SEN GUPTA, A.; HOBDDAY, A. J.; HOLBROOK, N. J.; PERKINS KIRKPATRICK, S. E.; SCANNELL, H. A.; STRAUB, S. C.; WERNBERG, T. **Longer and more frequente marine heatwaves over the past century.** Nature Communications (2018) 9:1324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.136951>.

OPPENHEIMER, M., BRUCE, G., 2017. Chapter 4: **Sea level rise and implications for low lying islands, coasts and communities coordinating.** In: IPCC SR Ocean and Cyrosphere.

PAIVA, S.V., OLIVEIRA FILHO, R.R., LOTUFO, T.M.C., 2015. **Ascidians from Rocas atoll, Northeast Brazil.** Front. Mar. Sci. <http://dx.doi.org/10.3389/fmars.2015.00039>

PEREIRA, N.S; MANSO, V.A.V.; MACEDO, R.J.A.; DIAS, J.M.A.; SILVA, A.M.C. **Detrital carbonate sedimentation of the Rocas Atoll, South Atlantic.** An Acad Bras Cienc, (2013), 85(1).

PRINCIPE, S. C.; ACOSTA, A. L.; ANDRADE, J. E.; LOTUFO, T. M.C. **Predicted Shifts in the Distributions of Atlantic Reef-Building Corals in the Face of Climate Change.** Front. Mar. Sci. 8:673086. DOI: 10.3389/fmars.2021.673086.

QUIMBAYO, J.P.; ABURTO-OROPEZA, O.; ALVARADO, J. J.; BOCOS, A.A.; DIAS, M.S.; FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; GARCIA, E.; JOHNSON, A.F.; KULBICKI, M.; LAMB, R.W.; LUIZ, O.J.; MASCAREÑAS-OSORIO, I.; MENDES, T.C.; PINHEIRO, H.T.; RODRIGUEZ-ZARAGOZA, F.; SALAS, E.; ZAPATA, F.A. **Determinants of reef fish assemblages in tropical Oceanic islands.** v. 42 , p.77-87, 2019. DOI: 10.1111/ecog.03506.

RAVEN, J. (org) 2005. **Ocean acidification due to increasing atmospheric carbon dioxide.** TheRoyal Society Report. 68p.

ROSSI, S., ISLA, E., BOSCH-BELMAR, M., GALLI, G., GORI, A., GRISTINA, M., INGROSSO, G., MILISENDA, G., PIRAINO, S., RIZZO, L., SCHUBERT, N., SOARES, M., SOLIDORO, C., THURSTAN, R.H., VILADRICH, N., WILLIS, T.J., ZIVERI, P., 2019. **Changes of energy fluxes in marine animal forests of the anthropocene: factors shaping the future seascape.** ICES J. Mar. Sci. 76, 2008–2019. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsz147>.

SANTOS, A.J.B.; BORTOLON, L.F.; BELLINI, C.; COLUCHI, R. **Ghost Nets Haunt the Olive Ridley Turtle (*Lepidochelys olivacea*) near the Brazilian Islands of Fernando de Noronha and Atol das Rocas.** Herpetological Review, 2012, 43(2), 245–246.

SANTOS, M.E.A.; REIMER, J.D. **Rafting in Zoantharia: a hitchhiker's guide to dispersal?** Marine Pollution Bulletin, (2018), 307-310, 130. DOI: 10.1016/j.marpolbul.2018.03.041.

SCHULZ-NETO, A., 2004. **Aves Marinhas do Atol das Rocas.** In: Branco, Joaquim Olinto (Ed.), Aves Marinhas e Insulares Brasileiras: Bioecologia e Conservação. UNIVALI, Itajaí, SC, pp. 169–192.

SCOTT C. DONEY, S.C.; FABRY, V.J.; FEELY, R.A.; KLEYPAS, J.A. **Ocean Acidification: The Other CO<sub>2</sub> Problem.** Annual Review of Marine Science. Vol. 1:169-192. 2009. <https://doi.org/10.1146/annurev.marine.010908.163834>

SEMINOFF, J. A. (2004) **Chelonia mydas.** The IUCN Red List of Threatened Species 2004:e.T4615A11037468, 10.2305/IUCN.UK.2004.RLTS.T4615A11037468.en.

SHEAVLY, S.B.; REGISTER, K.M. **Marine Debris & Plastics: Environmental Concerns, Sources, Impacts and Solutions.** J Polym Environ 15, 301–305 (2007). <https://doi.org/10.1007/s10924-007-0074-3>

SOARES, M. 2018. **Climate change and regional human pressures as challenges for management in oceanic islands, South Atlantic.** Mar. Pollut. Bull, v. 131, p. 347-355.

SOARES, M. O. **Geobiologia do Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial).** (2009). [260f.]. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Instituto de Geociências. Programa de Pós-Graduação em Geociências. Porto Alegre, RS –BR, 2009.

SOARES, M. O.; ROSSI, S.; GURGEL, A. R.; LUCAS, C. C.; TAVARES, T. C. L.; DINIZ, B. FEITOSA, C. V.; RABELO, E. F.; PEREIRA, P. H. C.; KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M. A. N.; CRUZ, I. C. S.; CARNEIRO, P. B. M.; ALVAREZ-FILIP, L. **Impacts of a changing environment on marginal coral reefs in the Tropical Southwestern Atlantic.** *Ocean and Coastal Management* 210 (2021) 105692. DOI: 10.1016/j.ocecoaman.2021.105692.

SOARES, M.O., 2020. **Marginal reef paradox: a possible refuge from environmental changes?** *Ocean Coast Manag.* 185, 105063 <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2019.105063>.

SOARES, M.O., PAIVA, C.C., GODOY, T., SILVA, M.B., 2011. **Atol das Rocas (Atlântico Sul Equatorial): Um caso de Lixo Marinho em Áreas Remotas.** *J. Integ. Coas. Zon. Man.* 11, 149–152. <http://dx.doi.org/10.5894/rgci233>.

SOARES, M.O., TAVARES, T.C.L., CARNEIRO, P.B.M., 2019. **Mesophotic ecosystems: distribution, impacts and conservation in the South Atlantic.** *Divers. Distrib.* 25, 255–268. <https://doi.org/10.1111/ddi.12846>.

SOARES, M.O.; DAVIS, M.; CARNEIRO, P.B.M. 2016. **Northward range expansion of the invasive coral (*Tubastraea tagusensis*) in the southwestern Atlantic.** *Mar. Biodivers.* 1-4. <http://dx.doi.org/10.1007/2Fs12526-016-0623-x>.

SOARES, M.O.; PAIVA, C.C.; GODOY, R.K.P.; SILVA, M.B.; CASTRO, C.S.S. (2010) – **Gestão ambiental de ecossistemas insulares: O caso da Reserva Biológica do Atol das Rocas, Atlântico Sul Equatorial.** *Revista Gestão Costeira Integrada*, 10(3): 347-360. ISSN: 1646-8872.

SOARES, M.O.; SALANI, S.; PAIVA, S.V.; BRAGA, M.D. A. **Shipwrecks help invasive coral to expand range in the Atlantic Ocean.** *MARINE POLLUTION BULLETIN*, v. 158, p. 111394, 2020.

SPALDING, M.; BURKE, L.; WOOD, S.A.; ASHPOLE, J.; HUTCHISON, J.; ZU ERMGASSEN, P. 2017. **Mapping the global value and distribution of coral reef tourism.** *Mar. Pol.* 82, 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2017.05.014>.

STODDART, D.R. **The shape of atolls.** *Marine Geology*, v.3, n.5, p. 369-383, 1965.

TCHAMABI, C.C.; ARAÚJO, M.; SILVA, M.; BOURLÈS, B., 2017. **A study of the Brazilian Fernando de Noronha and Rocas atoll wakes in the tropical Atlantic.** *Ocean Model* 111, 9–18. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ocemod.2016.12.009>.

TCHAMABI, C.C.; ARAUJO, M.; SILVA, M.; BOURLÈS, B.; TRAVASSOS, P. **Ichthyoplankton transport around the Brazilian Fernando de Noronha archipelago and Rocas Atoll: Are there any connectivity patterns?** *Indian Journal of Geo-Marine Sciences*, (2018), 812-818, 47(4).

TESCHIMA, M.M.; STRÖHER, P. R.; FIRKOWSKI, C.R.; PIE, M.R.; FREIRE, A.S. **Large-scale connectivity of *Grapsus grapsus* (Decapoda) in the Southwestern Atlantic oceanic islands: integrating genetic and morphometric data.** *Marine Ecology*, vol 37, (6) p. 1360-1372. 2017. <https://doi.org/10.1111/maec.12347>

TUNALA, L.P.; TÂMEGA, F.T.S.; DUARTE, H.M.; COUTINHO, R. 2019. **Stress factors in the photobiology of the reef coral *Siderastrea stellata***. J. Exp. Mar. Biol. Ecol. 519, 151188 <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2019.151188>.

WATERS, C.N; TURNER, S.D. **Defining the onset of the Anthropocene**. Vol 378, Issue 6621, pp. 706-708. 2022. DOI: 10.1126/science.ade2310

WIENS, H.J. **Atoll environment and Ecology**. 1962. Connecticut, Yale Univ. Press, 523p.

WILKINSON, C. (2002) **Status of Coral Reefs of the World 2002**. Australian Institute of Marine Science (AIMS), Global Coral Reef Monitoring Network (GCRMN), Townsville, Australia.

### APÊNDICE A – DADOS DE ANOMALIA TÉRMICA POSITIVA

Ano	Nº dias	Média dias	Freq MHW	Int média (C°)	Int máx (°C)	DHW
1984	12	6	2	1.006	1.52	0
1985	0	0	0	0	0	0
1986	0	0	0	0	0	0
1987	6	6	1	0.678	0.77	0.147
1988	19	6,33	3	0.865	1.14	2.42
1989	5	5	1	1.49	1.9	1.02
1990	0	0	0	0	0	0
1991	0	0	0	0	0	0
1992	0	0	0	0	0	0
1993	0	0	0	0	0	0
1994	0	0	0	0	0	0
1995	5	5	1	0.982	1.07	0.807
1996	0	0	0	0	0	0
1997	0	0	0	0	0	0
1998	24	6	4	0.825	1.4	3.425
1999	0	0	0	0	0	0
2000	12	6	2	1.055	1.61	0.142
2001	13	13	1	0.722	1.07	0
2002	0	0	0	0	0	0
*2003	33	6,6	5	0.843	1.41	1.034
2004	10	5	2	0.807	1.01	0
2005	17	5,66	3	0.762	1.03	0
2006	22	7,33	3	0.652	0.88	0.842
2007	16	16	1	0.759	0.85	0
2008	27	13,5	2	0.772	1.01	1.201
2009	63	21	3	0.949	1.67	3.96
*2010	206	19,09	11	0.846	1.59	9.885
2011	78	12,33	6	0.881	1.39	0.918
2012	0	0	0	0	0	0
2013	36	12	3	0.694	1.04	0.145
2014	5	5	1	0.902	0.98	0
2015	17	8,5	2	0.894	2.12	0
*2016	62	15,5	4	0.782	1.16	0.75
*2017	67	13,4	5	0.822	1.33	0.292
2018	26	13	2	0.778	1.23	0
*2019	112	15,42	7	0.977	1.69	7.512
2020	268	34	8	0.892	2.24	13.034