

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS  
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS  
AMBIENTAIS

Samira da Conceição Sabadini

**Suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de  
branqueamento de corais**

Belo Horizonte

2017

Samira da Conceição Sabadini

**Suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de  
branqueamento de corais**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais da Universidade Federal de Minas Gerais como requisito parcial para obtenção de título de mestre em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais.

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Sónia Maria Carvalho Ribeiro

Coorientadoras: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Úrsula Ruchkys de Azevedo e Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Zelinda Margarida de Andrade Nery Leão

Belo Horizonte  
Instituto de Geociências da UFMG

2017

S113s Sabadini, Samira da Conceição.  
2017 Suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de branqueamento de corais [manuscrito] / Samira da Conceição Sabadini. – 2017.  
89 f., enc.: il. (principalmente color.)

Orientadora: Sónia Maria Carvalho Ribeiro.

Coorientadora: Úrsula Ruchkys de Azevedo.

Coorientadora: Zelinda Margarida de Andrade Nery Leão.

Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Minas Gerais, Instituto de Geociências, 2017.

Bibliografia: f. 63-69.

Inclui apêndices.

1. Modelagem de dados – Aspectos ambientais – Teses. 2. Recifes e ilhas de coral – Abrolhos (BA) – Teses. I. Carvalho-Ribeiro, Sónia Maria. II. Ruchkys, Úrsula de Azevedo. III. Leão, Zelinda Margarida de Andrade Nery. IV. Universidade Federal de Minas Gerais. Instituto de Geociências. V. Título.

CDU: 911.2:519.6(813.8)



## FOLHA DE APROVAÇÃO

Suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de branqueamento de corais

**SAMIRA DA CONCEIÇÃO SABADINI**

Dissertação submetida à Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, como requisito para obtenção do grau de Mestre em ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS, área de concentração ANÁLISE E MODELAGEM DE SISTEMAS AMBIENTAIS.

Aprovada em 11 de maio de 2017 pela banca constituída pelos membros:

Profa. Sonia Maria Carvalho Ribeiro - Orientadora  
UFMG

Profa. Úrsula Ruchkys de Azevedo - Coorientadora  
UFMG

Prof. Diego Maedo  
UFMG

Prof. Ubirajara da Oliveira  
UFMG

Prof. Britaldo Silveira Soares Filho  
UFMG

Belo Horizonte, 11 de maio de 2017.

A minha família, meu porto seguro.

*“Dizem que, mesmo antes de um rio cair no mar ele treme de medo.  
Olha para trás, para toda a jornada, os cumes, as montanhas, o longo  
caminho sinuoso através das florestas e povoados, e vê a sua frente um oceano  
tão vasto, que entrar nele nada mais é do que desaparecer para sempre.  
Mas não há outra maneira.  
O rio não pode voltar.  
Ninguém pode voltar.  
Voltar é impossível na existência.  
Você pode apenas ir em frente.  
O rio precisa se arriscar e entrar no oceano.  
E somente quando ele entrar no oceano é que o medo desaparece.  
Porque apenas então, o rio saberá que não se trata de desaparecer no oceano...  
...mas tornar-se oceano.”*

*Autor desconhecido*

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, quero agradecer a Deus por guiar meu caminho e me permitir chegar até aqui. À minha família, que está sempre ao meu lado, me ajudando a enfrentar os desafios dessa vida. Principalmente, à minha irmã Luiza, que não só me escutou falar sobre esse projeto todo esse tempo, como também me acalmava e me ajudava a pensar nos momentos mais difíceis dessa jornada. À minha sobrinha Paulinha que com apenas 6 anos já sabe muito sobre branqueamento de corais. À Anna Cristina, que tanto me escutou e auxiliou no meu equilíbrio emocional.

À professora Sônia que aceitou o desafio de me orientar, sendo nós duas de áreas tão distintas. À professora Úrsula pela disponibilidade em me acompanhar e orientar na especialização e agora me coorientar no mestrado. À professora Zelinda Leão, fonte de inspiração para mim e tantos outros estudantes nesse país. Sempre prestativa e tranquila ao compartilhar todo seu conhecimento sobre os recifes de Abrolhos. Ao professor Ruy Kikuchi que, juntamente com a professora Zelinda, contribuiu para esse trabalho participando da consulta aos especialistas.

Aos meus amigos da modelagem, pela ótima convivência durante esses dois anos. Principalmente aos mais próximos, Elaine, Rayane, Kelen, Kelly e Gustavo. Seja nas viagens, passeios ou nos momentos de desespero, sempre estivemos juntos e evoluímos juntos. Nossa amizade tornou esses anos muito mais agradáveis.

Ao William e ao Hermam pelo tempo dispendido em me ajudar com as dúvidas sobre o DINAMICA EGO. Ao professor Britaldo, Bira e Diego que aceitaram compor a minha banca de defesa do mestrado. A todos que de alguma forma contribuíram para execução deste projeto, muito obrigada!

## RESUMO

Os ecossistemas marinhos são fundamentais para a manutenção da vida na Terra. Dentre eles, destacam-se os recifes de corais que são considerados altamente produtivos, diversos e complexos. No entanto, esses ecossistemas sofrem muitas ameaças, dentre elas o branqueamento de corais. O branqueamento ocorre, principalmente, como resposta a anomalias positivas de temperatura da superfície do mar. Esse trabalho teve como objetivo geral modelar a suscetibilidade dos recifes de Abrolhos (sul da Bahia) sofrerem branqueamento e, mais especificamente, gerar um mapa de suscetibilidade de branqueamento dos recifes de Abrolhos durante os verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016. Nossos resultados mostram que em 2001, 20% da área recifal apresentou baixa suscetibilidade ao branqueamento, enquanto 80% apresentou suscetibilidade média. 2002 foi o ano com menor suscetibilidade, sendo muito baixa em 18% da área e baixa em 82%. Em 2003, 75% da área mostrou baixa suscetibilidade e 25% média. Em 2005, a área de média suscetibilidade atingiu 90%, enquanto 10% apresentou baixa suscetibilidade. Em 2016, 19% da área apresentou média e 81% alta suscetibilidade. O ano de 2016 apresentou a maior suscetibilidade entre os anos estudados, sugerindo uma maior porcentagem de colônias branqueadas, o que é corroborado pelo fato de que este ano foi considerado pela NASA e NOAA como o ano mais quente desde 1880. Os resultados também mostram que o padrão de branqueamento é espacialmente diferenciado. Os recifes de abrolhos pertencentes ao arco costeiro apresentam maior suscetibilidade ao branqueamento. Exceção é feita aos recifes de Timbebas que, embora localizados no arco costeiro, são mais semelhantes aos recifes do arco externo que são menos suscetíveis ao branqueamento.

Palavras-chave: Recifes de corais, Abrolhos, branqueamento, modelagem.

## ABSTRACT

Marine ecosystems are fundamental to the maintenance of life on Earth. Among them, the coral reefs that are considered highly productive, diverse and complex stand out. However, these ecosystems suffer many threats, including coral bleaching. Bleaching occurs mainly in response to positive sea surface temperature anomalies. The objective of this work was to model the susceptibility of Abrolhos reefs (southern Bahia) to bleaching and, more specifically, to generate a map of susceptibility to bleaching of Abrolhos reefs during the summers of 2001, 2002, 2003, 2005 and 2016. Our results show that in 2001, 20% of the reef area presented low susceptibility to bleaching, while 80% presented medium susceptibility. 2002 was the year with the lowest susceptibility, being very low in 18% of the area and low in 82%. In 2003, 75% of the area showed low susceptibility and 25% medium. In 2005, the area of medium susceptibility reached 90%, while 10% presented low susceptibility. In 2016, 19% of the area presented medium and 81% high susceptibility. The year 2016 showed the highest susceptibility between the years studied, suggesting a higher percentage of bleached colonies, which is corroborated by the fact that this year was considered by NASA and NOAA as the warmest year since 1880. The results also show that the bleaching pattern is spatially differentiated. The reefs from the coastal arch of Abrolhos present the greater susceptibility to bleaching. Exception is made to Timbebas reefs that, although located in the coastal arch, are more similar to the outer arch reefs that are less susceptible to the bleaching.

Keywords: Coral reefs, Abrolhos, Bleaching, modeling.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 -	Ciclo de vida de corais incubadores de larvas.....	19
Figura 2 -	Endemicidade de corais escleractíneos e hidrocorais na costa brasileira.....	20
Figura 3 -	Distribuição dos recifes de corais no mundo.....	23
Figura 4 -	Distribuição da diversidade de espécies de corais no mundo.....	23
Figura 5 -	Distribuição de corais, recifes de corais e correntes no mundo...	24
Figura 6 -	Pólipos de colônia de <i>Mussismilia harttii</i> branqueados.....	25
Figura 7 -	Estágios do branqueamento.....	26
Figura 8 -	Mapa de localização da área de estudo.....	32
Figura 9 -	Desenho esquemático dos pináculos conhecidos como chapeirões.....	33
Figura 10 -	Circulação oceânica no Brasil.....	35
Figura 11 -	Modelo conceitual.....	38
Figura 12 -	Fluxograma das etapas da modelagem.....	40
Figura 13 -	Esquema do cálculo da máxima temperatura da superfície do mar no verão.....	41
Figura 14 -	Esquema do cálculo da mínima magnitude do vento no verão....	41
Figura 15 -	Esquema do cálculo da anomalia térmica acumulada no verão...	42
Figura 16 -	Modelo de análise multicritério da suscetibilidade dos recifes de corais ao fenômeno de branqueamento.....	44
Figura 17 -	<i>Box plot</i> da variável dependente.....	45
Figura 18 -	<i>Box plot</i> das variáveis ambientais independentes.....	46
Figura 19 -	Notas e pesos atribuídos às variáveis.....	47
Figura 20 -	Análise de sensibilidade do modelo.....	48
Figura 21 -	Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento e	

	espacialização dos dados de campo para 2001.....	49
Figura 22 -	Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento e espacialização dos dados de campo para 2002.....	50
Figura 23 -	Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento e espacialização dos dados de campo para 2003.....	52
Figura 24 -	Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento e espacialização dos dados de campo para 2005.....	53
Figura 25 -	Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento em 2016.....	54
Figura 26 -	Anomalia térmica acumulada nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.....	69
Figura 27 -	Máxima TSM nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.....	70
Figura 28 -	Máxima PAR nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.....	71
Figura 29 -	Mínima magnitude do vento nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.....	72
Figura 30 -	Mapa de distâncias (em metros) dos recifes às áreas urbanas, hidrovias e porto de Caravelas.....	73
Figura 31 -	Limites das unidades de conservação.....	74
Figura 32 -	Resultado dos testes de correlação espacial entre as variáveis do modelo.....	75

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 -	Relação das variáveis usadas em experimentos <i>in situ</i> e laboratoriais em estudos sobre branqueamento de corais.....	30
Tabela 2 -	Comparação dos níveis de suscetibilidade em cada ano estudado.....	56
Tabela 3 -	Análise descritiva da variável dependente (% de branqueamento de corais).....	76
Tabela 4 -	Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2001.....	77
Tabela 5 -	Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2002.....	79
Tabela 6 -	Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2003.....	81
Tabela 7 -	Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2005.....	83
Tabela 8 -	Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2016.....	85
Tabela 9 -	Análise descritiva das variáveis antropogênicas independentes (distância às áreas urbanas, hidrovias e porto).....	87

## LISTA DE SIGLAS

NOAA - *National Oceanic and Atmospheric Administration*

Km<sup>2</sup> - Quilômetro quadrado

S - Sul

W - Oeste

Km - Quilômetro

CPRM - Serviço Geológico do Brasil

BA - Bahia

ES - Espírito Santo

PARNA - Parque Nacional

m - Metro

m<sup>3</sup>.s - Metro cúbico por segundo

°C - Grau Celsius

S - Segundo

TSM - Temperatura da superfície do mar

AVHRR - *Advanced Very-High Resolution Radiometer*

NCEI - *National Centers for Environmental Information*

NCEP - *National Centers for Environmental Prediction*

m.s<sup>-1</sup> - Metro por segundo

PAR - Radiação fotossinteticamente ativa

SeaWiFS - *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor*

MODIS - *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer*

NASA - *National Aeronautics and Space Administration*

einstein.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> - Einstein por metro quadrado por dia

PSD - *Physical Sciences Division*

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ANTAQ - Agência Nacional de Transportes Aquaviários

EGO - *Environment for Geoprocessing Objects*

WGS - *World Geodetic System*

UTM - Sistema de projeção Universal Transversa de Mercator

Tiff - *Tagged Image File Format*

$\text{g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$  - Grama por centímetro quadrado por dia

US - Unidade de conservação de uso sustentável

PI - Unidade de conservação de proteção integral

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO.....</b>	<b>16</b>
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>19</b>
2.1. CORAIS.....	19
2.2. RECIFES DE CORAIS.....	21
2.3. DISTRIBUIÇÃO DOS RECIFES DE CORAIS NO MUNDO.....	22
2.4. BRANQUEAMENTO DE CORAIS.....	24
2.5. VARIÁVEIS EXPLICATIVAS.....	27
2.5.1. Variáveis ambientais de exposição.....	27
2.5.1.1. Anomalia térmica da superfície do mar.....	27
2.5.1.2. Radiação fotossinteticamente ativa.....	28
2.5.1.3. Magnitude do vento.....	28
2.5.2. Variáveis antropogênicas de exposição.....	28
2.5.2.1. Distância dos recifes de corais às áreas urbanas.....	28
2.5.2.2. Distância dos recifes de corais às hidrovias.....	28
2.5.2.3. Distância dos recifes de corais ao porto.....	29
2.5.2.4. Presença de unidades de conservação.....	29
2.5.3. Experimentos anteriores disponíveis na literatura.....	30
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>32</b>
3.1. ÁREA DE ESTUDO.....	32
3.2. BASE DE DADOS.....	35
3.2.1. Temperatura da superfície do mar.....	35
3.2.2. Magnitude do vento.....	36
3.2.3. Radiação fotossinteticamente ativa.....	36

3.2.4. Anomalia térmica da superfície do mar acumulada em períodos de 5 ou mais dias consecutivos.....	36
3.2.5. Distância dos recifes às áreas urbanas.....	37
3.2.6. Distância dos recifes às hidrovias e ao porto de Caravelas.....	37
3.2.7. Presença de unidades de conservação.....	37
3.3. MODELO CONCEITUAL E ETAPAS DA MODELAGEM.....	37
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>45</b>
4.1. RESULTADO DA ANÁLISE DESCRITIVA.....	45
4.2. RESULTADO DA ANÁLISE DE VARIABILIDADE TEMPORAL DOS DADOS.....	45
4.3. RESULTADO DA CONSULTA AOS ESPECIALISTAS.....	46
4.4. RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE.....	47
4.5. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2001.....	48
4.6. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2002.....	50
4.7. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2003.....	51
4.8. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2005.....	53
4.9. RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2016.....	54
4.10. COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE SUSCETIBILIDADE APRESENTADOS PARA CADA ANO ESTUDADO.....	55
<b>5. DISCUSSÃO.....</b>	<b>58</b>
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>63</b>
<b>APÊNDICE A.....</b>	<b>70</b>
<b>APÊNDICE B.....</b>	<b>71</b>

<b>APÊNDICE C</b> .....	72
<b>APÊNDICE D</b> .....	73
<b>APÊNDICE E</b> .....	74
<b>APÊNDICE F</b> .....	75
<b>APÊNDICE G</b> .....	76
<b>APÊNDICE H</b> .....	77
<b>APÊNDICE I</b> .....	78
<b>APÊNDICE J</b> .....	80
<b>APÊNDICE K</b> .....	82
<b>APÊNDICE L</b> .....	84
<b>APÊNDICE M</b> .....	86
<b>APÊNDICE N</b> .....	88

## 1. INTRODUÇÃO

Os ecossistemas marinhos são fundamentais para a manutenção da vida na Terra. No entanto, a conservação marinha no Brasil é numericamente inferior à conservação terrestre. Enquanto 1.928 unidades de conservação protegem 17,2% da área continental, apenas 157 unidades de conservação protegem 1,5% da área marinha (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2015).

Dentre os ecossistemas marinhos, os recifes de corais são considerados altamente produtivos, diversos e complexos (CONNELL, 1978, VILLAÇA, 2009). Entretanto, apesar da relevância desse ecossistema para a manutenção de serviços e bens ecossistêmicos oferecidos à sociedade, os recifes de corais sofrem diferentes pressões de origem ambiental e antropogênica. Dentre elas, podem ser citadas a eutrofização das águas devido à descarga de nutrientes e sedimentos oriundos da costa (COSTA JÚNIOR et al., 2000), destruição por pesca com explosivos, cianeto e redes de arrasto (WESTMACOTT et al., 2000), pisoteio durante mergulhos, ancoragem de embarcações (CASTRO, 2000), retirada dos esqueletos calcários para ornamentação (WESTMACOTT et al., 2000), doenças (LEÃO et al., 2010; PETERS, 2015), derrames de óleo (LEÃO, 1999), acidificação das águas (ANTHONY et al., 2008; EREZ et al., 2011) e branqueamento de corais (DOUGLAS, 2003; LEÃO et al., 2008; DONNER et al., 2005).

O branqueamento de corais, objeto de estudo desse trabalho, ocorre, principalmente, como resposta a anomalias positivas de temperatura da superfície da água. Há um consenso na literatura a respeito do limite de anomalia térmica suportada pelos corais, pois caso esse limite seja ultrapassado, ocorre o episódio de branqueamento. Diversos autores afirmam que o aumento de 1°C na temperatura média da superfície do mar no verão durante algumas semanas é suficiente para desencadear o branqueamento do tecido dos corais (GOREAU & HAYES, 1994; MARSHALL & SCHUTTENBERG, 2006; EAKIN et al., 2008; HOEGH-GULDBERG, 1999; DONNER et al., 2005; GARRIDO et al., 2016).

Durante o evento de branqueamento, os corais expulsam as zooxantelas do interior de seus tecidos e, portanto, perdem sua coloração habitual (DOUGLAS,

2003; MARANGONI et al., 2016). Com a expulsão das zooxantelas, é rompida a relação de simbiose entre a microalga fotossintetizante e o coral (GARRIDO et al., 2016). Esse tende a morrer se não for recolonizado por outra espécie de zooxantela mais tolerante à elevação da temperatura (MARSHALL & SCHUTTENBERG, 2006; DOUGLAS, 2003; FREITAS et al., 2012).

No Brasil, os primeiros registros de branqueamento de corais datam de 1993/1994 na costa adjacente ao Estado de São Paulo (MIGOTTO, 1997) e no recife de Viçosa, pertencente à região de Abrolhos (CASTRO & PIRES, 1999). Em 1997/1998 foi registrado branqueamento de colônias de corais no litoral norte da Bahia (DUTRA et al., 2000). Entre os anos de 2000 e 2005 os recifes da Bahia foram monitorados pela equipe da pesquisadora Zelinda Leão (LEÃO et al., 2008). Em 2003 ainda foram registrados branqueamentos nos recifes do Atol das Rocas, Fernando de Noronha, Tamandaré, Maragogi e Maracajaú (RN), sendo que o último apresentou o maior percentual de branqueamento (quase 12% das colônias de corais amostradas) (FERREIRA & MAIDA, 2006). Em 2010, o episódio de branqueamento em Maracajaú foi mais intenso, resultando em mais de 80% das colônias branqueadas (SOUZA, 2012). No mesmo ano, foi registrado branqueamento em 57% das colônias de corais no recife de Caramuanas (Baía de Todos os Santos), com posterior recuperação de quase todas as colônias afetadas (MIRANDA et al., 2013).

Em 2014 iniciou-se o terceiro evento global de branqueamento de corais que é considerado o mais longo já registrado (HUGHES ET AL., 2017; NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2015). Ao longo deste evento muitos recifes foram duramente atingidos em todo o mundo. Entre esses recifes, a Grande Barreira de Corais da Austrália teve 93% dos corais branqueados em 2016, dos quais 60% com alta severidade (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2016; HUGHES et al., 2017). Os recifes de corais do Hawaii atingiram níveis recordes de branqueamento em 2014 e a Ilha de Kiritimati, no Oceano Pacífico, apresentou mais de 80% de mortalidade de corais até 2015-2016 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2017). No Japão, mais de 90% dos recifes de corais na Ilha Ryukyu apresentaram branqueamento parcial e 70% dos corais morreram em 2016 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC

ADMINISTRATION, 2017). O branqueamento de corais também foi observado em 2014 e 2015 na Flórida e ao longo de todo o Caribe em 2015 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2017).

Considerando-se a tendência das mudanças climáticas globais e os impactos de origem antropogênica, torna-se evidente a importância de direcionar maior atenção e esforços para o desenvolvimento de simulações no complexo recifal de Abrolhos. Neste contexto, o trabalho tem como principal objetivo modelar a suscetibilidade dos recifes de Abrolhos sofrerem branqueamento de corais. Os objetivos específicos são: (i) Atribuir notas e pesos as variáveis explicativas baseado em consulta aos especialistas e literatura; (ii) Gerar um mapa de suscetibilidade dos recifes de Abrolhos sofrerem branqueamento de corais durante os verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016 e (iii) Estimar a área recifal para cada nível de suscetibilidade nos anos estudados.

## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 CORAIS

Corais são animais pertencentes ao filo dos Cnidários que apresentam elevada diversidade (MIGOTTO, 2007). Possuem ciclo de vida com uma fase pólipó fixa ao substrato e outra larval livre na coluna d'água (Figura 1) (PIRES et al., 2016).

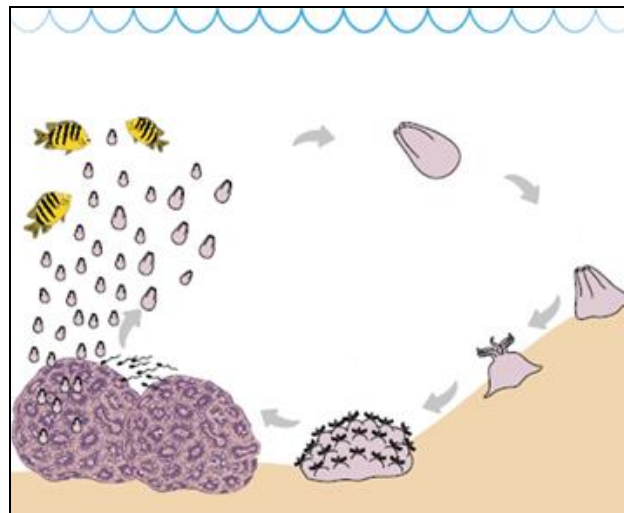


Figura 1: Ciclo de vida de corais incubadores de larvas.

Fonte: Modificado de Pires et al. (2016).

Os pólipos são estruturados em forma de cilindros que possuem uma extremidade oral que compreende boca e tentáculos orientados para cima e uma extremidade aboral fixa ao substrato (RUPPERT & BARNES, 1996). No entorno da boca, esses organismos possuem tentáculos com células urticantes e paralisantes conhecidas como cnidócitos, que além de serem úteis na captura das presas também são úteis na defesa do pólipó (CORAL VIVO, 20--).

Os corais apresentam duas formas de alimentação: beneficiam-se da relação de simbiose com microalgas conhecidas como zooxantelas, que fornecem alimento para os corais e, por heterotrofia, quando esses organismos estendem seus tentáculos e capturam organismos zooplanctônicos (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

A costa brasileira apresenta pouca diversidade de corais e considerável quantidade de espécies endêmicas como a *Mussismilia brasiliensis*,

*Mussismilia hispida*, *Mussismilia harttii*, *Mussismilia leptophylla*, *Siderastrea stellata*, *Millepora braziliensis*, *Millepora nitida* e *Millepora laboreli* (LEÃO et al., 2003; LEÃO et al., 2016). O alto endemismo de corais e hidrocorais é uma característica importante dos recifes de Abrolhos (LEÃO, 1999).

Sabendo-se da fundamental importância das espécies endêmicas construtoras de recifes, foi desenvolvida a análise de endemidade de corais hermatípicos na costa brasileira. A análise revelou que o Parcel de Manuel Luís (Maranhão) e a costa do estado da Bahia são as regiões que apresentam maior relevância como áreas endêmicas (Figura 2).

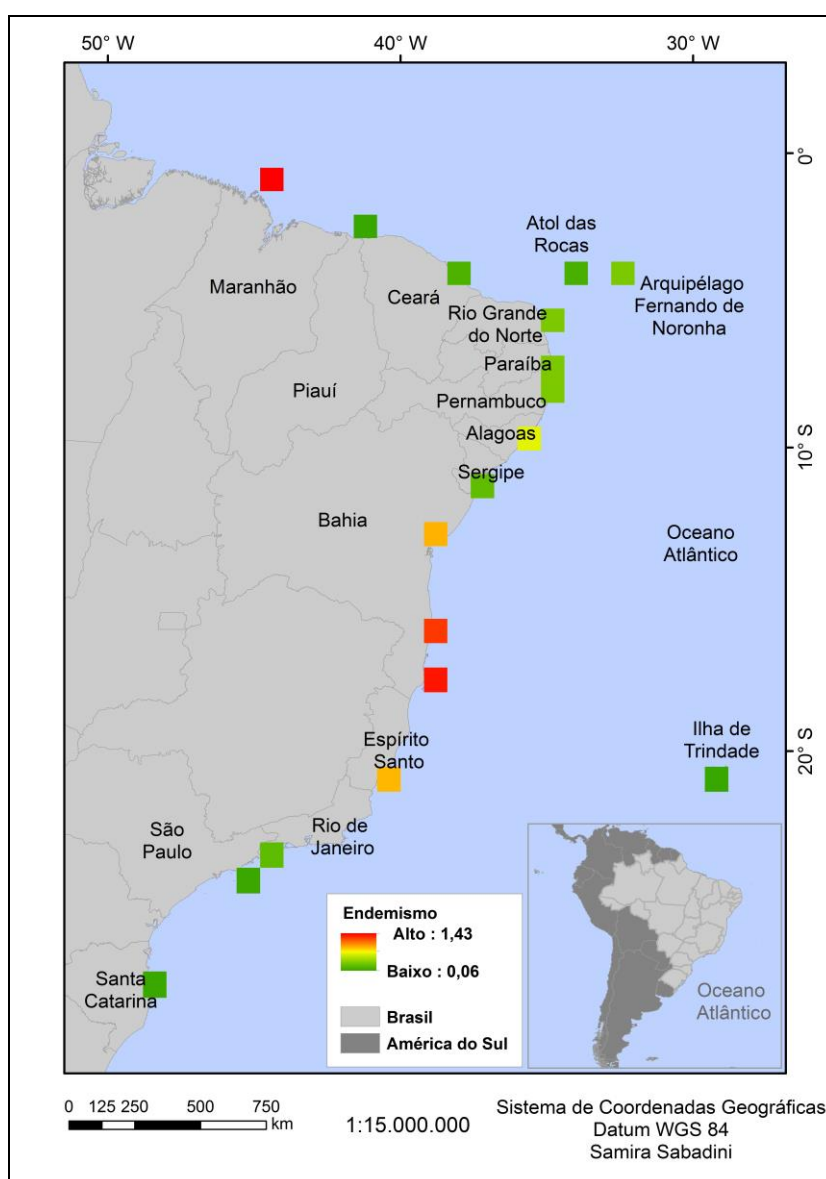


Figura 2. Endemidade de corais escleractíneos e hidrocorais na costa brasileira.

A alta endemicidade do Parcel de Manuel Luís deve-se, principalmente, ao confinamento geográfico da espécie *Millepora laboreli* até então só descrita nesse recife por Amaral et al. (2008). No entanto, é importante destacar que os recifes de Abrolhos apresentam número de espécies endêmicas superior a qualquer outro recife da costa brasileira.

Abrolhos se destaca como a região de maior biodiversidade no Oceano Atlântico Sul (LEÃO e DOMINGUEZ, 2000). Além disso, tem alto endemismo de corais e hidrocorais construtores de recifes, o que lhe confere relevante importância na costa brasileira.

## 2.2 RECIFES DE CORAIS

Os recifes de corais fornecem bens e serviços ecossistêmicos à sociedade, como alimentação, turismo, proteção da linha de costa contra tempestades, além de servirem como berçários para espécies de interesse comercial (BURKE et al., 2011). Portanto, é importante destacar sua relevância econômica, ecológica e social (FERREIRA et al., 2001).

Existem 3 tipos básicos de estruturas recifais: Recifes em franja, em barreiras e atóis. Os recifes em franja formam-se por meio do crescimento de uma plataforma rasa de carbonato de cálcio em direção à superfície da água (SPALDING et al., 2001). Desenvolvem-se próximos à costa ou no entorno de ilhas e continentes (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009). Os recifes em barreira possuem sua base em regiões mais profundas que os recifes em franja e localizam-se mais distantes da linha de costa (SPALDING et al., 2001). Entre a linha de costa e esses recifes, desenvolve-se uma laguna de grande extensão e profundidade (SPALDING et al., 2001; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009). Os atóis são recifes circulares que se desenvolvem em regiões oceânicas a partir do crescimento de um recife em franja no entorno de uma ilha vulcânica que sofre subsidência, resultando na formação de uma laguna no interior do recife (SPALDING et al., 2001).

Os corais representam elementos essenciais ao ecossistema recifal. São esses os principais construtores da estrutura tridimensional que é cimentada e preenchida por outros organismos (HOEGH-GULDBERG, 1999).

Os recifes de corais são encontrados em águas da região tropical que são consideradas como desertos de nutrientes, sendo a relação de simbiose entre os corais e as microalgas zooxantelas responsável por sua existência em áreas onde a oferta de nutrientes como o nitrogênio é limitada (HOEGH-GULDBERG, 1999). O ecossistema recifal representa um “oásis de produtividade”, pois apresenta alta taxa de reciclagem de nutrientes, o que resulta em elevada produtividade ( $1500 - 5000 \text{ g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) quando comparado com outros ecossistemas, como florestas tropicais ( $460 - 1600 \text{ g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ), ressurgências costeiras ( $110 - 370 \text{ g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) e manguezais ( $370 - 450 \text{ g.cm}^{-2}.\text{a}^{-1}$ ) (VILLAÇA, 2009).

Diante disso, os recifes de corais são considerados o ecossistema marinho de maior produtividade, sendo os recifes brasileiros os mais importantes do Oceano Atlântico Sul Ocidental (KIKUCHI et al., 2003; LEÃO et al., 2010).

### 2.3 DISTRIBUIÇÃO DOS RECIFES DE CORAIS NO MUNDO

Os corais podem ser encontrados em todo o mundo, principalmente, onde haja águas claras, quentes, limpas e iluminação do sol; enquanto as estruturas recifais tem sua distribuição limitada aos trópicos entre  $30^\circ$  norte e  $30^\circ$  sul (Figura 3) (SCHMIEGELOW, 2004).

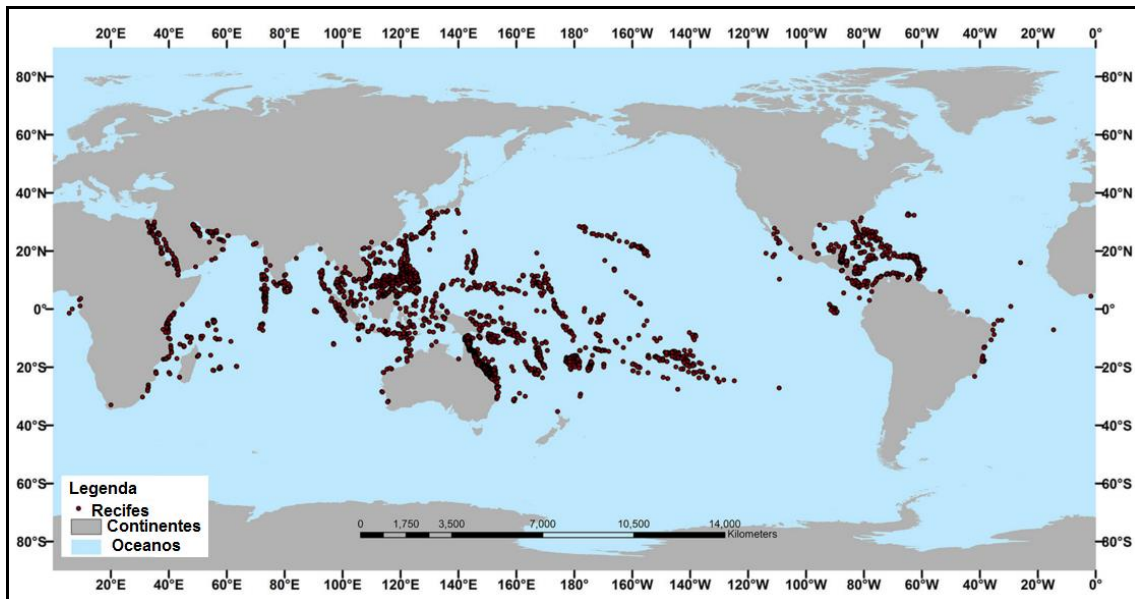


Figura 3: Distribuição dos recifes de corais no mundo.

Fonte: Modificado de NOAA (20--).

A Figura 4 apresenta a distribuição da diversidade de espécies de corais nos oceanos. A diversidade de espécies de corais é maior na porção ocidental dos Oceanos Atlântico (norte) e Indo-Pacífico e reduzida na porção oriental dos Oceanos Atlântico e Pacífico (PAULAY, 1997).

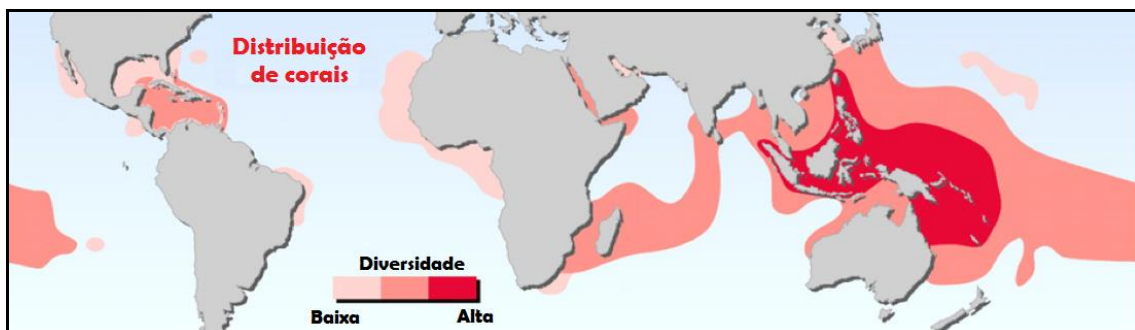


Figura 4: Distribuição da diversidade de espécies de corais no mundo.

Fonte: Modificado de Jennerjahn (2012).

A Grande Barreira de Corais da Austrália, pertencente à região do Indo-Pacífico oeste, é a estrutura recifal mais extensa do planeta, com aproximadamente 1.800 km de extensão (SCHMIEGELOW, 2004). As regiões orientais dos oceanos Atlântico e Pacífico apresentam baixa diversidade de corais devido à presença de correntes frias (PAULAY, 1997; CASTRO & HUBER, 2012) (Figura 5).

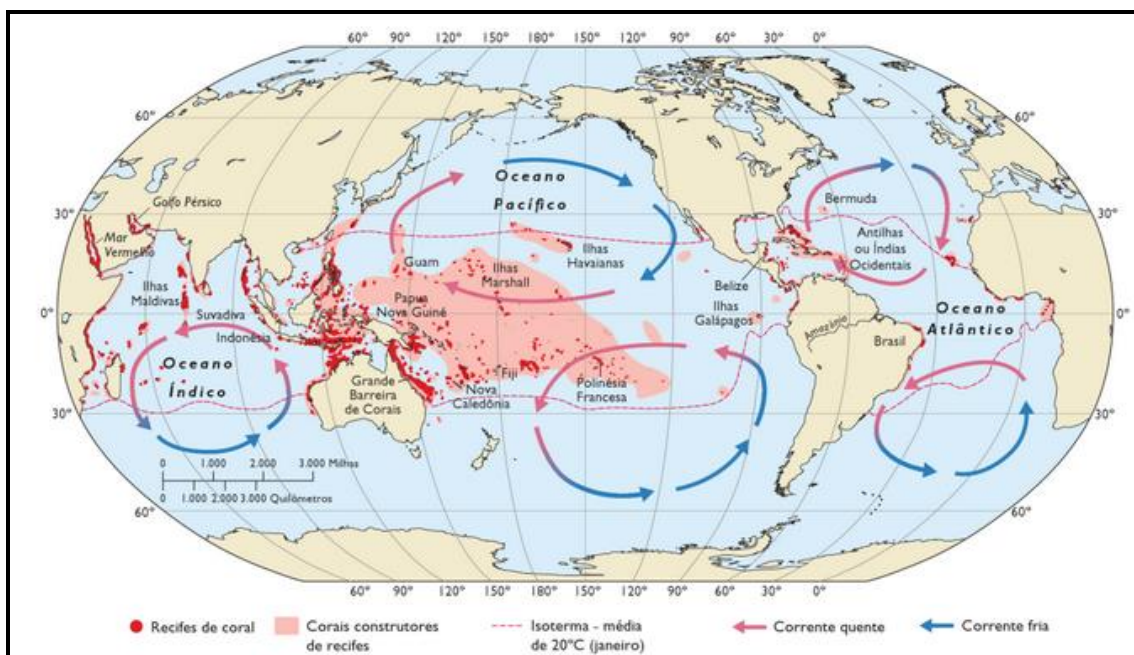


Figura 5: Distribuição de corais, recifes de corais e correntes no mundo.  
Fonte: Castro & Huber (2012).

Na costa brasileira são conhecidos ecossistemas recifais desde o Parcel de Manoel Luís (Maranhão) até os recifes de Viçosa (Bahia) (FERREIRA & MAIDA, 2006). São ainda encontrados corais, embora estes não formem estruturas recifais, desde o Espírito Santo até Santa Catarina (CASTRO & ZILBERBERG, 2016).

Os recifes de corais do Brasil apresentam baixa diversidade de corais, embora o ecossistema seja altamente diverso quando comparado com outros (LEÃO et al., 2003; CASTRO, 2000).

## 2.4 BRANQUEAMENTO DE CORAIS

Estudos apontam que o branqueamento de corais acontece como uma resposta imune do coral em relação às zooxantelas menos resistentes ao estresse ambiental (FREITAS et al., 2012; MARANGONI et al., 2016). Perturbações ambientais desregulam a produção de espécies reativas de oxigênio pelos corais e zooxantelas, logo, os corais expulsam as zooxantelas a fim de remover a fonte de estresse oxidativo (MARANGONI et al., 2016). Como consequência, ocorre a ruptura da relação de simbiose em que a zooxantela fornece ao coral cor e carbono orgânico e o coral fornece proteção e nutrientes

para a microalga (KIKUCHI et al., 2003). Com a eliminação das zooxantelas e a degradação dos pigmentos, o coral perde sua cor usual e passa a apresentar a cor esbranquiçada do esqueleto de carbonato de cálcio (Figura 6) (DOUGLAS, 2003; MARANGONI et al., 2016). Dessa forma, os corais podem ser recolonizados por zooxantelas de clados mais resistentes e, assim, aumentar sua chance de sobrevivência a eventos estressantes mais intensos (FREITAS et al., 2012; PICCIANI et al., 2016). No entanto, os corais morrem se não forem recolonizados por outros clados mais tolerantes (MARSHALL & SCHUTTENBERG, 2006, DOUGLAS, 2003).



Figura 6: Pólipos de colônia de *Mussismilia hartii* branqueados.

Fonte: Coral Vivo (2015).

O branqueamento das colônias de corais pode se dar parcialmente ou totalmente. Essas colônias tornam-se, então, mais suscetíveis às doenças, colonização por algas e bioerosão (WESTMACOTT et al., 2000). Caso a mortalidade das colônias seja intensa, ocorre a mudança de coloração dos pólipos branqueados para castanho-acinzentado devido à fixação de algas (WESTMACOTT et al., 2000) (Figura 7).

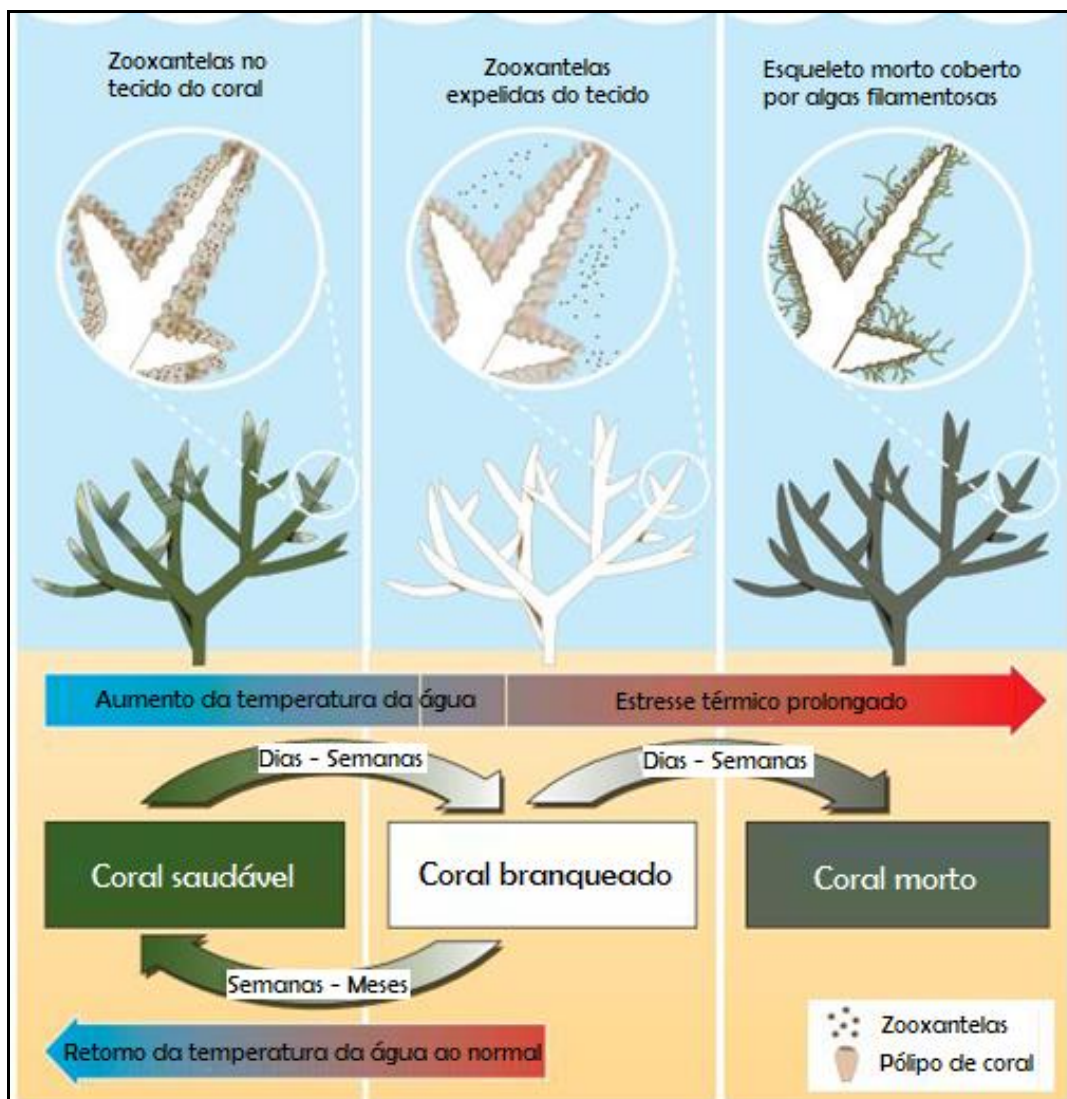


Figura 7: Estágios do branqueamento. Transição de um coral saudável para branqueado em um período de dias ou semanas de temperaturas anômalas e, posteriormente, para coral morto devido ao estresse prolongado. São necessárias semanas ou meses para a recuperação de um coral após cessar a condição estressante.  
 Fonte: Modificado de Marshall & Schuttenberg (2006).

Apesar da tendência histórica de atribuir episódios de branqueamento apenas às anomalias térmicas (DUNNE & BROWN, 2001), outros fatores também podem induzir o branqueamento de corais ao redor do mundo. A rápida queda de temperatura (KOBLOUK & LYSENKO, 1994), a complexa interação entre as anomalias térmica e a radiação fotossinteticamente ativa (DUNNE & BROWN, 2001), a precipitação e a turbidez da água (LEÃO et al., 2010), a exposição aérea dos corais durante marés de sizígia muito baixas (FADLALLAH et al., 1995) e condições de pouco ou nenhum vento (SKIRVING et al., 2006) são alguns dos fatores associados ao branqueamento de corais. Muitos autores

ainda afirmam que espécies diferentes de corais apresentam suscetibilidades distintas ao branqueamento (LOYA et al., 2001; MÓNACO et al., 2012; LEÃO et al., 2008).

O fenômeno de branqueamento de corais pode ocorrer em escala global e local (MARSHALL & SCHUTTENBERG, 2006). Quando em dimensões globais, geralmente, é associado às anomalias térmicas; já em escala regional possui como principal causa o estresse de origem antrópica (WESTMACOTT et al., 2000). A ocorrência conjunta de anomalias térmicas e causas antropogênicas pode se dar de forma sinérgica, sendo as forçantes antrópicas responsáveis pelo aumento da frequência e intensidade dos eventos de branqueamento (GARRIDO et al., 2016; CASTRO & ZILBERBERG, 2016; ALLEMAND et al., 2004; WESTMACOTT et al., 2000).

O desenvolvimento de *hot spots* no oceano pode afetar mais intensamente recifes que já sofrem impactos antropogênicos, pois esses tornam-se mais suscetíveis ao branqueamento devido ao enfraquecimento imposto pelos agentes estressores antropogênicos (WESTMACOTT et al., 2000). Estudos indicam que recifes não impactados por fontes antropogênicas recuperam-se mais facilmente de eventos de branqueamento e apresentam maior resiliência às mudanças climáticas globais (CARILLI et al, 2009; MELLIN et al, 2017).

## 2.5 VARIÁVEIS EXPLICATIVAS

### 2.5.1 Variáveis ambientais de exposição

#### 2.5.1.1 Anomalia térmica da superfície do mar

De acordo com a literatura, a anomalia térmica / elevação da temperatura da superfície do mar é a variável que melhor explica o branqueamento de corais (GLYNN, 1991; GOREAU & HAYES, 1994; DONNER et al., 2005; BURKE et al., 2011). Tal importância deve-se ao fato dos recifes de corais serem altamente sensíveis às mudanças na temperatura do mar, com condições ótimas de sobrevivência variando entre 26 e 28 °C (MACHADO et al., 2016; MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2009).

### 2.5.1.2 Radiação fotossinteticamente ativa

A radiação fotossinteticamente ativa também é uma variável ambiental importante no desencadeamento do branqueamento de corais. Muitos autores relacionaram o efeito combinado do aumento da temperatura da água do mar com o excesso de radiação solar como causa de eventos de branqueamento de corais (DUNNE & BROWN, 2001; FREITAS et al., 2012; WINTER et al., 2016).

### 2.5.1.3 Magnitude do vento

Ao soprar na superfície do mar, o vento causa a transferência de momento para a coluna d'água por meio de difusão turbulenta (SKIRVING et al., 2006). Condições de pouco ou nenhum vento favorecem o branqueamento de corais, uma vez que não há mistura vertical da coluna d'água que foi aquecida na superfície pela energia solar (SKIRVING et al., 2006).

## 2.5.2 Variáveis antropogênicas de exposição

### 2.5.2.1 Distância dos recifes de corais às áreas urbanas

A eliminação dos resíduos não tratados dos centros urbanos na região costeira desequilibra o ecossistema recifal e reduz a sua resiliência às perturbações ambientais (LEÃO et al., 2016; HORTA et al., 2016). Recifes localizados mais próximos da costa do estado da Bahia sofrem branqueamento de corais sob condições de anomalias térmicas menores que os recifes mais distantes da costa (Leão et al., 2008).

### 2.5.2.2 Distância dos recifes de corais às hidrovias

A navegação torna os ecossistemas recifais suscetíveis à contaminação crônica e aguda por óleo causada por pequenos vazamentos nos navios, lavagem de tanques e despejo de resíduos no mar (LOPES, 2007). O transporte de óleo próximo à região de Abrolhos ameaça ambientes sensíveis, como o complexo recifal de Abrolhos, reduzindo a capacidade dos organismos

de sobreviverem a outros distúrbios ambientais (JABLONSKI, 2008; LOPES, 2007).

#### 2.5.2.3 Distância dos recifes de corais ao porto

Nas últimas décadas, o aumento da sedimentação terrígena na proximidade dos recifes costeiros de Abrolhos indica que forçantes antropogênicas, como a dragagem, podem influenciar negativamente os recifes de Abrolhos (SILVA et al., 2013). Pollock et al. (2014) relacionaram o branqueamento de corais e as operações de dragagem na Austrália e sugeriram que se a energia utilizada para auto-limpeza dos corais não for fornecida pela heterotrofia e depressão metabólica, o branqueamento pode evoluir para mortalidade de corais.

#### 2.5.2.4 Presença de unidades de conservação

De acordo com Vila-Nova & Ferreira (2016), as unidades de conservação marinha beneficiam os recifes de corais, uma vez que o acesso e as atividades são regulamentados dentro dos limites das áreas protegidas. No Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, a pesca é proibida e, portanto, podem ser preservados os estoques de peixes herbívoros que controlam a proliferação de algas que competem por espaço com os corais (VILA-NOVA & FERREIRA, 2016). A sobrepesca, o crescimento desordenado de algas e a poluição diminuem a resistência dos corais aos eventos de branqueamento (ESCOBAR, 2016). Estudos realizados nos recifes da Grande Barreira de Corais e no Caribe apontam que recifes inseridos em áreas marinhas protegidas apresentam maiores taxas de resistência e resiliência aos distúrbios ambientais (MUMBY & HARBORN, 2010, MELLIN et al 2016). A existência de unidades de conservação não protege os corais dos efeitos diretos induzidos pelo clima (HUGHES et al 2003, KNOWLTON & JACKSON, 2008). No entanto, pode resultar em menos colônias de corais afetadas do que ambientes fragilizados que sofrem com distúrbios climáticos e antrópicos (MELLIN et al, 2016).

### 2.5.3 Experimentos anteriores disponíveis na literatura

A Tabela 1 apresenta experimentos *in situ* e laboratoriais que evidenciam a influência das variáveis citadas anteriormente no desencadeamento do branqueamento de corais.

**TABELA 1 - RELAÇÃO DAS VARIÁVEIS USADAS EM EXPERIMENTOS *IN SITU* E LABORATORIAIS EM ESTUDOS SOBRE BRANQUEAMENTO DE CORAIS.**

<b>Escala</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Tipo de dado</b>	<b>Fonte</b>
Nacional	Anomalia térmica, radiação PAR, magnitude do vento, radiação UV e clorofila	Consulta a especialistas em recifes de corais e literatura ( <i>Expert driven</i> ), Análise espacial de componentes principais e relações paramétricas <i>fuzzy</i> em conjunto com processo analítico hierárquico ( <i>Data driven</i> ).	Maina et al (2008)
Nacional	Anomalia térmica, clorofila-a e áreas marinhas protegidas	Relaciona a magnitude do branqueamento com a variação de temperatura da superfície do mar, áreas protegidas e qualidade da água ( <i>Data driven</i> ).	Hughes et al (2017)
Regional	Anomalia térmica, temperatura máxima, velocidade do vento, K490, precipitação e índices ENSO	Redes bayesianas ( <i>Data driven</i> ) com conhecimento de especialistas ( <i>Expert driven</i> ).	Krug et al (2013)
Regional	Áreas urbanas	Monitoramento em campo dos índices de vitalidade dos corais ( <i>Data driven</i> ).	Kikuchi et al (2010)
Regional	Vento	Modelo hidrodinâmico para avaliar a capacitância térmica da região a partir do nível de estabilidade da coluna d'água.	Skirving et al, 2006
Local	Presença de áreas marinhas protegidas	Experimentos <i>in situ</i> para analisar o efeito de peixes herbívoros sobre a resiliência de corais aos eventos de branqueamento ( <i>Data driven</i> ).	Hughes et al (2006); Mumby & Harborne (2010); Mellin et al (2016)
Local	Presença de porto	Pesquisa <i>in situ</i> sobre a incidência de doenças e branqueamento em corais devido à pluma de sedimentos de dragagem ( <i>Data driven</i> )	Pollock et al (2014)
Local	Suscetibilidade específica	Medição da espessura do tecido de diferentes espécies e monitoramento em campo com base no número de colônias branqueadas e na intensidade do branqueamento em cada espécie ( <i>Data driven</i> ).	Loya et al. (2001); Mónaco et al. (2012)
Local	Poluição por óleo	Pesquisa <i>in situ</i> sobre o efeito crônico da poluição por óleo com consequente redução da cobertura de coral e número de juvenis de corais ( <i>Data driven</i> ).	Bak (1987)
Experimento laboratorial	Poluição por óleo	Simulações da poluição crônica por óleo em tanques concluíram que o óleo afeta a reprodução e a recolonização dos corais ( <i>Data driven</i> ).	Rinkevich & Loya (1979)

---

Experimento laboratorial	Temperatura e radiação PAR	Monitoramento da resposta dos corais em diferentes temperaturas e radiação fotossinteticamente ativa ( <i>Data driven</i> )	Winter et al (2016); Lesser e Farrell (2004)
--------------------------	----------------------------	---	--

---

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O complexo recifal de Abrolhos localiza-se na porção norte do Banco de Abrolhos, em uma área de 6.000 km<sup>2</sup>, inserida entre as latitudes 17°20' e 18°10'S e longitudes 38°35' e 39°20'W (Figura 8) (FERREIRA & GONÇALVES, 1999; LEÃO, 1999). Enquanto a maior parte da plataforma continental brasileira apresenta larguras irregulares e reduzidas (~50 km), o Banco de Abrolhos consiste em uma expansão dessa plataforma que atinge aproximadamente 200 km nas adjacências do município de Caravelas (LEÃO, 1999).

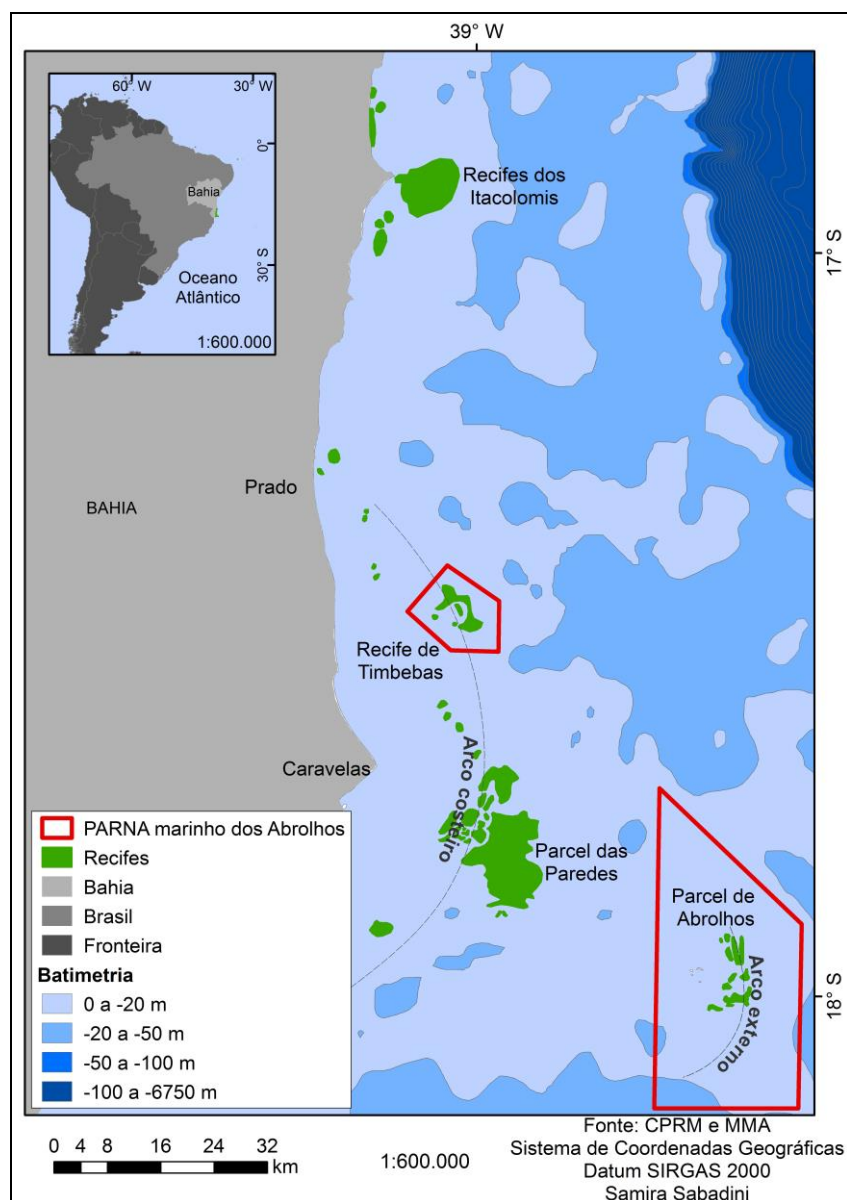


Figura 8: Mapa de localização da área de estudo.

O banco de Abrolhos possui área de aproximadamente 46.000km<sup>2</sup> distribuídos em 409 km de linha de costa desde o município de Prado (BA) até a foz do rio Doce (ES) (MARCHIORO et al., 2005).

Inserido nos limites do Banco de Abrolhos, está o primeiro Parque Nacional (PARNA) Marinho do Brasil que foi criado por meio do Decreto nº 88.218 em 06 de abril de 1983, compreendendo os recifes de Timbebas, as ilhas vulcânicas Siriba, Sueste, Redonda e Guarita e o Parcel de Abrolhos (BRASIL, 1983; INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS, 1991).

Os recifes de corais de Abrolhos são formados por pináculos coralíneos conhecidos como chapeirões (Figura 9) (FERREIRA & GONÇALVES, 1999; LEÃO et al., 2003). Esses chapeirões, não encontrados em nenhum outro recife do mundo, apresentam formato cogumelar que pode variar em altura (menos de 1 m até 25 m) e largura (menos de 1 m até 50 m) (LEÃO et al., 2003).

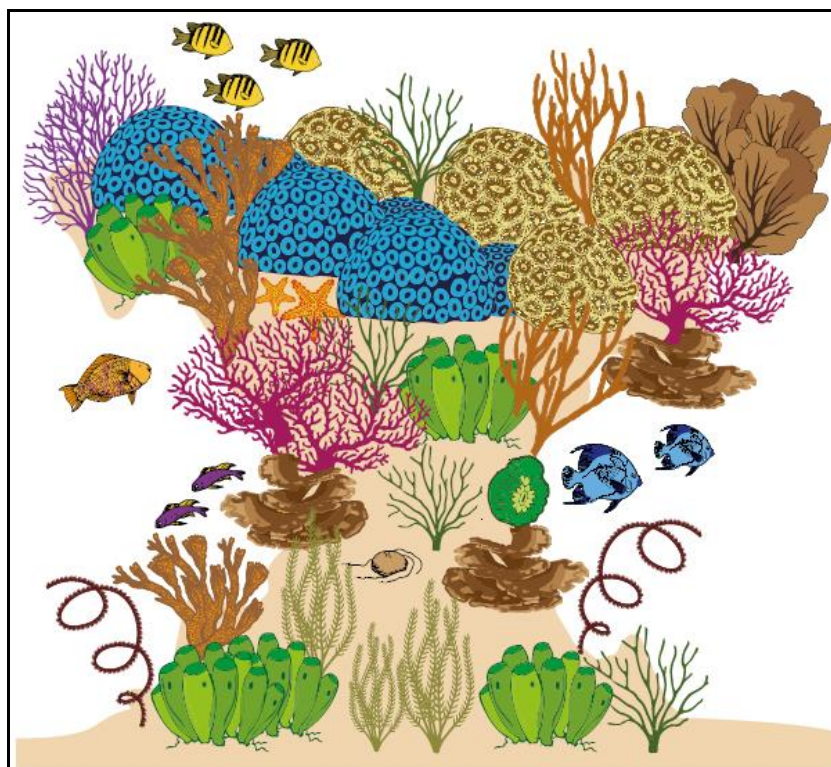


Figura 9: Desenho esquemático dos pináculos conhecidos como chapeirões.

Fonte: Seoane & Barbosa (2016).

Os recifes de Abrolhos dão forma a dois arcos orientados quase paralelamente à linha de costa: Arco costeiro e arco externo (LEÃO, 1999). O Arco Costeiro, distante aproximadamente 10 a 20 km da linha de costa, é composto por pináculos coralíneos e bancos recifais formados pela fusão de chapeirões (LEÃO, 1999; LEÃO et al., 2003). Já o arco externo, situado a aproximadamente 70 km da linha de costa, é constituído por numerosos chapeirões gigantes e isolados localizados em profundidades maiores que 20 m (LEÃO, 1999; LEÃO et al., 2016). O arquipélago de Abrolhos, localizado a cerca de 5 km a oeste do Parcel dos Abrolhos, é constituído por cinco ilhas vulcânicas que são bordejadas por recifes em franja incipientes (LEÃO et al., 2003).

A porção interna da plataforma continental e o entorno dos recifes do arco costeiro apresentam dominância de sedimentos siliciclásticos retrabalhados após a erosão da Formação Barreiras ou de origem fluvial (LEÃO & GINSBURG, 1997). Nos recifes e no entorno do arco externo há predominância de sedimentos carbonáticos, podendo ser desde fragmentos de organismos carbonáticos até o esqueleto de organismos vivendo no recife (LEÃO & GINSBURG, 1997). A costa brasileira adjacente ao Estado da Bahia é marcada pela ocorrência da Formação Barreiras com distribuição irregular ao longo do litoral, além de afloramentos do Embasamento Cristalino e depósitos sedimentares datados do quaternário (TESSLER & GOYA, 2005).

O clima da costa oriental brasileira é tropical úmido e a temperatura da superfície do mar varia entre 24°C no inverno a 28°C no verão (KELMO et al., 2003; LEÃO et al., 2003; LEÃO et al., 2010).

Na região *offshore* adjacente ao Estado da Bahia flui a corrente do Brasil (Figura 10), uma corrente de borda oeste fraca quando comparada com a Corrente do Golfo (SILVEIRA et al., 2000). Essa corrente está associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul e origina-se da bifurcação da Corrente Equatorial Sul em Corrente Norte do Brasil e Corrente do Brasil abaixo de 10° de latitude que fluem em direção ao norte e Sul, respectivamente (STRAMMA, 1991; PETERSON & STRAMMA, 1991).

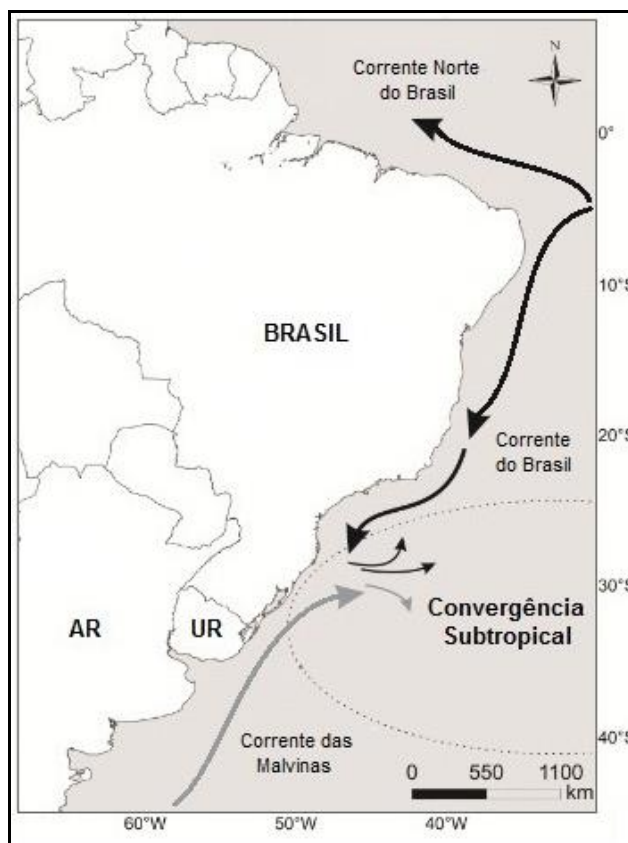


Figura 10: Circulação oceânica no Brasil.  
 Fonte: Centro de Estudos Costeiros, Limnológicos e Marinhos/UFRGS.

## 3.2 BASE DE DADOS

### 3.2.1 Temperatura da superfície do mar

As imagens diárias referentes à temperatura da superfície do mar (TSM) foram obtidas pelo radiômetro AVHRR (*Advanced Very-High Resolution Radiometer*). Essas imagens são disponibilizadas pelo NCEI (*National Centers for Environmental Information*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) em sua segunda versão no site <ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/NetCDF/>. Possuem unidade de medida em °C, resolução radiométrica de 32 bits e resolução espacial de 25 km.

### 3.2.2 Magnitude do vento

As imagens mensais referentes à magnitude do vento, a 10 metros da superfície do mar, foram obtidas do projeto de reanálises NCEP/NCAR (*National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research*) desenvolvido pela NOAA/OAR/ESRL PSD. Esses dados possuem unidade de medida em  $m.s^{-1}$ , resolução radiométrica de 32 bits, resolução espacial de  $1,875^\circ$  e estão disponíveis no *site* <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>.

### 3.2.3 Radiação fotossinteticamente ativa

As imagens diárias referentes à radiação fotossinteticamente ativa (PAR) foram obtidas pelos sensores SeaWiFS (para o ano de 2001) e MODIS-Aqua (para os demais anos) do *NASA Goddard Space Flight Center's Ocean Data Processing System* e estão disponíveis em: <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS/L3SMI> e <https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/L3SMI>. Possuem unidade de medida em  $einstein.m^{-2}.dia^{-1}$ , resolução radiométrica de 32 bits e resolução espacial de 9km.

### 3.2.4 Anomalia térmica da superfície do mar acumulada em períodos de 5 ou mais dias consecutivos

As imagens diárias referentes à anomalia térmica da superfície do mar foram produzidas pela NOAA a partir da série histórica de imagens de temperatura da superfície do mar entre 1971 e 2000 obtidas pelo radiômetro AVHRR (*Advanced Very-High Resolution Radiometer*). Essas imagens são disponibilizadas pelo PSD (*Physical Sciences Division*) da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*) no *site* <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>. Possuem unidade de medida em  $^\circ C$ , resolução radiométrica de 32 bits e resolução espacial de 25 km.

### 3.2.5 Distância dos recifes às áreas urbanas

O arquivo em formato *shapefile* referente às áreas urbanas foi obtido do *site* <http://maps.csr.ufmg.br/>. O *shapefile* das áreas urbanas do Brasil foi produzido pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais a partir dos setores censitários urbanos mapeados pelo IBGE em 2010 (INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA, 2010).

### 3.2.6 Distância dos recifes às hidrovias e ao porto de Caravelas

Os arquivos em formato *shapefile* referentes às hidrovias e ao porto de Caravelas foram disponibilizados pela ANTAQ (Agência Nacional de Transportes Aquaviários) e podem ser obtidos no *site* <http://www.antaq.gov.br/portal/PNIH.asp/>.

### 3.2.7 Presença de unidades de conservação

O arquivo em formato *shapefile* referente aos limites do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos e da Reserva Extrativista Marinha do Corumbau foi disponibilizado pelo MMA (MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, 2016) e pode ser obtido no *site* <http://mapas.mma.gov.br>. O *shapefile* referente ao PARNA marinho dos Abrolhos consiste em dois polígonos, um limita os recifes de Timbebas e o outro o Parcel dos Abrolhos e o arquipélago.

## 3.3 MODELO CONCEITUAL E ETAPAS DA MODELAGEM

A Figura 11 apresenta o modelo conceitual da suscetibilidade dos recifes de Abrolhos aos eventos de branqueamento de corais.

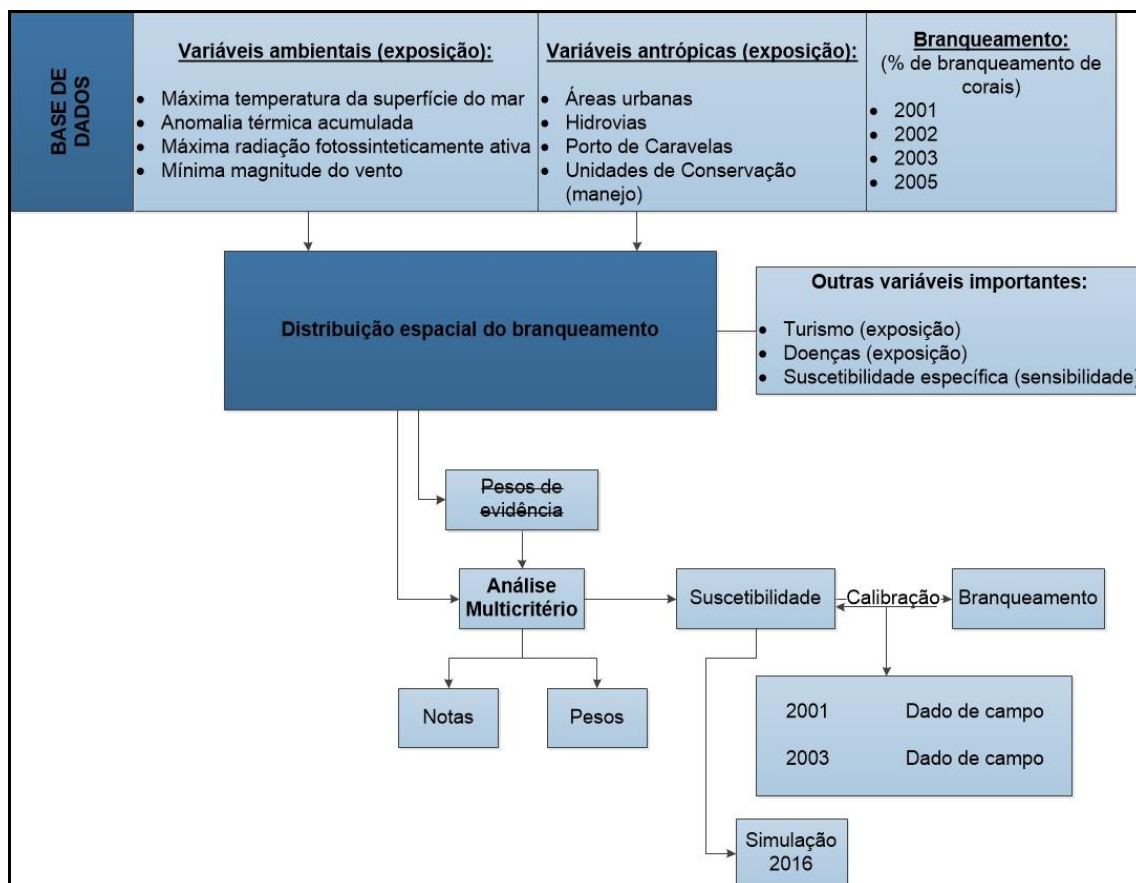


Figura 11: Modelo conceitual.

De acordo com o exposto por diversos autores e mencionado na revisão bibliográfica (capítulo 2) como fatores influenciadores do fenômeno de branqueamento de corais, este trabalho inclui como variáveis ambientais de exposição: a máxima temperatura da superfície do mar, a anomalia térmica da superfície do mar acumulada em períodos de 5 ou mais dias consecutivos, a máxima radiação fotossinteticamente ativa e a mínima magnitude do vento.

Também foram incorporadas ao modelo as variáveis antropogênicas de exposição que aumentam a suscetibilidade ao branqueamento de corais, uma vez que, como também mencionado na revisão bibliográfica (capítulo 2), reduzem a resistência desses às perturbações ambientais. As variáveis antropogênicas consideradas no modelo são: distância dos recifes às áreas urbanas, hidrovias, porto de Caravelas e presença de unidades de conservação. Sabe-se que outras variáveis como a pressão do turismo, doenças e a suscetibilidade específica de diferentes espécies de corais são variáveis importantes, mas que ainda não estão disponíveis.

Como variável dependente, utilizou-se as porcentagens de branqueamento de corais registradas no estudo de Kikuchi et al. (2010). É importante notar que os dados publicados sobre branqueamento de corais em Abrolhos são limitados. Atualmente, existem dados até 2005 publicados por Kikuchi et al. (2010) que foram utilizados nesse trabalho. Os dados coletados nos eventos de 2010 e 2016 estão em revisão e verificação cruzada. Apesar do alto custo envolvido em expedições de mergulho com fins científicos e da necessidade de capacitação da equipe envolvida neste tipo de pesquisa, a continuidade desse monitoramento é de fundamental importância para acompanhar o comportamento dos recifes de Abrolhos em antecipação às mudanças climáticas previstas para as próximas décadas.

Utilizando os dados disponíveis, o modelo foi calibrado usando os anos de 2001 e 2003 a fim de se obter como resultado um mapa de suscetibilidade ao branqueamento compatível com os dados obtidos em campo por Kikuchi et al. (2010). Posteriormente, foi realizada a simulação da suscetibilidade dos recifes no verão de 2016. As estimativas de 2016 ainda não foram validadas, pois não há dados publicados sobre a porcentagem de branqueamento nesse ano.

Com base nas variáveis acima mencionadas, a distribuição espacial da suscetibilidade dos corais de Abrolhos aos eventos de branqueamento foi realizada utilizando o método de análise multicritério que atribui notas e pesos às variáveis. Embora tenhamos tentado obter os pesos através do método dos pesos de evidência, este método não se mostrou eficaz devido à reduzida variabilidade espacial dos dados.

Utilizou-se o DINAMICA EGO (<http://csr.ufmg.br/dinamica>) que é uma plataforma de modelagem para a criação de modelos ambientais que permite modelagem dinâmica incorporando iterações, matrizes de transição, *feedback*, regionalização e bifurcação de processos (SOARES-FILHO et al. 2013).

A Figura 12 apresenta o fluxograma das etapas da modelagem.

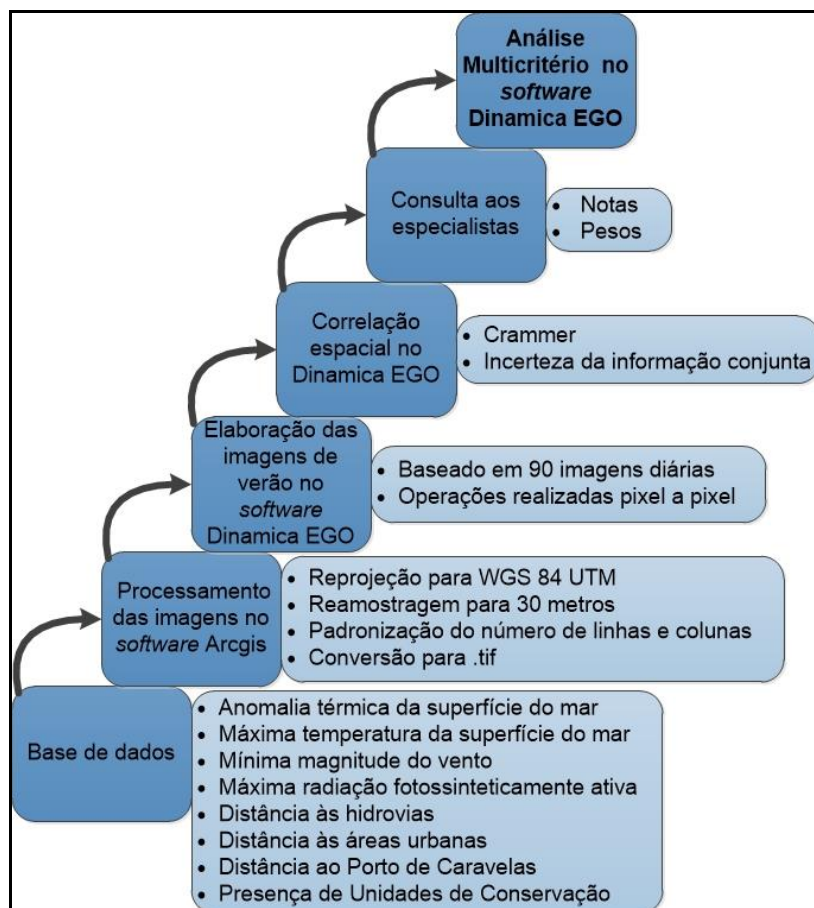


Figura 12: Fluxograma das etapas da modelagem.

Primeiramente, foi realizado o *download* da base de dados e então o processamento das imagens que consistiu na reprojecção dos dados para o sistema de projecção UTM e datum WGS 84, reamostragem das imagens para 30 metros, recorte da área de estudo para padronizar o número de linhas e colunas e conversão da imagem para o formato .tif (requisito do *software* DINAMICA EGO).

Após a padronização das imagens, foi realizada a construção das imagens para cada variável referentes ao verão de cada ano estudado (APÊNDICES A - D). A construção da imagem de verão foi realizada mantendo o maior valor de pixel entre as imagens diárias para a temperatura máxima da superfície do mar e para a máxima radiação fotossinteticamente ativa como apresentado na Figura 13.

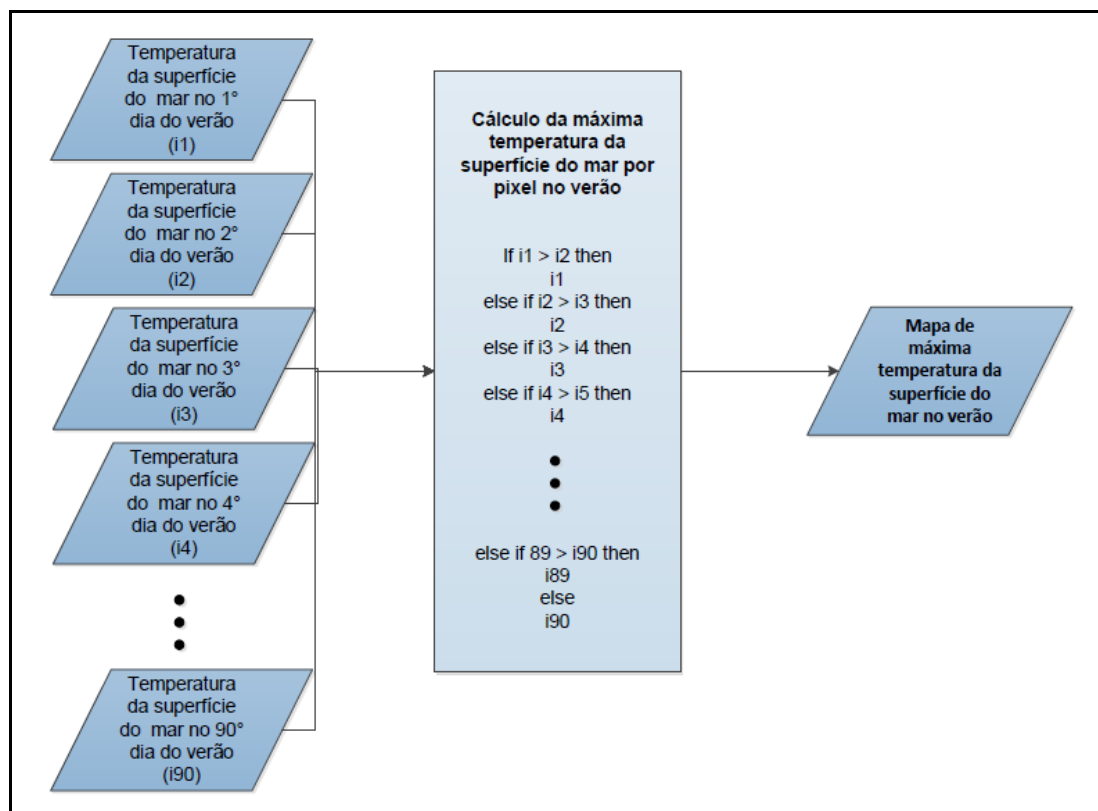


Figura 13: Esquema do cálculo da máxima temperatura da superfície do mar no verão. O esquema da máxima radiação fotossinteticamente ativa é idêntico ao da máxima temperatura da superfície do mar.

A construção da imagem de verão da mínima magnitude do vento foi realizada mantendo o menor valor de pixel entre as imagens das médias de cada mês como apresentado na Figura 14.

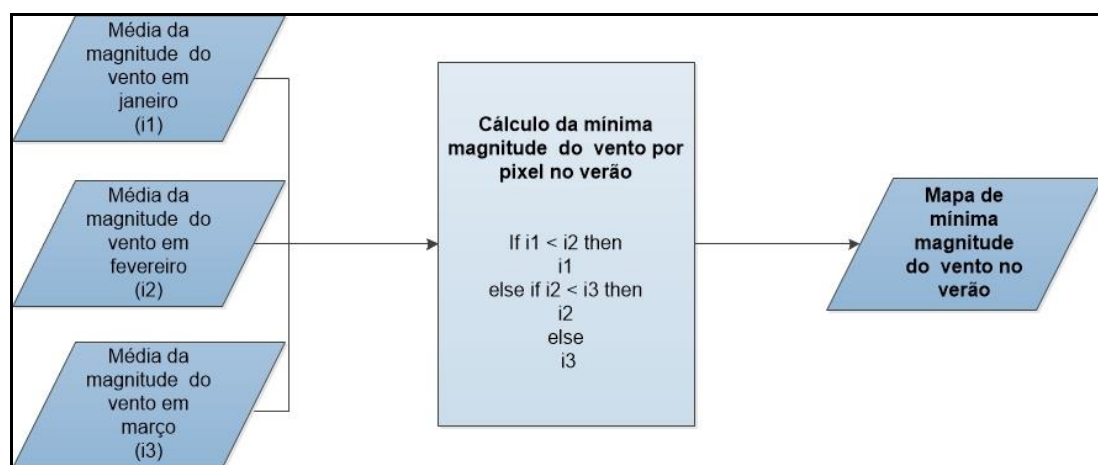


Figura 14: Esquema do cálculo da mínima magnitude do vento no verão.

A persistência de temperaturas acima da média climatológica foi incluída no modelo a partir da variável de anomalia térmica acumulada em períodos de 5 ou mais dias consecutivos. Para a construção da imagem referente ao período de verão foram selecionadas dentre as imagens diárias de anomalia térmica

apenas aquelas que faziam parte de uma sequência de 5 ou mais dias consecutivos de anomalias térmicas positivas nos recifes. Para os casos em que algum recife apresentou valores negativos de anomalia térmica, foi necessário converter os valores negativos em zero, pois nesses casos não havia contribuição de anomalia positiva e os valores negativos prejudicariam o acumulado de outros dias. Foi realizado então o somatório dos valores de anomalia térmica, pixel a pixel, e então gerado o mapa de anomalia térmica acumulada no verão de determinado ano (Figura 15).

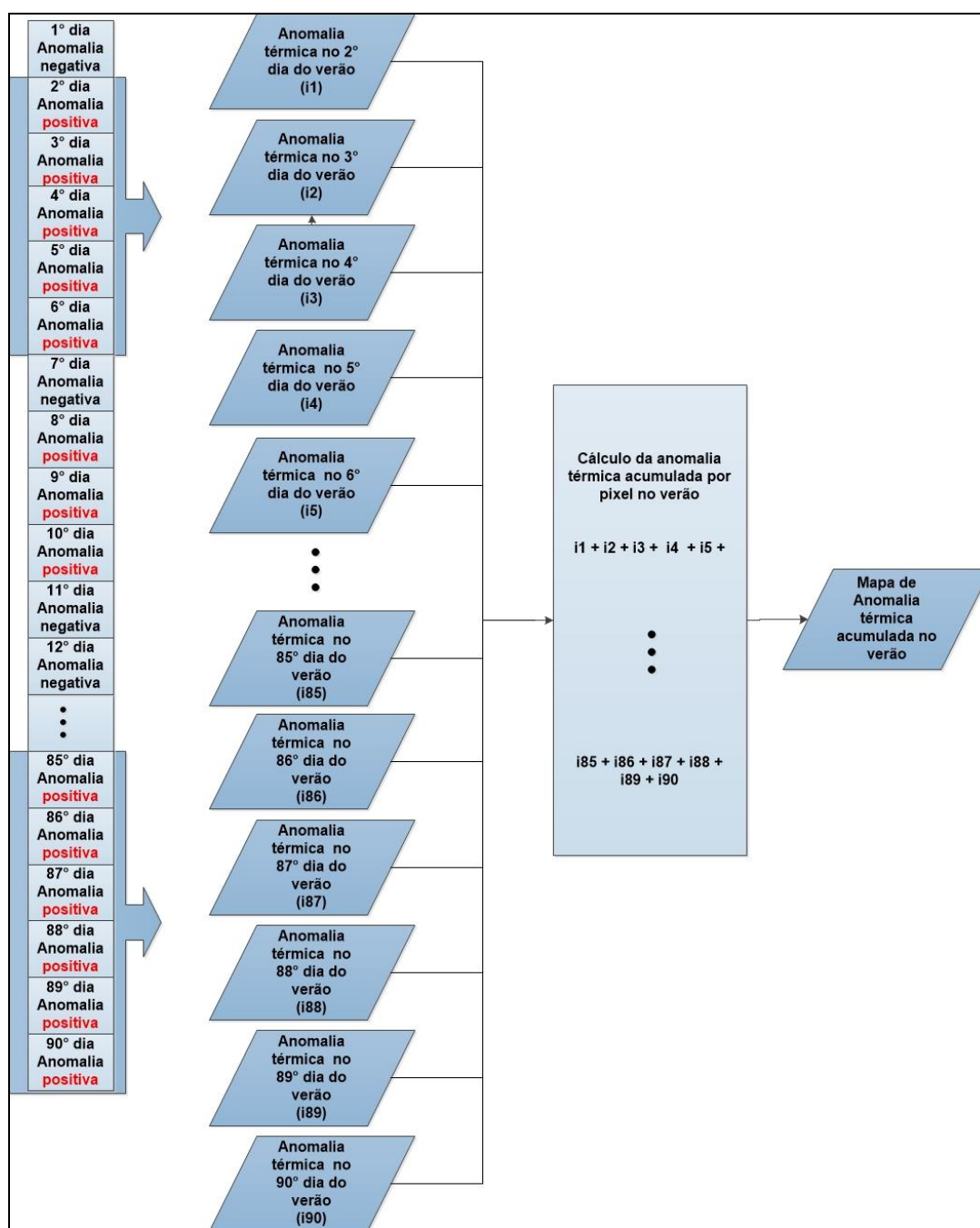


Figura 15: Esquema do cálculo da anomalia térmica acumulada no verão.

No *software* DINAMICA EGO foram calculadas as distâncias euclidianas, em metros, entre cada célula do mapa e às hidrovias, áreas urbanas e o porto de Caravelas (APÊNDICE E). Esses mapas foram utilizados para a modelagem de todos os anos estudados, com exceção do mapa de distâncias ao porto de Caravelas que foi utilizado a partir da modelagem de 2003 (ano de implantação do porto). Para gerar o mapa referente à presença de unidades de conservação foram atribuídos valores referentes a cada classe: ausência de unidade de conservação, presença de unidade de conservação de uso sustentável com e sem exclusão de pesca e unidade de conservação de proteção integral (APÊNDICE F).

Em seguida, foi verificado se havia correlação espacial entre as imagens de verão referentes a cada variável a partir do teste de Crammer e da incerteza da Informação conjunta. A etapa de análise de correlação entre variáveis é realizada a fim de que só sejam mantidos no modelo variáveis espacialmente independentes (SOARES-FILHO et al., 2009). A análise de correlação espacial indicou que as variáveis em questão são espacialmente independentes (APÊNDICE G).

Foi então realizada a etapa de consulta aos especialistas e à literatura para que fossem atribuídas notas e pesos às variáveis. Os especialistas Zelinda M. A. N. Leão e Ruy K. P. Kikuchi são pesquisadores da Universidade Federal da Bahia que desenvolvem pesquisas sobre o branqueamento de corais em Abrolhos desde 2000. Aos especialistas foram apresentadas as variáveis explicativas e seus respectivos intervalos e solicitado que atribuíssem pesos de acordo com a influência que cada variável apresenta no branqueamento e notas a cada intervalo das variáveis. Por fim, foi então construído o modelo de análise multicritério no DINAMICA EGO como apresentado na Figura 16.

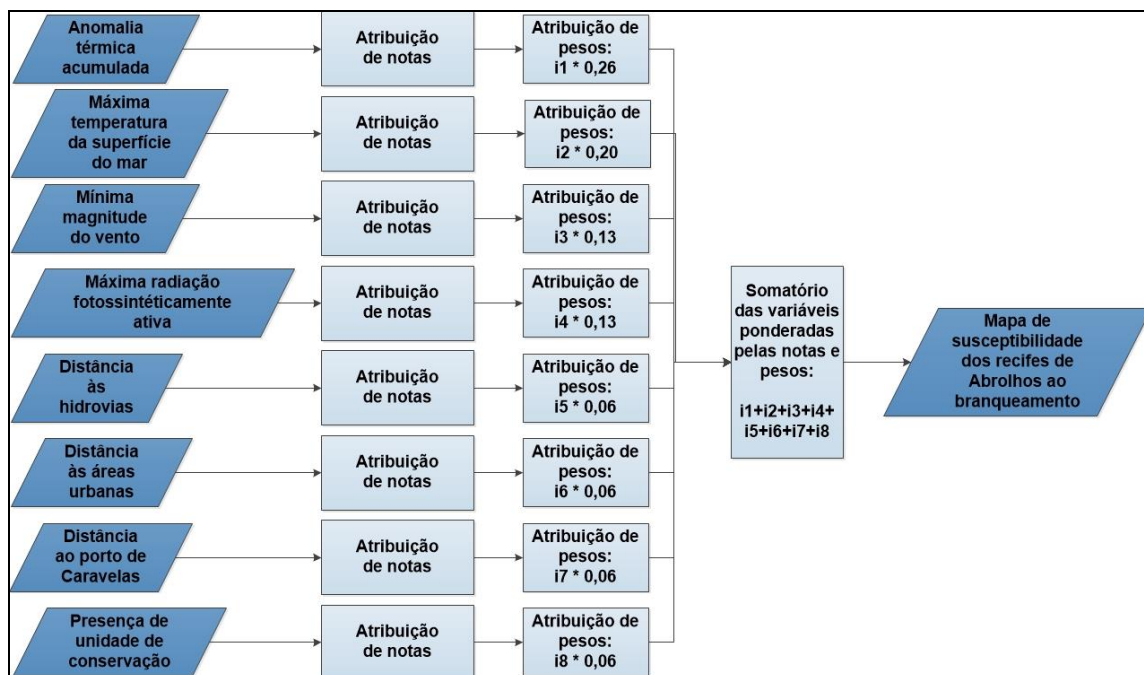


Figura 16: Modelo de análise multicritério da susceptibilidade dos recifes de corais ao fenômeno de branqueamento.

No modelo, foram carregados os mapas referentes a cada variável no verão de determinado ano, os mapas de distâncias e da presença de unidade de conservação. Foram atribuídas notas para cada classe de cada variável e pesos para cada variável conforme definido anteriormente. Por fim, foi calculado o somatório das variáveis já ponderadas que resultou no mapa de susceptibilidade dos recifes de Abrolhos ao branqueamento.

Primeiramente, foi realizada a modelagem para os anos de 2001, 2002, 2003 e 2005 buscando obter como resultado um mapa de susceptibilidade de branqueamento compatível com os dados obtidos em campo por Kikuchi et al. (2010). Posteriormente, foi realizada a simulação da susceptibilidade dos recifes no verão de 2016.

## 4. RESULTADOS

### 4.1 RESULTADO DA ANÁLISE DESCRITIVA

Foi realizada a análise descritiva da variável dependente (% de branqueamento de corais) e variáveis ambientais e antropogênicas independentes em 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016. Os valores máximo, mínimo, médio, desvio padrão, mediana e variância, calculados para cada recife, são apresentados nos APÊNDICES H - N.

### 4.2 RESULTADO DA ANÁLISE DE VARIABILIDADE TEMPORAL DOS DADOS

A intensidade do branqueamento de corais é influenciada pelo ano de ocorrência (Kruskall-Wallis,  $H(3) = 15,326$ ,  $p = 0,002$ ). A figura 17 apresenta o gráfico *box plot* da variável dependente.

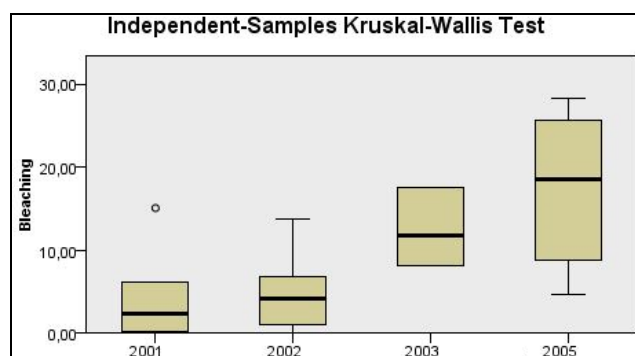


Figura 17: *box plot* da variável dependente.

As variáveis anomalia térmica (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 37,007$ ,  $p = 0,000$ ), máxima temperatura da superfície do mar (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 39,262$ ,  $p = 0,000$ ), máxima PAR (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 35,865$ ,  $p = 0,000$ ) e mínima magnitude do vento (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 36,728$ ,  $p = 0,000$ ) também são influenciadas pelo ano de ocorrência. A figura 18 apresenta o gráfico *box plot* das variáveis ambientais independentes.

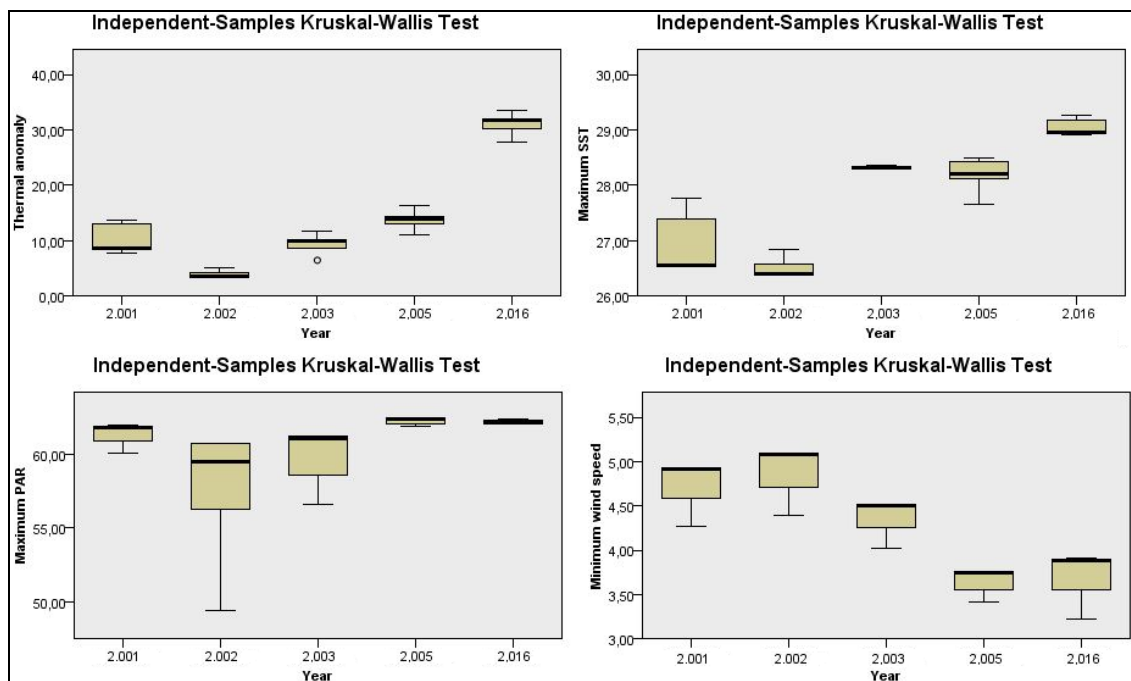


Figure 18: *box plot* das variáveis ambientais independentes.

### 4.3 RESULTADO DA CONSULTA AOS ESPECIALISTAS

A Figura 19 apresenta as notas e pesos obtidos da consulta aos especialistas e literatura que foram utilizados na análise multicritério. Os maiores pesos foram atribuídos às variáveis anomalia térmica acumulada (0,26) e máxima temperatura da superfície do mar (0,20). Seguidos pela mínima magnitude do vento e radiação fotossinteticamente ativa (0,13 para ambos). As variáveis antrópicas, embora aumentem a vulnerabilidade dos corais, não atuam diretamente no desencadeamento do branqueamento, recebendo assim o menor peso (0,06), pois apresentam menor influência no fenômeno. As notas para cada classe de variáveis variam de 0 (Menor influência) a 10 (Maior influência). Finalmente, foi sugerida uma escala de suscetibilidade variando de 0 (muito baixa) a 10 (muito alta).

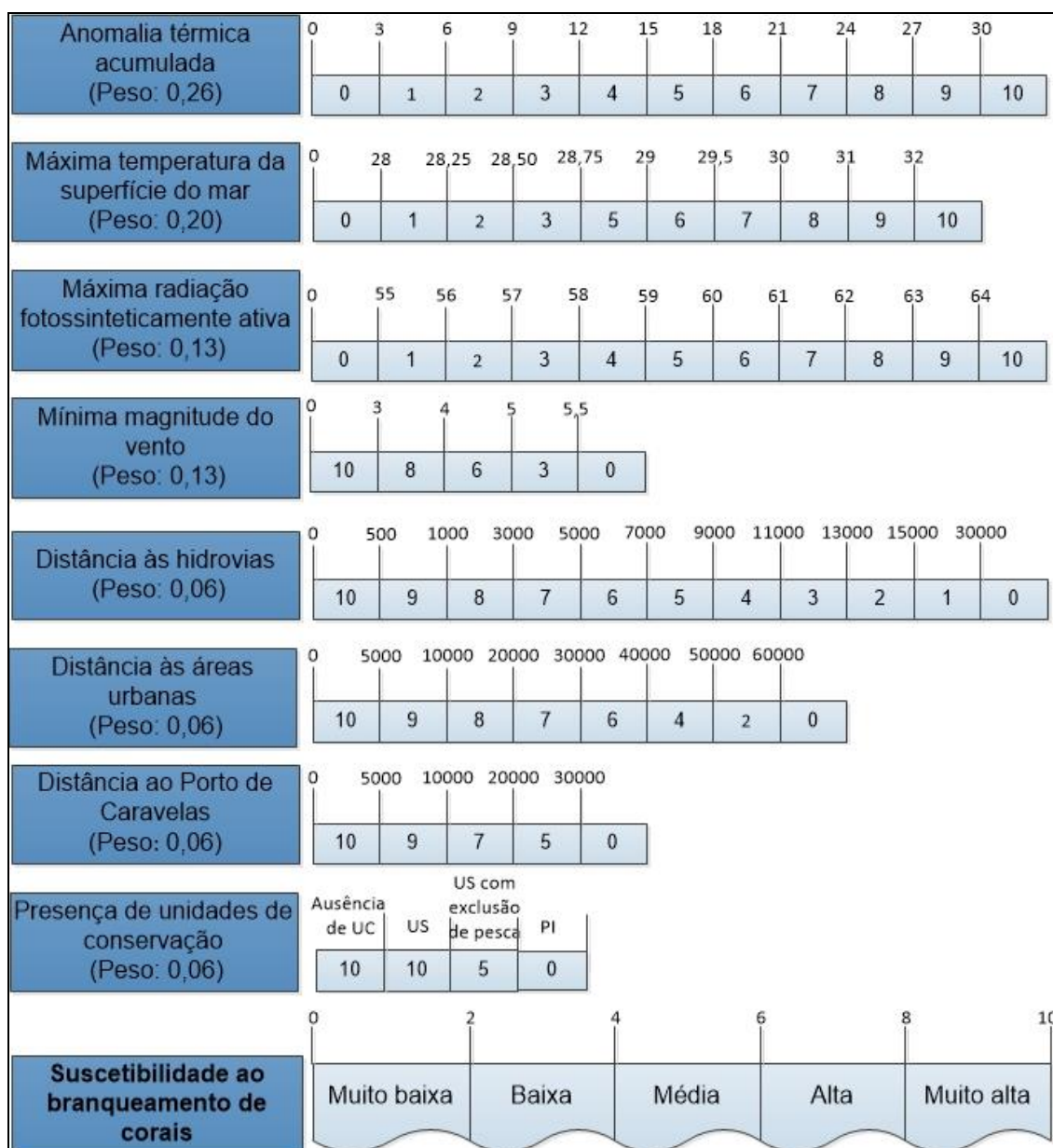


Figura 19: Notas e pesos atribuídos às variáveis. A variável distância ao Porto de Caravelas foi utilizada na modelagem a partir do ano 2003, ano de implementação do porto. UC = Unidade de conservação; US = Unidade de conservação de uso sustentável; PI = Unidade de conservação de proteção integral.

#### 4.4 RESULTADO DA ANÁLISE DE SENSIBILIDADE

A análise de sensibilidade do modelo foi realizada em relação aos pesos atribuídos a cada variável explicativa. Os modelos foram gerados para mostrar o efeito da remoção (peso de 0%) e a atribuição de 5, 25, 50 e 75% do peso total do modelo para cada variável. A Figura 20 mostra a variação da sensibilidade de cada variável obtida a partir da matriz de correlação espacial entre cada modelo gerado e o modelo utilizado no estudo.

A análise de sensibilidade mostrou que o modelo é insensível a variação dos pesos da variável vento em ambos os casos, ano de branqueamento fraco (2003) e forte (2005), devido à ausência de variação espacial dessa variável. Em anos de menores temperaturas da superfície do mar como em 2003, a ausência de variação espacial também tornou o modelo insensível a essa variável. No entanto, essas apresentam influência no modelo quando a variação temporal do fenômeno é analisada (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 39,262$ ,  $p = 0,000$  para a máxima temperatura da superfície do mar e Kruskall-Wallis,  $H(4) = 36,728$ ,  $p = 0,000$  para a mínima magnitude do vento).

O modelo apresentou reduzida sensibilidade em relação a variável anomalia térmica acumulada, o que indica menor nível de incerteza em relação a esse parâmetro que é o principal considerado nesse modelo e em vários outros (KRUG et al., 2013; MAINA et al., 2009, HUGUES et al., 2017).

O modelo apresentou maior sensibilidade em relação às variáveis antrópicas, principalmente UC e hidrovias. Portanto, optou-se por uma abordagem mais conservadora com menores pesos atribuídos as variáveis antrópicas que apresentam as maiores incertezas do modelo. Também foi levado em consideração que as variáveis antrópicas não atuam diretamente no desencadeamento do branqueamento de corais, mas apresentam papel secundário ao aumentar a vulnerabilidade dos corais ao fenômeno.

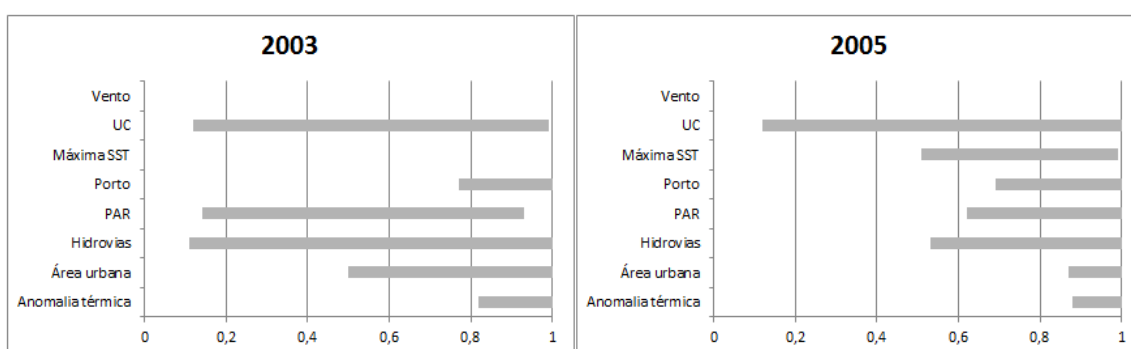


Figura 20: Análise de sensibilidade do modelo.

#### 4.5 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DA SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2001

A Figura 21 mostra os resultados da análise multicritério para o ano de 2001. A simulação feita para o ano de 2001 concorda com os dados de campo, evidenciando que os recifes do Parcel das Paredes (arco costeiro) apresentam as maiores suscetibilidades e os maiores valores de branqueamento como amostrado em campo por Kikuchi et al. (2010).

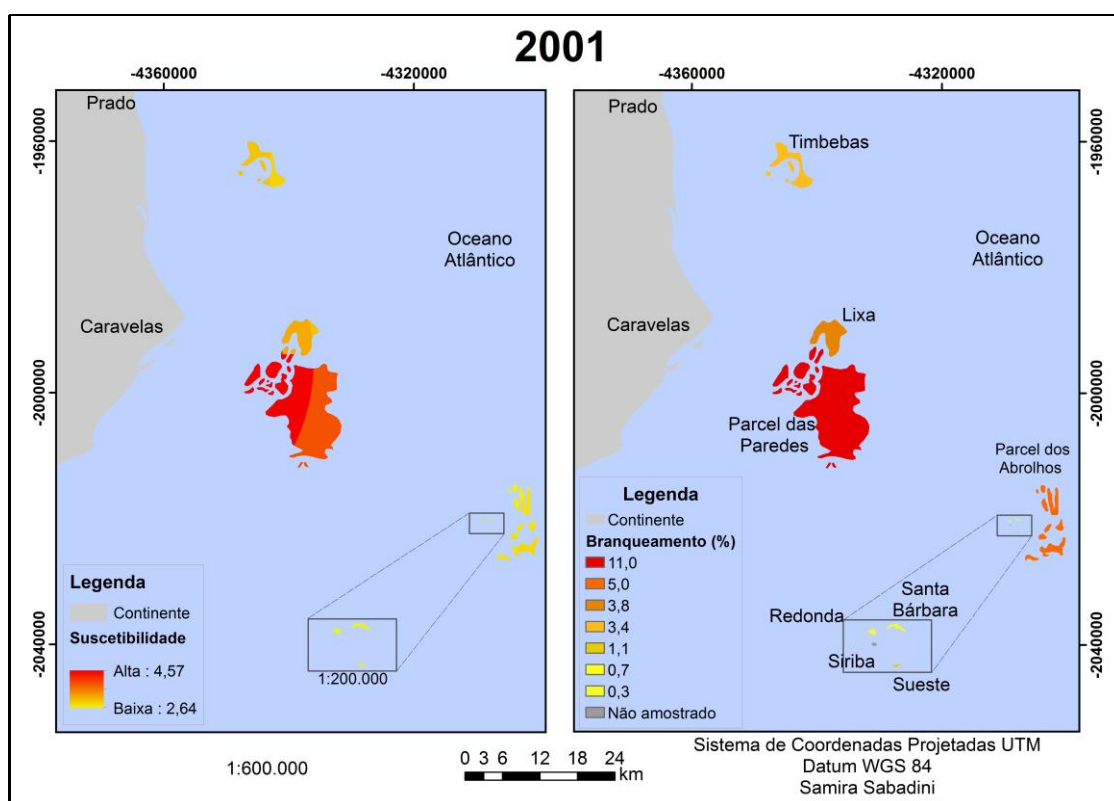


Figura 21: Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento (esquerda) e espacialização dos dados de campo (direita) para 2001.

Não houve suficiente variação espacial das variáveis ambientais (máxima TSM, mínima magnitude do vento e máxima PAR) entre os recifes do complexo recifal de Abrolhos, portanto, essas variáveis não explicaram a variação espacial da suscetibilidade ao branqueamento entre os recifes em 2001. A variável anomalia térmica acumulada apresentou variação espacial e, conseqüentemente, diferentes notas atribuídas aos recifes do arco costeiro e arco externo. Portanto, os maiores valores de anomalia térmica nos recifes do arco costeiro em 2001, juntamente com o efeito das variáveis antropogênicas, contribuíram para a maior suscetibilidade desses recifes. Os recifes de

Timbebas, embora tenham apresentado valores de anomalia térmica acumulada e proximidade com as áreas urbanas mais similares aos outros recifes do arco costeiro, mostraram claramente suscetibilidade mais baixa do que estes.

#### 4.6 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2002

A simulação para o ano de 2002 (Figura 22) não apresentou um padrão de suscetibilidade semelhante aos dados de campo de Kikuchi et al. (2010). A simulação mostrou, como nos outros anos estudados, o padrão de maiores valores de suscetibilidade ao branqueamento nos recifes do arco costeiro e menores nos recifes de Timbebas e do arco externo. No entanto, os dados de campo revelam menores porcentagens de branqueamento de corais nos recifes de Lixa e Paredes (arco costeiro). Ao contrário de Paredes e Lixa, o recife Pedra de Leste que foi amostrado apenas no ano de 2002, apresentou a maior porcentagem de branqueamento (8,2%). Esse recife, pertencente ao Parcel das Paredes, é o mais próximo do continente e, portanto, está mais sujeito aos efeitos da proximidade com a área urbana.

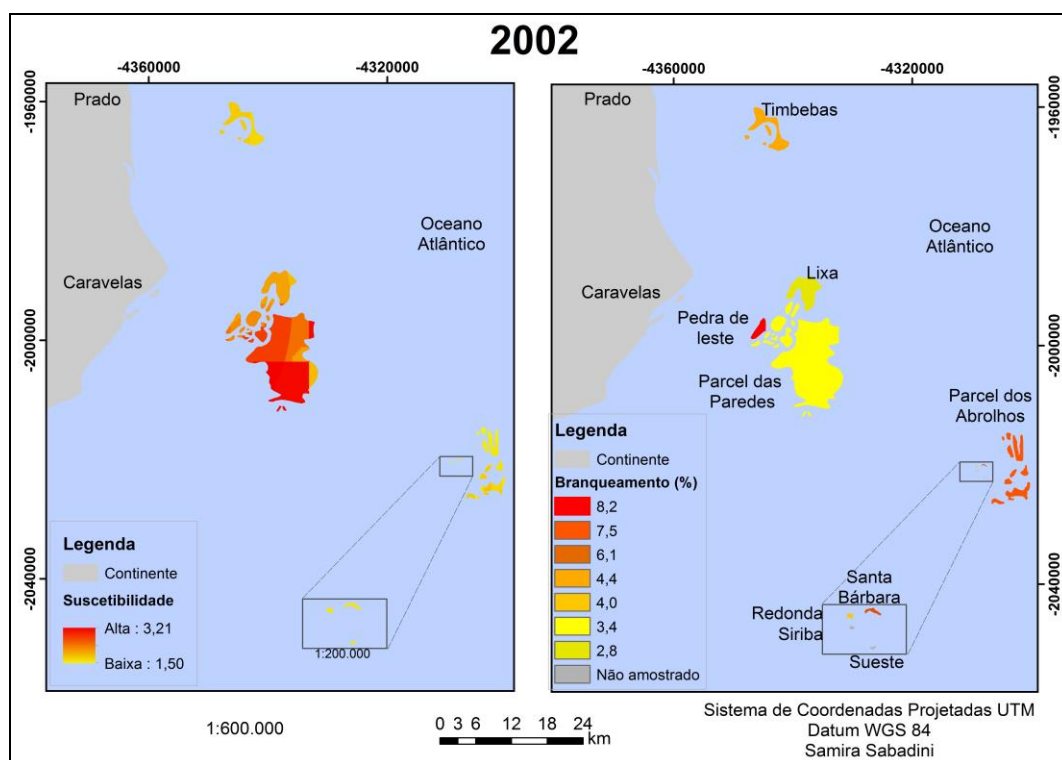


Figura 22: Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento (esquerda) e espacialização dos dados de campo (direita) para 2002.

Como já referido na revisão da literatura (capítulo 2), a anomalia térmica da superfície do mar é amplamente divulgada pela comunidade científica como o principal determinante do branqueamento de corais durante eventos globais (DUNNE & BROWN, 2001; LEÃO et al., 2008; MARANGONI et al., 2016; WINTER et al., 2016). Entretanto, no verão de 2002, Abrolhos apresentou anomalia térmica acumulada muito baixa se comparada com registros de outros anos. Além disso, em 2002 não houve variação espacial da anomalia térmica entre os recifes de Abrolhos. Provavelmente, devido à ausência de variação espacial da anomalia térmica entre os recifes, o modelo não apresentou a real distribuição espacial da suscetibilidade dos corais nesse verão. As únicas variáveis ambientais que apresentaram variabilidade espacial entre os recifes em 2002 e, portanto, influência no padrão de suscetibilidade, foram a mínima magnitude do vento e a máxima PAR, além das variáveis antrópicas.

A variação espacial do branqueamento de corais entre os recifes foi muito baixa (entre 2,8 e 7,5%, enquanto que em 2001 variou entre 0,3 e 11,0%). As porcentagens estimadas de branqueamento similares entre os recifes (variação inferior a 6,0%) podem não indicar um padrão bem definido como nos outros anos, podem ser uma variação aleatória ou refletir a influência de outras variáveis não contempladas nesse modelo. O nível de suscetibilidade apresentado pelo modelo para esse ano foi baixo (máximo de 3,21), o que é esperado para um ano com reduzida porcentagem de colônias branqueadas amostradas em campo.

#### 4.7 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2003

A simulação feita para o ano de 2003 (Figura 23) coincide com os dados de campo, evidenciando que o Parcel das Paredes e o recife de Lixa (arco costeiro), novamente, apresentaram as maiores suscetibilidades.

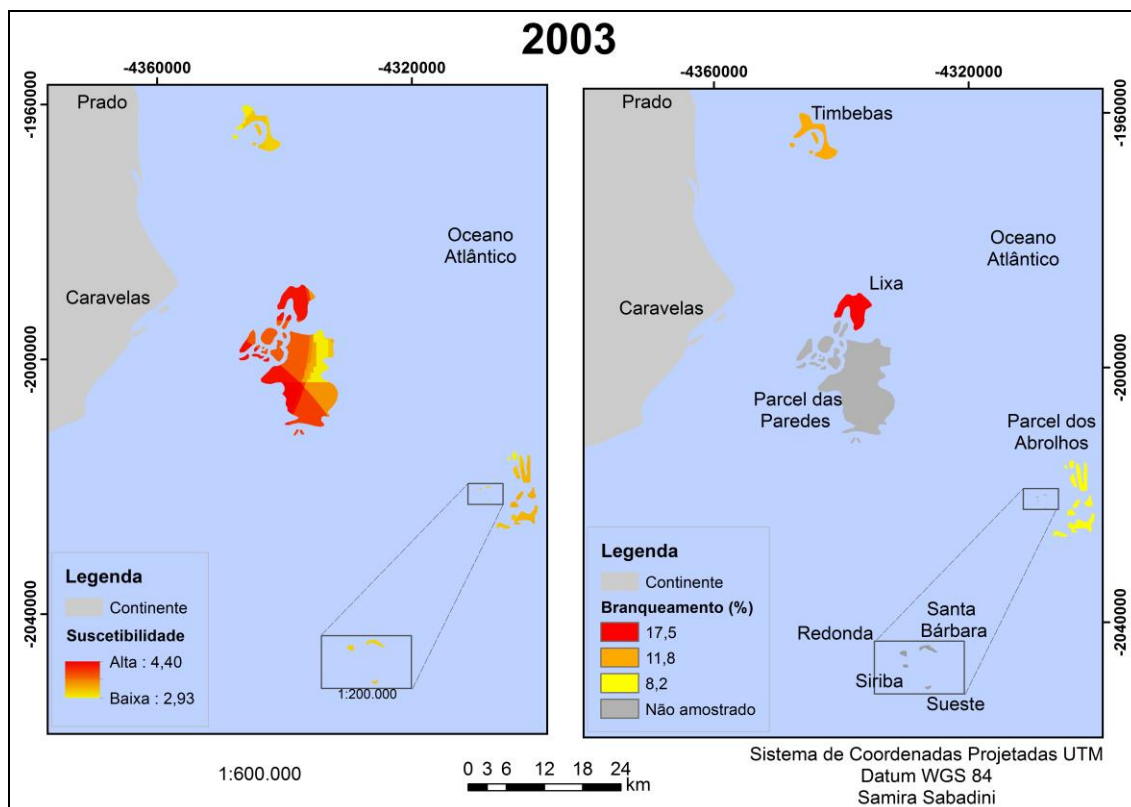


Figura 23: Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento (esquerda) e espacialização dos dados de campo (direita) para 2003.

Entre os recifes amostrados em campo por Kikuchi et al. (2010), o recife de Lixa apresentou o maior valor de branqueamento (17,5%). Em 2003, as variáveis ambientais (máxima TSM e mínima magnitude do vento) não apresentaram variação espacial entre os recifes. No entanto, as variáveis PAR e, principalmente, a anomalia térmica acumulada, juntamente com as variáveis antrópicas, foram responsáveis pela variabilidade espacial da suscetibilidade entre os recifes de Abrolhos. Os recifes de Timbebas, assim como em 2001, apresentaram suscetibilidade e percentual de branqueamento amostrado em campo (11,8%) mais semelhante aos recifes do arco externo (8,2%). O padrão de maior suscetibilidade ao branqueamento nos recifes do arco costeiro e menor no arco externo e recifes de Timbebas foi novamente evidenciado na simulação de 2003. Possivelmente, a proteção conferida pelo Parque Nacional Marinho dos Abrolhos aos recifes de Timbebas e a condição de anomalia térmica (7,67 °C) inferior aos recifes do arco costeiro (10,17 °C no recife Lixa e 11,71 °C Parcel das Paredes) favoreceram as menores suscetibilidade e porcentagem estimada de branqueamento nesse recife no verão de 2003.

#### 4.8 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2005

A espacialização da suscetibilidade ao branqueamento para o ano de 2005 (Figura 24) apresentou novamente valores mais elevados para os recifes do arco costeiro e menores para o arco externo e recifes de Timbebas.

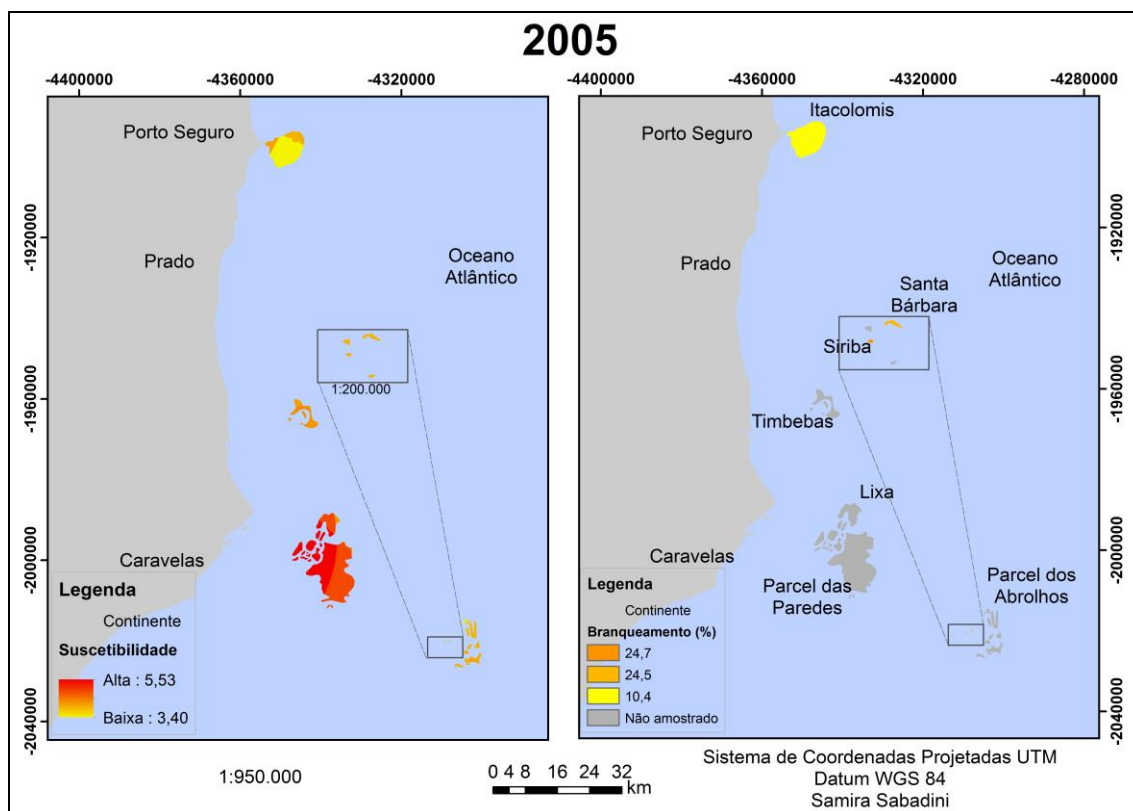


Figura 24: Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento (esquerda) e espacialização dos dados de campo (direita) para 2005.

Em 2005, apenas os recifes em franja do arquipélago de Abrolhos (arco externo) e os recifes dos Itacolomis (litoral de Porto Seguro), foram amostrados em campo por Kikuchi et al. (2010). Conforme registrado em campo, a modelagem mostrou menor suscetibilidade nos recifes dos Itacolomis e maior no arquipélago de Abrolhos. Decidiu-se modelar a suscetibilidade nesse ano devido à repetição do padrão de suscetibilidade no complexo recifal de Abrolhos, porém, uma vez que não foram amostrados recifes do arco costeiro, não é possível comparar os dados de campo com a suscetibilidade dos recifes do arco costeiro. As variáveis ambientais que apresentaram variação espacial e definiram a suscetibilidade ao branqueamento em 2005 foram, principalmente,

a anomalia térmica acumulada e a máxima TSM, além das variáveis antrópicas. A máxima TSM foi maior no arquipélago do que nos recifes dos Itacolomis. A anomalia térmica acumulada e a radiação PAR também favoreceram a menor suscetibilidade nos recifes dos Itacolomis.

#### 4.9 RESULTADO DA SIMULAÇÃO DE SUSCETIBILIDADE AO BRANQUEAMENTO EM 2016

O modelo sugere que em 2016 (Figura 25), assim como em 2001 e 2003, os recifes do arco externo e os recifes de Timbebas apresentaram menor suscetibilidade ao branqueamento que os outros recifes do arco costeiro (Lixa e Paredes).

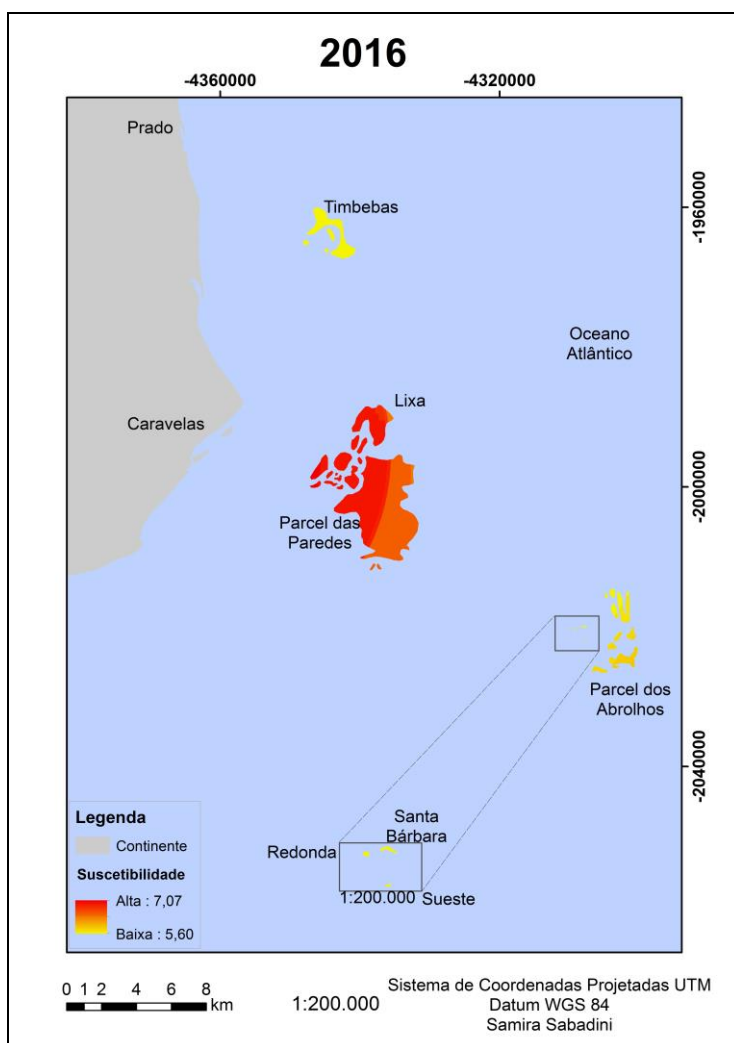


Figura 25: Simulação da suscetibilidade dos recifes ao branqueamento em 2016. Não há dados de campo publicados.

Assim como em 2003, a anomalia térmica acumulada em 2016 nos recifes de Timbebas foi menor (29,29 °C) que a registrada nos demais recifes do arco costeiro (31,98 °C em Lixa e 33,57 °C em Paredes). Portanto, a combinação de variáveis antropogênicas como a presença da unidade de conservação e a menor anomalia térmica acumulada pode ter resultado em menor suscetibilidade ao branqueamento nos recifes de Timbebas.

É provável que o nível de branqueamento de corais em 2016 tenha sido superior aos dos anos anteriores estudados, uma vez que a suscetibilidade atingiu 7,07 (alta suscetibilidade), muito superior aos valores máximos de 2001 (4,57), 2002 (3,21), 2003 (4,40) e 2005 (5,53). A maior suscetibilidade ao branqueamento em 2016 é corroborada pelo fato de que este ano foi considerado pela NASA e NOAA como o ano mais quente desde 1.880 (NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION, 2017).

#### 4.10 COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE SUSCETIBILIDADE APRESENTADOS PARA CADA ANO ESTUDADO

A Tabela 2 apresenta a área estudada dos recifes de Abrolhos em condições de muito baixa, baixa, média e alta suscetibilidade ao branqueamento de corais em cada ano estudado. É importante notar que a área do recife apresentada na tabela, não necessariamente, é completamente coberta por corais e, pode apresentar outras coberturas, como macroalgas, turfa e algas coralíneas.

TABELA 2 - COMPARAÇÃO DOS NÍVEIS DE SUSCETIBILIDADE EM CADA ANO ESTUDADO.

Ano	Muito baixa		Baixa		Média		Alta	
	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%	Área (km <sup>2</sup> )	%
2001	-	-	34	20	140	80	-	-
2002	31	18	143	82	-	-	-	-
2003	-	-	131	75	44	25	-	-
2005	-	-	17	10	158	90	-	-
2016	-	-	-	-	32	19	142	81

\* Área total = 175 km<sup>2</sup>. Nenhum recife foi classificado com suscetibilidade muito alta nos anos estudados.

Em 2001, o modelo mostrou que 20% da área recifal estava sob condição de baixa e 80% de média suscetibilidade ao branqueamento de corais. A área recifal com baixa suscetibilidade compreende, principalmente, os recifes de Timbebas, o Parcel dos Abrolhos e o Arquipélago dos Abrolhos. Os outros recifes do arco costeiro (recife de Lixa e Parcel das Paredes) apresentaram, em sua maior parte, média suscetibilidade ao branqueamento.

2002 foi o ano com menor suscetibilidade, sendo muito baixa em 18% da área e baixa em 82%. Os dados de campo de Kikuchi et al. (2010) também mostraram níveis reduzidos de branqueamento de corais, variando entre 2,8 e 8,2%, no verão de 2002. É provável que a suscetibilidade reduzida apresentada neste ano esteja associada a menor anomalia térmica acumulada.

Em 2003, 75% da área apresentou baixa suscetibilidade e 25% média. Nesse ano, assim como em 2001, a área de recife com baixa suscetibilidade compreendeu os recifes de Timbebas, o Parcel dos Abrolhos, o arquipélago dos Abrolhos e parte do Parcel das Paredes. A área com média suscetibilidade incluiu o recife de Lixa e a parte ocidental do Parcel das Paredes.

Em 2005, a área de recifes sob condição de média suscetibilidade atingiu 90%, enquanto 10% apresentou baixa suscetibilidade. O Parcel dos Abrolhos e o

Arquipélago dos Abrolhos apresentaram baixa suscetibilidade no verão de 2005, enquanto o Parcel das Paredes e os recifes de Timbebas apresentaram média suscetibilidade. Embora os recifes de Timbebas tenham sido classificados com média suscetibilidade, essa é numericamente menor do que no Parcel das Paredes, conforme apresentado na Figura 24.

A simulação realizada para o ano de 2016 apresentou 19% da área com média suscetibilidade e 81% com alta suscetibilidade. 2016 apresentou os maiores níveis de suscetibilidade entre os anos estudados, sugerindo maior porcentagem de colônias branqueadas. Assim como em 2001 e 2003, os recifes de Timbebas e o arco externo (Parcel dos Abrolhos e Arquipélago dos Abrolhos) apresentaram níveis de suscetibilidade inferiores ao do Parcel das Paredes que atingiu 7,07 em 2016.

## 5. DISCUSSÃO

A sinergia entre forçantes naturais e antropogênicas tem sido frequentemente relacionada ao fenômeno de branqueamento de corais, sendo as forçantes antrópicas responsáveis pelo aumento da frequência e intensidade dos eventos de branqueamento (GARRIDO et al., 2016; CASTRO & ZILBERBERG, 2016; ALLEMAND et al., 2004; WESTMACOTT et al., 2000). Visando contemplar os efeitos dessa sinergia, o modelo proposto identificou as áreas recifais de Abrolhos que apresentam maior suscetibilidade ao fenômeno de branqueamento de corais incorporando forçantes globais (climáticas) e locais (antropogênicas).

Estressores antropogênicos locais como a proximidade com áreas urbanas, hidrovias, portos, turismo e sobrepesca tornam os recifes mais frágeis aos distúrbios ambientais ao diminuírem a resiliência do ambiente. No entanto, a criação de unidades de conservação é uma medida de manejo que visa preservar o estado de equilíbrio do ambiente favorecendo a manutenção da resiliência do ecossistema. Estudos realizados nos recifes da Grande Barreira de Corais e no Caribe apontam que recifes inseridos em áreas marinhas protegidas apresentam maiores taxas de resistência e resiliência aos distúrbios ambientais (MUMBY & HARBORN, 2010, MELLIN et al 2016). Logo, a presença da unidade de conservação de proteção integral (PARNA marinho dos Abrolhos) protege os recifes das Timbebas, Parcel dos Abrolhos e arquipélago tornando esses ambientes mais saudáveis com a proibição da pesca, controle do turismo e tráfego de embarcações e melhoria na qualidade da água.

É importante ressaltar que essa é uma medida de manejo a fim de diminuir os estressores locais e, assim aumentar a resistência e resiliência do ecossistema recifal quando comparado a um recife mais degradado. Porém, essa medida não protege os corais dos efeitos diretos induzidos pelo clima (HUGHES et al 2003, KNOWLTON & JACKSON, 2008), ou seja, o manejo não impede o branqueamento que é desencadeado, principalmente, por anomalias térmicas. No entanto, pode resultar em menos colônias de corais afetadas do que ambientes fragilizados que sofrem com distúrbios climáticos e antrópicos

(MELLIN et al, 2016). Exemplo disso é o estudo de Hughes et al. (2017), realizado na Austrália em 2016, que revelou que as áreas protegidas não foram eficazes frente à intensidade do branqueamento ocorrido em 2016 na grande barreira de corais.

Os eventos de branqueamento de corais até então registrados no Brasil foram sempre menos intensos que em regiões como o Caribe e a Austrália (CORAL VIVO, 2016; LEÃO et al., 2016) e, diferentemente das elevadas taxas de mortalidade de corais nessas regiões, os corais brasileiros até agora sempre se recuperaram após os eventos de branqueamento. Provavelmente, a elevada turbidez das águas brasileiras que reduz a intensidade da radiação que atinge os corais e a menor intensidade das anomalias térmicas favoreceram o menor impacto desses eventos nos corais (CORAL VIVO, 2016, KIKUCHI et al, 2010). Portanto, devido a menor intensidade do fenômeno de branqueamento no Brasil, é possível que as unidades de conservação possam estar favorecendo a resiliência dos recifes protegidos ao proporcionar um ecossistema mais semelhante ao seu estado de equilíbrio quando comparado com um recife degradado.

A modelagem evidenciou que o padrão espacial da suscetibilidade ao branqueamento de corais no complexo recifal de Abrolhos é maior nos recifes do arco costeiro do que nos recifes do arco externo, com exceção dos recifes de Timbebas. Os recifes de Timbebas se assemelham mais aos recifes do arco externo que apresentam menor suscetibilidade ao branqueamento de corais. Esse padrão espacial de suscetibilidade ao branqueamento concorda com os dados de campo de Kikuchi et al. (2010) nos anos de 2001 e 2003. O padrão espacial deve-se, principalmente, às anomalias térmicas mais elevadas nesses recifes do que nos recifes do arco externo como apresentado nos APÊNDICES I - M e pelas variáveis antrópicas. Vários experimentos e modelagens (KRUG et al., 2013; MAINA et al., 2008, HUGHES et al, 2017) evidenciaram as anomalias térmicas como a principal causa direta no desencadeamento do branqueamento nos tecidos de corais. Nos anos 2001, 2003, 2005 e 2016, a anomalia térmica acumulada foi marcadamente maior nos recifes do arco costeiro do que nos recifes do arco externo. Em 2002, o modelo não apresentou a real distribuição espacial da suscetibilidade dos corais ao

branqueamento. O modelo é baseado, principalmente, na influência da temperatura da água no desencadeamento do branqueamento de corais. Nesse ano, Abrolhos apresentou anomalia térmica acumulada muito baixa (entre 3,62°C e 4,46°C) quando comparada com registros de outros anos, prejudicando a simulação da real suscetibilidade em 2002.

O Parcel das Paredes apresentou os maiores níveis de suscetibilidade em todas as simulações realizadas nesse estudo. Apesar da reduzida quantidade de dados de campo disponíveis, é, frequentemente, o recife do complexo recifal de Abrolhos com as maiores porcentagens de colônias de corais branqueadas. Somados à exploração pesqueira realizada no Parcel das Paredes, outros estressores locais como a proximidade com as áreas urbanas, presença de turistas e embarcações e sedimentação contribuem para maior fragilidade desses recifes.

A variação temporal da suscetibilidade ao branqueamento parece ser explicada pela intensidade das variáveis ambientais (Anomalia térmica (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 37.007$ ,  $p = 0.000$ ), máxima temperatura da superfície do mar (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 39.262$ ,  $p = 0.000$ ), máxima PAR (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 35.865$ ,  $p = 0.000$ ) e mínima magnitude do vento (Kruskall-Wallis,  $H(4) = 36.728$ ,  $p = 0.000$ ), com clara diferença entre os anos (2001, 2002 e 2003) que apresentaram baixa porcentagem de branqueamento (menos que 20%) e os anos (2005 e 2016) que apresentaram alta porcentagem de branqueamento.

Há uma marcada intensificação de anomalia térmica acumulada e máxima temperatura da superfície do mar entre os anos com menor suscetibilidade ao branqueamento (2001, 2002 e 2003) e os anos de maior suscetibilidade (2005 e 2016). Os maiores valores de anomalia térmica acumulada (33,57°C) e máxima TSM (29,27°C), que favorecem os eventos de branqueamento, foram registrados em 2016 durante o 3º evento global de branqueamento de corais. As menores magnitudes do vento, que também favorecem o processo de branqueamento de corais, também foram registradas nos anos de 2005 (3,41 m.s<sup>-1</sup>) e 2016 (3,22 m.s<sup>-1</sup>). A radiação fotossinteticamente ativa apresentou pouca variação temporal, sendo ligeiramente maior nos anos de 2005 e 2016.

A escala de suscetibilidade proposta indicou que 2002 foi o ano em que os recifes de Abrolhos estiveram menos suscetíveis ao branqueamento de corais com 82% da área recifal apresentando baixa suscetibilidade ao branqueamento. A baixa suscetibilidade nesse ano é explicada, principalmente, pelas menores temperaturas da superfície do mar que ocorreram em 2002. Em 2016, durante o 3º evento global de branqueamento de corais, 81% da área recifal de Abrolhos apresentou alta suscetibilidade decorrente, principalmente, da intensidade das anomalias térmicas da água superior aos outros anos estudados. Os níveis mais altos de suscetibilidade sugerem uma maior porcentagem de colônias branqueadas em 2016, o que é corroborado pelo fato de que esse ano foi considerado pela NASA como o ano mais quente desde 1880 (NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION, 2017).

Os recifes de Abrolhos apresentam características favoráveis frente às mudanças climáticas, já que são historicamente mais resistentes que outros importantes recifes do mundo. Somado a isso, os recifes indicados pelo modelo como menos suscetíveis ao branqueamento encontram-se protegidos pelo PARNA marinho dos Abrolhos (Timbebas, arquipélago e Parcel dos Abrolhos) que pode estar tornando-os mais resilientes a distúrbios ambientais como o branqueamento de corais. Esses recifes também, frequentemente, estiveram sob influência das menores anomalias térmicas quando comparados com os demais recifes do complexo recifal de Abrolhos. Logo, sabendo-se que o manejo das forçantes antrópicas locais não altera o cenário de mudanças climáticas, mas pode aumentar a resistência e resiliência dos corais, a melhoria da eficiência do PARNA marinho dos Abrolhos é fundamental. A melhoria da eficiência das áreas marinhas protegidas com controle do turismo, educação ambiental, controle da pesca ilegal, controle do desmatamento e ocupação costeira planejada são medidas que devem ser consideradas pelos tomadores de decisão para garantir a conservação dos ambientes recifais.

## 6. CONCLUSÃO

Dadas as estimativas de aumento médio da temperatura dos oceanos para o ano de 2100, é evidente a importância de reduzir os impactos antrópicos nos recifes de corais. Devido à comprovada relação sinérgica entre as forçantes globais e locais, a redução da pressão antropogênica pode favorecer a resistência e a resiliência desses ecossistemas marinhos aos eventos de branqueamento de corais.

O modelo mostrou ser eficaz na diferenciação espacial da suscetibilidade dos corais ao branqueamento em anos em que a anomalia térmica da superfície do mar foi alta e apresentou variação espacial entre os recifes. Em anos com reduzida anomalia térmica e pouca variação espacial entre os recifes, como em 2002, o modelo não estimou fielmente o branqueamento. São necessários mais trabalhos para explorar qual outro conjunto de variáveis melhor explica a suscetibilidade ao branqueamento nessa situação. No entanto, o modelo estimou corretamente a menor suscetibilidade ao branqueamento de corais nesse ano.

Um dos principais problemas a superar é encontrar dados disponíveis para estimar fielmente a suscetibilidade ao branqueamento. Os dados de branqueamento são escassos e as imagens de satélite não possuem resolução apropriada para modelar a suscetibilidade ao branqueamento em áreas recifais relativamente pequenas, tais como Abrolhos. Assim que mais dados de campo forem publicados, será possível realizar a validação do modelo e, assim, desenvolver simulações de cenários futuros. Apesar das restrições de dados, esse trabalho é inovador na diferenciação espacial da suscetibilidade ao branqueamento dentro do complexo recifal de Abrolhos.

A inclusão de outras variáveis como a pressão do turismo, doenças e a suscetibilidade específica de diferentes espécies de corais é importante para, no futuro, melhorar a eficiência do modelo. O monitoramento contínuo dos corais *in situ* e o desenvolvimento de modelos poderão orientar ações que diminuam os impactos antrópicos e aumentem a resiliência dos corais de Abrolhos às mudanças climáticas.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Base de dados geográficos - Hidrovias**, 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br>>. Acesso em: 27 fev. 2016.
- AGÊNCIA NACIONAL DE TRANSPORTES AQUAVIÁRIOS. **Base de dados geográficos - Portos**, 2013. Disponível em: <<http://www.antaq.gov.br>>. Acesso em: 27 fev. 2016.
- ALLEMAND, D.; FERRIER-PAGÈS, C.; FURLA, P.; HOULBRÈQUE, F.; PUVEREL, S.; REYNAUD, S.; TAMBUTTÉ, E.; TAMBUTTÉ, S.; ZOCCOLA, D. Biomineralisation in reef-building corals: from molecular mechanisms to environmental control. **General Palaeontology**. v. 3, n. 6, p. 453-467, 2004.
- AMARAL, F. M. D.; STEINER, A. Q.; BROADHURST, M. K.; CAIRNS, S. D. An overview of the shallow water calcified hydroids from Brazil (Hydrozoa: Cnidaria), including the description of a new species. **Zootaxa**. v. 1930, p. 56-68, 2008.
- ANTHONY, K. R. N.; KLINE, D. I.; DIAZ-PULIDO, G.; DOVE, S., HOEGH-GULDBERG, O. Ocean acidification causes bleaching and productivity loss in coral reef builders. **PNAS**. v. 105, n. 45, p. 17442-17446, 2008.
- BAK, R. P. M. Effects of Chronic Oil Pollution on a Caribbean Coral Reef. **Marine Pollution Bulletin**. v. 18, n. 10, p. 534-539, 1987.
- BRASIL. Decreto nº 88.218, de 6 de abril de 1983. **Cria o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos**, Brasília, 6 abr. 1983. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/decreto/1980-1989/D88218.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/decreto/1980-1989/D88218.htm)>. Acesso em: 11 fev. 2016.
- BURKE, L.; REYTAR, K.; SPALDING, M.; PERRY, A. **Reefs at risk**. 2011.
- CARILLI, J. E.; NORRIS, R. D.; BLACK, B. A.; WALSH, S. M.; MCFIELD, M. Local Stressors Reduce Coral Resilience to Bleaching. **PLoS ONE**. v. 4, n. 7, 2009.
- CASTRO, C. B.; PIRES, D. O. A bleaching event on a Brazilian coral reef. **Brazilian Journal of Oceanography**. v. 47, n. 1, p. 87-90, 1999.
- CASTRO, C. B. **Recifes de coral: avaliação e ações prioritárias para a conservação da biodiversidade da zona costeira e marinha**. ICMBIO. 2000.
- CASTRO, P.; HUBER, M. E. **Biologia Marinha**. 8. ed. AMGH Editora, 2012.
- CASTRO, C. B.; ZILBERBERG, C. Recifes brasileiros, sua importância e conservação. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 17-26, 2016.
- CENTRO DE ESTUDOS COSTEIROS, LIMNOLÓGICOS E MARINHOS/UFRGS. **Zona da Convergência Subtropical**. Disponível em: <<http://www.ufrgs.br/ceclimar/ceram/fauna-marinha-e-costeira>>. Acesso em: 25 fev. 2016.
- CONNELL, J. H. Diversity in Tropical Rain Forests and Coral Reefs. **Science**. v. 199, n. 4335, p. 1302-1310, 1978.
- CORAL VIVO. **El Niño ameaça saúde dos corais da costa brasileira**, 2016. Disponível em: <<http://coralvivo.org.br/noticias/el-nino-ameaca-saude-dos-corais-da-costa-brasileira/>>. Acesso em: 22 jan. 2017.
- CORAL VIVO. **Recifes e corais**, 20---. Disponível em: <<http://coralvivo.org.br/recifes-e-corais/corais/>>. Acesso em: 06 fev. 2016.

- COSTA JR, O. S., LEÃO, Z. M. A. N., NIMMO, M. ATRILL, M. Nutrifcation impacts on coral reefs from northern Bahia, Brazil. **Hydrobiologia**, 440: p. 307-316, 2000.
- DONNER, S. D.; SKIRVING, W. J.; LITTLE, C. M.; OPPENHEIMER, M.; HOEGH-GULDBERG O. Global assessment of coral bleaching and required rates of adaptation under climate change. **Global Change Biology**. v.11, n.12, p. 2251-2265, 2005.
- DOUGLAS, A. E. Coral bleaching—how and why?. **Marine Pollution Bulletin**. v. 46, p. 385-392. 2003.
- DUNNE, R. P.; BROWN, B. E. The influence of solar radiation on bleaching of shallow water reef corals in the Andaman Sea, 1993-1998. **Coral Reefs**. v. 20, p. 201-210, 2001.
- DUTRA, L. X. C.; KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M. A. N. Thirteen months monitoring coral bleaching on Bahia's north coast, Brazil.. In: INTERNATIONAL CORAL REEF SYMPOSIUM, 9, 2000, Bali. **Proceedings...** 2000. p. 373-373.
- EAKIN, C. M.; KLEYPAS, J.; HOEGH-GULDBERG, O. Global Climate Change and Coral Reefs: Rising Temperatures, Acidification and the Need for Resilient Reefs. In: WILKINSON, C. (Ed.). **Status of Coral Reefs of the World**: 2008. p. 29-34, 2008.
- EREZ, J.; REYNAUD, S.; SILVERMAN, J.; SCHNEIDER, K.; ALLEMAND, D. Coral Calcification Under Ocean Acidification and Global Change. In: DUBINSKY, Z.; STAMBLER, N. (Eds.). **Coral Reefs: An Ecosystem in Transition**. p.151-176, 2011.
- ESCOBAR, Herton. Recifes em risco. **Estadão**, Caravelas, 21 ago. 2016. Disponível em: <<http://infograficos.estadao.com.br/especiais/recifes-em-risco/>>. Acesso em: 13 mar. 2017.
- FADLALLAH, Y. H.; ALLEN, K. W.; ESTUDILLO, R. A. Mortality of shallow reef corals in the western Arabian Gulf following aerial exposure in winter. **Coral Reefs**. v. 14, p. 99-107, 1995.
- FERREIRA, C. E. L.; GONÇALVES, J. E. A. The Unique Abrolhos Reef Formation (Brazil): need for specific management strategies. **Coral Reefs**. v. 18, n. 4, p. 352-352, 1999.
- FERREIRA, B. P.; MAIDA, M.; CAVA, F. Características e perspectivas para o manejo da pesca na Apa Marinha Costa dos Corais. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE UNIDADES DE CONSERVAÇÃO, 2., 2001, Campo Grande, p. 50-58.
- FERREIRA, B. P.; MAIDA, M. **Monitoramento dos recifes de coral do Brasil**: Situação atual e perspectivas. Brasília: MMA, 2006.
- FREITAS, L. M.; OLIVEIRA, M. D. M.; KIKUCHI, R. K. P. Os mecanismos de sobrevivência dos corais diante do impacto das mudanças climáticas sobre o ecossistema de recifes. **Cadernos de Geociências**. v. 9, n. 2, p. 142-156, 2012.
- GARRIDO, A. G.; PICCIANI, N.; ZILBERBERG, C. Simbiose coral-zooxantela em um mundo em transformação. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros**: Rede de Pesquisas Coral Vivo. p. 81-96, 2016.
- GLYNN, P. W. Coral Reef Bleaching in the 1980s and Possible Connections with Global Warming. **Trends in Ecology and Evolution**. v. 6, n. 6, p. 175-179, 1999.
- GOREAU, T. J.; HAYES, R. L. Coral Bleaching and Ocean "Hot Spots". **Ambio**. v. 23, p. 176-180, 1994.
- HOEGH-GULDBERG, O. Climate change, coral bleaching and the future of the world's coral reefs. **Marine and Freshwater Research**. v. 50, p. 839-866, 1999.
- HORTA, P. A.; SISSINI, M. N.; BERGSTROM, E.; FREIRE, V.; BASTOS, E.; MARTINS, G.; LUCENA, L. A.; MARTINS, C.; BARUFI, J. B.; RORIG, L.; RIUL, P.; GURGEL, C. F. Papel das

algas nos recifes e as consequências das interferências antrópicas. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 157-168, 2016.

HUGHES, T. P.; Baird, A. H.; Bellwood, D. R.; Card, M.; Connolly, S. R.; Folke, C.; Grosberg, R.; Hoegh-Guldberg, O.; Jackson, J. B. C.; Kleypas, J.; Lough, J. M.; Marshall, P.; Nyström, M.; Palumbi, S. R.; Pandolfi, J. M.; Rosen, B.; Roughgarden, J. Climate Change, Human Impacts, and the Resilience of Coral Reefs. **Science**. v. 301, p. 929-933, 2003.

HUGHES, T. P.; BELLWOOD, D. R.; FOLKE, C. S.; MCCOOK, L. J.; PANDOLFI, J. M. No-take areas, herbivory and coral reef resilience. **TRENDS in Ecology and Evolution**. v. 22, n. 1, p.1-3, 2006.

HUGHES, T. P.; KERRY, J. T.; ÁLVAREZ-NORIEGA, M.; ÁLVAREZ-ROMERO, J. G.; ANDERSON, K. D.; BAIRD, A. H.; BABCOCK, R. C.; BEGER, M.; BELLWOOD, D. R.; BERKELMANS, R.; BRIDGE, T. C.; BUTLER, J. R.; BYRNE, M.; CANTIN, N. E.; COMEAU, S.; CONNOLLY, S. R.; CUMMING, G. S.; DALTON, S. J.; DIAZ-PULIDO, G.; EAKIN, C. M.; FIGUEIRA, W. F.; GILMOUR, J. P.; HARRISON, H. B.; HERON, S. F.; HOEY, A. S.; HOBBS, J.P. A.; HOOGENBOOM, M. O.; KENNEDY, E. V.; KUO, C.Y.; LOUGH, J. M.; LOWE, R. J.; LIU, G.; MCCULLOCH, M. T.; MALCOLM, H. A., MCWILLIAM, M. J.; PANDOLFI, J. M.; PEARS, R. J.; PRATCHETT, M. S.; SCHOEPF, V., SIMPSON, T.; SKIRVING, W. J.; SOMMER, B.; TORDA, G.; WACHENFELD, D. R.; WILLIS, B. L.; WILSON, S. K. Global warming and recurrent mass bleaching of corals. **Nature**. v. 543, n. 7645, p. 373-37, 2017.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Bases e referenciais**, 2010. Disponível em: <<http://ibge.gov.br>>. Acesso em: 23 fev. 2016.

INSTITUTO BRASILEIRO DO MEIO AMBIENTE E DOS RECURSOS NATURAIS RENOVÁVEIS. **Plano de Manejo: Parque Nacional Marinho dos Abrolhos**. Brasília, 1991.

JABLONSKI, S. A Zona Econômica Exclusiva – Óleo e Gás. In: ZAMBONI, A.; NICOLODI, J. L. (Org.). **Macrodiagnóstico da Zona Costeira e Marinha do Brasil**. Brasília: MMA, 2008.

JENNERJAHN, T. C. Biogeochemical response of tropical coastal systems to present and past environmental change. **Earth-Science Reviews**. v. 114, p. 19-41, 2012

KELMO, F.; ATTRILL, M. J.; JONES, M. B. Effects of the 1997–1998 El Niño on the cnidarian community of a high turbidity coral reef system (northern Bahia, Brazil). **Coral Reefs**. v. 22, p.541-550, 2003.

KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M. A. N.; OLIVEIRA, M. D. M.; DUTRA, L. X. C.; CRUZ, I. C. Branqueamento de corais nos recifes da Bahia associado aos efeitos do El Niño 2003. In: 78 CONGRESSO SOBRE PLANEJAMENTO E GESTÃO DAS ZONAS COSTEIRAS DOS PAÍSES DE EXPRESSÃO PORTUGUESA, 2. / CONGRESSO DA ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ESTUDOS DO QUATERNÁRIO – ABEQUA, 9. / CONGRESSO DO QUATERNÁRIO DE PAÍSES DE LÍNGUA PORTUGUESA, 2. , 2003, Recife. **Anais....** 2003. p. 1-3.

KIKUCHI, R. K. P.; LEÃO, Z. M. A. N.; OLIVEIRA, M. D. M. Conservation status and spatial patterns of AGRRA vitality indices in Southwestern Atlantic Reefs. **Revista de Biologia Tropical**, v. 58, p. 1-31, 2010.

KNOWLTON, N. ; JACKSON, J. B. C. Shifting Baselines, Local Impacts, and Global Change on Coral Reefs. **PLoS Biology**. v. 6, n. 2, p. 215-220, 2008.

KOBLUCK, D. R.; LYSENKO, M. A. "Ring" bleaching in southern caribbean *Agaricia agaricites* during rapid water cooling. **Bulletin of Marine Science**. v. 54, n. 1, p. 142-150, 1994

KRUG, L. A.; GHERARDI, D. F. M.; STECH, J. L.; LEÃO, Z. M. de A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; HRUSCHKA JÚNIOR, E. R.; SUGGETT, D. J. The construction of causal networks to estimate

coral bleaching intensity in Brazil. **Environmental Modelling & Software**, v. 42, p. 157-167, 2013.

LEÃO, Z. M. A. N.; GINSBURG, R. N. Living reefs surrounded by siliciclastics sediments: The Abrolhos coastal reefs, Bahia, Brazil. In: INT. CORAL REEF SYMPOSIUM, 8. 1997. **Proceedings....** 1997. p. 1767-1772.

LEÃO, Z. M. de A. N. Abrolhos, BA: O complexo recifal mais extenso do Atlântico Sul. In: SCHOBENHAUS, C.; CAMPOS, D.A; QUEIROZ, E.T.; WINGE, M.; BERBERT-BORN, M. (eds.). **Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil**. p. 345 - 359. 1999.

LEÃO, Z. M. A. N.; DOMINGUEZ, J. M. L. Tropical Coast of Brazil. **Marine Pollution Bulletin**. v. 41, n. 1-6, p. 112-122, 2000.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; TESTA, V. Coral and coral reefs os Brazil. In: JORGE CORTÉS (Ed.). **Latin America Coral Reefs**. Amsterdam: Elsevier Science, p. 9-52, 2003.

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

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; OLIVEIRA, M. D. M.; VASCONCELLOS, V. Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. **Pan-American Journal of Aquatic Sciences**. v. 5, n. 2, p. 224-235, 2010.

LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P. de; FERREIRA, B. P.; NEVES, E. G.; SOVIERZOSKI, H. H.; OLIVEIRA, M. de D. M.; MAIDA, M.; CORREIA, M. D.; JOHNSON, R. Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. **Brazilian Journal of Oceanography**. v. 64, n.2, p.97-116, 2016.

LESSER, M. P.; FARRELL, J. H. Exposure to solar radiation increases damage to both host tissues and algal symbionts of corals during thermal stress. **Coral Reefs**. v. 23, p. 367-377, 2004.

LOPES, C. F. **Ambientes costeiros contaminados por óleo: procedimentos de limpeza – manual de orientação**. São Paulo: Secretaria de Estado do Meio Ambiente, 2007.

LOYA, Y.; SAKAI, K.; YAMAZATO, K.; NAKANO, Y.; SAMBALI, H.; VAN WOESIK, R. Coral bleaching: the winners and the losers. **Ecology Letters**. v. 4, n. 2, p. 122-131, 2001.

MACHADO, L. F.; LEITE, D. C. A.; ROSADO, A. S.; PEIXOTO, R. S. O holobionte – microrganismos e a saúde dos corais. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 43-54, 2016.

MAINA, J.; VENUS, V.; MCCLANAHAN, T.; ATEWEBERHAN, M. Modelling susceptibility of coral reefs to environmental stress using remote sensing data and GIS models. **Ecological modeling**. v. 212, p. 180-199, 2008.

MARANGONI, L. F. B.; MARQUES, J. A.; BIANCHINI, A. Fisiologia de corais: a simbiose coral-zooxantela, o fenômeno de branqueamento e o processo de calcificação. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 55-72, 2016.

MARCHIORO, G. B.; NUNES, M. A.; DUTRA, G. F.; MOURA, R. L. de; PEREIRA, P. G. do P. Avaliação dos impactos da exploração e produção de hidrocarbonetos no Banco dos Abrolhos e adjacências. **Megadiversidade**. v.1, n. 2, p. 225-310, 2005.

MARSHALL, P.; SCHUTTENBERG, H. **A Reef Manager's Guide to CORAL BLEACHING**. Townsville, Great Barrier Reef Marine Park Authority, 2006.

MELLIN, C.; MACNEIL, M. A.; CHEAL, A. J.; EMSLIE, M. J.; CALEY, M. J. Marine protected areas increase resilience among coral reef communities. **Ecology letters**. v. 19, p. 629-637, 2016.

MIGOTTO, A. E. Anthozoan bleaching on the southeastern coast of Brazil in the summer of 1994. In Proc. Intern. Conference on Coelenterate Biology, 6, 1995. ICCB, Leeuwenhorst, p.329-335, 1997.

MIGOTTO, A. E. Filo Cnidaria. In: BRUSCA, R. C.; BRUSCA, G. J. (Org.). **Invertebrados**. Rio de Janeiro: Guanabara-Koogan, p. 227-278, 2007.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Download de dados geográficos**. Disponível em: <<http://mapas.mma.gov.br>>. Acesso em: 24 fev. 2016.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Conduta consciente em ambientes recifais / Gerência de Biodiversidade Aquática e Recursos Pesqueiros** – Brasília: MMA/SBF, 2009.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. **Unidades de Conservação por bioma**, 2015. Disponível em: <[http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80112/CNUC\\_Bioma\\_Fevereiro\\_2015.pdf](http://www.mma.gov.br/images/arquivo/80112/CNUC_Bioma_Fevereiro_2015.pdf)>. Acesso em: 11 fev. 2016.

MIRANDA, R. J.; CRUZ, I. C. S.; LEÃO, Z. M. A. N. Coral bleaching in the Caramuanas reef (Todos os Santos Bay, Brazil) during the 2010 El Niño event. **Latin American Journal of Aquatic Research**. v. 41, n. 2, p. 351-360, 2013.

MÓNACO, C. D.; HAIEK, G.; NARCISO, S.; GALINDO, M. Massive bleaching of coral reefs induced by the 2010 ENSO, Puerto Cabello, Venezuela. **Revista de Biología Tropical**, v. 6, n. 2, p. 527-538, 2012.

MUMBY, P. J.; HARBORNE, A. R. Marine Reserves Enhance the Recovery of Corals on Caribbean Reefs. **PLOs ONE**. v. 5, n. 1, p. 1-7, 2010.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **NASA, NOAA Data Show 2016 Warmest Year on Record Globally**, 2017. Disponível em: <<https://www.nasa.gov/press-release/nasa-noaa-data-show-2016-warmest-year-on-record-globally>>. Acesso em: 23 jan. 2017.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **OceanColor Web**. Disponível em: <<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/MODIS-Aqua/L3SMI>>. Acesso em: 25 maio. 2016.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. **OceanColor Web**. Disponível em: <<https://oceandata.sci.gsfc.nasa.gov/SeaWiFS>>. Acesso em: 25 maio. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA declares third ever global coral bleaching event**, 2015. Disponível em: <<http://www.noaanews.noaa.gov/stories2015/100815-noaa-declares-third-ever-global-coral-bleaching-event.html>>. Acesso em: 13 fev. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **U.S. coral reefs facing warming waters, increased bleaching**, 2016. Disponível em: <<http://www.noaa.gov/media-release/us-coral-reefs-facing-warming-waters-increased-bleaching>>. Acesso em: 22 jan, 2017.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Global Coral Bleaching 2014-2017: Status and an Appeal for Observations**, 2017. Disponível em: <[https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/analyses\\_guidance/global\\_coral\\_bleaching\\_2014-17\\_status.php](https://coralreefwatch.noaa.gov/satellite/analyses_guidance/global_coral_bleaching_2014-17_status.php)>. Acesso em: 07 abril 2017.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Corals: Where Are Reef Building Corals Found**, 20--. Disponível em:

<[http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial\\_corals/coral05\\_distribution.html](http://oceanservice.noaa.gov/education/tutorial_corals/coral05_distribution.html)>. Acesso em: 20 fev. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NCEP/NCAR Reanalysis Monthly Means and Other Derived Variables**. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.derived.surface.html>>. Acesso em: 26 maio. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **NOAA OI SST V2 High Resolution Dataset**. Disponível em: <<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.noaa.oisst.v2.highres.html>>. Acesso em: 22 maio. 2016.

NATIONAL OCEANIC AND ATMOSPHERIC ADMINISTRATION. **Data Access – OISST**. Disponível em: <<ftp://eclipse.ncdc.noaa.gov/pub/OI-daily-v2/NetCDF/>>. Acesso em: 15 maio. 2016.

PAULAY, G. Diversity and distribution of reef organisms. In: BIRKELAND, C. (ed). **Life and Death of Coral Reefs**. Chapman and Hall, New York. Pennings, 1997. p. 298-353.

PETERS, E. C. Diseases of Coral Reef Organisms. In: **Coral Reefs in the Anthropoceno**. Springer Netherlands. p. 147-178. 2015.

PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. **Progress in Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1-73, 1991.

PICCIANI, N.; GARRIDO, A. G.; CASTRO, C., B.; ZILBERBERG, C. Do equador aos trópicos – as zooxantelas na dimensão do espaço. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 73-82, 2016.

PIRES, D. O.; CASTRO, C. B.; SEGAL, B.; PEREIRA, C. M.; CARMO, E. C.; SILVA, R. G.; CALDERON, E. N. Reprodução de corais de águas rasas do Brasil. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 111-128, 2016.

POLLOCK, F. J.; LAMB, J. B.; FIELD, S. N.; HERON, S. F.; SCHAFFELKE, B.; SHEDRAWI, G.; BOURNE, D. G.; WILLIS, B. L. Sediment and Turbidity Associated with Offshore Dredging Increase Coral Disease Prevalence on Nearby Reefs. **PLoS ONE**. v. 9, n. 7, p. 1-9, 2014.

RINKEVICH, B.; LOYA, Y. Laboratory Experiments on the Effects of Crude Oil on the Red Sea Coral *Stylophora pistillata*. **Marine Pollution Bulletin**. v. 10, n. 11, p. 328-330, 1979.

RUPPERT, E. E.; BARNES, R.D. **Zoologia dos Invertebrados**. 6 ed. São Paulo: Ed. Roca. 1996. 1028p.

SCHMIEGELOW, J. M. M. **O Planeta Azul: uma introdução às Ciências Marinhas**. Rio de Janeiro: Editora Interciências, 2004.

SEOANE, J. C. S.; BARBOSA, C. F. Recifes de coral ao longo do tempo geológico. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 27-42, 2016.

SILVA, A. S.; LEÃO, Z. M. A. N.; KIKUCHI, R. K. P.; COSTA, A. B.; SOUZA, J. R. B. Sedimentation in the coastal reefs of Abrolhos over the last decades. **Continental Shelf Research**. v. 70, p. 159-167, 2013.

SILVEIRA, I. C. A.; SCHMIDT, A. C. K.; CAMPOS, E. J. D.; GODOI, S. S.; IKEDA, Y. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. **Brazilian Journal of Oceanography**. v. 48, n. 2, p. 171-183, 2000.

SKIRVING, W.; HERON, M.; HERON, S. The Hydrodynamics of a Bleaching Event: Implications for Management and Monitoring. In: PHINNEY, J. T. (edit.). **Coral Reefs and Climate Change: Science and Management Coastal and Estuarine Studies**, p. 145-161, 2006.

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; COSTA, W. L. S. **Modeling Environmental Dynamics with Dinamica EGO**. Disponível em: <[www.csr.ufmg.br/dinamica](http://www.csr.ufmg.br/dinamica)>. 2009

SOARES-FILHO, B. S.; RODRIGUES, H.; FOLLADOR, M. A hybrid analytical-heuristic method for calibrating land-use change models. **Environmental Modelling & Software**. 43, p. 80-87, 2013.

SOUZA, I. M. M. de. Avaliação da cobertura e monitoramento do branqueamento de corais nos recifes de Maracajaú/RN. 2012. 61 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia) – Centro de Biociências, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2012.

SPALDING, M. D.; RAVILIOUS, C.; GREEN, E. P. **World Atlas of Coral Reefs**. Prepared at the UNEP World Conservation Monitoring Centre. University of California Press, Berkeley, USA. 2001.

STRAMMA, L. Geostrophic transport of the South Equatorial Current in the Atlantic. **Journal of Marine Research**. 49, p. 281-294, 1991.

TESSLER, M. G.; GOYA, S. C. Processos Costeiros Condicionantes do Litoral Brasileiro. **Revista do Departamento de Geografia**. v.17, p.11-23, 2005.

VILA-NOVA, D. A.; FERREIRA, C. E. L. Unidades de conservação marinhas no Brasil e conservação de recifes de coral. In: ZILBERBERG, C. et al. (Eds.). **Conhecendo os Recifes Brasileiros: Rede de Pesquisas Coral Vivo**. p. 329-344, 2016.

VILLAÇA, R. C. Recifes Biológicos. In: PEREIRA, R. C.; SOARES-GOMES, A. **Biologia Marinha**. 2. ed. Rio de Janeiro: Interciência, p. 399-420, 2009.

WESTMACOTT, S., TELEKI, K., WELLS, S.; WEST, J. M. **Gestão de recifes de coral branqueados ou severamente danificados**. IUCN, Gland, Switzerland and Cambridge, UK, 2000.

WINTER, A. P. M.; CHALOUB, R. M.; DUARTE, G. A. S.; CASTRO, C. B. Photosynthetic responses of corals *Mussismilia hartii* (Verrill, 1867) from turbid waters to changes in temperature and presence/absence of light. **Brazilian journal of oceanography**, v. 64, n. 3, p. 203-216, 2016.

## APÊNDICE A

A figura 26 apresenta a variável ambiental independente anomalia térmica nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.

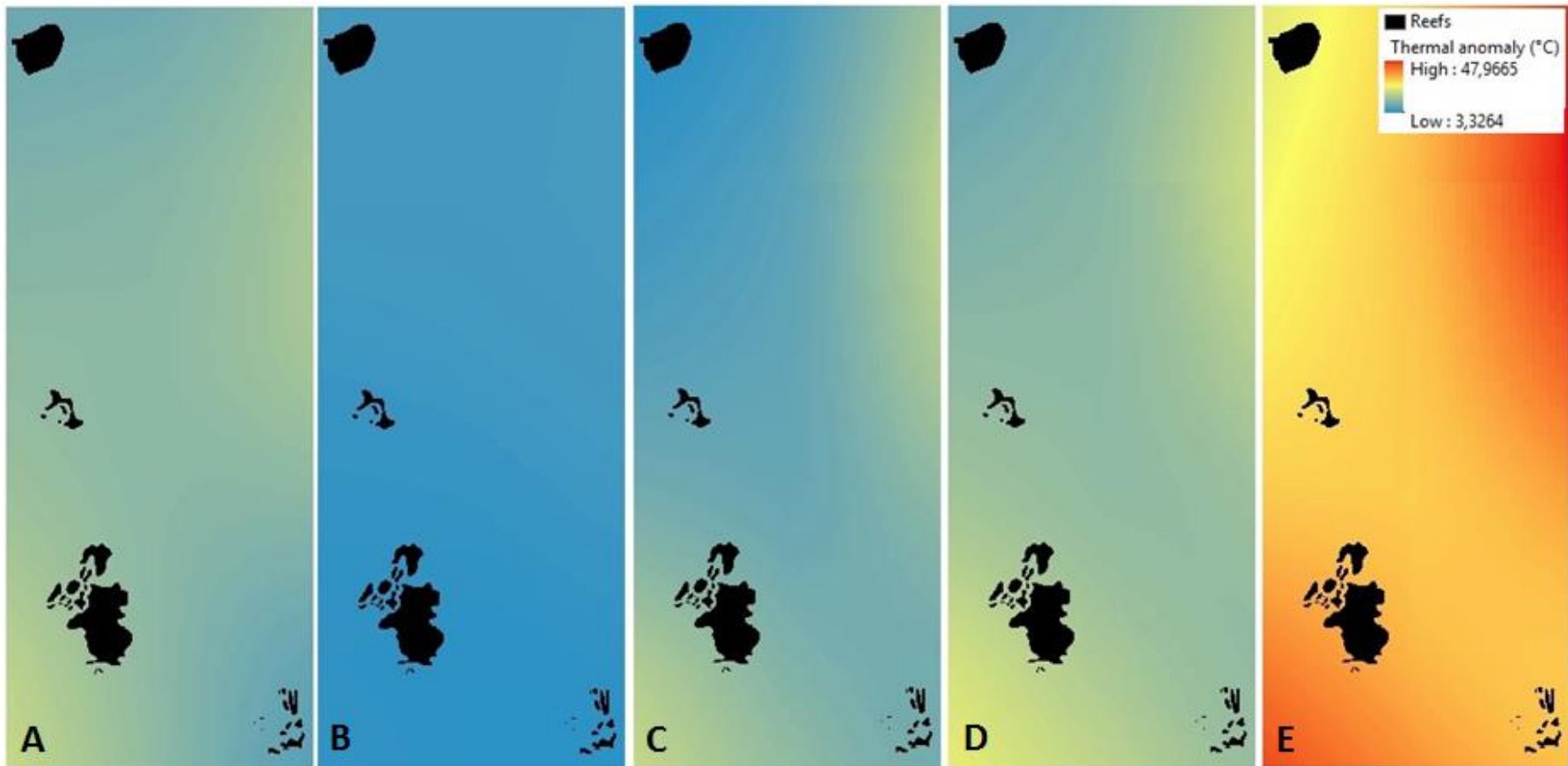


Figura 26: Anomalia térmica acumulada nos verões de 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c), 2005 (d) e 2016 (e).

## APÊNDICE B

A figura 27 apresenta a variável ambiental independente máxima temperatura da superfície do mar nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.

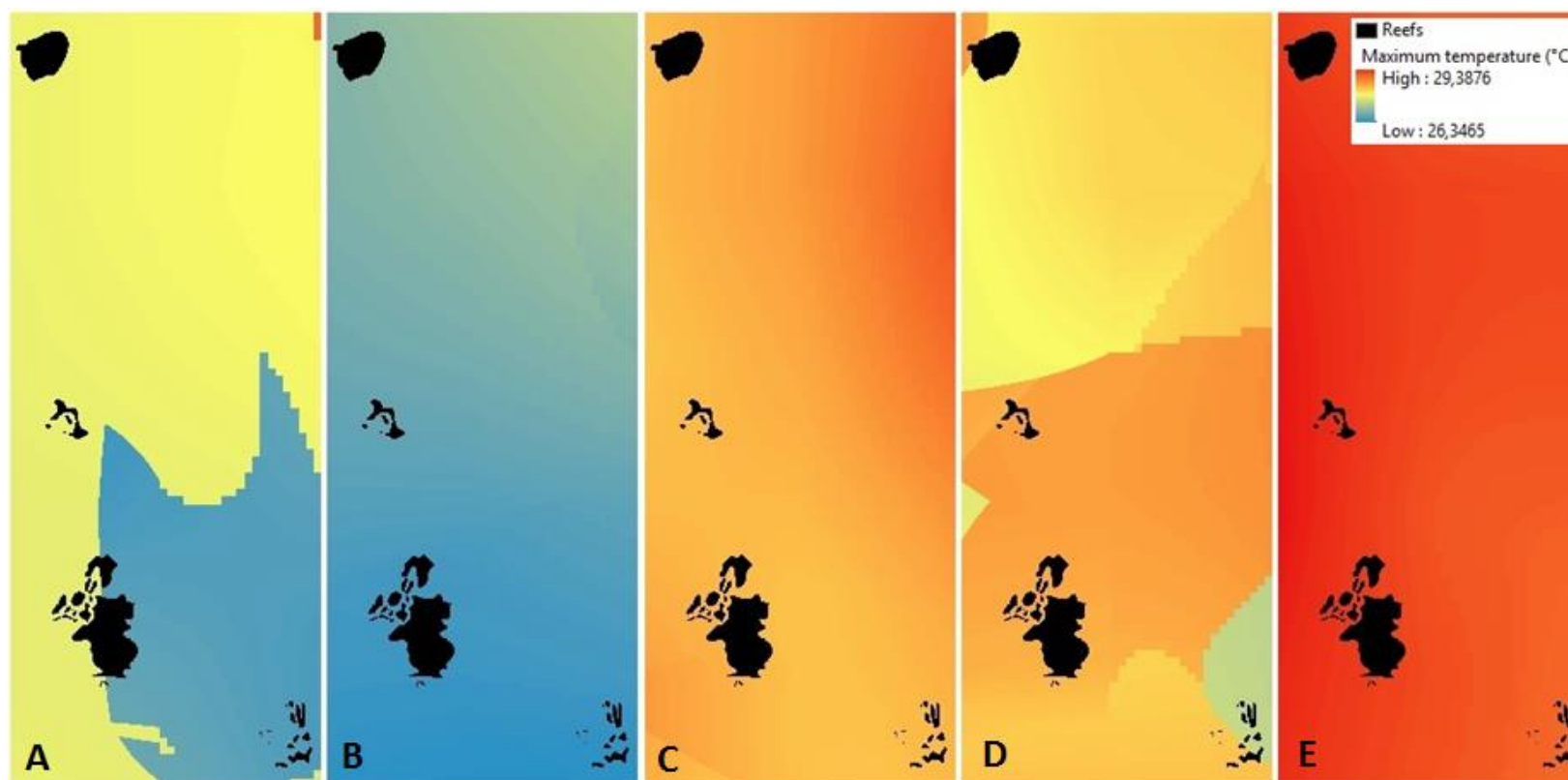


Figura 27: Máxima TSM nos verões de 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c), 2005 (d) e 2016 (e).

## APÊNDICE C

A figura 28 apresenta a variável ambiental independente máxima PAR nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.

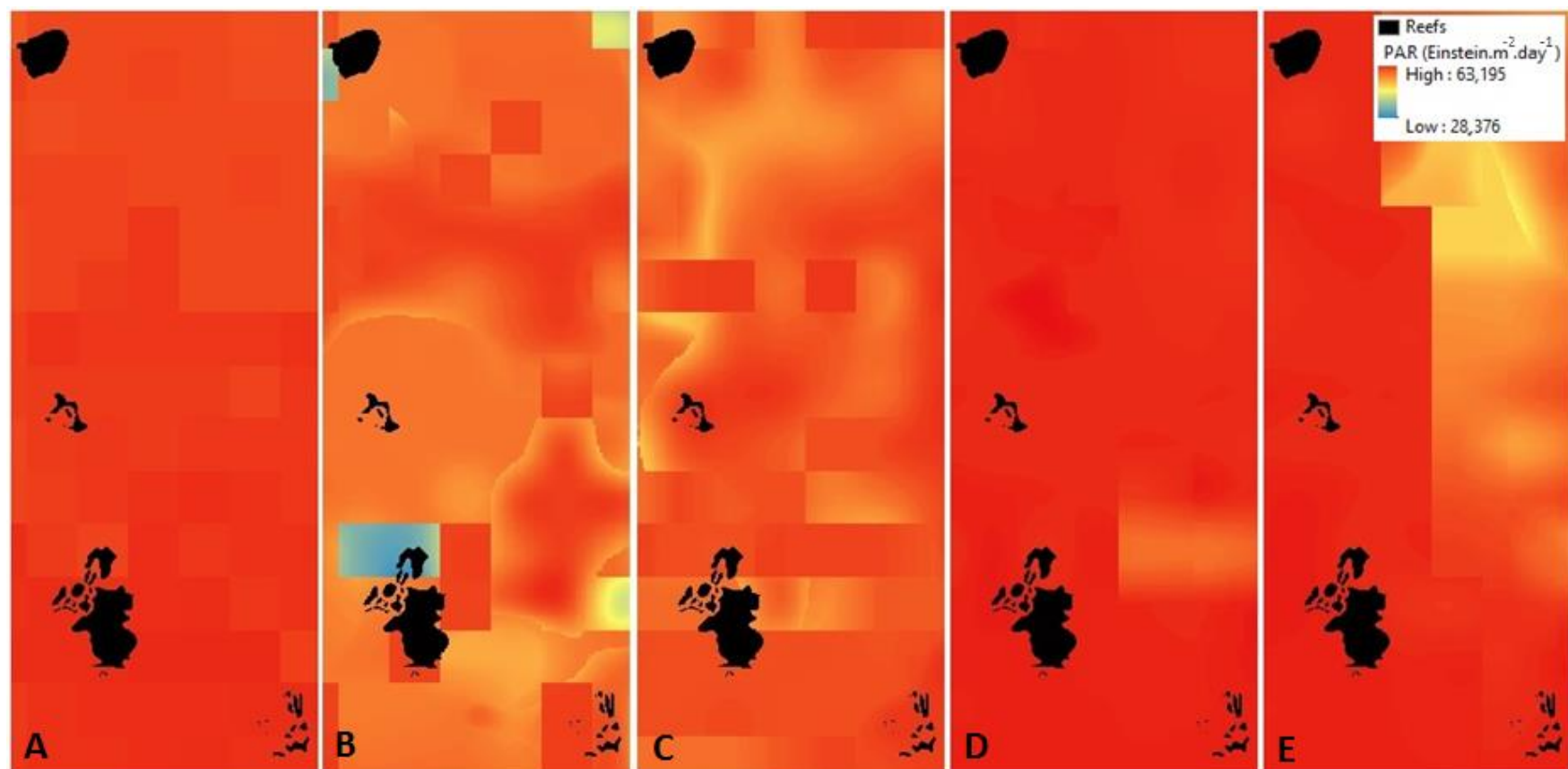


Figura 28: Máxima PAR nos verões de 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c), 2005 (d) e 2016 (e).

## APÊNDICE D

A figura 29 apresenta a variável ambiental independente mínima magnitude do vento nos verões de 2001, 2002, 2003, 2005 e 2016.

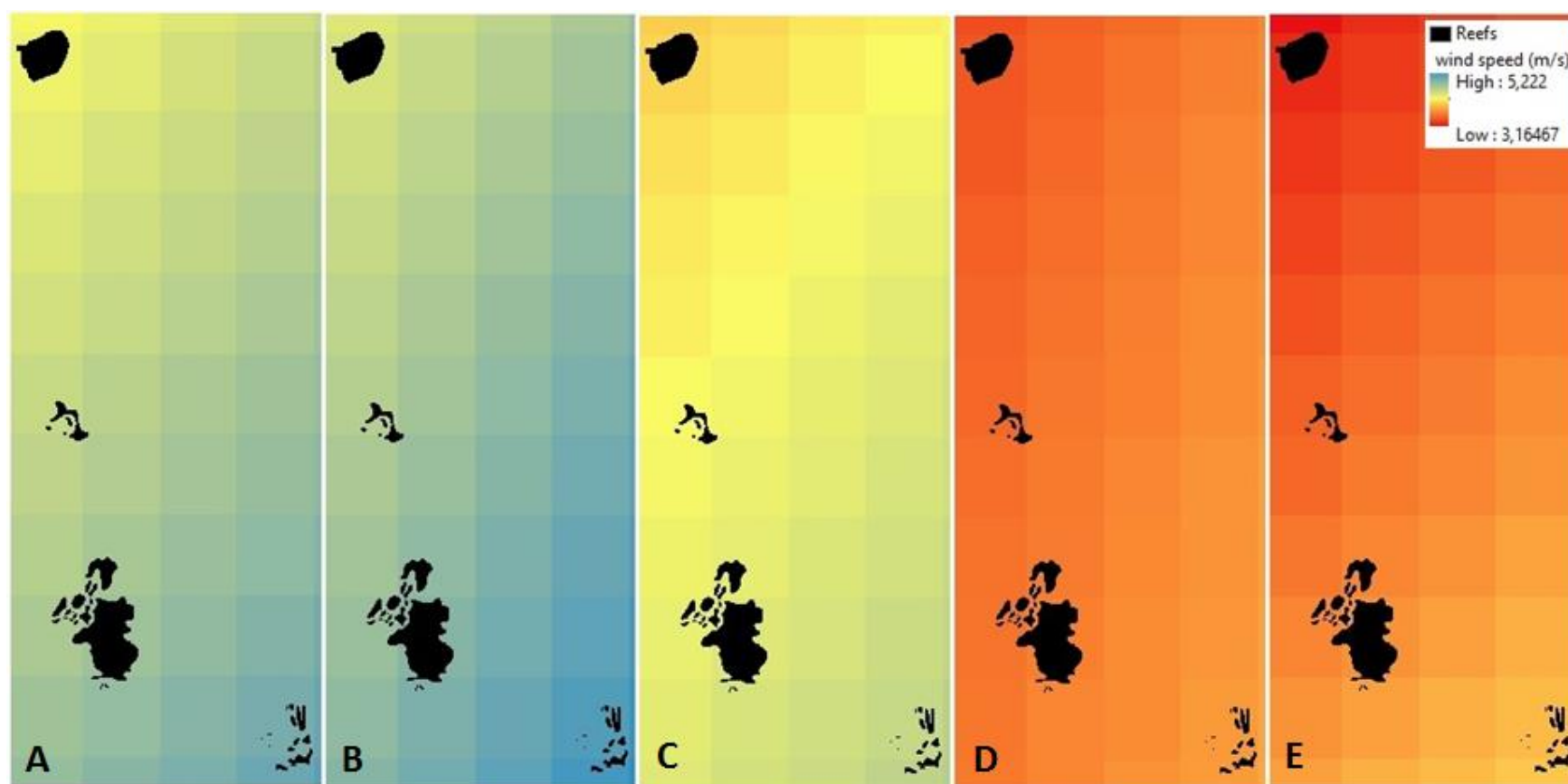


Figura 29: Mínima magnitude do vento nos verões de 2001 (a), 2002 (b), 2003 (c), 2005 (d) e 2016 (e).

## APÊNDICE E

A figura 30 apresenta as variáveis antropogênicas independentes (distâncias às áreas urbanas, hidrovias e porto de Caravelas).

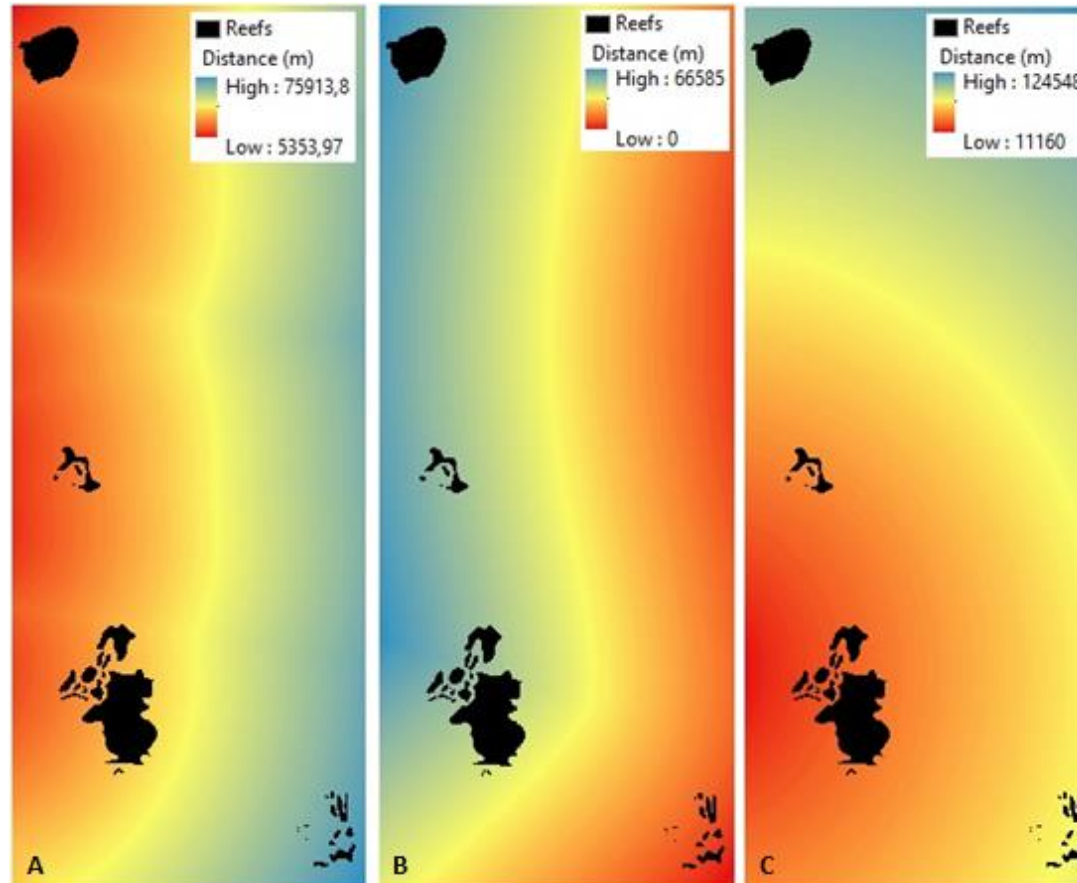


Figura 30: Mapa de distâncias (em metros) dos recifes às áreas urbanas (a), hidrovias (b) e porto de Caravelas (c).

## APÊNDICE F

A figura 31 apresenta os limites do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (unidade de conservação de proteção integral) e a Reserva Extrativista Marinha do Corumbau (unidade de conservação de uso sustentável).

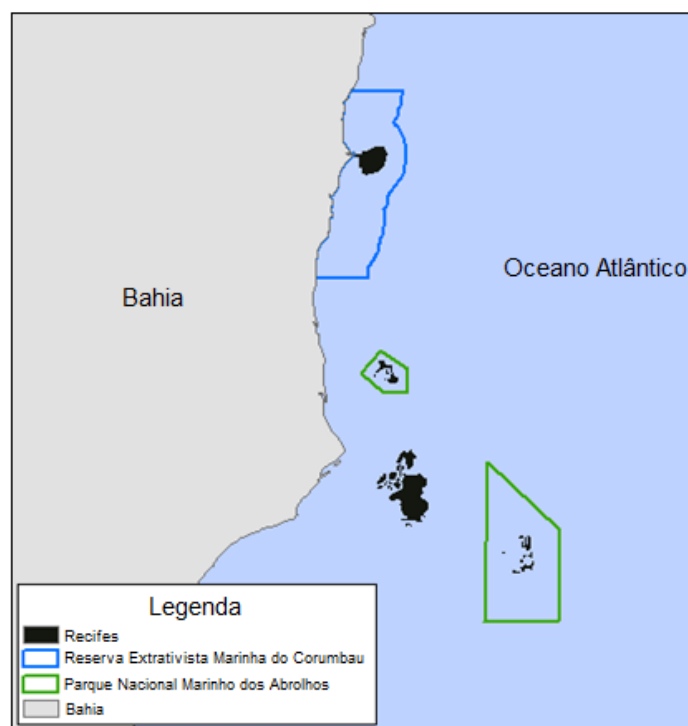


Figura F: Limites das unidades de conservação.

## APÊNDICE G

Trasition_From*	Trasition_To*	First_Variable*	Second_Variable*	Crammer	Joint_Uncertainty
1	2	anomalia_termica/layer_0	area_urbana/layer_0	0	0.137957761770011
1	2	anomalia_termica/layer_0	hidrovias/layer_0	0	0.0996410657621134
1	2	anomalia_termica/layer_0	porto/layer_0	0	0.0749014633355183
1	2	anomalia_termica/layer_0	radiacao_PAR/layer_0	0.371183760827131	0.289680619922665
1	2	anomalia_termica/layer_0	temperatura_maxima/layer_0	0.504712426988223	0.339572734825594
1	2	anomalia_termica/layer_0	vento/layer_0	0.306210428491473	0.17097145154864
1	2	area_urbana/layer_0	hidrovias/layer_0	0	0.289000317936963
1	2	area_urbana/layer_0	porto/layer_0	0	0.20172502461323
1	2	area_urbana/layer_0	radiacao_PAR/layer_0	0.233106602263465	0.064654737790208
1	2	area_urbana/layer_0	temperatura_maxima/layer_0	0.326236252804081	0.0801472412632085
1	2	area_urbana/layer_0	vento/layer_0	0.316629339395345	0.114207073275117
1	2	hidrovias/layer_0	porto/layer_0	0	0.115903025545446
1	2	hidrovias/layer_0	radiacao_PAR/layer_0	0.248276950462199	0.083112393180108
1	2	hidrovias/layer_0	temperatura_maxima/layer_0	0.339869125331222	0.0904530533055676
1	2	hidrovias/layer_0	vento/layer_0	0.23302592564404	0.0669948905375971
1	2	porto/layer_0	radiacao_PAR/layer_0	0.222856824974959	0.0519346880290262
1	2	porto/layer_0	temperatura_maxima/layer_0	0.34242341011188	0.10089983572506
1	2	porto/layer_0	vento/layer_0	0.269614677678051	0.0931034762485669
1	2	radiacao_PAR/layer_0	temperatura_maxima/layer_0	0.454768280623231	0.396665858186975
1	2	radiacao_PAR/layer_0	vento/layer_0	0.244511149561804	0.160729164882974
1	2	temperatura_maxima/la...	vento/layer_0	0.298483600705932	0.167491245962755

Figura 32: Resultado dos testes de correlação espacial entre as variáveis do modelo.

## APÊNDICE H

Tabela 3 – Análise descritiva da variável dependente (% de branqueamento de corais).

<b>% de branqueamento</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Máximo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>
Lixa 2001	0,0	10,4	3,8	4,1	2,5	16,9
Lixa 2002	0,0	8,1	2,8	3,6	0,9	13,1
Lixa 2003	17,5	17,5	17,5	-	17,5	-
Paredes 2001	0,0	20,5	11,0	8,1	14,1	66,3
Paredes 2002	0,0	10,0	3,4	4,2	1,1	17,3
Timbebas 2001	0,0	6,1	3,4	2,3	3,7	5,4
Timbebas 2002	0,6	12,2	4,4	4,5	3,4	20,4
Timbebas 2003	11,8	11,8	11,8	-	11,8	-
Parcel dos Abrolhos 2001	0,0	11,8	5,1	4,4	4,2	19,3
Parcel dos Abrolhos 2002	3,2	13,8	7,6	4,1	6,9	16,5
Parcel dos Abrolhos 2003	8,2	8,2	8,2	-	8,2	-
Santa Bárbara 2001	0,0	1,3	0,4	0,6	0,0	0,3
Santa Bárbara 2002	5,4	6,4	6,1	0,6	6,4	0,3
Santa Bárbara 2005	20,6	28,3	24,5	5,4	24,5	29,6
Redonda 2001	0,7	0,7	0,7	-	0,7	-
Redonda 2002	4,0	4,0	4,0	-	4,0	-
Siriba 2005	24,7	24,7	24,7	-	24,7	-
Sueste 2001	1,1	1,1	1,1	-	1,1	-
Itacolomis 2005	4,7	16,5	10,4	5,9	10,1	34,9

## APÊNDICE I

Tabela 4. Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2001. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife.

Recifes	Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Mediana	Variância
Lixa	Anomalia térmica	13,86	12,91	13,32	0,21	13,29	0,04
Paredes	Anomalia térmica	15,19	12,70	13,70	0,50	13,66	0,25
Timbebas	Anomalia térmica	8,38	7,34	7,85	0,24	7,89	0,06
Parcel dos Abrolhos	Anomalia térmica	12,85	12,53	12,63	0,06	12,63	0,00
Santa Bárbara	Anomalia térmica	8,74	8,47	8,55	0,11	8,47	0,01
Redonda	Anomalia térmica	8,68	8,68	8,68	0,00	8,68	0,00
Siriba	Anomalia térmica	8,63	8,41	8,42	0,05	8,41	0,00
Sueste	Anomalia térmica	8,68	8,68	8,68	0,00	8,68	0,00
Itacolomis	Anomalia térmica	9,44	8,90	9,15	0,13	9,15	0,02
Lixa	Máxima TSM	27,70	26,53	27,02	0,56	26,56	0,32
Paredes	Máxima TSM	27,69	26,56	27,07	0,53	26,64	0,28
Timbebas	Máxima TSM	26,57	26,52	26,53	0,01	26,53	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima TSM	27,73	27,72	27,73	0,00	27,73	0,00
Santa Bárbara	Máxima TSM	26,56	26,55	26,56	0,00	26,56	0,00
Redonda	Máxima TSM	26,56	26,56	26,56	0,00	26,56	0,00
Siriba	Máxima TSM	26,57	26,56	26,56	0,00	26,56	0,00
Sueste	Máxima TSM	26,56	26,56	26,56	0,00	26,56	0,00
Itacolomis	Máxima TSM	27,78	27,75	27,77	0,01	27,77	0,00
Lixa	Máxima PAR	61,12	60,48	60,64	0,15	60,57	0,02
Paredes	Máxima PAR	62,00	60,73	61,74	0,22	61,80	0,05
Timbebas	Máxima PAR	62,05	61,71	61,84	0,05	61,83	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima PAR	61,22	61,02	61,10	0,06	61,07	0,00
Santa Bárbara	Máxima PAR	61,98	61,91	61,95	0,02	61,95	0,00
Redonda	Máxima PAR	61,86	61,86	61,86	0,00	61,86	0,00
Siriba	Máxima PAR	61,87	61,87	61,87	0,00	61,87	0,00
Sueste	Máxima PAR	61,87	61,84	61,85	0,01	61,85	0,00
Itacolomis	Máxima PAR	60,92	59,47	60,05	0,22	60,07	0,05

Lixa	Mínima magnitude do vento	4,66	4,66	4,66	0,00	4,66	0,00
Paredes	Mínima magnitude do vento	4,77	4,59	4,71	0,03	4,72	0,00
Timbebas	Mínima magnitude do vento	4,98	4,92	4,93	0,03	4,92	0,00
Parcel dos Arolhos	Mínima magnitude do vento	4,61	4,48	4,50	0,03	4,48	0,00
Santa Bárbara	Mínima magnitude do vento	4,92	4,92	4,92	0,00	4,92	0,00
Redonda	Mínima magnitude do vento	4,92	4,92	4,92	0,00	4,92	0,00
Siriba	Mínima magnitude do vento	4,92	4,92	4,92	0,00	4,92	0,00
Sueste	Mínima magnitude do vento	4,92	4,92	4,92	0,00	4,92	0,00
Itacolomis	Mínima magnitude do vento	4,27	4,21	4,27	0,00	4,27	0,00

## APÊNDICE J

Tabela 5. Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2002. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife.

Recifes	Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Mediana	Variância
Lixa	Anomalia térmica	4,04	3,96	4,00	0,02	4,00	0,00
Paredes	Anomalia térmica	3,98	3,72	3,85	0,06	3,86	0,00
Timbebas	Anomalia térmica	3,78	3,58	3,66	0,06	3,65	0,00
Parcel dos Abrolhos	Anomalia térmica	4,53	4,39	4,46	0,04	4,46	0,00
Santa Bárbara	Anomalia térmica	3,65	3,63	3,64	0,01	3,63	0,00
Redonda	Anomalia térmica	3,63	3,63	3,63	0,00	3,63	0,00
Siriba	Anomalia térmica	3,62	3,62	3,62	0,00	3,62	0,00
Sueste	Anomalia térmica	3,63	3,63	3,63	0,00	3,63	0,00
Itacolomis	Anomalia térmica	5,44	5,33	5,37	0,03	5,37	0,00
Lixa	Máxima TSM	26,49	26,47	26,48	0,00	26,48	0,00
Paredes	Máxima TSM	26,48	26,43	26,45	0,01	26,45	0,00
Timbebas	Máxima TSM	26,43	26,37	26,40	0,02	26,40	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima TSM	26,69	26,65	26,67	0,01	26,67	0,00
Santa Bárbara	Máxima TSM	26,41	26,40	26,40	0,00	26,40	0,00
Redonda	Máxima TSM	26,40	26,40	26,40	0,00	26,40	0,00
Siriba	Máxima TSM	26,39	26,39	26,39	0,00	26,39	0,00
Sueste	Máxima TSM	26,40	26,40	26,40	0,00	26,40	0,00
Itacolomis	Máxima TSM	26,95	26,88	26,92	0,02	26,92	0,00
Lixa	Máxima PAR	56,43	28,38	32,19	4,67	31,41	21,83
Paredes	Máxima PAR	60,59	28,38	56,83	5,17	56,41	26,71
Timbebas	Máxima PAR	60,73	57,82	59,48	0,58	59,48	0,34
Parcel dos Abrolhos	Máxima PAR	56,75	56,64	56,71	0,03	56,71	0,00
Santa Bárbara	Máxima PAR	60,77	60,76	60,77	0,00	60,77	0,00
Redonda	Máxima PAR	60,75	60,75	60,75	0,00	60,75	0,00
Siriba	Máxima PAR	60,76	60,76	60,76	0,00	60,76	0,00
Sueste	Máxima PAR	60,76	60,75	60,75	0,00	60,75	0,00
Itacolomis	Máxima PAR	59,34	36,91	55,76	4,10	56,63	16,83

Lixa	Mínima magnitude do vento	4,79	4,79	4,79	0,00	4,79	0,00
Paredes	Mínima magnitude do vento	4,89	4,70	4,83	0,04	4,84	0,00
Timbebas	Mínima magnitude do vento	5,13	5,08	5,09	0,02	5,08	0,00
Parcel dos Abrolhos	Mínima magnitude do vento	4,75	4,60	4,62	0,03	4,60	0,00
Santa Bárbara	Mínima magnitude do vento	5,08	5,08	5,08	0,00	5,08	0,00
Redonda	Mínima magnitude do vento	5,08	5,08	5,08	0,00	5,08	0,00
Siriba	Mínima magnitude do vento	5,08	5,08	5,08	0,00	5,08	0,00
Sueste	Mínima magnitude do vento	5,08	5,08	5,08	0,00	5,08	0,00
Itacolomis	Mínima magnitude do vento	4,40	4,35	4,40	0,00	4,40	0,00

## APÊNDICE K

Tabela 6. Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2003. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife.

Recifes	Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Mediana	Variância
Lixa	Anomalia térmica	10,92	9,71	10,17	0,28	10,14	0,08
Paredes	Anomalia térmica	13,47	10,20	11,71	0,67	11,71	0,45
Timbebas	Anomalia térmica	10,03	9,42	9,56	0,11	9,52	0,01
Parcel dos Abrolhos	Anomalia térmica	7,98	7,30	7,67	0,19	7,64	0,03
Santa Bárbara	Anomalia térmica	9,91	9,77	9,83	0,05	9,81	0,00
Redonda	Anomalia térmica	9,91	9,91	9,91	0,00	9,91	0,00
Siriba	Anomalia térmica	9,97	9,86	9,87	0,02	9,86	0,00
Sueste	Anomalia térmica	9,91	9,91	9,91	0,00	9,91	0,00
Itacolomis	Anomalia térmica	3,88	3,44	3,68	0,09	3,68	0,01
Lixa	Máxima TSM	28,33	28,31	28,32	0,01	28,32	0,00
Paredes	Máxima TSM	28,39	28,29	28,33	0,02	28,33	0,00
Timbebas	Máxima TSM	28,35	28,28	28,33	0,02	28,33	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima TSM	28,34	28,31	28,32	0,01	28,32	0,00
Santa Bárbara	Máxima TSM	28,30	28,29	28,30	0,00	28,30	0,00
Redonda	Máxima TSM	28,29	28,29	28,29	0,00	28,29	0,00
Siriba	Máxima TSM	28,29	28,28	28,29	0,00	28,29	0,00
Sueste	Máxima TSM	28,29	28,29	28,29	0,00	28,29	0,00
Itacolomis	Máxima TSM	28,39	28,31	28,36	0,02	28,36	0,00
Lixa	Máxima PAR	59,62	57,10	59,45	0,43	59,52	0,19
Paredes	Máxima PAR	59,77	52,62	57,77	1,93	57,32	3,73

Timbebas	Máxima PAR	61,31	60,44	61,02	0,19	61,07	0,04
Parcel dos Abrolhos	Máxima PAR	61,65	59,71	61,21	0,39	61,31	0,16
Santa Bárbara	Máxima PAR	61,30	61,16	61,23	0,04	61,22	0,00
Redonda	Máxima PAR	61,05	61,05	61,05	0,00	61,05	0,00
Siriba	Máxima PAR	61,18	61,18	61,18	0,00	61,18	0,00
Sueste	Máxima PAR	61,15	61,08	61,09	0,03	61,08	0,00
Itacolomis	Máxima PAR	58,72	54,04	56,62	1,80	57,73	3,22
Lixa	Mínima magnitude do vento	4,32	4,32	4,32	0,00	4,32	0,00
Paredes	Mínima magnitude do vento	4,39	4,26	4,34	0,02	4,35	0,00
Timbebas	Mínima magnitude do vento	4,54	4,50	4,51	0,02	4,50	0,00
Parcel dos Abrolhos	Mínima magnitude do vento	4,28	4,19	4,20	0,02	4,19	0,00
Santa Bárbara	Mínima magnitude do vento	4,50	4,50	4,50	0,00	4,50	0,00
Redonda	Mínima magnitude do vento	4,50	4,50	4,50	0,00	4,50	0,00
Siriba	Mínima magnitude do vento	4,50	4,50	4,50	0,00	4,50	0,00
Sueste	Mínima magnitude do vento	4,50	4,50	4,50	0,00	4,50	0,00
Itacolomis	Mínima magnitude do vento	4,02	3,98	4,02	0,00	4,02	0,00

## APÊNDICE L

Tabela 7. Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2005. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife.

Recifes	Variáveis	Máximo	Mínimo	Média	Desvio padrão	Mediana	Variância
Lixa	Anomalia térmica	15,67	14,38	14,88	0,29	14,85	0,09
Paredes	Anomalia térmica	18,12	14,85	16,38	0,69	16,41	0,48
Timbebas	Anomalia térmica	14,32	13,07	13,41	0,26	13,32	0,07
Parcel dos Abrolhos	Anomalia térmica	13,07	12,65	12,83	0,11	12,83	0,01
Santa Bárbara	Anomalia térmica	14,04	13,77	13,89	0,09	13,86	0,01
Redonda	Anomalia térmica	14,04	14,04	14,04	0,00	14,04	0,00
Siriba	Anomalia térmica	14,15	13,97	13,98	0,04	13,97	0,00
Sueste	Anomalia térmica	14,04	14,04	14,04	0,00	14,04	0,00
Itacolomis	Anomalia térmica	8,51	7,75	8,13	0,18	8,13	0,03
Lixa	Máxima TSM	28,48	28,44	28,46	0,01	28,46	0,00
Paredes	Máxima TSM	28,45	28,32	28,40	0,03	28,40	0,00
Timbebas	Máxima TSM	28,25	27,38	27,66	0,39	27,40	0,15
Parcel dos Abrolhos	Máxima TSM	28,52	28,40	28,50	0,04	28,52	0,00
Santa Bárbara	Máxima TSM	28,21	28,20	28,20	0,00	28,21	0,00
Redonda	Máxima TSM	28,20	28,20	28,20	0,00	28,20	0,00
Siriba	Máxima TSM	28,21	28,21	28,21	0,00	28,21	0,00
Sueste	Máxima TSM	28,20	28,20	28,20	0,00	28,20	0,00
Itacolomis	Máxima TSM	28,55	27,93	28,02	0,16	27,97	0,03
Lixa	Máxima PAR	62,38	61,84	61,98	0,12	61,94	0,02
Paredes	Máxima PAR	62,77	61,99	62,44	0,12	62,44	0,02
Timbebas	Máxima PAR	62,56	62,45	62,49	0,02	62,49	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima PAR	62,20	62,07	62,14	0,04	62,15	0,00
Santa Bárbara	Máxima PAR	62,39	62,37	62,38	0,01	62,38	0,00

Redonda	Máxima PAR	62,37	62,36	62,36	0,00	62,36	0,00
Siriba	Máxima PAR	62,41	62,41	62,41	0,00	62,41	0,00
Sueste	Máxima PAR	62,38	62,37	62,37	0,00	62,37	0,00
Itacolomis	Máxima PAR	62,13	61,70	61,91	0,09	61,91	0,01
Lixa	Mínima magnitude do vento	3,60	3,60	3,60	0,00	3,60	0,00
Paredes	Mínima magnitude do vento	3,63	3,54	3,60	0,02	3,61	0,00
Timbebas	Mínima magnitude do vento	3,75	3,74	3,74	0,01	3,74	0,00
Parcel dos Abrolhos	Mínima magnitude do vento	3,58	3,50	3,51	0,02	3,50	0,00
Santa Bárbara	Mínima magnitude do vento	3,74	3,74	3,74	0,00	3,74	0,00
Redonda	Mínima magnitude do vento	3,74	3,74	3,74	0,00	3,74	0,00
Siriba	Mínima magnitude do vento	3,74	3,74	3,74	0,00	3,74	0,00
Sueste	Mínima magnitude do vento	3,74	3,74	3,74	0,00	3,74	0,00
Itacolomis	Mínima magnitude do vento	3,41	3,38	3,41	0,00	3,41	0,00

## APÊNDICE M

Tabela 8. Análise descritiva das variáveis ambientais independentes em 2016. Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife.

<b>Recifes</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>
Lixa	Anomalia térmica	32,73	31,49	31,98	0,28	31,94	0,08
Paredes	Anomalia térmica	35,53	32,05	33,57	0,68	33,56	0,46
Timbebas	Anomalia térmica	29,67	28,83	29,29	0,23	29,28	0,05
Parcel dos Abrolhos	Anomalia térmica	32,19	30,76	31,17	0,32	31,06	0,10
Santa Bárbara	Anomalia térmica	31,72	31,42	31,57	0,09	31,56	0,01
Redonda	Anomalia térmica	31,72	31,72	31,72	0,00	31,72	0,00
Siriba	Anomalia térmica	31,72	31,72	31,72	0,00	31,72	0,00
Sueste	Anomalia térmica	31,88	31,70	31,71	0,04	31,70	0,00
Itacolomis	Anomalia térmica	25,25	22,90	24,20	0,55	24,20	0,30
Lixa	Máxima TSM	29,21	29,15	29,18	0,02	29,18	0,00
Paredes	Máxima TSM	29,27	29,12	29,18	0,03	29,17	0,00
Timbebas	Máxima TSM	29,31	29,23	29,27	0,02	29,27	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima TSM	28,93	28,88	28,91	0,01	28,91	0,00
Santa Bárbara	Máxima TSM	28,95	28,94	28,94	0,00	28,94	0,00
Redonda	Máxima TSM	28,95	28,95	28,95	0,00	28,95	0,00
Siriba	Máxima TSM	28,95	28,95	28,95	0,00	28,95	0,00
Sueste	Máxima TSM	28,95	28,94	28,94	0,00	28,94	0,00
Itacolomis	Máxima TSM	29,22	29,13	29,18	0,02	29,18	0,00
Lixa	Máxima PAR	62,42	61,97	62,10	0,11	62,07	0,01
Paredes	Máxima PAR	62,69	61,92	62,42	0,16	62,45	0,02
Timbebas	Máxima PAR	62,28	62,12	62,20	0,05	62,21	0,00
Parcel dos Abrolhos	Máxima PAR	62,56	62,19	62,38	0,08	62,38	0,01
Santa Bárbara	Máxima PAR	62,17	62,13	62,14	0,01	62,14	0,00
Redonda	Máxima PAR	62,11	62,09	62,10	0,00	62,10	0,00
Siriba	Máxima PAR	62,13	62,12	62,13	0,00	62,13	0,00
Sueste	Máxima PAR	62,21	62,20	62,21	0,00	62,21	0,00
Itacolomis	Máxima PAR	62,09	61,99	62,04	0,03	62,02	0,00

Lixa	Mínima magnitude do vento	3,63	3,63	3,63	0,00	3,63	0,00
Paredes	Mínima magnitude do vento	3,76	3,57	3,68	0,03	3,69	0,00
Timbebas	Mínima magnitude do vento	3,58	3,45	3,47	0,03	3,45	0,00
Parcel dos Abrolhos	Mínima magnitude do vento	3,96	3,89	3,91	0,03	3,89	0,00
Santa Bárbara	Mínima magnitude do vento	3,89	3,89	3,89	0,00	3,89	0,00
Redonda	Mínima magnitude do vento	3,89	3,89	3,89	0,00	3,89	0,00
Siriba	Mínima magnitude do vento	3,89	3,89	3,89	0,00	3,89	0,00
Sueste	Mínima magnitude do vento	3,89	3,89	3,89	0,00	3,89	0,00
Itacolomis	Mínima magnitude do vento	3,22	3,16	3,22	0,00	3,22	0,00

## APÊNDICE N

Tabela 9. Análise descritiva das variáveis antropogênicas independentes (distância às áreas urbanas, hidrovias e porto). Valores máximos, mínimos, média, desvio padrão, mediana e variância calculados para cada recife. A variável distância ao porto foi considerada somente a partir do ano de 2003 (ano de implementação do porto).

<b>Recifes</b>	<b>Variáveis</b>	<b>Máximo</b>	<b>Mínimo</b>	<b>Média</b>	<b>Desvio padrão</b>	<b>Mediana</b>	<b>Variância</b>
Lixa	Área urbana	31264,35	24.917,36	28.179,30	1486,93	28.396,25	2.210.965,73
Paredes	Área urbana	36078,98	19.247,21	29.525,25	3639,84	30.050,73	13248422,60
Timbebas	Área urbana	22475,15	14.928,85	18.928,21	1811,85	19.097,19	3282795,42
Parcel dos Abrolhos	Área urbana	72181,13	64.349,27	68.495,04	1737,12	68.261,47	3017599,18
Santa Bárbara	Área urbana	63716,45	62.818,63	63.221,33	249,69	63.212,31	62347,40
Redonda	Área urbana	62355,46	61.968,61	62.161,77	97,74	62.160,62	9552,65
Siriba	Área urbana	62646,49	62.388,25	62.522,66	70,42	62.522,32	4958,62
Sueste	Área urbana	64187,16	63.914,98	64.066,93	72,18	64.074,41	5209,51
Itacolomis	Área urbana	18660,38	10.813,66	15.048,95	1887,38	15.121,49	3562186,10
Lixa	Hidrovias	53517,08	47.091,26	50.204,53	1489,50	49.987,83	2218605,17
Paredes	Hidrovias	55705,02	37.207,96	45.709,73	4311,36	45.503,27	18587827,17
Timbebas	Hidrovias	55524,00	48.201,75	51.324,47	1595,45	51.219,06	2545454,25
Parcel dos Abrolhos	Hidrovias	11877,35	2.334,03	6.744,82	2317,98	6.714,17	5373012,45
Santa Bárbara	Hidrovias	11877,46	11.052,06	11.526,14	229,45	11.553,90	52648,34
Redonda	Hidrovias	12523,66	12.135,03	12.347,68	94,72	12.350,42	8972,72
Siriba	Hidrovias	11968,91	11.727,39	11.850,98	65,92	11.850,04	4345,99
Sueste	Hidrovias	10359,78	10.129,61	10.222,51	60,65	10.209,92	3677,84
Itacolomis	Hidrovias	64565,14	55.209,99	59.225,39	2152,39	59.157,08	4632797,08
Lixa	Porto	30840,15	24.450,96	27.750,25	1491,51	27.962,79	2224607,88
Paredes	Porto	35529,74	18.722,04	28.995,64	3628,93	29.516,40	13169118,75
Timbebas	Porto	40629,55	34.837,03	38.284,98	1329,62	38.291,57	1767890,39
Parcel dos Abrolhos	Porto	71619,38	63.799,39	67.938,22	1733,78	67.703,86	3005997,80
Santa Bárbara	Porto	63157,13	62.259,05	62.662,00	249,75	62.653,14	62375,81
Redonda	Porto	61795,00	61.408,23	61.601,44	97,74	61.600,34	9554,05
Siriba	Porto	62085,50	61.827,15	61.961,63	70,43	61.961,22	4960,69

Sueste	Porto	63625,61	63.353,29	63.505,29	72,22	63.512,66	5215,93
Itacolomis	Porto	103643,47	93.905,07	98.954,99	2251,27	99.024,30	5068205,74