



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.05.17.41-TDI

CONECTIVIDADE DEMOGRÁFICA E ACLIMATAÇÃO DE PEIXES RECIFAIS DO GÊNERO SPARISOMA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Luciana Shigihara Lima

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Douglas Francisco
Marcolino Gherardi, aprovada
em 26 de abril de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T449EP>>

INPE
São José dos Campos
2019

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GBDIR)

Serviço de Informação e Documentação (SESID)

CEP 12.227-010

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/7348

E-mail: pubtc@inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE - CEPPII (PORTARIA Nº 176/2018/SEI-INPE):

Presidente:

Dr. Marley Cavalcante de Lima Moscati - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CGCPT)

Membros:

Dra. Carina Barros Mello - Coordenação de Laboratórios Associados (COCTE)

Dr. Alisson Dal Lago - Coordenação-Geral de Ciências Espaciais e Atmosféricas (CGCEA)

Dr. Evandro Albiach Branco - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (COCST)

Dr. Evandro Marconi Rocco - Coordenação-Geral de Engenharia e Tecnologia Espacial (CGETE)

Dr. Hermann Johann Heinrich Kux - Coordenação-Geral de Observação da Terra (CGOBT)

Dra. Ieda Del Arco Sanches - Conselho de Pós-Graduação - (CPG)

Silvia Castro Marcelino - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

BIBLIOTECA DIGITAL:

Dr. Gerald Jean Francis Banon

Clayton Martins Pereira - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

Simone Angélica Del Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Ivone Martins - Serviço de Informação e Documentação (SESID)

Cauê Silva Fróes - Serviço de Informação e Documentação (SESID)



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.05.17.41-TDI

CONECTIVIDADE DEMOGRÁFICA E ACLIMATAÇÃO DE PEIXES RECIFAIS DO GÊNERO SPARISOMA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS

Luciana Shigihara Lima

Dissertação de Mestrado do
Curso de Pós-Graduação em
Sensoriamento Remoto, orientada
pelo Dr. Douglas Francisco
Marcolino Gherardi, aprovada
em 26 de abril de 2019.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP3W34R/3T449EP>>

INPE
São José dos Campos
2019

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Lima, Luciana Shigihara.

L628c Conectividade demográfica e aclimação de peixes recifais do gênero Sparisoma em cenário de mudanças climáticas / Luciana Shigihara Lima. – São José dos Campos : INPE, 2019.
xxvi + 105 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21c/2019/04.05.17.41-TDI)

Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2019.

Orientador : Dr. Douglas Francisco Marcolino Gherardi.

1. Unidades de Conservação Marinhas. 2. Modelo baseado no indivíduo. 3. Atlântico Tropical Sul. 4. Regionalização oceânica. 5. Modelagem biofísica. I. Título.

CDU 528.8:551.46



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

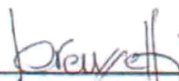
This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

Aluno (a): **Luciana Shighara Lima**

Título: "CONECTIVIDADE DEMOGRÁFICA E ACLIMATAÇÃO DE PEIXES RECIFAIS DO GÊNERO SPARISOMA EM CENÁRIO DE MUDANÇAS CLIMÁTICAS"

Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto

Dr. João Antonio Lorenzetti



Presidente / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Douglas Francisco Marcolino
Gherardi



Orientador(a) / INPE / SJCampos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Luciano Ponzi Pezzi



Membro da Banca / INPE / São José dos Campos - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

Aprovado () Reprovado

Dr. Juan Pablo Quimbayo



Convidado(a) / CEBIMar/USP / São Sebastião - SP

() Participação por Vídeo - Conferência

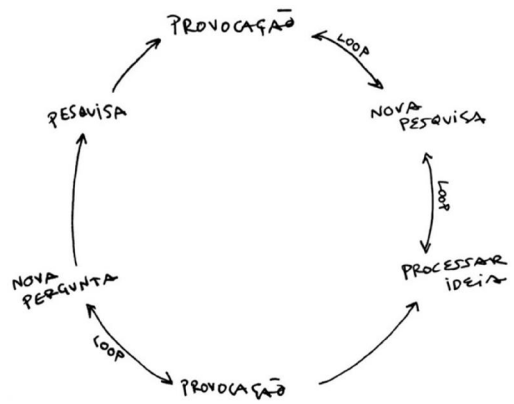
Aprovado () Reprovado

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

unanimidade

São José dos Campos, 26 de abril de 2019



Sem título, 2018. Matheus Abel.

A meus avós, Ramón Shigihara (Coco) e Nélide (Yeya), com quem compartilho a paixão pelo conhecimento, a sede de curiosidade y la admiración por el mar.

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer à todas as pessoas que contribuíram direta ou indiretamente para minha formação, aos amigos que me acompanharam nesta caminhada desde o início e aos que fui conhecendo ao longo do tempo.

Aos meus pais e meu irmão (especialmente em acaloradas discussões ambientais, “engenheirísticas” e agora, marinhas), que sempre estiveram presentes me dando apoio e motivando a seguir em frente. À toda minha família e amigos de longa data, que sempre estiveram presentes, mesmo distantes. E, que apesar do pouco contato nestes últimos dois anos “desaparecida”, estão sempre me apoiando e na torcida pelos meus logros.

Ao grupo de pesquisa em que estou inserida, o Laboratório de Estudos do Oceano e Atmosfera, pelo intercâmbio de conhecimentos e companheirismo, pelas discussões e aprendizados oceanográficos. Um agradecimento especial à Leilane dos Passos, que soube transmitir os saberes e o entusiasmo pela Oceanografia Física e pela modelagem, e que, tornou-se uma grande amiga nestes dois anos de Mestrado.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, pela oportunidade de estudo e de utilização de suas instalações. Em especial pela utilização do cluster Kerana, imprescindível para a realização do presente trabalho.

Aos professores e ao programa de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, por ampliar meus conhecimentos nesta área.

A meu orientador, Dr. Douglas Gherardi, que me confiou e brindou com a oportunidade de realizar este trabalho, resultando ser um grande desafio que empreendi com muita alegria.

A meu melhor amigo e companheiro de vida, Guilherme Bartels, que está sempre a meu lado, mesmo que a alguns tantos quilômetros de distância, por enquanto, e que me incentiva a seguir nossos sonhos todos os dias.

Em especial aos amigos Gilberto Collares, Idel Milani e Beatriz Camaño, que já me acompanham a alguns anos neste caminho de águas.

A minha turma do Sensoriamento Remoto, que estão sempre presentes, nas horas de farra e de estudo, e que transformaram a experiência do mestrado um tanto mais leve devido a sua amizade. Em especial aos amigos que se tornaram família nestes dois anos, sobretudo o grupo “*A Vida é Fuzzy*”. Assim como minhas turmas de casa: Yhasmin Moura, Luciana Oliveira, Leilane Passos, Mylene Cabrera, Ivette Baños e Tânia

Hoffman. Em especial também à Andeise Dutra, super parceira de risadas e trabalhos nestes dois anos.

Agradeço aos membros da banca examinadora, Dr. Luciano Ponzi Pezzi, Dr. João Antonio Lorenzetti, Dr. Juan Pablo Quimbayo, pelas contribuições para a melhoria desse trabalho.

Ao programa PELD-ILOC e CAPES pela concessão da bolsa (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001)

RESUMO

As mudanças na circulação e na temperatura do oceano afetam diretamente a capacidade de dispersão e assentamento dos organismos marinhos. Esta influência se dá principalmente nas condições de sobrevivência dos ovos e larvas, assim como na trajetória imposta pela circulação superficial. As projeções de cenários futuros de mudanças climáticas podem resultar em alterações na circulação e temperatura dos oceanos, afetando o ciclo de vida dos organismos marinhos. Assim, foram utilizadas soluções do modelo do sistema terrestre *Hadley Global Environment Model 2 - Earth System* (HadGEM2-ES) para a modelagem biofísica, com o objetivo de simular as possíveis mudanças nos padrões de conectividade entre nove Unidades de Conservação Marinhas brasileiras, situadas sobre quatro ilhas oceânicas (Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Arquipélago de Fernando de Noronha, Arquipélago de Martim Vaz e Trindade e Atol das Rocas) e cinco sobre a Plataforma Continental Brasileira (Parcel Manuel Luíz, Recife de Corais, Costa de Corais, Abrolhos e Cabo Frio), em um cenário em que nenhuma ação de mitigação seja realizada. Foi realizada a regionalização oceânica do modelo global HadGEM2-ES, ensemble r21p1, cenário Histórico e RCP8.5, através do *Regional Oceanic Model System* (ROMS) para o Oceano Atlântico, cujo domínio inclui as Unidades de Conservação Marinhas (UCMs) nas ilhas oceânicas brasileiras e na plataforma continental do Brasil. Os resultados do RCP 8.5 foram utilizados para advectar as partículas no modelo biológico de dispersão lagrangeana Ichthyop. O organismo-alvo foi o peixe recifal do gênero *Sparisoma* (Labridae: Scarinae) presente nessas áreas. A hipótese de que a aclimação dos peixes recifais poderia mitigar os impactos de um cenário mais quente do oceano foi testada. Observou-se que o cenário futuro de mudanças climáticas irá aumentar a mortalidade e reduzir a conectividade entre as Unidades de Conservação Marinhas mais ao norte. A aclimação reduzirá significativamente a mortalidade e aumentará a conectividade entre as UCMs, principalmente nos cenários de verão.

Palavras-chave: Unidades de Conservação Marinhas. Modelo baseado no indivíduo. Atlântico Tropical Sul. Regionalização oceânica. Modelagem biofísica.

DEMOGRAPHIC CONNECTIVITY AND ACCLIMATION OF REEF FISHES FROM THE GENDER *Sparisoma* sp. IN CLIMATE CHANGE SCENARIOS

ABSTRACT

Changes in ocean circulation and temperature directly affect the dispersal and settlement capacity of marine organisms. This influence occurs mainly in the survival conditions of eggs and larvae, as well as in the trajectory imposed by the superficial circulation. Projections of future scenarios of climate change may result in changes in ocean circulation and temperature, affecting the life cycle of marine organisms. Thus, solutions of the Hadley Global Environment Model 2 - Earth System (HadGEM2-ES) model for biophysical modeling were used to simulate the possible changes in the connectivity patterns between nine Brazilian Marine Protected Areas, located on four islands (São Pedro and São Paulo Archipelago, Fernando de Noronha Archipelago, Martim Vaz and Trindade Archipelago and Rocas Atol) and five on the Brazilian Continental Shelf (Parcel Manuel Luiz, Recife de Corais, Costa de Corais, Abrolhos and Cabo Frio), in a scenario in which no mitigation action is fulfilled. The oceanic regionalization of the global model HadGEM2-ES, ensemble r2i1p1, Historical scenario and RCP8.5, was performed through the Regional Oceanic Model System (ROMS) for the Atlantic Ocean, whose domain includes the Marine Protected Areas (AMPs) in the oceanic islands Brazil and on the continental shelf of Brazil. The results of RCP 8.5 were used to advect the particles in the biological model of Lagrangian Ichthyop dispersion. The target organism was the reef fish of the genus *Sparisoma* (Labridae: Scarinae) present in these areas. The hypothesis that acclimation of reef fish could mitigate the impacts of a warmer ocean scenario has been tested. It was noted that the future scenario of climate change will increase mortality and reduce connectivity between Marine Protected Areas further north. Acclimation will significantly reduce mortality and increase connectivity among AMPs, especially in summer scenarios.

Keywords: Marine Protected Areas. Individual Based Model. Tropical South Atlantic. Oceanic downscaling. Biophysical modeling.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1: Diagrama ilustrando as consequências das mudanças climáticas sobre o ambiente marinho, baseado em dados de IUCN (2017).	8
Figura 2.2: Cenários do IPCC - AR5 e as diferentes projeções das forçantes radiativas antropogênicas globais.	13
Figura 2.3: Representação esquemática da circulação do Oceano Atlântico Sul integrada nos primeiros 500m.	16
Figura 2.4: Quatro espécies do gênero <i>Sparisoma</i> , encontradas na costa e nas ilhas oceânicas brasileiras: (a) <i>Sparisoma tuiupiranga</i> (GASPARINI et al., 2003); (b) <i>Sparisoma amplum</i> (foto de Francini-Filho (2005) tirada no banco de Abrolhos (FishBase)); (c) <i>Sparisoma axillare</i> (foto de Floeter, S. tirada em Fernando de Noronha (FishBase)); (d) <i>Sparisoma frondosum</i> (foto de Luiz, Jr., Osmar J., tirada nos recifes do banco de Abrolhos (FishBase)).	24
Figura 3.1: Representação esquemática das etapas do trabalho.	26
Figura 3.2: Domínio do modelo, e Unidades de Conservação Marinhas (UCMs) utilizadas como áreas de desova e recrutamento e posição das boias do <i>Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic</i> (PIRATA) utilizadas para verificação do resultado dos experimentos hidrodinâmicos ao longo da coluna d'água.	27
Figura 3.3: (a) Representação das coordenadas sigma, no perfil vertical; (b) Representação de uma célula da malha do tipo Arakawa-C.	30
Figura 3.4: Quantidade de ovos lançados de cada UC, em cada uma das simulações. ...	37
Figura 3.5: Matrizes de Probabilidades de Transição (MPT).	41
Figura 4.1: Diagramas de Taylor para a temperatura média no domínio do período entre 1997 e 2004 para (a) verão e (b) inverno. Onde as linhas tracejadas indicam o coeficiente de correlação, os semicírculos centrados na origem, representam o desvio padrão, e os arcos de circunferência representam os valores de RMSD, estes centrados no desvio padrão da observação.	43

Figura 4.2: Perfis verticais de temperatura de 0 a 500 m de profundidade da coluna d'água, para (a) verão e (b) inverno, nos experimentos Histórico e RCP 8.5, comparados em relação aos dados de boias do PIRATA.....	44
Figura 4.3: Diferença entre a TSM para o experimento de cenário futuro (2092-2099) em relação ao experimento histórico (1997-2004) para (a) verão; e (b) inverno.	45
Figura 4.4: Magnitude e sentido da velocidade médio das correntes oceânicas de 0 a 100 metros de profundidade no cenário de clima presente (1997-2004), para (a), (c) e (e) as velocidades no verão, e (b), (d) e (f) as velocidades no inverno, sendo as duas primeiras para o SODA 3.4.2, e em seguida para o dado global do HadGEM2-ES, e por último os resultados da regionalização.....	47
Figura 4.5: Diagramas de Taylor para as componentes zonais (U) ((a) verão e (b) inverno) e meridionais (V) ((c) verão e (d) inverno) para os campos de correntes oceânicas superficiais (0 a 100 metros de profundidade).	48
Figura 4.6: Diferença entre a magnitude média das correntes oceânicas de 0 a 100 metros de profundidade, para o experimento de cenário futuro (2092-2099) em relação ao experimento histórico (1997-2004) para (a) verão; e (b) inverno.	49
Figura 4.7: Variabilidade anual das médias da TSM nos locais de desova. Os limites de temperatura de tolerância inferiores (24°C) e superiores (30°C e 33°C) para os peixes do gênero <i>Sparisoma</i> estão demarcados pelas linhas tracejadas.....	51
Figura 4.8: Mortalidade total dos indivíduos para inverno e verão com limites atuais de temperatura de tolerância e com aclimatação. Onde as cores claras indicam os resultados para o cenário com os limites de temperatura de tolerância atuais, e as mais intensas indicam o cenário com aclimatação. Os tons de azul indicam a quantidade de indivíduos mortos no final dos experimentos para os invernos, e amarelo/alaranjado, os verões.....	52

- Figura 4.9: Taxa de mortalidade ao longo do tempo para as simulações de 2092 a 2099: (a) Verões com temperatura de tolerância atual; (b) Verões com aclimatação; (c) Invernos com temperatura de tolerância atual; e (d) Invernos com aclimatação. Em que cada linha representa um ano de simulação..... 54
- Figura 4.10: Taxa de sobrevivência e mortalidade dos organismos, considerando as áreas de lançamento (a,b) e anos simulados (c, d) considerando a temperatura de tolerância atual. E considerando as áreas de lançamento das partículas (e,f) e anos simulados (g,h) nas simulações considerando a adaptação de +3°C dos organismos. Onde as cores indicam a causa da morte: por hipotermia – azul; por hipertermia – vermelho; advecção para fora do domínio – amarelo; ou sobrevivência - verde. 56
- Figura 4.11: Deslocamento total das partículas lançadas de cada UCM, em relação ao local de lançamento, para (a) verões e (b) invernos. Onde os tons claros indicam os resultados para o cenário de temperatura de tolerância atual, e os tons mais escuros representam as respostas do cenário de aclimatação.. 60
- Figura 4.12: Padrão de dispersão de ovos e larvas do Ichthyop, para os (a) verões e (b) invernos das simulações horárias, para o cenário com temperatura de tolerância atual..... 62
- Figura 4.13: Padrão de dispersão de ovos e larvas do Ichthyop, para os (a) verões e (b) invernos das simulações horárias, para os cenários de aclimatação. 63
- Figura 4.14: Recrutamentos para cada UCM, ao longo dos anos, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimatação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimatação (d)..... 65
- Figura 4.15: Auto - recrutamentos para cada UCM, ao longo dos anos, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimatação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimatação (d)..... 66

Figura 4.16: Valores de retenção local para cada UC, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimação (d).....	67
Figura 4.17: Matrizes de transição de probabilidades considerando o cenário de temperatura de tolerância atual no (a) verão e (b) inverno; e considerando o cenário com aclimação dos organismos (+3°C) no (c)verão e (d) inverno.	69
Figura A.1: Campo médio de temperatura da água do mar para verões do (a) OSTIA; (b) ROMS; para invernos de (c) OSTIA e (d) ROMS, para os anos de 1997 a 2004.....	95
Figura A.2: Campo médio de RMSD (°C) em relação aos dados de temperatura do OSTIA, nos verões: (a) para os dados do HadGEM2-ES, (b) para as saídas do ROMS; para os invernos: (c) para os dados do HadGEM2-ES, (d) para as saídas do ROMS.....	96
Figura A.3: Campo médio de viés (°C) em relação aos dados de temperatura do OSTIA, nos verões: (a) para os dados do HadGEM2-ES, (b) para as saídas do ROMS; para os invernos: (c) para os dados do HadGEM2-ES, (d) para as saídas do ROMS.....	97
Figura B.1: Campo médio de RMSD (m. s ⁻¹) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no verão.	98
Figura B.2: Campo médio de RMSD (m. s ⁻¹) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no inverno.	99
Figura B.3: Campo médio de viés (m. s ⁻¹) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no verão.	100
Figura B.4: Campo médio de viés (m. s ⁻¹) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no inverno.	101

Figura C.1: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de tolerância atual, verões.....	102
Figura C.2: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de tolerância atual, invernos.	103
Figura C.3: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de aclimatação, verões.	104
Figura C.4: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de aclimatação, invernos.	105

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 3.1: Informações sobre as áreas de lançamento dos ovos.....	28
Tabela 3.2: Períodos dos experimentos realizados.....	31
Tabela 3.3: Componentes oceânicas e atmosféricas inseridas na modelagem hidrodinâmica.....	33
Tabela 3.4: Características biológicas do gênero <i>Sparisoma</i> a ser inserida na configuração do Ichthyop versão 3.3.....	38

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AB	Unidade de Conservação de Abrisos
AMOC	Circulação de Revolvimento Meridional Atlântico
AR	Unidade de Conservação de Atol das Rocas
AR5	Quinto Relatório de Avaliação do IPCC
ASM	Altura da Superfície do mar
biCSE	Bifurcação da Correntes Sul Equatorial
CB	Corrente do Brasil
CC	Unidade de Conservação de Costa dos Corais
CDO	<i>Climate Data Operators</i>
CF	Unidade de Conservação de Cabo Frio
CM	Corrente das Malvinas
CMIP5	Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados – Fase 5
CNB	Corrente Norte do Brasil
ECP	<i>Extended Concentration Pathways</i>
ESGF	<i>Earth System Grid Federation</i>
ESM	Modelo do Sistema Terrestre
FN	Unidade de Conservação de Fernando de Noronha
GEE	Gases do Efeito Estufa
GHRSSST-PP	<i>Global High-Resolution Sea Surface Temperature – Pilot Project</i>
MBI	Modelo baseado no Indivíduo
ILOC	Ilhas Oceânicas
IPCC	Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas
IUCN	União Internacional para a Conservação da Natureza
MCG	Modelo de Circulação Geral
ML	Parque Estadual Marinho Parcel de Manuel Luíz
MPT	Matrizes de Probabilidades de Transição
NCO	<i>netCDF Operators</i>
OMM	Organização Mundial de Meteorologia
OSTIA	<i>Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis</i>
PELD-ILOC	Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração – Ilhas Oceânicas

PIRATA	<i>Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic</i>
PLD	<i>Pelagic Larvae Duration</i> - Período de duração da larva no plâncton
PNM	Pressão atmosférica a nível do mar
PNUA	Programa das Nações Unidas para o Ambiente
PPT	Precipitação
RC	Unidade de Conservação de Recife dos Corais
RCP	<i>Representative Concentration Pathway</i>
RMSD	<i>Root Mean Square Deviation</i>
ROMS	<i>Regional Ocean Modeling System</i>
S	Salinidade da água do mar
SODA	<i>Simple Ocean Data Assimilation</i>
SPSP	Arquipélago de São Pedro e São Paulo
SRES	<i>Special Report on Emission Scenarios</i>
TA	Temperatura do Ar
TR	Arquipélago de Trindade e Martim Vaz
TSM	Temperatura da Superfície do Mar
UCM	Unidade de Conservação Marinha
UKMO	<i>United Kingdom Meteorological Office</i>
V (u, v)	Correntes oceânicas, nas componentes zonais (u) e meridionais (v)
WCRP	<i>World Climate Research Program</i>
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Justificativa.....	5
1.2 Objetivos	6
1.2.1 Objetivo geral.....	6
1.2.2 Objetivos específicos	6
2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	7
2.1 O impacto das mudanças climáticas sobre os oceanos	7
2.2 Cenários de projeções climáticas.....	11
2.3 Regionalização.....	14
2.4 Cenário Atual <i>versus</i> Cenário Futuro do Atlântico Tropical	14
2.4.1 Cenário Atual	14
2.4.2 Cenário Futuro do Atlântico Tropical.....	17
2.5 Conectividade demográfica.....	18
2.6 Adaptação e aclimação dos organismos frente às mudanças climáticas.....	19
2.7 Modelagem biofísica.....	20
3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	25
3.1 Domínio do modelo: áreas de desova e recrutamento	26
3.2 Modelagem hidrodinâmica.....	28
3.2.1 Experimento Histórico (presente) e de cenário futuro.....	31
3.2.2 Verificação do experimento histórico de regionalização.....	33
3.3 Modelagem Lagrangeana	36
3.3.1 Causas e taxas de mortalidade.....	38
3.3.2 Padrões de dispersão e conectividade demográfica.....	39
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	42
4.1 Verificação e mudança climática regional no Oceano Atlântico Tropical	42
4.1.1 Temperatura da água do mar	42
4.1.2 Correntes superficiais	45
4.2 Impactos das mudanças climáticas sobre os peixes recifais do Atlântico tropical..	50
4.2.1 Mortalidade dos indivíduos.....	50

4.2.2	Padrões de dispersão	58
4.2.3	Recrutamento, auto-recrutamento e conectividade demográfica	64
5	SÍNTESE E CONCLUSÕES	71
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	74
	APÊNDICE A – TEMPERATURA DA ÁGUA DO MAR.....	95
	APÊNDICE B – CORRENTES OCEÂNICAS.....	98
	APÊNDICE C – MATRIZES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO.....	102

1 INTRODUÇÃO

Os ecossistemas, assim como o clima, são dinâmicos e sofrem mudanças em diversas escalas de tempo (BARANGE et al., 2010b). O aumento da temperatura e a elevação do nível do mar, a sua acidificação e os níveis de oxigênio dissolvido, assim como alterações nos padrões de circulação, afetam direta e indiretamente a distribuição das espécies e sua abundância, assim como a dinâmica das populações e composição das comunidades (PÖRTNER et al., 2015).

Frente à crescente preocupação com os impactos antrópicos sobre o meio ambiente, a comunidade científica internacional vem investigando o estado atual das mudanças climáticas e seus possíveis impactos socioeconômicos e ambientais (IPCC, 2007). Resultado disso, o Programa das Nações Unidas para o Ambiente (PNUA) e a Organização Mundial de Meteorologia (OMM) criaram, em 1988, o Painel Intergovernamental de Mudanças Climáticas (IPCC). O IPCC nasceu com o intuito de padronizar as informações sobre mudanças climáticas e produzir avaliações de informações científicas disponíveis sobre mudanças climáticas, com uma linguagem acessível e com o intuito de atender às necessidades de formuladores de políticas e não especialistas.

Desde sua criação, cientistas vinculados aos principais centros de pesquisa em clima, elaboram relatórios sobre os possíveis cenários de emissão de gases do efeito estufa na atmosfera e seus impactos sobre o clima. Estes cenários apresentados nos relatórios do IPCC são projeções. A diferença entre projeção e previsão está em que, nas previsões os modelos matemáticos são utilizados para prever condições climáticas num horizonte de tempo futuro, dada uma condição inicial. Já as projeções, são modelos em que são inseridas suposições a respeito do futuro e, assim, representar o clima neste suposto cenário (BRAY; VON STORCH, 2009; IPCC, 2013). Por exemplo, são projeções as respostas de sistemas climáticos frente a cenários de emissão ou concentração de gases do efeito estufa e aerossóis. São diferentes das previsões devido a que estas dependem de forçamentos devido a cenários de emissões/concentrações baseados em suposições enquanto que as previsões são resultados de tentativas em produzir estimativas da evolução real do clima no futuro, por exemplo, em escalas de tempo diárias, sazonais ou interanuais.

Os efeitos das mudanças climáticas sobre os ecossistemas marinhos podem ser investigados a partir da modelagem biofísica, que simula tanto os processos físicos como biológicos (LETT et al., 2010). Com base nos cenários climáticos pode-se simular seus efeitos sobre a biota marinha e a capacidade das Unidades de Conservação Marinhas (UCMs) de garantirem a resiliência desta biota. Essas simulações podem envolver desde produtores primários até os mais altos níveis tróficos e testar hipóteses sobre as respostas destes frente ao aquecimento global, tanto espacialmente como temporalmente. Isso facilita o entendimento dos processos que ocorrem em escala global e regional (BARANGE et al., 2010b; STOCK et al., 2011), embora projeções quantitativas específicas destas projeções ainda permaneçam imprecisas (PÖRTNER et al., 2015).

Dentre os Modelos de Circulação Geral (MCG), existem os que simulam os processos físicos apenas na atmosfera (os Modelos de Circulação Geral da Atmosfera), outros somente nos oceanos (Modelos de Circulação Geral Oceânico), enquanto alguns simulam em ambos (Modelos de Circulação Geral Atmosfera-Oceano). Atualmente existem alguns modelos capazes de simular as interações dos processos biológicos, físicos e químicos entre a atmosfera, oceano, criosfera e biosfera (Modelos do Sistema Terrestre - ESM). É importante destacar a dificuldade em representar de maneira fidedigna a realidade, e que cada entrada de informação no modelo é uma possível fonte de erro. A capacidade dos modelos para reproduzir a realidade deve ser avaliada a partir de dados medidos, para assim corroborar sua capacidade de representação da realidade (STONER et al., 2009).

O *Hadley Global Environment Model 2 - Earth System* (HadGEM2-ES) é um Modelo do Sistema Terrestre, criado pelo *Met Office Hadley Center* para as simulações centenárias apresentadas no *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5), sendo o primeiro de sua família de modelos (HadGEM2) a incluir componentes do sistema terrestre (ciclo de carbono terrestre e oceânico e química troposférica). A família HadGEM2 apresenta vários modelos, com diferentes níveis de complexidade, mas com uma mesma estrutura física, a qual inclui as configurações dos modelos acoplados Oceano-Atmosfera, dos não acoplados e, as configurações do sistema terrestre (COLLINS et al., 2008).

Os *Representative Concentration Pathways* (RCPs) são cenários de emissão de gases do efeito estufa, apresentados no Quinto Relatório de avaliação do IPCC (AR5). O RCP 8.5 corresponde a um cenário em que as emissões seguem a tendência atual de aquecimento, não havendo nenhuma atitude de mitigação. Neste cenário, considerado o mais pessimista, as emissões e concentrações de gases de efeito estufa aumentam consideravelmente ao longo do tempo, levando a um forçamento radiativo de 8,5 W/m² no final do século (RIAHI et al., 2011). Os cenários climáticos futuros preveem consequências cada vez mais graves para a pesca, o turismo, a proteção costeira e ecossistemas marinhos (HOEGH-GULDBERG et al., 2007).

Muitos organismos que vivem em ambientes recifais apresentam, em seu estágio larval, o maior potencial de conectividade entre populações que habitam diferentes áreas de recife (SALE, 1991). A duração do período larval (PLD), a temperatura da água e as correntes de água a que os ovos e larvas estão submetidos, o número de propágulos reprodutivos produzidos e a proporção de sobreviventes na colonização, assim como a disponibilidade de habitat adequado para o assentamento de larvas, são fatores que irão influenciar no potencial de conectividade entre populações distribuídas em diferentes áreas geográficas (GERBER et al., 2014; JONES et al., 2009; LEIS, 2007; MUNDAY et al., 2009; O'CONNOR et al., 2007). As mudanças climáticas podem afetar todos esses fatores e alterar significativamente os padrões de conectividade biológica e/ou causar extinções de espécies suscetíveis que residem nestes ecossistemas (CAHILL et al., 2012; MUNDAY et al., 2008a, 2009). Além disso, vários organismos calcários (por exemplo, algas calcárias, corais, moluscos e fases larvares de equinodermas) estão diretamente afetados negativamente devido ao fenômeno de acidificação oceânica (KROEKER et al., 2013).

Recrutamento é o processo biológico através pelo qual os animais são inseridos em uma população. A variabilidade no recrutamento ocasiona flutuações no tamanho das populações, de modo que entender as conexões no espaço e no tempo entre as variações ambientais e o recrutamento são fundamentais para a conservação eficaz destas regiões (CROWDER; NORSE, 2008). Muitas populações marinhas com fases dispersivas funcionam como “metapopulações” com subpopulações interconectadas que trocam indivíduos entre si (KRITZER; SALE, 2006). Além disso, muitas espécies marinhas apresentam o que os ecologistas chamam de “dinâmica populacional fonte –

sumidouro” (CROWDER et al., 2000). Neste contexto, ocorre que alguns organismos ocupam habitats “sumidouro” que são colonizados por larvas originadas de outros lugares, enquanto que, uma parte crítica da metapopulação ocorre em habitats de “fonte”, onde a produção de indivíduos desovados é suficiente para manter o tamanho das populações fonte e sumidouro (PULLIAM, 1988).

As ilhas oceânicas são caracterizadas por apresentar um alto grau de endemismo, devido a sua área reduzida e alto isolamento geográfico (PINHEIRO et al., 2017). O percentual de espécies endêmicas é alto e a vulnerabilidade destas espécies é maior em relação às dos continentes devido ao espaço geográfico limitado e único, além de haver menor variabilidade genética (FRANKHAM, 1997), aumentando o risco de extinção de populações que vivem nestas regiões (SERAFINI et al., 2010). Embora ao longo do tempo, em escala geológica, a fauna de peixes recifais isolados, apresentaram momentos de alta conectividade com o continente, devido a mudanças no nível do mar, o que favorece o modelo intermitente de conectividade entre populações de ilhas oceânicas e o continente (FERNÁNDEZ-PALACIOS et al., 2016; PINHEIRO et al., 2017).

A estimativa da conectividade a partir de modelagem biofísica se baseia na simulação hidrodinâmica do oceano a partir de um modelo numérico e de um modelo lagrangeano para simulação do comportamento de ovos e larvas baseado nos parâmetros físicos (fornecidos por um modelo hidrodinâmico) e nos parâmetros biológicos e ecológicos da espécie estudada. Estes elementos compõem os modelos baseados no indivíduo (*Individual Based Models* – IBM ou MBI), que possibilitam a simulação da dispersão dos indivíduos considerando características biológicas da espécie, tal como temperatura letal, flutuabilidade e migração nictemeral (ao longo das 24 horas) (HINRICHSEN et al., 2011).

Os budiões ou peixes-papagaio (família Scaridae da ordem dos Perciformes) representam um grupo funcional importante nos recifes de coral, pois se alimentam de algas que se aderem aos recifes, auxiliando no seu controle e crescimento devido ao assentamento de novas larvas (FRANCINI-FILHO et al., 2008). Além disso, estas espécies favorecem a transferência de energia entre os níveis inferiores e superiores da cadeia trófica (CHOAT, 1991). Os peixes desta família são encontrados ao longo da plataforma continental, como também sobre ilhas oceânicas. Desta forma este trabalho

analisou os padrões de conectividade demográfica das populações do peixe recifal do gênero *Sparisoma* sp. residentes nos ambientes recifais brasileiros continentais e insulares localizados em UCMs, considerando o cenário de projeção futura RCP 8.5.

1.1 Justificativa

Os peixes recifais são componentes importantes no equilíbrio da comunidade bentônica dos recifes (e demais fundos duros) das ilhas oceânicas e plataforma continental (REF). No entanto, estas espécies sofrem uma alta pressão devido atividades humanas como a pesca, a qual a *Food and Agriculture Organization* (FAO) estima que são extraídas mais de 250 toneladas destes peixes por ano em águas brasileiras (FAO, 2018). Na província Brasileira algumas espécies encontram-se altamente ameaçadas, como é o caso das espécies do gênero *Sparisoma*, o qual apresenta seis espécies endêmicas da província (DE MOURA et al., 2001; GASPARINI et al., 2003; HOEY; BONALDO, 2018). Assim, a compreensão sobre as possíveis alterações futuras no padrão de conectividade no Atlântico tropical é fundamental para se avaliar o nível de isolamento destas populações, os riscos de extinção local e as possíveis ações mitigadoras destes impactos.

Através da análise do estado físico do oceano atual e possível cenário futuro, pode-se estimar os potenciais impactos sobre a migração e conectividade entre populações marinhas e, assim elaborar medidas efetivas que visem minimizar os efeitos negativos das mudanças climáticas (CARR et al., 2017). Os planos de conservação precisam ser ajustados ao longo do tempo, à medida que espécies desaparecem de determinadas regiões e migram para novos territórios. Para isso, deve-se ter o acompanhamento destas mudanças, por meio de estudos de longa duração nestas áreas. O presente estudo faz parte do Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração - Ilhas Oceânicas (PELD-ILOC), cujo objetivo é monitorar a longo prazo as comunidades recifais das ilhas oceânicas brasileiras frente aos impactos antrópicos e de mudanças climáticas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo geral

O objetivo deste trabalho é determinar os padrões de conectividade demográfica das populações de peixes recifais do gênero *Sparisoma* sp. das ilhas oceânicas e plataforma continental do Brasil localizadas em Unidades de Conservação Marinhas (UCMs), frente às possíveis alterações ambientais em cenários futuros de mudanças climáticas.

1.2.2 Objetivos específicos

- 1) Analisar os padrões futuros da circulação no Atlântico tropical, incluindo as ilhas oceânicas e a plataforma continental do Brasil, com base na regionalização dinâmica do oceano, considerando o cenário de emissão do RCP8.5.
- 2) Avaliar os impactos do cenário futuro de emissões nas taxas de recrutamento e mortalidade de ovos e larvas dos peixes recifais do gênero *Sparisoma* sp.
- 3) Determinar os possíveis padrões de conectividade demográfica das populações de peixes do gênero *Sparisoma* sp. das ilhas oceânicas e da plataforma continental do Brasil, para os períodos de inverno e verão, a partir da regionalização do modelo de cenários de mudanças climáticas HadGEM2-ES.
- 4) Testar a hipótese de que a aclimação dos peixes recifais devido ao aumento temperatura da água do mar poderá influenciar a mortalidade dos ovos e larvas, assim como a conectividade demográfica.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

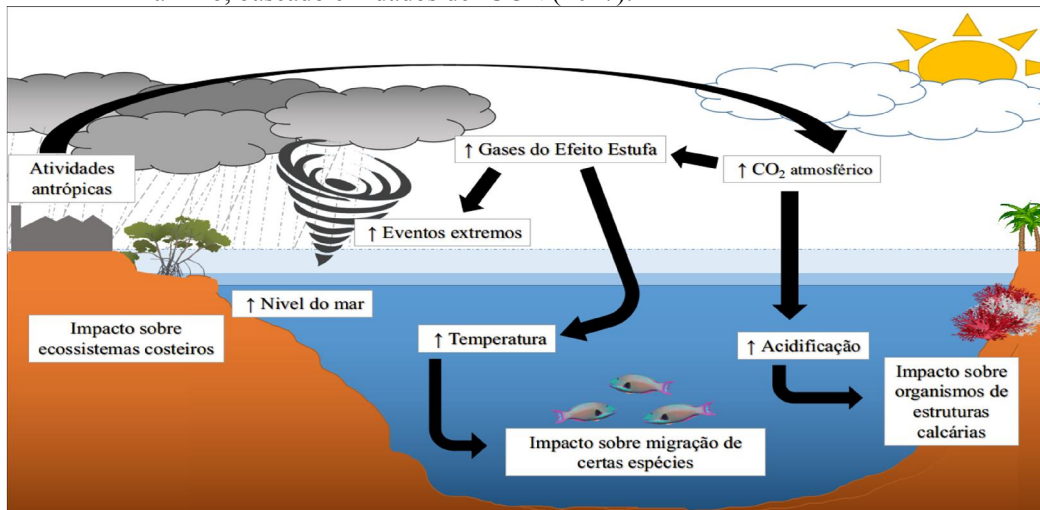
A fundamentação teórica apresenta, inicialmente, os possíveis impactos das mudanças climáticas sobre os oceanos e as consequências destes sobre os ecossistemas marinhos e as UCMs (2.1). Em seguida (2.2), discorre-se sobre os cenários de projeções climáticas, necessários para o entendimento de processos climáticos, tanto do passado assim como prováveis cenários futuros. Apresenta-se, também, importância da técnica de regionalização oceânica para a determinação das principais diferenças entre o estado atual e o esperado para o futuro em relação ao Oceano Atlântico tropical (2.3). Ao final, o cenário atual é comparado com o cenário futuro de circulação superficial do Atlântico tropical (2.4), apresenta-se o conceito de conectividade demográfica (2.5) e adaptação dos organismos frente às mudanças climáticas (2.6). E, como a modelagem hidrodinâmica e biológica podem ser integradas para explicar a interação de processos físicos e biológicos (2.7).

2.1 O impacto das mudanças climáticas sobre os oceanos

As atividades antrópicas, desde a revolução industrial, têm ocasionado impactos negativos sobre o clima e o meio ambiente (HOEGH-GULDBERG; BRUNO, 2010). A alta taxa de emissão de gases do efeito estufa (GEE) tem causado mudanças no equilíbrio químico, físico e biológico dos ecossistemas, induzido inclusive extinções locais de espécies tais como *Azurina eupalama* em Galápagos e recentemente eventos de branqueamento massivo de corais (BRIGGS, 2011; HUGHES et al., 2017, 2018). O Quinto Relatório de Avaliação do IPCC em 2013 revelou que o aquecimento do oceano é responsável por 93% do aumento do estoque de energia da Terra entre 1971 e 2010, resultando no aquecimento do oceano superior (águas a profundidades de até 700 metros) (LYNNE et al., 2013). Dentre as consequências deste aumento, inclui-se: aumento da estratificação dos oceanos, afetando o regime de correntes oceânicas, a expansão de zonas anóxicas, alterações nas faixas geográficas de ocorrência de espécies marinhas, e mudanças nas estações de reprodução, bem como a diversidade e abundância de comunidades marinhas (DONEY et al., 2012).

O aquecimento da atmosfera está ocasionando o derretimento das geleiras e do gelo no interior dos continentes, causando o aumento do nível do mar com impactos significativos nas linhas costeiras (erosão costeira, intrusão da água salgada, destruição de habitats) e assentamentos humanos costeiros (HARLEY et al., 2006). O IPCC projeta um aumento do nível médio da água do mar de 0,40 m (0,26 a 0,55 m) para 2081 a 2100 em comparação com 1986-2005 para um cenário de baixas emissões e 0,63 m (0,45 a 0,82 m) para um cenário de alta emissão (IPCC, 2007). Os eventos extremos devem aumentar em frequência devido ao aumento de emissões de GEE. Projeta-se também uma variação no padrão do regime de ventos, e conseqüentemente, a circulação dos oceanos. O aquecimento do oceano global, somado a variações na intensidade das correntes causará mudanças sobre a conectividade e sobrevivência dos organismos (Figura 2.1).

Figura 2.1: Diagrama ilustrando as conseqüências das mudanças climáticas sobre o ambiente marinho, baseado em dados de IUCN (2017).



Fonte: Produção do autor.

O CO₂ emitido em altas proporções também está tornando o oceano mais ácido, o que reduz a capacidade dos organismos marinhos como corais, plânctons e moluscos, de fixar carbonato de cálcio necessário para suas estruturas esqueléticas. Também exacerba os estresses fisiológicos existentes (como respiração impedida e reprodução) e reduz as taxas de crescimento e sobrevivência durante os primeiros estágios de vida de algumas

espécies (MUNDAY et al., 2012). Outros fatores como a desoxigenação, o aumento da intensidade de tempestades, o aumento da turbidez, da sedimentação, da eutrofização e de outras formas de poluição, contribui para o desenvolvimento de um ambiente de estresse para a sobrevivência dos organismos e para a perda da diversidade (CAROZZA et al., 2019; FREE et al., 2019; IPCC, 2007; KLEYPAS, 2019). A implementação e manutenção de áreas protegidas por lei, podem auxiliar na mitigação e diminuição destes impactos negativos, assim como na preservação da biodiversidade e qualidade dos ecossistemas.

Os ambientes recifais, formados por corais, são fundamentais na manutenção da diversidade de espécies, pois possibilitam a diversificação de nichos ecológicos e permitem a coexistência de um elevado número de espécies, incluindo peixes recifais (ADEY, 2000). Por este motivo, estes ambientes são focos de conservação da União Internacional para a Conservação da Natureza (IUCN), pois mudanças na composição de espécies pode gerar um efeito cascata e induzir diversas extinções de espécies (CAHILL et al., 2012; HARNIK et al., 2012). O aumento de temperatura, a variação de pH da água, e material particulado em suspensão, já afetam negativamente estes ecossistemas, como pode ser observado nos eventos globais de branqueamento de corais (SULLY et al., 2019).

As Unidades de Conservação Marinhas (UCMs) têm como finalidade garantir a conservação da biodiversidade, promovendo a utilização sustentável dos recursos naturais associados ao mar, em regiões de importância ecológica (TOPOR et al., 2019). Em alguns casos estas podem ajudar na recuperação de estoques pesqueiros e assim manter o potencial da pesca, regular o clima, reciclar nutrientes, assim como proteger da erosão acelerada em áreas costeiras (STRAIN et al., 2019). Para que as UCMs resultem efetivas na conservação e auxiliem na resiliência da biodiversidade frente às mudanças climáticas, recomenda-se identificar e incluir refúgios importantes para os organismos, principalmente pontos de desova, assim como observar os caminhos de conectividade que interligam esses refúgios para recolonização em caso de desastres. O grau de resiliência das populações (a capacidade de reestabelecer o equilíbrio, se adaptando a mudanças do ambiente) e a diversidade genética também são favorecidas quando há conectividade (LUNDBERG; MOBERG, 2003).

McLeod et al. (2009) recomendam que as UCMs sejam projetadas abarcando diferentes regimes de temperatura a fim de aumentar a probabilidade de sobrevivência de corais e seres que deles dependem. Observa-se que as isotermas de águas quentes tropicais dos oceanos tendem a avançar em direção aos polos (FEARY et al., 2014; MUNDAY et al., 2008a) e, espera-se o aumento da TSM nas regiões tropicais, de em média 3°C até 2100 (COLLINS et al., 2013). O avanço de espécies tropicais em áreas subtropicais é mais evidente em áreas de transição e apesar que em um princípio exista um aumento da diversidade com o tempo espécies subtropicais poderão ser extintas ou terão que migrar a áreas com condições ambientais similares (BATES et al., 2015; RILOV et al., 2019).

Considerando o cenário atual, será chave modelar futuros padrões de conectividade de organismos já ameaçados e identificar possíveis expansões latitudinais das distribuições de corais e dos organismos que compõem este ecossistema (FEARY et al., 2014). Isso ajudaria a orientar o planejamento de redes de UCMs em antecipação de futuras mudanças nos padrões climáticos (MORA; SALE, 2011). As mudanças no clima podem beneficiar algumas espécies ou populações devido à maior disponibilidade de alimentos ou nutrientes, menos custo fisiológico para sobrevivência ou alterações na composição das populações, podendo haver ou não redução na competitividade ou predação. Entretanto, mudanças ambientais abruptas podem causar o estresse, causando um desempenho fisiológico abaixo do ideal, afetando negativamente na adaptação dos organismos (DONEY et al., 2012). Para tais indivíduos, condições mais estressantes podem levar a maior mortalidade, assim como taxas de crescimento e reprodução reduzidas.

A aclimação térmica é um meio de lidar com o aumento de temperatura e ela envolve a alteração de características fisiológicas, comportamentais ou morfológicas dos organismos para se adaptar a um ambiente (ANGILLETTA JR., 2009). As adaptações às condições mais quentes podem ocorrer se as populações apresentam variação genética suficiente (MUNDAY et al., 2013), embora haja preocupação devido a que a taxa de aquecimento do oceano seja maior que a capacidade de adaptação das espécies (PARMESAN, 2006).

2.2 Cenários de projeções climáticas

O *World Climate Research Program* (WCRP) tem como meta facilitar a análise e a aplicação prática dos modelos climáticos de predição da variabilidade e mudanças do sistema terrestre a fim de determinar padrões de alteração do clima e os efeitos das atividades humanas. Nele participam diferentes grupos de trabalho e iniciativas de vários países. Seus principais objetivos são: 1) desenvolver o conhecimento e entendimento das mudanças climáticas, em escala global e regional, observando as variações nos padrões atmosféricos, oceânicos, terrestres e da criosfera; 2) desenvolver e aperfeiçoar os modelos que simulam os sistemas climáticos, através de forçantes naturais e antrópicas, resultantes de distúrbios específicos (TAYLOR et al., 2012).

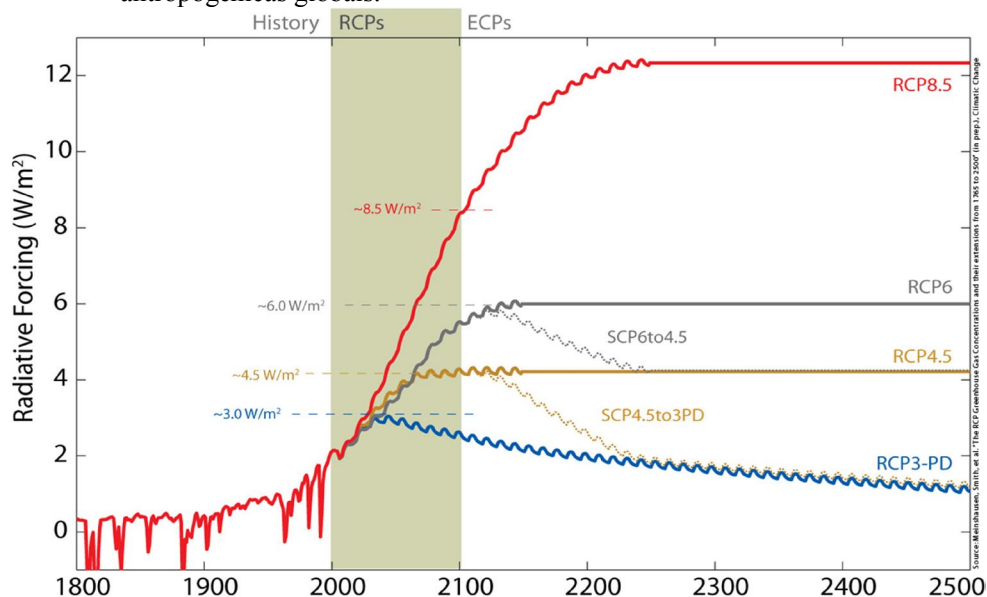
O Projeto de Intercomparação de Modelos Acoplados (CMIP, em inglês), desenvolvido no âmbito do WCRP, já está na sexta fase (iniciada em 2019) e seu objetivo inicial era o de realizar uma avaliação sistemática dos diferentes modelos globais acoplados do clima. Atualmente, o CMIP também atua no desenvolvimento de protocolos de experimentos (incluindo formatos, padrões e mecanismos de distribuição) para garantir a disponibilidade das saídas dos diferentes modelos do sistema terrestre para a comunidade (MEEHL et al., 2005). Os Relatórios de Avaliação (AR) apresentam resultados de discussões de grupos de trabalho multidisciplinares sobre as projeções de possíveis cenários considerando diferentes situações de emissão e manejo de recursos. O AR5 já é o quinto relatório emitido pelo CMIP e, diferente dos relatórios anteriores, apresenta novos cenários de concentração de GEE, chamados de *Representative Concentration Pathways* (RCP), vindo a substituir os cenários do *Special Report on Emission Scenarios* (SRES) apresentados no AR4.

Cada centro de pesquisa participante do CMIP pode elaborar modelos cujas saídas são disponibilizadas à comunidade, a fim de serem utilizadas para avaliar impactos em diferentes situações e lugares (MOSS et al., 2010). O CMIP apresenta duas estratégias, incluindo dois tipos de experimentos de modelagem climática: simulações de longo prazo (escala secular), e simulações de curto prazo (10-30 anos), também chamadas predições experimentais decenais (MEEHL et al., 2009). O modelo *Hadley Global Environment Model 2 - Earth System* (HadGEM2-ES) é a segunda versão de modelos HadGEM, apresentando componentes do sistema terrestre (“ES” - *Earth System*): o

ciclo de carbono terrestre e oceânico e a química troposférica (COLLINS et al., 2011). Ele pertence à família de modelos HadGEM, do UK Mett-Office que representa o estado da arte de modelos globais.

As simulações do CMIP5 incluem quatro possíveis cenários futuros (RCPs): RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6.0 e RCP 8.5; recebendo seus nomes com base no valor de pico ou estabilização dos níveis das forçantes radiativas relacionadas às mudanças no comportamento antrópico até o ano de 2100. As forçantes radiativas representam a diferença no balanço da energia que entra na atmosfera e o que retorna para o espaço, comparado a uma situação pré-industrial. O total da forçante radiativa é o resultado do balanço de forças positivas dos gases do efeito estufa (CO_2 , CH_4 , N_2O , PFC's), que induzem o aquecimento da atmosfera, e as forças negativas dos aerossóis, que causam o resfriamento (HANSEN et al., 1997). Por exemplo, o RCP 4.5 refere-se a um cenário no qual a forçante radiativa de estabilização ao final do século XXI corresponde a 4.5 W/m^2 . No cenário 4.5, ocorre crescimento exponencial das emissões, atingindo um máximo do efeito estufa até meados do século XXI, enquanto no cenário mais pessimista, ocorre um crescimento contínuo até meados do século XXII, atingindo seu máximo acima dos 12 W/m^2 (RCP 8.5) (Figura 2.2).

Figura 2.2: Cenários do IPCC - AR5 e as diferentes projeções das forçantes radiativas antropogênicas globais.



RCP – Representative Concentration Pathway; ECP - Extended Concentration Pathways.

Fonte: Meinshausen et al. (2011).

Os modelos climáticos simulam o clima no passado e futuro, sendo úteis na identificação de padrões em simulações do passado e assim, traçar tendências em relação ao futuro do clima, a curto, médio e longo prazo. Com o avanço do poder computacional, espera-se que haja aumento da complexidade e resolução não só temporal como espacial destes modelos, tornando-se cada vez mais precisos (MCGUFFIE; HENDERSON-SELLERS, 2005). Entretanto, nem tudo depende de poder computacional ou de resolução dos modelos, muitos apresentam algumas particularidades e deficiências na sua estrutura (MARAUN et al., 2017), principalmente na representação dos fenômenos que ocorrem próximo ao equador (RICHTER et al., 2012, 2014a; XU et al., 2014). Muitos MCGs produzem poucas nuvens Cirrus e Cumulus em resposta à convecção profunda, subestimando assim a redução de radiação de onda curta da superfície causada por estas nuvens (RAMANATHAN; COLLINS, 1991; RICHTER et al., 2016). Outro ponto a se destacar é a deficiência dos MCG na resposta do fluxo de calor latente às anomalias de TSM (LIN, 2007). Devido à alta intensidade dos ventos simulados sobre a superfície, muitos modelos superestimam os

fluxos de calor latente sobre os oceanos tropicais, contribuindo para um viés negativo de TSM (RICHTER et al., 2014b).

2.3 Regionalização

Os modelos globais utilizam grades com baixa resolução espacial para poder simular séries longas de tempo (FLATO et al., 2013). Contudo, para estudos de impactos, vulnerabilidades e mudanças na escala regional é preciso resolver a dinâmica do oceano em uma escala (horizontal, vertical e temporal) mais refinada. De maneira geral, a regionalização (*downscaling* em inglês) emprega uma grade de maior resolução espacial para aumentar o nível de detalhamento em uma determinada região e um determinado tempo (TRZASKA; SCHNARR, 2014). A partir desta técnica é possível a representação de fenômenos de mesoescala, como por exemplo ressurgências costeiras, turbulências, vórtices e meandros.

Existem algumas técnicas de regionalização, as mais conhecidas e utilizadas são o *downscaling* dinâmico e o *downscaling* estatístico. A primeira utiliza modelos hidrodinâmicos regionais, alimentados por modelos globais, sendo vantajosa pois resolve os processos físicos em maior resolução, contudo ela sofre dos mesmos vieses introduzidos pelos modelos globais. A segunda é capaz de incorporar diretamente nos modelos os dados de observações nos modelos e não requer alto poder computacional. Porém, requer séries de dados longas e confiáveis, sendo também afetada pelos vieses dos modelos globais, altamente influenciados pelo esquema de preditores escolhido (ABATZOGLOU; BROWN, 2012; FOWLER et al., 2007).

2.4 Cenário atual versus Cenário futuro do Atlântico Tropical

2.4.1 Cenário atual

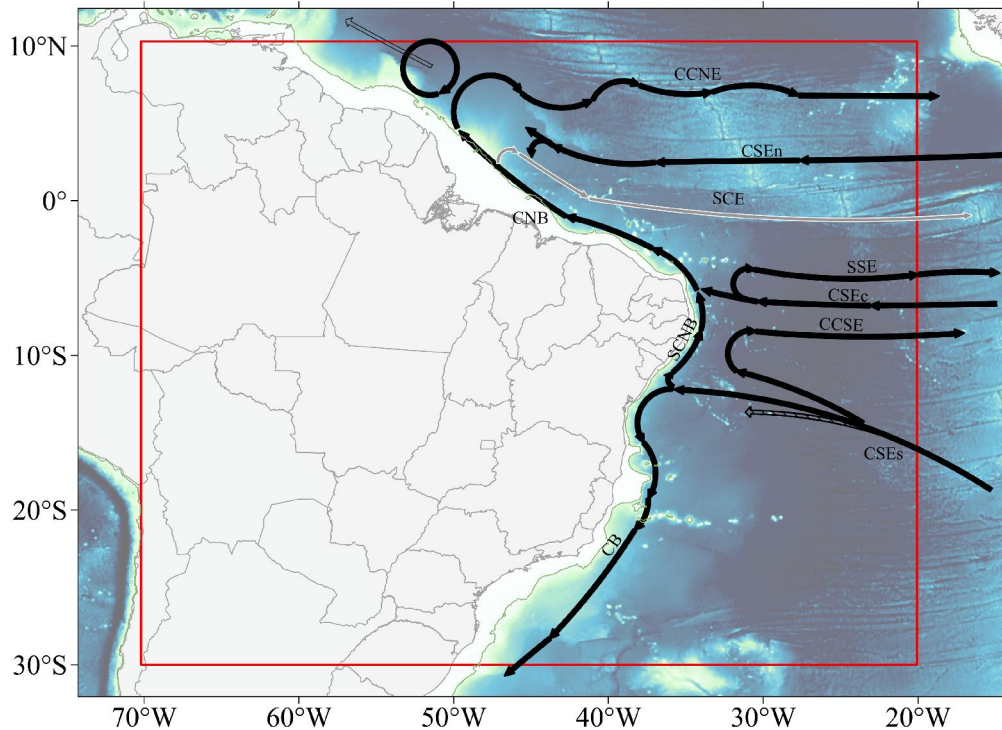
A área de estudo engloba o Oceano Atlântico Tropical e a Plataforma Continental Norte (PCN) e Leste (PCL) do Brasil. Esta região do Oceano Atlântico está sob a influência do Giro Subtropical do Atlântico Sul, este possui uma circulação anti-horária composto pelo ramo sul da Corrente Sul Equatorial (CSEs) que se bifurca (biCSE) próximo à margem continental leste brasileira dando origem à Corrente Norte do Brasil (CNB),

com fluxo em direção ao Equador, e a Corrente do Brasil (CB), em direção ao Sul. No Atlântico Tropical oeste, próximo à região norte do Brasil, estão as Correntes Sul Equatorial (CSE) em seus ramos Central (CSEc) e Norte (CSEn), a Contracorrente Sul Equatorial (CCSE), a Subcorrente Sul Equatorial (SSE) e a Subcorrente Equatorial (SE) (Figura 2.3). A Plataforma apresenta largura que varia de 8 km a 330 km, sendo mais estreita em aproximadamente 8°S, sobre a foz do rio São Francisco, e mais larga sobre a foz do Amazonas (330 km) e no banco de Abrolhos (240 km) (CORREA, 1977; COUTINHO, 1981; GOES; FERREIRA JÚNIOR, 2017).

A circulação oceânica induzida pelo vento resulta da ação e da posição do anticiclone sub-tropical semi-estacionário do Atlântico Sul, responsável pela circulação anti-horária dos ventos. Estes correspondem aos alísios de sudeste na região equatorial, apresentando variações de direção e intensidade, entre inverno e verão. Segundo modelo de circulação apresentado por Castro e Miranda (1998), durante o verão, na plataforma continental, predominam ventos de leste-nordeste entre as latitudes de 15°S e 30°S, e no inverno, ventos na direção sudoeste são os predominantes na região equatorial até a latitude de 20°S, estes últimos, associados à frentes frias, estabelecendo-se como uma zona de transição com ventos fracos na faixa entre 20°S e 30°S.

A Corrente Sul-Equatorial (CSE) é originada pela corrente de Benguela em 34°S, na ponta da África e se move rumo a noroeste entre as coordenadas 15 e 30°S. O transporte da CSE incluindo as duas frentes é entorno de 30 Sv. As velocidades máximas superficiais são entorno de 20 cm.s⁻¹. Os núcleos da corrente se estendem em até 800 m de profundidade (TSUCHIYA et al., 1994). A bifurcação da CSE (biCSE) apresenta importância para a variabilidade climática porque o sistema da CSE e a Subcorrente Norte do Brasil (SNB) são o principal canal para o fluxo de retorno oceânico superior da Célula de Revolvimento Meridional (MOC) (GANACHAUD, 2003; LUMPKIN; SPEER, 2003; TALLEY, 2003). Em uma média anual a biCSE ocorre entre as latitudes 14°S e 16°S nos primeiros 100m de coluna d'água (RODRIGUES et al., 2007; STRAMMA; ENGLAND, 1999).

Figura 2.3: Representação esquemática da circulação do Oceano Atlântico Sul integrada nos primeiros 500m.



Contracorrente Norte Equatorial (CCNE), Corrente Sul Equatorial em seu ramo sul (CSEs), ramo central (CSEc), ramo norte (CSEn), Contracorrente Sul Equatorial (CCSE), Subcorrente Sul Equatorial (SSE) e Subcorrente Equatorial (SCE), Corrente do Brasil (CB), Subcorrente Norte do Brasil (SCNB), Corrente Norte do Brasil (CNB). A isóbata de 200 m, que marca o limite da plataforma, está assinalada em cinza. O domínio do modelo hidrodinâmico está limitado ao retângulo em vermelho. Baseado em Talley et al. (2011), Stramma e England (1999), e Peterson e Stramma (1991).

Fonte: Produção do autor.

A Corrente do Brasil (CB) é considerada uma corrente rasa, apresentando seu eixo de corrente acima da isóbata de 200 m em sua região de formação (AMORIM et al., 2013). Ela segue paralelamente à costa do continente sul-americano até a região da Convergência Subtropical, onde se encontra com a Corrente das Malvinas (CM) e em seguida se afasta da costa (OLSON et al., 1988). Esta corrente apresenta importante atividade de meso-escala, como meandros, vórtices e anéis (SOUTELINO et al., 2011). Estes fenômenos são gerados pela combinação da batimetria complexa da região com a instabilidade baroclínica devido ao cisalhamento vertical. Mascarenhas et al. (1971) foram os primeiros a descreverem os meandramentos e vórtices da CB ao largo do

sudeste brasileiro, identificando estruturas ciclônicas e anticiclônicas na região próxima a Cabo Frio, a partir de mapas de topografia dinâmica. Na CB também são identificadas feições anticiclônicas centradas em 15°S, 17°S, 19°S, chamadas de vórtices de Ilhéus, vórtice de Royal Charlotte e vórtice de Abrolhos (SOUTELINO; MIRANDA, 2013).

A CB apresenta um fluxo associado ao movimento de duas massas de água (Água Tropical - AT e Água Central do Atlântico Sul - ACAS). A AT, superficial, é formada devido à intensa radiação e ao excesso de evaporação em relação à precipitação, característicos do Atlântico Sul equatorial, sendo transportada para o Sul pela CB, apresentando temperaturas superiores a 20°C e salinidade acima de 36 ups (CASTRO; MIRANDA, 1998). A ACAS, é caracterizada por apresentar temperatura superior a 6°C e inferiores a 20°C, e salinidade entre 34,6 e 36 ups. Origina-se na confluência da CB com a CM e isto, de acordo com Stramma e England (1999), é responsável por sua alta salinidade. Imediatamente abaixo da ACAS, está a Água Intermediária Antártica (AIA), pelos limites termohalinos de 3° - 6° C para temperatura, e 34,2-34,6 ups para salinidade (CIRANO et al., 2006). Apresenta-se bem definida, movendo-se em direção ao equador ao norte de 20°S, e fluindo para sul em 28°S. A Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), situada abaixo da AIA, é caracterizada por temperaturas entre 3° - 4°C e salinidade entre 34,6 - 35 ups, a profundidades entre 1500 e 3000 m ao largo do Sudeste Brasileiro (SILVEIRA et al., 2000), fluindo para sul ao longo do contorno oeste até cerca de 32°S, onde pelo menos parte da corrente retorna para o equador (REID, 1989).

A CNB flui ao longo da costa Norte da América do Sul, no sentido noroeste e se estende até vários metros de profundidade, atuando como fonte de massas de água para outras correntes do sistema equatorial (Contracorrente Norte Equatorial (CCNE), Subcorrente Equatorial (SCE), Subcorrente Sul Equatorial (SCSE) e a Subcorrente Norte Equatorial (SCNE))(GOES et al., 2005). A partir da confluência da CNB e a CCNE, vórtices ciclônicos e anticiclônicos são desprendidos, seguindo em direção ao caribe (DIDDEN; SCHOTT, 1993).

2.4.2 Cenário futuro do Atlântico Tropical

Através dos resultados de vários modelos do CMIP5, observa-se que, entre 30° e 40° S há intensificação da CB, em cerca de 40% no final do século XXI, e um deslocamento

para norte da posição média da bifurcação, de 13,22°S para 10,90°S (GARZOLI; MATANO, 2011; PONTES et al., 2016; TOSTE et al., 2017). Observa-se o enfraquecimento do transporte nas camadas superiores do oceano, entre 15° e 32°S, relacionado ao enfraquecimento do rotacional da tensão de cisalhamento do vento sobre esta região. Projeta-se para o ano de 2100, no RCP 8.5, redução da intensidade de 15 a 60% da Circulação de Revolvimento Meridional Atlântico (AMOC), assim como da circulação atmosférica, como as células de Walker e Hadley, ocasionado pelas emissões antropogênicas e associado ao aquecimento da superfície (CHENG et al., 2013; KJELLSSON, 2015; SEAGER et al., 2010; VECCHI; SODEN, 2007).

A maioria dos modelos do CMIP5 preveem sobre a Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) movimentos ascendentes mais fracos, assim como a mudança da sua largura e localização, ocasionado pelo enfraquecimento da recirculação atmosférica devido ao aquecimento (BYRNE et al., 2018). A CNB, como depende principalmente dos ventos alísios, que apresentará desintensificação, poderá apresentar redução na intensidade de suas correntes (ZHANG et al., 2011).

2.5 Conectividade demográfica

Um dos principais mecanismos de interação das populações de organismos marinhos, em especial daquelas separadas por grandes distâncias, é o da conectividade demográfica via dispersão de ovos e larvas (COWEN; SPONAUGLE, 2008). Este mecanismo indica o grau de dependência e influencia a dinâmica das populações, permitindo a recolonização de áreas submetidas a extinção local (CROOKS; SANJAYAN, 2006).

Os recifes são ambientes com um fundo consolidado que facilita sua resistência frente à ação das ondas e das correntes marinhas. Os recifes biogênicos, podem ser construídos por colônias de coral ou por algas calcárias, capazes de hospedar uma grande diversidade de organismos marinhos como esponjas, moluscos, crustáceos e peixes (HOLT et al., 1998). Ao longo dos anos, estes organismos construtores de recifes crescem uns sobre os outros, criando um ambiente com alta complexidade onde se estabelece uma grande variedade de peixes. Estas áreas apresentam a maior biodiversidade de todos os ecossistemas do planeta (ADEY, 2000).

A denominação peixes recifais surgiu como referência a todos aqueles peixes observados em ambientes de recifes de coral (SALE, 1991). Entretanto, estes peixes podem ocorrer em outros tipos de fundo consolidado, existindo, entretanto, algumas espécies que residem obrigatoriamente neles (BELLWOOD, 1998). Para os organismos marinhos a temperatura e a salinidade são dois fatores que agem juntos e apresentam papel fundamental no período de incubação e eclosão de ovos de muitas espécies (ANIL; KURIAN, 1996; PETERSON et al., 1996). A reprodução é considerada um processo altamente custoso energeticamente, ocorrendo somente quando os animais estão situados na zona de conforto (IWASA, 1991; SCHRECK, 2010; WARNER, 1984). Sabe-se, entretanto, que as condições de temperatura que influenciam no desenvolvimento dos peixes são características ao nível de gênero (CONOVER; KYNARD, 1981). Por isso, determinar o potencial de aclimação e adaptação às mudanças climáticas rápidas é fundamental para entender os impactos de longo prazo das mudanças climáticas na conectividade dos recifes de corais (MUNDAY et al., 2009).

2.6 Adaptação e aclimação dos organismos frente às mudanças climáticas

Para persistir em cenários de oceano mais quente, as espécies terão que migrar, aclimatar ou adaptar. Mudanças em escala de espécies já estão ocorrendo nos ecossistemas marinhos, com populações expandindo para latitudes mais altas, e diminuindo em latitudes mais baixas (POLOCZANSKA et al., 2013). Algumas espécies tropicais são mais vulneráveis que as temperadas, em relação à altas variações térmicas, devido a eles terem evoluído em um ambiente relativamente estável termicamente (NILSSON et al., 2009; TEWKSBURY et al., 2008; WRIGHT et al., 2009). Consequentemente, entender o potencial das espécies para se aclimatar ou se adaptar à rápida mudança de temperatura será especialmente importante para prever as consequências do aquecimento global para populações e comunidades de espécies tropicais (DONELSON et al., 2011).

Stillman (2003) e Veilleux; Donelson (2018) estudaram a nível fenológico as adaptações dos organismos. Munday et al. (2008b) e Donelson et al. (2011) indicam redução sobre o crescimento somático devido ao esforço energético para a adaptação

temperaturas mais altas, enfatizando a necessidade de explorar os custos assim como os benefícios à aclimação térmica. Este tipo de adaptação fornece um mecanismo que poderia ajudar as populações de peixes tropicais a lidar com o aquecimento das temperaturas oceânicas. Parece provável que a aclimação terá um papel importante na redução dos impactos do aquecimento global, melhorando as chances de que as populações continuem dentro de suas faixas geográficas. Entretanto, a aclimação térmica tem limitações e pode não ser suficiente para populações que já vivem perto de seu máximo térmico, portanto, a seleção de genótipos termicamente tolerantes ao longo das gerações também será vital. Mesmo com a aclimação, Donelson et al. (2008) indica que indivíduos em populações futuras terão aptidão reduzida, o que terá ramificações significativas para sustentabilidade da população.

Apesar de que a aclimação às temperaturas máximas possa afetar o desempenho a temperaturas mínimas, nem sempre é o caso. A adaptação a uma temperatura extrema muitas vezes não coincide com o baixo desempenho na temperatura oposta extrema. Isso sugere que a aclimação pode ser um processo importante pelo qual os peixes de recife tropicais podem lidar com o aumento das temperaturas médias no verão no futuro, sem perda de desempenho nas temperaturas de inverno (ANGILLETTA JR., 2009; GVOŽDÍK et al., 2007).

2.7 Modelagem biofísica

Para entender como processos físicos impactam o comportamento de organismos, os modelos biofísicos são ferramentas poderosas para investigar o estado de populações (LETT et al., 2009). O início de vida das espécies-alvo e sua interação com o ambiente é simulado pela combinação de um modelo biológico estocástico, com modelos de circulação oceânica. Geralmente, estes modelos são lagrangeanos e liberam partículas como sendo indivíduos e usam informações sobre correntes e condições ambientais de modelos de circulação oceânica para rastrear o movimento dos organismos através do espaço e do tempo (PARIS et al., 2007). Os modelos biofísicos incluem transporte, crescimento, comportamento, mortalidade e assentamento de ovos e larvas, associado aos campos tridimensionais dinâmicos das componentes físicas (por exemplo, velocidade, temperatura, densidade) fornecidos por modelos hidrodinâmicos e

biogeoquímicos acoplados ou não (LETT et al., 2010). Estes modelos permitem análises exploratórias e teste de hipóteses para o estudo de recrutamento de populações de peixes marinhos (MILLER, 2007).

A modelagem hidrodinâmica permite a simulação tridimensional do oceano, como por exemplo, o *Regional Ocean Modeling System* (ROMS). Este resolve, em três dimensões, as equações de movimento de Navier Stokes, resultando em situações de estado de uma determinada região do oceano para um determinado período, de acordo com a condição inicial, de contorno e forçamento ao qual este foi submetido (SHCHEPETKIN, 2003; SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005).

Os modelos baseados no indivíduo (MBI) simulam de forma lagrangeana a dispersão de ovos e larvas utilizando os resultados de modelos hidrodinâmicos, como o ROMS, sob condições biológicas definidas em função do organismo-alvo, como tempo de duração larval no plâncton, migração nictemeral e temperatura letal (DEANGELIS; MOOIJ, 2005; PELIZ et al., 2007). Na província brasileira, D'Agostini et al. (2015) avaliou a conectividade dos peixes do gênero *Mycteroperca* entre ambientes recifais de Unidades de Conservação marinhas e costeiras ao longo do litoral da Bahia através de modelo baseado no indivíduo (MBI). Rudorff et al. (2009) avaliou a dispersão de larvas de lagosta espinhosa, cujo período de duração larval da lagosta espinhosa é de até 12 meses, sobre a região equatorial sobre o Oceano Atlântico, entre a costa do Brasil e da África. O PLD alto é fator preponderante sobre o padrão de dispersão das larvas, visto que podem alcançar maiores distâncias. Do mesmo modo, Endo (2018) determinou a conectividade entre áreas marinhas protegidas brasileiras no Atlântico tropical, através da simulação da dispersão de larvas de peixes do gênero *Sparisoma*. Estes modelos são capazes de simular, por exemplo, a dispersão larval em diferentes cenários para, assim, auxiliar no entendimento da dinâmica populacional de uma espécie de interesse frente a uma condição de estado do meio em que está inserido. Esta estratégia permite estabelecer como o meio físico, direta ou indiretamente, pode afetar a abundância de organismos e sua variabilidade nos ecossistemas marinhos em diversas situações de clima (BARANGE et al., 2010a).

O Ichthyop é uma ferramenta computacional desenvolvida para auxiliar na compreensão de como os processos físicos (correntes oceânicas, temperatura) e biológicos

(crescimento, mortalidade) afetam a dinâmica do Ichthyoplâncton. Este é um modelo lagrangeano, que simula o deslocamento de um número específico de partículas (representando os ovos e larvas dos organismos estudados) ao longo do tempo. Lançadas de uma região fonte, as partículas são carregadas pelas correntes originadas das simulações do modelo hidrodinâmico. Ele também é capaz de simular a morte e sobrevivência por condições físicas do ambiente, como temperatura e salinidade.

Os peixes do gênero *Sparisoma* (família Scaridae, Figura 4), também chamados de budiões, estão presentes no Oceano Atlântico, Índico e Pacífico, e são fundamentais para o equilíbrio dos ecossistemas recifais, por serem os principais agentes da bioerosão dos recifes (BELLWOOD; CHOAT, 1990). São encontradas treze espécies nativas deste gênero no Atlântico, sendo seis endêmicas da costa do Brasil (FEITOZA et al., 2005; GASPARINI et al., 2003; MOURA et al., 2001; PINHEIRO et al., 2018). Estas espécies apresentam dentes caninos proeminentes na parte superior da boca, utilizadas para a raspagem de algas sobre os corais, sua principal fonte de alimento (BONALDO et al., 2006). Este gênero tem sido alvo de uma série de estudos sobre a importância e o papel dos herbívoros nos recifes de corais, sendo apontados como os principais determinantes da estrutura da comunidade bentônica de recifes (BONALDO et al., 2006; HOEY; BONALDO, 2018; MENDES et al., 2015).

São predominantes em espécies deste gênero organismos hermafroditas protogínicos, os quais desenvolvem uma maturação das estruturas sexuais femininas antes da maturação das estruturas masculinas, sofrendo alteração de sua cor, em cada fase sexual (AFONSO et al., 2008; CHOAT; ROBERTSON, 1975; HAWKINS; ROBERTS, 2004; RANDALL; RANDALL, 1963). Existem basicamente duas fases associadas à cor: fase inicial e fase terminal; a fase inicial é predominantemente feminina, e a terminal é exclusivamente masculina (HAWKINS; ROBERTS, 2004). Nos peixes da espécie *S. viride* foi observado que, os machos residentes de territórios de um só macho, a desova é diária pelas fêmeas do grupo (VAN ROOIJ et al., 1996). A desova é pelágica e ocorre ao longo de todo o ano, para a maioria das espécies (MUNRO, 1983). Já a fecundidade pode variar conforme a espécie, a região e época do ano, Lessa et al. (2016) e Vêras et al. (2009), que estudaram a biologia reprodutiva do *S. frondosum*, encontrado no litoral nordeste do Brasil, indicam que sua reprodução ocorre durante todo o ano, apresentando uma quantidade média de ovócitos lançados por fêmea de 80.276.

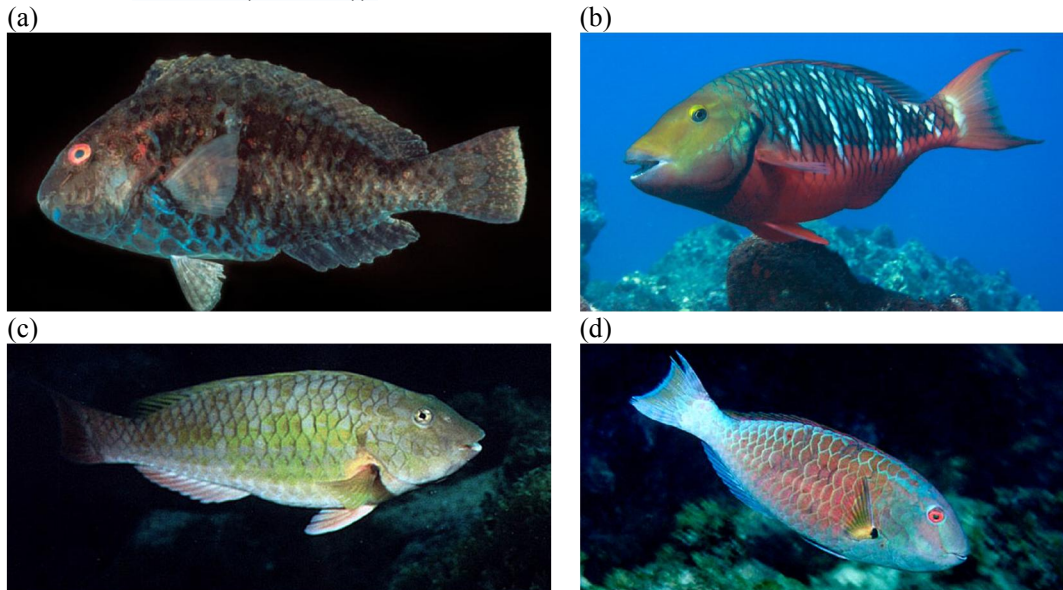
O tempo de permanência no plâncton (PLD, em inglês *Pelagic Larvae Duration*) é variável para o gênero, variando de 18 dias (*S. atomarium*), 57 dias (*S. viride*), e até 60 dias para (*S. radians*) (LUIZ et al., 2013; ROBERTSON et al., 2006). Há evidências de que temperaturas mais altas (dentro do tolerado pelos organismos), aceleram o desenvolvimento, aumentam as taxas de crescimento e reduzem o PLD (MCLEOD et al., 2015; SPONAUGLE et al., 2006, 2011). Isso acarreta em variações sobre a dispersão, reduzindo as distâncias percorridas neste estágio, que é fundamental para a conectividade e propagação dos organismos no oceano.

As populações de budiões sofrem pressão da pesca extensiva apesar de os ambientes recifais estarem parcialmente protegidos como reservas marinhas, com redução da sua abundância observada nas últimas décadas (BENDER et al., 2013; FLOETER et al., 2006). Além disso, barreiras ambientais entre a plataforma continental e os habitats recifais oceânicos (FLOETER et al., 2008; SPALDING et al., 2007), assim como correntes superficiais (CNB e CB), ao longo da plataforma e talude, podem contribuir para o isolamento das ilhas (ROCHA, 2003). O potencial de dispersão não deve variar consistentemente entre peixes-papagaio do Atlântico Sudoeste, já que as espécies do gênero *Sparisoma* têm desova pelágica e uma longa duração de larvas, que varia entre 18 e 60 dias (LUIZ et al., 2013; ROBERTSON et al., 2006). O período larval destes peixes apresenta alto potencial dispersivo, seguido de recrutamento e de um estágio adulto de dispersão restrita, associado ao habitat de corais (MAZZEI et al., 2017).

A reprodução em peixes marinhos tipicamente ocorre dentro de uma faixa estreita de temperatura (VAN DER KRAAK; PANKHURST, 1997) e um aumento de 2–3 ° C pode ser suficiente para reduzir a atividade reprodutiva (RUTTENBERG et al., 2005) ou aumentar a mortalidade de ovos (GAGLIANO et al., 2007; MUNDAY et al., 2009). Mesmo quando há alimento adicional disponível, temperaturas mais altas podem ter um efeito negativo no crescimento e reprodução se excederem os ideais térmicos (DONELSON et al., 2010). As populações de espécies que vivem próximo de seu ótimo térmico podem apresentar diminuição na sua capacidade reprodutiva e qualidade fenológica, independentemente da disponibilidade de alimento (MUNDAY et al., 2008b). Isto indica que mesmo que o aumento de temperatura seja relativamente pequeno, pode-se ter um efeito deletério na condição corporal adulta dos peixes, o que

levará, em última instância, a menos e menores descendentes sendo produzidos (DONELSON et al., 2008).

Figura 2.4: Quatro espécies do gênero *Sparisoma*, encontradas na costa e nas ilhas oceânicas brasileiras: (a) *Sparisoma tuiupiranga* (GASPARINI et al., 2003); (b) *Sparisoma amplum* (foto de Francini-Filho (2005) tirada no banco de Abrolhos (FishBase)); (c) *Sparisoma axillare* (foto de Floeter, S. tirada em Fernando de Noronha (FishBase)); (d) *Sparisoma frondosum* (foto de Luiz, Jr., Osmar J., tirada nos recifes do banco de Abrolhos (FishBase)).

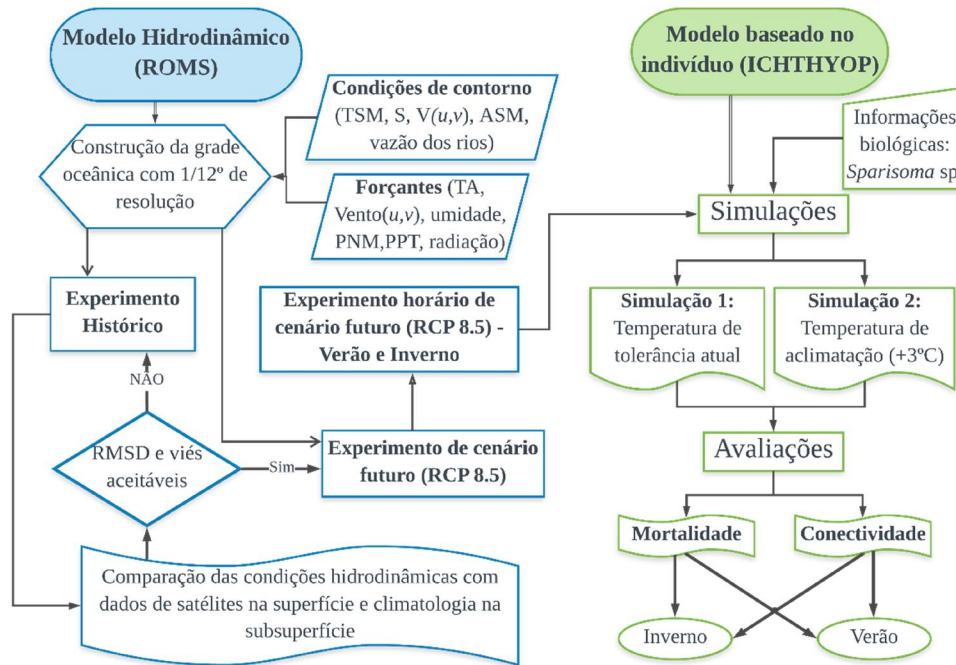


Fonte: Produção do autor

3 MATERIAIS E MÉTODOS

O trabalho é composto de duas principais etapas: modelagem hidrodinâmica e a modelagem biológica (Figura 3.1). Primeiramente foi realizada a modelagem hidrodinâmica, através do *Regional Ocean Modeling System* (ROMS), do Oceano Atlântico na região da Plataforma e ilhas oceânicas, utilizando as forçantes e condições de contorno oceânicos fornecidos pelo modelo HadGEM2-ES, ensemble (doravante chamado de conjunto) r2i1p1. Estas saídas, junto a informações biológicas dos peixes do gênero *Sparisoma*, foram inseridas no modelo Ichthyop, para simular o comportamento destes frente às alterações no oceano ocasionadas pelas mudanças climáticas. Foram realizados quatro experimentos, resultando em quatro conjuntos de saídas: verão simulado com os limites atuais de temperatura de tolerância do *Sparisoma* sp (de 24°C a 30°C), verão considerando a aclimatação dos peixes para até +3°C da temperatura da água (24°C a 33°C); e dois experimentos para os invernos, considerando estes dois limites de temperatura de tolerância descritos. Foi definido o limite de até 3°C de adaptação no limite superior ao tolerado atualmente pelos organismos, com base em estudos de Donelson et al. (2011, 2012); Madeira et al. (2017) e Munday et al. (2012), que estudaram o processo de adaptação de organismos recifais ao longo das gerações.

Figura 3.1: Representação esquemática das etapas do trabalho.



TSM - Temperatura da Superfície do Mar; S - Salinidade da água do mar; V (u, v) – correntes oceânicas, nas componentes zonais (u) e meridionais (v); ASM - Altura da Superfície do mar; TA - Temperatura do Ar; PNM - Pressão atmosférica a nível do mar; PPT- precipitação.

Fonte: Produção do autor.

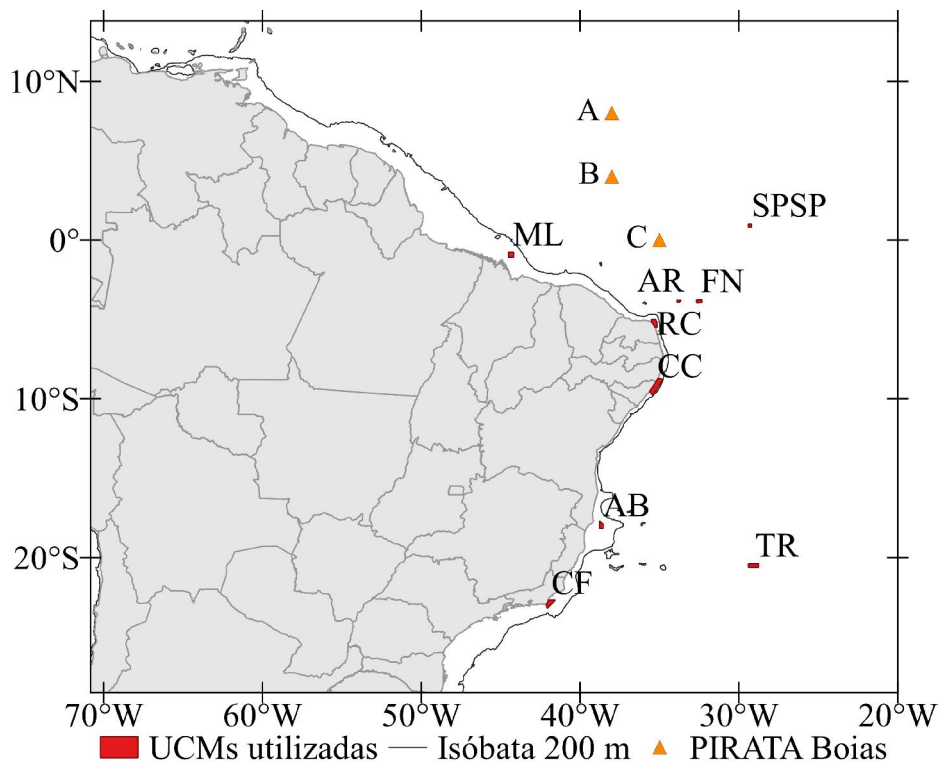
3.1 Domínio do modelo: áreas de desova e recrutamento

O domínio definido para a simulação compreende-se entre as coordenadas 70,2°W - 20,067°W e 10,3°N - 30°S. Ele representa a região onde foram resolvidas as equações hidrodinâmicas e biológicas para observação dos processos estudados dentro de uma escala espacial e temporal.

As áreas de desova e recrutamento foram definidas com base nas UCMs e na existência de ambientes recifais. Dentro do domínio, ao longo de toda a costa brasileira, estão cinco conjuntos de ilhas oceânicas: Arquipélago de São Pedro e São Paulo (SPSP), Ilha de Fernando de Noronha (FN), Atol das Rocas (AR) e as ilhas de Trindade e de Martim Vaz (TR). Sobre a Plataforma Continental estão as Unidades de Conservação de Abrolhos (AB), Cabo Frio (CF), Costa dos Corais (CC), Recife dos Corais (RC) e o

Parque Estadual Marinho Parcel de Manuel Luíz (ML) (Figura 3.2). Todas estas áreas são consideradas vulneráveis, e apresentam uma alta prioridade de esforços de conservação. As Unidades de Conservação que abrangem as ilhas de São Pedro e São Paulo e as ilhas de Trindade e Martim Vaz foram regulamentadas em março de 2018, durante o andamento do presente estudo. Foi então, para estas duas UCMs estabelecido o tamanho nas simulações considerando a batimetria e não, o que foi estabelecido por lei posteriormente ao início das simulações (Tabela 1). Para a área de Cabo Frio, foi considerada a área da Área de Proteção Ambiental Pau-Brasil.

Figura 3.2: Domínio do modelo, e Unidades de Conservação Marinhas (UCMs) utilizadas como áreas de desova e recrutamento e posição das boias do *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) utilizadas para verificação do resultado dos experimentos hidrodinâmicos ao longo da coluna d'água.



Onde: ML – Parcel Manuel Luíz; AR – Atol das Rocas; FN – Arquipélago de Fernando de Noronha; SPSP – Ilhas de São Pedro e São Paulo; RC – Recife de Corais; CC – Costa de Corais; AB – Abrolhos; CF – Cabo Frio; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz. Os triângulos amarelos representam a posição das bóias fundeadas do projeto *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA): A – 8°N 38°W; B – 4°N 38°W; C – 0°N 35°W.

Fonte: Produção do autor.

Tabela 3.1: Informações sobre as áreas de lançamento dos ovos.

Área de estudo	Tipo	Coordenadas	Área (km^2)	Situação
Arquipélago de São Pedro e São Paulo (SPSP) *	ILOC	0° 54' N 29° 18' W	125,6	Área de Proteção Ambiental
Arquipélago de Fernando de Noronha (FN)	ILOC	3° 51' S 32° 29' W	447,2	Parque Nacional
Atol das Rocas (AR)	ILOC	3° 51' S 33° 48' W	308,7	Parque Nacional
Arquipélago de Trindade e Martim Vaz (TR) *	ILOC	20° 30' S 29° 04' W	2299,9	Área de Proteção Ambiental
Parcel Manuel Luiz (ML)	PCB	0° 55' S 44° 20' W	1257,6	Parque Estadual Marinho
Recife de Corais (RC)	PCB	5° 13' S 35° 18' W	1507,4	Área de Proteção Ambiental
Costa dos Corais (CC)	PCB	9° 12' S 35° 13' W	3995,4	Área de Proteção Ambiental
Abrolhos (AB)	PCB	17° 59' S 38° 39' W	992,4	Parque Nacional Marinho
Cabo Frio (CF)**	PCB	22° 53' S 41° 56' W	1616,6	Área de Proteção Ambiental

ILOC: Ilha Oceânica; PCB: Plataforma Continental Brasileira. * As UCMs que abrangem as ilhas de São Pedro e São Paulo, assim como as ilhas de Trindade e Martim Vaz, foram estabelecidas em março de 2018, após o início deste trabalho. Portanto, a delimitação destas áreas foi definida pela batimetria, sendo inferior ao tamanho estabelecido pelos Decretos 9.313 (19/03/2018) e 9.312 (19/03/2018). ** A Área de Proteção Ambiental Pau-Brasil foi utilizada para a delimitação da região que abrange Cabo Frio.

Fonte: Produção do autor.

3.2 Modelagem hidrodinâmica

O ROMS é um modelo oceânico tridimensional de alta resolução, composto de um conjunto de rotinas matemáticas que integram as equações primitivas de Navier-Stokes. Estas são discretizadas por métodos de diferenças finitas, resolvendo as médias de Reynolds e assumindo as aproximações hidrostáticas e de Boussinesq (SHCHEPETKIN; MCWILLIAMS, 2005; HAIDVOGEL et al., 2008). As equações dinâmicas resolvidas pelo ROMS são aqui descritas em coordenadas horizontais cartesianas (componentes zonal e meridional) e coordenadas verticais sigma, pelas equações 3.1, 3.2, 3.3, respectivamente.

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla u - f v = -\frac{\partial \phi}{\partial x} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{u'w'} - \nu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_u + \mathcal{D}_u \quad (3.1)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla v + f u = -\frac{\partial \phi}{\partial y} - \frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{v'w'} - \nu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_v + \mathcal{D}_v \quad (3.2)$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial z} = -\frac{\rho g}{\rho_0} \quad (3.3)$$

A equação da continuidade é expressa pela equação 3.4:

$$\frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} + \frac{\partial w}{\partial z} = 0 \quad (3.4)$$

A evolução temporal de um campo de concentração escalar, $C(x,y,z,t)$ (por exemplo: salinidade e temperatura), é governada pela equação 3.5:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \vec{v} \cdot \nabla C = -\frac{\partial}{\partial z} \left(\overline{C'w'} - \nu_\theta \frac{\partial C}{\partial z} \right) + \mathcal{F}_C + \mathcal{D}_C \quad (3.5)$$

A equação de estado é dada pela equação 3.6:

$$\rho = \rho(T, S, P) \quad (3.6)$$

Onde:

$\mathcal{D}_u, \mathcal{D}_v, \mathcal{D}_C$ – termos difusivos;

$\mathcal{F}_u, \mathcal{F}_v, \mathcal{F}_C$ – termos de forçamento;

$f(x, y)$ – parâmetro de Coriolis;

g – aceleração da gravidade;

ν e ν_θ – viscosidade molecular e difusividade;

P – pressão;

$\phi(x, y, z, t)$ – pressão dinâmica $\phi = (P/P_0)$;

S – salinidade;

t – tempo;

T – temperatura potencial;

u, v e w – componentes x, y e z do vetor de velocidade \vec{v} ;

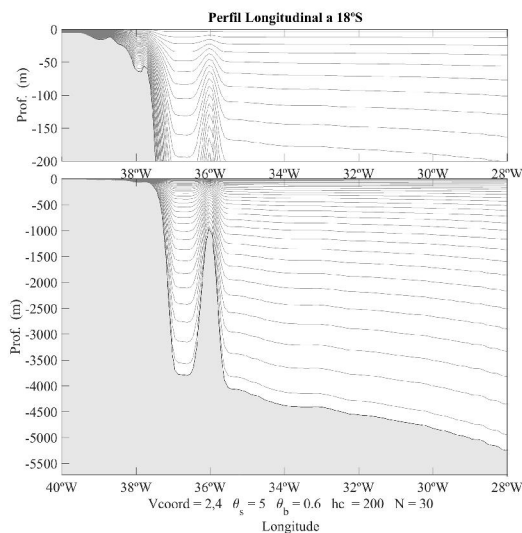
x e y – coordenadas horizontais;

z - coordenadas verticais;

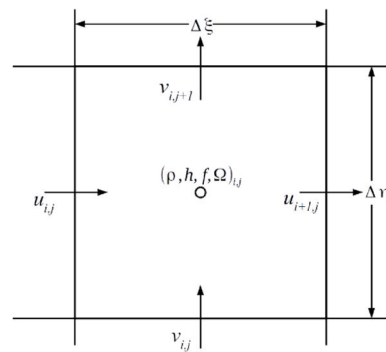
As variáveis que apresentam o símbolo (') representam as flutuações turbulentas, e com a barra horizontal superior representam uma média ao longo do tempo. As coordenadas verticais são expressas em coordenadas sigma adimensionais (figura 3.3.a) e as horizontais são expressas em coordenadas cartesianas em uma malha do tipo Arakawa-C (figura 3.3.b). Isto traz grande facilidade computacional quando é utilizado para modelar áreas com relevos bastante acidentados (CINTRA, 2010).

Figura 3.3 (a) Representação das coordenadas sigma, no perfil vertical; (b) Representação de uma célula da malha do tipo Arakawa-C.

(a)



(b)



Fonte: (a) Produção do autor. (b) Arakawa; Lamb (1977).

3.2.1 Experimento histórico (presente) e de cenário futuro

O experimento histórico foi rodado antes do experimento de cenário futuro para que seus resultados fossem comparados com dados de observação da TSM (OSTIA), correntes superficiais (SODA) e análises oceânicas na subsuperfície, para verificar a representatividade do modelo sobre a área de estudo. As simulações de clima presente compreendem entre os anos de 1995 e 2005, e as simulações do experimento do cenário futuro de 2090 a 2100 (Tabela 3.2). Devido ao período de validação do modelo (experimento histórico) compreender entre os anos de 1997 a 2004, houve limitação quanto à escolha dos produtos de Sensoriamento Remoto para comparação da corrente oceânica. A grade para a regionalização do modelo hidrodinâmico apresenta resolução horizontal, em graus, de $1/12^\circ$ e 30 níveis na vertical. As forçantes e condições de contorno são oriundas do modelo HadGEM2-ES (conjunto r2i1p1). O experimento histórico foi utilizado exclusivamente para a avaliação da acurácia da regionalização oceânica, não sendo utilizado para as simulações biofísicas. Após a verificação da representatividade do modelo, no cenário presente, realizou-se a simulação do cenário de clima futuro, cujos anos simulados referem-se ao final do século XXI, seguindo as mesmas configurações do ROMS que foram utilizadas no experimento histórico.

Tabela 3.2: Períodos dos experimentos realizados.

Experimento	Período
<i>Spin-up</i> Histórico	1995 – 1996
Experimento Histórico	1997 – 2005
<i>Spin-up</i> futuro	2090 – 2091
Experimento RCP8.5	2092 – 2100
Experimento Horário Verão RCP 8.5	Janeiro – Março (2092 – 2100)
Experimento Horário Inverno RCP 8.5	Julho – Setembro (2092 – 2100)

Fonte: Produção do autor.

O *spin-up* é a rodada inicial do modelo, utilizado para que as soluções numéricas das equações se aproximem do equilíbrio com as forçantes do modelo. A partir destes dados são obtidas as condições iniciais para o experimento hidrodinâmico que se quer realizar.

No caso deste trabalho, foram realizadas duas rodadas de *spin-up* com duração de 2 anos, uma para cada experimento. As simulações horárias para verão e inverno foram inicializadas a partir das saídas mensais do experimento RCP 8.5 e foram utilizadas na simulação biológica.

A componente atmosférica utilizada para forçamento no ROMS possui resolução horizontal de 1,25° por 1,875° em latitude-longitude, com 38 níveis na vertical. A componente oceânica utilizada para elaboração das condições inicial e de contorno apresenta uma grade irregular com resolução zonal constante de 1° e resolução meridional variável, consistindo de 1°, entre os polos e aumentando suavemente até 1/3° no equador, com 40 níveis na vertical (JONES et al., 2011). Esses conjuntos são rodadas de simulação com diferentes perturbações do mesmo modelo. A nomenclatura dos conjuntos se dá seguindo a forma: r (N) i (M) p (L), em que (N) seria o número de realizações (valor inteiro positivo), distinguindo os membros de um conjunto gerado pela inicialização de um conjunto de execuções com condições iniciais diferentes, mas igualmente realistas; o (M) indica os diferentes métodos de inicialização, e/ou conjunto de dados observacionais; e o (L) indica o tipo de perturbação física associada ao modelo (TAYLOR et al., 2010). Para um único modelo e experimento, N, M e L devem ser interpretados independentemente e, deve-se procurar utilizar sempre os mesmos conjuntos, permitindo a associação dos resultados à referidas alterações. Foi definido o conjunto r2i1p1 devido à disponibilidade das variáveis para forçamento e condições iniciais e de contorno, tanto no experimento histórico como no experimento de cenário futuro. O modelo HadGEM2-ES apresenta grade gaussiana, devendo ser interpolada com peso (*first order conservative remapping: remapycon – Climate Data Operators-CDO*) para ser inserida no ROMS.

O pré-processamento consistiu em realizar procedimentos para padronizar as saídas do Earth System Model (ESM), para serem lidas no ROMS. Primeiramente, realizou-se o recorte para a área de estudo, e visualização dos dados, para padronização de unidades entre as saídas, ajustes horários e de calendário. Para isso, utilizou-se o programa *netCDF Operators (NCO)*, *Climate Data Operators (CDO)*, rotinas em Shell script e Matlab, para visualização e preparação dos dados para a regionalização. A abreviação de cada variável corresponde à nomenclatura adotada pelo *Earth System Grid*

Federation (ESGF), órgão responsável pela uniformização das saídas dos modelos do sistema terrestre (Tabela 3.3).

Tabela 3.3: Componentes oceânicas e atmosféricas inseridas na modelagem hidrodinâmica.

Componentes Atmosféricas	Componentes Oceânicas
huss – umidade específica próxima à superfície	friver – fluxo de água que entra no oceano vindo de rios
pr – precipitação	so – salinidade da água do mar
os – pressão do ar na superfície	thetao – temperatura potencial da água do mar
lwrad – radiação de onda longa na superfície	uo – velocidade em x da água do mar
swrad – balanço de onda curta que incide sobre a superfície	vo – velocidade em y da água do mar
tas – temperatura do ar próxima da superfície	zos – altura do nível do mar sobre o geóide
uas – vento zonal próximo à superfície	
vas – vento meridional próximo à superfície	

Fonte: Produção do autor.

A batimetria utilizada para elaboração da grade para o modelo hidrodinâmico foi obtida a partir do banco de dados do ETOPO1, disponível em <www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>, que possui resolução de 1 arco-minuto de grau. A linha de costa foi definida pela base de dados GSHHG, que possui escala de 1:100.000, disponível em <www.ngdc.noaa.gov/mgg/shorelines/gshhs.html>.

3.2.2 Verificação do experimento histórico de regionalização

Dados coletados *in situ* e através de sensores remotos servem como referência para avaliar a qualidade do modelo numérico em representar a realidade. Informação de boias e expedições oceanográficas permitem a caracterização dos fenômenos que ocorrem no oceano, em superfície e profundidade. O uso de dados de satélites permite a observação dos processos atmosféricos, oceânicos e terrestres em várias escalas espaço-

temporais e frequentemente são utilizados com modelos climáticos para simular a dinâmica do sistema climático e melhorar as projeções climáticas (YANG et al., 2013). A seguir serão descritos os conjuntos de dados, análises e reanálises utilizados para a verificação do experimento histórico.

O sistema *Operational Sea Surface Temperature and Sea Ice Analysis* (OSTIA) fornece dados de análise, resultado de uma combinação de satélites de micro-ondas e infravermelho, bem como dados *in situ*, resultando em produtos de nível 4. A fusão dos dados de satélite com dados *in situ* permite maior cobertura, fornecendo dados de TSM em uma escala temporal e espacial mais elevada. É disponibilizada pelo *United Kingdom Meteorological Office* (UKMO), através do projeto *Global High-Resolution Sea Surface Temperature – Pilot Project* (GHRSSST-PP), de resolução espacial de 0,05° (~6km).

A base de dados do SODA (*Simple Ocean Data Assimilation*) são dados de reanálise, elaborada através da assimilação de dados utilizando modelos numéricos oceânicos. A reanálise é um método que utiliza observações (*in situ*, imagens orbitais) e um modelo numérico para simular um ou mais aspectos do sistema terrestre, que geram uma estimativa sintetizada do estado do sistema. Em resumo, os dados de reanálise usam um sistema de previsão como entrada e assimilação de dados, para representar o passado, e projetar dados futuros. O SODA, versão 3.4.2, apresenta resolução aproximadamente ¼°x1/4° de resolução horizontal, com projeção de Mercator, de grade regular e 50 níveis na vertical. Esta versão utilizou o modelo numérico MOM5, forçantes da superfície os dados do ERA-Interim, e os dados do WOD13 e COADS2.1. Esta base de dados apresenta dados desde 1980. Segundo Carton et al. (2018), a versão 3.4.2 apresentou redução nos erros sistemáticos em relação às versões anteriores. Foram utilizados os dados de correntes zonais (U) e meridionais (V) do SODA, para verificação das saídas do ROMS, e comparação com os dados do HadGEM2-ES, no experimento de clima presente.

O *Prediction and Research Moored Array in the Tropical Atlantic* (PIRATA) é projeto de cooperação entre Brasil, França e Estados Unidos, em que estabeleceram uma rede de observação *in situ* composta por boias fundeadas que monitoram uma série de variáveis dos processos de interação oceano-atmosfera no oceano Atlântico Tropical.

Foram comparados ao longo da coluna d'água os dados do PIRATA com os dados do modelo HadGEM2-ES e com o resultado da regionalização. Para o período (1997 a 2004), apenas as boias sobre as coordenadas 0°N 35°W, 4°N 38°W e 8°N 38°W apresentaram uma série de dados para todo o período (Figura 3.2).

Foram avaliados e comparados os resultados gerados no modelo do experimento histórico com dados de Sensoriamento Remoto. Para determinar os erros e o quanto se difere do dado observado, calculou-se a raiz do desvio quadrático médio (*Root Mean Square Deviation* – RMSD) (Equação 6) e o viés (Equação 7). Os dados de TSM do ROMS foram comparados com dados de análise do OSTIA, e a comparação das correntes com dados do SODA.

$$RMSD = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (X_{sim,i} - X_{obs,i})^2}{N}} \quad (3.6)$$

$$Viés = \sum_{i=1}^N (x_{sim} - x_{obs}) \quad (3.7)$$

onde,

X_{sim} – valor da variável simulada pelo modelo;

X_{obs} – valor da variável medida;

N – Número de dados.

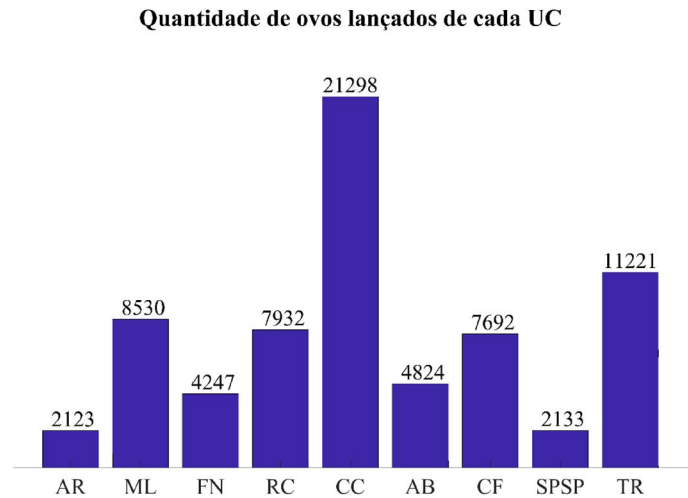
Também foram elaborados diagramas de Taylor para comparação dos dados gerados pelo modelo com os dados observados. Este tipo de métrica representa a raiz quadrada média da diferença entre duas variáveis e o desvio padrão, indicados por um único ponto no gráfico, que fornece uma síntese dos graus de correspondência entre as variáveis obtidas pelo modelo e as observadas (TAYLOR, 2001).

3.3 Modelagem Lagrangeana

A simulação da dispersão de ovos e larvas foi realizada apenas para o cenário futuro (RCP 8.5), a partir do modelo baseado no indivíduo (Ichthyop). Foram realizadas análises do padrão de dispersão, determinadas as taxas de mortalidade, de retenção de ovos e indivíduos em cada local de lançamento dos ovos, quantos migraram e recrutaram em cada área de conservação marinha, e o tempo que levaram em migrar e ser recrutado para a população. O período dos experimentos foi de 60 dias, período este considerado a média da duração do tempo entre a eclosão do ovo e o período de estágio larval (ROBERTSON et al., 2006). Foram realizados experimentos em duas estações do ano (inverno – julho e agosto, verão (60 dias) – janeiro e fevereiro (60 dias)), para os oito anos finais do século XXI (2092 a 2100), de modo a caracterizar a variabilidade interanual e sazonal e entre as áreas de lançamento.

No total, foram realizados quatro experimentos biológicos: (i) verão e (ii) inverno, com as condições de temperatura de tolerância atuais para os peixes do gênero *Sparisoma*; (iii) verão e (iv) inverno; com a condição de aclimação de +3°C do organismo, em que a temperatura de tolerância foi ampliada de 30°C para 33°C. Foi definido para cada simulação o lançamento de 70.000 ovos em cada uma das simulações, saindo de dentro de cada uma das nove UCs deste estudo. A quantidade de ovos para cada uma das áreas de lançamento foi proporcional ao tamanho da área de cada UCM, e foi a mesma em todas as simulações realizadas (Figura 3.4). Neste trabalho, condições como a disponibilidade de alimento, a qualidade dos habitats, assim como a predação não foram consideradas diretamente, deve-se, portanto, ter cautela na interpretação dos resultados.

Figura 3.4: Quantidade de ovos lançados de cada UC, em cada uma das simulações.



Onde: AR – Atol das Rocas, ML – Parcel Manuel Luíz, FN – Arquipélago de Fernando de Noronha, RC – APA de Recife de Corais, CC – APA de Costa dos Corais, AB – Abrolhos, CF – Cabo Frio, SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo, e TR – Arquipélago de Trindade e Martim Vaz.

Fonte: Produção do autor.

São poucos os estudos no Brasil sobre o comportamento e características biológicas e reprodutivas sobre o comportamento dos ovos e larvas das espécies do gênero *Sparisoma* (Scaridae). Devido a isso, algumas informações sobre a família Scaridae de outras localidades foram utilizados (Tabela 3.4). Os dados de configuração do Ichthyop foram baseados em Endo (2018), com o objetivo de facilitar a comparação entre os resultados do período simulado pela autora (2008-2015), com os resultados do cenário futuro apresentados pelo presente trabalho.

Tabela 3.4: Características biológicas do gênero *Sparisoma* a ser inserida na configuração do Ichthyop versão 3.3.

Variável	Valor definido	Referência
Número total de partículas	70000	(ENDO, 2018)
Período de Duração Larval (PLD) e transporte de larvas	60 dias	(ROBERTSON et al., 2006)
Comportamento na costa	Rebatimento (Buouncing)	-
Método numérico de advecção	Runge Kutta 4	(ISLAM, 2015)
Taxa de dissipação turbulenta	1×10^{-4}	(PELIZ et al., 2007)
Profundidade de desova	20 m	(RANDALL; RANDALL, 1963)
Densidade do ovo	$0,0089 \text{ g/cm}^3$	(ROBERTSON, 1996)
Tempo de eclosão do ovo	24 horas	(RANDALL; RANDALL, 1963)
Migração nictemeral (dia e noite)	-58m a -27m	(HUEBERT, 2009)
Hora de nascer e pôr do sol	6:00 e 18:00	-
Temperatura ótima para ovos e larvas	24,0°C a 30°C	(BUNN et al., 2000; SOUZA et al., 2010; VAN ROOIJ et al., 1995)
Temperatura de aclimatação para ovos e larvas	24°C a 33°C	Baseado em Donelson et al. (2011)
Época da desova	Durante todo o ano	(VÉRAS et al., 2008)
Períodos simulados	Janeiro e fevereiro – Verão Julho e agosto – Inverno	-
Anos de simulação	2092 a 2099	-

Fonte: Produção do autor.

3.3.1 Causas e taxas de mortalidade

Ao longo da simulação, o Ichthyop registra o momento e a causa da morte dos indivíduos. A probabilidade de mortalidade por temperatura foi calculada a partir da quantidade de larvas que migraram para águas com temperaturas fora do intervalo de tolerância dividido pelo total de partículas que foram lançadas, em cada área (Equação 3.8). Não foram contabilizados os indivíduos que se deslocaram para fora do domínio.

$$MorT_t = \frac{\sum d}{\sum_t c - \sum_t adv} \quad (3.8)$$

Onde:

MorT - mortalidade por temperatura;

d - Número de partículas transportadas para águas com temperatura inferior ou superior à tolerância;

c - número de partículas desovadas no domínio do modelo;

adv - número de partículas advectadas para fora do domínio.

Foi realizada uma análise de variância não-paramétrica (Kruskall-Wallis) para avaliar similaridades e diferenças significativas entre os anos analisados de cada um dos experimentos, com e sem aclimatação, no tempo e entre as áreas.

3.3.2 Padrões de dispersão e conectividade demográfica

Para a caracterização dos padrões de dispersão e conectividade, foram calculadas as taxas de retenção local (Equação 9), de recrutamento (Equação 10), e auto recrutamento (Equação 11), além de observado o padrão de deslocamento ao longo da simulação, e as distâncias percorridas pelos organismos oriundos de cada uma das UCs.

Retenção local se refere à relação entre os indivíduos que foram recrutados em uma determinada área e a quantidade total que foi lançada deste ponto no início da simulação; o recrutamento se refere à quantidade de indivíduos que migraram de uma área para outra; e o auto-recrutamento se refere aos que permaneceram na mesma área de lançamento.

$$RetLocal = \frac{\text{recrutadas no local } i}{\text{todas as partículas lançadas do ponto } i} \quad (3.9)$$

$$Rec_{t,i} = \frac{\sum_t c_{ij}}{\sum_t c_j - \sum_t adv_j - \sum_t d_j} \quad (3.10)$$

$$AutoRec_{t,i} = \frac{\sum_t c_{ii}}{\sum_t c_i - \sum_t adv - \sum_t d_i} \quad (3.11)$$

Onde:

Rec_{ti} - recrutamento de todas as áreas no tempo t na área i;

$AutoRec_{ii}$ - autorrecrutamento de todas as áreas no tempo t na área i;

d - Número de partículas transportadas para águas com temperatura inferior ou superior à tolerância;

c - número de partículas desovadas no domínio do modelo;

adv - número de partículas advectadas para fora do domínio;

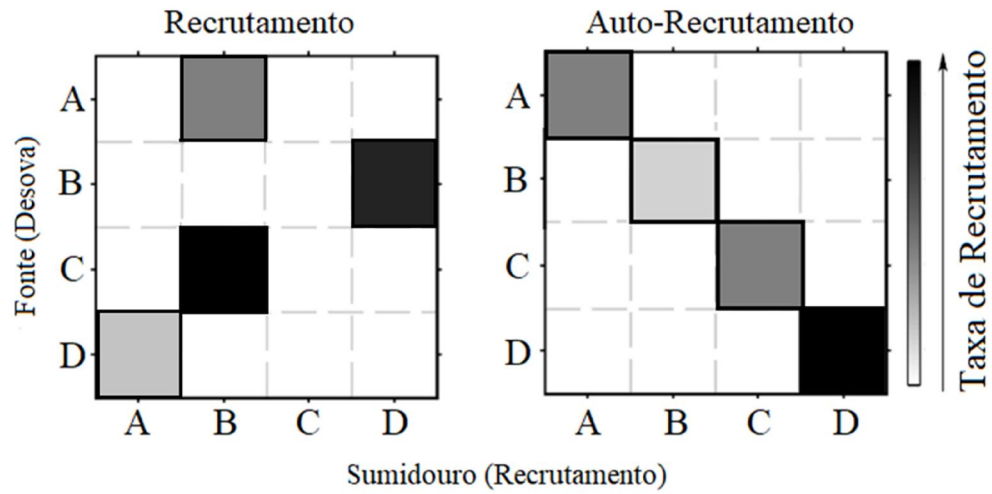
c_{ii} - partícula que saiu da área “i”, e permaneceu na área “i”;

c_{ij} - partícula que saiu da área “i”, e recrutou na área “j”.

As Matrizes de Probabilidades de Transição (MPT), também chamadas de matrizes de conectividade, indicam a probabilidade (proporção de sobreviventes) de indivíduos no estágio larval, que são originários de uma população N_i (“fonte” ou “desova”), no tempo t, de recrutar em outra população N_j (“sumidouro” ou “recrutamento”), após o término do tempo de permanência da larva no plâncton (PLD), estimado pelas trajetórias individuais oriundas do modelo biofísico (p.ex Burgess et al., 2014; D’Agostini et al., 2015).

As áreas hachuradas na matriz (figura 3.5) representam a troca de larvas entre os locais de origem (no eixo y) e de destino (no eixo x), enquanto que as áreas vazias significam que não há conectividade entre os locais. Quando visto horizontalmente, pode-se observar o destino das larvas de origens específicas. Ao visualizar verticalmente, os locais de origem de um determinado “destino” podem ser determinados. Na diagonal desta matriz, quando N_i e N_j são iguais, os locais de origem e assentamento são os mesmos, indicando o auto-recrutamento, quando este ocorre.

Figura 3.5: Matrizes de Probabilidades de Transição (MPT).



Fonte: Produção do autor.

Para elaborar as MPT, divide-se a quantidade de indivíduos que sobreviveram e chegaram à área de recrutamento pela quantidade de indivíduos que sobreviveram de cada uma das áreas de desova (COWEN et al., 2006; D'AGOSTINI et al., 2015).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados e discussão estão apresentados da seguinte maneira: na seção 4.1 apresenta-se a verificação sobre as simulações para o presente e em seguida apresenta-se o estado futuro do Oceano Atlântico Tropical, quais as mudanças percebidas na hidrodinâmica sobre a região estudada, a intensificação e desintensificação de correntes, a elevação da temperatura da água do mar em relação ao presente e diferenças entre o inverno e o verão; a seção 4.2 aborda os impactos das mudanças climáticas sobre os peixes recifais do Atlântico tropical, os efeitos do cenário futuro do oceano sobre a dispersão e conectividade entre unidades de conservação, e sobre a sobrevivência e mortalidade dos organismos.

4.1 Verificação e mudança climática regional no Oceano Atlântico Tropical

Foi realizada a análise dos campos médios de TSM e de correntes através da comparação com dados de reanálise (OSTIA e SODA 3.4.2) e *in situ* (PIRATA). Os dados de TSM foram comparados com os dados do OSTIA, e as correntes superficiais médias de 0 a 100 metros de profundidade comparadas com os dados do SODA 3.4.2. A avaliação do desempenho do modelo hidrodinâmico para o experimento histórico foi feita para determinar a sua capacidade de simular os campos atuais de maneira acurada. Esta etapa é importante para dar maior confiabilidade do modelo climático no experimento de cenário futuro utilizado para a modelagem biológica. Após a verificação do experimento histórico são apresentadas as diferenças entre ele e o cenário futuro com o intuito de averiguar as principais diferenças hidrodinâmicas no final do século XXI.

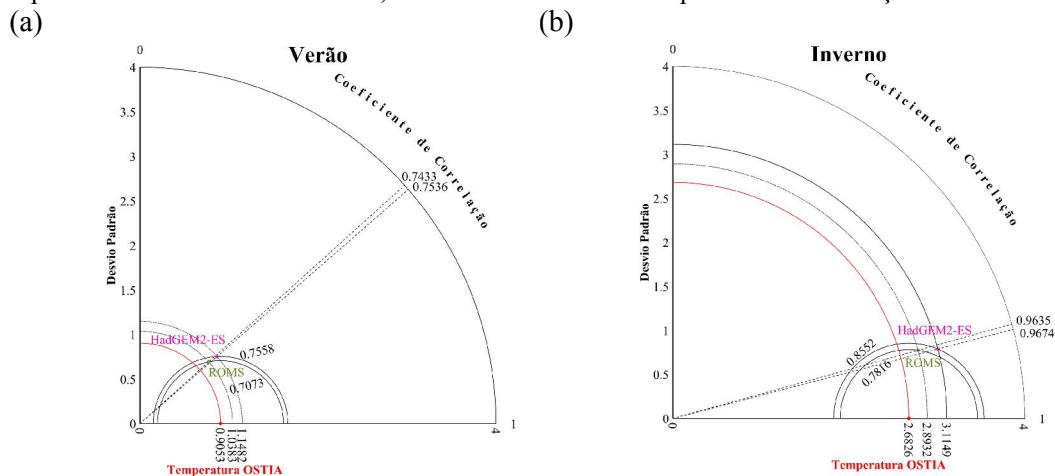
4.1.1 Temperatura da água do mar

O campo médio de TSM no modelo, tanto no verão (janeiro, fevereiro, março) como no inverno (junho, julho e agosto), de 1997 a 2004, apresentou temperaturas mais baixas que o OSTIA (Figuras 1 e 2 - Apêndice A). Os resultados da regionalização apresentaram valores de RMSD e viés na mesma ordem de grandeza que o modelo global, em relação aos dados de reanálise. Com valores semelhantes à erros obtidos por outros experimentos recentes na região, variando de 0 a 2,5°C (D'AGOSTINI et al.,

2015; DIAS et al., 2014; GOUVEIA et al., 2017). Embora os erros da regionalização apresentem a mesma ordem de grandeza dos erros do HadGEM2-ES, eles são relativamente maiores, provavelmente devido a que o do modelo global apresenta vieses sistemáticos na componente atmosférica na região, principalmente sobre o Equador (RICHTER et al., 2012; XU et al., 2014). E, uma vez que a regionalização é aplicada apenas no oceano, o viés na componente atmosférica acaba influenciando o viés na regionalização oceânica.

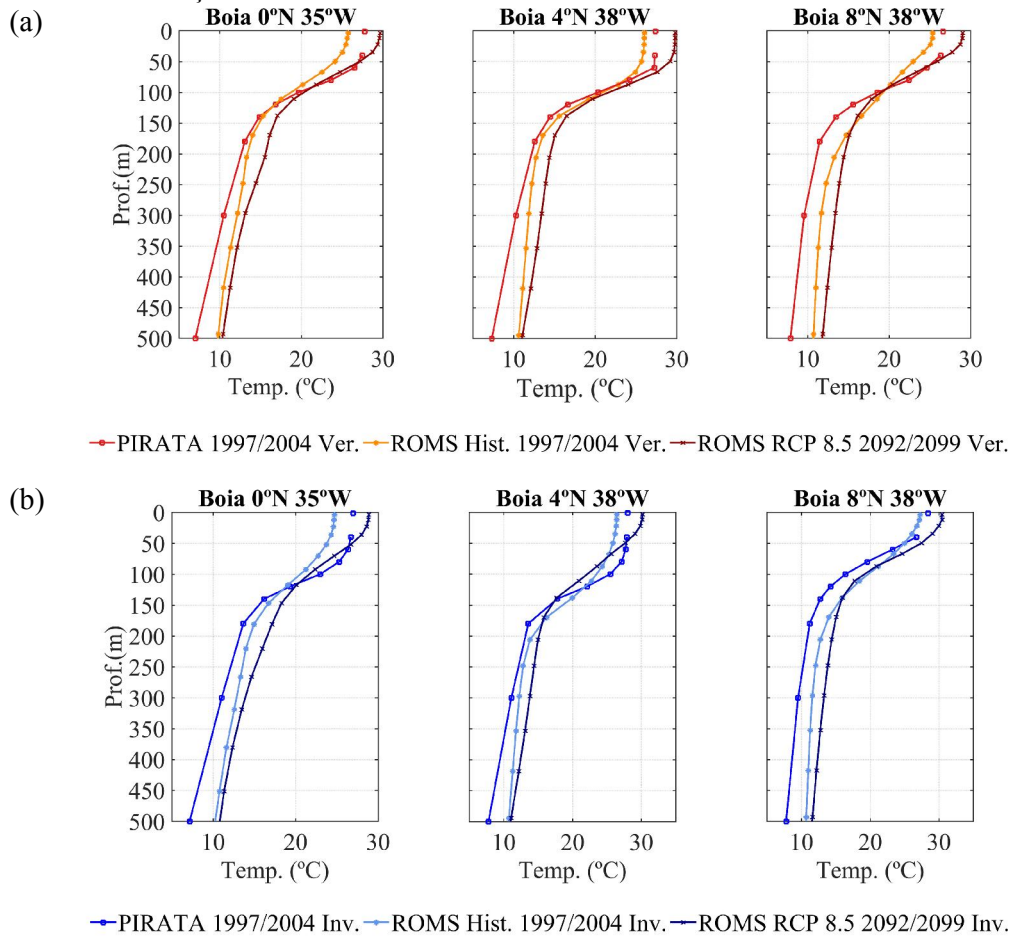
O campo médio de temperatura da regionalização resultou ser mais baixo que o apresentado pelos dados do OSTIA, isso se deve a uma particularidade do modelo climático utilizado como parâmetro de entrada no ROMS, que já apresenta valores mais baixos (Apêndice A). Os modelos do sistema terrestre são conhecidos por apresentar dificuldades na representação dos fenômenos que ocorrem na região equatorial do Atlântico (XU et al., 2014). Para todo o domínio ao longo de toda a série analisada, os diagramas de Taylor (Figura 4.1) apresentam menor variação entre os resultados no verão, que no inverno. Os valores de RMSD foram ligeiramente mais altos no inverno (HadGEM2-ES: 0,8552 e ROMS: 0,7816), que no verão (HadGEM2-ES: 0,7558 e ROMS: 0,7073).

Figura 4.1: Diagramas de Taylor para a temperatura média no domínio do período entre 1997 e 2004 para (a) verão e (b) inverno. Onde as linhas tracejadas indicam o coeficiente de correlação, os semicírculos centrados na origem, representam o desvio padrão, e os arcos de circunferência representam os valores de RMSD, estes centrados no desvio padrão da observação.



As medidas obtidas das boias do PIRATA que forneceram dados no período equivalente ao período do experimento histórico localizam-se nas coordenadas 0°N 35°W, 4°N 38°W e, 8°N 38°W (Figura 4.2). De maneira geral, a TSM do ROMS apresenta valores de temperatura abaixo do observado pelas boias até 100 m de profundidade, porém, abaixo dessa profundidade, em média, apresentam-se mais elevadas, nos três pontos observados. Contudo, as respostas do modelo seguem o comportamento dos dados observados. Para o cenário RCP 8.5, o perfil de temperatura apresenta-se mais quente, para as duas estações observadas.

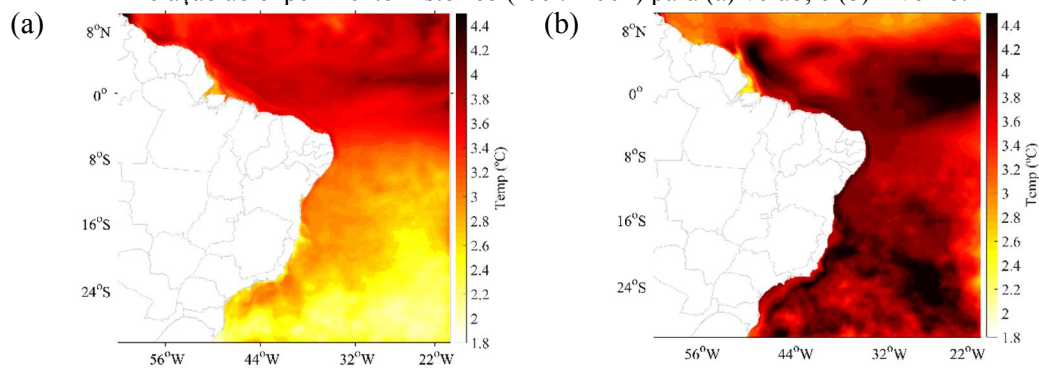
Figura 4.2: Perfis verticais de temperatura de 0 a 500 m de profundidade da coluna d'água, para (a) verão e (b) inverno, nos experimentos Histórico e RCP 8.5, comparados em relação aos dados de boias do PIRATA.



Fonte: Produção do autor.

As maiores diferenças de TSM do cenário futuro em relação ao presente foram encontradas no inverno (Figura 4.3.b), uma vez que os invernos tenderão a ser mais quentes que os invernos do cenário atual, e os verões apresentarão menos diferenças em relação ao verão atual. Alexander et al. (2018), porém, encontraram maiores tendências de aquecimento sobre o Atlântico Norte no verão boreal, que amplifica o ciclo sazonal de TSM no século XXI, para o hemisfério norte.

Figura 4.3: Diferença entre a TSM para o experimento de cenário futuro (2092-2099) em relação ao experimento histórico (1997-2004) para (a) verão; e (b) inverno.



Fonte: Produção do autor.

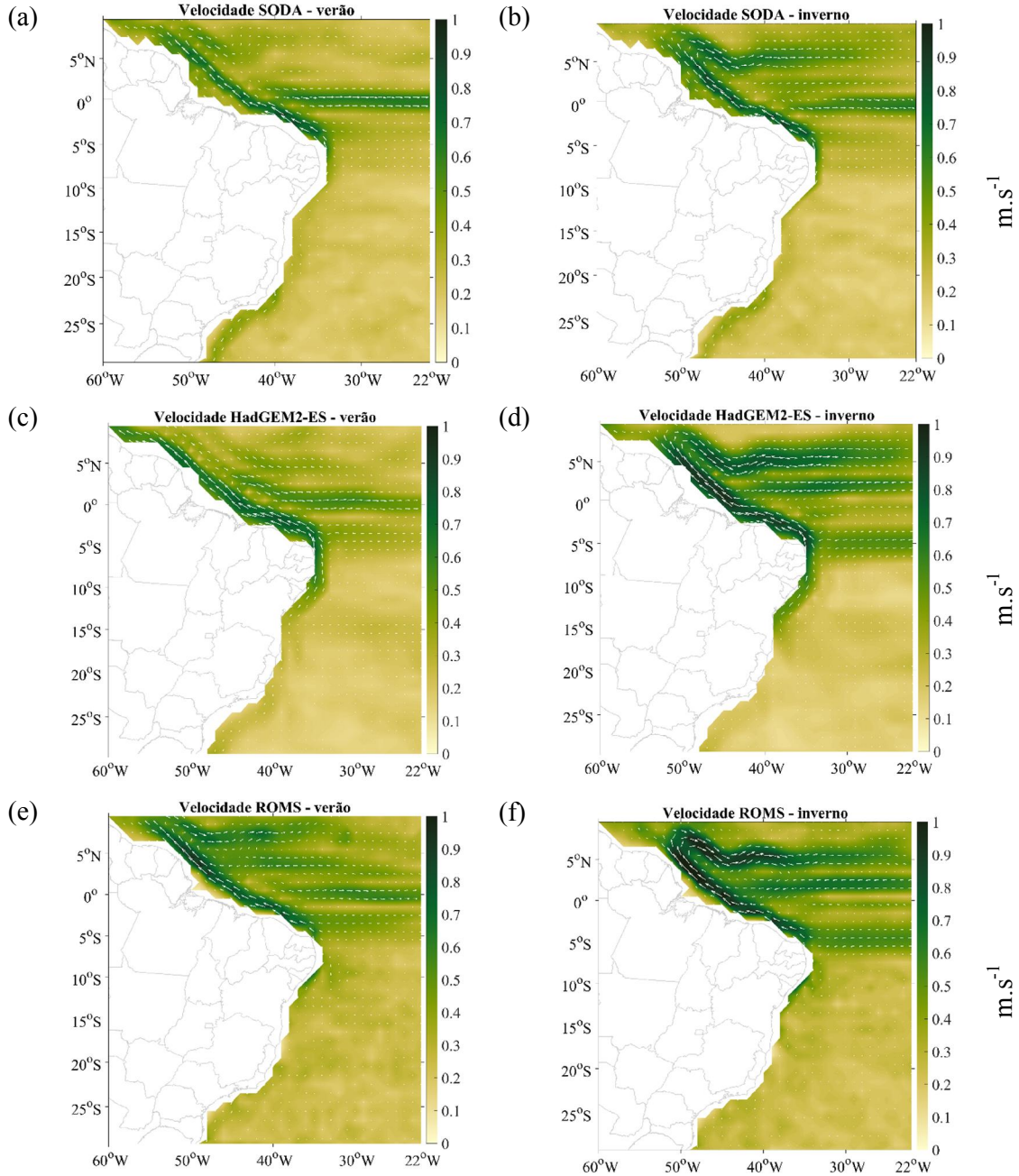
4.1.2 Correntes superficiais

As médias de verão (JFM) e inverno (JAS) das componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes superficiais resultantes da regionalização (saídas do ROMS) apresentaram maiores intensidades comparadas com a análise (SODA 3.4.2), principalmente em áreas próximas à costa (Figura 4.4). Entretanto, os resultados do ROMS estão coerentes em relação aos dados do SODA, na direção das componentes de corrente, e representam corretamente a variabilidade entre verão e inverno. As velocidades das correntes superficiais no inverno são mais intensas que no verão possivelmente causadas pelos ventos mais intensos desta estação (TEIXEIRA et al., 2013).

O RMSD apresentou valores mais altos no cenário de inverno, principalmente junto à foz do rio Amazonas e região equatorial (Apêndice B). A influência do viés presente no

HadGEM2-ES sobre a região foi intensificada pelo ROMS. Richter et al. (2014a) discorrem sobre o viés na região equatorial, nos modelos do sistema terrestre apresentados pelo CMIP5. Eles atribuem o viés da região à dificuldade em representar corretamente convecção marinha e a posição latitudinal da ZCIT. Particularmente este último tem uma forte influência sobre os ventos zonais equatoriais tanto no ciclo sazonal quanto na variabilidade interanual. Nos resultados encontrados, percebe-se que intensificação dos ventos alísios no modelo, aumentam a intensidade das correntes nessa região, quando comparados com os dados do SODA.

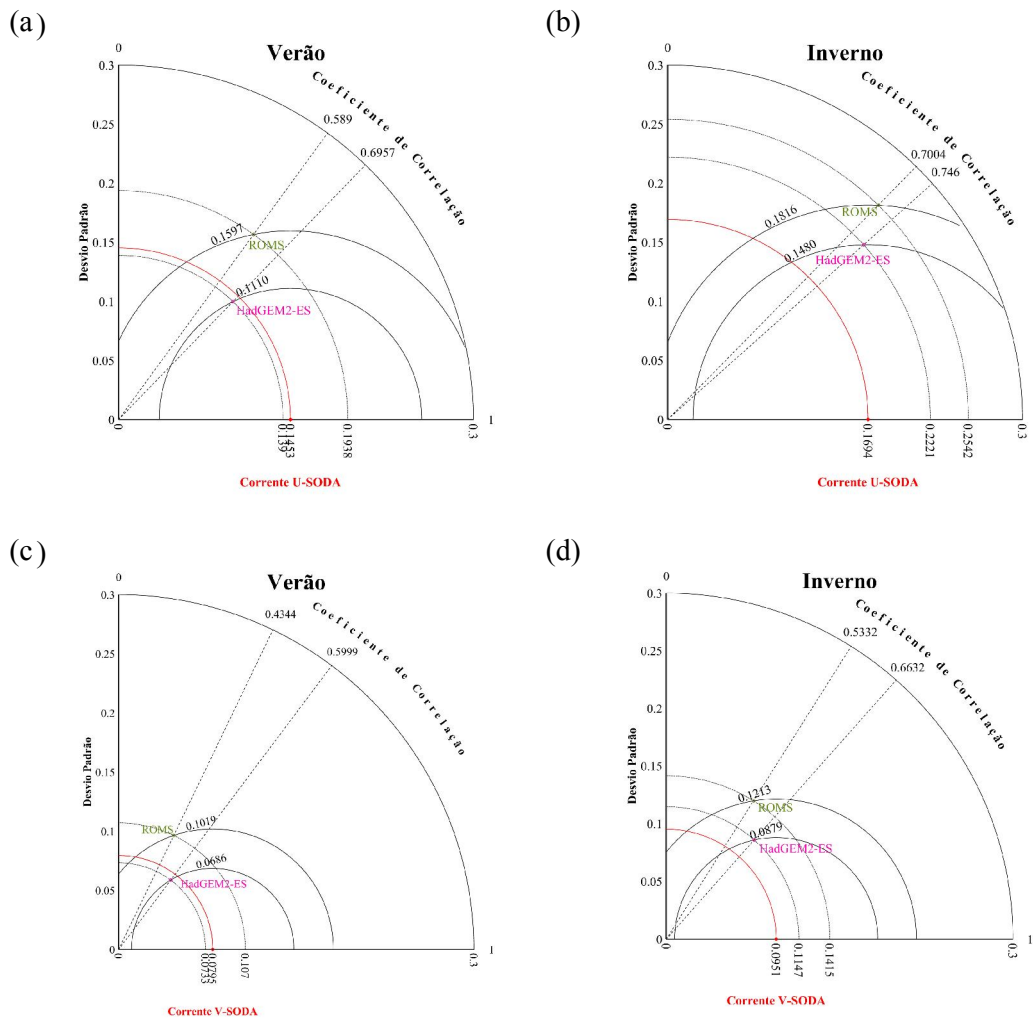
Fig. 4.4 Magnitude e sentido da velocidade média das correntes oceânicas de 0 a 100 metros de profundidade no cenário de clima presente (1997-2004), para (a), (c) e (e) as velocidades no verão, e (b), (d) e (f) as velocidades no inverno, sendo as duas primeiras para o SODA 3.4.2, e em seguida para o dado global do HadGEM2-ES, e por último os resultados da regionalização.



Fonte: Produção do autor.

Os diagramas de Taylor mostram que a regionalização resultou em valores mais distantes da observação (SODA) (Figura 4.5). Ainda assim, não resultou ser tão distante dos resultados do HadGEM2-ES. A perda de qualidade do resultado pode estar associada aos processos de mesoescala que são difíceis de serem representados, e também, aos ventos alísios intensificados no modelo climático, contribuindo para uma intensificação das correntes superficiais, aumentando o viés na região.

Figura 4.5: Diagramas de Taylor para as componentes zonais (U) ((a) verão e (b) inverno) e meridionais (V) ((c) verão e (d) inverno) para os campos de correntes oceânicas superficiais (0 a 100 metros de profundidade).

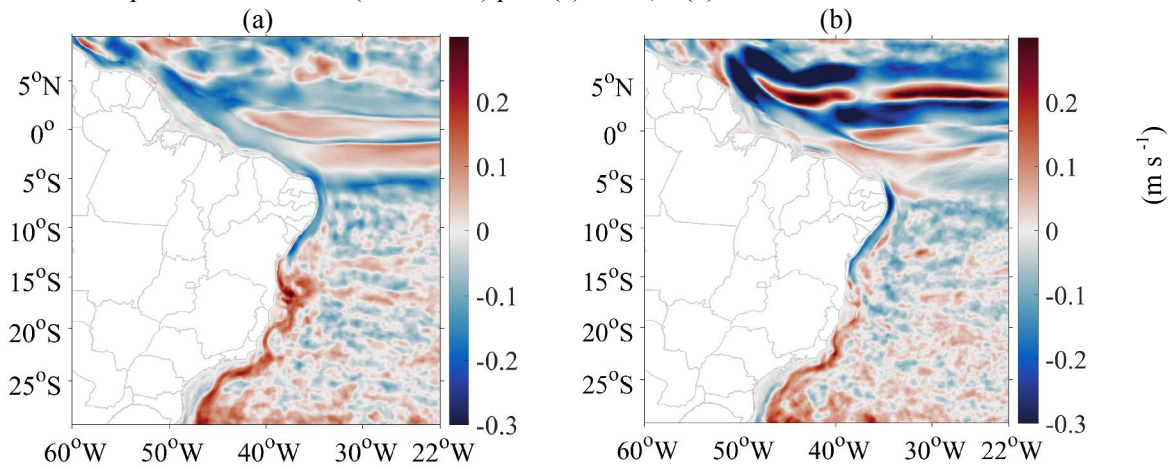


Fonte: Produção do autor.

Como o processo de regionalização foi realizado com um modelo regional oceânico (ROMS), o viés ocasionado por ventos tende a aumentar, visto que o campo de ventos em 10 m de altura fornecido ao modelo como forçante, é apenas interpolado pelo ROMS para a grade numérica, ou seja, ele mantém a baixa resolução do ESM, de $1,25^\circ$ por $1,875^\circ$ em latitude-longitude.

A CNB tende a ficar menos intensa no final do século XXI (2092-2100) no cenário RCP 8.5, em relação ao cenário presente (1997-2004), (Figura 4.6). Houve maior diferença entre futuro e presente no inverno (Figura 4.6.b), onde se percebe a perda de intensidade da retroflexão da CNB no cenário futuro. Pontes et al. (2016), apesar de não terem aplicado o processo de regionalização, também indicam que a CNB diminui a intensidade nas camadas mais superficiais. Entretanto, a CB tende a ficar mais intensa até o final do século, como também encontrado por Toste et al.(2017), que regionalizaram as saídas do HadGEM2-ES no oceano Atlântico Sul (Figura 4.6). Este aumento está relacionado à migração da origem desta corrente para norte (de $13,22^\circ\text{S}$ para $10,9^\circ\text{S}$), o que intensifica e propaga as correntes baroclínicas para sul.

Figura 4.6: Diferença entre a magnitude média das correntes oceânicas de 0 a 100 metros de profundidade, para o experimento de cenário futuro (2092-2099) em relação ao experimento histórico (1997-2004) para (a) verão; e (b) inverno.



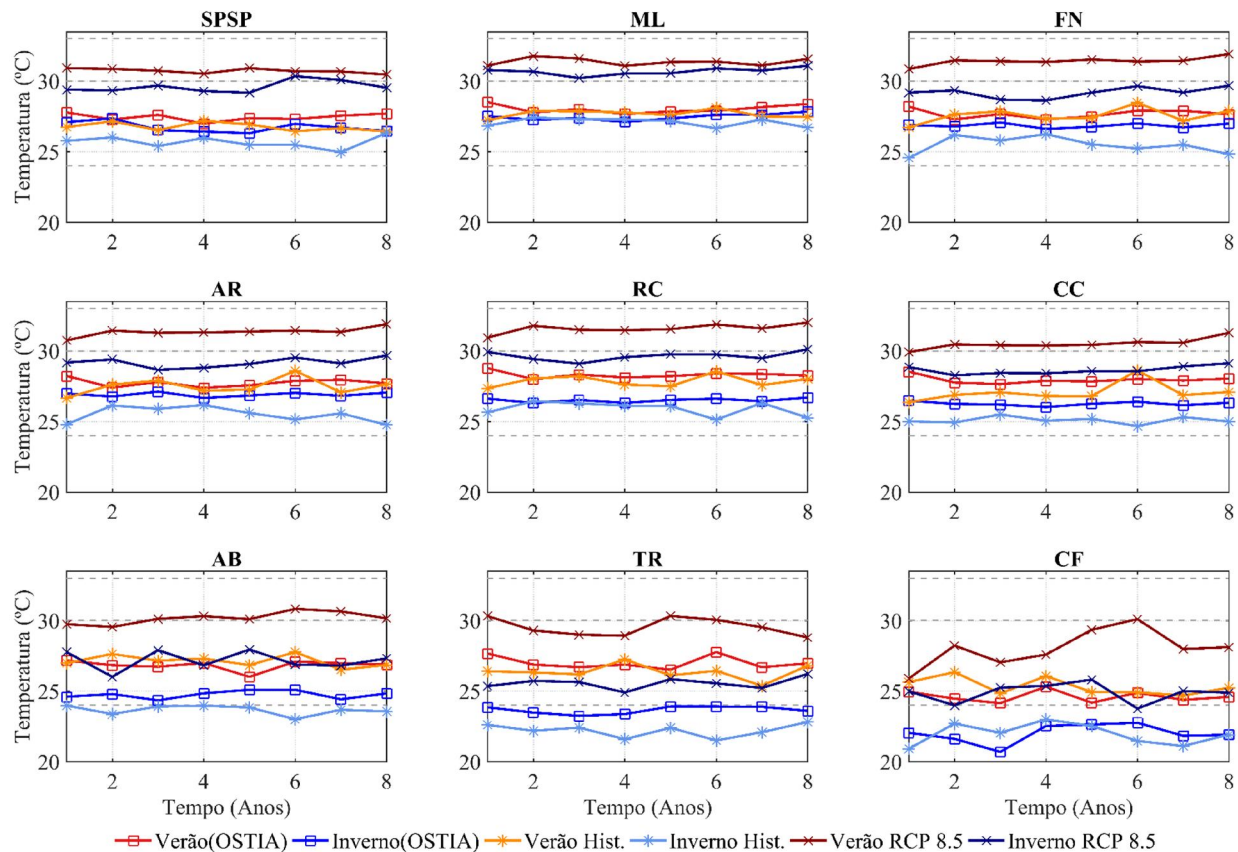
Fonte: Produção do autor.

4.2 Impactos das mudanças climáticas sobre os peixes recifais do Atlântico tropical

4.2.1 Mortalidade dos indivíduos

As temperaturas superiores ao máximo de tolerância, foram a principal causa de mortes dos organismos para as simulações sem aclimação. Apesar do cenário futuro apresentar temperaturas altas quando comparadas ao cenário histórico, em média até 4°C superiores no inverno, e 3°C no verão, houve também mortes por temperatura inferior à temperatura de tolerância. Percebe-se que os valores de temperatura no cenário futuro, nas áreas de lançamento, apresentaram temperaturas superiores às ideais para a sobrevivência (Figura 4.7). Isso explica a alta taxa de mortalidade das simulações sem aclimação, tanto para o inverno e para o verão. As temperaturas médias de inverno e verão para as UCs com as latitudes mais baixas apresentaram menor variabilidade sazonal e interanual da temperatura, tanto para o cenário presente como para o cenário futuro. À medida que aumenta a latitude, a variabilidade da TSM aumenta, com destaque para a UC de Cabo Frio, que no cenário de projeção futura apresenta temperaturas toleráveis para os peixes estudados, aumentando assim a taxa de sobrevivência, principalmente no inverno.

Figura 4.7: Variabilidade anual das médias da TSM nos locais de desova. Os limites de temperatura de tolerância inferiores (24°C) e superiores (30°C e 33°C) para os peixes do gênero *Sparisoma* estão demarcados pelas linhas tracejadas.

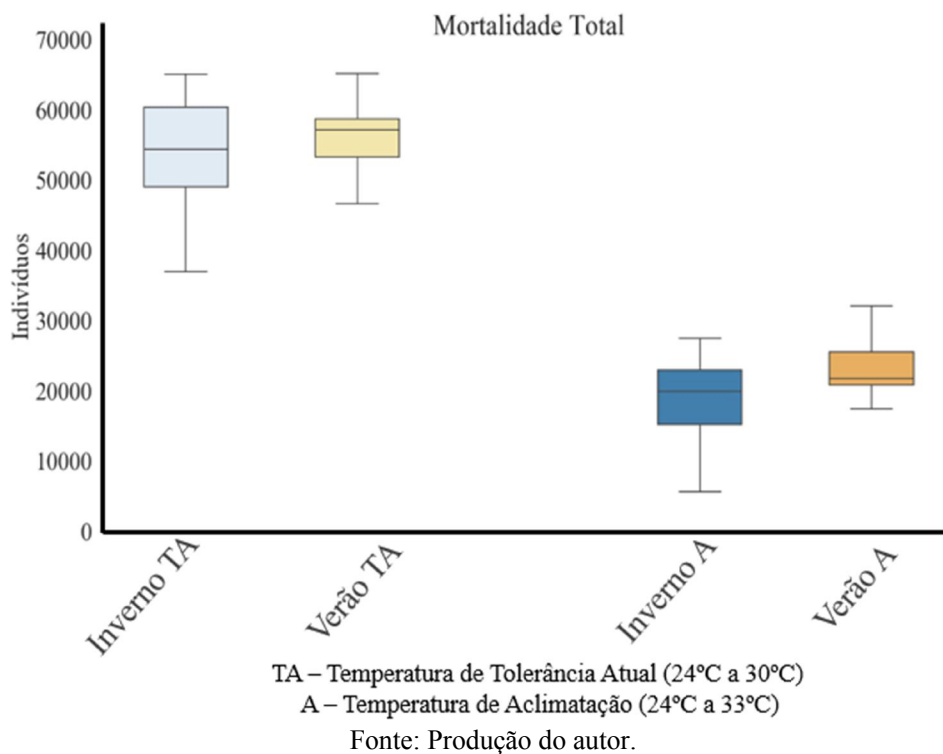


SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; FN – Arquipélago de Fernando de Noronha; AR – Atol das Rocas; RC – Recife de Corais; CC – Costa de Corais; AB – Abrolhos; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz; CF – Cabo Frio.

Fonte: Produção do autor.

Não foram encontradas diferenças significativas das mortalidades (ANOVA unifatorial), entre verão e inverno nas simulações com limites atuais de temperatura de tolerância ($p = 0,64$) e com aclimação ($p = 0,16$) (Figura 4.8). Entretanto, comparando-se entre os verões com e sem aclimação ($p < 0,001$) e os invernos ($p < 0,001$), ambos apresentaram diferenças significativas, considerando um nível de significância de 5%.

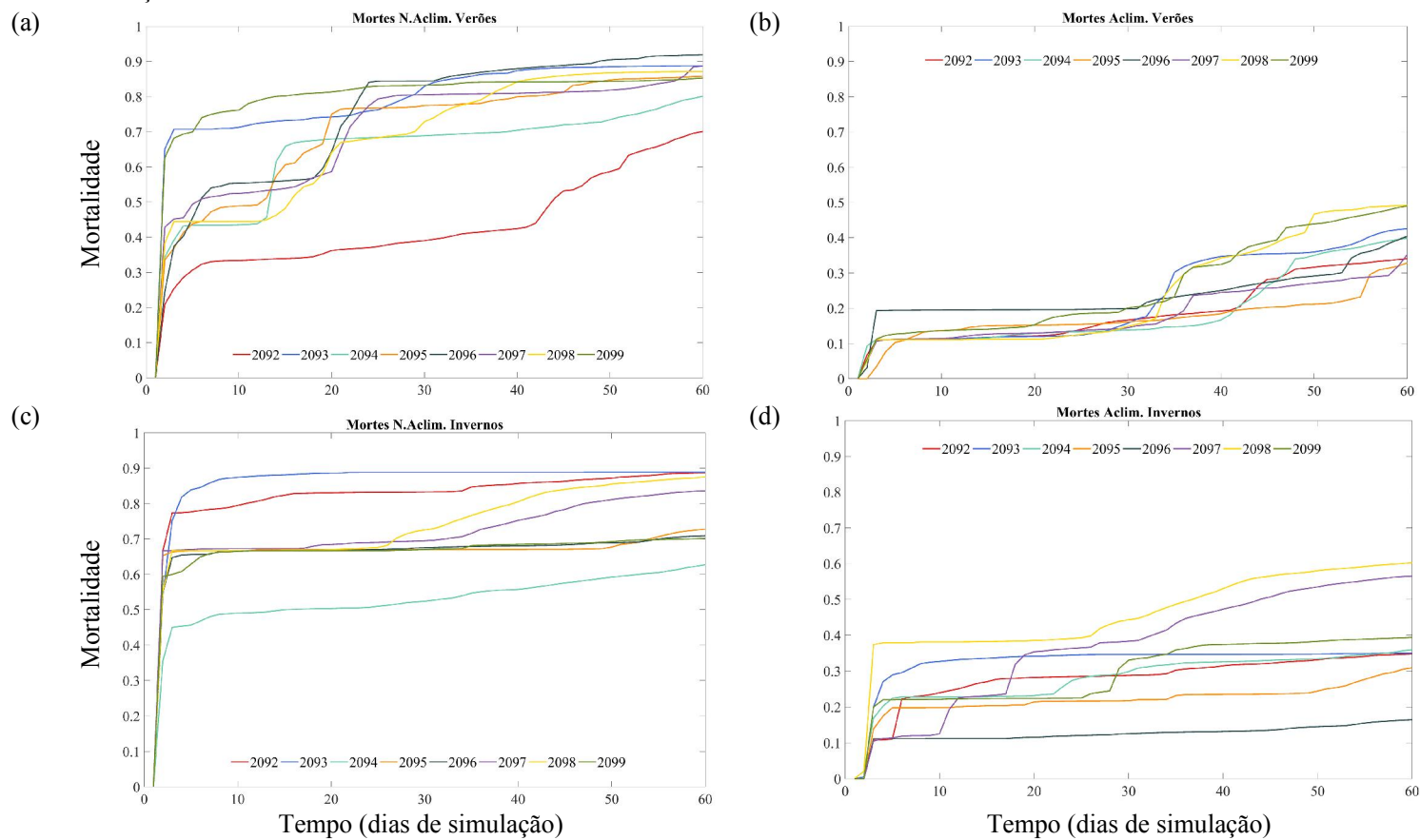
Figura 4.8: Mortalidade total dos indivíduos para inverno e verão com limites atuais de temperatura de tolerância e com aclimação. Onde as cores claras indicam os resultados para o cenário com os limites de temperatura de tolerância atuais, e as mais intensas indicam o cenário com aclimação. Os tons de azul indicam a quantidade de indivíduos mortos no final dos experimentos para os invernos, e amarelo/alaranjado, os verões.



A mortalidade foi alta no início das simulações sem aclimação, enquanto a partícula se comporta como ovo (primeiras 24 horas) e apresenta densidade de $0,089 \text{ g. cm}^{-3}$ (Figura 4.9.a, c). Neste estágio, as partículas se encontram em profundidades extremamente

rasas, próximas à superfície onde a água tende a apresentar temperaturas mais altas do que nas profundidades onde a larva se desenvolve (27 a 58 metros). A mortalidade é significativamente menor nas simulações com aclimação em virtude da maior tolerância térmica (Figura 4.9.b, d).

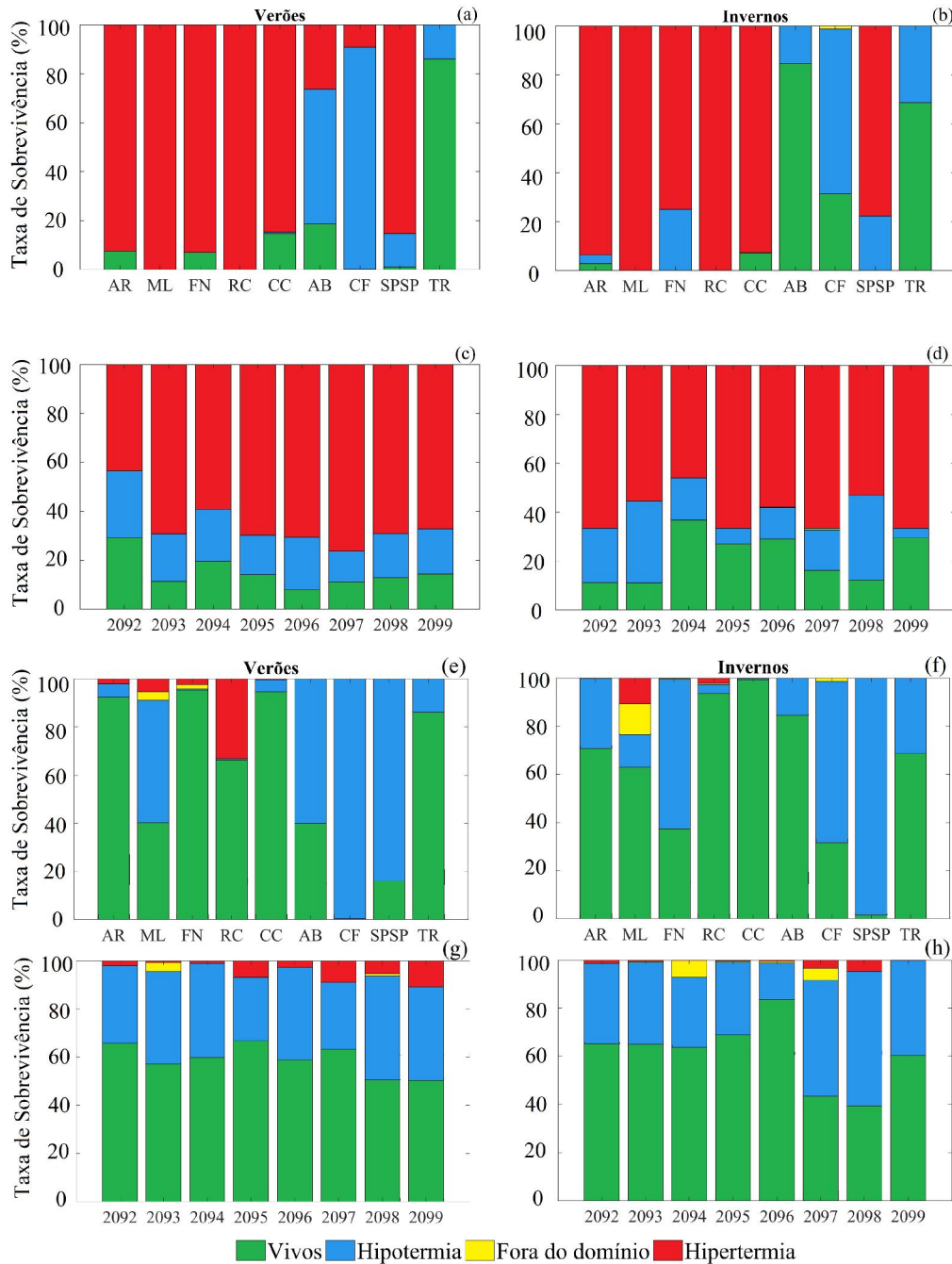
Figura 4.9: Taxa de mortalidade ao longo do tempo para as simulações de 2092 a 2099: (a) Verões com temperatura de tolerância atual; (b) Verões com aclimação; (c) Invernos com temperatura de tolerância atual; e (d) Invernos com aclimação. Em que cada linha representa um ano de simulação.



Fonte: Produção do autor.

A sobrevivência dos organismos é baixa relativamente, se comparada a quantidade de indivíduos lançados (Figura 4.10). Quando uma partícula sai do domínio ela é considerada morta. As mortes por hipertermia (calor) e hipotermia (frio) são ocasionadas pelo deslocamento das partículas para regiões cuja temperatura da água estão fora da faixa de tolerância.

Figura 4.10: Taxa de sobrevivência e mortalidade dos organismos, considerando as áreas de lançamento (a,b) e anos simulados (c, d) considerando a temperatura de tolerância atual. E considerando as áreas de lançamento das partículas (e,f) e anos simulados (g,h) nas simulações considerando a adaptação de +3°C dos organismos. Onde as cores indicam a causa da morte: por hipotermia – azul; por hipertermia – vermelho; advecção para fora do domínio – amarelo; ou sobrevivência - verde.



Fonte: Produção do autor.

Para as áreas de ML e RC todos os indivíduos lançados nas simulações sem aclimatação morreram, tanto no inverno como no verão. Já nos cenários com aclimatação, a taxa de sobrevivência no verão e inverno, respectivamente foi de 40,3 e 62,9% em ML e 66,3 e 93,6% em RC. O processo de aclimatação permitiu que os sobreviventes das partículas lançadas em FN aumentassem de 7 para 95% no verão e, no inverno, não houve sobreviventes no cenário com temperatura de tolerância atual, passando para uma taxa de 37% para o cenário com aclimatação. Com taxas maiores de sobrevivência, mais partículas dispersaram percorrendo maiores distâncias, advectando para regiões com condições adversas, como regiões onde não é possível seu assentamento, assim como regiões mais quentes ou frias, o que explica variação na taxa de mortes, por frio e calor, entre os dois cenários.

Em AR, houve elevada mortalidade por calor no inverno e no verão, no cenário sem aclimatação. Já no cenário de aclimatação, a sobrevivência nas duas estações estudadas foi bastante elevada (92,4% para o verão e 70,8% para o inverno), apresentando morte por frio para 5,5% das partículas no verão, e 29,1% no inverno. As partículas oriundas de CC apresentaram um aumento na sobrevivência nas simulações utilizando a temperatura atual de tolerância para com aclimatação: de 14,7% (verão) e 7,2% (inverno) para 94,7 e 99,4%, respectivamente.

Em AB as condições de aclimatação não interferiram nas taxas de sobrevivência e causas de mortes, apresentando 84,7% dos organismos vivos no final da simulação, e os restantes 15,3% tendo apresentado morte por frio. Nos verões, o cenário sem aclimatação apresentou 26,2% de mortes por calor, 55,2% de mortes por frio, e 1% dos organismos sobreviveram; para o cenário com aclimatação não houve mortes por calor, apresentando 60% dos organismos mortos por frio, e 40% vivos no final do experimento.

Para SPSP, no cenário sem aclimatação, a mortalidade por temperaturas altas foi de 85,3 e 13,7% por temperaturas baixas, sobrevivendo apenas 1% dos organismos lançados. Já no cenário de aclimatação, não se observou mortes por hipertermia, já a mortalidade por hipotermia aumentou para 83,8%, e resultando em 16,1% dos organismos vivos no final da simulação.

As partículas advectadas de TR não apresentaram variação na sobrevivência entre os dois experimentos (sem e com aclimatação), tanto no inverno como no verão. Esta é uma região de relativa atividade de mesoescala, o que pode ter contribuído para uma maior uniformidade de temperaturas e o aprisionamento das partículas próximo de sua origem (SPALDING et al., 2007).

A elevação futura da TSM observada nas simulações resultou na amenização das temperaturas mais baixas características da região de CF, que apresentou temperaturas toleráveis para os indivíduos, apresentando uma taxa de sobrevivência de 31,4 (sem aclimatação) e 31,7% (com aclimatação) nas simulações de inverno. Nos verões, sobreviveram 2 e 3%, respectivamente. Ainda assim, as mortes por temperaturas baixas foram preponderantes em todas as simulações.

Observa-se que há maior sobrevivência dos organismos lançados de UCMs mais afastadas do equador (TR, CF, AB), principalmente no cenário com limites atuais de temperatura de tolerância, elevando, assim, a importância das UCMs ao sul do domínio, em latitudes maiores. Há uma tendência de que, com o aumento da temperatura global, ocorra a migração de espécies, e haja maior riqueza da biodiversidade em regiões mais afastadas do equador, onde as temperaturas resultem mais amenas (RILOV et al., 2019).

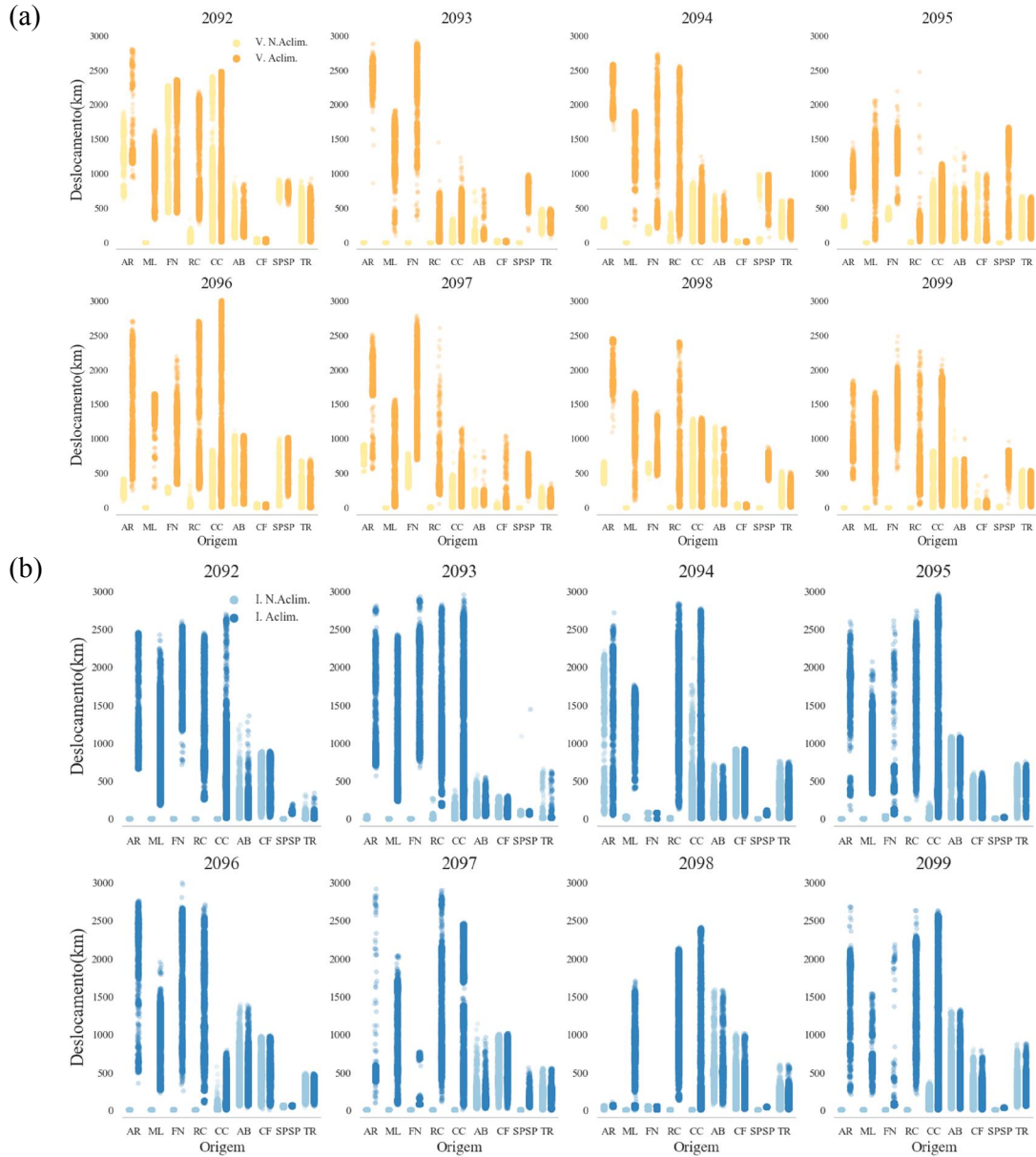
4.2.2 Padrões de dispersão

A circulação oceânica tem papel fundamental na dispersão durante os primeiros estágios de vida (isto é, ovos, esporos, larvas, juvenis) para a maioria das espécies marinhas (OSPINA-ALVAREZ et al., 2019). Para muitas espécies, este estágio inicial da vida representa o mais importante ou até mesmo, o único mecanismo de dispersão e conexão entre as diferentes populações. Com as variações já observadas no estado físico do oceano nas últimas décadas e nos cenários de projeções futuras, espera-se que os padrões de dispersão dos organismos sejam diferentes, ou até mesmo o PLD seja diferente (ROBERTSON et al., 2006). Porém, aqui apenas avalia-se o impacto das mudanças climáticas sobre o estado físico do oceano e seu impacto sobre a dispersão e sobrevivência, abordando como adaptação dos organismos apenas a aclimatação frente a um oceano mais quente.

As correntes de maior importância sobre a dispersão aqui apresentam-se a Corrente Norte do Brasil, que direciona as partículas, quando vivas, para norte, e a Contracorrente Norte Equatorial, direcionando-as para distâncias mais longas, e em direção leste. A corrente do Brasil, mais intensa, encaminha para sul os indivíduos lançados das UCMs sobre sua região de influência (AB, CF, e CC, no verão). A posição da bifurcação da CSE apresenta relevância sobre o padrão de dispersão das partículas, principalmente das lançadas por CC. Nas regiões próximas ao equador, as partículas apresentaram maiores distâncias percorridas nos cenários de aclimatação, comparado às simulações sem aclimatação, devido ao aumento da sobrevivência ao longo da simulação. No cenário sem aclimatação, as partículas advectadas das regiões próximas do equador (ML, FN, SPSP e RC) apresentaram alta mortalidade logo no início da simulação (Figura 4.9), o que resultou na morte da maioria das partículas antes mesmo de serem advectadas para fora da área de desova.

As partículas oriundas de AR, FN e ML apresentaram maiores distâncias percorridas, nos cenários de aclimatação, percorrendo distâncias de até 2500 km em relação à origem (Figura 4.11). Os deslocamentos de CC, AB, CF e TR foram semelhantes em ambos cenários, tanto no inverno como no verão, com exceção de CC, que no inverno, devido à baixa sobrevivência, as partículas não se deslocaram para longe da origem. O deslocamento meridional da posição média da biCSE entre o inverno e o verão determina se uma partícula ficará submetida ao regime de escoamento da CNB ou da CB, em especial, aquelas lançadas em CC, AR e FN. As Figuras 4.12 e 4.13 mostram que RC apresenta-se como “trampolim” entre os indivíduos da porção norte e sul do domínio.

Figura 4.11: Deslocamento total das partículas lançadas de cada UCM, em relação ao local de lançamento, para (a) verões e (b) invernos. Onde os tons claros indicam os resultados para o cenário de temperatura de tolerância atual, e os tons mais escuros representam as respostas do cenário de aclimação.

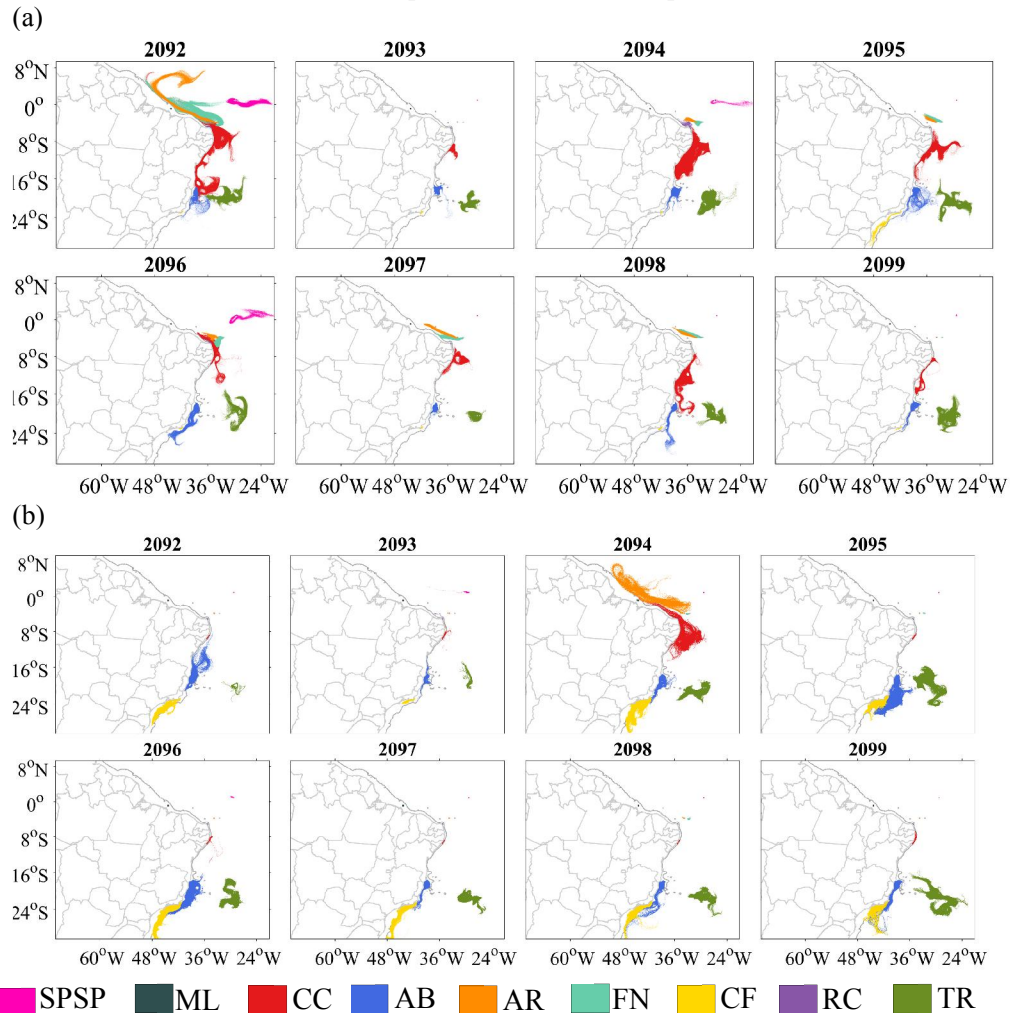


Fonte: Produção do autor.

Apesar da redução da intensidade da CNB, as maiores distâncias percorridas são das partículas submetidas a esta corrente. As maiores diferenças no padrão de dispersão entre inverno e verão se dão principalmente pelas partículas lançadas de CC, situada próximo à bifurcação da CSE. Devido à sazonalidade da posição da biCSE, nos verões

as larvas de CC tendem a ir para sul, seguindo a CB e chegando até aproximadamente 24°S, podendo ser recrutadas por AB, enquanto que nos invernos, devido à que a posição da bifurcação está mais ao sul, as partículas de CC são influenciadas pela SCNB e tendem a migrar para noroeste, seguindo o mesmo padrão que RC, AR, FN e ML, quando estas sobrevivem. A distribuição espacial dos indivíduos vivos durante as simulações para os verões e invernos, estão apresentadas nas Figuras 4.12 e 4.13, que apresenta os resultados das simulações utilizando os limites de tolerância atual de temperatura, e cenário com aclimatação, em que os organismos toleram até 3°C acima dos limites atuais.

Figura 4.12: Padrão de dispersão de ovos e larvas do Ichthyop, para os (a) verões e (b) invernos das simulações horárias, para o cenário com temperatura de tolerância atual.

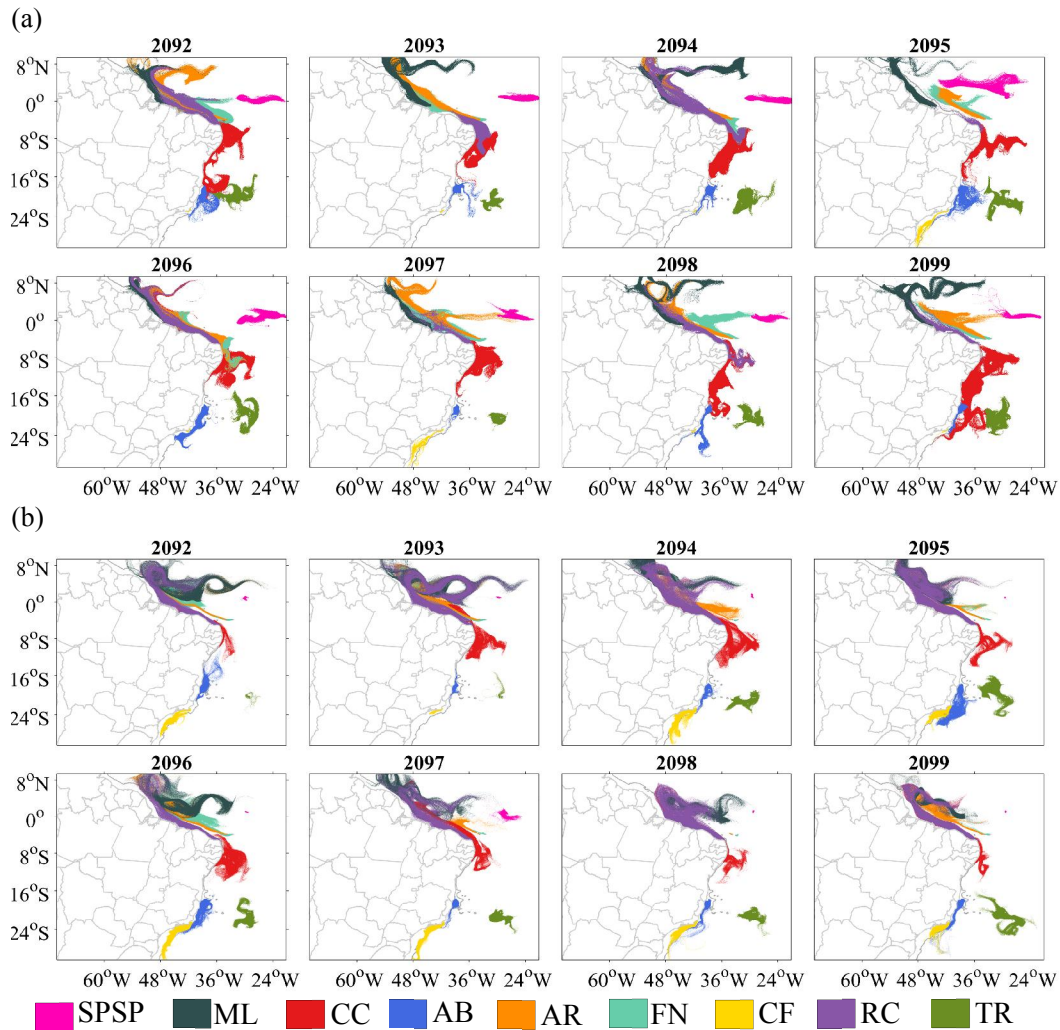


Onde: SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; CC – Costa dos Corais; AB – Abrolhos; AR – Atol das Rocas; FN – Fernando de Noronha; CF – Cabo Frio; RC – Recife de Corais; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz

Fonte: Produção do autor.

Percebe-se que no cenário em que a temperatura de tolerância permanece com os limites atuais, a sobrevivência dos organismos se dá principalmente nas UCMs mais distantes do equador. A temperatura da água do mar mais elevada é o fator preponderante para os altos índices de mortalidade nestas simulações. As UCMs ao sul do domínio apresentaram maiores taxas de sobrevivência e dispersão, o que reafirma o definido por Feary et al. (2014), que eleva a importância de zonas temperadas frente ao aumento da temperatura da água do mar.

Figura 4.13: Padrão de dispersão de ovos e larvas do Ichthyop, para os (a)verões e (b) invernos das simulações horárias, para os cenários de aclimatação.



Onde: SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; CC – Costa dos Corais; AB – Abrolhos; AR – Atol das Rocas; FN – Fernando de Noronha; CF – Cabo Frio; RC – Recife de Corais; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz

Fonte: Produção do autor.

Nas proximidades de TR, há maior efeito dos vórtices sobre o movimento das partículas, o que ocasiona o transporte das larvas de forma desordenada, não havendo tendência a percorrer longas distâncias, e influenciando no auto-recrutamento. Entretanto, apesar de indicar maior isolamento, a fauna de TR é semelhante às regiões costeiras, possivelmente devido à presença dos montes submarinos e à hidrodinâmica de seu entorno (GASPARINI; FLOETER, 2001; PINHEIRO et al., 2018). AB apresenta

também influência dos vórtices da região, contudo, provavelmente devido à CB mais intensa, a maioria das partículas tendem a migrar para sul, podendo ser recrutadas por CF, que também é influenciada pela CB.

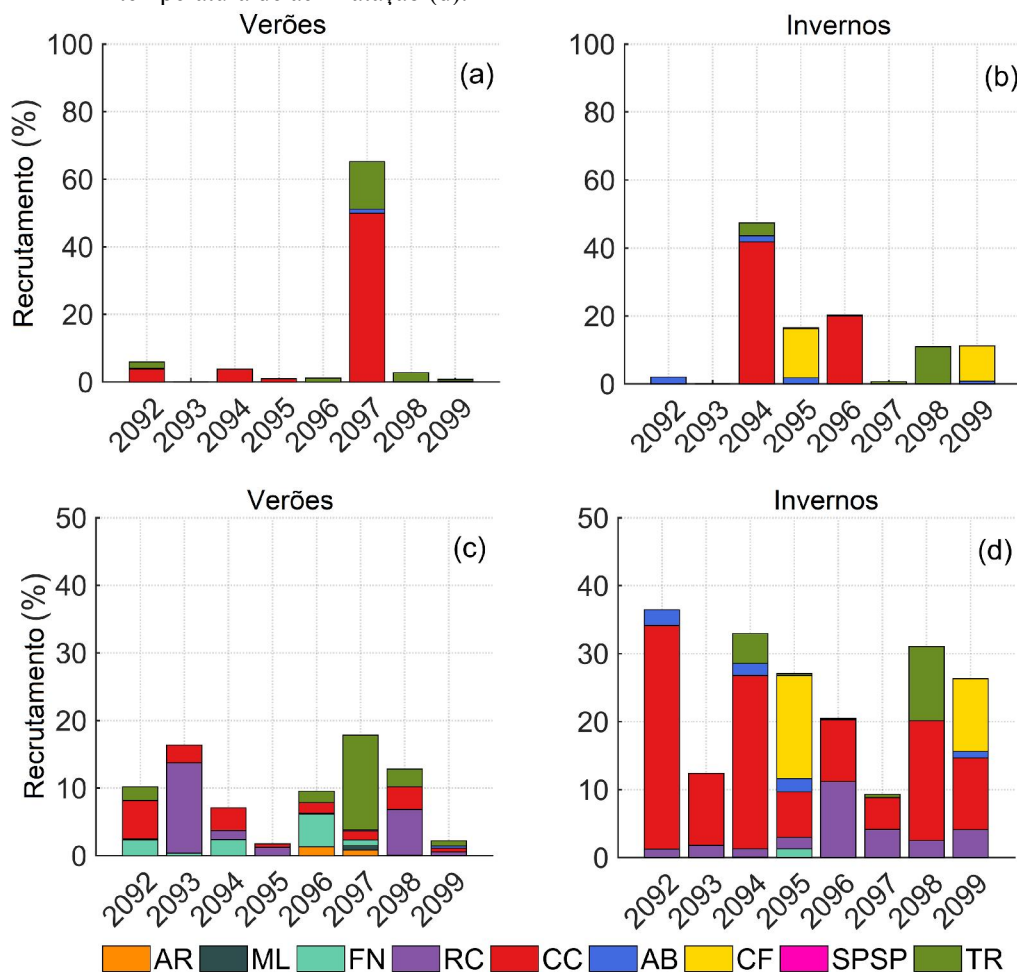
Para os indivíduos lançados de ML, FN, RC, e AR, a CNB apresenta papel preponderante sobre a dispersão. Apesar de ser menos intensa no cenário futuro de mudanças climáticas, a CNB encaminha as partículas em direção a noroeste, até encontrar a CCNE, que encaminha para o sentido leste. Cowen et al. (2003) apresentaram os efeitos da interação entre os vórtices destacados da CNB e a resposta biológica do sistema, medido pelo recrutamento dos peixes de recifes de coral. No geral, seus resultados demonstram que os anéis produzidos pela retroflexão da CNB interferem com a dinâmica do fluxo na costa de Barbados (situado fora do domínio, porém próximo ao limite norte) e inserem uma variabilidade considerável no recrutamento local de peixes recifais. Observa-se bem esse padrão nas simulações, onde as correntes ao norte carregam as partículas para fora do domínio, nos cenários de aclimação. Outro fator a destacar nesta região é a descarga de água doce originada do rio Amazonas, que despeja cerca de $5.5 \times 10^3 \text{ km}^3 \text{ ano}^{-1}$ de água no oceano, exportando para o Atlântico 15 a 20 % de toda carga global levada pelos rios aos oceanos (DAGG et al., 2004; DE PAIVA et al., 2013; OLTMAN et al., 1964), e junto com ela é exportada uma elevada carga de sedimentos, constituindo em um limitante na dispersão dos organismos na região costeira (ROCHA, 2003). Entretanto, o modelo lagrangeano não considerou variações por salinidade ou presença de sedimentos sobre a mortalidade, apenas por diferenças de temperatura.

4.2.3 Recrutamento, auto-recrutamento e conectividade demográfica

O recrutamento resultou maior nos invernos, em que a temperatura se torna mais amena, aumentando a taxa de sobrevivência, e conseqüentemente, a taxa de recrutamento em todas as áreas (Figura 4.14). Observa-se que o ano de 2093 não apresentou nenhum recrutamento no cenário de temperatura de tolerância atual nem no cenário de aclimação, apresentando certa variabilidade interanual. Destacam-se as UCMs ao sul do domínio no cenário sem aclimação (CC, AB CF e TR), elas são as únicas áreas que apresentam recrutamento. Enquanto que, no cenário de aclimação, as partículas

lançadas de UCMs mais a norte sobrevivem e tendem a recrutar, como RC, FN, AR e ML. Os invernos resultaram em maiores taxas de recrutamento, em média, quando comparadas com os verões em todos os cenários, sugerindo maior importância desta estação nos cenários de projeções futuras.

Figura 4.14: Recrutamentos para cada UCM, ao longo dos anos, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimação (d).



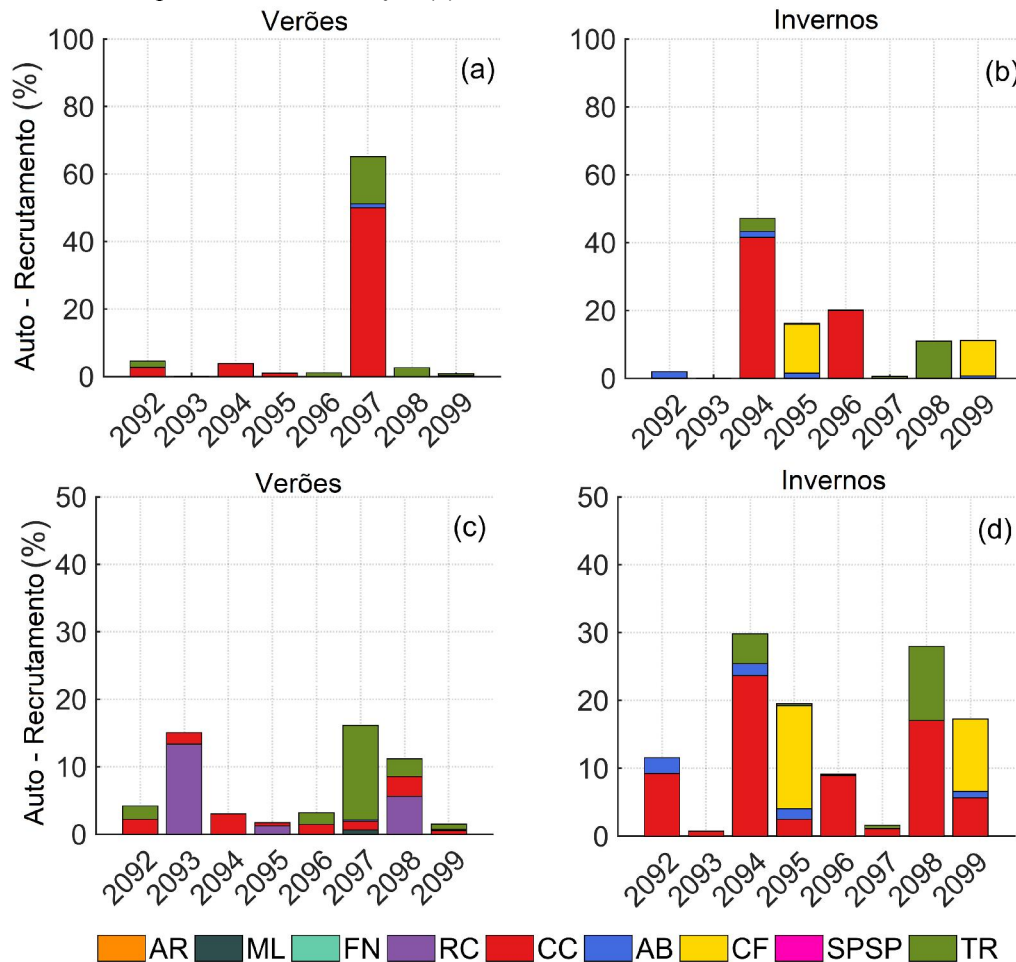
Onde: SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; CC – Costa dos Corais; AB – Abrolhos; AR – Atol das Rocas; FN – Fernando de Noronha; CF – Cabo Frio; RC – Recife de Corais; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz.

Fonte: Produção do autor.

Assim como observado nos gráficos de recrutamento, o ano de 2093 apresenta um comportamento atípico, não havendo organismos auto-recrutados nas UCMs (Figura

4.15). Em contrapartida, nos anos de 2097 (no verão) e 2094 (no inverno), a taxa de auto-recrutamento foi elevada, principalmente para CC.

Figura 4.15: Auto - recrutamentos para cada UCM, ao longo dos anos, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimação (d).



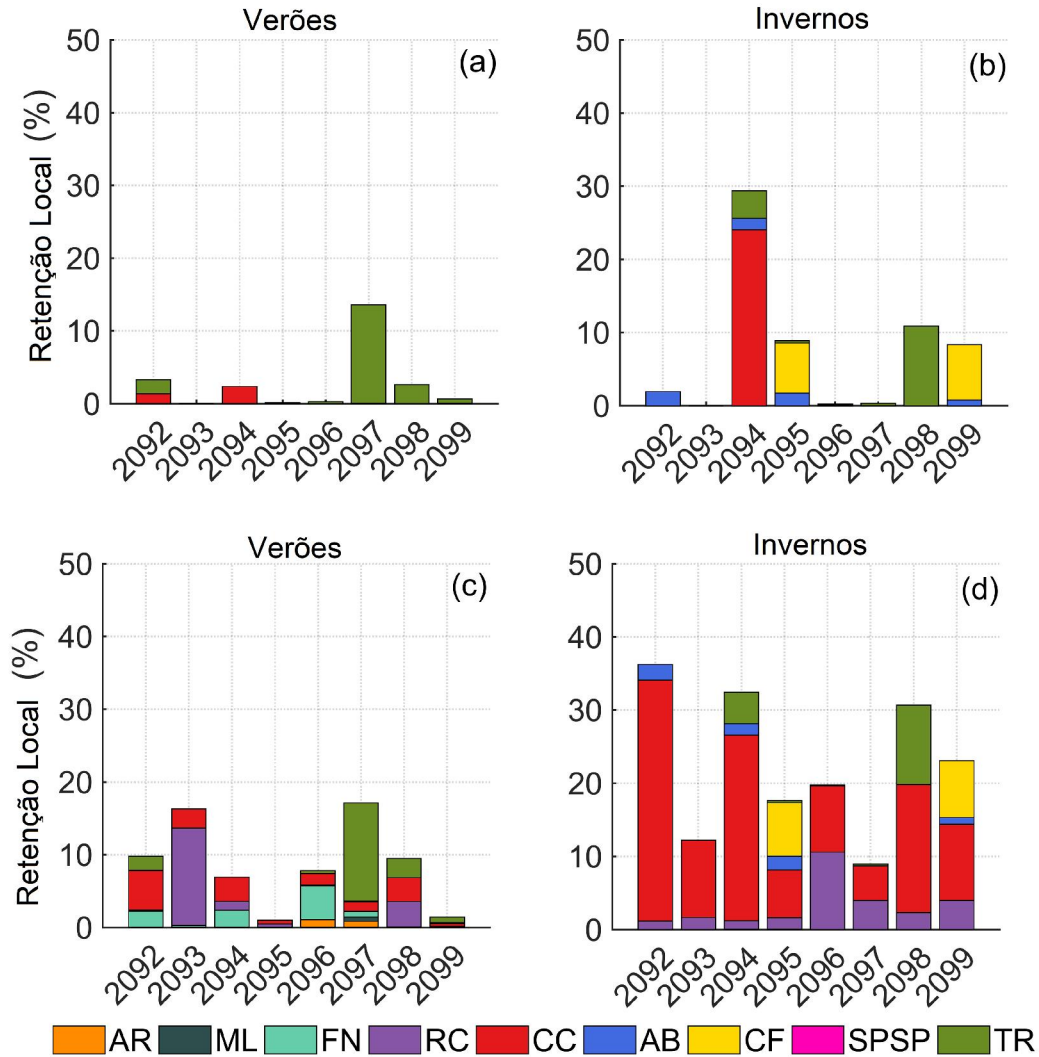
Onde: SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; CC – Costa dos Corais; AB – Abrolhos; AR – Atol das Rocas; FN – Fernando de Noronha; CF – Cabo Frio; RC – Recife de Corais; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz.

Fonte: Produção do autor.

Os valores de retenção local apresentam a taxa de organismos recrutados em função do total lançado desta área (sem a exclusão das partículas mortas), servindo como um indicativo da sua importância relativa. No primeiro cenário, existe apenas retenção local

em TR, AB e CC (no verão, Figura 4.16.a) e AB, CF, CC e TR (no inverno, Figura 4.16.b). Já no segundo cenário aumentam as taxas para FN, TR e RC (Figura 4.16.c, d), sendo estas as que apresentaram maiores taxas, junto com CC.

Figura 4.16: Valores de retenção local para cada UC, para verões considerando a temperatura de tolerância atual (a) e temperatura de aclimação (c); e invernos para os experimentos considerando a temperatura de tolerância atual (b) e temperatura de aclimação (d).



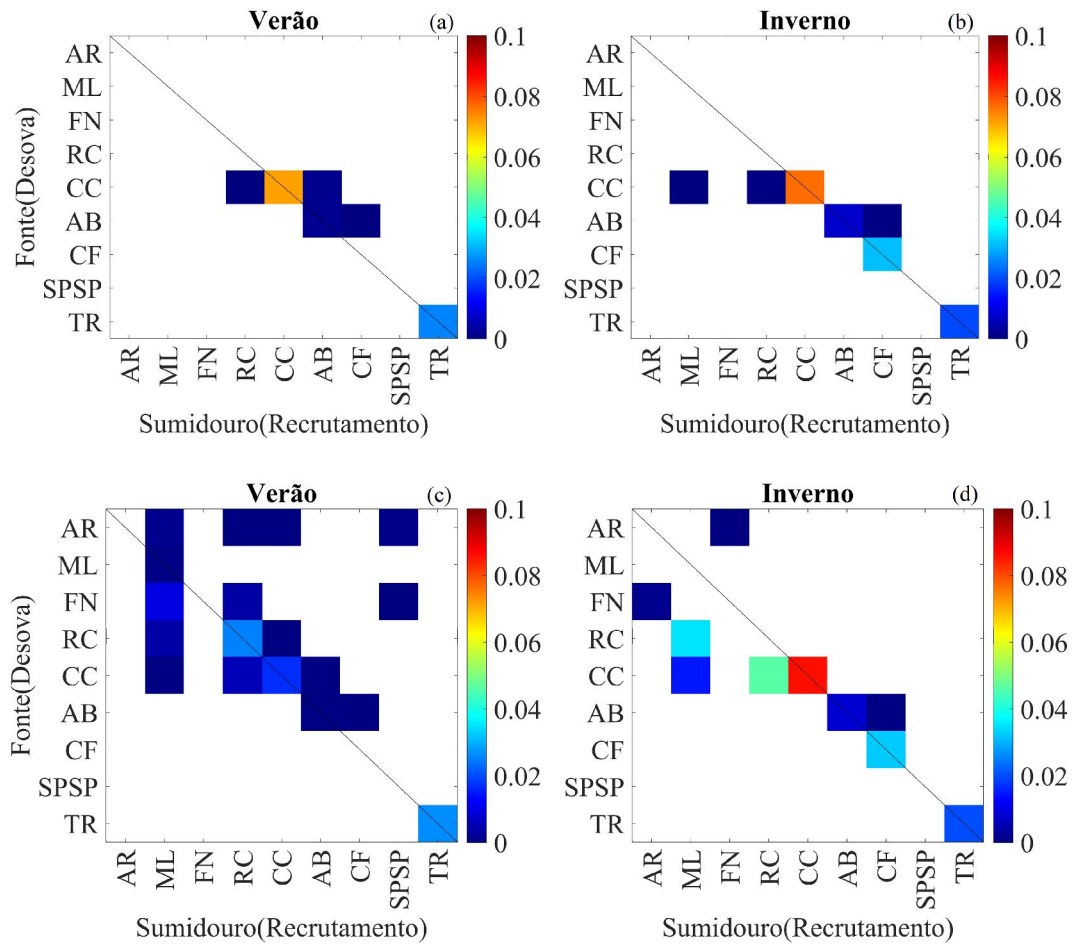
Onde: SPSP – Arquipélago de São Pedro e São Paulo; ML – Parcel Manuel Luíz; CC – Costa dos Corais; AB – Abrolhos; AR – Atol das Rocas; FN – Fernando de Noronha; CF – Cabo Frio; RC – Recife de Corais; TR – Ilhas de Trindade e Martim Vaz.

Fonte: Produção do autor.

A conectividade demográfica entre as UCMs aumenta nos cenários com aclimação em relação ao cenário sem aclimação devido à maior quantidade de sobreviventes (Figura 4.17) e percebe-se que o auto recrutamento em Costa dos Corais, Abrolhos e Trindade ocorre em todos os quatro cenários. CF apresenta auto-recrutamento em ambos cenários, no inverno, quando o processo de ressurgência não está latente, e a região apresenta temperaturas toleráveis pelos organismos-alvo (MASCARENHAS et al., 1971). As regiões mais ao norte do domínio (AR, ML, FN, RC) apresentam conectividade apenas no cenário de aclimação, com exceção de SPSP, que não apresentou recrutamento nem auto-recrutamento em nenhuma das simulações.

Uma área que apresenta importância como fonte de organismos é RC, por ser a região que se apresenta como área fonte para várias áreas: para Fernando de Noronha, Costa dos Corais, e para si própria, em todos os cenários, e Parcel Manuel Manuel Luíz, exceto no verão simulado para temperatura de tolerância atual. A CNB diminui de intensidade no final do século XXI, contudo ainda apresenta altas velocidades, o que explica as maiores distâncias percorridas e o fluxo unificado das partículas desta região. A região central do domínio apresenta maiores níveis de conectividade, possivelmente por esta região estar sob a influência da bifurcação da CSE, que direciona as partículas ora mais para o norte, ora para sul, e da corrente do Brasil, que encaminha as larvas em direção ao sul, conectando as UCMs de AB com CF, por exemplo.

Figura 4.17: Matrizes de transição de probabilidades considerando o cenário de temperatura de tolerância atual no (a) verão e (b) inverno; e considerando o cenário com aclimação dos organismos (+3°C) no (c)verão e (d) inverno.



Fonte: Produção do autor.

A UCM de Trindade apresenta mesmo padrão de auto-recrutamento em todas as simulações, sendo maior no verão. Nos dois invernos simulados, a conectividade foi semelhante, porém, no cenário de aclimação as UCMs de AR, FN e RC, situadas a norte, também contribuíram para a conectividade. Já para os verões, o cenário de aclimação apresentou mais UCMs que se relacionam: AR com ML, RC, CC e SPSP; ML apresenta auto-recrutamento, FN se conecta com ML, RC e SPSP; RC com ML, RC e CC. Todas estas são áreas influenciadas pela posição da bifurcação e CNB. O padrão de conectividade ao sul do domínio segue semelhante no cenário com e sem aclimação, variando apenas a quantidade de recrutas: CC se conecta com RC, CC e

AB; AB se conecta com AB e CF. Observa-se também que o auto-recrutamento é responsável pela maior quantidade de partículas assentadas no final das simulações. O Apêndice C apresenta as MPT para cada um dos anos simulados, percebe-se que há certa variabilidade na conectividade entre os anos, havendo anos em que não apresentou nenhuma conectividade (2093, nos experimentos sem aclimatação), ou conectividade reduzida. Destaca-se também a importância do auto-recrutamento, principalmente nos experimentos sem aclimatação, sendo mais recorrente ao longo dos oito anos simulados.

Embora a quantidade de indivíduos recrutados no verão seja relativamente menor que no inverno, a conectividade demográfica resulta ser maior no verão que no inverno, no experimento de aclimatação. A conectividade tende a aumentar quando comparado com o presente apresentado por Endo (2018), principalmente entre ilhas oceânicas e as UCMs sobre a plataforma, em todos os experimentos realizados neste estudo, mesmo em cenário sem a aclimatação dos peixes. Nos experimentos de Endo (2018), os invernos apresentam conexão demográfica apenas de FN, RC e CC para ML, e de CC para RC, assim como o auto-recrutamento de CC, no verão.

5 SÍNTESE E CONCLUSÕES

A regionalização do modelo HadGEM2-ES para o Oceano Atlântico tropical através do ROMS representou corretamente as feições e processos oceanográficos. Embora o viés negativo da TSM presente no modelo do sistema terrestre HadGEM2-ES tenha se repetido na regionalização, não inviabilizou sua utilização no modelo biológico. Os campos de TSM apresentaram corretamente a temperatura dentro do domínio, apresentando os campos de ressurgência costeira e equatorial, este último com leve deslocamento para leste, devido ao viés negativo presente no modelo HadGEM2-ES. Ao longo da coluna d'água a temperatura apresenta-se coerente quando comparada com os dados das boias do PIRATA. As correntes superficiais no modelo HadGEM2-ES são menos intensas quando comparadas com as do SODA 3.4.2, enquanto que nos resultados da regionalização, apresentam-se mais intensos, provavelmente devido ao aumento da resolução de grade e viés no campo de ventos utilizado como forçante.

As correntes oceânicas são determinantes na dispersão e conexão dos organismos entre as UCMs do Atlântico tropical sul. A CNB, no cenário futuro, apresentou diminuição da magnitude, enquanto que a CB apresentou intensificação, possibilitando a advecção das larvas predominantemente para sul, nas áreas influenciadas por esta. No inverno, há maior isolamento da região norte com a região sul, devido ao deslocamento para sul da biCSE, que encaminha as partículas lançadas de CC predominantemente para noroeste. No verão, as partículas desta UCM tendem a migrar para sul e ser influenciadas pela CB, devido ao deslocamento para norte da biCSE. As UCMs ao norte (AR, ML, FN, RC, SPSP) apresentaram altas taxas de mortalidade no cenário com limites atuais de temperatura de tolerância.

A possibilidade de adaptação dos peixes recifais a temperaturas mais elevadas, permite a expansão da conexão entre as UCMs, no cenário de projeção futura. Porém, isso se deve ao aumento da quantidade de sobreviventes durante as simulações, e deve-se ter precaução quanto à interpretação dos resultados. Parece provável que a aclimação seja preponderante na redução dos impactos do aquecimento global, e aumente as chances de sobrevivência das populações em suas faixas geográficas atuais. No entanto, a aclimação tem limitações e pode não ser suficiente para populações que já vivem

perto de seu máximo térmico, portanto, a adaptação térmica ao longo de várias gerações também será vital.

Os resultados das simulações do MBI demonstraram variabilidade interanual e sazonal, tanto para a mortalidade como para o recrutamento das larvas dentro das UCMs. A mortalidade é maior nos verões que nos invernos, tanto nos cenários utilizando o limite atual de tolerância quanto nos cenários de aclimatação. A aclimatação resultou ser fundamental para a permanência e sobrevivência dos peixes-alvo deste estudo sobre a região equatorial. Nos cenários com os limites atuais de temperatura, as mortes por hipertermia foram preponderantes. Enquanto que nos cenários de aclimatação, mortes por hipotermia foram maiores, porém havendo maiores partículas vivas ao final das simulações.

Devido ao aquecimento dos oceanos, esperam-se extinções regionais, ou adaptações nas condições térmicas, assim como mudanças de alcance de espécies. A migração para latitudes mais altas eleva a importância de regiões temperadas, assim como das UCMs destas regiões. Estudar padrões de evolução e deslocamento de espécies podem ajudar a identificar vias para aumentar a resiliência dos ecossistemas e resultam em ferramentas úteis para auxiliar na geração de estratégias de conservação e políticas de preservação.

Observa-se que a conectividade, assim como o auto-recrutamento, tende a aumentar para o sul, comparado com os resultados determinados para o presente. O auto-recrutamento foi o principal responsável na quantidade de assentamentos no final das simulações. Entretanto, a qualidade dos habitats, a disponibilidade de alimento e a predação não foram levadas em consideração, e podem comprometer a sobrevivência e reprodução destes peixes.

A modelagem biofísica permitiu uma visão abrangente dos efeitos das mudanças climáticas sobre o Oceano Atlântico tropical para os últimos anos do século XXI, considerando o padrão atual de crescimento de emissão de GEE (RCP 8.5). As estimativas de conectividade demográfica apresentadas aqui permitem avaliar os impactos das mudanças climáticas na efetividade das UCMs atuais em conservar a biodiversidade de peixes recifais.

Sugere-se para trabalhos futuros a simulação com outros organismos marinhos fundamentais nas áreas de recife, como por exemplo espécies de corais. Assim como

análises de sensibilidade sobre o período de duração larval, a densidade e abundância de organismos são também análises que complementam o presente estudo. Podem também ser utilizadas as saídas do CMIP6, recentemente disponibilizadas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABATZOGLOU, J. T.; BROWN, T. J. A comparison of statistical downscaling methods suited for wildfire applications. **International Journal of Climatology**, v. 32, n. 5, p. 772–780, 2012.
- ADEY, W. H. Coral reef ecosystems and human health: biodiversity counts! **Ecosystem Health**, v. 6, n. 4, p. 227–236, 2000.
- AFONSO, P.; MORATO, T.; SANTOS, R. S. Spatial patterns in reproductive traits of the temperate parrotfish *Sparisoma cretense*. **Fisheries Research**, v. 90, n. 1–3, p. 92–99, 2008.
- ALEXANDER, M. A. et al. Projected sea surface temperatures over the 21st century: changes in the mean, variability and extremes for large marine ecosystem regions of Northern Oceans. **Elemental Science of the Anthropocene**, v. 6, n. 1, p. 9, 2018.
- AMORIM, F. N. et al. The seasonal circulation of the eastern Brazilian shelf between 10°S and 16°S: a modelling approach. **Continental Shelf Research**, v. 65, p. 121–140, 2013.
- ANGILLETTA JUNIOR., M. J. **Thermal adaptation**. Oxford: Oxford University Press, 2009.
- ANIL, A. C.; KURIAN, J. Influence of food concentration, temperature and salinity on the larval development of *Balanus amphitrite*. **Marine Biology**, v. 127, n. 1, p. 115–124, 1996.
- ARAKAWA, A.; LAMB, V. R. Computational design of the basic dynamical processes of the UCLA General Circulation Model. In: CHANG, J. (Ed.). **Methods in computational physics: advances in research and applications**. Los Angeles: Academic Press, 1977. v. 17p. 173–265.

- BARANGE, M. et al. Modelling the potential impacts of climate change and human activities on the sustainability of marine resources. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, v. 2, n. 5/6, p. 326–333, 2010a.
- BARANGE, M. et al. **Marine ecosystems and global change**. Oxford: Oxford University Press, 2010b.
- BATES, A. E. et al. Distinguishing geographical range shifts from artefacts of detectability and sampling effort. **Diversity and Distributions**, v. 21, n. 1, p. 13–22, 2015.
- BELLWOOD, D. R. What are reef fishes? - comment on the report by D. R. Robertson: do coral-reef fish faunas have a distinctive taxonomic structure? (Coral reefs 17: 179-186). **Coral Reefs**, v. 17, n. 2, p. 187–189, 1998.
- BELLWOOD, D. R.; CHOAT, J. H. A functional analysis of grazing in parrotfishes (family Scaridae): the ecological implications. **Environmental Biology of Fishes**, v. 28, p. 189–214, 1990.
- BENDER, M. G.; FLOETER, S. R.; HANAZAKI, N. Do traditional fishers recognise reef fish species declines? shifting environmental baselines in eastern Brazil. **Fisheries Management and Ecology**, v. 20, n. 1, p. 58–67, 2013.
- BONALDO, R. M. et al. Foraging activity and resource use by three parrotfish species at Fernando de Noronha Archipelago, tropical West Atlantic. **Marine Biology**, v. 149, n. 3, p. 423–433, 2006.
- BRAY, D.; VON STORCH, H. “Prediction” or “Projection”? **Science Communication**, v. 30, n. 4, p. 534–543, 25 jun. 2009.
- BRIGGS, J. C. Marine extinctions and conservation. **Marine Biology**, v. 158, n. 3, p. 485–488, 2011.
- BUNN, N. A.; FOX, C. J.; WEBB, T. A literature review of studies on fish egg mortality: implications for the estimation of spawning stock biomass by the annual egg production method. **Science Series Technical Report**, v. 111, p. 37, 2000.

- BURGESS, S. C. et al. Beyond connectivity: how empirical methods can quantify population persistence to improve marine protected-area design. **Ecological Applications**, v. 24, n. 2, p. 257–270, 2014.
- BYRNE, M. P. et al. Response of the intertropical convergence zone to climate change: location, width, and strength. **Current Climate Change Reports**, v. 4, n. 4, p. 355–370, 2018.
- CAHILL, A. E. et al. How does climate change cause extinction? **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, v. 280, n. 1750, p. 1 - 9, 2012.
- CAROZZA, D. A.; BIANCHI, D.; GALBRAITH, E. D. Metabolic impacts of climate change on marine ecosystems: Implications for fish communities and fisheries. **Global Ecology and Biogeography**, v. 28, n. 2, p. 158–169, 2019.
- CARR, M. H. et al. The central importance of ecological spatial connectivity to effective coastal marine protected areas and to meeting the challenges of climate change in the marine environment. **Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems**, v. 27, n. S1, p. 6–29, 2017.
- CARTON, J. A.; CHEPURIN, G. A.; CHEN, L. SODA3: a new ocean climate reanalysis. **Journal of Climate**, v. 31, n. 17, p. 6967–6983, 2018.
- CASTRO, B. M.; MIRANDA, L. B. Physical oceanography of the western Atlantic continental shelf located between 4°N and 34°S. In: ROBINSON, A. R.; BRINK, K. H. (Eds.). **The sea: the global coastal oceans**. New York: John Wiley & Sons, 1998. p. 209–251.
- CHENG, W.; CHIANG, J. C. H.; ZHANG, D. Atlantic meridional overturning circulation (AMOC) in CMIP5 Models: RCP and historical simulations. **Journal of Climate**, v. 26, n. 18, p. 7187–7197, 2013.
- CHOAT, J. H. The Biology of Herbivorous Fishes on Coral Reefs. In: **The Ecology of Fishes on Coral Reefs**. Elsevier, 1991. p. 120–155.

- CHOAT, J. H.; ROBERTSON, D. R. Protogynous hermaphroditism in fishes of the family Scaridae. In: REINBOTH, R. (Ed.). **Intersexuality in the animal kingdom**. Berlin: Springer, 1975. p. 263–283.
- CINTRA, M. M. **Modelagem matemática da circulação, transporte e dispersão de nutrientes e plâncton no Arquipélago de São Pedro e São Paulo**. 87p. Dissertação (Mestrado em Oceanografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010.
- CIRANO, M. et al. A circulação oceânica de larga-escala na região oeste do Atlântico Sul com base no modelo de circulação Global OCCAM. **Revista Brasileira de Geofísica**, v. 24, n. 2, p. 209–230, 2006.
- COLLINS, M. ; et al. Long-term climate change: projections, commitments and irreversibility. In: STOCKER, T.F.; QIN, D.; PLATTNER, G. K.; TIGNOR, M. M. B.; ALLEN, S. K.; BOSCHUNG, J.; NAUELS, A.; XIA, Y.; BEX, V. P. M. M. (Ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. New York: Cambridge University Press, 2013. p. 1029–1136.
- COLLINS, W. J. et al. **Evaluation of HadGEM2 model**. [S.l.]: Met Office, 2008. 47p. (Haddley Centre Technical Note, 74).
- COLLINS, W. J. et al. Development and evaluation of an Earth-system model – HadGEM2. **Geoscientific Model Development Discussions**, v. 4, n. 2, p. 997–1062, 2011.
- CONOVER, D. O.; KYNARD, B. E. Environmental sex determination: interaction of temperature and genotype in a fish. **Science**, v. 213, n. 4507, p. 577–579, 1981.
- CORREA, I. C. Fisiografia e morfologia das cadeias Vitória-Trindade e Abrolhos. **Pesquisas em Geociências**, v. 7, n. 1, p. 11–21, 1977.
- COUTINHO, P. DA N. Sedimentação na plataforma continental Alagoas-Sergipe. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 21, n. 1–2, p. 1–18, 1981.

COWEN, R. K. et al. Impact of North Brazil current rings on local circulation and coral reef fish recruitment to Barbados, West Indies. In: GONI, G. J.; MALANOTTE-RIZZOLI, P. (Eds.). **Interhemispheric water exchange in the Atlantic Ocean**. [S.l.]: Elsevier Oceanography, 2003. p. 443–462.

COWEN, R. K.; SPONAUGLE, S. Larval Dispersal and Marine Population Connectivity. **Annual Review of Marine Science**, v. 1, n. 1, p. 443–466, 2008.

COWEN, R.; PARIS, C.; SRINIVASAN, A. Scaling of connectivity in marine populations Peer reviewed article. **Science**, v. 311, p. 522–525, 2006.

CROOKS, K. R.; SANJAYAN, M. Connectivity conservation: maintaining connections for nature. In: _____ (Eds.). **Connectivity conservation**. Cambridge: Cambridge University Press, 2006. p. 1–20.

CROWDER, L. B. et al. Source-sink population dynamics and the problem of siting marine reserves. **Bulletin of Marine Science**, v. 66, n. 3, p. 799–820, 2000.

CROWDER, L.; NORSE, E. Essential ecological insights for marine ecosystem-based management and marine spatial planning. **Marine Policy**, v. 32, n. 5, p. 772–778, 2008.

D’AGOSTINI, A.; GHERARDI, D. F. M.; PEZZI, L. P. Connectivity of marine protected areas and its relation with total kinetic energy. **PLoS ONE**, v. 10, n. 10, p. 1–19, 2015.

DAGG, M. et al. Transformation of dissolved and particulate materials on continental shelves influenced by large rivers: Plume processes. **Continental Shelf Research**, v. 24, n. 7–8, p. 833–858, 2004.

DE MOURA, R. L.; DE FIGUEIREDO, J. L.; SAZIMA, I. A new parrotfish (Scaridae) from Brazil, and revalidation of *Sparisoma amplum* (Ranzani, 1842), *Sparisoma frondosum* (Agassiz, 1831), *Sparisoma axillare* (Steindachner, 1878) and *Scarus trispinosus* Valenciennes, 1840. **Bulletin of Marine Science**, v. 68, n. 3, p. 505–524, 2001.

- DE PAIVA, R. C. D. et al. Large-scale hydrologic and hydrodynamic modeling of the Amazon River basin. **Water Resources Research**, v. 49, n. 3, p. 1226–1243, 2013.
- DEANGELIS, D. L.; MOOIJ, W. M. Individual-based modeling of ecological and evolutionary processes. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 36, n. 1, p. 147–168, 2005.
- DIAS, D. F. et al. Modeling the spawning strategies and larval survival of the Brazilian sardine (*Sardinella brasiliensis*). **Progress in Oceanography**, v. 123, p. 38–53, 2014.
- DIDDEN, N.; SCHOTT, F. Eddies in the North Brazil Current retroflexion region observed by Geosat altimetry. **Journal of Geophysical Research**, v. 98, n. C11, p. 20121, 1993.
- DONELSON, J. et al. Effects of elevated water temperature and food availability on the reproductive performance of a coral reef fish. **Marine Ecology Progress Series**, v. 401, p. 233–243, 2010.
- DONELSON, J. M. et al. Acclimation to predicted ocean warming through developmental plasticity in a tropical reef fish. **Global Change Biology**, v. 17, n. 4, p. 1712–1719, 2011.
- DONELSON, J. M. et al. Rapid transgenerational acclimation of a tropical reef fish to climate change. **Nature Climate Change**, v. 2, n. 1, p. 30–32, 2012.
- DONELSON, J. M.; MCCORMICK, M. I.; MUNDAY, P. L. Parental condition affects early life-history of a coral reef fish. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 360, n. 2, p. 109–116, 2008.
- DONEY, S. C. et al. Climate change impacts on marine ecosystems. **Annual Review of Marine Science**, v. 4, n. 1, p. 11–37, 2012.
- ENDO, C. A. K. **Determinação da conectividade ecológica entre as ilhas oceânicas brasileiras e a plataforma continental norte e leste do Brasil**. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2018.

- FAO. **FAO Yearbook. Fishery and Aquaculture Statistics 2016**. FAO, 2018.
- FEARY, D. A. et al. Latitudinal shifts in coral reef fishes: why some species do and others do not shift. **Fish and Fisheries**, v. 15, n. 4, p. 593–615, 2014.
- FEITOZA, B. M.; ROSA, R. S.; ROCHA, L. A. Ecology and zoogeography of deep-reef fishes in northeastern Brazil. **Bulletin of Marine Science**, v. 76, n. 3, p. 725–742, 2005.
- FERNÁNDEZ-PALACIOS, J. M. et al. Towards a glacial-sensitive model of island biogeography. **Global Ecology and Biogeography**, v. 25, n. 7, p. 817–830, 2016.
- FLATO, G. et al. Evaluation of Climate Models. **Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**, p. 741–866, 2013.
- FLOETER, S. R. et al. Atlantic reef fish biogeography and evolution. **Journal of Biogeography**, v. 35, n. 1, p. 22–47, 2008.
- FLOETER, S. R.; HALPERN, B. S.; FERREIRA, C. E. L. Effects of fishing and protection on Brazilian reef fishes. **Biological Conservation**, v. 128, n. 3, p. 391–402, 2006.
- FOWLER, H. J.; BLENKINSOP, S.; TEBALDI, C. Linking climate change modelling to impacts studies: recent advances in downscaling techniques for hydrological modelling. **International Journal of Climatology**, v. 27, n. 12, p. 1547–1578, 2007.
- FRANCINI-FILHO, R. B. et al. Live coral predation by parrotfishes (Perciformes: Scaridae) in the Abrolhos Bank, eastern Brazil, with comments on the classification of species into functional groups. **Neotropical Ichthyology**, v. 6, n. 2, p. 191–200, 2008.
- FRANKHAM, R. Do island populations have less genetic variation than mainland populations? **Heredity**, v. 78, n. 3, p. 311–327, 1997.
- FREE, C. M. et al. Impacts of historical warming on marine fisheries production. **Science**, v. 363, n. 6430, p. 979–983, 2019.

GAGLIANO, M.; MCCORMICK, M. I.; MEEKAN, M. G. Temperature-induced shifts in selective pressure at a critical developmental transition. **Oecologia**, v. 152, n. 2, p. 219–225, 2007.

GANACHAUD, A. Large-scale mass transports, water mass formation, and diffusivities estimated from World Ocean Circulation Experiment (WOCE) hydrographic data. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C7, p. 3213, 2003.

GARZOLI, S. L.; MATANO, R. The South Atlantic and the Atlantic Meridional Overturning Circulation. **Deep-Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography**, v. 58, n. 17–18, p. 1837–1847, 2011.

GASPARINI, J. L.; FLOETER, S. R. The shore fishes of Trindade Island, western South Atlantic. **Journal of Natural History**, v. 35, n. 11, p. 1639–1656, 2001.

GASPARINI, J. L.; JOYEUX, J.-C.; FLOETER, S. R. *Sparisoma tuiupiranga*, a new species of parrotfish (Perciformes: Labroidae: Scaridae) from Brazil, with comments on the evolution of the genus. **Zootaxa**, v. 384, p. 1–14, 2003.

GERBER, L. R. et al. Climate change impacts on connectivity in the ocean: Implications for conservation. **Ecosphere**, v. 5, n. 3, p. 1 - 18, 2014.

GOES, E. R.; FERREIRA JÚNIOR, A. V. Caracterização morfossedimentar da plataforma continental brasileira. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 10, n. 5, p. 1595, 2017.

GOES, M. et al. Retroreflections of the North Brazil Current during February 2002. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, v. 52, n. 4, p. 647–667, 2005.

GOUVEIA, M. B. et al. Do the Brazilian sardine commercial landings respond to local ocean circulation? **PLoS ONE**, v. 12, n. 5, 2017.

GVOŽDÍK, L.; PUKY, M.; ŠUGERKOVÁ, M. Acclimation is beneficial at extreme test temperatures in the Danube crested newt, *Triturus dobrogicus* (Caudata, Salamandridae). **Biological Journal of the Linnean Society**, v. 90, n. 4, p. 627–636, 2007.

- HAIDVOGEL, D. B. et al. Ocean forecasting in terrain-following coordinates: formulation and skill assessment of the Regional Ocean Modeling System. **Journal of Computational Physics**, v. 227, n. 7, p. 3595–3624, 2008.
- HANSEN, J.; SATO, M.; RUEDY, R. Radiative forcing and climate response. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 102, n. D6, p. 6831–6864, 1997.
- HARLEY, C. D. G. et al. The impacts of climate change in coastal marine systems. **Ecology Letters**, v. 9, n. 2, p. 228–241, 2006.
- HARNIK, P. G. et al. Extinctions in ancient and modern seas. **Trends in Ecology & Evolution**, v. 27, n. 11, p. 608–617, 2012.
- HAWKINS, J. P.; ROBERTS, C. M. Effects of fishing on sex-changing Caribbean parrotfishes. **Biological Conservation**, v. 115, n. 2, p. 213–226, 2004.
- HINRICHSEN, H. H. et al. Evaluating the suitability of coupled biophysical models for fishery management. **ICES Journal of Marine Science**, v. 68, n. 7, p. 1478–1487, 2011.
- HOEGH-GULDBERG, O. et al. Coral Reefs Under Rapid Climate Change and Ocean Acidification. **Science**, v. 318, n. 5857, p. 1737–1742, 2007.
- HOEGH-GULDBERG, O.; BRUNO, J. F. The Impact of Climate Change on the World's Marine Ecosystems. **Science**, v. 328, n. 5985, p. 1523–1528, 2010.
- HOEY, A. S.; BONALDO, R. M. **Biology of Parrotfishes**: Florida: CRC Press, 2018.
- HOLT, T. J. et al. **Biogenic Reefs (volume IX). An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs**. Scottish Association for Marine Science (UKMarine SACs Project), 1998.
- HUEBERT, K. B. **Behavior and transport of pelagic coral reef fish larvae in the straits of Florida**. Tese (Doutorado em Biologia Marinha e Pesca). Universidade de Miami, Flórida, 2009.

HUGHES, T. P. et al. Coral reefs in the Anthropocene. **Nature**, v. 546, n. 7656, p. 82–90, 2017.

HUGHES, T. P. et al. Global warming transforms coral reef assemblages. **Nature**, v. 556, n. 7702, p. 492–496, 2018.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. **Climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability: contribution of working group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change**. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE - IPCC. Near-term Climate Change: Projections and Predictability. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). . **Climate Change 2013 - The Physical Science Basis**. Cambridge: Cambridge University Press, 2013. p. 953–1028.

INTERNATIONAL UNION FOR CONSERVATION OF NATURE - IUCN. **Issue brief: the ocean and climate change**. Gland:IUCN, 2017. Disponível em: <https://www.iucn.org/sites/dev/files/the_ocean_and_climate_change_issues_brief.pdf> . Acesso em: 19 fev. 2019.

ISLAM, M. A. A comparative study on numerical solutions of Initial Value Problems (IVP) for Ordinary Differential Equations (ODE) with Euler and Runge Kutta methods. **American Journal of Computational Mathematics**, v.5, n.3, p. 393–404, 2015.

IWASA, Y. Sex change evolution and cost of reproduction. **Behavioral Ecology**, v. 2, n. 1, p. 56–68, 1991.

JONES, C. D. et al. The HadGEM2-ES implementation of CMIP5 centennial simulations. **Geoscientific Model Development**, v. 4, n. 3, p. 543–570, 2011.

JONES, G. P. et al. Larval retention and connectivity among populations of corals and reef fishes: History, advances and challenges. **Coral Reefs**, v. 28, n. 2, p. 307–325, 2009.

KJELLSSON, J. Weakening of the global atmospheric circulation with global warming. **Climate Dynamics**, v. 45, n. 3–4, p. 975–988, 2015.

KLEYPAS, J. A. K. A. Climate change and tropical marine ecosystems: A review with an emphasis on coral reefs. **UNED Research Journal**, v. 11, n. 1, p. S24–S35, 2019.

KRITZER, J. P.; SALE, P. F. The Metapopulation Ecology of Coral Reef Fishes. In: KRITZER, J. P.; SALE, P. F. (Eds.). **Marine Metapopulations**. Elsevier, 2006. p. 31–67.

KROEKER, K. J. et al. Impacts of ocean acidification on marine organisms: quantifying sensitivities and interaction with warming. **Global change biology**, v. 19, n. 6, p. 1884–96, 2013.

LEIS, J. Behaviour as input for modelling dispersal of fish larvae: behaviour, biogeography, hydrodynamics, ontogeny, physiology and phylogeny meet hydrography. **Marine Ecology Progress Series**, v. 347, n. 2003, p. 185–193, 2007.

LESSA, R. et al. Demography of the Agassiz's parrotfish *Sparisoma frondosum* (Agassiz, 1831) in north-eastern Brazil. **Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom**, v. 96, n. 5, p. 1157–1166, 2016.

LETT, C. et al. Biophysical modelling to investigate the effects of climate change on marine population dispersal and connectivity. **Progress in Oceanography**, v. 87, n. 1–4, p. 106–113, 2010.

LETT, C.; ROSE, K. A.; MEGREY, B. A. Biophysical models. In: CHECKLEY, D. et al. (Eds.). **Climate Change and Small Pelagic Fish**. Cambridge: Cambridge University Press, 2009. p. 88–111.

LIN, J.-L. The Double-ITCZ problem in IPCC AR4 coupled GCMs: ocean–atmosphere feedback analysis. **Journal of Climate**, v. 20, n. 18, p. 4497–4525, 2007.

LUIZ, O. J. et al. Adult and larval traits as determinants of geographic range size among tropical reef fishes. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 110, n. 41, p. 16498–16502, 2013.

LUMPKIN, R.; SPEER, K. Large-scale vertical and horizontal circulation in the North Atlantic Ocean. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, n. 9, p. 1902–1920, 2003.

LUNDBERG, J.; MOBERG, F. Mobile link organisms and ecosystem functioning: implications for ecosystem resilience and management. **Ecosystems**, v. 6, n. 1, p. 87–98, 2003.

LYNNE, D. et al. Observations: ocean pages. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). **Climate change 2013: the physical science basis**. Geneva: IPCC, 2013. p. 255–316.

MADEIRA, C. et al. Thermal stress, thermal safety margins and acclimation capacity in tropical shallow waters—An experimental approach testing multiple end-points in two common fish. **Ecological Indicators**, v. 81, n. May, p. 146–158, 2017.

MARAUN, D. et al. Towards process-informed bias correction of climate change simulations. **Nature Climate Change**, v. 7, n. 11, p. 764–773, 2017.

MASCARENHAS, A. S.; MIRANDA, L. B.; ROCK, N. J. A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio. In: COSTLOW JR, J. D. (Ed.). **Fertility of the sea**. New York: Gordon and Breach Science, 1971. p. 285–295.

MAZZEI, E. F. et al. Parrotfishes of the genus *Scarus* in southwestern Atlantic oceanic reef environments: occasional pulse or initial colonization? **Marine Biodiversity**, v. 49, n. 1, p. 555–561, 2017.

MCGUFFIE, K.; HENDERSON-SELLERS, A. **A climate modelling primer**. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2005. v. 1

MCLEOD, E. et al. Designing marine protected area networks to address the impacts of climate change. **Frontiers in Ecology and the Environment**, v. 7, n. 7, p. 362–370, 2009.

MCLEOD, I. M. et al. Latitudinal variation in larval development of coral reef fishes: Implications of a warming ocean. **Marine Ecology Progress Series**, v. 521, p. 129–141, 2015.

MEEHL, G. A. et al. Overview of the coupled model intercomparison project. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 86, n. 1, p. 89–93, 2005.

MEEHL, G. A. et al. Decadal prediction. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 90, n. 10, p. 1467–1486, 2009.

MEINSHAUSEN, M. et al. The RCP greenhouse gas concentrations and their extensions from 1765 to 2300. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 213–241, 2011.

MENDES, T. C.; CORDEIRO, C. A. M. M.; FERREIRA, C. E. L. An experimental evaluation of macroalgal consumption and selectivity by nominally herbivorous fishes on subtropical rocky reefs. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 471, p. 146–152, 2015.

MILLER, T. J. Contribution of individual-based coupled physical-biological models to understanding recruitment in marine fish populations. **Marine Ecology Progress Series**, v. 347, n. 1995, p. 127–138, 2007.

MORA, C.; SALE, P. F. Ongoing global biodiversity loss and the need to move beyond protected areas: A review of the technical and practical shortcomings of protected areas on land and sea. **Marine Ecology Progress Series**, v. 434, p. 251–266, 2011.

MOSS, R. H. et al. The next generation of scenarios for climate change research and assessment. **Nature**, v. 463, n. 7282, p. 747–756, 2010.

MOURA, R.; FIGUEIREDO, J. L.; SAZIM, I. A new parrotfish (Scaridae) from Brazil, and revalidation of *Sparisoma amplum* (Ranzani, 1842), *Sparisoma frondosum* (Agassiz, 1831), *Sparisoma axillare* (Steindachner, 1878) and *Scarus trispinosus* Valenciennes, 1840. **Bulletin of Marine Science**, v. 68, n. 3, p. 505–524, 2001.

MUNDAY, P. L. et al. Climate change and the future for coral reef fishes. **Fish and Fisheries**, v. 9, n. 3, p. 261–285, 2008a.

MUNDAY, P. L. et al. Elevated temperature restricts growth potential of the coral reef fish *Acanthochromis polyacanthus*. **Coral Reefs**, v. 27, n. 4, p. 927–931, 2008b.

MUNDAY, P. L. et al. Climate change and coral reef connectivity. **Coral Reefs**, v. 28, n. 2, p. 379–395, 2009.

MUNDAY, P. L. et al. Predicting evolutionary responses to climate change in the sea. **Ecology Letters**, v. 16, n. 12, p. 1488–1500, 2013.

MUNDAY, P. L.; MCCORMICK, M. I.; NILSSON, G. E. Impact of global warming and rising CO₂ levels on coral reef fishes: what hope for the future? **Journal of Experimental Biology**, v. 215, n. 22, p. 3865–3873, 2012.

MUNRO, J. L. Epilogue: progress in coral reef fisheries research: 1973-1982. In: (Ed.). **Caribbean coral reef fishery resources**. Manila: Iclarm, 1983. p. 249-265.

NILSSON, G. E. et al. Elevated temperature reduces the respiratory scope of coral reef fishes. **Global Change Biology**, v. 15, n. 6, p. 1405–1412, 2009.

O’CONNOR, M. I. et al. Temperature control of larval dispersal and the implications for marine ecology, evolution, and conservation. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 104, n. 4, p. 1266–1271, 2007.

OLSON, D. B. et al. Temporal variations in the separation of Brazil and Malvinas currents. **Deep Sea Research Part A, Oceanographic Research Papers**, v. 35, n. 12, p. 1971–1990, 1988.

OLTMAN, R. E. et al. **Amazon river investigations, reconnaissance, measurements of july 1963**. Washington Geological Survey of the United States Department of the Interior, 1964.

OSPINA-ALVAREZ, A. et al. MPA network design based on graph network theory and emergent properties of larval dispersal **ArXiv**, 2019. Disponível em: <https://arxiv.org/abs/1902.03977>.

PARIS, C. B.; CHÉRUBIN, L. M.; COWEN, R. K. Surfing, spinning, or diving from reef to reef: effects on population connectivity. **Marine Ecology Progress Series**, v. 347, p. 285–300, 2007.

- PARMESAN, C. Ecological and evolutionary responses to recent climate change. **Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics**, v. 37, n. 1, p. 637–669, 2006.
- PELIZ, A. et al. A study of crab larvae dispersal on the Western Iberian Shelf: physical processes. **Journal of Marine Systems**, v. 68, n. 1–2, p. 215–236, 2007.
- PETERSON, R. G.; STRAMMA, L. Upper-level circulation in the South-Atlantic Ocean. **Progress In Oceanography**, v. 26, n. 1, p. 1–73, 1991.
- PETERSON, R. H.; MARTIN-ROBICHAUD, D. J.; BERGE, O. Influence of temperature and salinity on length and yolk utilization of striped bass larvae. **Aquaculture International**, v. 4, n. 2, p. 89–103, 1996.
- PINHEIRO, H. T. et al. Island biogeography of marine organisms. **Nature**, v. 549, n. 7670, p. 82–85, 2017.
- PINHEIRO, H. T. et al. South-western Atlantic reef fishes: Zoogeographical patterns and ecological drivers reveal a secondary biodiversity centre in the Atlantic Ocean. **Diversity and Distributions**, v. 24, n. 7, p. 951–965, 2018.
- POLOCZANSKA, E. S. et al. Global imprint of climate change on marine life. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 10, p. 919–925, 2013.
- PONTES, G. M.; SEN GUPTA, A.; TASCETTO, A. S. Projected changes to South Atlantic boundary currents and confluence region in the CMIP5 models: the role of wind and deep ocean changes. **Environmental Research Letters**, v. 11, n. 9, p. 094013, 2016.
- PÖRTNER, H. O. et al. Ocean systems. In: INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (Ed.). **Climate change 2014: impacts, adaptation and vulnerability: part A: global and sectoral aspects**. Geneva: IPCC, 2015. p. 411–484.
- PULLIAM, H. R. Sources, Sinks, and Population Regulation. **The American Naturalist**, v. 132, n. 5, p. 652–661, 1988.

RAMANATHAN, V.; COLLINS, W. Thermodynamic regulation of ocean warming by cirrus clouds deduced from observations of the 1987 El Niño. **Nature**, v. 351, n. 6321, p. 27–32, 1991.

RANDALL, J. E.; RANDALL, H. A. The spawning and early development of the Atlantic parrot fish, *Sparisoma rubripinne*, with notes on other scarid and labrid fishes. **Zoologica**, v. 48, n. 5, p. 49–60, 1963.

REID, J. L. On the total geostrophic circulation of the South Atlantic Ocean: Flow patterns, tracers, and transports. **Progress in Oceanography**, v. 23, n. 3, p. 149–244, 1989.

RIAHI, K. et al. RCP 8.5-A scenario of comparatively high greenhouse gas emissions. **Climatic Change**, v. 109, n. 1, p. 33–57, 2011.

RICHTER, I. et al. Tropical Atlantic biases and their relation to surface wind stress and terrestrial precipitation. **Climate Dynamics**, v. 38, n. 5–6, p. 985–1001, 2012.

RICHTER, I. et al. Equatorial Atlantic variability and its relation to mean state biases in CMIP5. **Climate Dynamics**, v. 42, n. 1–2, p. 171–188, 2014a.

RICHTER, I. et al. What controls equatorial Atlantic winds in boreal spring? **Climate Dynamics**, v. 43, n. 11, p. 3091–3104, 2014b.

RICHTER, I. et al. An overview of coupled GCM biases in the tropics. **Indo-Pacific Climate Variability and Predictability**, p. 213–263, 2016.

RILOV, G. et al. Adaptive marine conservation planning in the face of climate change: what can we learn from physiological, ecological and genetic studies? **Global Ecology and Conservation**, v. 17, e00566, 2019.

ROBERTSON, D. R. Egg size in relation to fertilization dynamics in free-spawning tropical reef fishes. **Oecologia**, v. 108, n. 1, p. 95–104, 1996.

ROBERTSON, R. D. et al. Mechanisms of speciation and faunal enrichment in Atlantic parrotfishes. **Molecular Phylogenetics and Evolution**, v. 40, n. 3, p. 795–807, 2006.

- ROCHA, L. A. Patterns of distribution and processes of speciation in Brazilian reef fishes. **Journal of Biogeography**, v. 30, n. 8, p. 1161–1171, 2003.
- RODRIGUES, R. R.; ROTHSTEIN, L. M.; WIMBUSH, M. Seasonal variability of the South Equatorial Current Bifurcation in the Atlantic Ocean: a numerical study. **Journal of Physical Oceanography**, v. 37, n. 1, p. 16–30, 2007.
- RUDORFF, C. A. G. et al. Modeling spiny lobster larval dispersion in the Tropical Atlantic. **Fisheries Research**, v. 96, n. 2–3, p. 206–215, 2009.
- RUTTENBERG, B. I. et al. Patterns, causes and consequences of regional variation in the ecology and life history of a reef fish. **Oecologia**, v. 145, n. 3, p. 394–403, 2005.
- SALE, P. F. Reef fish communities: open nonequilibrium systems. In: SALE, P. F. (Ed.). **The ecology of fishes on coral reefs**. Durham: Elsevier, 1991. p. 564–598.
- SCHRECK, C. B. Stress and fish reproduction: The roles of allostasis and hormesis. **General and Comparative Endocrinology**, v. 165, n. 3, p. 549–556, 2010.
- SEAGER, R.; NAIK, N.; VECCHI, G. A. Thermodynamic and dynamic mechanisms for large-scale changes in the hydrological cycle in response to global warming. **Journal of Climate**, v. 23, n. 17, p. 4651–4668, 2010.
- SERAFINI, T. Z.; FRANÇA, G. B. DE; ANDRIGUETTO-FILHO, J. M. Ilhas oceânicas brasileiras: biodiversidade conhecida e sua relação com o histórico de uso e ocupação humana. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 10, n. 3, p. 281–301, 2010.
- SHCHEPETKIN, A. F. A method for computing horizontal pressure-gradient force in an oceanic model with a nonaligned vertical coordinate. **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. C3, p. 3090, 2003.
- SHCHEPETKIN, A. F.; MCWILLIAMS, J. C. The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model. **Ocean Modelling**, v. 9, n. 4, p. 347–404, 2005.

- SILVEIRA, I. C. A. DA et al. A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. **Revista Brasileira de Oceanografia**, v. 48, n. 2, p. 171–183, 2000.
- SOUTELINO, R. G. et al. Is the Brazil current eddy-dominated to the north of 20°S? **Geophysical Research Letters**, v. 38, n. 3, p. 1–5, 2011.
- SOUTELINO, R. G.; MIRANDA, J. A. A semi-idealized study to evaluate the role of topography on the coastal upwelling at Cabo Frio, RJ. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 7, n. 1, p. 101–114, 2013.
- SOUZA, C. S.; BARREIRO, A. S.; MAFALDA JUNIOR., P. O. Padrões espaciais e temporais de larvas de Scaridae (Pisces: Perciformes) no nordeste do Brasil e suas relações com os fatores oceanográficos. **Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology**, v. 14, n. 2, p. 1–11, 2010.
- SPALDING, M. D. et al. Marine ecoregions of the world: a bioregionalization of coastal and shelf areas. **BioScience**, v. 57, n. 7, p. 573–583, 2007.
- SPONAUGLE, S.; BOULAY, J.; RANKIN, T. Growth- and size-selective mortality in pelagic -larvae of a common reef fish. **Aquatic Biology**, v. 13, n. 3, p. 263–273, 2011.
- SPONAUGLE, S.; GRORUD-COLVERT, K.; PINKARD, D. Temperature-mediated variation in early life history traits and recruitment success of the coral reef fish *Thalassoma bifasciatum* in the Florida Keys. **Marine Ecology Progress Series**, v. 308, p. 1–15, 2006.
- STILLMAN, J. H. Acclimation capacity underlies susceptibility to climate change. **Science**, v. 301, n. 5629, p. 65, 2003.
- STOCK, C. A. et al. On the use of IPCC-class models to assess the impact of climate on Living Marine Resources. **Progress in Oceanography**, v. 88, n. 1/4, p. 1–27, 2011.
- STONER, A. M. K.; HAYHOE, K.; WUEBBLES, D. J. Assessing general circulation model simulations of atmospheric teleconnection patterns. **Journal of Climate**, v. 22, n. 16, p. 4348–4372, 2009.

- STRAIN, E. M. A. et al. A global assessment of the direct and indirect benefits of marine protected areas for coral reef conservation. **Diversity and Distributions**, v. 25, n. 1, p. 9–20, 2019.
- STRAMMA, L.; ENGLAND, M. On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. **Journal of Geophysical Research: Oceans**, v. 104, n. C9, p. 20863–20883, 1999.
- SULLY, S. et al. A global analysis of coral bleaching over the past two decades. **Nature Communications**, v. 10, n. 1264, p. 1 - 5, 2019.
- TALLEY, L. D. Shallow, intermediate, and deep overturning components of the global heat budget. **Journal of Physical Oceanography**, v. 33, n. 3, p. 530–560, 2003.
- TALLEY, L. D. et al. **Descriptive physical oceanography**. 6 ed. Amsterdam: Elsevier, 2011.
- TAYLOR, K. E. Summarizing multiple aspects of model performance in a single diagram. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, v. 106, n. D7, p. 7183–7192, 2001.
- TAYLOR, K. E. et al. **CMIP5 Data Reference Syntax (DRS) and controlled vocabularies**, 2010. Disponível em:
<https://pcmdi.llnl.gov/mips/cmip5/docs/cmip5_data_reference_syntax_v0-25_clean.pdf?id=16>. Acesso em 22 fev. 2019.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An overview of CMIP5 and the experiment design. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 93, n. 4, p. 485–498, 2012.
- TEIXEIRA, C. E. P. et al. The inner shelf circulation on the Abrolhos Bank, 18°S, Brazil. **Continental Shelf Research**, v. 70, p. 13–26, 2013.
- TEWKSBURY, J. J.; HUEY, R. B.; DEUTSCH, C. A. ECOLOGY: Putting the Heat on Tropical Animals. **Science**, v. 320, n. 5881, p. 1296–1297, 2008.

- TOPOR, Z. M. et al. Marine protected areas enhance coral reef functioning by promoting fish biodiversity. **Conservation Letters**, n. e12638, 2019.
- TOSTE, R.; ASSAD, L. P. D. F.; LANDAU, L. Downscaling of the global HadGEM2-ES results to model the future and present-day ocean conditions of the southeastern Brazilian continental shelf. **Climate Dynamics**, v.51, n.1/2, p. 143–159, 2017.
- TRZASKA, S.; SCHNARR, E. **A review of downscaling methods for climate change projections**. Washington: United States Agency for International Development, 2014.
- TSUCHIYA, M.; TALLEY, L. D.; MCCARTNEY, M. S. Water-mass distributions in the western South Atlantic: a section from South Georgia Island (54S) northward across the equator. **Journal of Marine Research**, v. 52, n. 1, p. 55–81, 1994.
- VAN DER KRAAK, G.; PANKHURST, N. W. Temperature effects on the reproductive performance of fish. In: MACDONALD, D. G.; WOOD, C. M. (Eds.). **Global warming implications for freshwater and marine fish**. Cambridge: Society for Experimental Biology Seminar Series, 1997. p. 159–176.
- VAN ROOIJ, J. M. et al. Ontogenetic, social, spatial and seasonal variations in condition of the reef herbivore *Sparisoma viride*. **Marine Biology**, v. 123, n. 2, p. 269–275, 1995.
- VAN ROOIJ, J. M. et al. Resource and habitat sharing by the stoplight parrotfish, *Sparisoma viride*, a Caribbean reef herbivore. **Environmental Biology of Fishes**, v. 47, n. 1, p. 81–91, 1996.
- VECCHI, G. A.; SODEN, B. J. Global warming and the weakening of the tropical circulation. **Journal of Climate**, v. 20, n. 17, p. 4316–4340, 2007.
- VEILLEUX, H. D.; DONELSON, J. M. Reproductive gene expression in a coral reef fish exposed to increasing temperature across generations. **Conservation Physiology**, v. 6, n. 1, p. 1–12, 2018.

VÉRAS, D. P. et al. Biologia reprodutiva do budião-batata, *Sparisoma frondosum* (actinopterygii: Scaridae), capturado na costa central do estado do Pernambuco. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 42, n. 1, p. 40–51, 2009.

WARNER, R. R. Mating Behavior and Hermaphroditism in Coral Reef Fishes: The diverse forms of sexuality found among tropical marine fishes can be viewed as adaptations to their equally diverse mating systems. **American Scientist**, v. 72, n. 2, p. 128–136, 1984.

WRIGHT, S. J.; MULLER-LANDAU, H. C.; SCHIPPER, J. The future of tropical species on a warmer planet. **Conservation Biology**, v. 23, n. 6, p. 1418–1426, 2009.

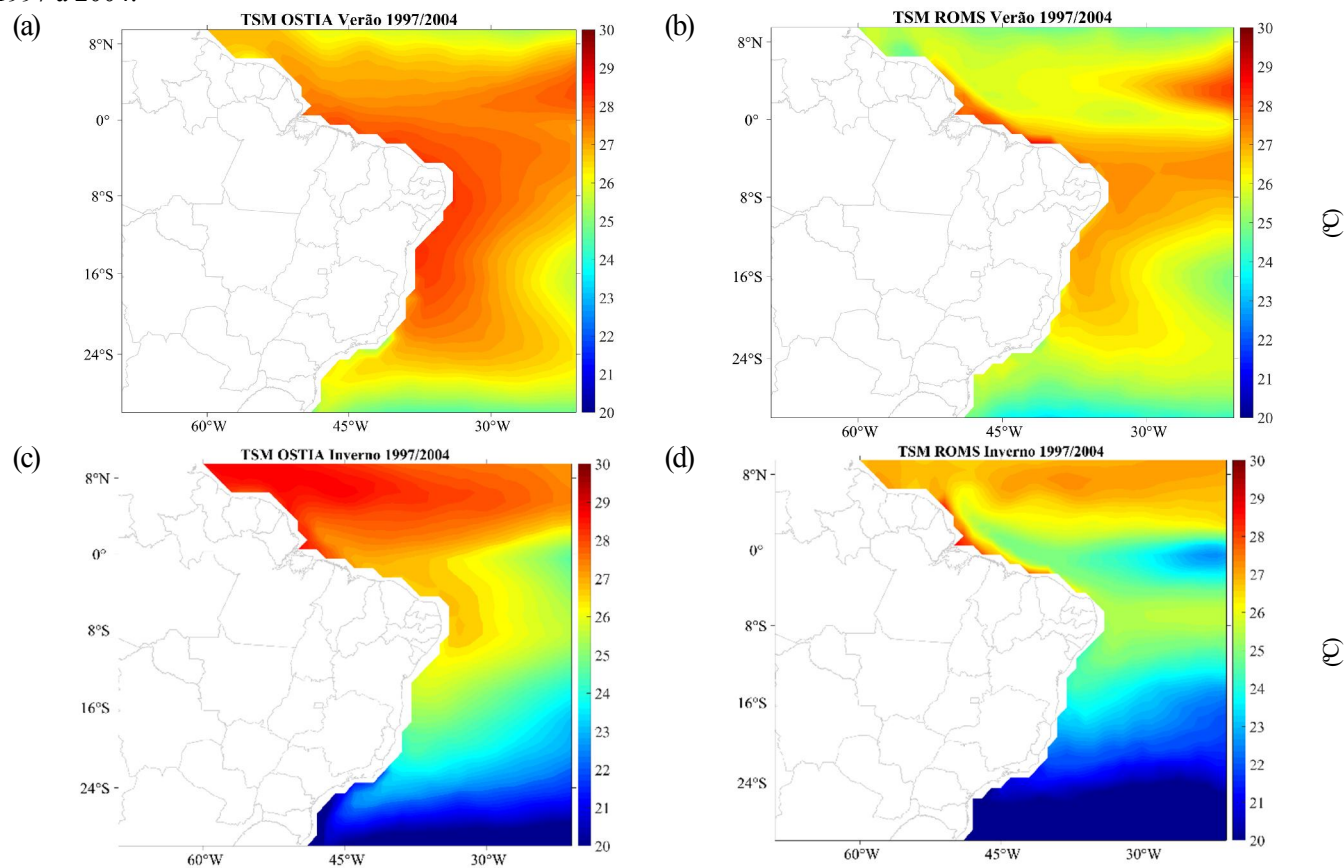
XU, Z. et al. Diagnosing southeast tropical Atlantic SST and ocean circulation biases in the CMIP5 ensemble. **Climate Dynamics**, v. 43, n. 11, p. 3123–3145, 2014.

YANG, J. et al. The role of satellite remote sensing in climate change studies. **Nature Climate Change**, v. 3, n. 10, p. 875–883, 2013.

ZHANG, D. et al. Multidecadal variability of the North Brazil Current and its connection to the Atlantic meridional overturning circulation. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. C4, p. 1–9, 2011.

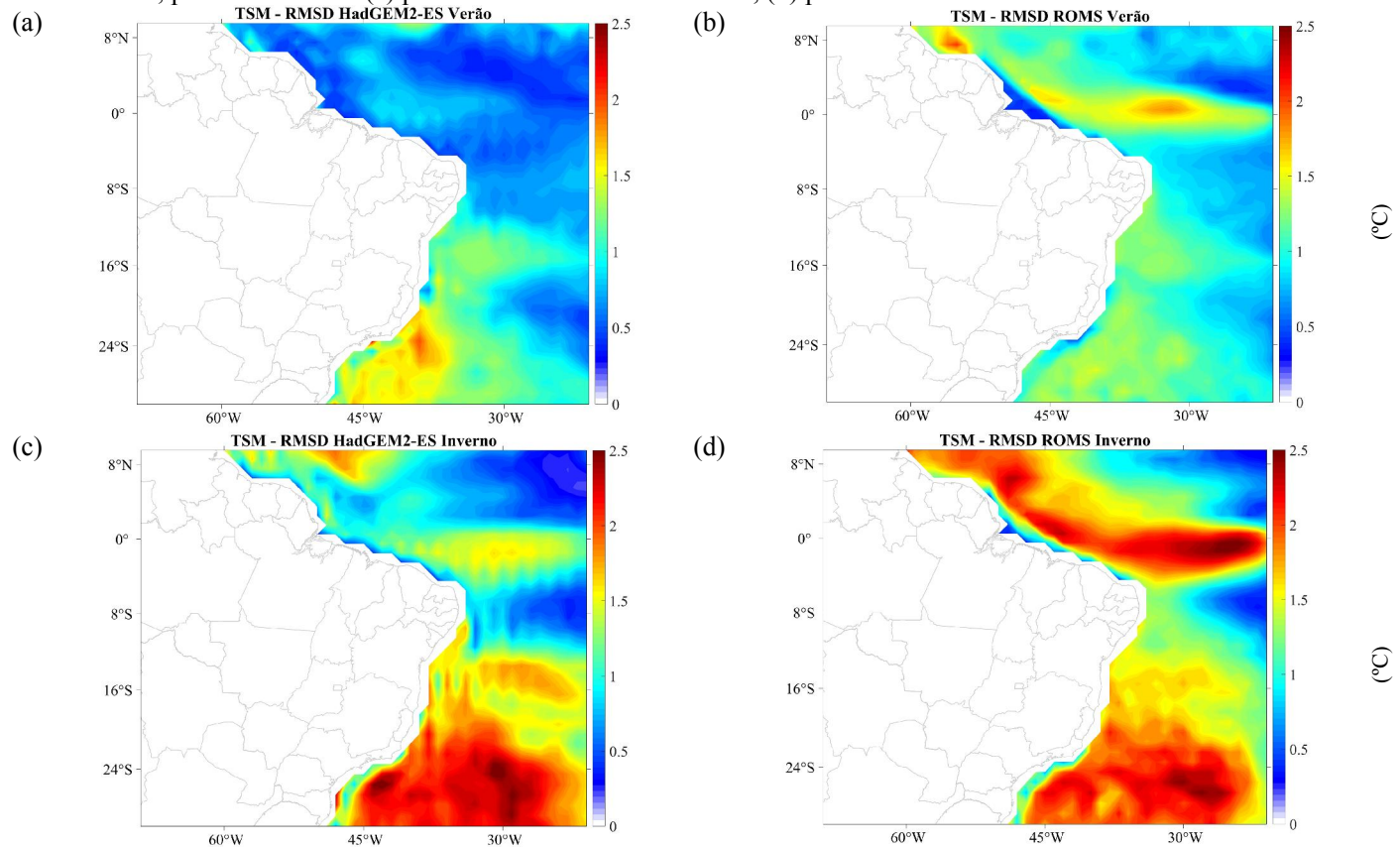
APÊNDICE A – TEMPERATURA DA ÁGUA DO MAR

Figura A.1: Campo médio de temperatura da água do mar para verões do (a) OSTIA; (b) ROMS; para invernos de (c) OSTIA e (d) ROMS, para os anos de 1997 a 2004.



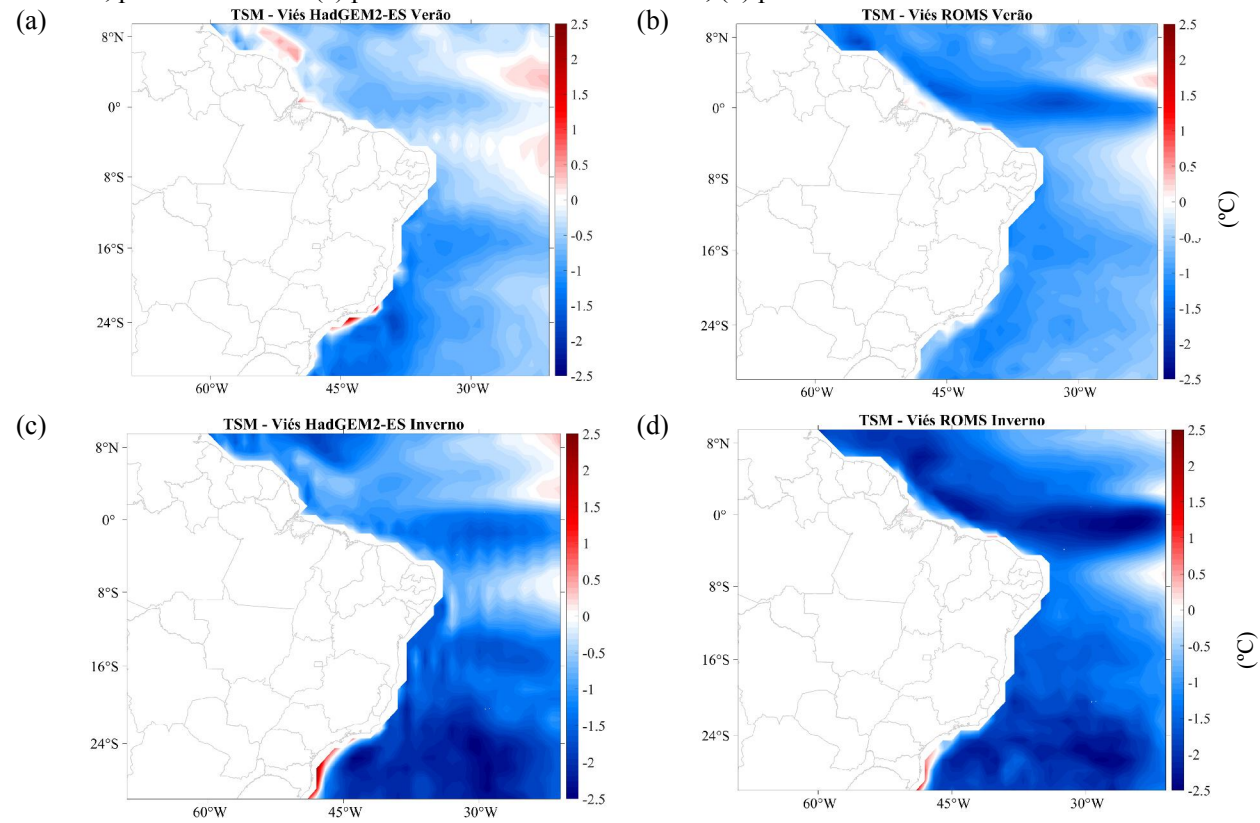
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura A.2: Campo médio de RMSD ($^{\circ}\text{C}$) em relação aos dados de temperatura do OSTIA, nos verões: (a) para os dados do HadGEM2-ES, (b) para as saídas do ROMS; para os invernos: (c) para os dados do HadGEM2-ES, (d) para as saídas do ROMS.



Fonte: Produzido pelo autor.

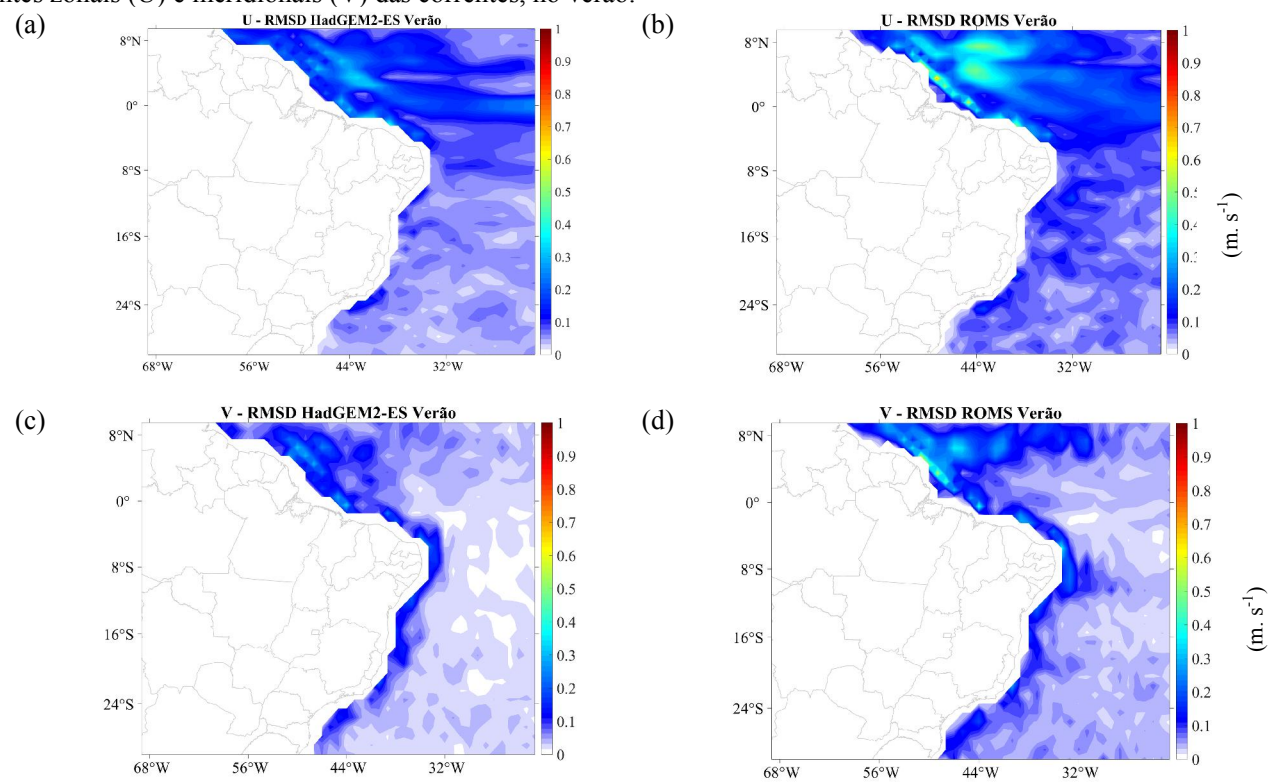
Figura A.3: Campo médio de viés (°C) em relação aos dados de temperatura do OSTIA, nos verões: (a) para os dados do HadGEM2-ES, (b) para as saídas do ROMS; para os invernos: (c) para os dados do HadGEM2-ES, (d) para as saídas do ROMS.



Fonte: Produzido pelo autor.

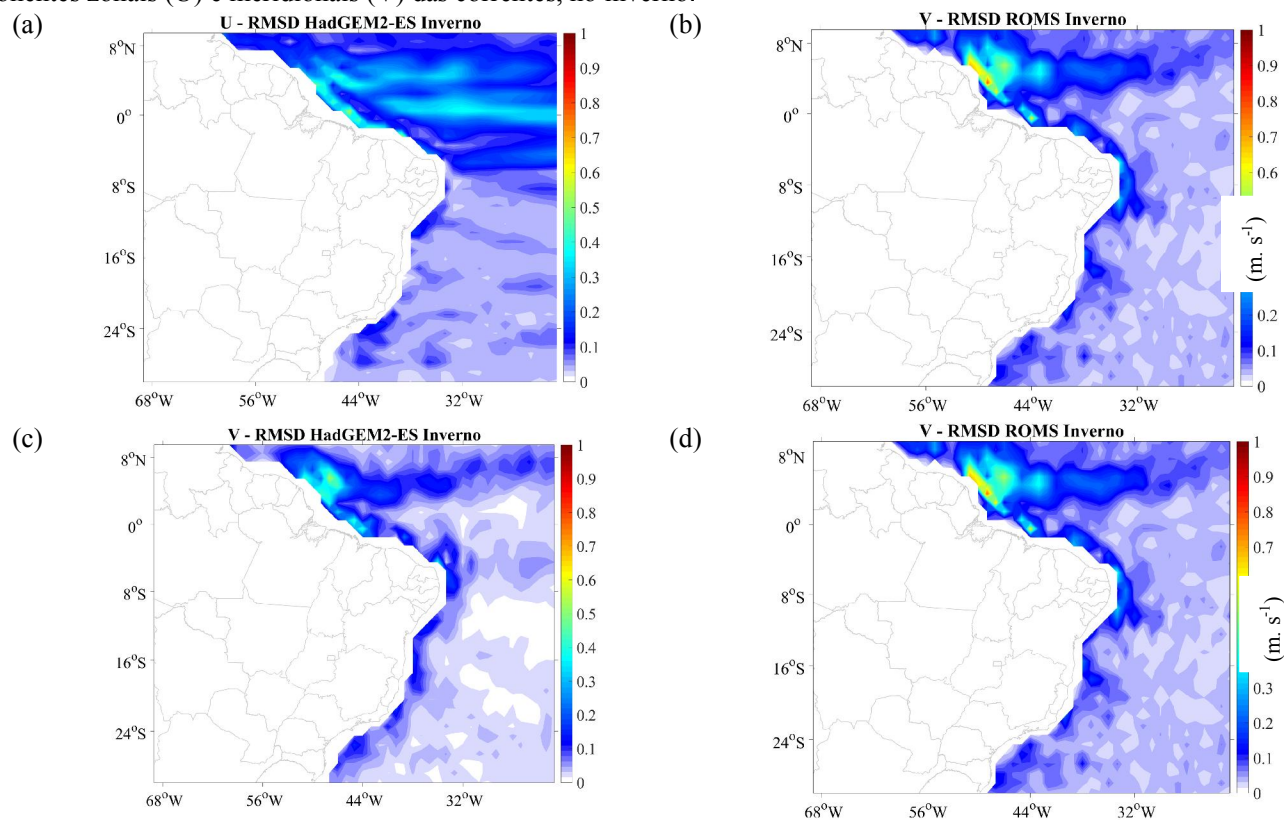
APÊNDICE B – CORRENTES OCEÂNICAS

Figura B.1: Campo médio de RMSD (m. s^{-1}) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no verão.



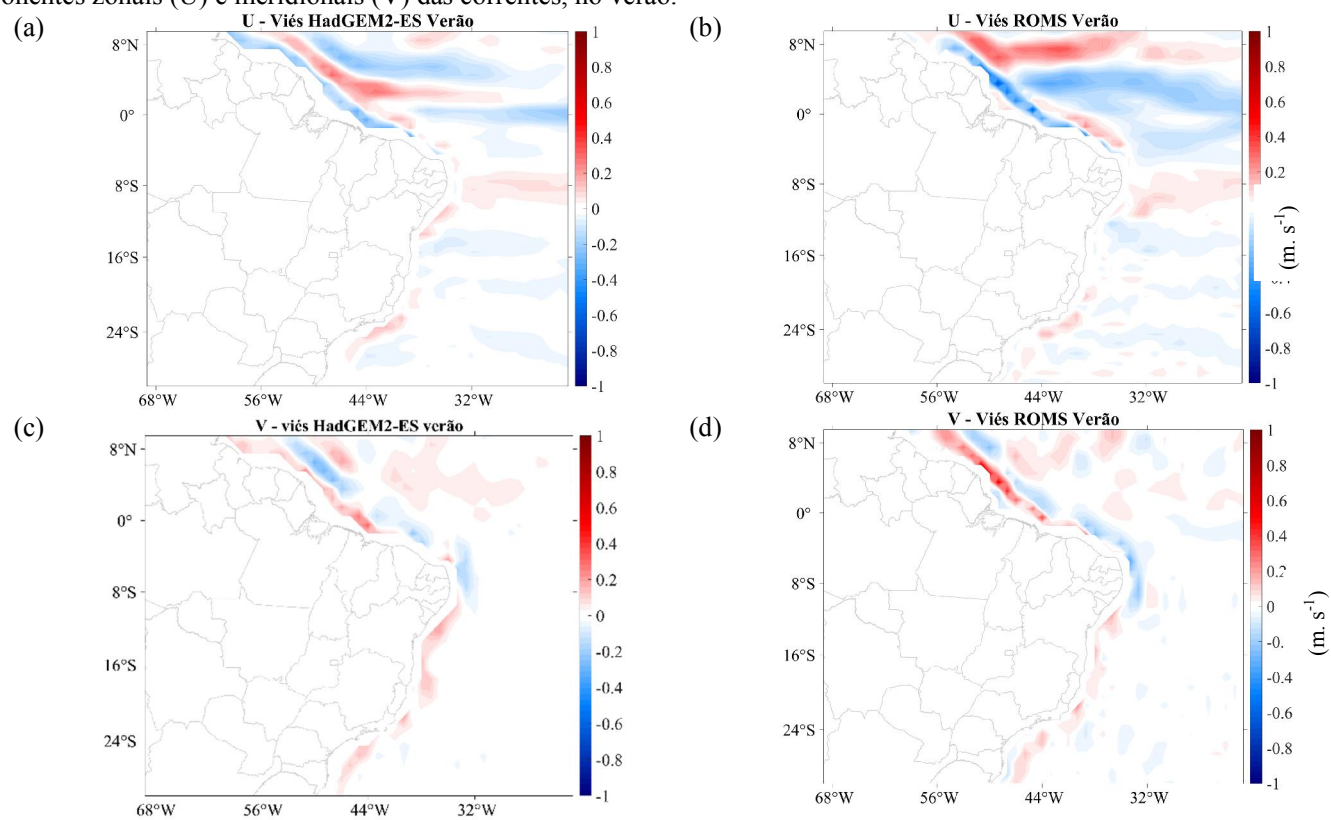
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura B.2: Campo médio de RMSD (m. s^{-1}) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no inverno.



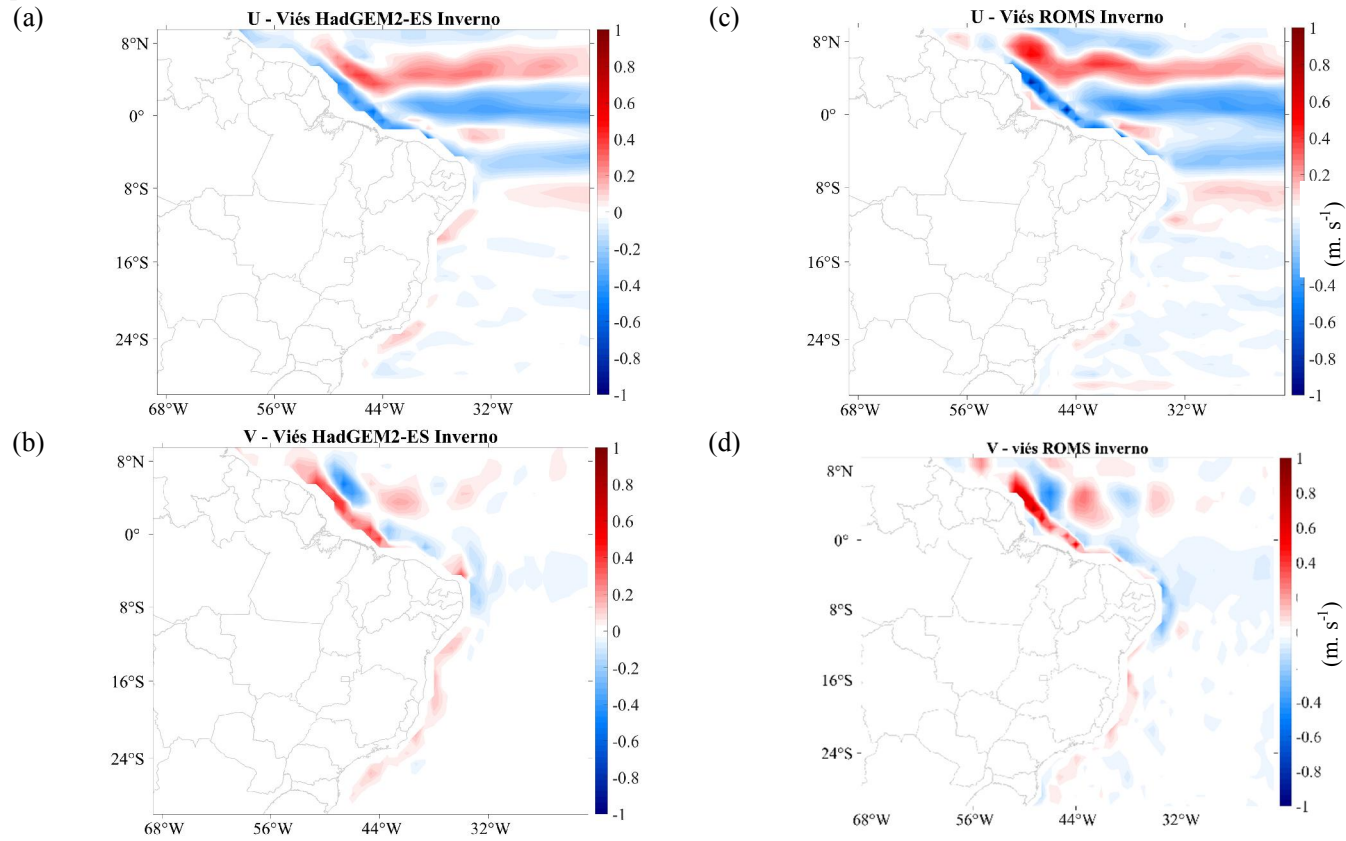
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura B.3: Campo médio de viés (m. s^{-1}) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no verão.



Fonte: Produzido pelo autor.

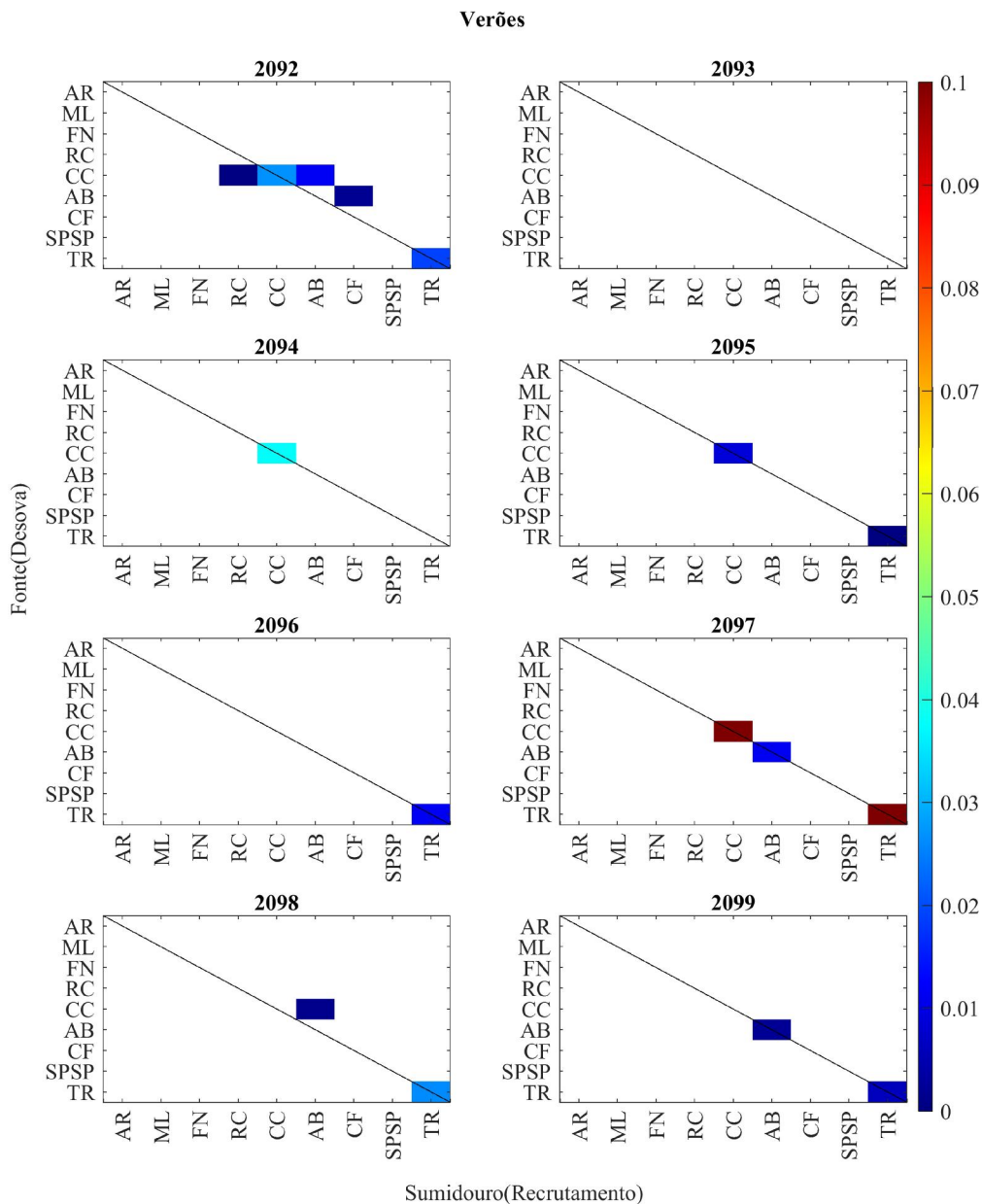
Figura B.4: Campo médio de viés (m. s^{-1}) em relação aos dados do SODA 3.4.2, para os dados do HadGEM2-ES e para as saídas do ROMS, para as componentes zonais (U) e meridionais (V) das correntes, no inverno.



Fonte: Produzido pelo autor.

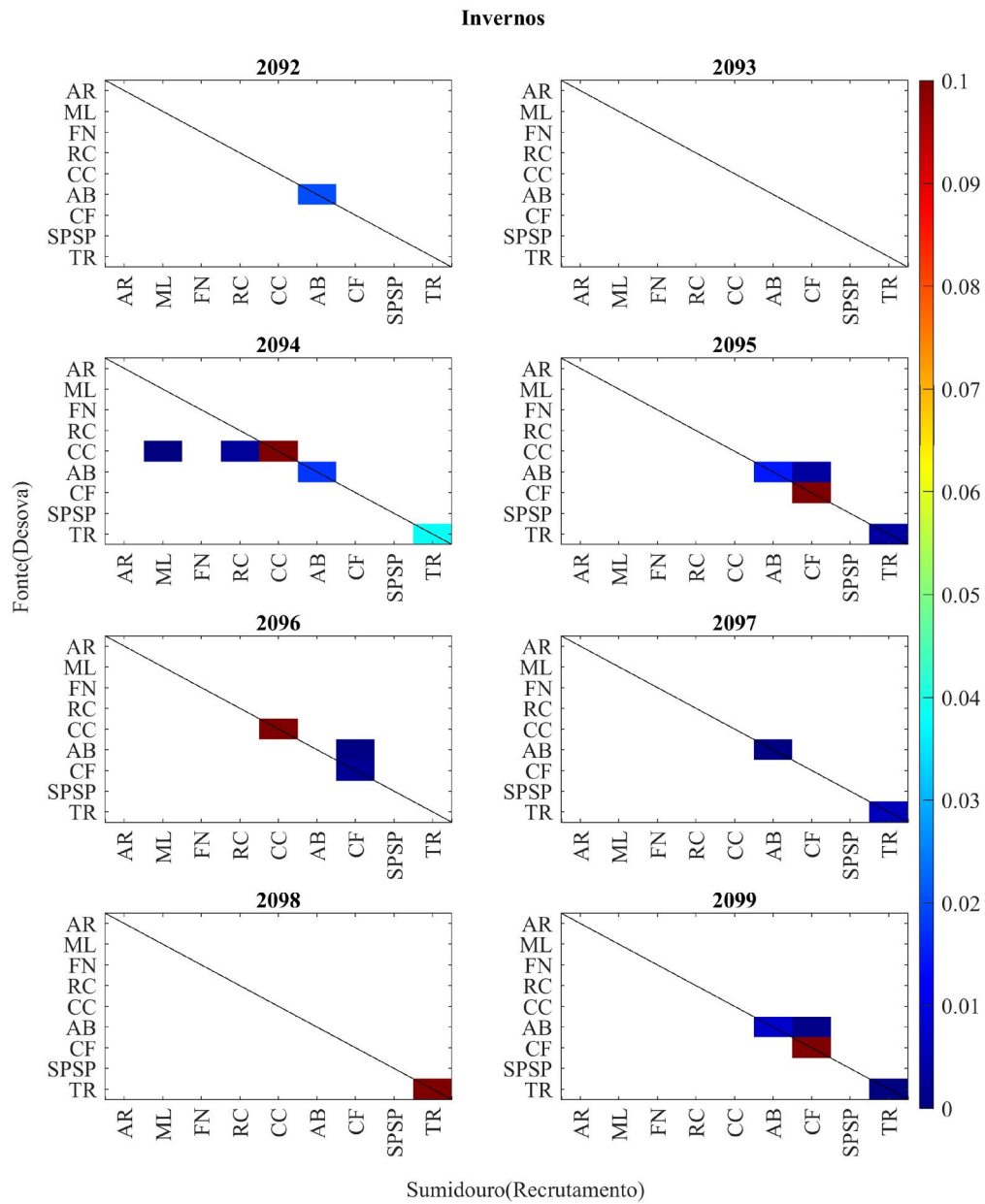
APÊNDICE C – MATRIZES DE PROBABILIDADE DE TRANSIÇÃO

Figura C.1: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de tolerância atual, verões.



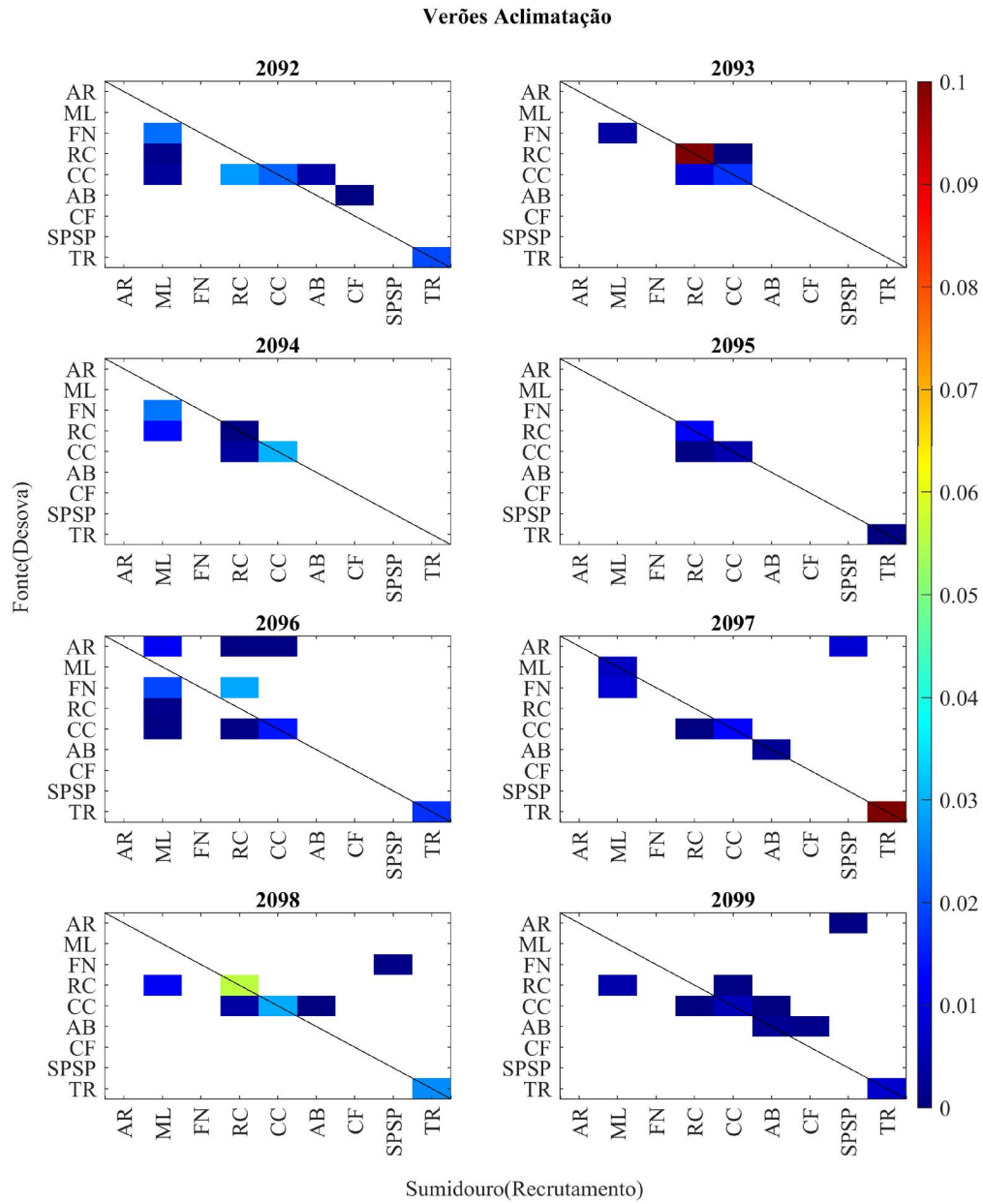
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura C.2: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de tolerância atual, invernos.



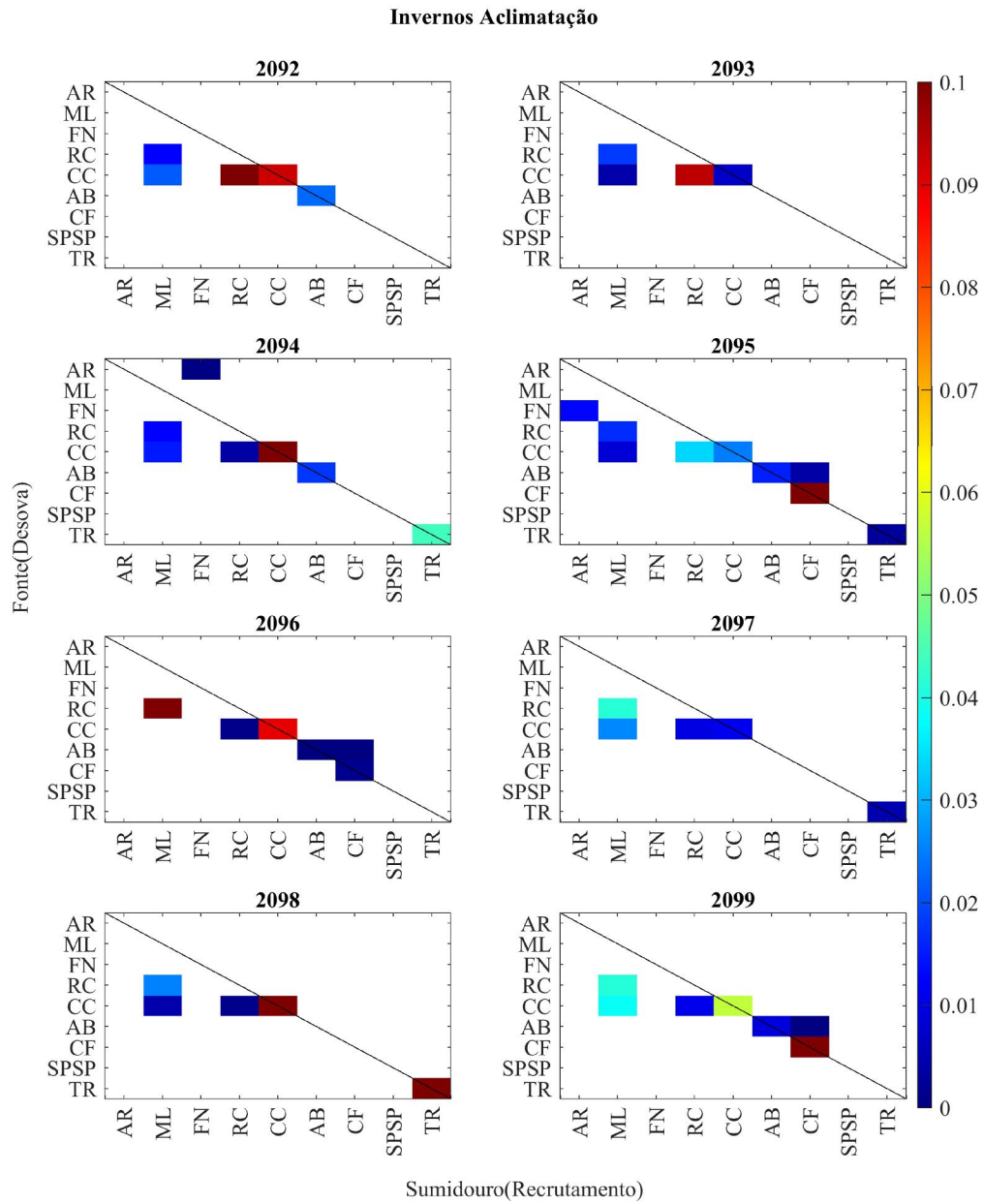
Fonte: Produzido pelo autor.

Figura C.3: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de aclimação, verões.



Fonte: Produzido pelo autor.

Figura C.4: Matrizes de Probabilidade de Transição para os cenários de aclimação, invernos.



Fonte: Produzido pelo autor.