

THIAGO BUCHIANERI NUMA DE OLIVEIRA

**Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que
Fernando de Noronha-PE: uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos.**

São Paulo

2023

THIAGO BUCHIANERI NUMA DE OLIVEIRA

**Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que
Fernando de Noronha-PE: uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos**

Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Orientador: Prof. Dr. Eduardo Siegle

São Paulo

2023

OLIVEIRA, Thiago Buchianeri Numa de. **Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que Fernando de Noronha-PE:** uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos. Dissertação apresentada ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Mestre em Ciências, Programa de Oceanografia, área de Oceanografia Geológica.

Versão corrigida

Aprovado em: ___/___/____.

Banca Examinadora

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Profa. Dra. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Prof. Dr. _____ Instituição _____

Julgamento _____ Assinatura _____

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte.

Catálogo na publicação
Serviço de Biblioteca e Documentação
Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo

Oliveira, Thiago Buchianeri Numa de Oliveira
Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que Fernando de Noronha-PE, uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos / Thiago Buchianeri Numa de Oliveira; orientador Eduardo Siegle.

Dissertação (Mestrado em Oceanografia Geológica) - Programa de Pós-Graduação do Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023

Versão original

1 - Conectividade, 2 - Dispersão larval, 3 - Ambientes recifais, 4 - Ilha oceânica, 5 - Área Marinha Protegida, 6 - *Montastraea cavernosa*, 7 - Modelo biofísico, 8 - Modelo hidrodinâmico, 9 - Conservação.

AGRADECIMENTOS

Meus sinceros agradecimentos aos que se fizeram presentes no decorrer desta pesquisa e que viabilizaram a sua construção

Ao meu orientador Dr. Eduardo Siegle, por abrir as portas do seu laboratório, quando o mundo estava se fechando devido a pandemia, me mostrando os caminhos da modelagem numérica, desafios, e me ensinar como melhorar.

A Profa.Dra. Beatrice Padovanni, pela confiança que você teve no meu trabalho desde a graduação, me guiando e orientando na tese e na vida.

Ao Dr. Nelson Gouveia, por disponibilizar o seu belíssimo trabalho, o seu modelo hidrodinâmico foi imprescindível para essa tese. Acredito que essa parceria ainda nos renderá muitos frutos.

A meus pais, por sempre apoiarem e minhas escolhas, mostrar que sempre podemos estudar para nos aperfeiçoar, a importância do conhecimento, plantarem em mim a semente da curiosidade, e o amor pela natureza. Meu irmão, sem sua ajuda, meus mapas não seriam os mesmos.

A Zaira Matheus, minha madrinha, graças ao seu magnífico acerto fotográfico de Fernando de Noronha, foi possível identificar a reprodução da *Montastraea cavernosa*, além de me ensinar o amor pelo mar e pela oceanografia, me guiou pelas primeiras respirações no snorkel, e com suas fotos e experiências de vida me mostrando um mundo maravilhoso embaixo d'água.

Aos meus amigos, funcionários e professores do Instituto Oceanográfico da USP e do CEPENE, por construir no meu crescimento em busca do conhecimento, vocês sempre me trouxeram luz a maçante rotina, fizeram os dias melhores e me acolheram.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

“Existirmos a que será que se destina?”

Caetano veloso - Cajuína

RESUMO

OLIVEIRA, Thiago Buchianeri Numa de. **Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que Fernando de Noronha-PE: uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos.** 2023. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

A conectividade entre ambientes isolados, como ilhas oceânicas, desempenha um papel fundamental na manutenção de populações marinhas, especialmente aquelas sujeitas a impactos climáticos e exploração pesqueira. A conservação de Áreas Marinhas Protegidas é essencial para garantir a sustentabilidade desses ecossistemas, e a análise da dispersão larval por meio de modelos biofísicos é uma ferramenta valiosa para compreender a conectividade entre diferentes habitats recifais. O presente estudo utilizou um modelo hidrodinâmico para investigar a dispersão de larvas do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, identificando três padrões de distribuição: exportação larval para a plataforma continental norte/nordeste brasileira, auto recrutamento e conectividade vertical. Os resultados apontam a fragilidade da recomposição genética de *M. cavernosa* em Fernando de Noronha, enfatizando a necessidade de conservação desse habitat crítico para a sobrevivência e diversidade genética dessas populações. A área protegida do Arquipélago de Fernando de Noronha é fundamental para a manutenção da biodiversidade local e da plataforma norte brasileira, ressaltando sua relevância para políticas de conservação e manejo.

Palavras-chave: Conectividade. Dispersão larval. Ambientes recifais. Ilha oceânica. Área Marinha Protegida. *Montastraea cavernosa*. Modelo biofísico. Modelo hidrodinâmico. Conservação.

ABSTRACT

OLIVEIRA, Thiago Buchianeri Numa de. **Padrões de dispersão larval do coral *Montastrea cavernosa* do arquipélago que Fernando de Noronha-PE: uma abordagem multiescalar utilizando modelos lagrangeanos.** 2023. 68 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2023.

The connectivity between isolated environments, such as oceanic islands, plays a fundamental role in the maintenance of marine populations, especially those subject to climate impacts and fishing exploitation. The conservation of Marine Protected Areas is essential to ensure the sustainability of these ecosystems, and the analysis of larval dispersion through biophysical models is a valuable tool to understand the connectivity between different reef habitats. The present study used a hydrodynamic model to investigate the dispersal of *Montastraea cavernosa* coral larvae in Fernando de Noronha Archipelago, identifying three distribution patterns: larval export to the northern/northeastern Brazilian continental shelf, self-recruitment, and vertical connectivity. The results highlight the fragility of the genetic reconstitution of *M. cavernosa* in Fernando de Noronha, emphasizing the need for the conservation of this critical habitat for the survival and genetic diversity of these populations. The protected area of Fernando de Noronha Archipelago is essential for the maintenance of local biodiversity and the northern Brazilian shelf, underscoring its relevance for conservation and management policies.

Key words: Connectivity. Larval dispersion. Reef environments. Oceanic island. Marine Protected Area. *Montastraea cavernosa*. Biophysical model. Hydrodynamic model. Conservation.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1.** Batimetria da região do Arquipélago de Fernando de Noronha, os dados de batimetria provenientes das cartas náutica 52 e 11100 da marinha brasileira em conjunto com os dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram interpolados no software ARCGIS. 6
- Figura 2.** Região do Parque marinho no Arquipélago de Fernando de Noronha. Os limites dos polígonos foram obtidos através do site do ICMBIO <https://www.gov.br/icmbio/pt-br>, os dados de batimetria provenientes das cartas náutica 52 e 11100 da marinha brasileira em conjunto com os dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram interpolados no software ARCGIS 6
- Figura 3.** Mapa das principais correntes oceânicas nas proximidades do Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo vermelho). CNB (Corrente Norte do Brasil), CSEc (ramo central da Corrente Sul Equatorial), CSEs (ramo sul da Corrente Sul Equatorial). 8
- Figura 4** -Grade Numérica construída para a região de Fernando de Noronha, produzida no software Delft3d. Na área focal do estudo, a plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha, a resolução da grade é de 60 metros..... 10
- Figura 5.** Dados de ventos do ano de 2016 na região de Fernando de Noronha - PE retirados do modelo global da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Wavewatch III, utilizados na elaboração do modelo hidrodinâmico costeiro 12
- Figura 6.** Batimetria interpolada na grade numérica da região de Fernando de Noronha produzida no software Delft3D. Os valores batimétricos são provenientes das cartas náuticas de número 52 e 2200 da marinha brasileira assim como dados obtidos pelo Serviço Geológico Brasileiro 13
- Figura 7.** Batimetria da plataforma insular do AFN interpolada na grade numérica gerada no software Delft3d. Os valores batimétricos são provenientes das cartas náuticas de número 52 e 2200 da marinha brasileira assim como dados obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM). 14
- Figura 8.** O gráfico representa a comparação entre os resultados de altura da superfície do mar computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ..... 16
- Figura 9.** O gráfico representa a comparação entre os resultados da componente zonal da velocidade computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ..... 16
- Figura 10.** O gráfico representa a comparação entre os resultados da componente meridional da velocidade computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ. 17
- Figura 11.** Representação das zonas com suas respectivas profundidades e porcentagem de cobertura do coral *Montastraea cavernosa*: Cabeço dois irmão - CDI (preto), Laje dois irmãos – LDI (vermelho), Baía dos golfinhos - BG (branco), Ponta da Sapata - PS (verde), Cabeço da sapata - CS (azul claro) e Barro vermelho - BV (roxo) , referentes as subpopulações do coral *M. cavernosa* no arquipélago de Fernando de Noronha identificada por Matheus (2019), criado no software Ichthyop para a dispersão larval. 19
- Figura 12.** Coral pétreo *Montastraea cavernosa* no arquipélago de Fernando de Noronha. 20
- Figura 13.** Ciclo de vida de corais liberadores de gametas: 1) Liberação sincronizada de pacotes de ovócitos e espermatozoides. Vários predadores se alimentam dos gametas liberados. 2) Gametas rapidamente flutuam para a superfície da água, onde ocorre a fecundação. 3) A divisão celular começa poucas horas após a

desova. 4) O desenvolvimento do zigoto se dá no primeiro dia. 5) As larvas plânula se desenvolvem e se dispersam com as correntes por alguns dias. 6) Plânulas com mesentérios começam a mudar de forma. 7) As plânulas começam a procurar um local adequado para se assentarem. 8) As plânulas se assentam cerca de uma semana após a desova e se transformam em pólipos fundadores, que começam a secretar o esqueleto calcário. 9) As colônias começam a crescer através de brotamento de pólipos. 20

Figura 14. Foto da Laje Dois Irmãos na manhã seguinte da desova do coral *Montastraea cavernosa*, em 22 de agosto de 2016. 21

Figura 15. Padrões de correntes modeladas no Arquipélago de Fernando de Noronha no provável horário da desova coral *Montastraea cavernosa*. As setas indicam a direção da corrente, já a magnitude é representada na escala de cores 25

Figura 16. Distribuição da velocidade média na coluna de água na região do Arquipélago de Fernando de Noronha, no período de maré enchente. 26

Figura 17. Distribuição da velocidade média na coluna de água na região do Arquipélago de Fernando de Noronha, no período de maré vazante. 26

Figura 18. Trajetórias larvais do coral *Montastraea cavernosa* na plataforma insular de Fernando de Noronha (preto), calculadas pelo modelo biofísico desenvolvido para agosto de 2016. As cores representam a origem das larvas, Cabeço Dois Irmãos (vermelho), Laje Dois Irmãos (roxo), Baía dos Golfinhos (verde), Ponta da Sapata (amarelo), Cabeço da Sapata (azul claro), Barro Vermelho (azul marinho). As estrelas laranjas representam as trajetórias que foram exportadas da plataforma insular 27

Figura 19. Trajetórias das larvas do coral *Montastraea cavernosa*, provenientes das zonas Baía dos Golfinhos (verde), Cabeço Dois Irmão (vermelho), Laje Dois Irmãos (rosa) para o mês de agosto de 2016. Resultados obtidos através do modelo biofísico Ichthyop..... 28

Figura 20. Resultados obtidos pelo modelo biofísico. Cada gráfico representa uma área como sumidouro, sendo apresentada a taxa de sucesso do Cabeço dois irmãos (CDI), Laje dois irmãos (LDI) e Baía dos Golfinhos (BG) de atuarem como fonte para a respectiva área..... 29

Figura 21. Distribuição do kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2012. Representando a média ocorrida no período de 2003 a 2013. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 30

Figura 22. Distribuição do kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2008. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 31

Figura 23. Distribuição do kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2011. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 31

Figura 24. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de backtracking de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2012, considerando 20 dias de tempo de vida larval. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 33

Figura 25. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de backtracking de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* do Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2012, considerando 30 dias de tempo de vida larval. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 33

Figura 26. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de backtracking de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2008. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo). 34

Sumário

1. INTRODUÇÃO	1
2 MATERIAIS E MÉTODOS	5
2.1 ÁREA DE ESTUDO	5
2.2 MODELAGEM NUMÉRICA	8
2.2.1 Modelo local - Delft3D	9
2.2.1 Dados de entrada	10
2.3 MODELAGEM BIOFÍSICA	18
2.3.1 Coral <i>Montastraea cavernosa</i> no Arquipélago de Fernando de Noronha ...	18
2.4 EXPERIMENTOS	22
2.4.1 Conectividade local	22
2.4.2 Padrões de dispersão em mesoescala	23
3 RESULTADOS	25
3.1 MODELO HIDRODINÂMICO	25
3.2 CONECTIVIDADE LOCAL	27
3.3 RESULTADOS DE MESOESCALA	29
3.3.1 Arquipélago de Fernando de Noronha como Fonte	29
3.3.2 Arquipélago de Fernando de Noronha como sumidouro	32
4 DISCUSSÃO.....	35
5 CONCLUSÕES.....	38
REFERÊNCIA	39
ANEXO.....	45

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AFN – Arquipélago de Fernando de Noronha

AMP – Área marinha protegida

BG – Baía dos Golfinhos

BV – Barro Vermelho

CDI – Cabeço Dois Irmãos

CS – Cabeço da Sapata

LDI – Laje Dois Irmãos

PS – Ponta da Sapata

CNB - Corrente Norte do Brasil

1. INTRODUÇÃO

As plataformas continentais e insulares constituem um mosaico de megahabitats ecologicamente interconectados que abrigam uma grande diversidade de habitats e comunidades biológicas associadas (SECCHIN, 2011). Essa diversidade gera uma série de serviços ecossistêmicos essenciais para a sobrevivência e bem-estar humanos (MOBERG; PATRICK, 2003), tais como: suporte (ciclagem de nutrientes, produção primária), provisão (alimentação, medicamentos, recursos ornamentais e fertilizantes), regulação (controle do clima, controle de inundações, e estabilização da linha de costa) e cultural (estético, educacional, sistemas de conhecimento, diversidade cultural e recreativo) (REID; RAUDSEPP-HEARNE, 2005). No entanto, esses ecossistemas, estão sofrendo grandes impactos antrópicos que afetam sua biodiversidade e serviços ecossistêmicos (BROWN; BLONDEL, 2009).

Populações marinhas de invertebrados e peixes bentônicos, são frequentemente conectadas pela dispersão pelágica de suas larvas, que mantém meta populações em sistemas de fontes e sumidouros em distâncias que podem compreender até centenas de quilômetros (COWEN; PARIS; SRINIVASAN, 2006). Assim, a modelagem biofísica é uma ferramenta importante para identificar e dimensionar a consistência nos padrões de transporte larval, identificar a resiliência e variabilidade nas conexões, descrevendo processos populacionais relevantes para a manutenção natural ecossistêmica e para a conservação e o manejo (COWEN; PARIS; SRINIVASAN, 2006; KARNAUSKAS et al., 2022; VAZ et al., 2022).

As Áreas Marinhas Protegidas (AMP) têm papel significativo na conservação dos ecossistemas marinhos. No planejamento dessas áreas, é fundamental analisar a capacidade de interconexão entre diferentes habitats, formando uma rede bem conectada que permite a troca de indivíduos entre subpopulações em seus limites ou populações de outras AMPs, possibilitando a manutenção da biodiversidade (CROOKS; SANJAYAN, 2006), Resolução GA17.38 da IUCN). As correntes marinhas são as principais responsáveis por este processo, denominado conectividade (COWEN; SPONAUGLE, 2009). Compreender a conectividade de uma população e sua relação com a hidrodinâmica local, é essencial para o manejo para a conservação da biodiversidade, além de fornecer subsídios para políticas públicas, tais como o planejamento espacial marinho e a criação de novas áreas marinhas protegidas.

Uma das formas de avaliar a importância de uma área marinha protegida é conhecer o seu potencial para abrigar e proteger habitats, seja na qualidade ou na raridade do habitat, o pode ser feito utilizando as informações provenientes de estudos sobre conectividade (CROOKS; SANJAYAN, 2006).

Nos últimos anos, modelos numéricos vêm sendo cada vez mais utilizados com essa finalidade porque possibilita a análise espacial da dinâmica das populações marinhas, especialmente a relacionada com a dispersão de larvas (SALE et al., 2005; WILLIS et al., 2003).

Os corais da ordem Scleractinia (Cnidaria: Hydrozoa), conhecidos como corais verdadeiros ou pétreos, são animais sésseis caracterizados por sua grande plasticidade morfológica, ecológica e reprodutiva, além de possuírem esqueleto de carbonato de cálcio. Podem ser hermafroditas ou gonocóricos que liberam gametas na coluna de água onde ocorre a fertilização e o desenvolvimento da larva (plânula), sendo que em outros casos a fertilização e incubação ocorrem dentro do pólipó feminino. Em geral, a larva assenta no substrato 4 a 6 dias após a eclosão (FADLALLAH, 1983; HARRISON; WALLACE, 1990) Estes corais são considerados os principais responsáveis pela formação e manutenção de diversos tipos de recifes e pela produção global de aproximadamente 15% do carbonato de cálcio. (ARMSTRONG et al., 2006). No Brasil, o escleractíneo *Montastrea cavernosa* (LINNAEUS, 1767), conhecido em alguns locais como “coral casca-de-jaca”, é uma espécie abundante e de ampla distribuição, podendo ser encontrada nos recifes situados em ilhas oceânicas como nas ilhas do Arquipélago Fernando de Noronha e na costa do Parcel Manoel Luis (Maranhão) até o litoral do Espírito Santo, em profundidades que variam de 1 m (Ilha de Itaparica) a 80 m (Banco Vitória). Este escleractinídeo tem preferência por águas claras e relativamente calmas.

Nos últimos 30 anos, a área de cobertura dos corais rasos da região tropical da borda oeste do Atlântico teve uma redução de 80% (GARDNER et al., 2003), provocada pela poluição, sedimentação, aumento da temperatura dos oceanos e doenças (ARMSTRONG et al., 2006). No caso dos recifes brasileiros, os impactos regionais parecem ser mais importantes que os de grande escala, já que os maiores riscos que esses ambientes enfrentam são: a proliferação de algas, sedimentação, e impactos de origem terrestres como o desmatamento e o desenvolvimento urbano (SEGAL; BERENQUER; CASTRO, 2012) .

A conectividade entre os recifes de ilhas oceânicas e a plataforma continental desempenha um papel fundamental na dinâmica e na saúde dos ecossistemas marinhos (SELKOE et al., 2016). Essas ilhas, situadas em meio a vastos espaços oceânicos, podem servir como pontos de partida e chegada para dispersão larval e fluxos de nutrientes, modelando a

estrutura genética e a diversidade biológica das comunidades recifais (COWEN et al., 2000; GILMOUR et al., 2013). Além disso, a troca de organismos entre as ilhas e a plataforma continental pode influenciar a resiliência e a capacidade de recuperação desses ecossistemas diante de perturbações e mudanças ambientais (SALE et al., 2005; STORLAZZI et al., 2018). No Brasil foi identificado, com base em análises genéticas do coral *Mussismilia hispida*, um importante fluxo genético entre as ilhas oceânicas brasileiras e a plataforma continental norte e nordeste (PELUSO et al., 2018).

Os recifes mesofóticos são encontrados entre 30 m e 150 m de profundidade, sendo considerados menos suscetíveis à ação antrópica (LESSER; SLATTERY; LEICHTER, 2009). Devido a sua capacidade de conectividade com recifes de águas rasas, com profundidades menores de 30 m (HERZLIEB et al., 2006; LESSER; SLATTERY; LEICHTER, 2009; SLATTERY et al., 2011), sua preservação e proteção é de extrema importância para a sobrevivência de peixes e das comunidades bentônicas de regiões pouco profundas (ARMSTRONG et al., 2006).

A literatura mostra que o maior conhecimento sobre conectividade é resultado de estudos feitos sobre a variabilidade genética de espécies marinhas que habitam a mesma faixa de profundidade. Em contraposição, trabalhos relacionados com a variabilidade da conectividade entre populações que habitam diferentes profundidades, como no caso dos recifes eufóticos e mesofóticos, ainda são escassos (SWEARER et al., 2002).

As consequências ecológicas da variabilidade da conectividade, em escalas espacial e temporal são função do ciclo de vida dos organismos, sua forma de dispersão e dos parâmetros oceanográficos (COWEN et al., 2002; COWEN; SPONAUGLE, 2009; KARNAUSKAS et al., 2022; THOMAS et al., 2015). O mecanismo de dispersão, do local de eclosão até o de assentamento, é controlado por fatores bióticos e pelas variáveis ambientais. O primeiro define onde a larva eclode, o seu comportamento na coluna de água, a época do assentamento e até a probabilidade de morrer antes. O segundo influencia a distribuição da larva durante sua permanência na coluna de água (THOMAS et al., 2015), uma vez que dependendo da força e direção da corrente, estas podem percorrer poucos metros ou centenas de quilômetros antes de encontrar o local ideal para assentar (COWEN; PARIS; SRINIVASAN, 2006). Assim, a taxa de chegada e assentamento de novos corais (recrutas) é um processo chave na manutenção do crescimento dos recifes e na restauração dos que estão degradados (MUMBY et al., 2006), o que torna os estudos sobre conectividade essenciais para a melhor compreensão desse processo, bem como para o monitoramento dos ambientes recifais.

O arquipélago de Fernando de Noronha, localizado no Oceano Atlântico, é reconhecido pela sua importância ambiental e abriga uma Área Marinha Protegida de grande relevância para a conservação da biodiversidade marinha. Essa área desempenha um papel crucial na preservação de espécies marinhas de grande importância ecológica, como corais, tartarugas marinhas, golfinhos e diversas espécies de peixes recifais (BELLINI; SANCHES, 1996; DOMÍNGUEZ-PETIT et al., 2022; ESTON et al., 1986). Estudos recentes demonstram a importância da Área Marinha Protegida de Fernando de Noronha como fontes de larvas de lagostas para plataforma continental adjacente (RUDORFF et al., 2007) além de ser verificado por estudos da genética do coral pétreo *Mussismilia hispida* a existência de conectividade entre o arquipélago e o litoral norte/nordeste brasileiro (PELUSO et al., 2018). A implementação de políticas de conservação e manejo adequadas nesta área protegida é essencial para garantir a sustentabilidade dos ecossistemas marinhos e o bem-estar das comunidades que dependem desses recursos.

O presente trabalho teve como objetivo investigar os padrões de dispersão e conectividade entre ambientes recifais no Arquipélago de Fernando de Noronha, Pernambuco, assim como seu intercâmbio larval com populações alóctones, com base na aplicação de dois modelos hidrodinâmicos para a elaboração de um modelo biofísico. Para a representação a conectividade entre os ambientes recifais o trabalho foi baseado no coral escleractíneo *Montastraea cavernosa*, devido a sua dominância, tanto nas regiões rasas com ocorrência em 75% das amostras até 12m, quanto em zonas mesofóticas onde foi verificado 30% de cobertura média (ESTON et al., 1986; LABOREL, 1967; MAIDA; PADOVANI FERREIRA; CLÁUDIO BELLINI, 1995; PIRES et al., 1992).

O trabalho também teve como finalidade fornecer subsídios para políticas de conservação e manejo da área protegida de Fernando de Noronha com a identificação da trajetória das larvas da espécie de coral pétreo *Montastraea cavernosa*, contribuindo para a melhor compreensão da conectividade e sua importância na conservação dos ambientes recifais e da biota associada.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho faz parte do projeto interdisciplinar “Recifes Profundos do Arquipélago de Fernando de Noronha: mapeamento, conectividade e proteção” (financiado pela Fundação Boticário). Os dados físicos utilizados para a elaboração do trabalho foram obtidos em junho de 2016.

2.1 ÁREA DE ESTUDO

O Arquipélago de Fernando de Noronha (AFN), localizado no Atlântico Sul Equatorial (Lat. 3° 51' 13,71" S, Long. 32° 25' 25,63" W) a 545 km de Recife- Pernambuco e a 360 km de Natal – Rio Grande do Norte (Figura 1), é formado por uma ilha principal, que corresponde a 91% de sua área total, e 20 ilhotas. Este arquipélago constitui a parte emersa de um monte cônico de 60 km de diâmetro e 4 km de altura, o qual forma parte de um alinhamento de montes submarinos com orientação este-oeste, chamado Cadeia de Fernando de Noronha. Sua plataforma insular possui 3 a 4 km de largura e cerca de 100m de profundidade (ALMEIDA, 2002).

O Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha (Figura 2) foi criado em 1988 pelo Decreto n° 96.693 e tem uma área de 10.927,64 hectares (FERREIRA; JESUS; SILVA, 1990). A área emersa abrangida pelo parque compreende cerca de 70% da ilha principal e todas as ilhas secundárias, enquanto a região imersa estende-se até aproximadamente 50 m de profundidade.

Figura 1. Batimetria da região do Arquipélago de Fernando de Noronha, os dados de batimetria provenientes das cartas náutica 52 e 11100 da Marinha do Brasil em conjunto com os dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram interpolados no software ARCGIS.

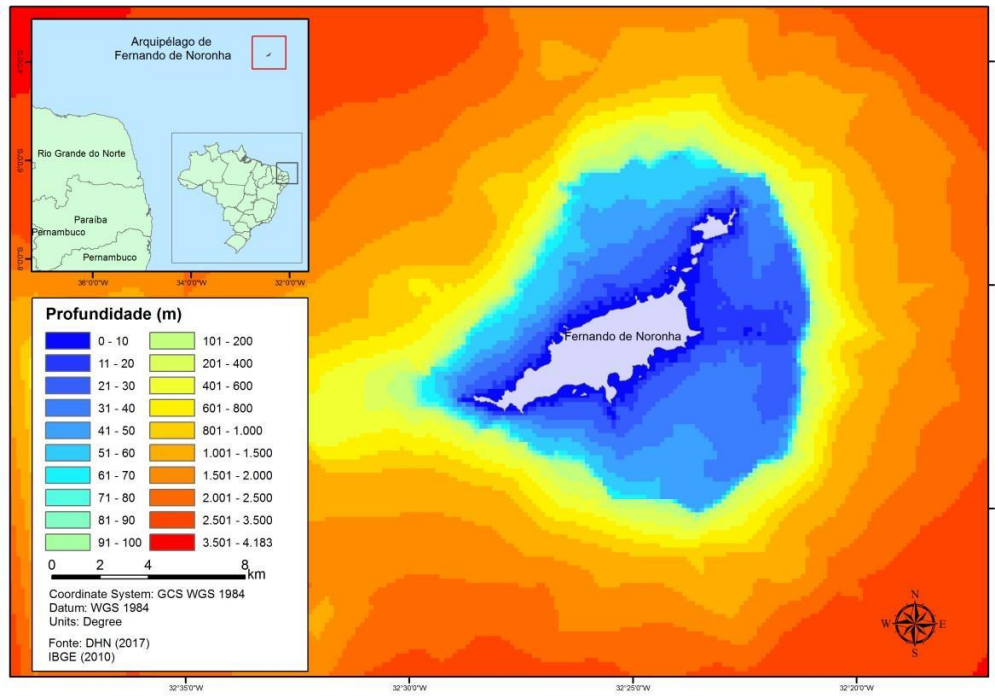
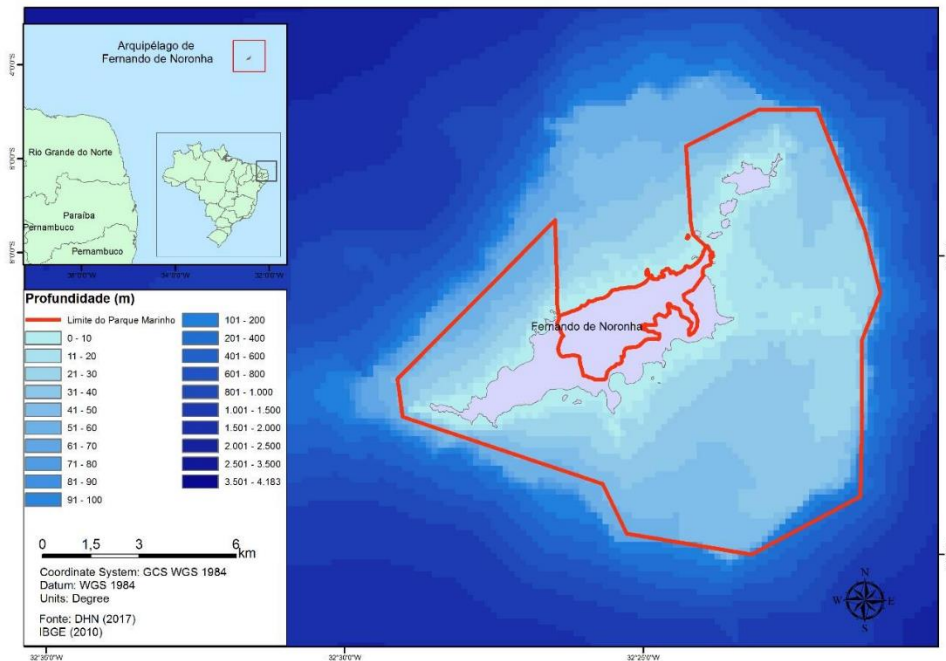


Figura 2. Região do Parque marinho no Arquipélago de Fernando de Noronha. Os limites dos polígonos foram obtidos através do site do ICMBIO <https://www.gov.br/icmbio/pt-br>, os dados de batimetria provenientes das cartas náutica 52 e 11100 da Marinha do Brasil em conjunto com os dados do Serviço Geológico do Brasil (CPRM) foram interpolados no software ARCGIS

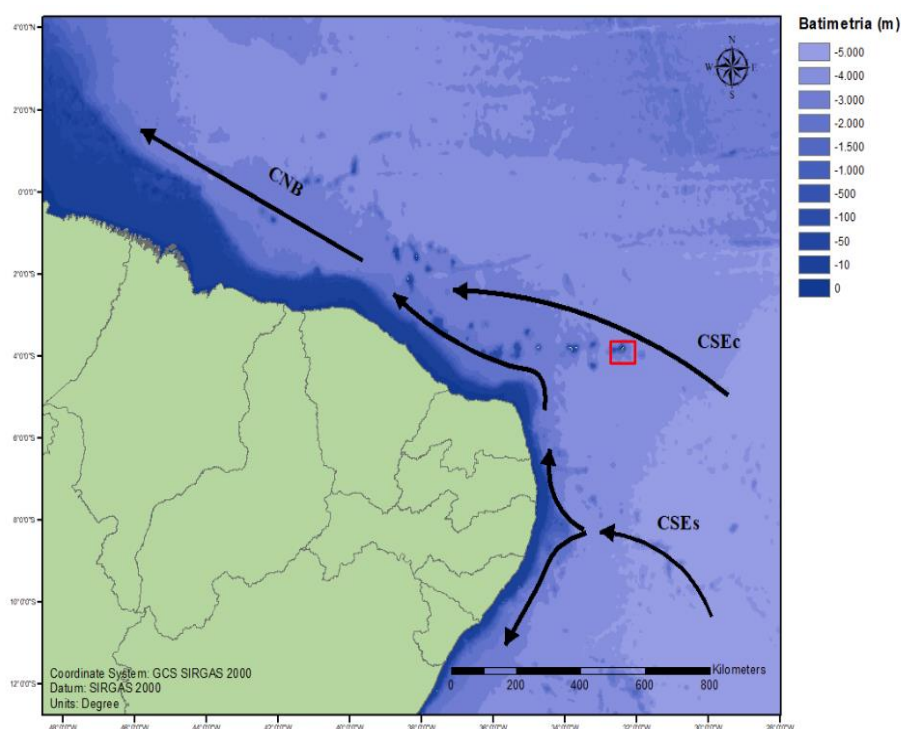


A área de estudo caracteriza-se pelo clima tropical com temperatura média de 28°C e amplitude térmica de 4°C, sendo fortemente influenciada pelos ventos alísios de sudeste, com velocidades de 10 nós à 15 nós (MATHEUS et al., 2019). A região apresenta duas estações bem definidas, uma seca entre setembro e fevereiro com acumulados pluviométricos de 500 mm, e a outra chuvosa, de março a agosto, cujos acumulados atingem 1.000 mm (FERREIRA et al., 2013).

O clima de onda da região é dominado por *swells* formados pelos ventos alísios, que são controlados pela variação da Zona de Convergência Intertropical com períodos entre 8 e 10 s, e por vagas de ondas (*swells*) formados por ciclones em latitudes médias em ambos os hemisférios. Os *swells* formados no hemisfério norte atingem o arquipélago nos meses de outubro à abril, e os do sul de maio a setembro, com períodos de 12 a 14 s. Nesses dois casos, as alturas das ondas variaram entre 2,0 e 2,5 m (COSTA, 2015).

O Arquipélago de Fernando de Noronha é influenciado pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial (SECc), com velocidade média de 10 $\text{cm}\cdot\text{s}^{-1}$, o qual se junta a Corrente Norte do Brasil (CNB) por volta de $\sim 3^\circ\text{S}$ (ESTON et al., 1986; RICHARDSON; WALSH, 1986). A CNB é originada na bifurcação do ramo sul da Corrente Sul Equatorial, na superfície camada, em torno de 12°S (Figura 3) (DA SILVEIRA; DE MIRANDA; BROWN, 1994; STRAMMA; IKEDA; PETERSON, 1990). Esta bifurcação apresenta variação sazonal relacionada às mudanças anuais dos ventos alísios e, conseqüentemente, da Zona de Convergência Intertropical, atingindo latitudes mais baixas no verão austral e latitudes mais altas no inverno (DA SILVEIRA; DE MIRANDA; BROWN, 1994). Nas camadas rasas ($\sim 150\text{m}$), tanto o CNB quanto a Corrente Sul Equatorial têm características de Água Equatorial Tropical com alta salinidade (aproximadamente 36 ups) e temperaturas variando entre 26 e 30°C (DA SILVEIRA; DE MIRANDA; BROWN, 1994; STRAMMA; IKEDA; PETERSON, 1990; STRAMMA; SCHOTT, 1999).

Figura 3. Mapa das principais correntes oceânicas nas proximidades do Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo vermelho). CNB (Corrente Norte do Brasil), CSEc (ramo central da Corrente Sul Equatorial), CSEs (ramo sul da Corrente Sul Equatorial).



2.2 MODELAGEM NUMÉRICA

O trabalho consiste na implementação de dois modelos numéricos hidrodinâmicos. O modelo hidrodinâmico utilizado para a caracterização do padrão de correntes locais, foi desenvolvido pelo autor no software Delft3D (Deltares, versão *open source*). O modelo possui diversos módulos, incluindo o hidrodinâmico (DELFT-FLOW) que funciona em três dimensões (3D). O modo DELFT-FLOW resolve a equação de Navier-Stokes para um fluido incompressível. Na equação do momento vertical as acelerações verticais são desprezadas, o que leva à equação da pressão hidrostática. Dentro do modelo as velocidades verticais são calculadas a partir da equação de continuidade, equação de momento, a equação de advecção-difusão e modelo de turbulência. O sistema de equações para o modelo de fluxo tridimensional é descrito por LESSER et al. 2004.

Para realizar as simulações de dispersão em meso-escala foram utilizadas as saídas do modelo Regional Ocean Model System (ROMS) entre os anos de 2003 e 2013. Essas

simulações foram fruto de uma parceria com o Dr. Nelson de Almeida Gouveia, mais detalhes das simulações podem ser vistas em Gouveia et al. (2021). Abaixo é apresentado uma descrição das configurações de simulação.

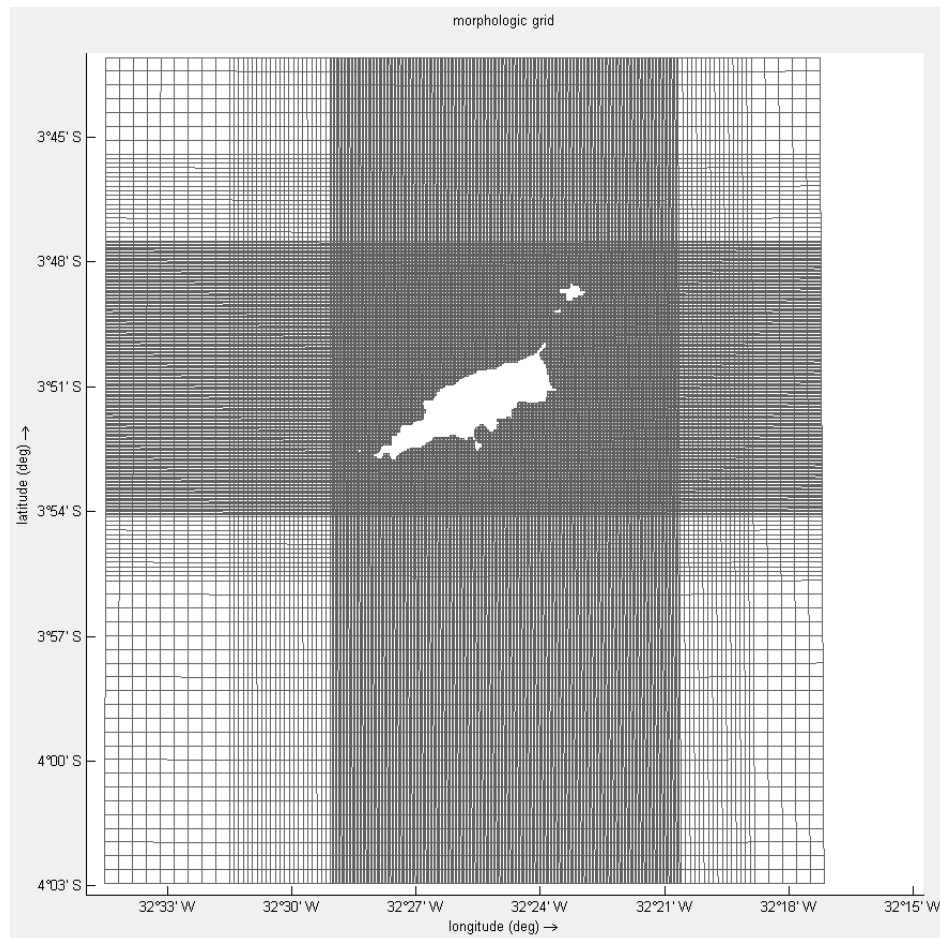
As simulações foram realizadas para a porção oeste do oceano Atlântico tropical Norte entre 8°S a 22°N e 20°W a 60°W. A resolução horizontal utilizada foi de 1/12° (~9km em longitude) Essa grade espacial é suficiente para resolver o primeiro raio de deformação baroclínica de Rossby nos trópicos (entre 60 e 230 km) (CHELTON et al., 1998) na região tropical. Considera-se, portanto, que a resolução de 1/12° seja ideal para resolver os processos de mesoescala que serão analisados (como por exemplo: vórtices e retroflexão da corrente Norte do Brasil). 40 níveis verticais sigma foram utilizados.

Para a batimetria foi usado o produto ETOPO1, com resolução espacial de 1 arco-minuto (~ 1,8 km), o qual possui cobertura global, sendo proveniente do banco de dados da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) As forçantes utilizadas no modelo de meso-escala foram: a (i) de vazão de rios, as (ii) atmosféricas, as de (iii) maré, e de (iv) contorno (i.e componentes zonal e meridional de velocidade das correntes oceânicas, temperatura, salinidade altura do nível do mar e velocidade de correntes integradas na vertical (zonal e meridional)).

2.2.1 Modelo local - Delft3D

. Considerando a plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha como região focal, foi elaborada uma grade numérica contendo 281 por 243 elementos quadráticos com nove diferentes resoluções. O gradiente de resolução foi desenvolvido para a obtenção de uma alta resolução espacial na área de interesse (elementos com aproximadamente 60m) e uma menor resolução na borda da grade (elementos com aproximadamente 600 m), correspondente a região profunda onde predomina o movimento geostrófico (Figura 4).

Figura 4 -Grade Numérica construída para a região de Fernando de Noronha, produzida no software Delft3d. Na área focal do estudo, a plataforma insular do Arquipélago de Fernando de Noronha, a resolução da grade é de 60 metros



Os dados *in situ* utilizados no trabalho foram coletados dentro do projeto de pesquisa “Recifes profundos do Arquipélago de Fernando de Noronha: mapeamento, conectividade e proteção”, coordenado pela Dra. Mirella Costa. A coleta, feita em junho de 2016, incluiu a obtenção de dados biológicos, geomorfológicos e físicos, batimetria, ondas, correntes e marés durante aproximadamente 30 dias, nas porções setentrionais (Mar de Dentro) do AFN.

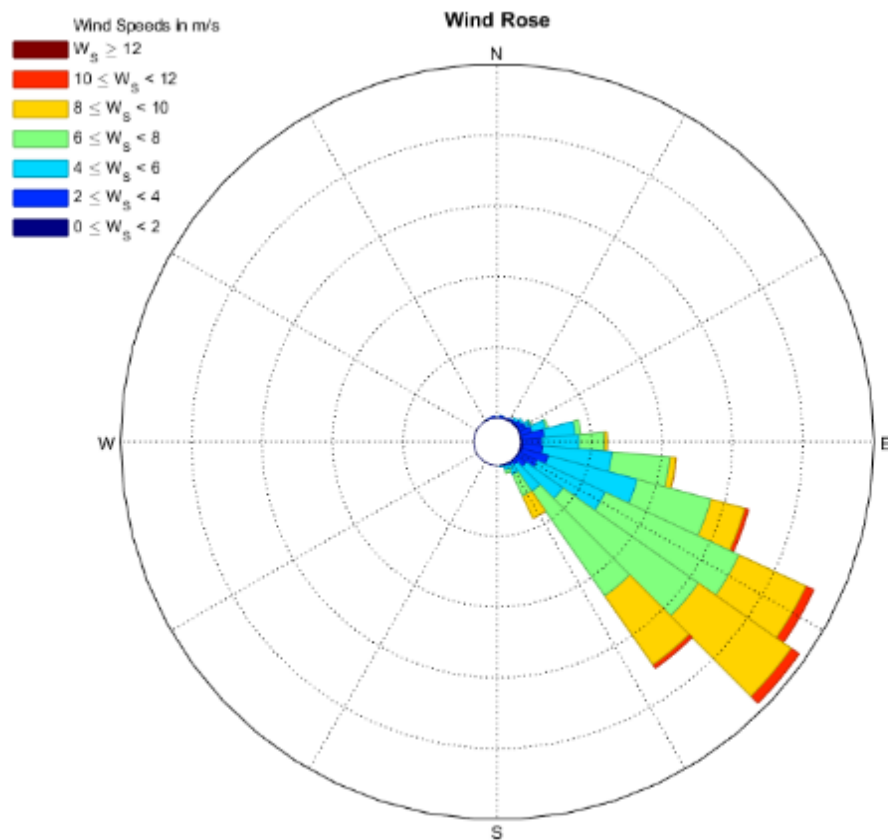
2.2.1 Dados de entrada

Para entender a hidrodinâmica local com alta resolução espacial e temporal foram utilizados dados relacionados às condições de contorno de maré astronômica (Tabela 1) e de ventos provenientes do modelo global da NOAA Wave Watch III (Figura 5) como condições iniciais para o modelo local (Delft 3D).

Tabela 1. Componentes de maré e seus valores retirados do modelo global da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) Wavewatch III utilizados na elaboração do modelo hidrodinâmico costeiro para a região de Fernando de Noronha-PE

Name	Amplitude [m]	Phase [deg]
MK3	0.014	46
K2	0.078	164
S2	0.287	163
T2	0.017	163
M2	0.805	149
NU2	0.032	142
N2	0.17	141
MU2	0.044	58
2N2	0.022	132
MM	0.023	144
MSF	0.032	322
O1	0.047	167
P1	0.017	241
K1	0.052	247
Q1	0.016	117

Figura 5. Dados de ventos do ano de 2016 na região de Fernando de Noronha - PE retirados do modelo global da National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA), Wavewatch III, utilizados na elaboração do modelo hidrodinâmico costeiro



Na campanha, dados de batimetria da plataforma insular do arquipélago foram obtidos usando-se um ecobatímetro (50 kHz – 200 kHz) operando a uma frequência de registro de 1 segundo, e perfis perpendiculares à linha de costa no sentido praia à quebra da plataforma, com espaçamento longitudinal de 1 km entre eles. A batimetria coletada pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM) que utiliza da tecnologia de aerolevanteamento a laser do fundo marinho, conhecida internacionalmente como Airborne Laser Bathymetry (ALB) também foi usada, assim como as informações batimétricas que constam nas cartas náuticas nº 2200 e nº52 da Marinha Brasileira.

Com a finalidade de representar a batimetria local, foi feita a interpolação de dois conjuntos de dados batimétricos, um com maior resolução e mais próximos da costa (dados coletados in situ e provenientes da CPRM) e o outro com menor resolução ao largo da

plataforma insular (dados das Cartas Náutica). Os dados foram georreferenciados no software ARCGis interpolados no Delft3D (Figura 6 e Figura 7).

Figura 6. Batimetria interpolada na grade numérica da região de Fernando de Noronha produzida no software Delft3D. Os valores batimétricos são provenientes das cartas náuticas de número 52 e 2200 da marinha brasileira assim como dados obtidos pelo Serviço Geológico Brasileiro

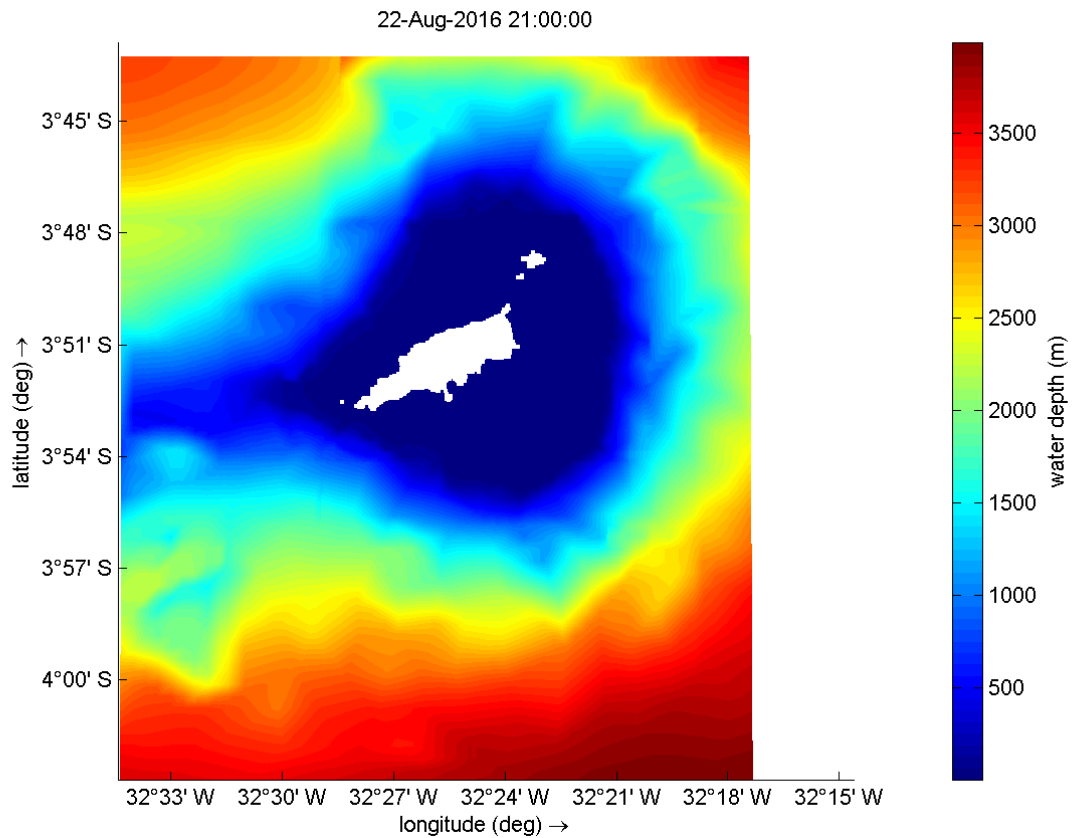
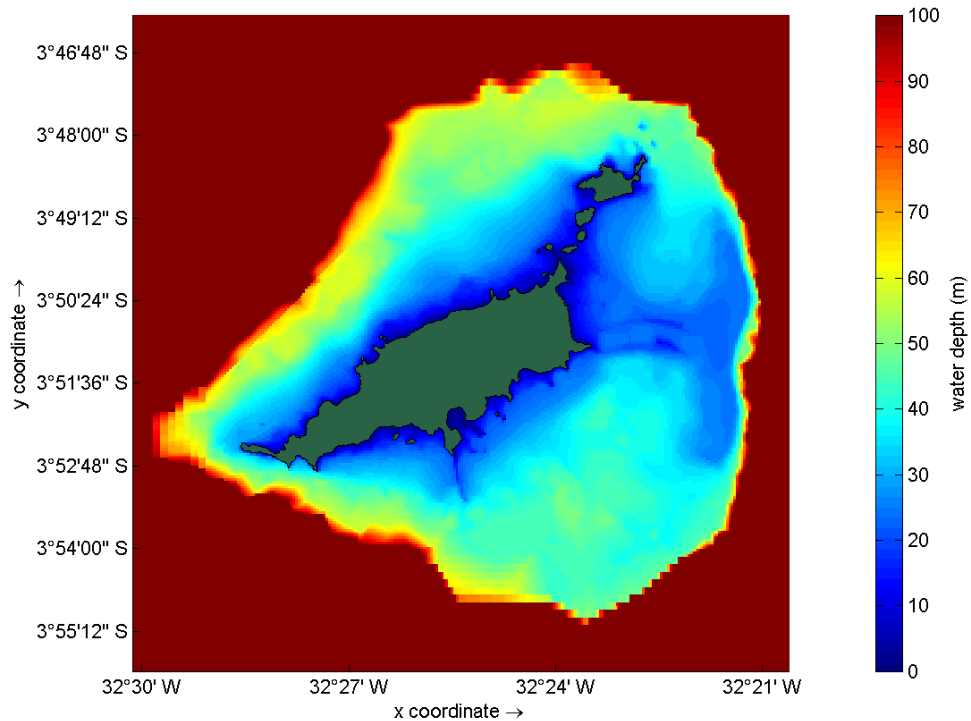


Figura 7. Batimetria da plataforma insular do AFN interpolada na grade numérica gerada no software Delft3d. Os valores batimétricos são provenientes das cartas náuticas de número 52 e 2200 da marinha brasileira assim como dados obtidos pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).



2.2.1.2 Spin-up

Inicialmente foi realizado o spin-up do modelo, que consiste em uma simulação que visa fazer com que o modelo numérico costeiro atinja o equilíbrio dinâmico das soluções das equações de movimento do modelo. Em outras palavras, é onde ocorre o equilíbrio entre a solução das equações e as forçantes do modelo, no modo barotrópico e baroclínico das equações de Navier Stokes. Esta etapa do nosso estudo teve um mês para a estabilização.

2.2.1.3 Avaliação do modelo numérico local

No presente trabalho as séries temporais de correntes, ondas e marés foram obtidas in situ através de um perfilador acústico (Aquadopp profiler - 1MHz) fundeado a aproximadamente 18 m de profundidade no Mar de Dentro e no Mar de Fora. O perfilador, que transmite pulsos sonoros a uma frequência constante na água e quando atingem as partículas suspensas refletem os pulsos de volta, tem seu funcionamento baseado no princípio do efeito

Doppler, onde ondas sonoras têm maior frequência quando estão se aproximando do detector e menor quando estão se afastando. Estas informações foram fundamentais para calibrar e validar o modelo numérico a ser implementado na região

Para identificar a melhor relação entre os dados produzidos pelo modelo, quando comparados com os dados *in situ*, foi feita a calibração ajustando os parâmetros de rugosidade de fundo e viscosidade da água.

O processo de calibração consiste em ajustes nos parâmetros de rugosidade de fundo e viscosidade da água, para encontrar a melhor relação entre os dados produzidos pelo modelo, quando comparados com os dados coletados *in situ*. A verificação da qualidade da validação foi baseada no cálculo do erro médio absoluto relativo (RMAE) para os dados da altura da maré, assim como os das velocidades zonais e meridionais.

Velocidade na componente meridional:

$$\text{RMAE} = \langle (|V_c - V_m| - \Delta V_m) \rangle / \langle |V_m| \rangle$$

Velocidade na componente zonal:

$$\text{RMAE} = \langle (|U_c - U_m| - \Delta U_m) \rangle / \langle |U_m| \rangle$$

Onde V = velocidade meridional, U = velocidade meridional, c = computada, m = medida, $\langle \dots \rangle$ = média, ΔV e ΔU = Erro do equipamento.

O cenário com maior convergência entre dados modelados com a realidade, apresentaram índices de RMAE de 0.0346, 0.2624 e 0.4019 para a variação do nível do mar, velocidade zonal e velocidade meridional respectivamente. (Figura 8, Figura 9 e Figura 10)

Figura 8. O gráfico representa a comparação entre os resultados de altura da superfície do mar computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ.

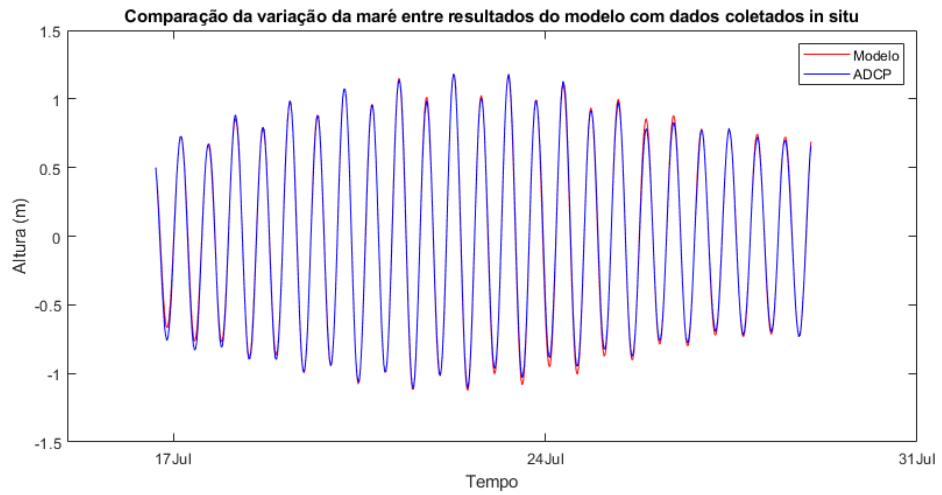


Figura 9. O gráfico representa a comparação entre os resultados da componente zonal da velocidade computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ.

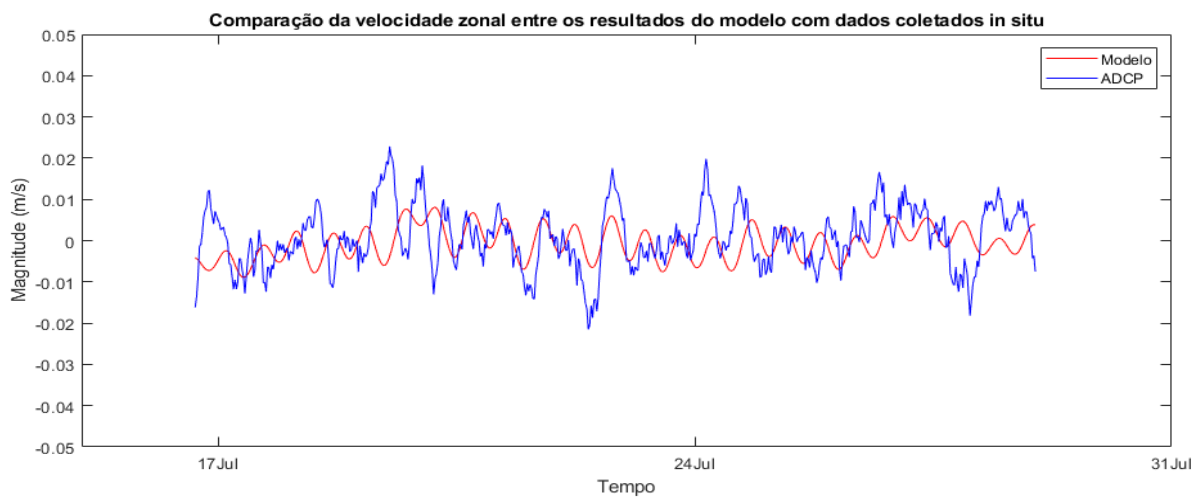
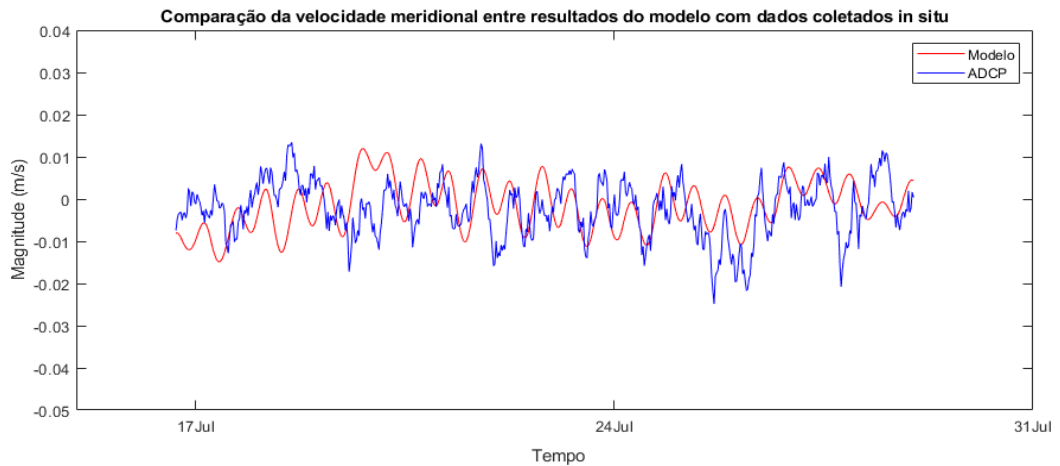


Figura 10. O gráfico representa a comparação entre os resultados da componente meridional da velocidade computados pelo modelo hidrodinâmico, produzido no software Delft3d, com os dados coletados in situ.



O modelo hidrodinâmico de cinco camadas sigmas produzidos para a região foi desenvolvido para representar somente a dinâmica do transporte das massas de água na plataforma insular, utilizando o vento e a maré como forçantes. Segundo a classificação apresentada por van Rijn et al. 2003, o modelo é qualificado como confiável (Tabela 2).

Tabela 2. Qualificação de um modelo hidrodinâmico baseado no cálculo do erro médio absoluto (RMAE) das velocidades de correntes

Qualificação	Velocidade; RMAE
Excelente	< 0.1
Boa	0.1 – 0.3
Razoável	0.3 – 0.5
Fraca	0.5 – 0.7
Ruim	>0.7

Fonte: VAN RIJN et al., 2003

2.3 MODELAGEM BIOFÍSICA

O modelo biofísico utilizado nesse estudo é o *Ichthyop*, desenvolvido por Lett et al., 2008, baseado nas características das larvas e do ambiente. Neste modelo a larva é caracterizada pelas variáveis do estado de desenvolvimento: idade (dias), comprimento (mm), estágio (ovo, saco vitelino, larva), posição (longitude [°E], latitude [°N] e profundidade (m)) e estado (vivo ou morto). Enquanto o ambiente físico é caracterizado pelas variáveis do oceano: velocidade de corrente (ms^{-1}), temperatura (°C) e salinidade (LETT et al., 2008).

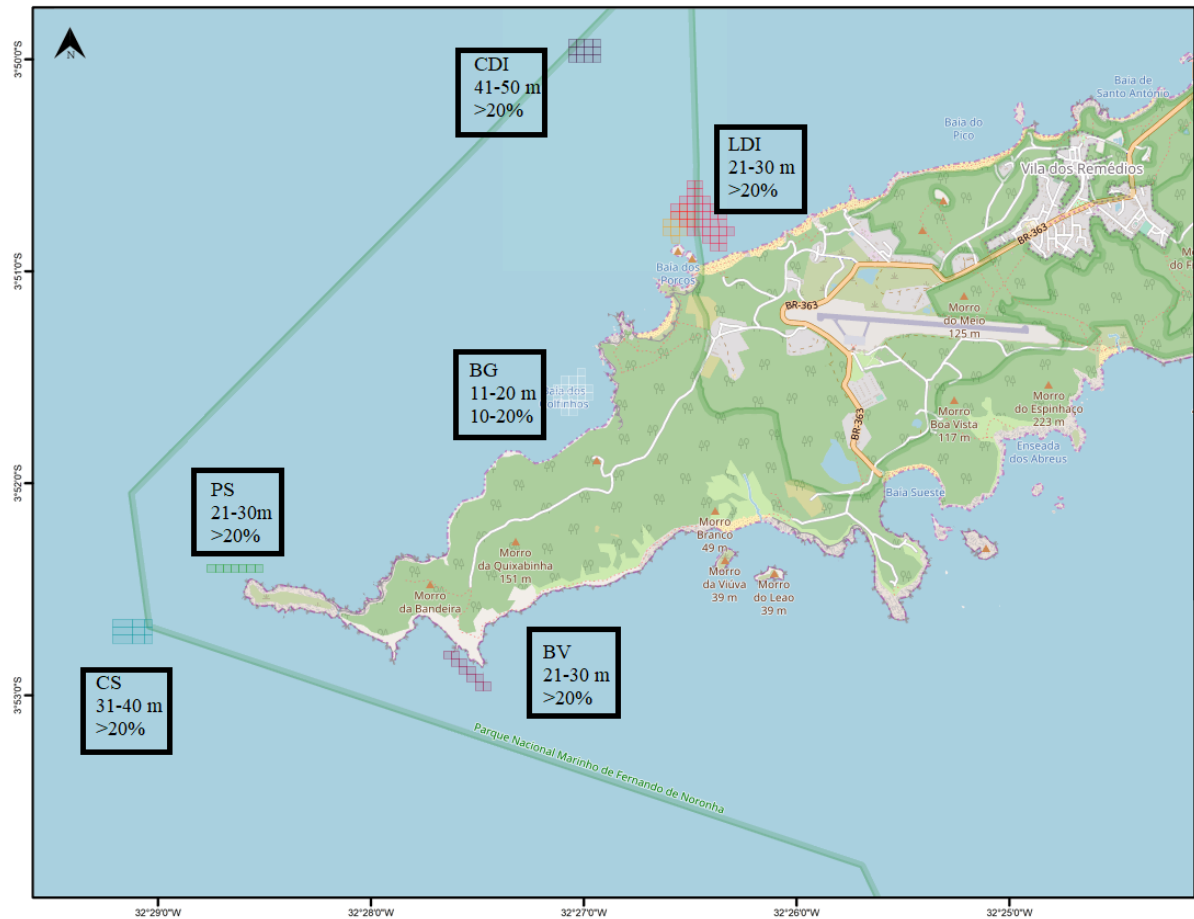
Importante ressaltar que devido à falta de compatibilidade entre os resultados do *Delft 3D* com o *Ichthyop*, os outputs do modelo hidrodinâmico e a grade numérica foram reescritos com a ajuda do software *MATLab*, para que a estrutura do arquivo tivesse a mesma estrutura dos resultados gerados pelo *ROMS* (Regional Ocean Modeling System).

2.3.1 Coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha

As primeiras coletas de organismos bentônicos no AFN foram feitas pela expedição do H.M.S. Challenger entre 1873 e 1876 e os estudos taxonômicos em 1890 (RIDLEY; M.A., 1888). Outros trabalhos visaram a caracterização da comunidade bentônica da zona eufótica ((ESTON et al., 1986; LABOREL, 1969; MAIDA; PADOVANI FERREIRA; CLÁUDIO BELLINI, 1995) . Mais recentemente, a comunidade bentônica localizada até os 50 m de profundidade foi caracterizada pela Matheus (2019) utilizando-se fotográfica subaquática.

No presente trabalho as estações amostrais utilizadas são as demarcadas pela Matheus (2013) para delimitar as zonas das 6 subpopulações de *Montastrea cavernosa*: Baía dos Golfinhos (BG), Cabeço dois Irmãos (CDI), Laje Dois Irmãos (LDI), Ponta da Sapata (PS), Cabeço da Sapata (CS), e Barro vermelho (BV). As quais todas localizadas no Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha. A zonas ocupadas pelas subpopulações de *M. cavernosa* no AFN estudadas no presente trabalho foram delimitadas com base na batimetria da região, sendo definidos 39 quadrados de 60 m², representando a LDI; 15 para BG; 7 para PS; 6 para CS; e 10 para o BV (Figura 11).

Figura 11. Representação das zonas com suas respectivas profundidades e porcentagem de cobertura do coral *Montastraea cavernosa*: Cabeço dois irmãos - CDI (preto), Laje dois irmãos – LDI (vermelho), Baía dos golfinhos - BG (branco), Ponta da Sapata - PS (verde), Cabeço da sapata - CS (azul claro) e Barro vermelho - BV (roxo) , referentes as subpopulações do coral *M. cavernosa* no arquipélago de Fernando de Noronha identificada por Matheus (2019), criado no software *Ichthyop* para a dispersão larval.



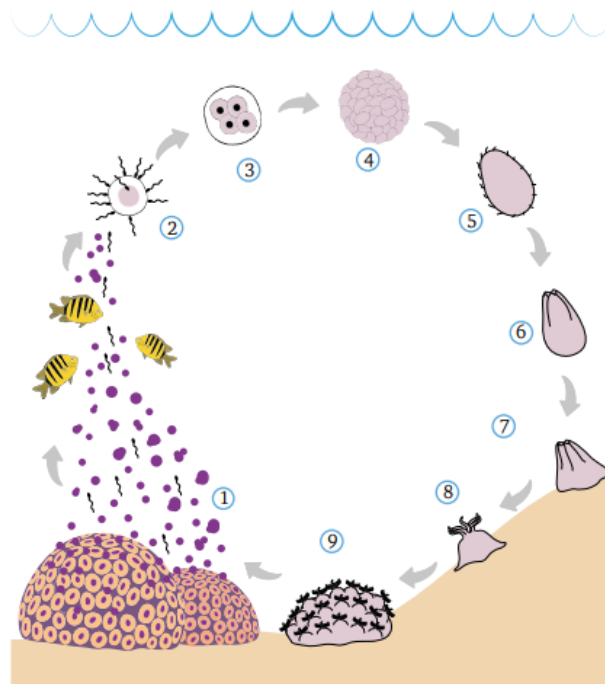
M. Cavernosa possui representantes gonocóricos e desovadores de gametas (Figura 12 e Figura 13), com ovócitos que atingem valores máximos de 0,417 mm. Em 23 de agosto de 2016 foi reportada uma alta concentração de gametas (Figura 14), devido à existência de passeios de mergulhos diários que ocorrem no AFN, infere-se que a liberação dos gametas ocorreu na noite anterior, cinco dias após a lua cheia. Essa suposição é corroborada pela literatura, onde na região equatorial a desova ocorre nos meses de agosto e setembro, no intervalo de 4 à 7 dias após a lua cheia e entre 0:57–1:44 minutos após o pôr do sol (VIZE, 2006).

Figura 12. Coral pétreo *Montastraea cavernosa* no arquipélago de Fernando de Noronha.



. Foto: Zaira Matheus

Figura 13. Ciclo de vida de corais liberadores de gametas: 1) Liberação sincronizada de pacotes de ovócitos e espermatozoides. Vários predadores se alimentam dos gametas liberados. 2) Gametas rapidamente flutuam para a superfície da água, onde ocorre a fecundação. 3) A divisão celular começa poucas horas após a desova. 4) O desenvolvimento do zigoto se dá no primeiro dia. 5) As larvas plânula se desenvolvem e se dispersam com as correntes por alguns dias. 6) Plânulas com mesentérios começam a mudar de forma. 7) As plânulas começam a procurar um local adequado para se assentarem. 8) As plânulas se assentam cerca de uma semana após a desova e se transformam em pólipos fundadores, que começam a secretar o esqueleto calcário. 9) As colônias começam a crescer através de brotamento de pólipos.



Fonte: PIRES et al 2006

Figura 14. Foto da Laje Dois Irmãos na manhã seguinte da desova do coral *Montastraea cavernosa*, em 22 de agosto de 2016.



Foto: Zaira Matheus

Devido à incipiência de dados de comportamento larval de *M. cavernosa*, utilizou-se neste estudo as características da *Montastraea faveolata*. Foi verificado por Vermeij et al., 2006, que para a salinidade da região (~36), o processo de assentamento não ocorre até 200h após a desova, e 90% das plânulas morreram ou se assentaram após 580 e todas morreram após 800 horas (SZMANT; MEADOWS, 2006; VERMEIJ; FOGARTY; MILLER, 2006).

A tabela a seguir delinea as características fundamentais das larvas empregadas em um modelo biofísico, juntamente com os valores adotados no modelo e as referências teóricas das quais as informações foram obtidas. Esses dados são de importância crítica para a investigação do comportamento e dinâmica das larvas em ecossistemas marinhos. A tabela abrange informações relevantes, como o tempo de vida pelágico das larvas, sua migração vertical diária, o número total de larvas por simulação e a época de reprodução, com base nas obras de Vermiji et al (2006) e Szamant et al (2006). Adicionalmente, são fornecidos detalhes sobre o comportamento da linha de costa das larvas, bem como os métodos empregados no modelo biofísico, incluindo a advecção utilizando o método numérico Runge-Kutta de quarta ordem e a dispersão horizontal com um coeficiente de difusão de $1E-9 \text{ m}^2/\text{s}^3$, com base no estudo de (PELIZ et al., 2007).

Tabela 3. Parâmetros utilizados no modelo biofísico *Ichthyop*.

Tempo de vida pelágico	20 dias	<i>Vermiji et al 2006, Szamant 2006</i>
Migração vertical diária	3 dias após liberação	<i>Vermiji et al 2006, Szamant 2006</i>
Migração vertical diária	0m dia – 30m noite	<i>Szamant 2006</i>
Total de larvas por simulação	100.000	
Data	5 dias após a lua cheia	<i>Vermiji et al 2006</i>
Comportamento da linha de costa	bouncing	
Advecção	Runge-Kutta 4	<i>Akemi et al 2019</i>
Dispersão horizontal	1E-9 m ² /s ³	<i>Peliz et al 2007</i>

2.4 EXPERIMENTOS

Com o objetivo de investigar os padrões de dispersão larval e a conectividade que ocorrem em Fernando de Noronha, foram conduzidos três cenários distintos durante a fase metodológica deste estudo. No primeiro cenário, utilizou-se o modelo costeiro desenvolvido no Delft para compreender os padrões de dispersão larval e a conectividade da população de *M. cavernosa* na plataforma insular para o ano de 2016, visando criar o entendimento sobre os padrões de dispersão e conectividade entre as subpopulações. Já nos dois cenários subsequentes, o foco foi investigar o intercâmbio genético entre a população do arquipélago e populações alóctones. Para isso, foram empregados dados provenientes do modelo de mesoescala desenvolvido no ROMS. Essa abordagem metodológica permitiu obter informações valiosas sobre a dispersão e a variabilidade genética da espécie em questão.

2.4.1 Conectividade local

Para entender a conectividade da população de *M. Cavernosa* da plataforma insular do arquipélago de Fernando de Noronha foram utilizados os valores de correntes zonal e meridional simulados pelo modelo produzido pelo autor no Delft3D. Os dados coletados pelo

ADCP foram fundamentais para a viabilidade do modelo costeiro, portanto, a data escolhida para simular a desova ocorreu um dia antes do registro fotográfico, dia 22 de agosto de 2016.

2.4.2 Padrões de dispersão em mesoescala

Devido ao Arquipélago de Fernando de Noronha ser localizado em um monte oceânico, torna-se imprescindível a aplicação de um modelo de mesoescala para investigar o potencial intercâmbio genético entre a população local e populações alóctones. Nesse sentido, foi empregado o modelo desenvolvido no ROMS pelo Dr. Nelson Gouveia, o qual permitiu a simulação das correntes da região ao longo de um período de 10 anos.

A incipiência de dados referentes à época na qual ocorreu a desova nos anos de 2003 a 2013, fez-se necessário estipular a data do evento, o registro de 2016 foi utilizado como referência. Para as simulações meso-oceânicas, foi escolhida a lua cheia compreendida entre os dias 15 de agosto e 15 de setembro de cada, com a liberação de partículas ocorrendo 5 dias a posteriori, às 21:00 horas, conforme a tabela a seguir.

Tabela 4. Dias referentes à lua cheia entre 15 de agosto e 15 de setembro no período de 2003 e 2013. Dados utilizados como base para simular a reprodução do coral *M. cavernosa*.

Lua cheia	Início da simulação	Ano
15 de setembro	20 de setembro	2003
29 de agosto	3 de setembro	2004
15 de agosto	20 de agosto	2005
07 de setembro	12 de setembro	2006
28 de agosto	2 de setembro	2007
17 de agosto	22 de agosto	2008
4 de setembro	9 de setembro	2009
24 de agosto	29 de agosto	2010
12 de setembro	17 de setembro	2011
31 de agosto	5 de setembro	2012
21 de agosto	26 de agosto	2013

Com o objetivo de identificar as possíveis fontes larvais para o Arquipélago de Fernando de Noronha, foi conduzida uma simulação de *backtracking* no modelo biofísico. Nesse processo, as partículas foram inicializadas no arquipélago e, em seguida, dispersas retroativamente no tempo, seguindo uma migração vertical diária até atingirem a idade de 4 dias, para posteriormente serem dispersas de forma passiva. A cada ano analisado, as partículas lagrangeanas foram liberadas após 20 e 30 dias da data de desova, representando larvas com um período de vida larval de 20 e 30 dias, respectivamente.

Tabela 5. Datas utilizadas no modelo retroativo no tempo para o estudo da dispersão larval do coral *M. cavernosa* em cada ano analisado.

Início da simulação com 30 dias de PLD	Início da simulação com 20 dias de PLD	Final da simulação	Ano
20 de outubro	10 de outubro	20 de setembro	2003
3 de outubro	23 de setembro	3 de setembro	2004
19 de setembro	9 de setembro	20 de agosto	2005
11 de outubro	01 de outubro	12 de setembro	2006
2 de outubro	22 de setembro	2 de setembro	2007
21 de setembro	11 de setembro	22 de agosto	2008
09 de outubro	29 de setembro	9 de setembro	2009
28 de setembro	18 de setembro	29 de agosto	2010
17 de outubro	7 de outubro	17 de setembro	2011
5 de outubro	25 de setembro	5 de setembro	2012
25 de setembro	15 de setembro	26 de agosto	2013

3 RESULTADOS

3.1 MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico elaborado para plataforma insular do AFN, aplicado em agosto de 2016, indica que o transporte residual foi principalmente em direção leste (Figura 15). Em contrapartida, a análise dos resultados referentes aos períodos de maré mostrou que na maré enchente a movimentação de água tem sentido sudeste-noroeste, ocorrendo convergência na porção setentrional e divergência na porção meridional da plataforma insular. Na maré vazante, a água se desloca em direção oeste-Leste. Os resultados mostram a inversão do sentido das correntes médias entre os dois períodos de maré, exceção feita à região leste da porção setentrional, onde o sentido dessas correntes foi predominantemente leste, independente da maré (Figura 16). Por outro lado, a análise dos dados obtidos relacionados à variação do nível do mar revelou que a desova do coral *M. cavernosa* ocorreu no estofa de maré enchente (Figura 17).

Figura 15. Padrões de correntes modeladas no Arquipélago de Fernando de Noronha no provável horário da desova coral *Montastrea cavernosa*. As setas indicam a direção da corrente, já a magnitude é representada na escala de cores

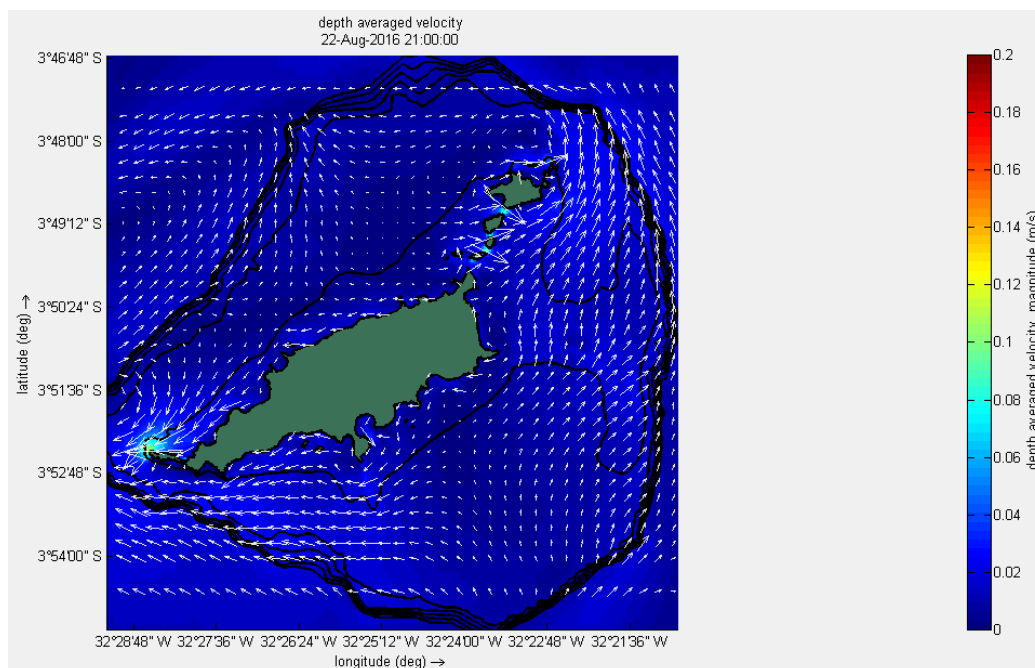


Figura 16. Distribuição da velocidade média na coluna de água na região do Arquipélago de Fernando de Noronha, no período de maré enchente.

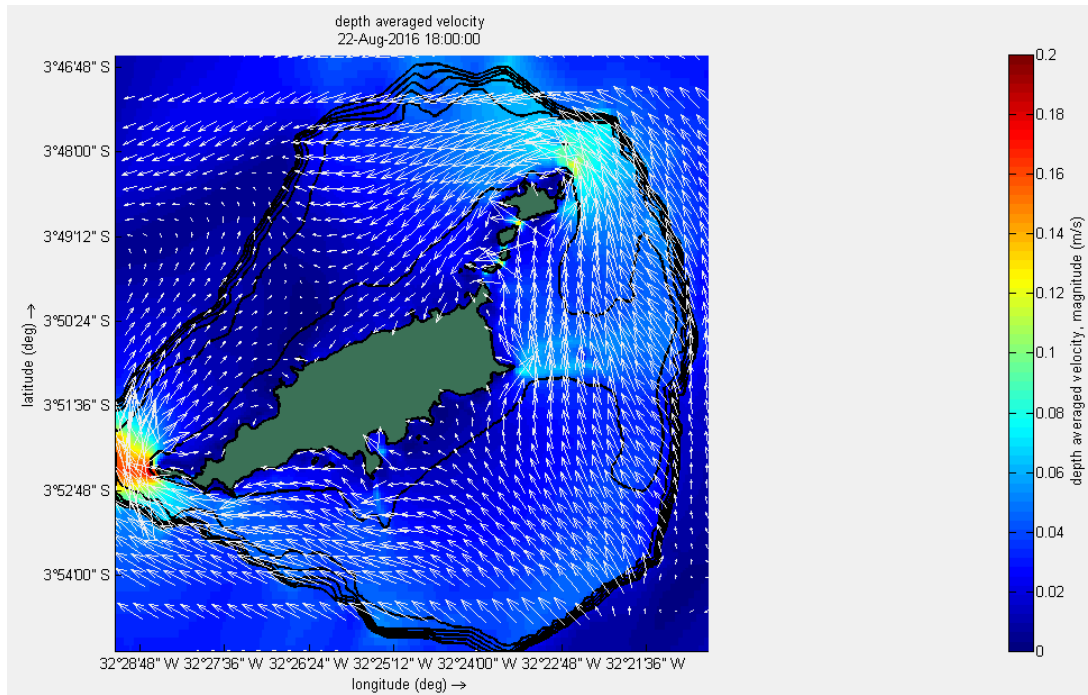
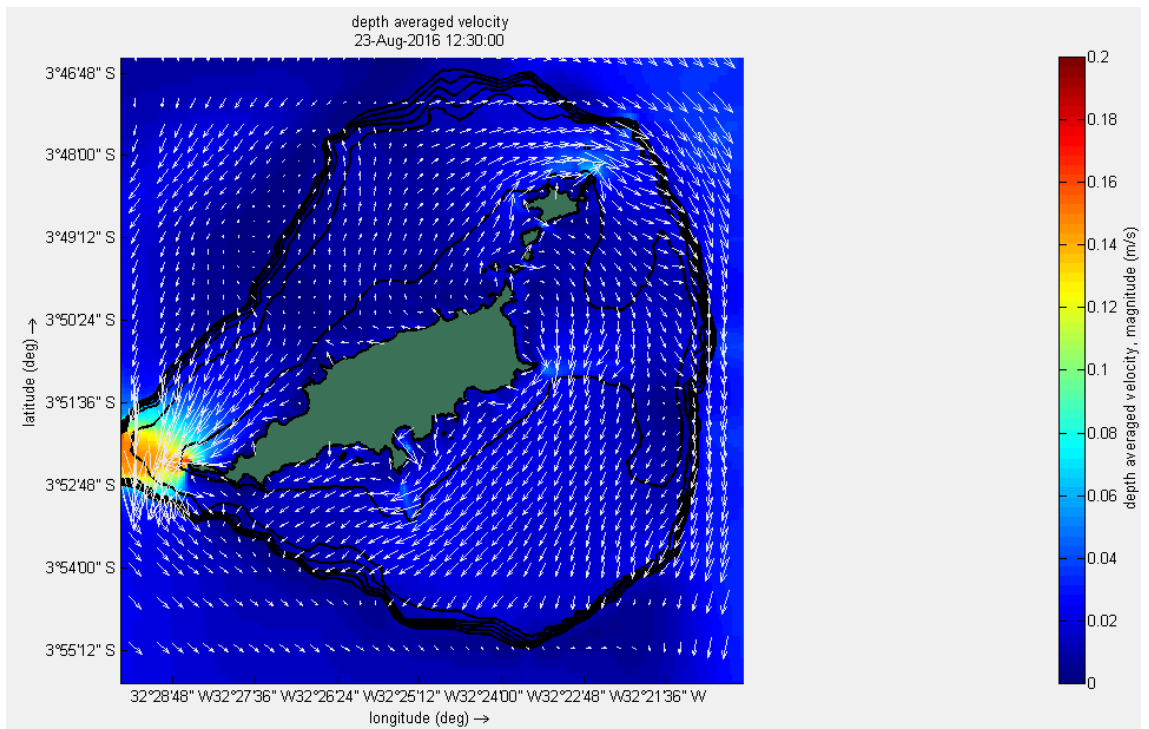


Figura 17. Distribuição da velocidade média na coluna de água na região do Arquipélago de Fernando de Noronha, no período de maré vazante.

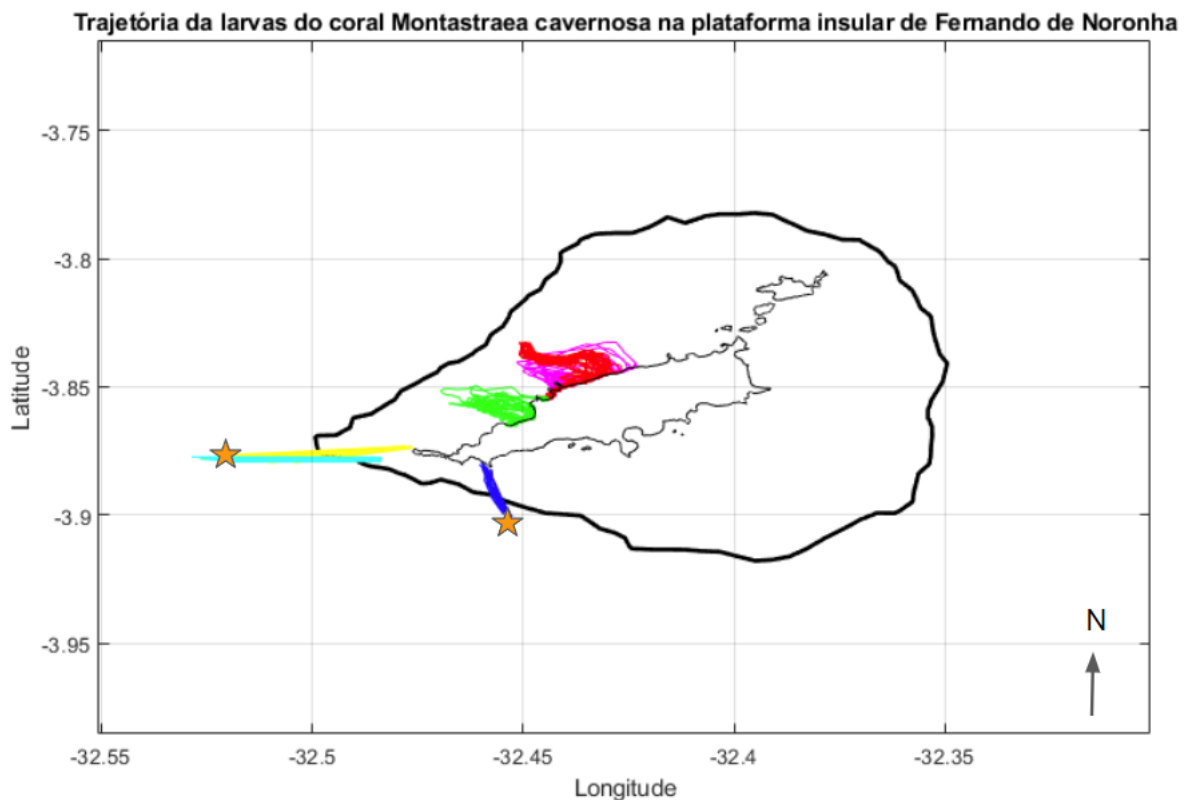


3.2

CONECTIVIDADE LOCAL

No primeiro cenário elaborado para estudar as trajetórias larvais e conectividade da população de *M. cavernosa* no AFN, os resultados mostram que no BV, CS e na PS três das seis subpopulações analisadas atuam como exportadoras de larvas, isto é, saem da plataforma insular. Em contraposição, a trajetória larval das subpopulações da BG, CDI e LDI evidenciam sua permanência na plataforma insular. Todos estes resultados permitiram identificar a existência de duas regiões onde potencialmente ocorre conectividade (Figura 18).

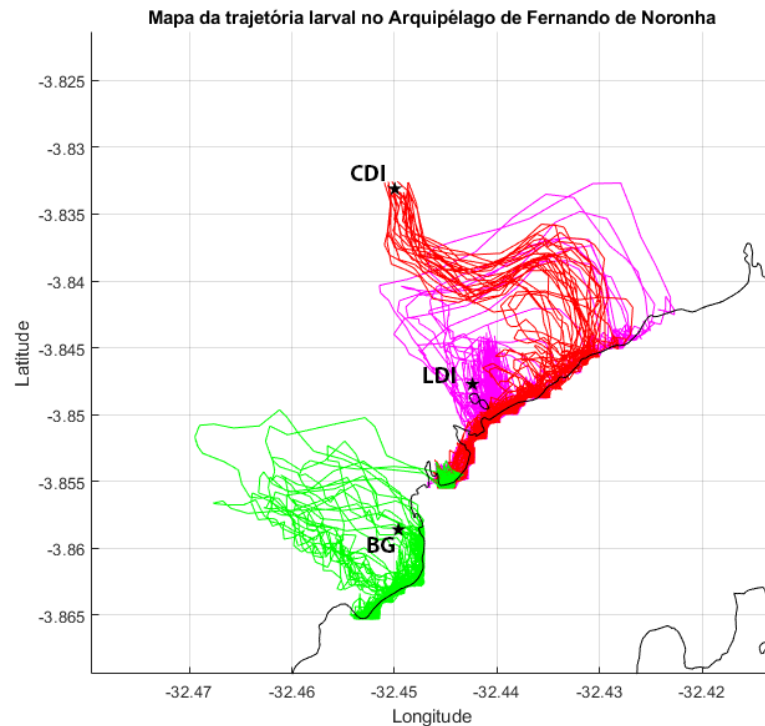
Figura 18. Trajetórias larvais do coral *Montastraea cavernosa* na plataforma insular de Fernando de Noronha (preto), calculadas pelo modelo biofísico desenvolvido para agosto de 2016. As cores representam a origem das larvas, Cabeço Dois Irmãos (vermelho), Laje Dois Irmãos (roxo), Baía dos Golfinhos (verde), Ponta da Sapata (amarelo), Cabeço da Sapata (azul claro), Barro Vermelho (azul marinho). As estrelas laranjas representam as trajetórias que foram exportadas da plataforma insular



Observando apenas as subpopulações nas quais a trajetória das larvas de *M. cavernosa* ficou restrita à plataforma insular, os resultados obtidos indicam que a Baía dos Golfinhos seria uma área de auto recrutamento da espécie, isto é, as larvas retornam

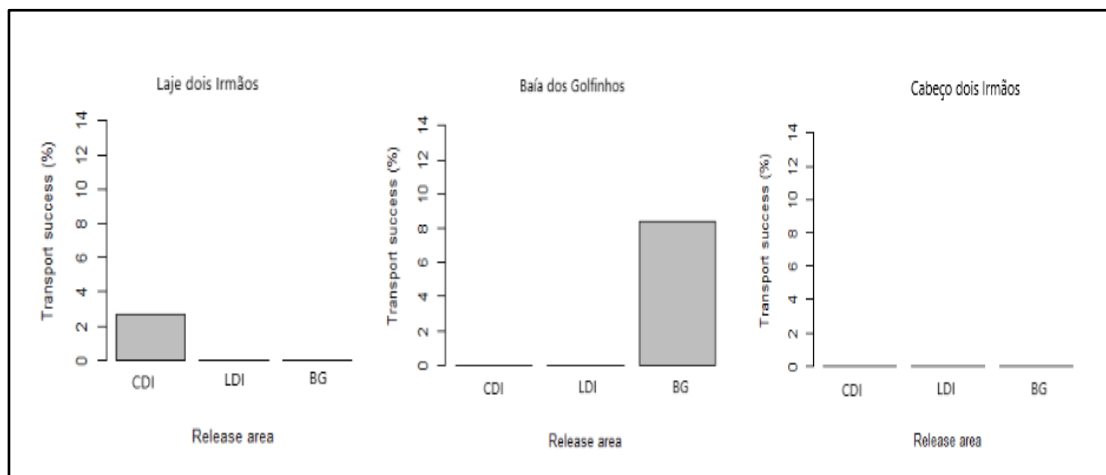
para se assentar no local de origem. Os resultados mostram, ao que tudo indica, a possível troca genética entre os corais mesofóticos da CDI e os corais rasos da LDI. (Figura 19)

Figura 19. Trajetórias das larvas do coral *Montastraea cavernosa*, provenientes das zonas Baía dos Golfinhos (verde), Cabeço Dois Irmão (vermelho), Laje Dois Irmãos (rosa) para o mês de agosto de 2016. Resultados obtidos através do modelo biofísico *Ichthyop*.



A análise da taxa de sucesso no transporte das larvas na Baía dos golfinhos evidenciou que a taxa de auto recrutamento foi de aproximadamente 9%, sugerindo que no período de estudo não houve aporte de larvas de outras subpopulações na BG. Em contrapartida, a subpopulação de corais rasos da Laje Dois Irmãos recebeu aporte larval da subpopulação de corais mesofóticos do CDI, sendo a taxa de sucesso no transporte em de aproximadamente 2% (Figura 20).

Figura 20. Resultados obtidos pelo modelo biofísico. Cada gráfico representa uma área como sumidouro, sendo apresentada a taxa de sucesso do Cabeço dois irmãos (CDI), Laje dois irmãos (LDI) e Baía dos Golfinhos (BG) de atuarem como fonte para a respectiva área.



3.3 RESULTADOS DE MESOESCALA

3.3.1 Arquipélago de Fernando de Noronha como Fonte

Nesta seção de resultados, são apresentados os achados do segundo cenário o qual utilizou-se do modelo hidrodinâmico de mesoescala para identificar as possíveis trajetórias das larvas do coral *M. cavernosa* da BV, CS e na PS, as quais exportam larvas para além da plataforma insular, no período compreendido entre os anos de 2003 e 2013 (Anexo 1 ao Anexo 11).

A Figura 21, baseada nos dados de 2012, mostra a tendência média de chegada das larvas na plataforma continental norte brasileira, na região compreendida entre os estados do Ceará e Pará com probabilidades de auto recrutamento no arquipélago para larvas que conseguem se assentar novas, em até dois dias após estarem aptas. No entanto, as Figura 22 e Figura 23 demonstraram que ocorreram variações significativas em relação a essa tendência média. A Figura 22 ilustra o ano de 2008, em que as larvas atingiram áreas mais ao norte da plataforma continental, chegando até o estado do Amapá. Já a Figura 23 mostra o ano de 2011, em que as larvas alcançam áreas mais ao sul, chegando até o estado do Rio Grande do Norte. Esses resultados indicam a existência de anos com desvios em relação à tendência média de dispersão larval, possivelmente relacionados a fatores ambientais ou climáticos. Essas

descobertas são relevantes para a compreensão da dinâmica de dispersão larval do *M. cavernosa* no arquipélago de Fernando de Noronha e podem contribuir para estratégias de conservação e manejo dos recifes de coral na região.

Figura 21. Distribuição de kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2012. Representando a média ocorrida no período de 2003 a 2013. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).

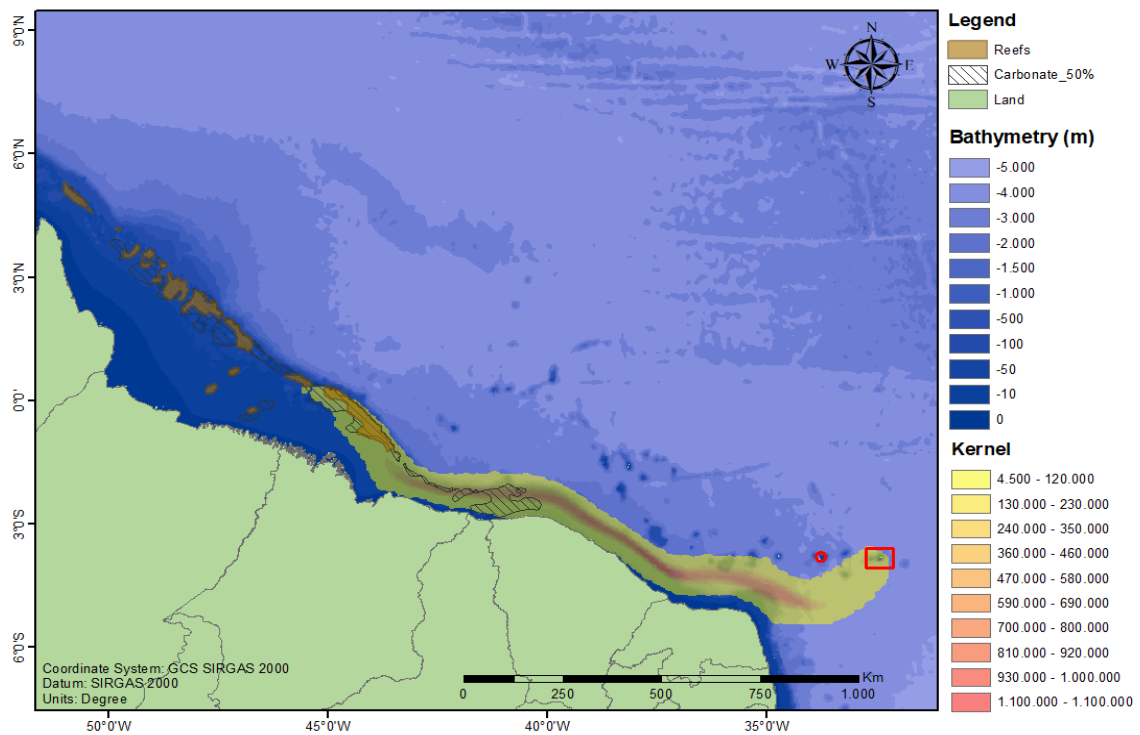


Figura 22. Distribuição de kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2008. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).

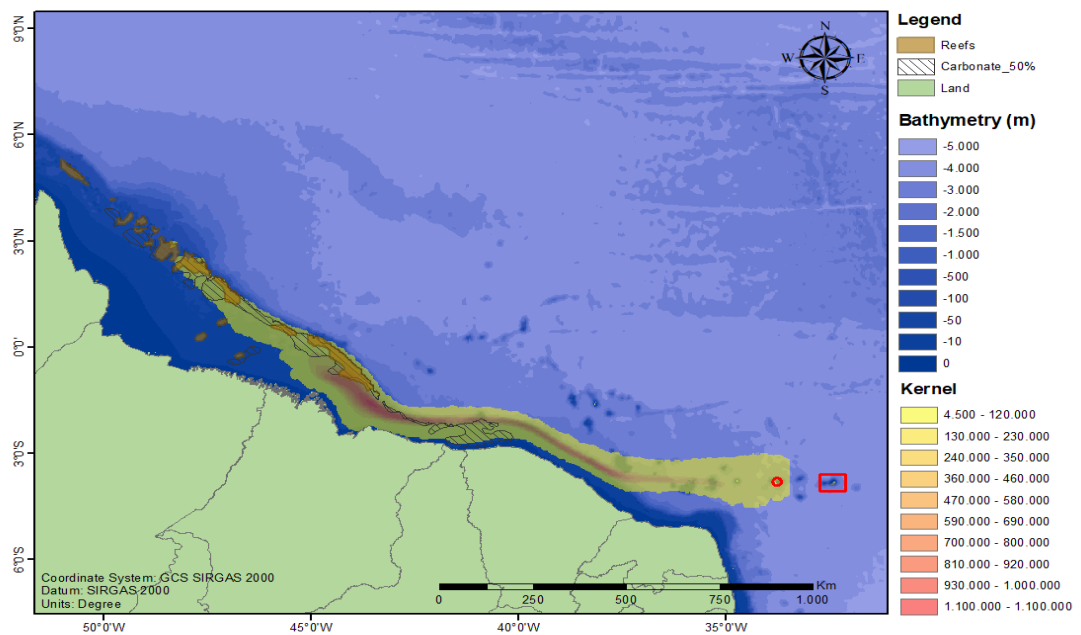
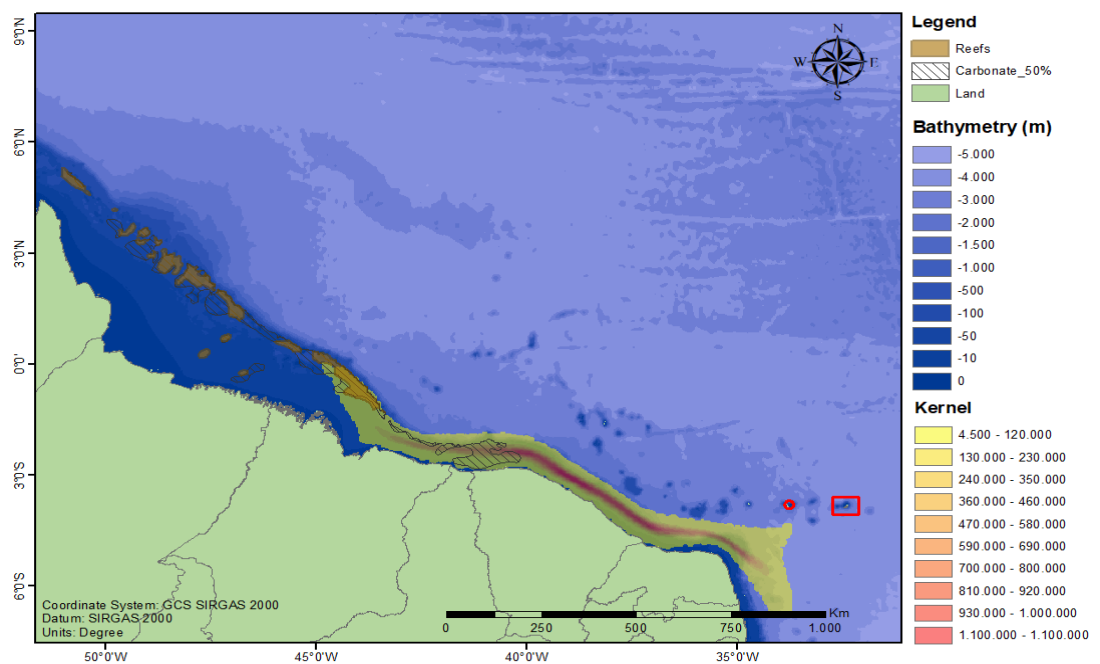


Figura 23. Distribuição de kernel representando os últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2011. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



3.2.2 Arquipélago de Fernando de Noronha como sumidouro

A presente seção apresenta os resultados do modelo biofísico que calculou o *backtracking* das trajetórias de dispersão das larvas do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, com o objetivo de identificar os locais em que as colônias deveriam estar localizadas para que, durante o período de desova, as larvas alcançassem o arquipélago. As análises foram realizadas considerando as possíveis trajetórias ocorridas entre os anos de 2003 e 2013.

Dos anos analisados, com exceção de 2008, os resultados do modelo indicaram que nenhum dos locais sugeridos seria habitat natural da espécie (Anexo 12 ao Anexo 22). Isso torna pouco provável que, nesses anos, o Arquipélago de Fernando de Noronha tenha servido como um sumidouro larval para populações alóctones, conforme ilustrado Figura 24, utilizando-se dos dados de 2012.

No entanto, no ano de 2008, o Arquipélago de Fernando de Noronha mostrou-se um possível sumidouro de larvas com um período de vida larval de 30 dias, provenientes das colônias de coral *Montastraea cavernosa* da Cadeia Norte, como demonstrado na Figura 25

Figura 24. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de *backtracking* de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2012, considerando 20 dias de tempo de vida larval. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).

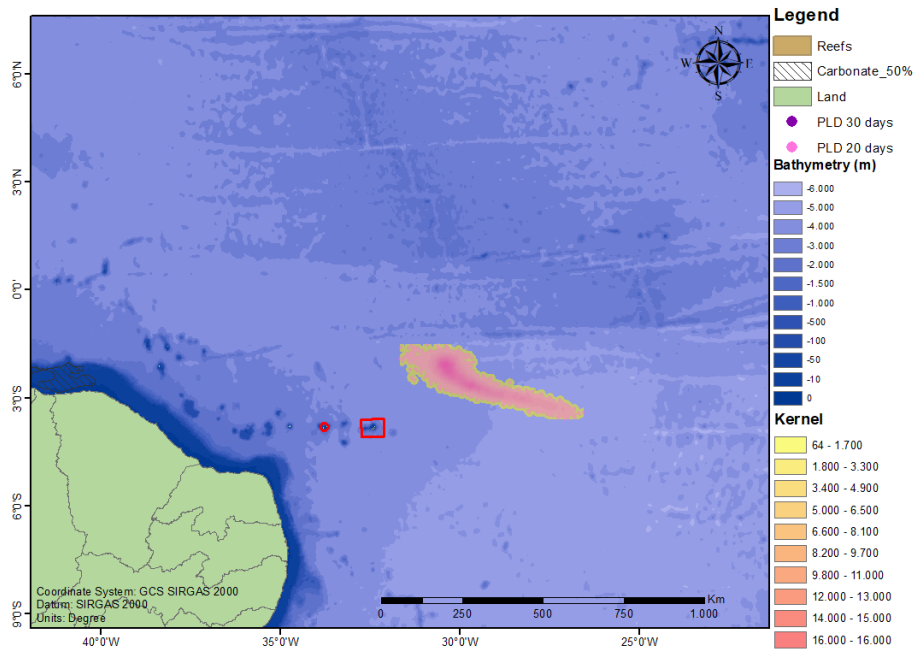


Figura 25. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de *backtracking* de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* do Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2012, considerando 30 dias de tempo de vida larval. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).

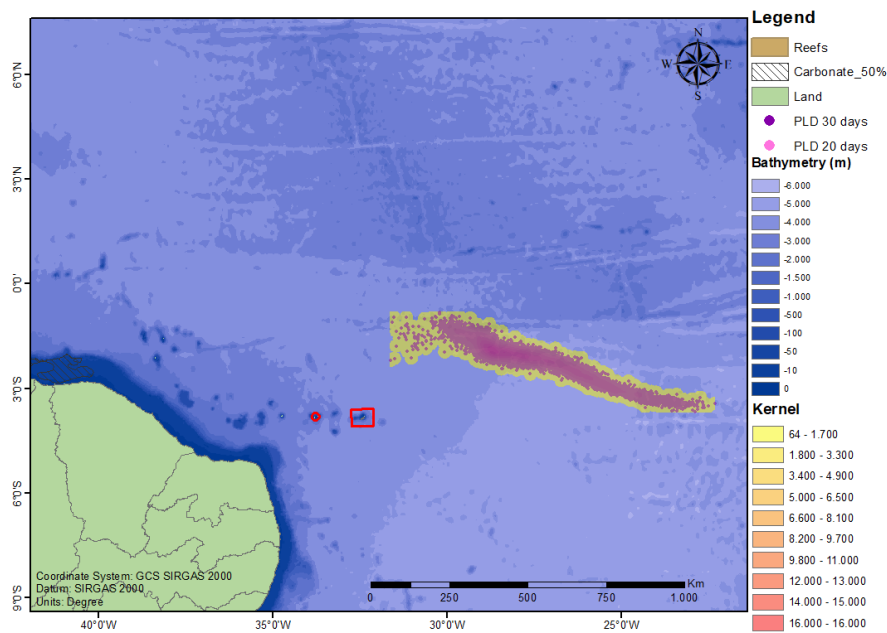
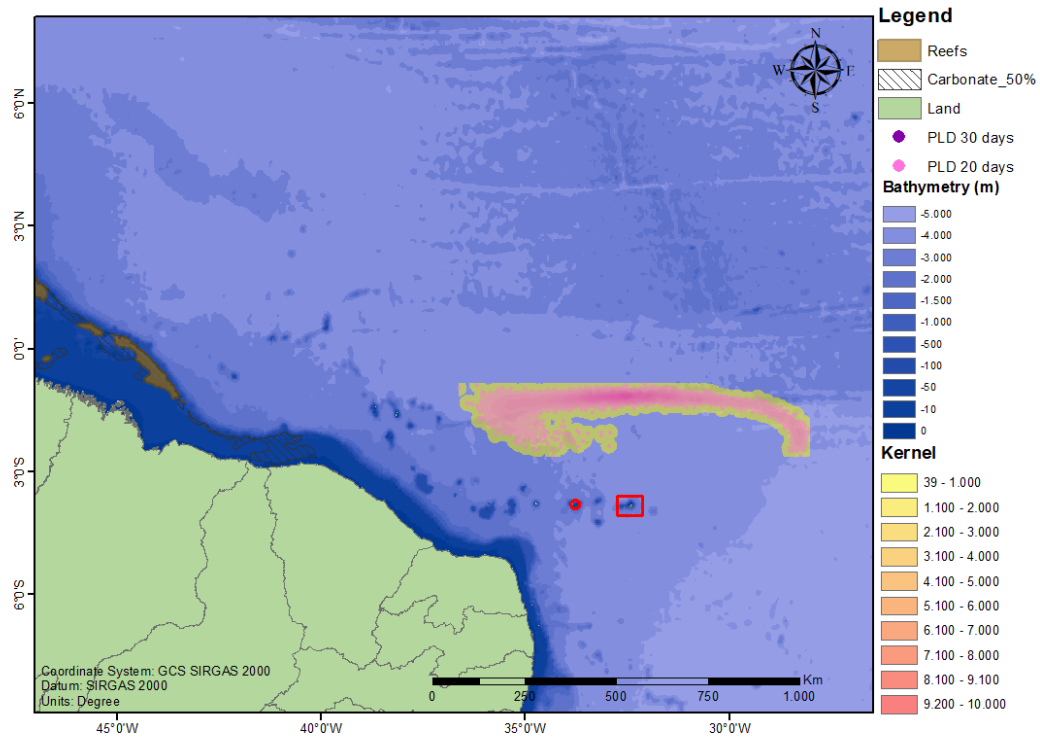


Figura 26. Distribuição de kernel representado o final das trajetórias de *backtracking* de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2008. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



4 DISCUSSÃO

Conectividade entre ambientes isolados, como ilhas oceânicas, são chave para a manutenção das populações, especialmente aquelas exploradas pela pesca ou sujeitas a impactos climáticos (COWEN; SPONAUGLE, 2009; SELKOE et al., 2016). Simulações feitas a partir de imagens de satélite indicam que o estoque de lagostas (Palinuridae) da região Norte, pode ser sustentado pelas larvas provenientes do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atol das Rocas e o Arquipélago de Fernando de Noronha via dispersão larval (RUDORFF et al., 2007). Mais recentemente, estudos da genética do coral pétreo *Mussismilia hispida* mostram a existência de conectividade entre as ilhas oceânicas e o litoral norte brasileiro (PELUSO et al., 2018). O modelo biofísico desenvolvido no presente trabalho evidenciou que as subpopulações do coral *M. cavernosa*, que habitam a porção oeste da plataforma insular, atuam como importantes exportadores larvais para a plataforma continental norte brasileira, entretanto o oposto é incerto.

As análises das trajetórias baseado nos resultados da dispersão larval da espécie de coral *M. cavernosa* produzidas pelo *Ichthyop* permitiu identificar, claramente, a existência de três padrões de distribuição: (i) Exportação larval para a plataforma continental norte/nordeste brasileira, (ii) auto recrutamento (iii) Conectividade vertical. Esses mesmos padrões foram identificados em estudos recentes de conectividade baseados em modelagem numérica, para *M. cavernosa* (STUDIVAN; VOSS, 2018) e outras espécies de corais (BRIDGE et al., 2012; MELLIN et al., 2019; THOMAS et al., 2015) na Grande Barreira de Corais da Austrália.

Além disso, os padrões de correntes desenvolvidos pelo modelo hidrodinâmico na plataforma insular do arquipélago de Fernando de Noronha, mostram a formação de convergência na porção central da parte meridional e divergência na porção setentrional, no período de maré enchente. Estes padrões são análogos aos estudos de propagação de ondas de maré em canais estuarinos (MACIEL; CHACALTANA; RIGO, 2003; NASCIMENTO; CHACALTANA; PICCOLI, 2013). Apesar da convergência produzida por ondas de gravidade serem amplamente estudadas no âmbito da dinâmica costeira (DAVIDSON-ARNOTT; BAUER; HOUSER, 2019), ainda são escassos os estudos feitos sobre a convergência produzida por ondas de maré em ilhas oceânicas. Os padrões de correntes de mesoescala mostraram que as partículas saem do arquipélago de Fernando de Noronha pelo ramo central da Corrente Sul Equatorial em direção à costa norte brasileira, e as que chegam são por uma contracorrente proveniente da Corrente Norte do Brasil (GOUVEIA; GHERARDI; ARAGÃO,

2019). Uma importante região no norte do Brasil, afetada por esse padrão de circulação, é o Grande Sistema de Recifes do Amazonas (GARS). Recentemente, estudos destacaram a importância do Grande Sistema de Recifes da Amazônia (GARS) e seu potencial de atuar como corredor de espécies entre o Caribe e Brasil (e.g. FRANCINI-FILHO et al., 2018; MOURA et al., 2016). Apesar de não necessariamente receber larvas de *M. cavernosa*, abordadas aqui, outras espécies podem ter como destino essa região. No limite sul do GARS, na região do Parcel Manuel Luiz, estudos como de CORDEIRO et al. (2021) mostram a presença de *Montastrea Cavernosa*. Os resultados do modelo biofísico aqui apresentado, indicam a probabilidade de o arquipélago de Fernando de Noronha servir de fonte larval para a região.

Estudos realizados sobre os corais da Grande Barreira de Corais na Austrália, mostram que o auto recrutamento é um mecanismo importante na permanência e manutenção das metapopulações recifais, e, que a maior conectividade é um fator de resiliência (CONNOLLY; BAIRD, 2010; SAMMARCO, 1994; THOMAS et al., 2015; UNDERWOOD et al., 2009). No presente trabalho a taxa de auto recrutamento obtida na Baía dos Golfinhos foi de 9%, a existência desse padrão é um indicativo da importância dessa área de *M. cavernosa* como fonte para as populações locais (e.g. CONNOLLY; BAIRD, 2010; SAMMARCO, 1994; THOMAS et al., 2015; UNDERWOOD et al., 2009).

Em várias regiões do mundo, tem sido constatado que os recifes mesofóticos têm papel relevante no fornecimento de larvas para outras subpopulações (BONGAERTS et al., 2010; BONGAERTS; SMITH, 2019; BRIDGE et al., 2012; LAVERICK et al., 2018; MELLIN et al., 2019). Nesse sentido, e considerando que os resultados apresentados evidenciam a existência de conectividade vertical de 1% no AFN, a proteção dos recifes mesofóticos do Cabeço Dois Irmãos são fundamentais para a manutenção da subpopulação da Laje Dois Irmãos frente aos possíveis impactos antrópicos os quais os corais rasos estão mais propensos.

Esses resultados indicam uma fragilidade na recomposição genética da população de *Montastraea cavernosa* em Fernando de Noronha. A ausência de locais adequados para a colonização da espécie, com exceção do ano de 2008, ressalta a importância da conservação desse arquipélago como um habitat crítico para a sobrevivência e a manutenção da diversidade genética dessas populações., evidenciando a necessidade de uma maior frequência amostral das subpopulações da *M. cavernosa*, assim como de estudos sobre o ciclo de vida da espécie. Revisitar este sistema no futuro, à medida que modelos de circulação de maior resolução e conjuntos de dados especializados de zooplâncton se tornarem disponíveis, será importante para validar ainda mais nossos resultados

Embora os modelos de circulação possam ter limitações em termos temporais e de resolução espacial, a modelagem biofísica fornece uma visão inicial valiosa da dispersão larval. Essas informações podem ser complementadas por outras técnicas e estudos genéticos (COWEN; SPONAUGLE, 2009; ENDO et al., 2019; LAVERICK et al., 2018; PARIS; CHÉRUBIN; COWEN, 2007; PELUSO et al., 2018; WERNER; COWEN; PARIS, 2007). Os padrões identificados através do modelo desenvolvido no presente trabalho, permitem inferir que o arquipélago é um local de importante exportador larval, porém raramente se comporta como sumidouro. O estudo evidenciou a importância da área Marinha Protegida do Arquipélago Fernando de Noronha, fundamental para a manutenção e preservação da biodiversidade local e da plataforma norte brasileira.

A compreensão desses processos de dispersão larval, em função da hidrodinâmica nas diferentes escalas, é de suma importância para a compreensão da biodiversidade local e regional. Padrões esses que precisam ser compreendidos para subsidiar a avaliação de possíveis impactos de alterações nos padrões de correntes em função de mudanças do clima.

5 CONCLUSÕES

O estudo, que teve como propósito identificar os padrões de conectividade no Arquipélago Fernando de Noronha, demonstrou que a região atua principalmente como exportador larval para a plataforma continental norte e nordeste do Brasil. No entanto, existem também padrões de auto recrutamento e de conectividade vertical.

Mesmo considerando as limitações decorrentes da incipiência de dados referentes à reprodução da *M. cavernosa* na costa brasileira para o modelo de mesoescala, e monitoramento local viabilizando uma série temporal de dados para o modelo local, verificamos ser possível inferir os padrões de trajetórias das larvas. O estudo ressalta a importância da necessidade de um monitoramento da reprodução da *M. Cavernosa*, assim como estudos genéticos, visando um maior entendimento sobre a sua dinâmica populacional.

A continuação em escala temporal de estudos como esse, assim como a aplicação metodológica para outras espécies de fase larval livre nadante, mostra-se fundamental para o conhecimento da dinâmica marinha biológica, assim como embasam a criação de políticas públicas, como criação ou ampliação de Área Marinha Protegida, com intuito da conservação ambiental.

REFERÊNCIA

- ALMEIDA, F. F. M. The Fernando de Noronha Archipelago: a record of a volcanic mount of the South Atlantic. **Stios geológicos e paleontológicos do Brasil**, v. 1, p. 361–368, 2002.
- ARMSTRONG, R. A. et al. Characterizing the deep insular shelf coral reef habitat of the Hind Bank marine conservation district (US Virgin Islands) using the Seabed autonomous underwater vehicle. **Continental Shelf Research**, v. 26, n. 2, p. 194–205, fev. 2006.
- BELLINI, C.; SANCHES, T. M. Reproduction and feeding of marine turtles in the Fernando de Noronha Archipelago, Brazil. **Marine Turtle Newsletter**, v. 74, n. 1, p. 12–13, 1996.
- BONGAERTS, P. et al. Assessing the ‘deep reef refugia’ hypothesis: focus on Caribbean reefs. **Coral reefs**, v. 29, p. 309–327, 2010.
- BONGAERTS, P.; SMITH, T. B. Beyond the “Deep Reef Refuge” hypothesis: a conceptual framework to characterize persistence at depth. **Mesophotic coral ecosystems**, p. 881–895, 2019.
- BRIDGE, T. C. L. et al. Diversity of Scleractinia and Octocorallia in the mesophotic zone of the Great Barrier Reef, Australia. **Coral Reefs**, v. 31, p. 179–189, 2012.
- BROWN, C. J.; BLONDEL, P. Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. **Applied Acoustics**, v. 70, n. 10, p. 1242–1247, out. 2009.
- CHELTON, D. B. et al. Geographical Variability of the First Baroclinic Rossby Radius of Deformation. [s.l: s.n.].
- CONNOLLY, S. R.; BAIRD, A. H. Estimating dispersal potential for marine larvae: dynamic models applied to scleractinian corals. **Ecology**, v. 91, n. 12, p. 3572–3583, 2010.
- CORDEIRO, C. et al. Conservation status of the southernmost reef of the Amazon Reef System: The Parcel de Manuel Luís. **Coral Reefs**, v. 40, p. 165–185, 2021.
- COSTA, M. S. F. Front Pages Wave and tidally induced processes on Rocas Atoll: geomorphological implications and future projections. [s.l: s.n.].
- COWEN, R. K. et al. Connectivity of marine populations: open or closed? **Science**, v. 287, n. 5454, p. 857–859, 2000.

- COWEN, R. K. et al. Population Connectivity in Marine Systems. [s.l: s.n.].
- COWEN, R. K.; PARIS, C. B.; SRINIVASAN, A. Scaling of connectivity in marine populations. **Science**, v. 311, n. 5760, p. 522–527, 27 jan. 2006.
- COWEN, R. K.; SPONAUGLE, S. Larval dispersal and marine population connectivity. **Annual Review of Marine Science**, 2009.
- CROOKS, K. R.; SANJAYAN, M. Connectivity conservation: maintaining connections for nature. **Connect Conserv.** , 2006.
- DA SILVEIRA, I. C. A.; DE MIRANDA, L. B.; BROWN, W. S. On the origins of the North Brazil Current. **Journal of Geophysical Research**, v. 99, n. C11, 1994.
- DAVIDSON-ARNOTT, R.; BAUER, B.; HOUSER, C. **Introduction to coastal processes and geomorphology**. [s.l.] Cambridge university press, 2019.
- DOMÍNGUEZ-PETIT, R. et al. Parental Effects and Reproductive Potential of Fish and Marine Invertebrates: Cross-Generational Impact of Environmental Experiences. **FishesMDPI**, , 1 ago. 2022.
- ENDO, C. A. K. et al. Low connectivity compromises the conservation of reef fishes by marine protected areas in the tropical South Atlantic. **Scientific Reports**, v. 9, n. 1, 1 dez. 2019.
- ESTON, V. et al. VERTICAL DISTRIBUTION OF BENTHIC MARINE ORGANISMS ON ROCKY COASTS OF THE FERNANDO DE NORONHA ARCHIPELAGO (BRAZIL). [s.l: s.n.].
- FADLALLAH, Y. H. Sexual reproduction, development and larval biology in scleractinian corals: a review. **Coral reefs**, v. 2, p. 129–150, 1983.
- FERREIRA, B. P. et al. The effects of sea surface temperature anomalies on oceanic coral reef systems in the southwestern tropical Atlantic. **Coral Reefs**, v. 32, n. 2, p. 441–454, 1 jun. 2013.
- FERREIRA, L. M.; JESUS, F.; SILVA, H. A. Plano de manejo do Parque Nacional Marinho de Fernando de Noronha. **Ibama/Funatura**, 1990.
- FRANCINI-FILHO, R. B. et al. Perspectives on the Great Amazon Reef: extension, biodiversity, and threats. **Frontiers in Marine Science**, p. 142, 2018.
- GARDNER, T. A. et al. Long-term region-wide declines in Caribbean corals. **science**, v. 301, n. 5635, p. 958–960, 2003.
- GILMOUR, J. P. et al. Recovery of an isolated coral reef system following severe disturbance. **Science**, v. 340, n. 6128, p. 69–71, 2013.

GOUVEIA, N. DE A.; GHERARDI, D. F. M.; ARAGÃO, L. The role of the Amazon River plume on the intensification of the hydrological cycle. **Geophysical Research Letters**, v. 46, n. 21, p. 12221–12229, 2019.

HARRISON, P. L.; WALLACE, C. C. Reproduction, dispersal and recruitment of scleractinian corals. Em: **Coral reefs**. [s.l.] Elsevier, 1990. v. 25p. 133–207.

HERZLIEB, S. et al. Comparative assessment of coral reef systems located along the insular platform south of St. Thomas, US Virgin Islands and the relative effects of natural and human impacts. **Proc 10th Int Coral Reef Symp, Okinawa. Anais...**2006.

KARNAUSKAS, M. et al. Source–sink recruitment of red snapper: Connectivity between the Gulf of Mexico and Atlantic Ocean. **Fisheries Oceanography**, v. 31, n. 6, p. 571–586, 1 nov. 2022.

KELLEHER, G.; KENCHINGTON, R. A. **Guidelines for establishing marine protected areas**. [s.l.] Iucn, 1992. v. 3

LABOREL, J. A revised list of Brazilian scleractinian corals and description of a new species. 1967.

LABOREL, J. Madreporaires et hydrocorallières récifaux des côtes Brésilienne. Systematique, ecologie. repartition verticale et géographique. **Results Scientifique du Campagne de Calypso**, v. 9, n. 25, p. 171–229, 1969.

LAVERICK, J. H. et al. To what extent do mesophotic coral ecosystems and shallow reefs share species of conservation interest? A systematic review. **Environmental Evidence**, v. 7, n. 1, p. 1–13, 2018.

LESSER, G. R. et al. Development and validation of a three-dimensional morphological model. **Coastal engineering**, v. 51, n. 8–9, p. 883–915, 2004.

LESSER, M. P.; SLATTERY, M.; LEICHTER, J. J. **Ecology of mesophotic coral reefs**. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, 15 jul. 2009.

LETT, C. et al. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics. A Lagrangian tool for modelling ichthyoplankton dynamics.. **Environmental Modelling and Software**. v. 23, n. 9, 2008.

LINNAEUS, C. **Systema naturae, per regna tria naturae, secundum classes, ordines, genera, species cum characteribus, et differentiis**. [s.l.: s.n.].

MACIEL, M. A.; CHACALTANA, J. T. A.; RIGO, D. Padrao de escoamento no Canal da Passagem. **V Semana Estadual de Meio Ambiente (SESMA) Vitória**, 2003.

MAIDA, M.; PADOVANI FERREIRA, B.; CLÁUDIO BELLINI,). AVALIAÇÃO PRELIMINAR DO RECIFE DA BAÍA DO SUESTE, FERNANDO DE NORONHA, COM ÊNFASE NOS CORAIS ESCLERACTÍNEOS. [s.l: s.n.].

MATHEUS, Z. et al. Benthic reef assemblages of the Fernando de Noronha Archipelago, tropical South-west Atlantic: Effects of depth, wave exposure and cross-shelf positioning. **PLoS One**, v. 14, n. 1, p. e0210664, 2019.

MELLIN, C. et al. Cross-shelf variation in coral community response to disturbance on the Great Barrier Reef. **Diversity**, v. 11, n. 3, p. 38, 2019.

MOBERG, F.; PATRICK, P. R. Ecosystem services of the tropical seascape: interactions, substitutions and restoration **Ocean & Coastal Management**. [s.l: s.n.].

MOURA, R. L. et al. An extensive reef system at the Amazon River mouth. **Science advances**, v. 2, n. 4, p. e1501252, 2016.

MUMBY, P. J. et al. Fishing, trophic cascades, and the process of grazing on coral reefs. **science**, v. 311, n. 5757, p. 98–101, 2006.

NASCIMENTO, T. F. DO; CHACALTANA, J. T. A.; PICCOLI, F. P. Análise da influência do alargamento de um estreitamento na hidrodinâmica do Canal da Passagem, Vitória-ES, através de modelagem numérica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 18, n. 3, p. 31–39, 2013.

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.

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.

PELUSO, L. et al. Contemporary and historical oceanographic processes explain genetic connectivity in a Southwestern Atlantic coral. **Scientific Reports**, v. 8, n. 1, 1 dez. 2018.

PIRES, D. O. et al. Cnidários bentônicos do arquipélago de Fernando de Noronha, Brasil. **Boletim do Museu Nacional: Zoologia**, n. 354, p. 1–21, 1992.

REID, W. V; RAUDSEPP-HEARNE, C. **Millennium ecosystem assessment**. , 2005.

RICHARDSON, P. L.; WALSH, D. Mapping Climatological Seasonal Variations of Surface Currents in the Tropical Atlantic Using Ship Drifts. **JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH**. [s.l.] Duncan and Schladow, 1986.

RIDLEY, H. N.; M.A., F. L. S. **ON THE ZOOLOGY OF FERNANDO NORONHA. 473 NOTES ON THE ZOOLOGY OF FERNANDO NORONHA.** [s.l: s.n.].

RUDORFF, C. A. G. et al. **Modeling spiny lobster larval dispersion in the tropical Atlantic using satellite data.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.researchgate.net/publication/228872017>>.

SALE, P. F. et al. Critical science gaps impede use of no-take fishery reserves. **Trends in Ecology and Evolution**, v. 20, n. 2, p. 74–80, 2005.

SAMMARCO, P. W. Larval dispersal and recruitment processes in Great Barrier Reef corals: Analysis and synthesis. **The Bio-Physics of Marine Larval Dispersal**, v. 45, p. 35–72, 1994.

SECCHIN, N. A. Mapeamento de habitats marinhos na plataforma dos Abrolhos. **Universidade Federal do Espírito Santo, Programa de Pós-graduação em Oceanografia Ambiental**, 2011.

SEGAL, B.; BERENGUER, V.; CASTRO, C. B. Experimental recruitment of the Brazilian endemic coral *Mussismilia braziliensis* and conditioning of settlement plates. **Ciencias Marinas**, v. 38, n. 1A, p. 1–10, 2012.

SELKOE, K. A. et al. A decade of seascape genetics: contributions to basic and applied marine connectivity. **Marine Ecology Progress Series**, v. 554, p. 1–19, 2016.

SLATTERY, M. et al. Connectivity and stability of mesophotic coral reefs. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, v. 408, n. 1–2, p. 32–41, 15 nov. 2011.

STORLAZZI, C. D. et al. **O C E A N O G R A P H Y Most atolls will be uninhabitable by the mid-21st century because of sea-level rise exacerbating wave-driven flooding.** [s.l: s.n.]. Disponível em: <<https://www.science.org>>.

STRAMMA, L.; IKEDA, Y.; PETERSON, R. G. **Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20°S** Deep-Sea Research. [s.l: s.n.].

STRAMMA, L.; SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean** Deep-Sea Research II. [s.l: s.n.].

STUDIVAN, M. S.; VOSS, J. D. Assessment of mesophotic coral ecosystem connectivity for proposed expansion of a Marine sanctuary in the Northwest gulf of Mexico: Population genetics. **Frontiers in Marine Science**, v. 5, n. MAY, 17 maio 2018.

SWEARER, S. E. et al. Evidence of self-recruitment in demersal marine populations. **Bulletin of Marine Science**, v. 70, n. 1, p. 251–271, 2002.

SZMANT, A. M.; MEADOWS, M. G. **Developmental changes in coral larval buoyancy and vertical swimming behavior: implications for dispersal and connectivity.** Proc 10th Int Coral Reef Symp. **Anais...**2006.

THOMAS, C. et al. **Modelling marine connectivity in the Great Barrier Reef and exploring its ecological implications - C. Thomas.** [s.l: s.n.].

UNDERWOOD, J. N. et al. Ecologically relevant dispersal of corals on isolated reefs: implications for managing resilience. **Ecological Applications**, v. 19, n. 1, p. 18–29, 2009.

VAN RIJN, L. C. et al. The predictability of cross-shore bed evolution of sandy beaches at the time scale of storms and seasons using process-based profile models. **Coastal Engineering**, v. 47, n. 3, p. 295–327, 2003.

VAZ, A. C. et al. Exploitation Drives Changes in the Population Connectivity of Queen Conch (*Aliger gigas*). **Frontiers in Marine Science**, v. 9, 1 jul. 2022.

VERMEIJ, M. J. A.; FOGARTY, N. D.; MILLER, M. W. Pelagic conditions affect larval behavior, survival, and settlement patterns in the Caribbean coral *Montastraea faveolata*. **Marine Ecology Progress Series**, v. 310, p. 119–128, 3 abr. 2006.

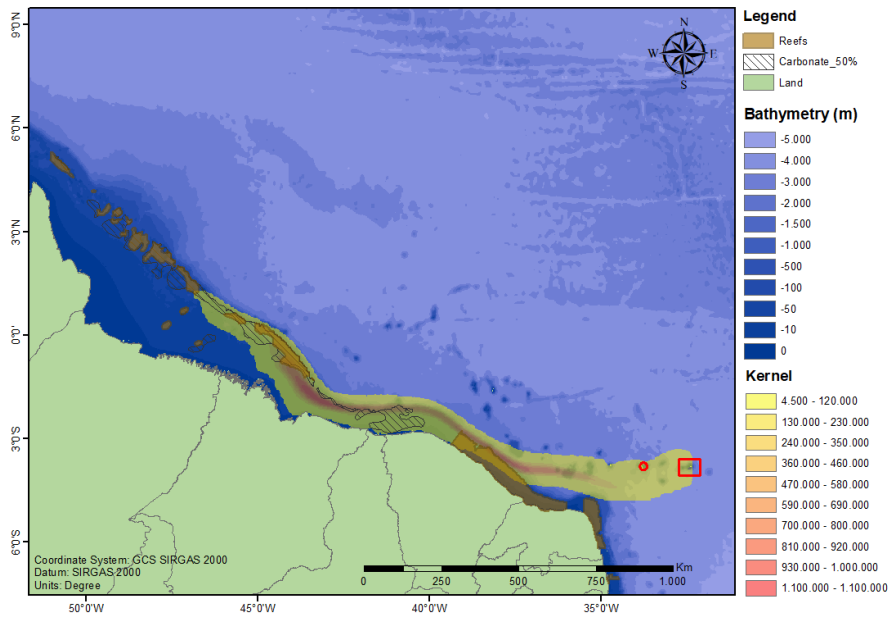
VIZE, P. D. **Deepwater broadcast spawning by *Montastraea cavernosa*, *Montastraea franksi*, and *Diploria strigosa* at the Flower Garden Banks, Gulf of Mexico.** Coral Reefs. **Anais...**mar. 2006.

WERNER, F. E.; COWEN, R. K.; PARIS, C. B. Coupled biological and physical models: present capabilities and necessary developments for future studies of population connectivity. **Oceanography**, v. 20, n. 3, p. 54–69, 2007.

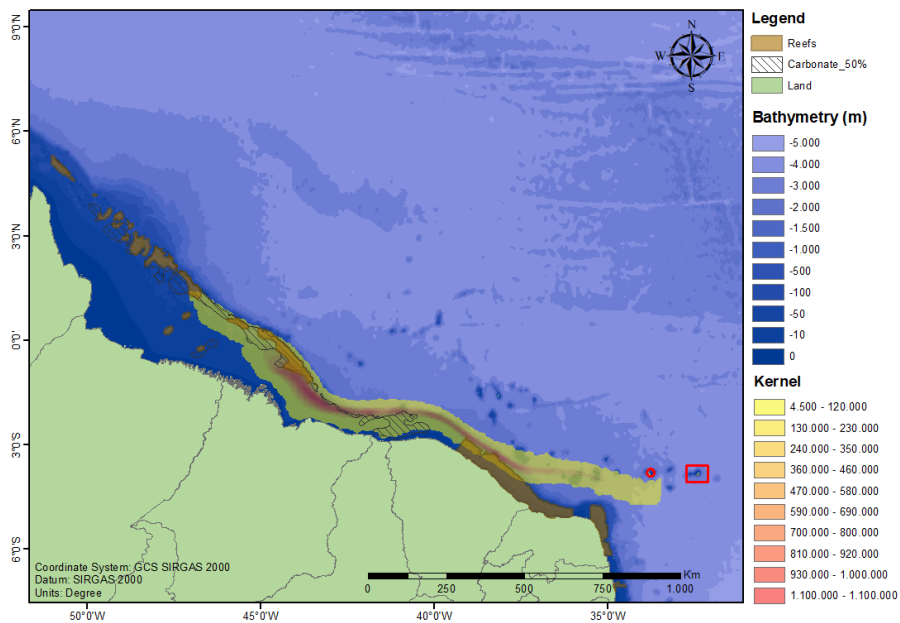
WILLIS, T. J. et al. **Burdens of evidence and the benefits of marine reserves: putting Descartes before des horse?** [s.l: s.n.].

ANEXO

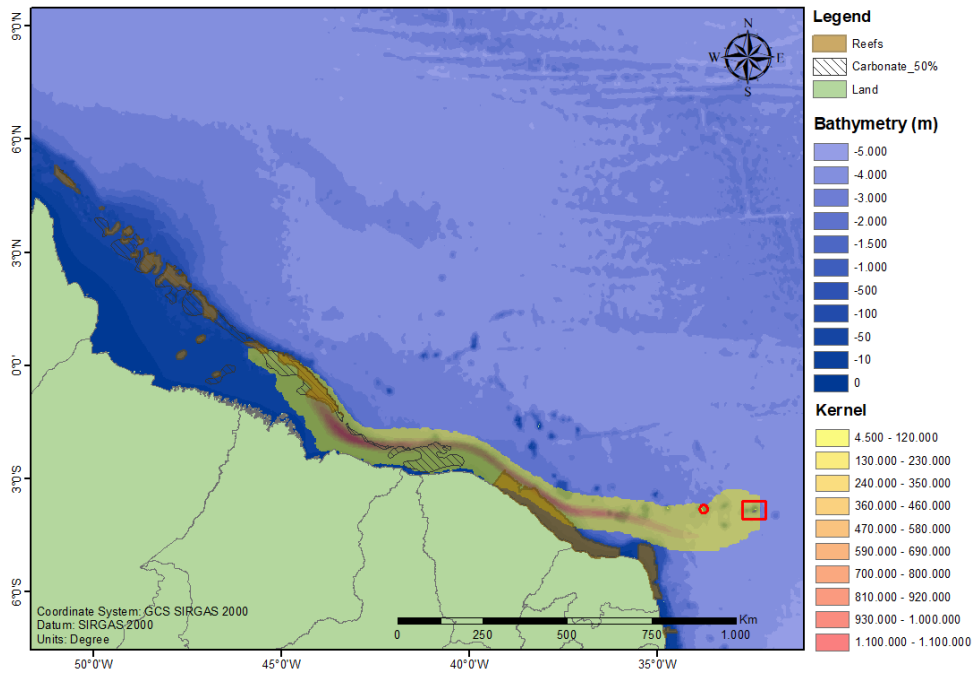
Anexo 1 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2003. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



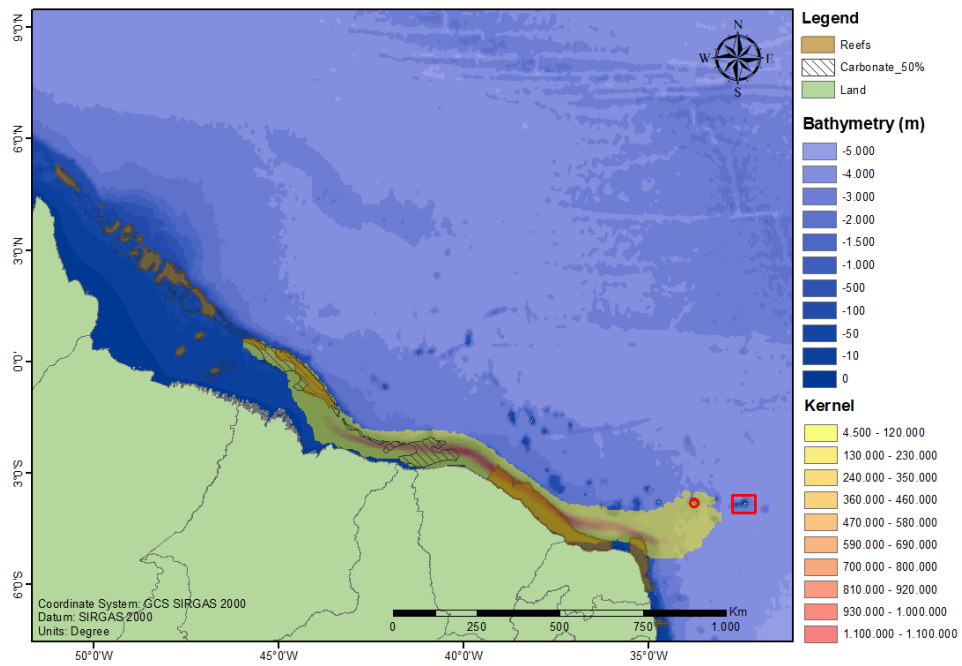
Anexo 2 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2004. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



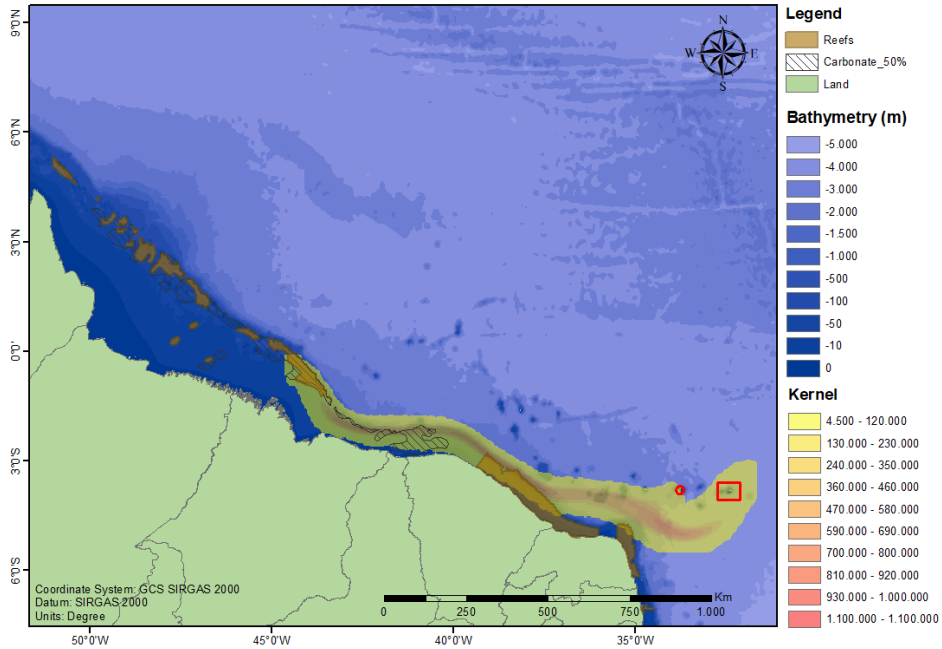
Anexo 3 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2005. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



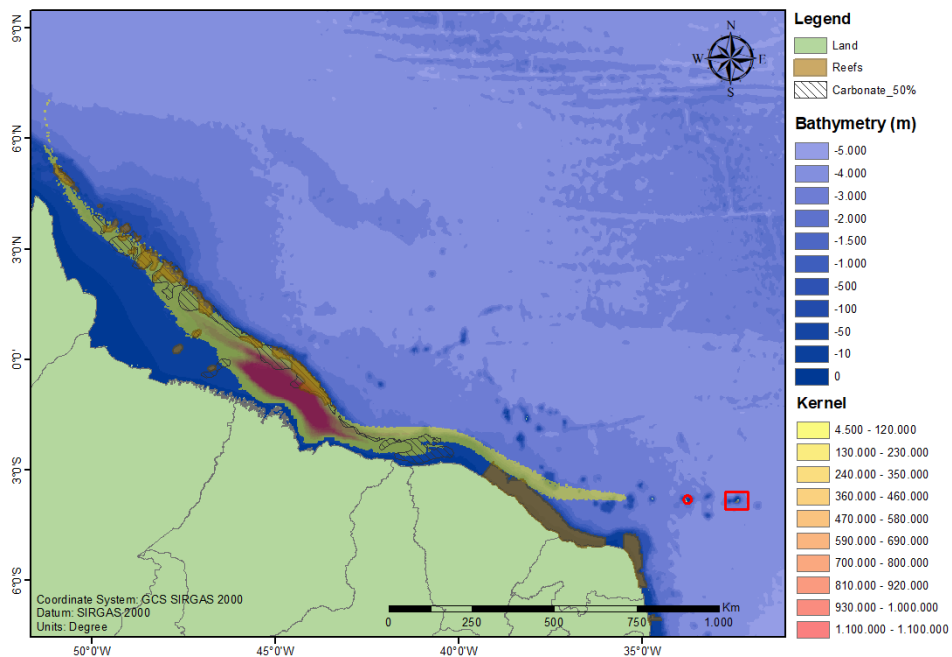
Anexo 4 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2006. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



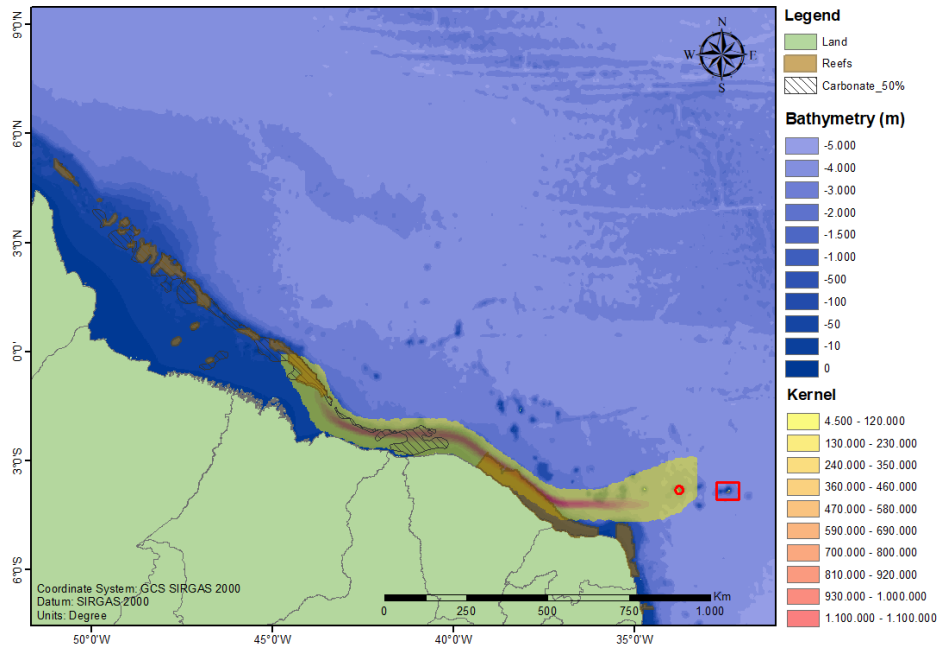
Anexo 5 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2007. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



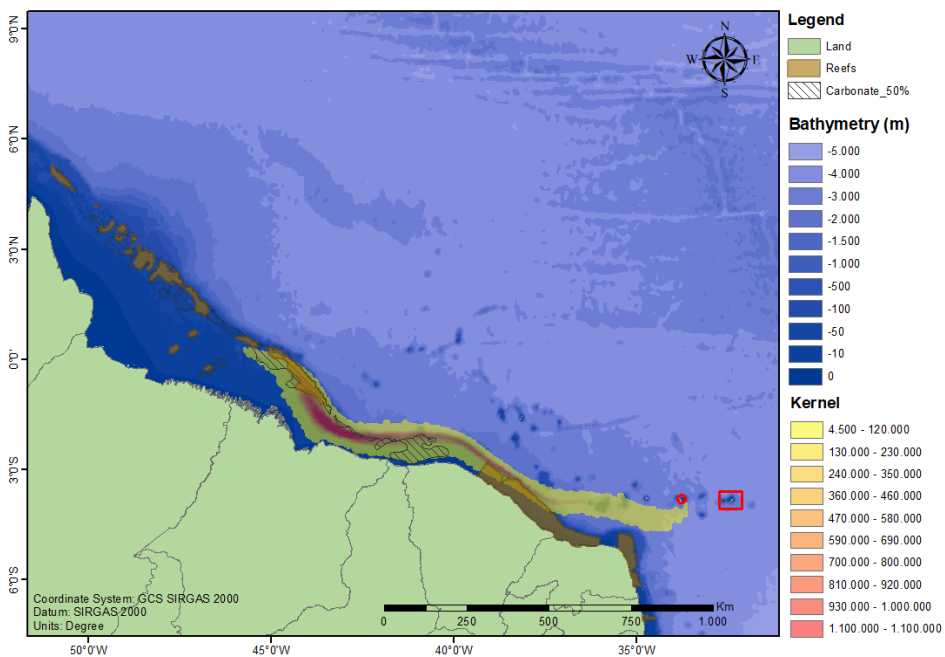
Anexo 6 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2008. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



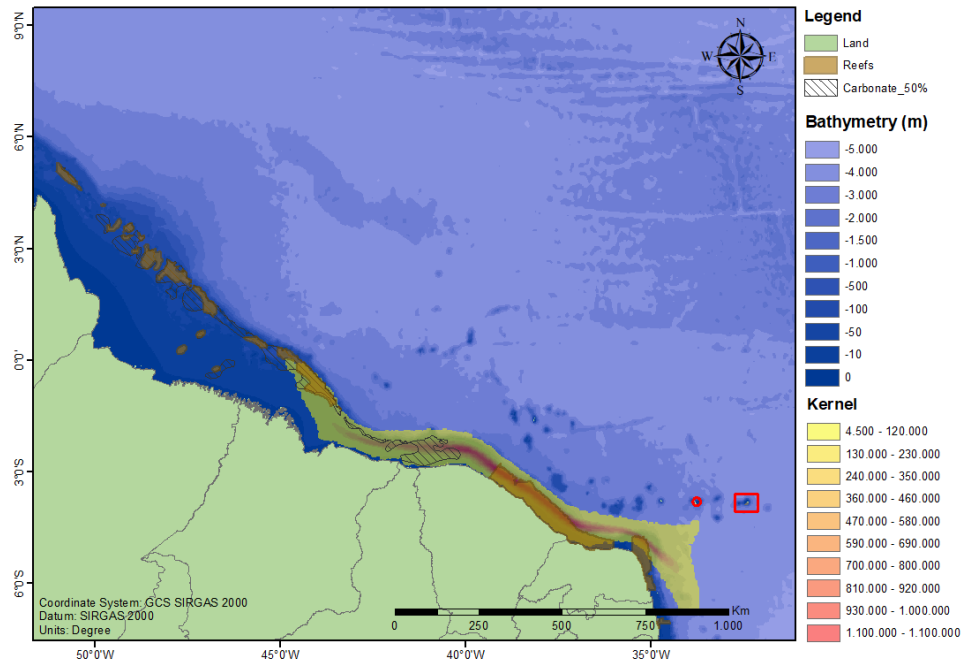
Anexo 7 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2009. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



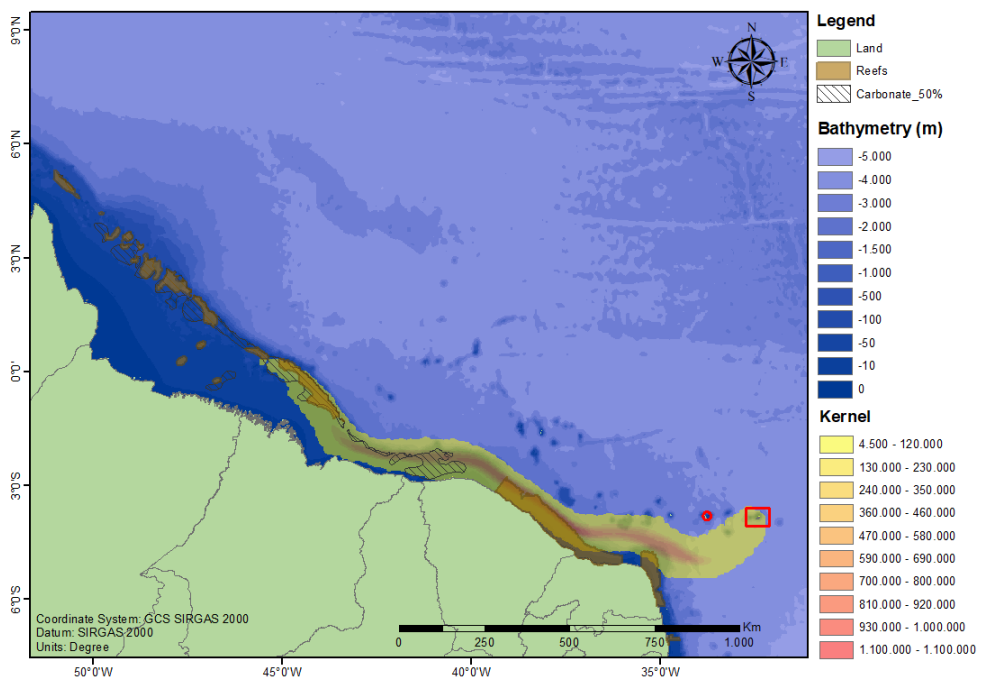
Anexo 8 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2010. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



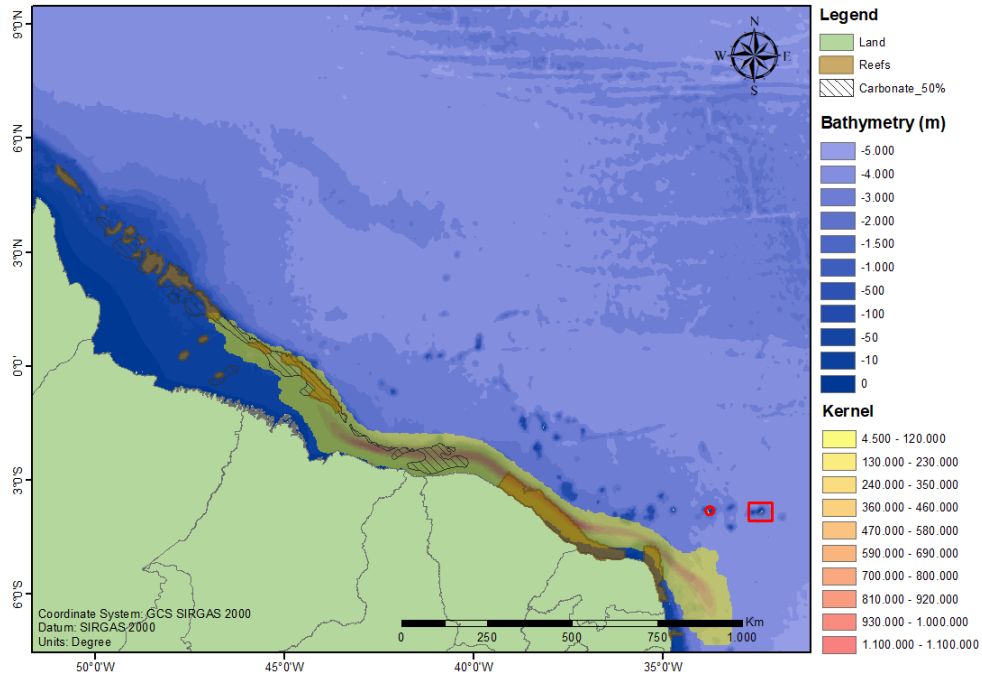
Anexo 9 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2011. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



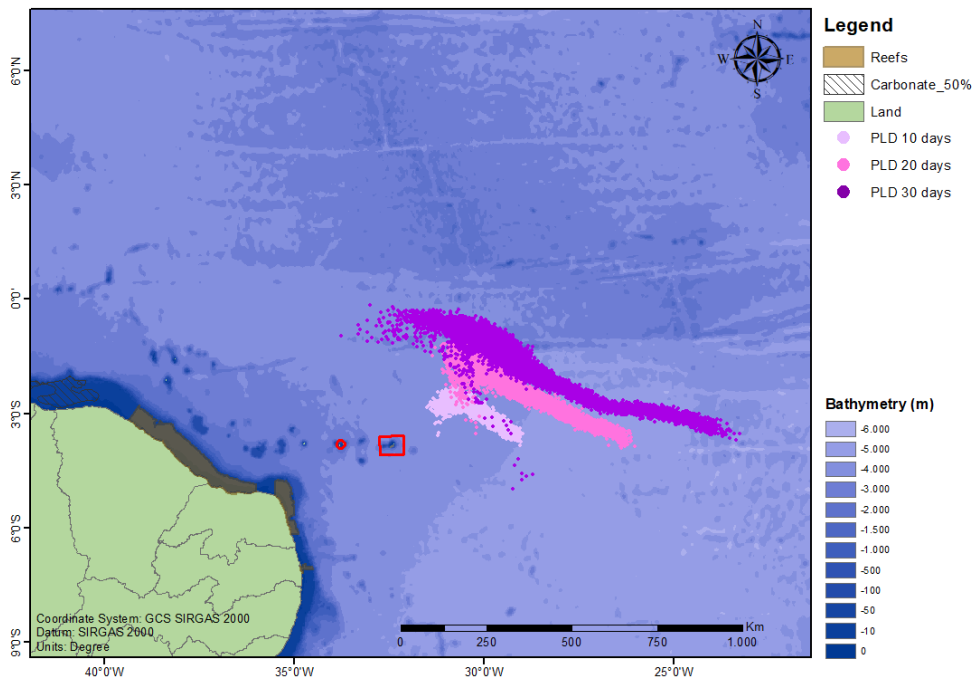
Anexo 10 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2012. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



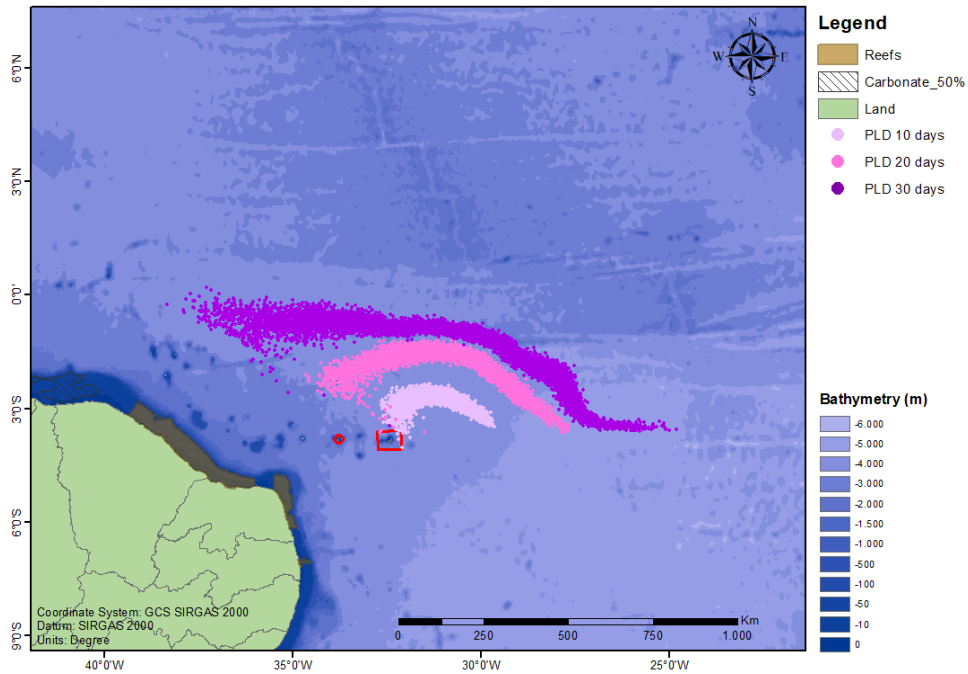
Anexo 11 - Mapa de kernel dos últimos dias das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* a partir do Arquipélago de Fernando de Noronha no ano de 2013. Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



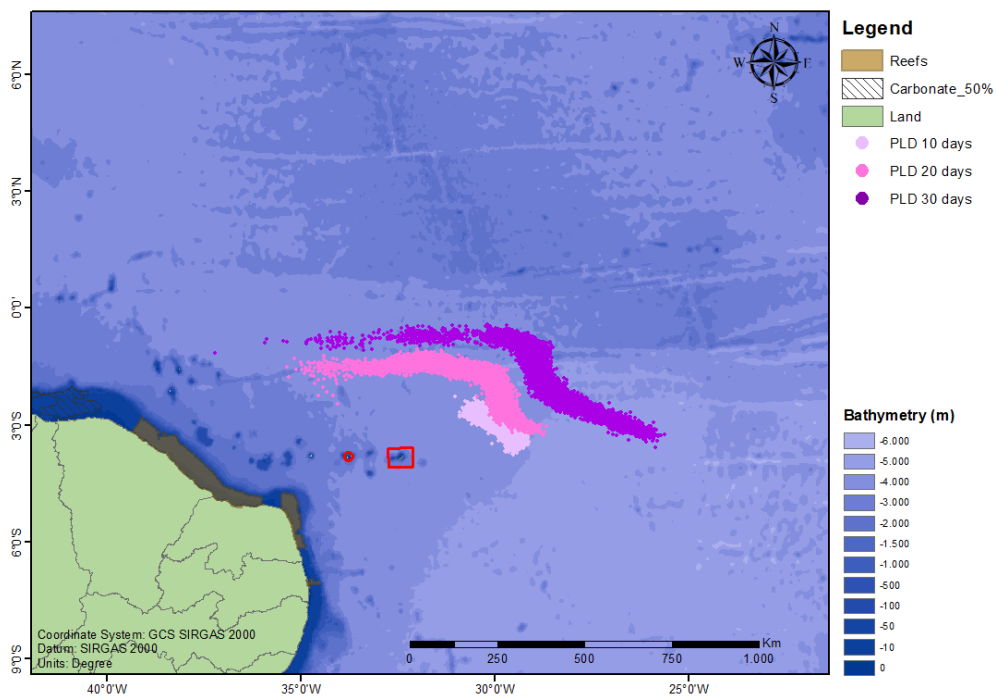
Anexo 12 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2003, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



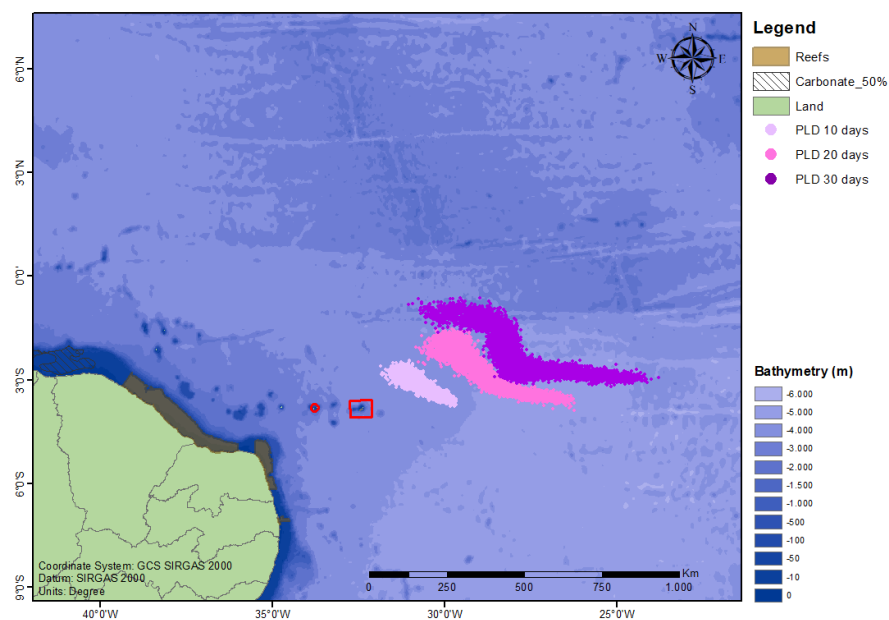
Anexo 13 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2004, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



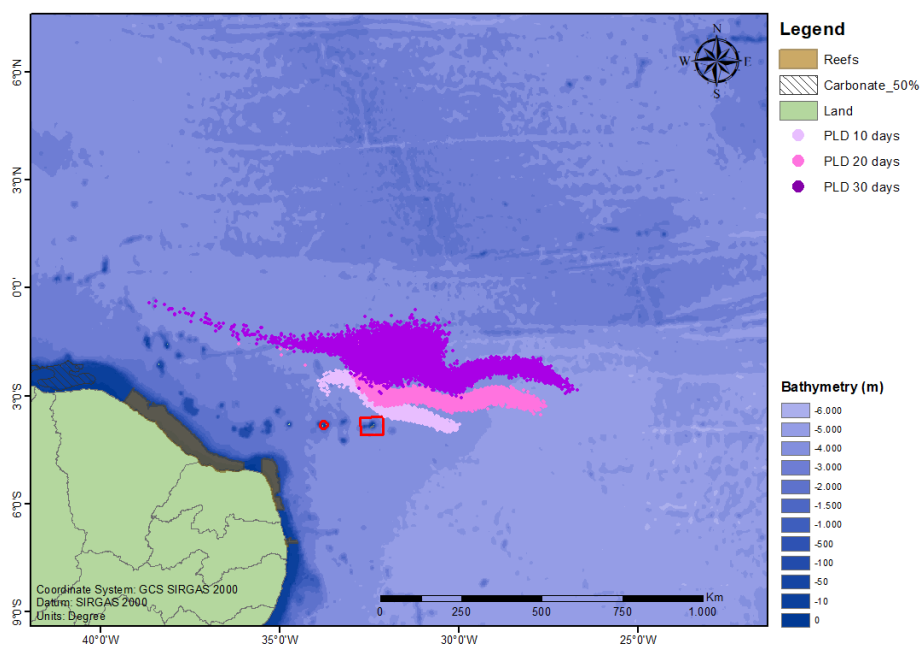
Anexo 14 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2005, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



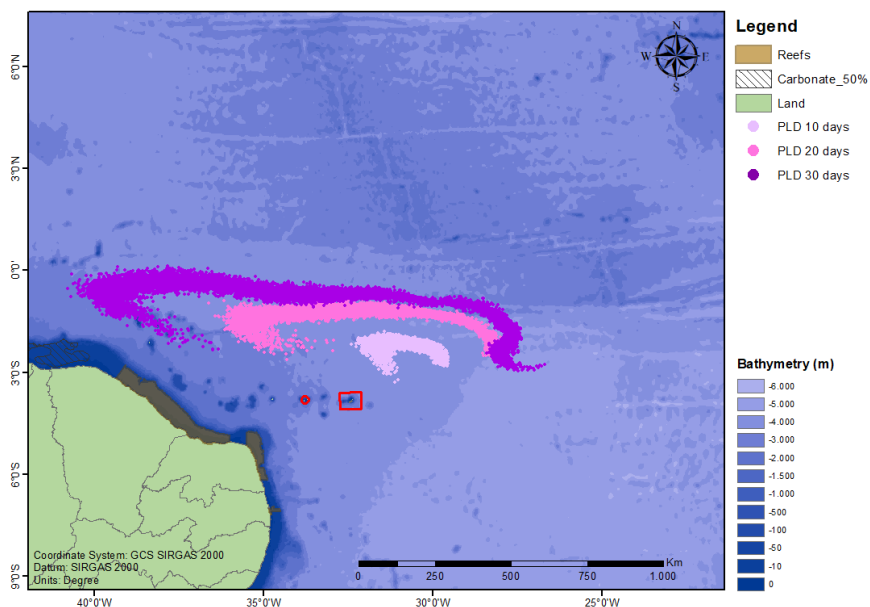
Anexo 15 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2006, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



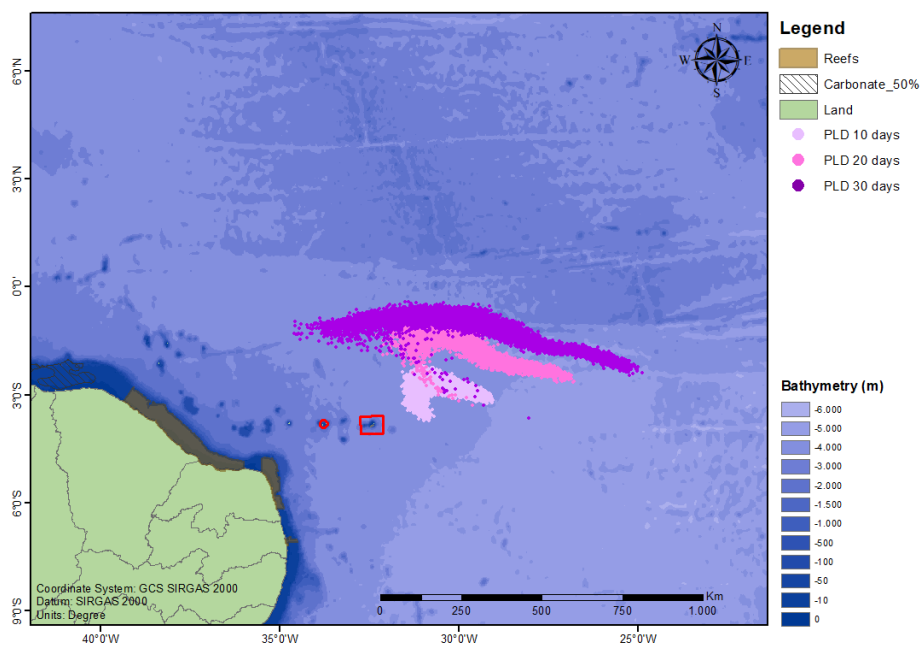
Anexo 16 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2007, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



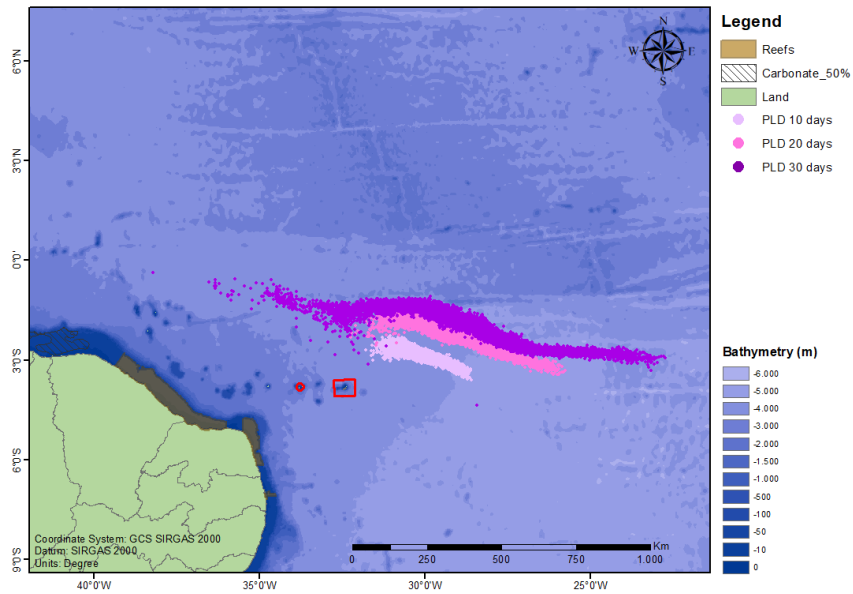
Anexo 17 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2008, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



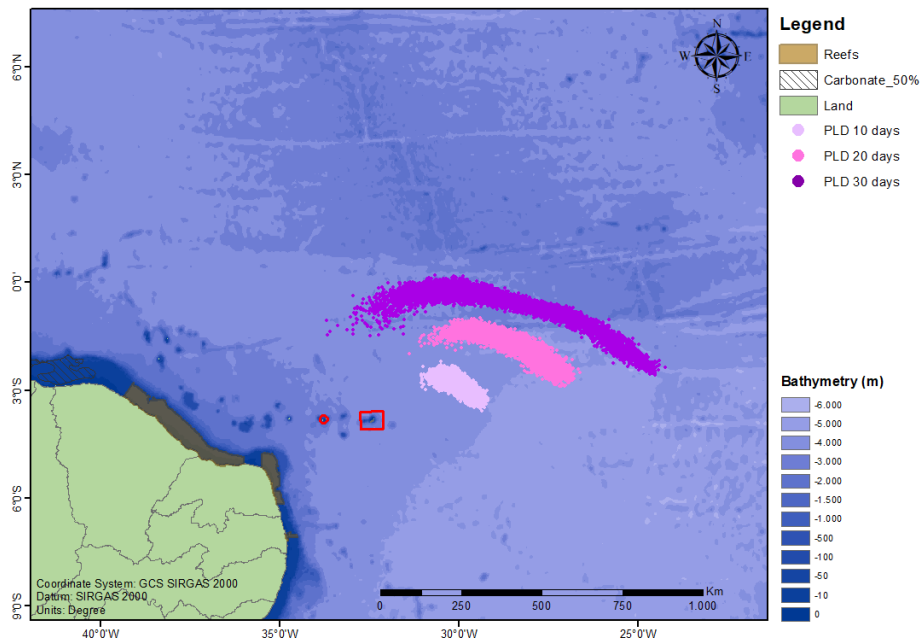
Anexo 18 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2009, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



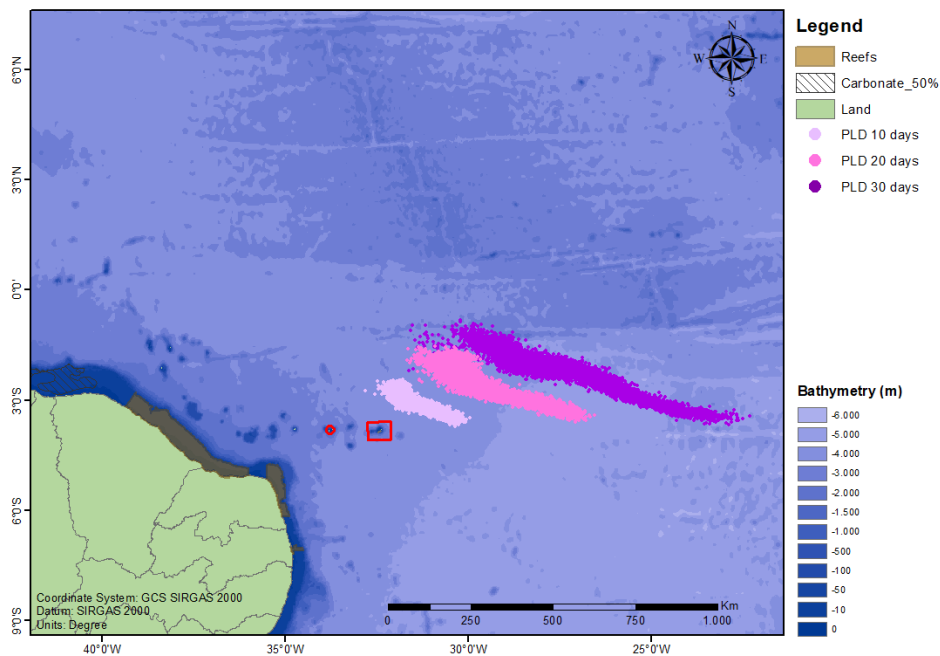
Anexo 19 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2010, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



Anexo 20 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2011, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



Anexo 21 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2012, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).



Anexo 22 - Mapa do final das trajetórias de dispersão larval do coral *Montastraea cavernosa* no Arquipélago de Fernando de Noronha, utilizando os dados de 2013, considerando 10,20 e 30 dias de tempo de vida larval (PLD). Em vermelho estão representados o Arquipélago de Fernando de Noronha (retângulo) e o atol das Rocas (círculo).

