

ARQUIPÉLAGO
DE SÃO PEDRO
E SÃO PAULO

20
anos de pesquisa



ARQUIPÉLAGO
DE SÃO PEDRO
E SÃO PAULO | **20**
anos de pesquisa

REALIZAÇÃO

Comando da Marinha

Almirante de Esquadra Eduardo Barcellar Leal Ferreira

Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM)

Contra-Almirante Sérgio Gago Guida

Subsecretaria para o Plano Setorial para os Recursos do Mar (PSRM)

Capitão de Mar e Guerra Flavio Luiz Giacomazzi (Ref^o-T)

Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPÉLAGO)

Capitão de Fragata (T) Marco Antônio Carvalho de Souza

Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Profa. Dra. Ângela Maria Paiva (Reitora)

Prof. Dr. Daniel Diniz Melo (Vice-reitor)

Prof. Dr. Graco Aurélio Câmara Viana (Diretor do Centro de Biociências)

Fundação Norte-riograndense de Pesquisa e Cultura (FUNPEC)

Prof. Dr. André Laurindo Maitelli (Diretor Geral)

Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq)

Dr. Mario Neto Borges

Projetos de apoio

PROARQUIPÉLAGO (SECIRM/UFRN/FUNPEC)

PROILHAS (UFRN/FUNPEC)

Coordenação

Prof. Dr. Jorge Eduardo Lins Oliveira (UFRN)

A772 Arquipélago de São Pedro e São Paulo : 20 anos de pesquisa / Universidade Federal do Rio Grande do Norte ; organizadores: Dr. Jorge Eduardo Lins Oliveira, Dra Danielle de Lima Viana, Capitão de Fragata (T) Marco Antônio Carvalho de Souza ; prefácio Dra Danielle de Lima Viana ; apresentação Contra Almirante Renato Melo. – Recife : Via Design Publicações, 2018.

263p. : il.

Inclui referências.

ISBN 978-85-93906-01-5

1. SÃO PEDRO E SÃO PAULO, ARQUIPÉLAGO – BRASIL. 2. PESQUISAS CIENTÍFICAS – SÃO PEDRO E SÃO PAULO, ARQUIPÉLAGO – BRASIL. 3. DESCOBRIMENTOS E EXPLORAÇÕES. 4. DESCOBRIMENTOS GEOGRÁFICOS – BRASIL. 5. RECURSOS NATURAIS – BRASIL – PRESERVAÇÃO. I. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. II. Lins Oliveira, Jorge Eduardo. III. Viana, Danielle de Lima. IV. Souza, Marco Antônio Carvalho de. V. Melo, Renato.

CDU 918.1

CDD 918.1

Organizadores

Jorge Eduardo Lins Oliveira

Danielle de Lima Viana

Capitão de Fragata (T) Marco Antônio Carvalho de Souza

ARQUIPÉLAGO
DE SÃO PEDRO
E SÃO PAULO

20
anos de pesquisa

1ª edição

Recife, 2018

Via Design Publicações

PROJETO EDITORIAL

Editores

Jorge Eduardo Lins Oliveira

Doutor em Biologia Marinha pela Université Marie et Pierre Currie - Paris 6 - França
Professor Titular da Universidade Federal do Rio Grande do Norte
Coordenador Técnico operacional do Programa PROARQUIPELAGO
e-mail: jorgelins@ufrnet.br

Danielle de Lima Viana

Doutora em Oceanografia Biológica pela Universidade Federal de Pernambuco
Pesquisadora do Departamento de Pesca da Universidade Federal Rural de Pernambuco
Bolsista da CAPES / Ciências do Mar 2 / Processo nº88881.145908/2017-01
e-mail: vianadl@yahoo.com

Marco Antonio Carvalho de Souza

Capitão de Fragata da Marinha do Brasil
Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar
Coordenador do Programa PROARQUIPELAGO
e-mail: marco.carvalho@secirm.mar.mil.br

Revisão Técnica

Dr. Carlos Alessandre Domingos Lentini
Universidade Federal da Bahia

Dra. Danielle de Lima Viana
Universidade Federal Rural de Pernambuco

Dr. Fábio Raposo do Amaral
Universidade Federal de São Paulo

Dr. Fernando Manuel Raposo Morgado
Universidade de Aveiro - Portugal

Dr. Francisco Pinheiro
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dra. Gabriela Paula Fernandes
Universidad Nacional del Noroeste de la provincia de Buenos Aires

Dra. Helenice Vital
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dr. Jorge Eduardo Lins Oliveira
Universidade Federal do Rio Grande do Norte

Dra. Manuela Bassoi
Universidade Federal do Rio Grande

Dra. Maria de Lourdes Souza Santos
Universidade Federal Rural da Amazônia

Dr. Teodoro Vaske Junior
Universidade Estadual Paulista Julio de Mesquita Filho

Dr. Ramón Bonfil
Oceanos Vivientes - México

Projeto Gráfico e Diagramação

Via Design Publicações

- 6 Prefácio**
- 8 Agradecimentos**
- 10 Apresentação**
- 12 Introdução**
O Naturalista Charles Darwin e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 16 Capítulo 1**
Micro-e Mesozooplâncton do ASPSP: Diversidade, Distribuição Vertical e Influência da Termocline e Fotoperíodo
- 32 Capítulo 2**
Biomassa sestônica e abundância do Zooplâncton e Zoonêuston (com ênfase em Copépodes e Eufausiáceos) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial
- 48 Capítulo 3**
Diversidade e padrões espaço-temporais no Ictionêuston e Ictioplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 62 Capítulo 4**
Ostracodes (Crustacea) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 72 Capítulo 5**
Biotecnologia Marinha aplicada ao desenvolvimento de Fármacos Anticâncer a partir de Microrganismos Marinhos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 86 Capítulo 6**
Estrutura Populacional da Lagosta *Panulirus echinatus* no Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 99 Capítulo 7**
Carioevolução e aspectos da Filogeografia Insular de peixes do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 111 Capítulo 8**
Variação Temporal das Comunidades Recifais no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: ações do Projeto de Monitoramento de Longa Duração (PELD)
- 128 Capítulo 9**
Peixes pelágicos e prospecção em águas profundas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 143 Capítulo 10**
Elasmobrânquios do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 160 Capítulo 11**
Mais do que Ômega-3: Compostos Orgânicos Bromados (Antrópicos e Naturais) em albacora-laje (*Thunnus albacares*) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 174 Capítulo 12**
Os Grandes Atobás-Marrons do pequeno Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 184 Capítulo 13**
Os Golfinhos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 198 Capítulo 14**
Levantamento Topográfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Atlântico Equatorial) através da Tecnologia Lidar
- 211 Capítulo 15**
Análise Qualitativa Fractal das estruturas nas Ilhas Belmonte e Challenger e sua relação com a estruturação Local - Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 226 Capítulo 16**
A Sismicidade na região do Arquipélago de São Pedro e São Paulo - Atlântico Equatorial
- 236 Capítulo 17**
Microsismos registrados na estação sismográfica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e suas relações com variações da intensidade do vento
- 248 Capítulo 18**
Propriedades físicas e biogeoquímicas da região oceânica circundante ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo
- 263 Posfácio**

Prefácio

Longe de tudo, a 1.100 quilômetros do ponto mais próximo da costa brasileira, no meio do Oceano Atlântico, a um terço da distância entre o Brasil e a África, em águas cuja profundidade ultrapassa os quatro mil metros, foi inaugurada em junho de 1998, a primeira Estação Científica do ASPSP, a qual teve como objetivo apoiar o Programa de Pesquisas no ASPSP - PROARQUIPÉLAGO, coordenado pela Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar - SECIRM. Assim, completam-se 20 anos de pesquisas realizadas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo - ASPSP. A partir da Implantação dessa Estação Científica, foi possível o desenvolvimento de inúmeros trabalhos científicos, os quais proporcionaram uma maior compreensão da dinâmica dos ecossistemas insulares e seus intrincados processos ecológicos no Oceano Atlântico, com resultados de grande significação ecológica e socioeconômica para a nação brasileira.

Frequentemente sujeito a abalos sísmicos, o ASPSP é formado por seis ilhas maiores e outras quatro de menor tamanho, com a maior ilha, Belmonte, apresentando 100 metros de comprimento e extensão entre os pontos extremos, alcançando apenas 420 metros. Embora apresente dimensões reduzidas, a presença do ASPSP influencia diretamente as condições hidrodinâmicas locais e, conseqüentemente, as comunidades biológicas que vivem no seu entorno. O que, para muitos pode ser visto como um conglomerado de rochas perdidas no mar, habitadas apenas por aves marinhas, totalmente desprovido de praias, com vegetação quase ausente, para os pesquisadores é a única exposição mundial de rochas que surgiram através do soerguimento do manto do assoalho submarino acima do nível do mar, o que caracteriza essa

formação geológica como única no mundo. Trata-se de um dos menores e mais isolados arquipélagos oceânicos tropicais do planeta, que apresenta uma das mais elevadas taxas de endemismo no Oceano Atlântico. É o único conjunto de ilhas oceânicas brasileiras localizado no hemisfério Norte e estrategicamente situado entre os continentes sul-americano e africano, fato que lhe atribui uma condição única para a realização de pesquisas nos mais diversos campos da ciência.

Após esses 20 anos de pesquisa, com o apoio logístico da Marinha do Brasil e a contribuição inestimável dos seus parceiros institucionais como o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), a Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE), a Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) e diversas outras instituições de ensino e pesquisa e órgãos governamentais e privados, o ASPSP continua, sem dúvida, sendo o local mais inóspito do Brasil, um paraíso de águas claras de uma riquíssima fauna marinha, uma importante área de biodiversidade ecológica repleta de segredos ainda a serem desvendados.

Agradecimientos

Vinte anos de um sonho que se tornou realidade. Ainda em meados da década de 1990, a SECIRM - Marinha do Brasil, juntamente com um grupo de pesquisadores e representantes de instituições governamentais, dentre outras, juntaram esforços na elaboração de um projeto visionário: implementar uma estação científica no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, de forma a apoiar um programa de pesquisas de longa duração, abrangendo os mais variados ramos das Ciências do Mar e Ambientais, da geologia à meteorologia e climatologia, passando pelas oceanografias física, química, biológica e pesqueira.

Desta forma, foi instituído em junho de 1996, pelo Comandante da Marinha do Brasil, o Programa PROARQUIPELAGO, e em junho de 1998, construída sua Estação Científica. Desde então, sob à coordenação da SECIRM, inúmeras expedições foram realizadas, permitindo não somente a reivindicação de uma ZEE (Zona Econômica Exclusiva) à partir do Arquipélago, mas sobretudo beneficiando o desenvolvimento de pesquisas nas mais diversas áreas do conhecimento e a formação de pesquisadores de instituições de ensino e pesquisas do país.

O presente livro, o segundo da série, apresenta os resultados dos estudos realizados no âmbito do PROARQUIPELAGO, demonstrando todo o esforço da comunidade acadêmica nacional no desenvolvimento da ciência, apresentando à sociedade civil, os resultados científicos alcançados na última década.

Neste contexto, parabenizamos a todos que, de uma forma direta ou indireta, participaram

ou participam do Programa PROARQUIPELAGO. À SECIRM - Marinha do Brasil, que sem o seu apoio institucional na manutenção da estrutura organizacional e logística, este Programa não teria se desenvolvido. Ao Comando do 3º Distrito Naval, que com sua estrutura operacional e meios flutuantes, tem garantido ao Programa e seus pesquisadores, os níveis de segurança necessários ao bom desempenho de suas pesquisas. Ao CNPq, que através do fomento aos projetos de pesquisas, tem desempenhado um papel decisivo na sustentabilidade dos estudos propostos.

Nossos agradecimentos aos pesquisadores e seus orientandos, que são a base de sustentação do Programa, pela dedicação e comprometimento com os objetivos estabelecidos. Destacamos ainda, um agradecimento especial às instituições de ensino e pesquisa nacionais, pelo apoio e incentivo aos seus professores e alunos na participação do Programa.

Apresentação

A localização geográfica e as características únicas do ecossistema insular do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), associadas a interesses de ordem científica, econômica e estratégica, levaram a Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), em 11 de junho de 1996, a instituir o Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPELAGO). Ato seguinte, em 25 de junho de 1998, sob a coordenação da SECIRM (Secretaria Interministerial para os Recursos do Mar), Organização Militar da Marinha do Brasil, foi inaugurada uma Estação Científica naquele distante Arquipélago. Desde então, o local vem sendo permanentemente habitado por pesquisadores. Além de contribuir para alavancar nossa produção científica, tal feito garantiu para o Brasil a consolidação de uma área marítima, em torno do ASPSP, de 200 milhas de raio (cerca de 450.000 km²), denominada “Zona Econômica Exclusiva”. É fato que, com considerável envergadura e versatilidade operacional, o PROARQUIPELAGO vem cumprindo, com êxito, sua missão principal: viabilizar a realização contínua de pesquisas na remota região do ASPSP, abrangendo as mais diversas áreas do conhecimento, como geologia e geofísica, recursos pesqueiros, oceanografia e ecologia.

O livro “Arquipélago de São Pedro e São Paulo – 20 anos de Pesquisa”, segundo da série, apresenta para o meio acadêmico e sociedade em geral, os resultados científicos alcançados pelo PROARQUIPELAGO na última década. Trata-se de uma conquista expressiva, uma vez que envolve centenas de alunos de graduação e pós-graduação, dezenas de universidades nacionais e diversas áreas do conhecimento. Muitas monografias de

graduação, dissertações de mestrado e teses de doutorado foram geradas, bem como inúmeros artigos científicos publicados. Sem dúvida, esse trabalho, além de proporcionar um melhor entendimento dos processos que ocorrem na região, contribui significativamente para a qualificação de mão de obra especializada no País.

O ASPSP é um patrimônio ímpar e, como tal, requer atenção especial. Assim, as informações geradas nestes últimos anos, e apresentadas neste livro, são da mais alta relevância, uma vez que servirão de subsídios para garantir o caráter sustentável das futuras ações.

Introdução

O Naturalista Charles Darwin e o Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Claudia L. R. Motta¹
Iara Regina Nocentini André²
Gilberto Lacerda Santos²

Por ocasião da comemoração dos 20 anos do Programa Arquipélago São Pedro e São Paulo - PROARQUIPÉLAGO, cujas pesquisas são essenciais para o avanço do conhecimento acerca daquela que é a região mais inóspita do Brasil, vale salientar a passagem pelo local do grande naturalista inglês Charles Robert Darwin e suas impressões sobre aquele espaço geográfico, ponto do Brasil mais próximo da África, distando aproximadamente 1.820 km de Guiné Bissal, que consiste em um conjunto de ilhas rochosas situadas no hemisfério Norte, sobre a Dorsal Meso Atlântica (00° 55,01' N e 029° 20,76' W, a cerca de 1.100 km da cidade de Natal, no Rio Grande do Norte, e 520 km do Arquipélago de Fernando de Noronha, em Pernambuco). O Arquipélago é, de fato, um remoto grupo de ilhas, próximo à linha do Equador, que ocupa uma área emersa de cerca de 17.000 m², cuja elevação máxima é de 18 m acima do nível do mar. Foi descoberto pelo navegador português Manuel de Castro Alcoforado, em 1511, que comandava uma nau chamada São Pedro. Esta, tendo se chocado contra os rochedos, foi resgatada por uma segunda nau, da mesma frota, chamada São Paulo. Daí, a origem do nome deste arquipélago, cujo primeiro registro cartográfico data de 1529 (CAMPOS *et al.*, 2013). O resultado da viagem de circunavegação feita por Darwin, iniciada em 1831, é amplamente conhecido. Contudo, nem todos conhecem os detalhes sobre o embarque de Darwin no HMS Beagle e sobre os registros realizados por ele quando da passagem pelo Arquipélago de São Pedro e São Paulo, os quais consistem em uma redescoberta do mesmo sob uma perspectiva científica.

Os relatos da viagem, tanto aqueles constantes do Diário do Beagle quanto aqueles provenientes da Narrativa das Viagens Topográficas do HMS Beagle entre os Anos 1826 e 1836 (DARWIN, 1839a),

indicam que Darwin foi se familiarizando com a vida a bordo daquele tipo de embarcação e com a rotina de interação com informações essenciais para viabilizar a viagem, como as astronômicas e as atmosféricas.

Também era essencial para a viabilização da viagem, a questão da obtenção de provisões para a tripulação ao longo do tempo, tendo em vista a inexistência de tecnologias de conservação de alimentos e a escassez de espaço no navio. Além do mais, em uma viagem transatlântica, plena de incertezas com relação à sua duração exata, não se podia prever possibilidades de reabastecimento. Assim, habitualmente, os navios atracavam nas ilhas em busca de alimentos frescos para a tripulação e, desde o início da viagem, Darwin estava curioso em comprovar as histórias dos marujos de que os homens conseguiam derrubar com facilidade enorme quantidade de aves que habitavam o Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Os relatos de Darwin sobre o Arquipélago limitaram-se aos dias 15 e 16 de fevereiro de 1832 e neles se pode constatar as seguintes observações acerca dos procedimentos de reabastecimento do HMS Beagle no Arquipélago São Pedro e São Paulo (DARWIN, 2008):

Ví os rochedos de São Paulo logo adiante de mim. Dirigimo-nos a eles durante a noite e hoje pela manhã estamos a uma distância de poucas milhas. Quando a três milhas, baixaram-se dois botes: um com o senhor Stokes para cartografar a ilha, o outro com o senhor Wickham e comigo para estudos de geologia e prática de tiro. Os rochedos podem ser considerados como a ponta de uma montanha submarina. Não passam de quarenta pés acima do nível do mar, e de cerca de meia milha de circunferência. Não se pode ver o fundo a uma milha de distância da ilha e, se a profundidade do Atlântico é grande como em geral se supõe, que imensa pirâmide deve ser.

Tivemos alguma dificuldade em aportar, já que o longo marulho do mar aberto quebrava com violência contra a costa rochosa. Havíamos visto de

1 Universidade Federal do Rio de Janeiro (claudiam@nce.ufrj.br);

2 Universidade de Brasília.

longe grandes bandos de aves marinhas pairando por ali e, quando estávamos na ilha, apresentou-se-nos uma cena das mais extraordinárias. Fomos cercados por todos os lados por pássaros, tão pouco acostumados aos homens que não se moviam. Abatemos com pedras e com meu martelo as ativas e ágeis estermináceas. Atirar estava fora de cogitação, então pegamos dois dos tripulantes dos botes e a obra do massacre começou. Eles logo juntaram uma pilha de aves e chapéus cheios de ovos.

Enquanto estávamos tão ativos em terra, os homens a bordo não ficaram para trás. Apanharam uma grande quantidade de belos peixes grandes e teriam conseguido muito mais não tivessem os tubarões rompido tantas de suas linhas e de seus anzóis. Conseguiram içar três desses peixes e, durante nossa ausência, dois dos grandes foram apanhados pelo navio. Retornamos triunfais com nossa presa, mas estávamos bastante fatigados. A ilha fica a apenas cinquenta milhas do equador e as pedras, brancas do esterco das aves, refletiam um clarão quente. As aves eram apenas dois tipos, alcatrazes e beneditos, e eram, com alguns pouco insetos, os únicos seres complexos que habitavam este lugar desolado.

Embora sucintas, as anotações de Darwin também referem-se à formação do Arquipélago. Darwin fez diversas anotações em sua caderneta de campo relacionadas às observações geológicas que permitiram, mais tarde, escrever um artigo com a descrição mais refinada sobre as características geográficas do lugar, que mais tarde viriam a ser publicadas no *Journal of researches into the geology and natural history of the various countries visited by H.M.S. Beagle* em 1839. Em sua melhor descrição do Arquipélago, Darwin (1839b), descreveu suas observações:

Ao atravessar o Atlântico, durante a manhã de 16 de fevereiro, ancorámos perto da Ilha de S. Paulo. Este grupo de rochas situa-se a 0° 58' de latitude norte, e 29° 15' longitude oeste. Encontra-se a 540 milhas de distância da costa da América, e a 350 da ilha de Fernando Noronha. O ponto mais alto fica apenas a 50 pés acima do nível do mar, e a circunferência

total é inferior a três quartos de milha. Este pequeno pico ergue-se abruptamente fora das profundezas do oceano. A sua constituição mineralógica não é simples; nalgumas partes a rocha é de quartzo, noutras de natureza feldspática, e às vezes contém finas veias de serpentina misturadas com matéria calcária. A circunstância de estas rochas não serem de origem calcária é interessante porque, com muito poucas exceções, as ilhas situadas no meio dos grandes oceanos são assim constituídas. Como os pináculos mais altos da cordilheira da grande montanha provavelmente existiram como ilhas distantes de qualquer continente, somos levados a esperar que fossem frequentemente constituídas por rochas vulcânicas. Torna-se, portanto, um ponto curioso para especular o das mudanças que muitas das presentes ilhas teriam sofrido durante o lapso das idades incontáveis que seriam necessárias para as elevar até cumes cobertos de neve. Se considerarmos o caso de Ascensão, ou de Santa Helena, as quais há muito existem na condição de extintas, podemos sentir-nos seguros que o mero núcleo ou centro da ilha iria resistir antes que pudesse decorrer um tão vasto período durante cuja duração total a superfície ficasse exposta a constante desgaste; talvez que, tendo-se decomposto cada fragmento de rocha celular, uma massa de alguma rocha compacta, tal como o fonolito ou nefrite, viesse a coroar o nosso novo Chimborazo. As rochas de S. Paulo aparecem à distância com uma cor branca brilhante. Isto é devido, em parte, aos excrementos de uma vasta multidão de aves marinhas, e parcialmente a uma cobertura de uma substância branca nacarada que está intimamente unida à superfície das rochas. Esta, quando examinada à lupa, descobre-se ser constituída pela sobreposição de numerosas camadas extremamente finas, com a espessura total de cerca de um décimo de uma polegada. A superfície é macia e acetinada, e tem um lustro de pérola; é consideravelmente mais dura do que espato calcário, embora possa ser riscada com uma faca: sob o maçarico, calcina, enegrece ligeiramente e emite um odor fétido. Consiste em fosfato de cal misturado com algumas impurezas, e a sua origem deve-se, sem dúvida, à ação da chuva ou pulverização das ondas

sobre os excrementos dos pássaros. Posso aqui referir que encontrei nalguns buracos das rochas de lava, da ilha de Ascensão, massas consideráveis da substância chamada guano, a qual aparece, em grandes camadas com algumas jardas de espessura, na costa ocidental das partes intertropicais da América do Sul, nos ilhéus frequentados por aves marinhas. De acordo com a análise de Fourcroy e Vauquelin, é composta pelos uratos, fosfatos, e oxalatos de cal, amônia e potassa, junto com outros sais, e alguma gordura e matéria terrena. Creio que não há dúvida que se trata do estrume mais rico que alguma vez se descobriu.

Darwin, apesar de pouca experiência nas observações *in loco* naquele início da viagem, conseguiu expor as características físicas dos rochedos, bem como da sua fauna. Embora fosse um jovem que acabara de completar 23 anos, ainda aprendiz de naturalista, no início de uma viagem que duraria 4 anos, 10 meses e 4 dias, entre outras observações, Darwin foi o primeiro cientista a supor que o Arquipélago de São Pedro e São Paulo fosse um afloramento dos picos de uma cadeia montanhosa do fundo oceânico, o que permitiria estudos sobre o manto abissal na superfície da Terra.

Pode-se dizer que os relatos de Darwin acerca do Arquipélago deram origem a todo um movimento de interesse científico pelo Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Contudo, passados 185 anos há ainda muito a ser desvendado e esse pedaço isolado do território brasileiro, em torno do qual se contabiliza também 200 milhas náuticas integradas ao país, revela-se cada vez mais estratégico. Neste sentido, da mesma forma que essa primeira abordagem científica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, elaborada por Darwin, teve a Marinha como principal vetor - naquele caso a Armada Britânica -, atualmente, e de forma direta e decisiva, a Armada Brasileira permanece apoiando cientistas brasileiros na abordagem científica do Arquipélago, viabilizando a presença de pesquisadores, a realização de descobertas em diversos campos de conhecimento e garantindo a soberania nacional sobre aquele território e seu entorno.

Isto é possibilitado pela manutenção de uma estação científica no local, que acolhe pesquisadores de todo o país e também estrangeiros, que se interessam pelo posicionamento estratégico do Arquipélago para medições meteorológicas, pelas informações geológicas ali colhidas e pelos estudos de fauna e flora ali possibilitados. Além do mais, recursos tecnológicos mais recentes permitem uma nova abordagem subaquática do Arquipélago, a qual abre um imenso leque de construção de conhecimentos. Assim, dando continuidade a uma tradição iniciada pelo HMS Beagle, o primeiro navio a levar para o arquipélago um cientista, os navios da Marinha do Brasil, em cada viagem ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo, viabilizam o trabalho de inúmeros cientistas, o que formata uma parceria estratégica entre a Marinha e cientistas nacionais em prol do desenvolvimento do país.

Referências Bibliográficas

CAMPOS, T. F. C.; VIRGENS NETO, J.; SRIVASTAVA, N. K.; PETTA, R. A.; HARTMANN, L. A.; MORAES, J. F. S.; MENDES, L.; SILVEIRA, S. R. M. **Saint Peter and Saint Paul's Archipelago - Tectonic uplift of infracrustal rocks in the Atlantic Ocean**, Geological and Palaeontological Sites of Brazil, SIGEP002, 2005

Disponível em: << <http://sigep.cprm.gov.br/sitio002/sitio002english.pdf> >>

Acesso em 28/07/2017

DARWIN, C. R., **Journal and remarks. 1832-1836**, *The narrative of the voyages of H.M. Ships Adventure and Beagle*. London, Colburn (1st ed., Vol.III), 1839a.

Disponível em: < http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1839_voyage_F10.3.pdf >

Acesso em 20/07/2017

DARWIN, C. R., *Journal of researches into the geology and natural history of the various countries visited by H.M.S. Beagle*. London, Colburn. 1839b.

Disponível em:< http://darwin-online.org.uk/converted/pdf/1839_Beagle_F11.pdf >

Acesso em 20/07/2017

DARWIN, C. R., **O diário do Beagle**. 1a Ed., Curitiba, Editora UFPR, 2008.

Micro - e Mesozooplâncton do ASPSP: Diversidade, Distribuição Vertical e Influência da Termoclina e Fotoperíodo

Pedro Augusto Mendes de Castro Melo¹
Alejandro Esteweson Santos Faustino da Costa¹
Érika Pinho Correia¹
Lucas Guedes Pereira Figueirêdo¹
Andrea Pinto Silva¹
Xiomara Franchesca García-Díaz²
Mauro de Melo Júnior³
Sigríd Neumann-Leitão¹

01

Abstract

This study was carried out to access the vertical distribution of the zooplankton around the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, and the thermocline effect on this distribution. The thermocline presented different effects in the protozooplankton, mainly in dinoflagellates, changing their structure. The microzooplankton and the mesozooplanktonic Copepoda had the biodiversity (richness, diversity and evenness) and abundance patterns highly affected both by the thermocline and photoperiod (diurnal and nocturnal). This is a valuable contribution to the understanding of the ecology of diverse planktonic groups within a singular tropical Atlantic system.

Introdução

O zooplâncton compreende o conjunto de organismos geralmente microscópicos, incluindo desde formas unicelulares até pequenos vertebrados, como larvas de peixes, que vivem na massa d'água. Embora sejam capazes de atividades natatórias, as correntes d'água determinam seus deslocamentos, uma vez que não são capazes de manter sua distribuição contra o movimento das correntes, mesmo aqueles mais lentos. Esta característica passiva (= plâncton, no grego) dos deslocamentos é essencial à vida planctônica (LEVINTON, 1995; GROSS e GROSS, 1996).

Dentre as classificações do zooplâncton (incluindo o protozooplâncton), uma das mais relevantes é a do tamanho, podendo estar inserido nas seguintes categorias: picoplâncton (0,2 a 2µm), nanoplâncton (2 a 20 µm), microplâncton (20 a 200 µm), mesoplâncton (0,2 a 20 mm), macroplâncton (2 a 20 cm) e megaplâncton (20 a 200 cm) (SIEBURTH *et al.*, 1978; LEVINGTON, 1995).

No início da década de 1980 o entendimento das relações tróficas existentes nos ecossistemas aquáticos deu um salto com a publicação do artigo de Azam *et al.* (1983). Desde muito tempo se sabe que uma porção considerável da produção primária realizada pelo fitoplâncton é liberada na coluna d'água na forma de matéria orgânica dissolvida (FOGG, 1958; CHOI, 1972). No entanto, se acreditava que essa matéria orgânica era perdida para o ecossistema. Essa ideia mudou com a publicação da hipótese da alça microbiana (AZAM *et al.*, 1983). De acordo com essa hipótese, a matéria orgânica dissolvida liberada pelo fitoplâncton é utilizada como fonte de energia por organismos picoplanctônicos. Esses, por sua vez,

1 Universidade Federal de Pernambuco (sigridnl@uol.com.br);

2 Universidade Federal Rural da Amazônia;

3 Universidade Federal Rural de Pernambuco.

são predados por organismos nanoplanctônicos ou microplanctônicos e através dessas relações tróficas, a energia que foi reaproveitada pelo picoplâncton pode entrar na cadeia alimentar principal, já que organismos nanoplanctônicos e microplanctônicos fazem parte da dieta alimentar de predadores do mesoplâncton. Assim, a grande relevância do zooplâncton constitui em ser elo fundamental na transferência da energia oriunda da matéria orgânica produzida pelo fitoplâncton e bactérias, para os demais elos da teia trófica, de tal forma que a atividade metabólica do zooplâncton tem grande influência na produção pelágica, nos ciclos biogeoquímicos e em outros processos ecológicos vitais (LEVINTON, 1995; PARANAGUÁ *et al.*, 2004). Além disso, apresentam espécies indicadoras ambientais, bem como informam sobre os processos oceanográficos dominantes, uma vez que a sua comunidade é influenciada pelas condições bióticas e abióticas do meio (FRASER, 1962; LONGHURST e PAULY, 1987).

Dentro do microzooplâncton, podemos destacar os dinoflagelados, tintinídeos e radiolários. Os dinoflagelados são organismos eucarióticos unicelulares que fazem parte do filo Myzozoa e são abundantes no ambiente marinho e em ecossistemas de água doce. O grupo é muito diverso e pelo menos 1555 espécies, pertencentes a 117 gêneros já estão descritas (GÓMEZ, 2005). Estima-se que existam pelo menos 2000 espécies (TAYLOR *et al.*, 2008). Muitas espécies de dinoflagelados são capazes de florescer formando *blooms* de baixa diversidade e geralmente sem uma sucessão de espécies, com apenas uma alcançando valores muito elevados de densidade em diversas regiões do mundo (SMAYDA, 2002). Os tintinídeos são organismos eucarióticos unicelulares heterotróficos que fazem parte do filo Ciliophora. A característica mais marcante dos ciliados tintinídeos é a presença da lorica, uma estrutura rígida, de natureza proteica (AGATHA e SIMON, 2012), construída pelo próprio ciliado, dentro da qual o ciliado vive. Essas estruturas despertaram a atenção de pesquisadores e se tornaram objeto

de estudo desde o século XIX (FOL, 1881; DADAY, 1887) e a sua morfologia passou a ser o principal critério adotado na taxonomia. Os radiolários são organismos eucarióticos unicelulares que compõem o filo Radiozoa. Esses organismos são exclusivamente marinhos, solitários ou coloniais e grande parte das espécies constrói um esqueleto de sílica. Da mesma forma que os dinoflagelados e tintinídeos, os radiolários são importantes componentes da alça microbiana.

Dentro do mesozoplâncton, os copépodes podem ser destacados como os metazoários mais abundantes do nosso planeta. Esses microcrustáceos planctônicos são fortemente influenciados pela temperatura (MCLAREN, 1963; MAYZAUD, 1973), luz (FERNÁNDEZ, 1977), salinidade (MARSHALL, 1973) e turbulência (STRICKLER, 1985; ALCAREZ *et al.*, 1989).

Os oceanos tropicais são caracterizados pela presença de uma termoclina permanente que impede o enriquecimento das camadas superficiais da coluna d'água por águas mais profundas e ricas em nutrientes. Como consequência, existe escassez de nutrientes nas camadas superficiais da maior parte dos oceanos tropicais. Sob essas condições, a chamada "estrutura tropical típica" é formada (HERBLAND e VOITURIEZ, 1979) e mantida, sendo modificada apenas com aporte suficiente de nutrientes para as camadas superficiais (CULLEN, 1982).

A presença de ilhas e montes submarinos é responsável por modificações na hidrodinâmica e na estrutura termohalina dos ambientes oceânicos, provocando o chamado "efeito ilha", quando uma combinação de correntes de recirculação e ressurgência fazem com que águas de profundidade moderada, ricas em nutrientes, atinjam a zona eufótica (DOTY e OGURY, 1956). Este evento pode contribuir para um incremento na biomassa planctônica ao redor dessas áreas (UDA e ISHINO, 1958; BOEHLERT, 1988). A biomassa de produtores primários, por exemplo, pode chegar

a aumentar em até 85% quando comparada com as áreas oceânicas oligotróficas adjacentes (GOVE *et al.*, 2016). Assim, grandes variações na topografia, fisiografia, profundidade e localização dos montes submarinos, tornam igualmente diversos os processos físicos e ecológicos atuantes, influenciando na estrutura das comunidades locais (BOEHLERT e GENIN, 1987; ROGERS, 1994; GENIN, 2004).

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) é um exemplo de ilhas oceânicas localizadas em áreas oligotróficas oceânicas tropicais. Dentre as ilhas oceânicas do Brasil, o ASPSP é comparável a um *oásis* no meio das águas oligotróficas do oceano Atlântico. O zooplâncton que aí ocorre é rico tanto no holoplâncton (organismos que passam toda vida no plâncton), predominante nos ambientes oceânicos (OMORI e IKEDA, 1984), quanto no meroplâncton (organismos que passam parte do ciclo de vida no plâncton), predominante nos ambientes costeiros. Esse oásis marinho motivou a realização de várias expedições científicas e a prospecção pesqueira (DELANO, 1817; DARWIN *et al.*, 1839), além de muitas outras que geraram publicações, especialmente aquelas no contexto do livro sobre os 10 anos do ASPSP (VIANA *et al.*, 2009).

Os trabalhos sobre o zooplâncton no ASPSP têm focado a abundância e a distribuição de ovos e/ou larvas de espécies nectônicas de importância comercial que utilizam essa área como berçário (ANDRADE, 2000; LESSA *et al.*, 2000), bem como os trabalhos sobre a distribuição temporal e espacial do pico-, nano-, micro-, meso- e macroplâncton (GALVÃO, 2000; CAVALCANTI, 2002; SIQUEIRA, 2002; ARAÚJO, 2003; GARCÍA-DÍAZ, 2007; GARCÍA-DÍAZ *et al.*, 2009; COSTA, 2018a), distribuição vertical (MELO, 2013; CORREIA, 2014; COSTA, 2018b) e os trabalhos acerca de grupos zooplânctônicos específicos (SOUZA, 2001; OLIVEIRA e LARRAZÁBAL, 2002; FREIRE *et al.*, 2004; ARAÚJO, 2006) ou relativos a espécies (MELO *et al.*, 2014; MELO *et al.*, 2015).

O conjunto de informações obtidas demonstra que a riqueza de espécies do zooplâncton do ASPSP é típica de ecossistemas oceânicos de baixas latitudes. Estudos realizados por GARCÍA-DÍAZ (2007) registrou mais de 200 táxons do mesozooplâncton nas águas superficiais do ASPSP, enquanto para áreas costeiras e oceânicas do Nordeste brasileiro estes valores são inferiores, como nos estudos de NEUMANN-LEITÃO *et al.* (1999); CAVALCANTI e LARRAZÁBAL (2004) com 141 e 63 espécies respectivamente.

Material e Métodos

O ASPSP é composto de 10 pequenas ilhotas de peridotito serpentinizado e milonitizado (CAMPOS *et al.*, 2010), originadas de um soerguimento de manto litosférico (MAIA *et al.*, 2016), que fazem parte de um monte submarino que emerge a partir de profundidades de aproximadamente 4000 metros até aproximadamente 20 metros acima do nível do mar, e é considerado um dos menores e mais isolados arquipélagos do mundo (FEITOZA *et al.*, 2003). O ASPSP sofre influência do ramo norte da Corrente Sul Equatorial (nCSE) no sentido leste-oeste e da Sub-Corrente Equatorial (SCE) no sentido oeste-leste, esta última possuindo seu núcleo logo abaixo da superfície (STRAMMA, 1991; ARAÚJO e CINTRA, 2009).

O presente capítulo apresenta resultados obtidos ao longo de estudos realizados entre os anos de 2010 e 2015. Tanto o protozooplâncton como o micro e mesozooplâncton foram estudados a partir de amostras coletadas nos primeiros 100 metros da coluna d'água. Diferentes metodologias foram aplicadas, de acordo com os objetivos de cada estudo, e são descritas a seguir.

O protozooplâncton foi coletado durante duas campanhas realizadas nos meses de março e novembro de 2015, em sete profundidades (1, 10, 20, 30, 50, 75 e 100 metros), utilizando-se garrafa tipo Niskin (10 L). Essas amostragens foram

realizadas em pontos situados nas porções norte (N) e a sul (S) do arquipélago nas proximidades da isóbata 500 metros (Figura 1). Todo o volume coletado (10 L) foi concentrado com uma rede de malha de 20 μm e fixado com lugol em uma concentração final de 3%. Perfilagens foram realizadas utilizando um CTD Sontek CastAWAY, e mostraram que a profundidade de início da termoclina variou entre 30 e 60 metros.

O zooplâncton foi coletado em três campanhas (C1: junho/2010, C2: setembro/2011 e C3: outubro/2011), nos períodos diurno e noturno, em duas estações fixas (uma a leste, E, e outra a

oeste, W, do ASPSP; Figura 1). Assim como para os protistas planctônicos, as amostragens do zooplâncton foram realizadas da superfície até 100 m de profundidade, embora tenham sido executadas em 5 camadas de 20 m, as quais sejam: L1: 0-20 m, L2: 20-40 m, L3: 40-60 m, L4: 60-80 m e L5: 80-100 m. As coletas foram realizadas através de arrastos verticais com rede de fechamento tipo Nansen (com área de boca de 0,28 m²) e aberturas de malha de 64 μm (microzooplâncton) e 200 μm (mesozooplâncton). Para esta última malha, foram estudados o principal grupo, em termos de biodiversidade e abundância (Copepoda).

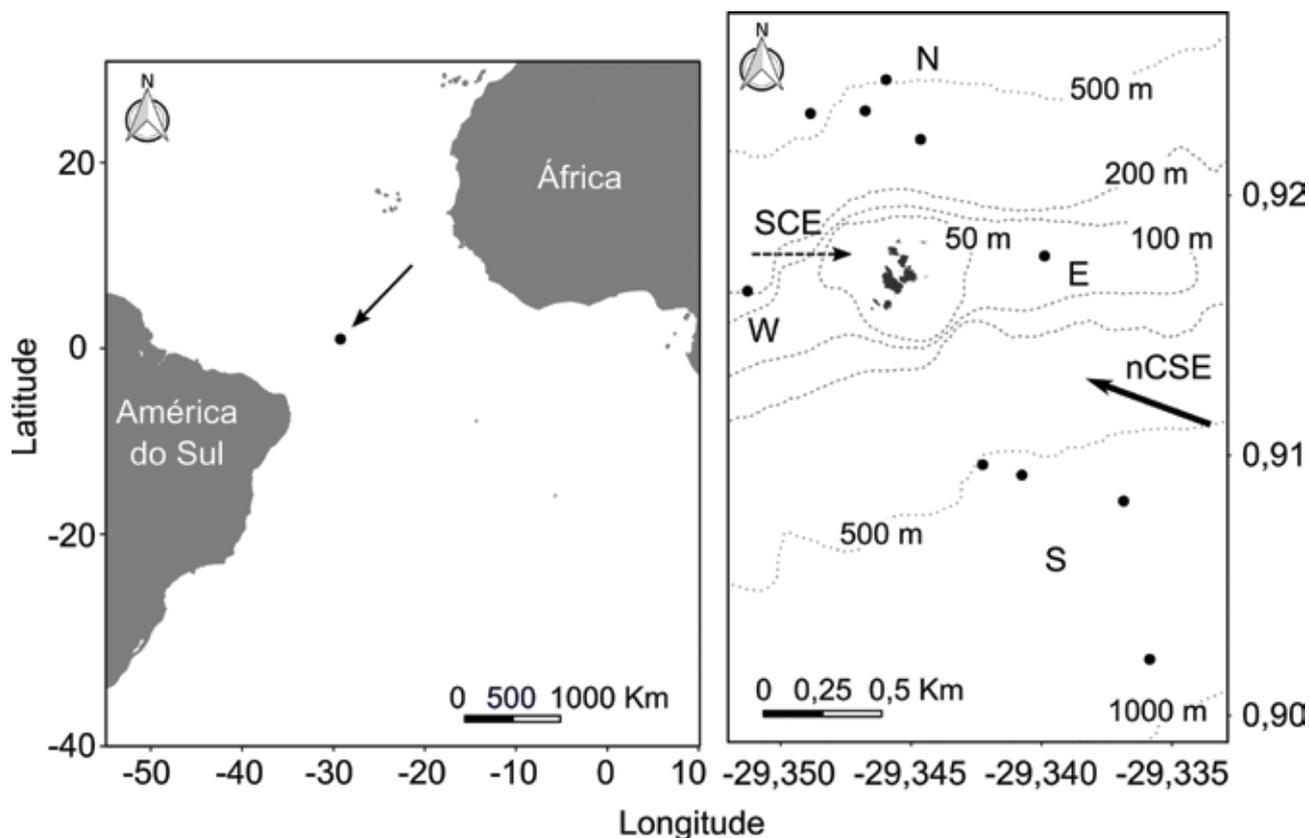


Figura 1. Localização do ASPSP no Oceano Atlântico Tropical e posicionamento das estações oceanográficas onde foram realizadas amostragens com garrafa Niskin (N e S) e onde foram realizadas amostragens com redes de plâncton de 64 e 200 μm (W e E). nCSE – Ramo norte da Corrente Sul Equatorial; SCE – Sub-corrente Equatorial.

Figure 1. Location of the SPSPA in the Tropical Atlantic Ocean and positioning of the oceanographic stations where the Niskin bottle samplings were performed (N and S) and where the 64 and 200 μm plankton net samplings were performed (W and E). nCSE – north branch of the South Equatorial Current; SCE – Equatorial Undercurrent.

A partir de perfis com um CTD (*SeaBird Electronics SeaCat SBE-19*), da superfície até os 100 m de profundidade, foi detectado o início da termoclina a uma profundidade em torno dos 55-60 m.

Para as demais campanhas, foram obtidos dados do *WOAslect* (World Ocean Atlas Select), disponibilizado pelo NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), os quais indicaram uma profundidade da termoclina similar entre as campanhas. Dessa forma, no presente estudo, entende-se que a termoclina divide os 100 m de coluna d'água estudados em dois estratos: um estrato de superfície (acima da termoclina), compreendendo as camadas L1, L2 e L3 e outro estrato de subsuperfície (abaixo da termoclina), compreendendo as camadas L4 e L5.

Protistas microplanctônicos

Os protistas planctônicos representam uma importante parcela do zooplâncton de águas oligotróficas dos oceanos tropicais. Foram registrados 6 grupos de protistas microplanctônicos no Arquipélago, Cocolitoforídeos, silicoflagelados, dinoflagelados, ciliados aloricados e loricados (tintinídeos), foraminíferos e radiolários policistíneos, totalizando 238 espécies identificadas, com destaque para os dinoflagelados em abundância e diversidade.

Quando considerada a influência da termoclina sobre esses organismos no entorno do ASPSP, foi observado que pouco mais que 80% dos organismos coletados na camada superficial e que aproximadamente 65% dos registrados abaixo da camada superficial eram dinoflagelados. Um total de 126 espécies deste grupo foram identificadas e esse é um número subestimado, já que grande parte dos indivíduos menores e mais delicados não puderam ser identificados devido a maior sensibilidade das células aos processos de fixação.

Os dinoflagelados possuem a vantagem competitiva de migrar na coluna d'água para profundidades

com concentrações mais elevadas de nutrientes, armazenar os nutrientes no interior de suas células e migrar para camadas mais superficiais, onde a luz está disponível e a fotossíntese pode ocorrer, já que muitas espécies são mixotróficas (JI e FRANKS, 2007). Na área do entorno do Arquipélago, as concentrações mais elevadas de dinoflagelados foram encontradas por volta dos 20 metros de profundidade (Figura 2A). Essa profundidade estava, em geral, associada com o início da termoclina e, conseqüentemente, o início de um gradiente de densidade. Os dinoflagelados podem se concentrar em zonas com gradientes de densidade, ainda que pequenos, por uma limitação na distância máxima que eles podem percorrer (BLASCO, 1978). Dessa forma, a profundidade de início da termoclina pode estar agindo como uma barreira para a dispersão dos dinoflagelados na coluna d'água.

A influência da termoclina sobre a assembleia de dinoflagelados é muito clara. Essa característica ficou evidenciada por meio de uma PERMANOVA ($p < 0,001$) e por uma análise de coordenadas principais (PCoA) (Figura 2D). Existe uma assembleia de dinoflagelados típica da camada superficial, acima da termoclina, e uma assembleia abaixo da camada superficial, na termoclina. Um total de 20 espécies indicadoras de dinoflagelados puderam ser determinadas através de uma análise de valor indicador. Para a camada superficial, 15 espécies foram classificadas como indicadoras, enquanto que para a termoclina, cinco espécies foram classificadas como indicadoras (Tabela I). Muitas dessas espécies pertencem ao gênero *Tripes*, o qual possui importância histórica como indicador ecológico (Figura 3A) (FROST e WILSON, 1938; GRAHAM, 1941).

Os ciliados tintinídeos e radiolários estão presentes com abundâncias bem mais baixas quando comparados com os dinoflagelados. As riquezas também foram menos elevadas em comparação com os dinoflagelados, com um total de 45 e 65 espécies identificadas, respectivamente. Em termos de participação relativa, os tintinídeos representam

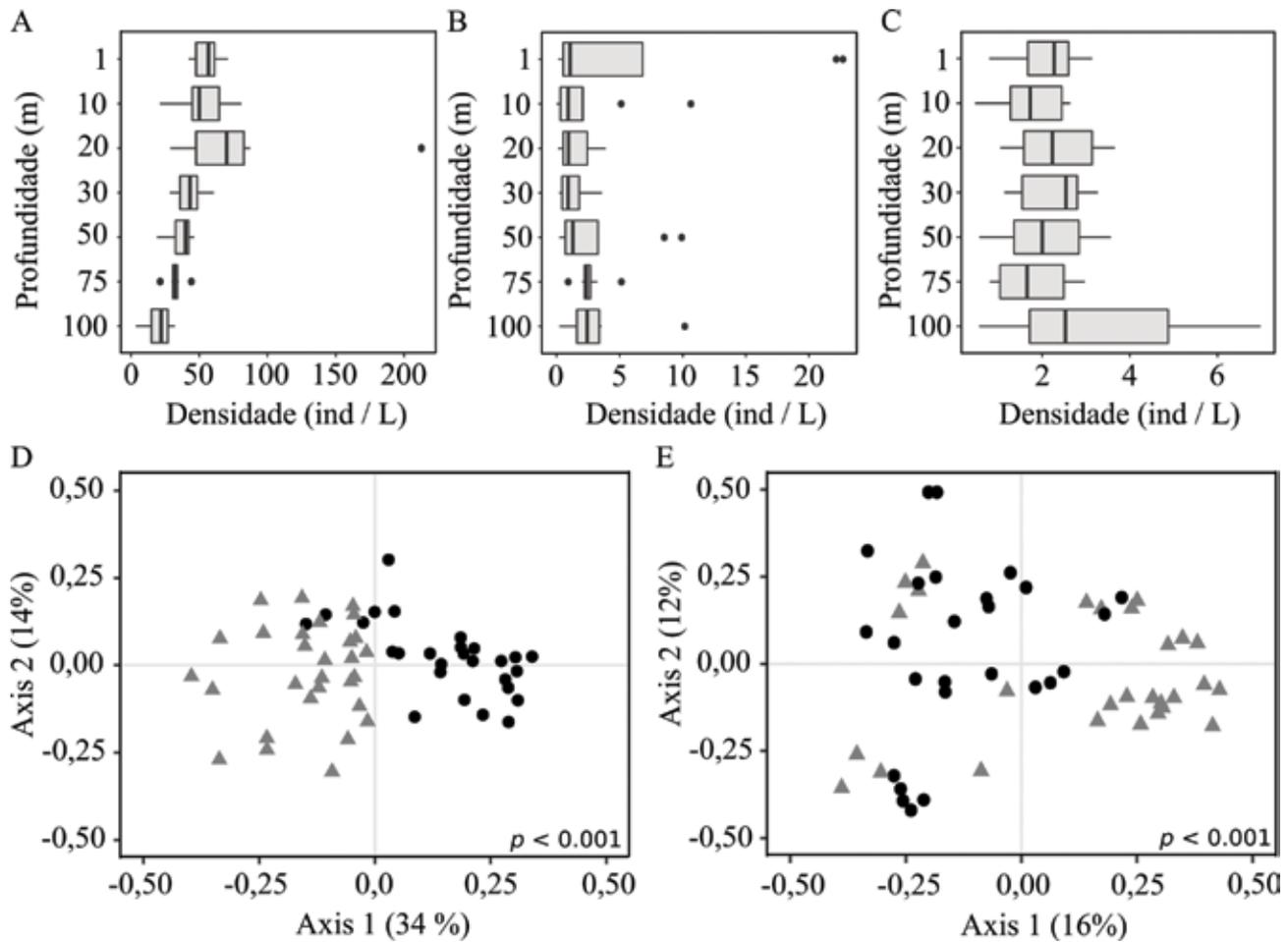


Figura 2. Distribuição vertical dos valores de densidade total da assembleia de dinoflagelados (A), ciliados tintinídeos (B) e radiolários (C). Ordenação das amostras da camada superficial e subsuperficial (amostras da termoclina) pelo método da Análise de Coordenadas Principais (PCoA) com base nas assembleias de dinoflagelados (D) e ciliados tintinídeos (E).

Figure 2. Vertical distribution of the total density values of the dinoflagellate (A), tintinnid ciliates (B), and radiolarians (C) assemblages. Principal Coordinate Analysis (PCoA) ordination based on the dinoflagellates (D), and tintinnid ciliates (E) assemblages.

3,9% dos indivíduos coletados na camada superficial e 6% dos indivíduos encontrados abaixo da termoclina, embora as densidades desses protistas tenham sido mais elevadas na camada superficial (Figura 2B). Esse é um padrão esperado, já que apesar desses organismos ocorrerem em regiões profundas (KRŠINIĆ, 1982), eles são organismos planctônicos típicos de regiões superficiais (THOMPSON *et al.*, 1999). A termoclina

também possui uma influência nítida na assembleia dos ciliados tintinídeos, dividindo-a em uma assembleia característica da camada superficial e outra característica da termoclina ($p < 0,001$) (Figura 2E). Além disso, cinco espécies indicadoras de tintinídeos para as águas da termoclina foram encontradas através de uma análise de valor indicador (Tabela I), diferentemente do que foi constatado para a camada superficial.

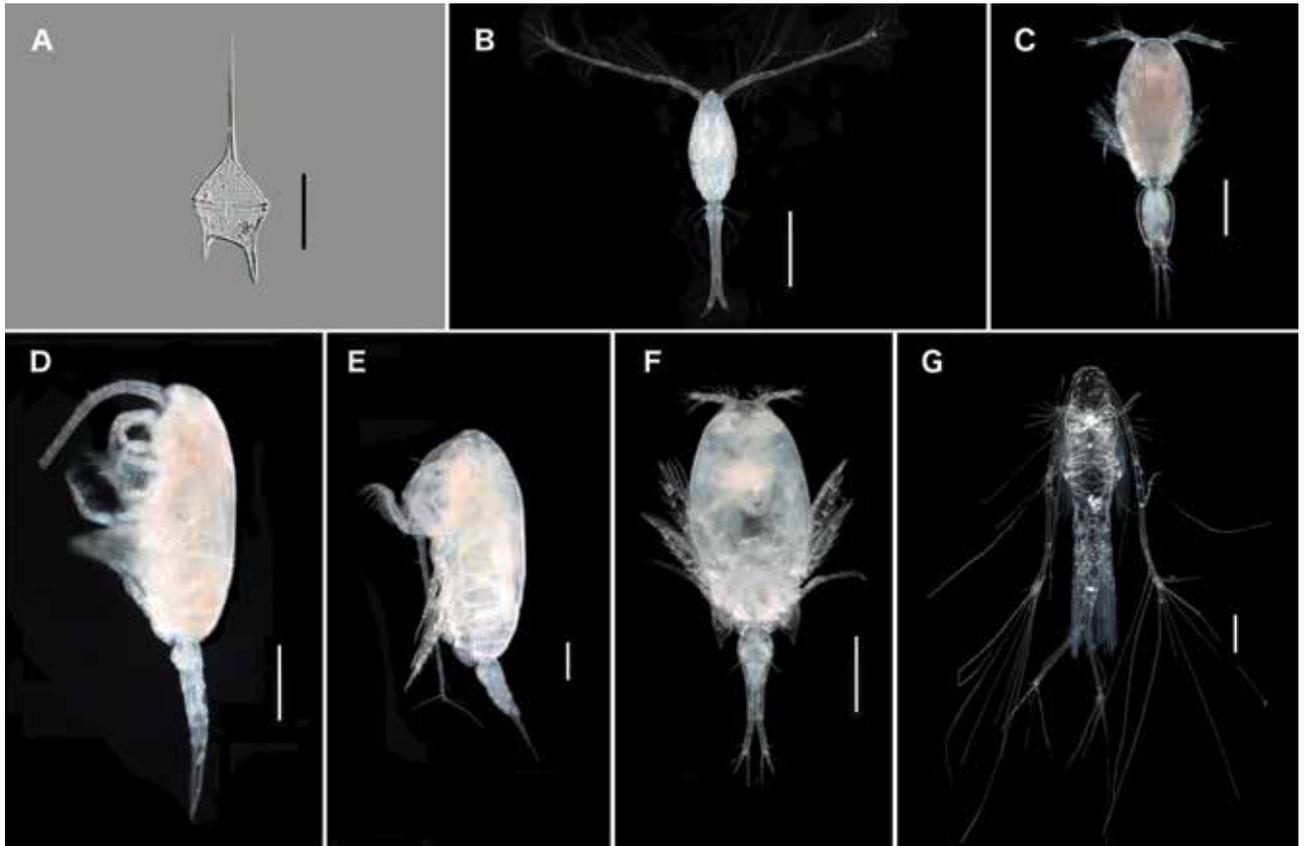


Figura 3. Espécies do zooplâncton do ASPSP. (A) *Tripus pentagonus*, (B) *Oithona plumifera*, (C) *Oncaea media*, (D) *Clausocalanus furcatus*, (E) *Clausocalanus mastigophorus*, (F) *Corycaeus giesbrechti* e (G) *Mormonilla phasma*. Escala: (A) 50 μ m e (B-G) 200 μ m.

Figure 3. Zooplankton species from SPSPA. (A) *Tripus declinatus*, (B) *Oithona plumifera*, (C) *Oncaea media*, (D) *Clausocalanus furcatus*, (E) *Clausocalanus mastigophorus*, (F) *Corycaeus giesbrechti* e (G) *Mormonilla phasma*. Scale: (A) 50 μ m e (B-G) 200 μ m.

Os radiolários, por sua vez, representam 2,8% dos indivíduos coletados na camada superficial e 5% dos indivíduos coletados abaixo da camada superficial, na termoclina. Os radiolários são pouco estudados no Oceano Atlântico e raros são os trabalhos publicados. Os baixos valores de densidade encontrados para a assembleia dos radiolários no entorno do ASPSP estão próximos aos valores encontrados por Thompson *et al.* (1999), no Atlântico Sul. O aumento nos valores de densidade com o aumento da profundidade, por volta dos 100 metros (Figura 2C), está de acordo com o observado por outros autores em áreas do

Oceano Pacífico (DENNETT *et al.*, 2002; ZASKO e RUSANOV, 2005).

Não foi encontrada evidência de influência da termoclina sobre a assembleia dos radiolários, nem a existência de espécies indicadoras da camada superficial ou das águas da termoclina. O intervalo de profundidade estudado não foi o suficiente para se detectar estatisticamente modificações na estrutura vertical da assembleia de radiolários visto que esses organismos são mais comuns, em geral, abaixo dos 200 metros de profundidade (KRŠINIĆ, 1998; KRŠINIĆ e GRBEC, 2002).

Tabela I. Espécies indicadoras da camada superficial e da termoclina determinadas a partir da análise de valor indicador (IndVal). Estão listadas as espécies cujo resultado foi significativo com base em 4999 permutações. n.i. – não identificado.

Table I. Indicator species for the surface layer and thermocline determined by a Indicator Value Analysis (IndVal). Only the significant species after 4999 permutations are listed. n.i. – non identified.

Camada superficial	Termoclina
Dinoflagelados	Dinoflagelados
<i>Corythodinium tessellatum</i>	<i>Amphisolenia globifera</i>
<i>Gonyaulax verior</i>	<i>Dinophysis schuetti</i>
<i>Gymnodinium</i> sp.	<i>Dinophysis uracantha</i>
<i>Histioneis milneri</i>	<i>Phalacroma cuneus</i>
<i>Noctiluca</i> sp.	<i>Triposolenia depressa</i>
<i>Ornithocercus steinii</i>	
<i>Protoperidinium curtipes</i>	Tintinídeos
<i>Tripes candelabrus</i>	<i>Codonella amphorella</i>
<i>Tripes declinatus</i>	<i>Dictyocysta entzi</i>
<i>Tripes fusus</i>	<i>Dictyocysta lepida</i>
<i>Tripes gibberus</i>	<i>Dictyocysta mitra</i>
<i>Tripes macroceros</i>	<i>Dictyocysta</i> sp.
<i>Tripes muelleri</i>	Tintinnina n.i.
<i>Tripes pentagonus</i>	
<i>Tripes teres</i>	

De forma geral, a termoclina possui efeitos distintos sobre as diferentes assembleias de protistas microplanctônicos no entorno do ASPSP. O efeito mais claro ocorre na assembleia de dinoflagelados, com alteração nítida em sua estrutura, enquanto que a assembleia de tintinídeos é afetada, embora que em menor grau quando comparada com a assembleia de dinoflagelados. A assembleia de radiolários não é afetada nos primeiros 100 metros de profundidade, embora exista uma tendência de aumento nos valores de densidades por volta dos 100 metros.

Zooplâncton

O microzooplâncton do ASPSP esteve representado por 102 táxons, considerando a menor categoria taxonômica possível, distribuídos em 8 Filos (Myzozoa, Ciliophora, Cnidaria, Annelida, Mollusca, Arthropoda, Chaetognatha e Chordata), com domínio de organismos pertencentes ao protozooplâncton (dinoflagelados, foraminíferos, radiolários e tintinídeos) e à classe dos Copepoda (náuplios e copepoditos).

Com relação à frequência de ocorrência, 21 taxa apresentaram valores iguais ou acima de 60%, destacando-se *Ceratium* spp., Copepoda (Náuplio) e *Oncaea* spp. (juvenil), que apresentaram 100% de frequência de ocorrência. Outros 50 taxa tiveram seus valores de frequência de ocorrência abaixo de 15% e foram considerados raros. A diversidade de espécies foi bastante elevada e apresentou uma tendência de diminuição de 0-20 m ($3,76 \pm 0,24$ bits. ind⁻¹) em direção aos 80-100 m ($3,46 \pm 0,31$ bits. ind⁻¹). Com relação à equitabilidade, em todas as campanhas foram encontrados valores acima de 0,5 para todas as camadas, o que indica uma homogeneidade e equilíbrio na comunidade. A riqueza de espécies apresentou um padrão em função da profundidade, com um aumento de 0-20 m ($4,24 \pm 0,63$) até atingir seu máximo em 60-80 m ($5,52 \pm 1,20$), seguido de uma leve diminuição em 80-100 m ($5,29 \pm 1,22$).

Águas oligotróficas de regiões tropicais apresentam elevadas riqueza e diversidade de organismos e uma teia trófica complexa (FINENKO *et al.*, 2003), sendo a maioria das espécies destes ambientes consistentemente rara (PIONTKOVSKI *et al.*, 2003). A partir dos resultados obtidos, é possível inferir que no ASPSP, área de forte estratificação da coluna d'água, a diversidade e a riqueza de espécies sofrem intensa influência da profundidade. A resposta de espécies à estável estrutura vertical da termoclina oceânica é uma importante causa da diversidade regional do plâncton (LONGHURST, 1985), assim como a pressão por predação também pode ser uma

das principais causas de altas diversidades nestas áreas (MCGOWAN e WALKER, 1985).

A densidade média do microzooplâncton durante o momento estudado foi de $1093,47 \pm 841,58 \text{ ind. m}^{-3}$, com um máximo de $4068,32 \pm 128,02 \text{ ind. m}^{-3}$ e um mínimo de $10,42 \pm 0,61 \text{ ind. m}^{-3}$. Durante o período diurno, a densidade média apresentou uma diminuição dos 0-20 m ($1684,71 \pm 713,16 \text{ ind. m}^{-3}$) em direção aos 40-60 m ($650,24 \pm 818,99 \text{ ind. m}^{-3}$), seguida de um aumento até 80-100 m ($1129,54 \pm 1510,31 \text{ ind. m}^{-3}$). No período noturno, entretanto, a média da densidade mostrou uma diminuição desde 0-20 m ($1699,01 \pm 726,59 \text{ ind. m}^{-3}$) até 80-100 m ($405,11 \pm 398,38 \text{ ind. m}^{-3}$), passando por um leve aumento em 40-60 m ($1558,14 \pm 576,70 \text{ ind. m}^{-3}$) (Figura 4A). Entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os períodos diurno e noturno (teste t, $p = 0,764$). PAFFENHÖFER e MAZZOCCHI (2003) também não encontraram essa diferença e atribuíram isto a inexistência de uma migração vertical marcante.

Quando comparadas as densidades de todas as camadas, foram encontradas diferenças significativas (ANOVA, $p = 0,022$), com 0-20 m, 20-40 m e 40-60 m diferentes significativamente de 60-80 m e 80-100 m, separando a coluna d'água em dois estratos: superfície (0-20 m, 20-40 m e 40-60 m) e subsuperfície (60-80 m e 80-100 m). Comparando estes dois estratos, encontrou-se diferenças significativas entre eles (teste t, $p < 0,001$), o que destaca ainda mais a importância da termocline.

Com relação à distribuição vertical dos grupos Protista, Copepoda (adulto), Copepoda (juvenil) e Copepoda (náuplio), todos seguem um padrão de diminuição da densidade em relação à profundidade. Os Protistas (composto por Dinoflagellata, Tintinnina, Foraminifera e Radiolaria) apresentou, ainda, um aumento da densidade na profundidade 80-100 m em relação à 60-80 m. O subgrupo de outros organismos apresenta um padrão de manutenção da densidade independente da profundidade (Figura 4B).

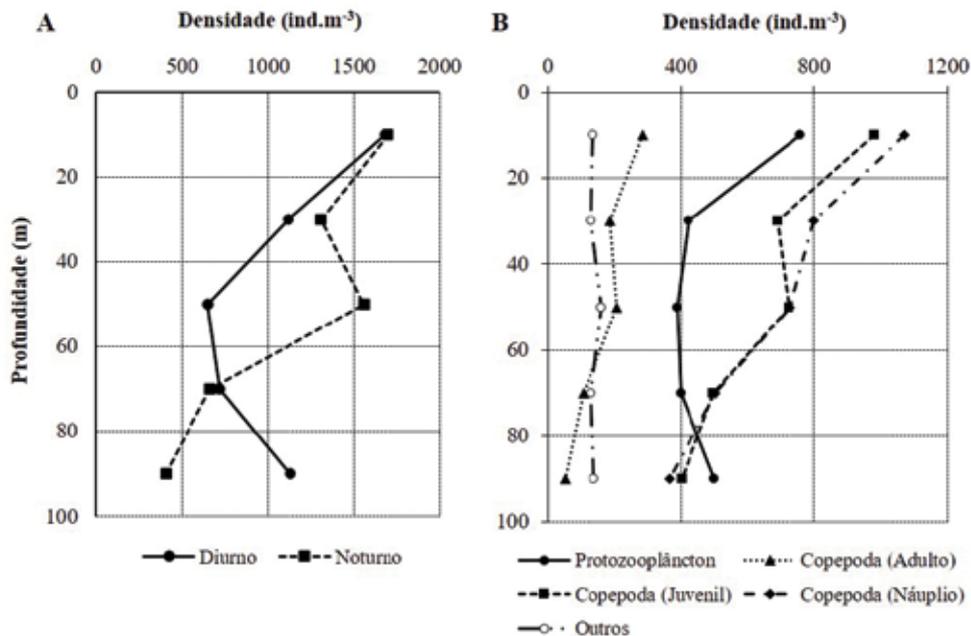


Figura 4. Distribuição vertical da densidade média total do microzooplâncton nos períodos diurno e noturno (A) e densidade total dos principais grupos do microzooplâncton (B) no ASPSP nas campanhas C1 (2010), C2 e C3 (2011). **Figure 4.** Vertical distribution of mean total density of the microzooplankton in the diurnal and nocturnal periods (A) and total density of the main microzooplanktonic groups (B) in the SPSPA in C1 (2010), C2 and C3 (2011) campaigns.

Apesar da variabilidade na distribuição vertical dos organismos pertencentes ao microzooplâncton no ASPSP, um padrão geral pode ser observado: a distribuição destes organismos está intimamente relacionada à estratificação térmica do ambiente. Ou seja, a termoclina exerce um papel fundamental na ecologia destes organismos planctônicos, como já sugerido por Sameoto (1986) e Paffenhöfer e Mazzocchi (2003).

Copepoda do mesozooplâncton

Os Copepoda do mesozooplâncton estiveram representados por 131 *taxa*, com 107 identificados até o nível de espécie, compreendendo copepoditos juvenis e adultos (machos e fêmeas), enquanto os demais táxons estiveram representados apenas por copepoditos juvenis. Calanoida foi a principal ordem, representada por 74 espécies, seguida por Cyclopoida (27), Harpacticoida (5) e Mormonilloida, esta última representada por uma única espécie, *Mormonilla phasma* (Figura 3G), que esteve restrita às camadas inferiores (entre 60 e 100 m) (Figura 4A). O registro dessa espécie em águas rasas no ASPSP quando comparado a sua ocorrência em outras regiões (200 a 1000 m), indica algum tipo de ressurgência orográfica, ou “pulsos” de ressurgência

na área, tendo sido o primeiro registro da espécie no Atlântico Sul oriental (MELO *et al.*, 2015).

Dentre as principais espécies identificadas, oito se destacaram em termos de ocorrência, *Clausocalanus furcatus* e *Oithona plumifera* que estiverem presentes em 100% das amostras, *Calocalanus pavo* (90%), *Euchaeta marina* e *Oncaea media* (81,7%), *Farranula gracilis* (75%), *Paracalanus aculeatus* (71,7%) e *Macrosetella gracilis* (60%). Algumas dessas espécies são apresentadas na Figura 3 (B-D).

Foi observada uma relação inversa entre profundidade e o número de espécies, com o maior número ocorrendo em L5 (82), seguido por L4 (68), L3 (54), L2 (45) e L1 (44). A riqueza apresentou este mesmo padrão, com um aumento com a profundidade em todas as campanhas (Figura 5B). Das espécies observadas, 56 foram registradas pela primeira vez para o ASPSP (Tabela II)(Figura 3 E-G). A maior parte dessas espécies estiveram relacionadas com a camada abaixo da termoclina (L4 e L5), sugerindo movimentos migratórios a partir de águas mais profundas em direção à região epipelágica, limitado pela presença da termoclina. Essa elevada riqueza de espécies e número de novos registros destaca a importância de estudos em águas mais profundas no entorno do ASPSP, uma vez que

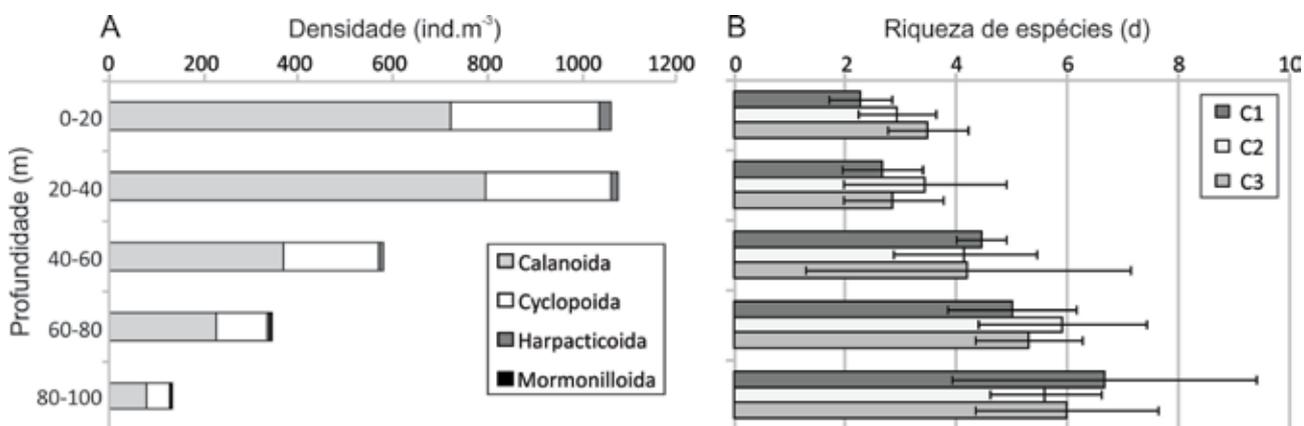


Figura 5. Distribuição vertical da densidade das diferentes ordens (A) e riqueza de espécies (B) dos Copepoda nas campanhas C1 (2010), C2 e C3 (2011) no ASPSP.

Figure 5. Vertical distribution of the density of the different orders (A) and species richness (B) of Copepoda in the C1 (2010), C2 and C3 (2011) campaigns in SPSPA.

a variação vertical é a principal forma de criação de nichos em ambientes oceânicos (MCGOWAN e WALKER, 1979; AMBLER e MILLER, 1987).

Dentre os *taxa* identificados, alguns ocorreram em apenas um horário de coleta, sendo 22 exclusivamente diurnos e 38 exclusivamente noturnos. Alguns *taxa* apresentaram distribuição fortemente limitada pela presença da termoclina, com 19 ocorrendo apenas acima (0-60 m), enquanto 43 ocorreram exclusivamente abaixo (60-100 m), destacando o importante papel do fotoperíodo e da termoclina como forçantes reguladoras da distribuição vertical das espécies (WICKSTEAD, 1976; WILLIAMS e CONWAY, 1980; PAFFENHÖFER e MAZZOCCHI, 2003).

A densidade média dos Copepoda para as três campanhas apresentou uma redução da superfície até os 100 m, com L1 e L2 apresentando média de 1061,7 e 1074,1 ind.m⁻³ respectivamente, enquanto L5 apresentou média de 129,6 ind.m⁻³ (Figura 5A). Esse padrão de redução com a profundidade é observado em várias regiões oceânicas tropicais e subtropicais (SHIMODE *et al.*, 2006; BRUGNANO *et al.*, 2010). No período diurno, esse padrão foi evidenciado em todas as campanhas, enquanto no período noturno, apesar das camadas superiores (L1 e L2) apresentarem densidades superiores na maioria das vezes, na estação a leste do ASPSP durante a campanha C1, a maior densidade ocorreu em L4. Esse incremento em L4 no período noturno está relacionado à migração de espécies de águas de maior profundidade em direção ao ambiente epipelágico.

Tabela II. Espécies de Copepoda com primeiro registro para o ASPSP.

Table II. Copepods species with the first record for the SPSPA.

<i>Taxa</i>	
<i>Calanus propinquus</i> Brady, 1883	<i>H. longicornis</i> (Claus, 1863)
<i>Acrocalanus gracilis</i> Giesbrecht, 1888	<i>H. mucronatus</i> (Claus, 1863)
<i>Calocalanus contractus</i> Farran, 1926	<i>H. oxycephalus</i> (Giesbrecht, 1889)
<i>C. minutus</i> Andronov, 1973	<i>Heterorhabdus lobatus</i> Bradford, 1971
<i>C. styliremis</i> Giesbrecht, 1888	<i>H. spinifrons</i> (Claus, 1863)
<i>Paracalanus indicus</i> Wolfenden, 1905	<i>H. vipera</i> (Giesbrecht, 1889)
<i>Subeucalanus subtenuis</i> (Giesbrecht, 1888)	<i>Centropages gracilis</i> (Dana, 1849)
<i>Clausocalanus arcuicornis</i> (Dana, 1849)	<i>C. longicornis</i> Mori, 1932
<i>C. ingens</i> Frost & Fleminger, 1968	<i>Temoropia mayumbaensis</i> T. Scott, 1894
<i>C. mastigophorus</i> (Claus, 1863)	<i>Candacia bipinnata</i> (Giesbrecht, 1889)
<i>C. minor</i> Sewell, 1929	<i>C. longimana</i> (Claus, 1863)
<i>C. parapergens</i> Frost & Fleminger, 1968	<i>C. varicans</i> (Giesbrecht, 1892)
<i>C. paululus</i> Farran, 1926	<i>Oithona setigera</i> (Dana, 1849)
<i>C. pergens</i> Farran, 1926	<i>Conaea</i> sp.1
<i>Ctenocalanus vanus</i> Giesbrecht, 1888	<i>Lubbockia squillimana</i> Claus, 1863
<i>Aetideus acutus</i> Farran, 1929	<i>Oncaea mediterranea</i> (Claus, 1863)
<i>Euchirella amoena</i> Giesbrecht, 1888	<i>O. scottodicarloi</i> Heron & Bradford-Grieve, 1995
<i>E. pulchra</i> (Lubbock, 1856)	<i>Triconia conifera</i> (Giesbrecht, 1891)
<i>E. splendens</i> Vervoort, 1963	<i>Copilia quadrata</i> Dana, 1849
<i>E. truncata</i> Esterly, 1911	<i>Sapphirina metallina</i> Dana, 1849
<i>Gaetanus minor</i> Farran, 1905	<i>Vettopia granulosa</i> (Giesbrecht, 1891)
<i>Scaphocalanus curtus</i> (Farran, 1926)	<i>Corycaeus (Agetus) flaccus</i> Giesbrecht, 1891
<i>Scolecithricella</i> sp.1	<i>C. (Agetus) typicus</i> (Krøyer, 1849)
<i>Scolecithrichopsis ctenopus</i> (Giesbrecht, 1888)	<i>C. (Onychocorycaeus) agilis</i> Dana, 1849
<i>Scolecithrix bradyi</i> Giesbrecht, 1888	<i>C. (Onychocorycaeus) giesbrechti</i> F. Dahl, 1894
<i>Arietellus aculeatus</i> (T. Scott, 1894)	<i>C. (Onychocorycaeus) ovalis</i> Claus, 1863
<i>Augaptilus longicaudatus</i> (Claus, 1863)	<i>Distiocolus minor</i> (T. Scott, 1894)
<i>Haloptilus longicirrus</i> Brodsky, 1950	<i>Mormonilla phasma</i> Giesbrecht, 1891

Conclusões

A distribuição vertical dos protistas e animais do plâncton epipelágico no entorno do ASPSP demonstrou uma variabilidade fortemente associada a estrutura vertical de densidade, induzida pela variação vertical da temperatura, bem como pelo fotoperíodo. Fica evidenciado que, verticalmente, a termoclina tem importante papel na biologia e ecologia do plâncton, uma vez que pode atuar como uma barreira física, afetando a distribuição vertical das diferentes espécies. Ao mesmo tempo, o fotoperíodo regulou a ocorrência e densidade de várias espécies de Copepoda, mostrando que a termoclina, em conjunto com a variação diária da luz, afetam os padrões de biodiversidade (riqueza, diversidade e equitabilidade) e abundância desta parcela do plâncton oceânico. Os resultados aqui discutidos foram obtidos a partir de estudos que se concentraram nos primeiros 100 metros da coluna d'água. Os organismos planctônicos não estão restritos a esse intervalo de profundidade e a ampliação dos estudos para camadas ainda mais profundas no entorno do ASPSP permanece um desafio. Um segundo desafio diz respeito a adoção de abordagens holísticas no estudo do plâncton do ASPSP. O caminho para este fim está sendo trilhado e é possível que nos próximos anos, com o aumento no número de estudos realizados, esse tipo de abordagem seja possibilitada.

Referências Bibliográficas

- AGATHA, S. and SIMON, P. **On the nature of tintinnid loricae (Ciliophora: Spirotricha: Tintinnina): a histochemical, enzymatic, EDX, and high-resolution TEM study.** *Acta Protozoologica*, v. 51, p. 1-19. 2012.
- ALCARAZ, M.; ESTRADA, M. and MARRASÉ, C. **Interaction between turbulence and zooplankton in laboratory microcosms.** *21st EMBS. Polish Academy of Sciences*, p. 191-204. 1989.
- AMBLER, J.W. and MILLER, C.B. **Vertical habitat-partitioning by copepodites and adults of subtropical oceanic copepods.** *Marine Biology*, v. 94, p. 561-577. 1987.
- ANDRADE, A. **Ictioneuston do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** 2000. 58 f. Monografia em Ciências Biológicas, Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife. 2000.
- ARAÚJO, E.M. **Macrozooplankton da zona economica exclusiva do nordeste do Brasil em ênfase em Siphonora da cadeia Rocas/Noronha e do Arquipélago São Pedro e São Paulo (Revizee NE II).** 2003. 79 f. Monografia em, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2003.
- ARAÚJO, E.M. **Siphonophora (Cnidaria) do Arquipélago São Pedro e São Paulo e da Cadeia Norte/Rocas/Noronha (Brasil).** 2006. 226 f. Dissertação em Biologia animal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2006.
- ARAÚJO, M. and CINTRA, M. **Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** In: Hazin, F.H.V. (Ed.). *O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.* Brasília: SECIRM p. 107-114. 2009.
- AZAM, F.; FENCHEL, T.; FIELD, J.G.; GRAY, J.S.; MEYER-REIL, L.A. and THINGSTAD, F. **The ecological role of water-column microbes in the sea.** *Marine Ecology Progress Series*, v. 10, p. 257-263. 1983.
- BLASCO, D. **Observations on the diel migration of marine dinoflagellates off the Baja California coast.** *Marine Biology*, v. 46, p. 41-47. 1978.
- BOEHLERT, G.W. **Current-topography interactions at midocean seamounts and the impact on pelagic ecosystems.** *GeoJournal*, v. 1, p. 45-52. 1998.
- BOEHLERT, G.W.; GENIN, A. **A review of the effects of seamounts on biological processes.** In: Keating, B.H.; Fryer, P.; Batiza, R.; Boehlert, G.W. (Ed.). *Seamounts Islands and Atolls: American Geophysical Union Washington* p. 319-334. 1987.
- BRUGNANO, C.; BERGAMASCO, A.; GRANATA, A.; GUGLIELMO, L. and ZAGAMI, G. **Spatial distribution and community structure of copepods in a central Mediterranean key region (Egadi Islands—Sicily Channel).** *Journal of Marine Systems*, v. 81, p. 312-322. 2010.
- CAMPOS, T.F.C.; BEZERRA, F.H.R.; SRIVASTAVA, N.K.; VIEIRA, M.M.; VITA-FINZI, C. **Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul rocks (Equatorial Atlantic) consistent with emplacement by extrusion.** *Marine Geology*, v. 271, p. 177-186. 2010.
- CAVALCANTI, E.A.H. **Macrozooplâncton da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil (REVIZEE NEII e NEIII) com ênfase em Copepoda.** 2002. 91 f. Dissertação em

Biologia Animal, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2002.

CAVALCANTI, E.A.H. and LARRAZÁBAL, M.E.L.

Macrozooplâncton da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil (segunda expedição oceanográfica - REVIZEE/NE II) com ênfase em Copepoda (Crustacea). *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 21, p. 467-475. 2004.

CHOI, C.I. **Primary production and release of dissolved organic carbon from phytoplankton in the western North Atlantic Ocean.** *Deep-Sea Research*, v. 19, p. 731-735. 1972.

CORREIA, E.P. Migração vertical do microzooplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. 2014. 48 f. Dissertação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2014.

COSTA, A.E.S.F.; SANTANA, J.R. and NEUMANN-LEITÃO, S. **Changes in microplanktonic protists assemblages promoted by the thermocline induced stratification around an oceanic archipelago.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*. 2018a. (no prelo).

COSTA, A.E.S.F. Ecologia de protozoários no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: dinâmica espacial e temporal. 2018. 89 f. Tese em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2018b.

CULLEN, J.J. **The deep chlorophyll maximum: comparing vertical profiles of chlorophyll-a.** *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, v. 39, n. 5, p. 791-803. 1982.

DADAY, E. **Monographie der Familie der Tintinnodeen.** *Mittheilungen aus der Zoologische Station zu Neapel*, v. 7, p. 473-591. 1887.

DARWIN, C.; KING, P.P. and FITZROY, R. 1839. **Narrative of the surveying voyages of His Majesty's Ships Adventure and Beagle between the years 1826 and 1836, describing their examination of the southern shores of South America, and the Beagle's circumnavigation of the globe.** London: Henry Colburn, 352 p.

DELANO, A. 1817. **Narrative of Voyages and Travels in the Northern and Southern Hemispheres: Comprising Three Voyages Round the World; Together with a Voyage of Survey and Discovery, in the Pacific Ocean and Oriental Islands. By Amasa Delano.** E. G. House, 598 p.

DENNETT, M.R.; CARON, D.A.; MICHAELS, A.F.; GALLAGER, S.M. and DAVIS, C.S. **Video plankton recorder reveals high abundances of colonial Radiolaria in surface waters of the central North Pacific.** *Journal of Plankton Research*, v. 24, p. 797-805. 2002.

DOTY, M.S. and OGURY, M. **The island mass effect.** *Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, v. 22, p. 33-37. 1956.

FEITOZA, B.M.; ROCHA, L.A.; LUIZ-JÚNIOR, O.J.; FLOETER, S.R.; GASPARINI, J.L. **Reef fishes of St. Paul's rocks: new records and notes on biology and zoogeography.** *Aqua Journal of Ichthyology and Aquatic Biology*, v. 7, p. 61-82. 2003.

FERNÁNDEZ, F. **Efecto de la intensidad de luz natural en la actividad metabólica y en la alimentación de varias especies de copépodos planctónicos.** *Investigación Pesquera*, v. 41, p. 575-602. 1977.

FINENKO, Z.Z.; PIONTKOVSKI, S.A.; WILLIAMS, R. and MISHONOV, A.V. **Variability of phytoplankton and mesozooplankton biomass in the subtropical and tropical Atlantic Ocean.** *Marine Ecology Progress Series*, v. 250, p. 125-144. 2003.

FOGG, G.E. **Extracellular products of phytoplankton and the estimation of primary production.** *Rapports et Proces-Verbaux du Conseil International pour l'Exploration de la Mer*, v. 144, p. 56-60. 1958.

FOL, M.H. **Contribution a la connaissance de la famille des Tintinnodea.** *Archives des Sciences Physiques et Naturelles*, v. 5, p. 5-24. 1881.

FRASER, J. **Nature Adrift: the Story of Marine Plankton.** London: G. T. Foulis, 1962. 178 p.

FREIRE, A.S.; BARTELLA, M.; BIROLO, A.B.; SOARES, L.C.P.M.; VILELA, R.V. and THEY, N.G.H. 2004. **Ciclos de Vida de crustáceos decápodos e estomatopodos no arquipélago de São Pedro e São Paulo: Ocorrência de larvas planctônicas.** II Workshop Científico/Ambiental. p. 9.

FROST, N. and WILSON, A.M. **The genus Ceratium and its use as an indicator of hydrographic conditions in the Newfoundland waters.** *Newfoundland Research Bulletin*, v. 5, p. 1-15. 1938.

GALVÃO, I.B. O nanoplâncton e o microplâncton da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil (REVIZEE-NEII). Recife, 2000. 160 p. 2000. 160 f. Dissertação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2000.

GARCÍA-DÍAZ, X.F. Zooplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (NE, Brasil). 2007. 84 f. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007.

GARCÍA-DÍAZ, X.F.; GUSMÃO, L.M.O. and NEUMANN-LEITÃO, S. Biodiversidade e dinâmica espaço-temporal do zooplâncton. *O arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de estação científica.* Hazin, F.H.V. Brasília: SECIRM: 138-147 p. 2009.

- GENIN, A. **Bio-physical coupling in the formation of zooplankton and fish aggregations over abrupt topographies.** *Journal of Marine Systems*, v. 50, p. 3-20. 2004.
- GÓMEZ, F. **A list of free-living dinoflagellate species in the world's oceans.** *Acta Botanica Croatica*, v. 64, n. 1, 129-212. 2005.
- GRAHAM, H.W. **An Oceanographic Consideration of the Dinoflagellate Genus Ceratium.** *Ecological Monographs*, v. 11, p. 99-116. 1941.
- GROSS, M.G. and GROSS, E.R. 1996. **Oceanography, a View of Earth.** Prentice Hall, 472 p.
- GOVE, J.M.; McMANUS, M.A.; NEUHEIMER, A.B.; POLOVINA, J.J.; DRAZEN, J.C.; SMITH, R.C.; MERRIFIELD, M.A.; FRIEDLANDER, A.M.; EHSES, J.S.; YOUNG, C.W.; DILLON, A.K. and WILLIAMS, G.J. **Near-island biological hotspots in barren ocean-basins.** *Nature Communications*, 7:10581. 2016.
- HERBLAND, A. and VOITURIEZ, B. **Hydrological structure analysis for estimating the primary production in the tropical Atlantic Ocean.** *Journal of Marine Research*, v. 37, 87-101. 1979.
- Jl, R. and FRANKS, P.J.S. **Vertical migration of dinoflagellates: model analysis of strategies, growth, and vertical distribution patterns.** *Marine Ecology Progress Series*, v. 344, p. 49-61. 2007.
- KRŠINIĆ, F. **On vertical distribution of tintinnines (Ciliata, Oligotrichida, Tintinnina) in the open waters of the South Adriatic.** *Marine Biology*, v. 68, p. 83-90. 1982.
- KRŠINIĆ, F. **Vertical distribution of protozoan and microcopepod communities in the South Adriatic Pit.** *Journal of Plankton Research*, v. 20, p. 1033-1060. 1998.
- KRŠINIĆ, F. and GRBEC, B. **Some distributional characteristics of small zooplankton at two stations in the Otranto Strait (Eastern Mediterranean).** *Hydrobiologia*, v. 482, p. 119-136. 2002.
- LESSA, R.P.; BEZERRA JR., J.L.; LIMA, M.; PEREIRA, A.A. and NASCIMENTO, E.D. 2000. Composição, distribuição e abundância do ictonêuston da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil (1995-2000): Programa REVIZEE. Comissão Interministerial para os Recursos do Mar, Programa REVIZEE. Recife, p. 31
- LEVINTON, J.S. 1995. **Marine Biology: Function, Biodiversity, Ecology.** New York: Oxford University Press, 420 p.
- LONGHURST, A.R. **Relationship between diversity and the vertical structure of the upper ocean.** *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*, v. 32, p. 1535-1570. 1985.
- LONGHURST, A.R. and PAULY, D. 1987. **Ecology of Tropical Oceans.** San Diego: Academic Press, 407 p.
- MAIA, M.; SICHEL, S.; BRIAIS, A.; BRUNELLI, D.; LIGI, M.; FERREIRA, N.; CAMPOS, T.; MOUGEL, B.; BREHME, I.; HÉMOND, C.; MOTOKI, A.; MOURA, D.; SCALABRIN, C.; PESSANHA, I.; ALVES, E.; AYRES, A. and OLIVEIRA, P. **Extreme mantle uplift and exhumation along a transpressive transform fault.** *Nature Geoscience*, v. 9, 619-623. 2016.
- MARSHALL, S.M. **Respiration and feeding in copepods.** *Advances in Marine Biology*, v. 11, p. 57-120. 1973.
- MAYZAUD, P. **Respiration and nitrogen excretion of zooplankton. II. Studies of the metabolic characteristics of starved animals.** *Marine Biology*, v. 21, p. 19-28. 1973.
- MCGOWAN, J.A. and WALKER, P.W. **Structure in the Copepod Community of the North Pacific Central Gyre.** *Ecological Monographs*, v. 49, p. 195-226. 1979.
- MCGOWAN, J.A. and WALKER, P.W. **Dominance and Diversity Maintenance in an Oceanic Ecosystem.** *Ecological Monographs*, v. 55, p. 103-118. 1985.
- MCLAREN, I.A. **Effects of temperature on growth of zooplankton, and the adaptive value of vertical migration.** *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, v. 26, p. 199-220. 1963.
- MELO, P.A.M.C. Efeito da turbulência sobre a migração vertical dos Copepoda no Arquipélago de São Pedro e São Paulo – Brasil. 2013. 72 f. Tese de Doutorado em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco 2013.
- MELO, P.A.M.C.; MELO JÚNIOR, M.; ARAUJO, M. and NEUMANN-LEITÃO, S. **The first occurrence of the Order Mormonilloida (Copepoda) in the Tropical Southwest Atlantic Ocean.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, v. 87, p. 233-237. 2015.
- MELO, P.A.M.C.; MELO JÚNIOR, M.; ARAÚJO, M. and NEUMANN-LEITÃO, S. **A morphological anomaly in Clausocalanus mastigophorus (Claus, 1863) (Copepoda, Calanoida) from St. Peter and St. Paul Archipelago.** *Brazilian Journal of Biology*, v. 74, p. 728-729. 2014.
- NEUMANN-LEITAO, S.; GUSMAO, L.M.O.; SILVA, T.A.; NASCIMENTO-VIEIRA, D.A. and SILVA, A.P. **Mesozooplankton biomass and diversity in coastal**

- and oceanic waters off North-eastern Brazil. *Archive of Fishery and Marine Research*, v. 47, p. 153-165. 1999.
- OLIVEIRA, V.S.d. and LARRAZÁBAL, M.E.L. **Pteropoda (Gastropoda, Thecosomata e Gymnosomata) coligidos ao largo dos arquipélagos de São Pedro e São Paulo, costa nordeste, Brasil.** *Revista Brasileira de Zoologia*, v. 19, p. 215-227. 2002.
- OMORI, M. and IKEDA, T. 1984. **Methods in marine zooplankton ecology.** New York.: Wiley-Interscience Publications, 331 p.
- PAFFENHÖFER, G.-A. and MAZZOCCHI, M.G. **Vertical distribution of subtropical epiplanktonic copepods.** *Journal of Plankton Research*, v. 25, p. 1139-1156. 2003.
- PARANAGUÁ, M.N.; NASCIMENTO-VIEIRA, D.A.; GUSMÃO, L.M.O.; NEUMANN-LEITÃO, S. and SCHWAMBORN, R. 2004. *Estrutura da comunidade zooplanctônica.* In: Eskinazi-Leça, E.; Neumann-Leitão, S.; Costa, M.F. (Ed.). *Oceanografia: um cenário tropical.* Recife: Bargaço & UFPE p. 441-459.
- PIONTKOVSKI, S.A.; LANDRY, M.R.; FINENKO, Z.Z.; KOVALEV, A.V.; WILLIAMS, R.; GALLIENNE, C.P.; MISHONOV, A.V.; SKRYABIN, V.A.; TOKAREV, Y.N. and NIKOLSKY, V.N. **Plankton communities of the South Atlantic anticyclonic gyre.** *Oceanologica Acta*, v. 26, p. 255-268. 2003.
- ROGERS, A.D. **The biology of seamounts.** *Advances in Marine Biology*, v. 30, p. 305-350. 1994.
- SAMEOTO, D.D. **Influence of the biological and physical environment on the vertical distribution of mesozooplankton and micronekton in the eastern tropical Pacific.** *Marine Biology*, v. 93, p. 263-279. 1986.
- SHIMODE, S.; TODA, T. and KIKUCHI, T. **Spatio-temporal changes in diversity and community structure of planktonic copepods in Sagami Bay, Japan.** *Marine Biology*, v. 148, p. 581-597. 2006.
- SIEBURTH, J.McN. **Pelagic ecosystem structure: heterotrophic compartments of the plankton and their relationship to plankton size fractions.** *Limnology and Oceanography*, v. 23, n. 6. 1978.
- SIGNORINI, S.R.; MCCLAIN, C.R. and DANDONNEAU, Y. **Mixing and phytoplankton bloom in the wake of the Marquesas Islands.** *Geophysical Research Letters*, v. 26, p. 3121-3124. 1999.
- SIQUEIRA, P.M.X. Distribuição espacial de pico e nanoplâncton oceânicos do nordeste do Brasil (Revizee NE III). 2002. 37 f. Monografia em, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2002.
- SMAYDA, T.J. **Adaptive ecology, growth strategies and the global bloom expansion of dinoflagellates.** *Journal of Oceanography*, v. 58, 281-294. 2002.
- SOUZA, P.M.M. 2001. Distribuição espacial e temporal das comunidades planctônicas ao longo da Zona Econômica Exclusiva. Programa de avaliação do potencial sustentável de recursos vivos da zona econômica exclusiva- REVIZEE Score Nordeste. Universidade Federal da Bahia. Salvador.
- STRAMMA, L. and SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean.** *Deep Sea Research Part II*, v. 46, p. 279-303. 1999.
- STRICKLER, J.R. **Feeding currents in calanoid copepods: two new hypotheses.** *Symposia of the Society for Experimental Biology*, v. 89, p. 459-485. 1985.
- TAYLOR, F.J.R.; HOPPENRATH, M. and SILDARRIAGA, J. F. **Dinoflagellate diversity and distribution.** *Biodiversity and Conservation*, v. 17, p. 407-418. 2008.
- THOMPSON, G.A.; ALDER, V.A.; BOLTOVSKOY, D. and BRANDINI, F. **Abundance and biogeography of tintinnids (Ciliophora) and associated microzooplankton in the Southwestern Atlantic Ocean.** *Journal of Plankton Research*, v. 21, p. 1265-1298. 1999.
- UDA, M. and ISHINO, M. **Enrichment patterns resulting from eddy systems in relation to fishing grounds.** *Journal of the Tokyo University of Fisheries*, v. 44, p. 105-119. 1958.
- VIANA, D.d.L.; HAZIN, F.H.V. and SOUZA, M.A.C. 2009. **O arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de estação científica.** Brasília: SECIRM, 348 p.
- WICKSTEAD, J.H. 1976. **Marine zooplankton.** London: Edward Arnold, 64 p. p.
- WILLIAMS, R. and CONWAY, D.V.P. **Vertical distributions of *Calanus finmarchicus* and *C. helgolandicus* (Crustacea: Copepoda).** *Marine Biology*, v. 60, p. 57-61. 1980.
- ZASKO, D.N. and RUSANOV, I.I. **Vertical Distribution of Radiolarians and Their Role in Epipelagic Communities of the East Pacific Rise and the Gulf of California.** *Biology Bulletin*, v. 32, p. 279-287. 2005.

Biomassa sestônica e abundância do Zooplâncton e Zoonêuston (com ênfase em Copépodes e Eufausiáceos) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial

Renata Polyana Santana Campelo¹
Simone Maria de Albuquerque Lira²
Cynthia Dayanne Mello de Lima²
Kaio Henrique Farias da Silva²
Xiomara Franchesca Garcia-Díaz²
Mauro de Melo Junior³
Manoela Costa Brandão⁴
Luis Ernesto A. Bezerra¹
Ralf Schwamborn²
Sigrid Neumann-Leitão²

02

Abstract

Tropical oceanic regions have a permanent thermocline, which prevents the mixing of surface and nutrient-rich deep waters, thus showing low productivity and planktonic biomass. Seamounts are known to disrupt the vertical stability of the water column significantly increasing the availability of nutrients in the upper layers. The Saint Peter and Saint Paul Archipelago constitute a small isolated group of rocky islands surrounded by oligotrophic waters. The presence of the archipelago influences the hydrodynamic and potentially the local planktonic community. The present study gathered data from different sampling strategies at Saint Peter and Saint Paul Archipelago between 2010 and 2012. Our main aims were to access distribution patterns of the sestonic biomass, total abundance of copepods, total abundance of zooneuston, characterize the neustonic copepod assemblage, and describe the distribution of euphausiids around the archipelago. We focused on copepods and euphausiids due to the importance of these groups in terms of abundance and role in energy transfer between primary and higher trophic levels. Our results show higher sestonic biomass at night and downstream of the islands, attributed to diel vertical migration (DVM) and local hydrodynamics. Regarding the copepods, no significant spatial or diel distinction was observed in the community, which might have occurred due to the high predation rates by planktivorous fish.

In turn, euphausiids were significantly more abundant at night, highlighting their DVM behavior. The neustonic copepod assemblage was depicted by species considered truly neustonic, as well as pelagic ones, which presence was associated with food availability.

Introdução

O Zooplâncton desempenha um papel chave no controle da produção do fitoplâncton e são uma fonte de alimento para os níveis tróficos superiores, estruturando assim o ecossistema pelágico (HAVENS, 1998). Esses organismos são caracterizados por ciclos de vida bastante curtos, podendo durar de semanas até meses (DENMAN *et al.*, 1989) o que os caracterizam por exemplo, como excelentes indicadores de mudanças provenientes do impacto antrópico ou de ordem climática (HAYS *et al.*, 2005). Assim, de acordo com o ciclo de vida o zooplâncton é classificado em meroplâncton (organismos que passam parte do seu ciclo de vida no plâncton sendo representado por larvas e juvenis da maioria dos organismos do bentos e nécton) e holoplâncton (que passam todo o seu ciclo de vida como membros do plâncton). Os representantes mais importantes do holoplâncton são os copépodes, pequenos crustáceos dominantes no ambiente pelágico de

-
- 1 Universidade Federal do Ceará;
 - 2 Universidade Federal de Pernambuco (sigridnl@uol.com.br);
 - 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco;
 - 4 Observatoire Océanologique de Villefranche-sur-Mer.

vários ecossistemas marinhos, compreendendo de 55 a 95% da abundância e até 80% da biomassa total do mesozoplâncton (BRANDINI *et al.*, 1997). Outro importante grupo do holoplâncton são os eufausídeos. Estes pequenos camarões desempenham um papel fundamental no ciclo global do carbono. Por serem considerados fortes migradores, se deslocam verticalmente a distâncias superiores a 200 m à noite, contribuindo desta forma, para a transferência de energia disponível na camada fótica para as camadas profundas através da bomba biológica do carbono (BRINTON *et al.*, 1999).

Os organismos zooplanctônicos ocupam diferentes zonas de profundidades no domínio pelágico dos oceanos. O nêuston é composto de organismos associados a interface oceano-atmosfera ocorrendo até um limite de 1 m de profundidade (PARANAGUÁ *et al.*, 2004). A comunidade neustônica é principalmente influenciada pela radiação solar, temperaturas extremas, variação de salinidade e vento (LIRA, 2013). Além disso, os organismos do zooplâncton são encontrados em estratos de grandes profundidades (cerca de 6.000 m) (LALLI e PARSON, 1993), porém as maiores concentrações de biomassa e abundância desses organismos ocorrem na camada epipelágica (que se estende em média até aos 200 m de profundidade, embora possa ser limitada pela termoclina) nos oceanos (LALLI e PARSON, 1993).

As águas do Nordeste brasileiro são caracteristicamente oligotróficas e de baixa produtividade biológica, exceto nos locais em que ocorrem ressurgências como no entorno de montes e ilhas oceânicas (LIRA *et al.*, 2014). Uma vez que essas feições topográficas mudam a hidrodinâmica local, através da combinação de correntes de recirculação e ressurgência, provocando o chamado “efeito ilha” (DOTY e OGURY, 1956). Este evento contribui para um incremento na biomassa planctônica ao redor dessas áreas (que atuam como verdadeiros ‘Oásis’ em meio ao oceano oligotrófico do Atlântico Sul) (BOEHLERT, 1988). Estimativas de abundância e biomassa são um meio indireto de identificar a

produção zooplanctônica e são de fundamental importância para entender o papel ecológico dos organismos planctônicos num ecossistema (RODRIGUEZ e MULLIN, 1986).

Os padrões de distribuição da biomassa sestônica (DIAZ *et al.*, 2009) e da abundância do mesozoplâncton (DIAZ *et al.*, 2009; Melo *et al.*, 2012, 2014) e do zooneuston (LIRA, 2013; SANTANA, 2015) inspiraram pesquisas ecológicas no remoto Arquipélago de São Pedro e São Paulo, porém ainda existe uma escassez de informações para a região, sobretudo devido a dificuldade de acesso. Assim o presente estudo reúne dados de pesquisas com diferentes estratégias de amostragens realizadas no menor e mais isolado arquipélago do planeta no período entre 2010 à 2012, onde os principais objetivos foram: (1) Determinar os padrões de distribuição espacial (montante vs. jusante) e quanto ao turno (dia vs. noite) da biomassa sestônica, abundância total de copépodes e abundância total do zoonêuston; (2) Caracterizar a assembleia de copépodes neustônicos e (3) Descrever a composição e abundância total de Euphausiacea em resposta ao turno de amostragem no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Material e Métodos

Área de estudo

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) (Figura 1) é um dos menores (área de plataforma rasa equivalente a 3,5 km²) e mais isolado grupos de ilhas oceânicas. Localizado ao norte do equador (0°55'06"N e 29°20'48"W), dista aproximadamente 1.800 km da costa africana e 630 km de Fernando de Noronha (EDWARDS e LUBBOCK, 1983). O ASPSP está sob a influência do ramo norte da Corrente Sul Equatorial (CSE) que flui no sentido Leste-Oeste, carregando águas superficiais vindas do Golfo da Guiné e da região de Cabo Verde e Serra Leoa. Em sentido contrário e de ação subsuperficial, a Subcorrente Equatorial (SCE) carrega águas entre 40 e 150 m de profundidade (ARAUJO e CINTRA,

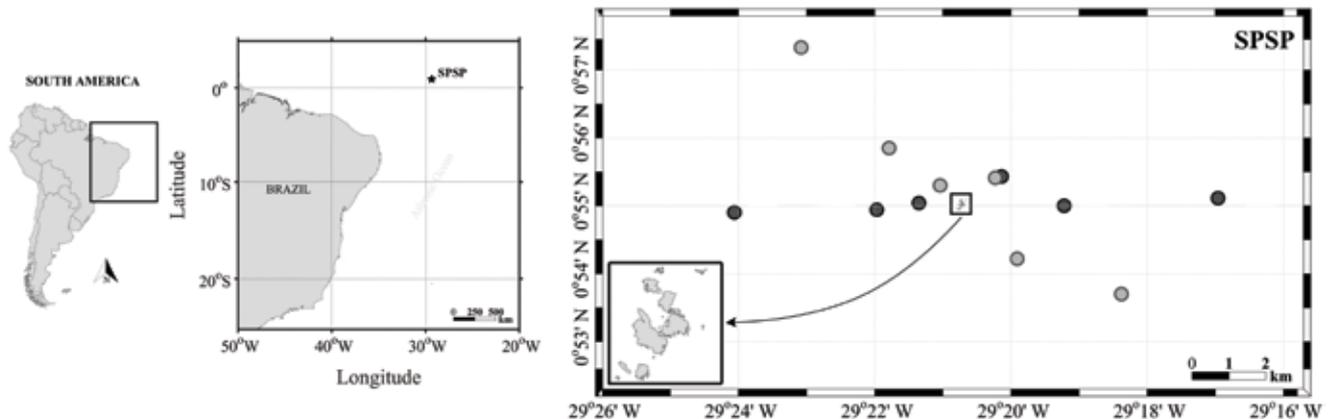


Figura 1. Posição dos transectos: E (Leste) - W (Oeste) (círculos cinza escuro – dados coletados em 2010) e SE (Sudeste) - Noroeste (NW) (círculos cinza-claros – dados coletados em 2012) e localização das estações de amostragens no ASPSP. **Figure 1.** Location of the transects: E (East) – W (West) (dark gray circles - data collected in 2010) and SE (Southeast) - Northwest (NW) (light gray circles - data collected in 2012) and location of the sampling stations at SPSPA.

2009), originária da Corrente Norte do Brasil (CNB) (EDWARDS e LUBBOCK, 1983). A interação da topografia do rochedo com as correntes atuantes ocasiona a produção de vórtices, perturbações da estrutura termohalina e possíveis mecanismos locais de ressurgência (ARAUJO e CINTRA, 2009). Dessa forma, a presença do arquipélago influencia diretamente as condições hidrodinâmicas locais e consequentemente as comunidades biológicas que vivem no seu entorno.

Estratégia de amostragem

O presente trabalho reúne dados de pesquisas sobre o zooplâncton insular desenvolvidas pelo laboratório de Zooplâncton Marinho da UFPE. Assim, as informações apresentadas sobre a biomassa sestônica (mg.m^{-3}), abundância total de copépodes (ind.m^{-3}) e abundância total do zoonêuston (ind.m^{-3}) foram obtidas através de expedições realizadas a bordo do Navio Hidroceanográfico Cruzeiro do Sul da Marinha do Brasil. Amostragens diurnas e noturnas ocorreram em julho de 2010 e 2012. Um ADCP foi usado para obter a direção e velocidade da corrente predominante e assim definir a posição dos dois transectos: Um transecto a montante da ilha (1) e outro a jusante da ilha (2). Em cada transecto foram definidas três estações.

Com o objetivo de estudar a distribuição vertical da assembleia dos Euphausídeos foram realizadas amostragens noturnas e diurnas em junho de 2010, setembro e outubro de 2011. As amostras foram coletadas a partir de uma profundidade de 100 m até a superfície em duas estações fixas, uma a leste (S1) e uma a oeste (S2) do ASPSP (Figura 1).

Procedimento de campo

Para obter informações da biomassa sestônica e da abundância total da assembleia de copépodes, arrastos oblíquos feitos em "V", estendendo-se a uma profundidade de 75% da profundidade local, ou no máximo 200 m de profundidade foram realizados utilizando uma armação do tipo "Bongo" com rede cilíndrico-cônica (diâmetro de boca de 0,6 m² e tamanho de malha de 300 μm). Um total de 12 amostras foram coletadas. Um fluxômetro da marca Hydro-Bios foi posicionado na boca da rede para estimar o volume de água filtrada.

Para a coleta do Zoonêuston, arrastos de 20 minutos, em velocidade de 2 a 3 nós foram performizados. Estas coletas foram realizadas em um catamarã David Hempel de alumínio (Hydro-Bios) equipado com duas redes superpostas com boca retangular (nêuston inferior de 0-7,5cm) e

(nêuston superior de 7,5-22,5cm), com malha de 500µm cada. Para obtenção do volume filtrado utilizou-se um fluxômetro acoplado a rede de plâncton do neuston inferior.

A assembleia de eufausiáceos foi amostrada através de arrastos verticais realizados com uma rede de fechamento tipo "Nansen" com diâmetro de boca de 0,28 m² e tamanho de malha de 200 µm. No total, 60 amostras de plâncton foram analisadas.

Após os arrastos acima descritos, as amostras foram transferidas para frascos plásticos e imediatamente fixadas a bordo em solução de formaldeído (4%), tamponado com tetraborato de sódio.

Procedimento laboratorial

Biomassa sestônica (mg.m⁻³) - esta foi estimada através da metodologia do peso-úmido. As amostras foram filtradas em acumuladores de tamanho de malha equivalente a 100µm previamente pesado em balança de precisão de 0,001mg (NEWELL e NEWELL, 1963). A amostra foi submetida a um tempo de secagem que variou entre 2 á 5 minutos (dependendo da quantidade de material amostrado) e posteriormente submetido a uma pesagem final. Para evitar o efeito do peso de partículas que não fazem parte do ambiente planctônico (como macroalgas, pedaços de tintas dos navios e microplásticos), foram removidos das amostras e pesados separadamente.

Abundância total dos copépodes (ind.m⁻³) - As amostras foram fracionadas em alíquotas de 1/32 ou 1/64, utilizando um quarteador do tipo Motoda (OMORI e IKEDA, 1984), contendo pelo menos 300 copépodes (FRONTIER, 1981). Os espécimes foram identificados e inspecionados sob o estereomicroscópio Zeiss Discovery V8. Apenas os dados de abundância total da assembleia de copépodes são apresentados no presente estudo.

Abundância total do Zooneuston (ind.m⁻³) - As amostras foram fracionadas em alíquotas 1/2 ou 1/16, utilizando um quarteador do tipo Motoda (OMORI e IKEDA, 1984), contendo pelo menos 200 organismos. Os espécimes foram identificados e inspecionados sob o estereomicroscópio Zeiss Stemi SV6. Apenas os dados de abundância total dos grupos em grandes grupos e da assembleia de copépodes são apresentados no presente estudo.

Abundância total dos Eufausiáceos (ind.m⁻³)

- As amostras foram triadas em sua totalidade e os eufausídeos foram separados de acordo com o estágio de desenvolvimento (caliopsis, furcilia e adulto) e identificados até o menor nível taxonômico possível, usando literatura disponível (MONTÚ, 1983; BAKER *et al.*, 1991). Indivíduos danificados que não puderam ser identificados foram classificados como "Euphausiacea n.id".

Análise dos dados

A análise de variância (ANOVA Two-way) foi usada para examinar o efeito do turno (dia vs. noite) e espacial (montante vs. jusante) sobre a biomassa sestônica e abundância total de copépodes. Posteriormente, o teste SNK (Student-Newman-Keuls) foi usado para uma comparação *a posteriori* quando a interação entre os fatores foi significativa. Para o Zooneuston além dos fatores associados ao turno, e lados da ilha, também foi testado o fator espacial: interface do nêuston (superior vs. inferior). Todos esses fatores comparando a comunidade neustônica foram testados através do teste T de Student e para testar os fatores espaciais e entre turnos associados aos eufausiáceos foi utilizado o teste Mann-Whitney. A heterogeneidade das variâncias foi investigada através do teste de Levene e os dados foram transformados através do logaritmo natural de (X + 1) antes da análise quando necessário. O nível de significância foi definido em P<0,05 para todas as análises.

Resultados

Biomassa sestônica e Abundância total de copépodes

No ano de 2012 a biomassa sestônica variou entre um valor mínimo de (10 mg.m^{-3}) no período diurno, transecto montante, estação a (insular) à um máximo de (185 mg.m^{-3}) no período noturno, transecto jusante, estação c (intermediária) (Figura 2A). O efeito do fator turno (Tabela I) foi verificado sobre a biomassa sestônica (Anova two-way $F(1, 8) = 6,86, P = 0,03$) onde a média noturna ($98,66 \pm 69,07 \text{ mg.m}^{-3}$) foi significativamente maior do que a média diurna ($46,83 \pm 34,70 \text{ mg.m}^{-3}$) (Figura 3A). O efeito espacial (Tabela I) também foi verificado

(Anova two-way $F(1, 8) = 8,78, P = 0,01$), cujo valor médio a jusante da ilha ($102 \pm 65 \text{ mg.m}^{-3}$) foi significativamente superior ao valor a montante ($43,43 \pm 36,03 \text{ mg.m}^{-3}$) (Figure 3B). Para a biomassa uma interação significativa entre os fatores (turno x espacial) foi detectada (Tabela I). O teste SNK mostrou o efeito do turno sobre a biomassa sestônica em ambos os transectos estudados, onde tanto no período diurno como noturno esta é significativamente maior a jusante da ilha. Ainda de acordo com o teste *a posteriori*, a montante do ASPSP a biomassa diurna mostrou-se maior do que a noturna e no lado jusante a média diurna foi menor que a noturna (Tabela I).

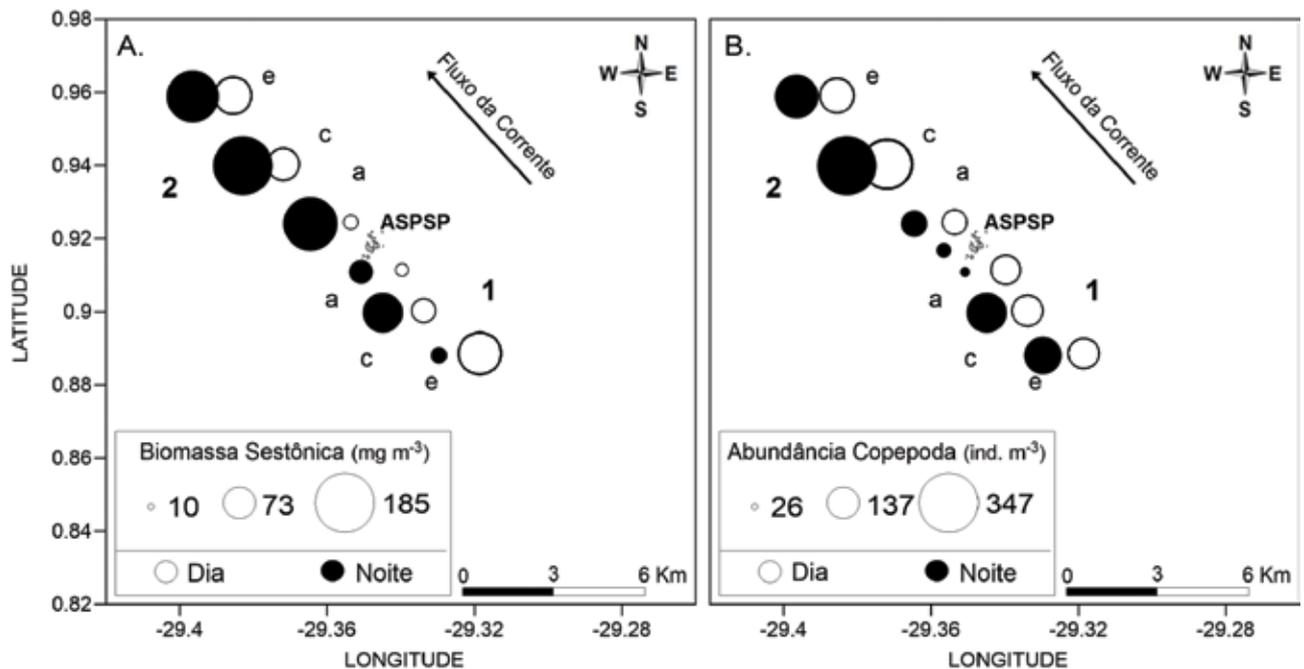


Figura 2. Distribuição espacial da: (A) Biomassa sestônica (mg.m^{-3}) e (B) Abundância de copépodes (ind.m^{-3}) no ASPSP em julho de 2012. As áreas dos círculos são proporcionais à biomassa sestônica (A) e abundância de copépodes (B) total em cada estação de amostragem. Os círculos em preto representam os dados amostrados no período noturno, e os círculos transparentes aos diurnos. O número 1 indica a posição do transecto sudeste (montante da ilha) e o número 2 a posição Noroeste (jusante da ilha). As estações são representadas pelas letras: a (insular), c (intermediária), e (oceânica).

Figure 2. Spatial distribution of the: (A) Sestonic biomass (mg.m^{-3}) and (B) Abundance of copepods (ind.m^{-3}) at SPSPA in July 2012. The areas of the circles are proportional to total sestonic biomass (A) and total abundance of copepods (B) at each sampling station. The circles in black represent data sampled in the nocturnal period, and the transparent circles to the diurnal period. Number 1 indicates the position of the Southeast transect (upstream of the island) and number 2 represents the Northwest position (downstream of the island). The stations are represented by letters: a (insular), c (intermediate), e (oceanic).

Em relação à abundância total de copépodes, os valores mínimos e máximos registrados foram respectivamente iguais a (26, 57 ind.m⁻³) no período noturno, transecto montante, estação a (insular) e (347 ind.m⁻³) no período noturno, transecto jusante, estação c (intermediária) (Figura 2B). A média noturna (151,32 ± 111 ind.m⁻³) da abundância total de copépodes foi numericamente

maior que a média diurna (123 ± 69,9 ind.m⁻³) (Figura 3C). A abundância de copépodes registrada a montante foi equivalente a (100 ± 43,45 ind.m⁻³) e a jusante (173,88 ± 112,27 ind.m⁻³) (Figura 3D). Não foi observado o efeito do turno e do espaço sobre a distribuição da abundância de copépodes no entorno do ASPSP (Tabela I).

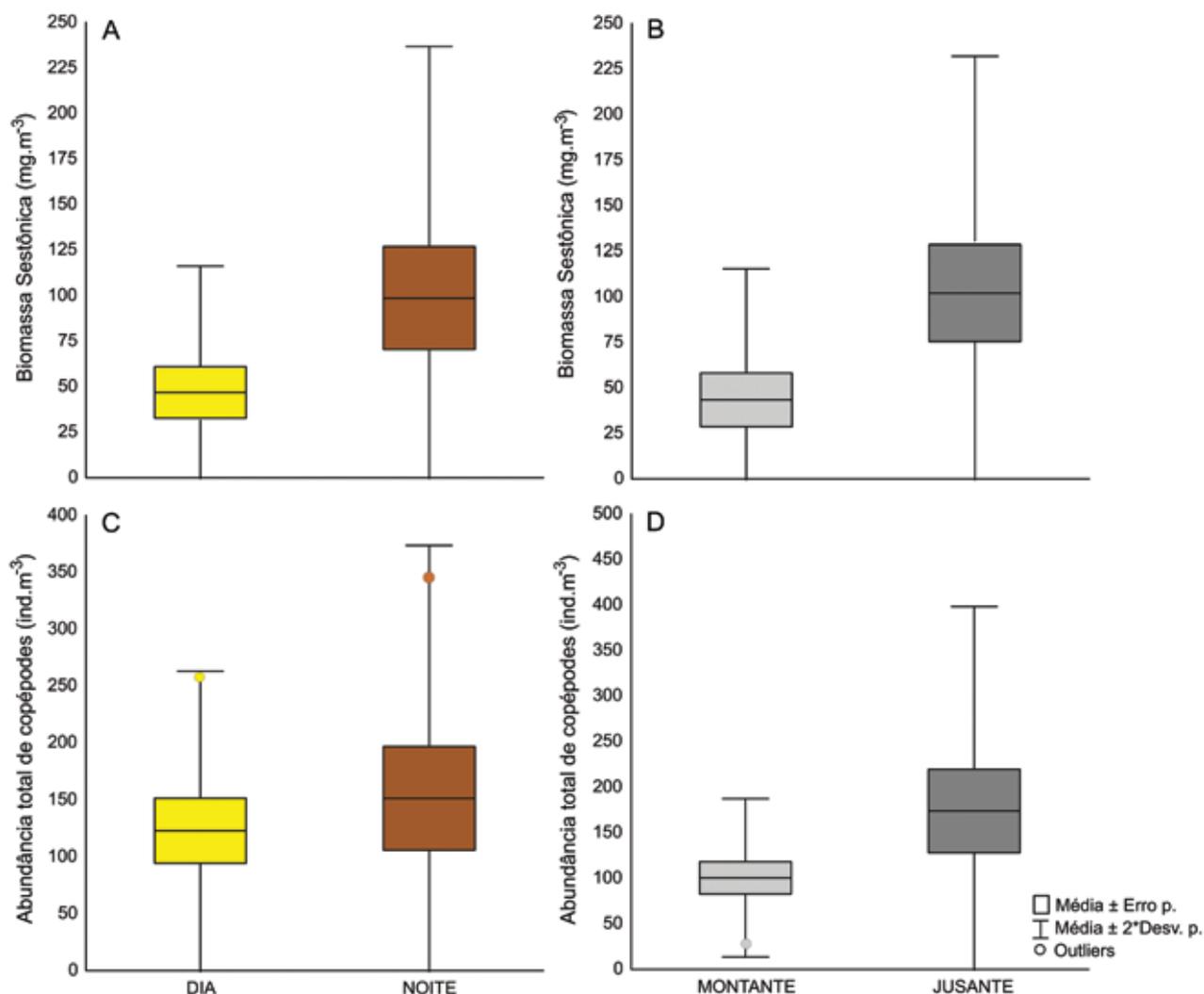


Figura 3. Box-Plot mostrando a média (\pm desvio padrão) da biomassa sestônica (mg.m⁻³) e da abundância total de copépodes (ind.m⁻³) em relação aos fatores testados, onde: A (biomassa sestônica vs. turno); B (biomassa sestônica vs. espacial); D (Abundância total de copépodes vs. turno); E (Abundância total de copépodes vs. espacial) em Julho de 2012, no ASPSP.

Figure 3. Box-Plot showing the mean (\pm standard deviation) of the sestonic biomass (mg.m⁻³) and the total abundance of copepods (ind.m⁻³) in relation to the factors tested, where: A (sestonic biomass vs. diel variation); B (sestonic biomass vs. spatial); D (total abundance of copepods vs. diel variation); E (total abundance of copepods vs. diel variation) in July 2012, at SPSPA.

Tabela I. (A) ANOVA de dois fatores testando os efeitos do turno (dia vs. noite) e espacial (montante vs. jusante) sobre a (i) a biomassa sestônica e (ii) abundância total de copépodes; (B) testes SNK em termos de interação significativa para (i) biomassa sestônica. Os valores de *p* em negrito são significativos.

Table I. (A) Two-way ANOVA testing the effects of diel variation (day vs. night) and spatial (upstream vs. downstream) on the (i) sestonic biomass and (ii) total copepods abundance; (B) SNK tests on significant interaction terms for (i) sestonic biomass. *p* values in bold are significant.

A) ANOVA		(i) Biomassa sestônica			(ii) Abundância total de copépodes		
Fatores	<i>df</i>	MS	<i>F</i>	<i>p</i>	MS	<i>F</i>	<i>p</i>
Turno (T)	1	8058,43	54	0,03	2406,2	0,27	0,61
Espacial (E)	1	10311,69	7	0,01	16183,0	1,88	0,21
T X E	1	10181,96	9	0,01	1217,9	0,14	0,72
Error	8	1173,64			8605,3		

B) SNK		(i) Biomassa sestônica			
Turno		Espacial			
Dia	Montante < Jusante	Montante	Dia > Noite		
Noite	Montante < Jusante	Jusante	Dia < Noite		

Zoonêuston

A abundância total dos organismos planctônicos associados ao zoonêuston variou de um mínimo de 0,6 ind.m⁻³ no nêuston superior durante o dia até o máximo 30,06 ind.m⁻³ no nêuston inferior durante a noite. Foram registrados 19 táxons (Tabela II) em grandes grupos e 25 táxons de copépodes. Os Copepoda, Chaetognatha e Foraminifera foram os táxons mais abundantes tanto para o nêuston superior (NS) quanto para o nêuston inferior (NI) no ASPSP. A contribuição de Copepoda foi de 67% para o nêuston inferior e 65,15% para o nêuston superior, os Chaetognatha contribuíram com 14,03% e 17,74% e os Foraminifera com 7,76% e 6,60%, respectivamente. Os demais grupos se distribuíram com menores frequências e abundâncias com uma proporção semelhante entre as camadas superiores e inferiores do nêuston.

A assembleia de copépodes do zoonêuston foi composta por 25 espécies, com valores de média no NS equivalente a 3,2±6 ind.m⁻³, enquanto que no NI foi de 0,9±1,4 ind.m⁻³. As espécies *Undinula vulgaris* (Dana, 1849), *Euchaeta marina* (Prestandrea, 1833), *Pontellina plumata* (Dana, 1849), *Labidocera nerii* (Krøyer, 1849), *Corycaeus speciosus* (Dana, 1849) e *Farranula gracilis* (Dana, 1849) foram consideradas as mais abundantes (Figura 4). A espécie *Undinula vulgaris* (Figura 4a) dominou em termos de abundância relativa no nêuston superior dia (17,25%) e noite (19,45%) e no nêuston inferior dia (16,27%) e noite (24,50%).

Tabela II. Abundância relativa (AR) da comunidade zooneustônica do ASPSP, no período de julho a agosto de 2010. Nêuston superior (N.S.) e Nêuston inferior (N. I.).

Table II. Relative abundance (AR) of the zooneustonic community from SPSPA, between July and August 2010. Epineuston (N.S.) and Hyponeuston (N. I.).

	N.S	N.I
FORAMINIFERA		
Foraminifera	6,60	7,76
CNIDARIA		
Hydrozoa	1,65	1,70
Anthozoa	0	0,01
MOLLUSCA		
Gastropoda	1,23	2,37
Cephalopoda	0	0,50
ANNELIDA		
Polychaeta	0,36	0,25
HEXAPODA		
<i>Halobates</i> sp.	0,04	0
CRUSTACEA		
Ostracoda	0	0,006
Copepoda	65,16	67,00
Mysidacea	0,81	0,79
Euphausiacea	2,29	2,93
Amphipoda	0,69	0,56
Decapoda total	0,32	0,34
Stomatopoda	0,07	0,005
CHAETOGNATHA		
Chaetognatha	17,74	14,03
CHORDATA		
Thaliacea	0,80	0,10
Appendicularia	0,45	0,26
Teleostei (larva)	0,008	0,15
Teleostei (ovos)	1,75	1,66

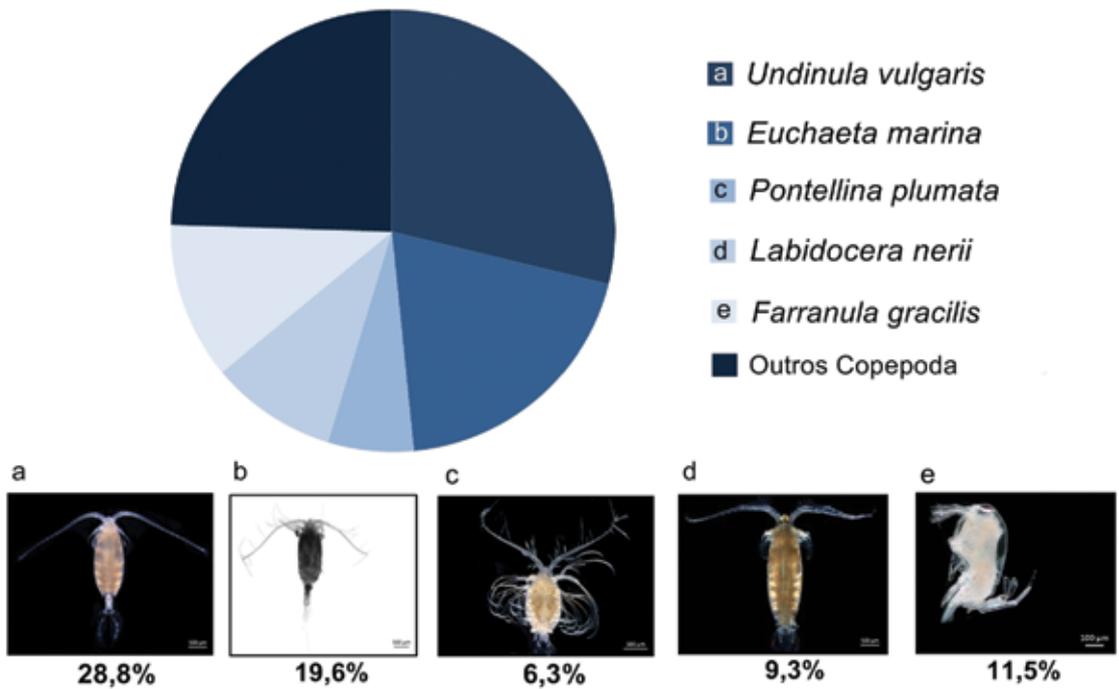


Figura 4. Abundância relativa da assembleia de copépodos associada ao Zoonêuston do Arquipélago de São Pedro e São Paulo em julho de 2010. a) *Undinula vulgaris*, b) *Euchaeta marina*, c) *Pontellina plumata*, d) *Labidocera nerii*, e) *Farranula gracilis*.

Figure 4. Relative abundance of the copepods associated to the Zooneuston of the SPSPA in July 2010. a) *Undinula vulgaris*, b) *Euchaeta marina*, c) *Pontellina plumata*, d) *Labidocera nerii*, e) *Farranula gracilis*.

A variabilidade das comunidades em relação aos fatores turno da amostragem e aos fatores espaciais: interfaces do nêuston (superior e inferior) e lado da ilha (montante vs. jusante) apresentou diferença apenas para o fator turno, onde a abundância foi significativamente maior no período noturno (teste t, $p < 0,05$) (Figura 5). A distribuição da abundância total (ind.m^{-3}) em cada ponto de amostragem (Figura 6) não exibiu tendência em relação aos lados da ilha e nem com a interface do nêuston superior e inferior, entretanto, foi possível visualizar a diferença em relação aos horários noturnos e diurnos, com maiores valores bem maiores no período noturno.

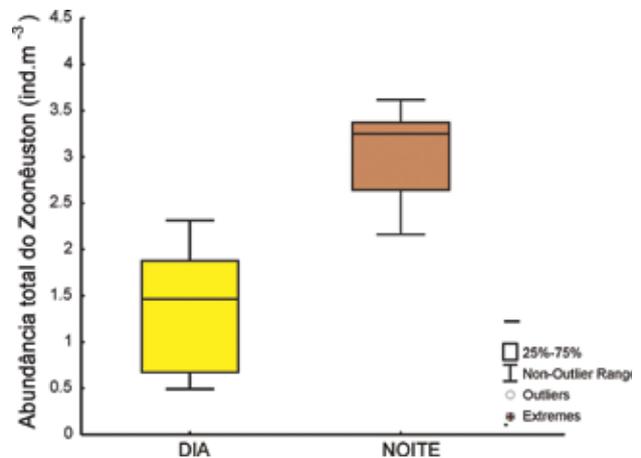


Figura 5. Box-Plot mostrando a mediana da abundância total do zoonêuston em relação ao dia e a noite em Julho-Agosto de 2010, no ASPSP.

Figure 5. Box-Plot showing the median in relation to the factors tested, where: the total abundance of zooneuston in relation to day and night in July-August 2010, at SPSPA.

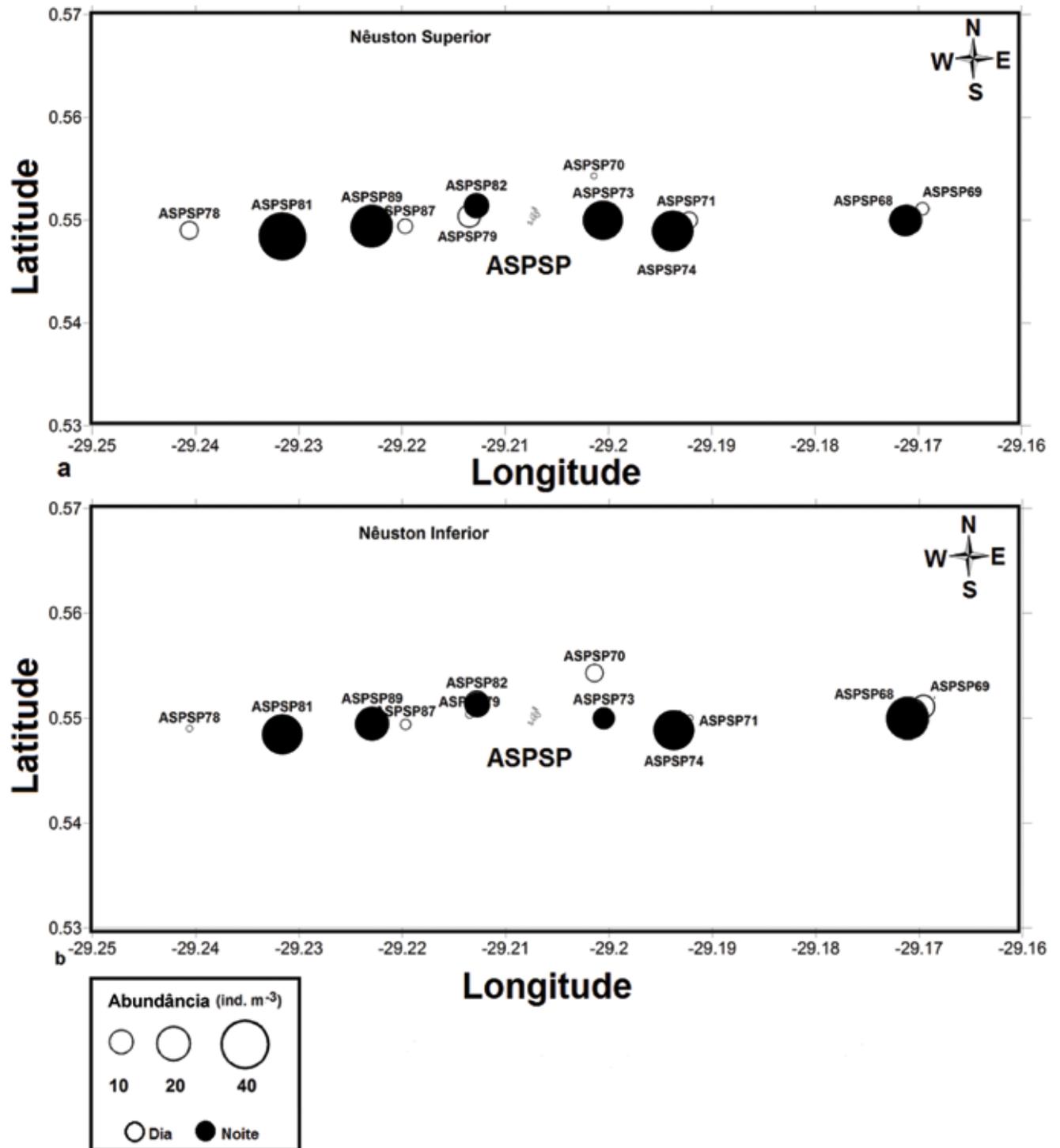


Figura 6. Distribuição da abundância total do Zoonêuston no Arquipélago de São Pedro e São Paulo em cada estação de amostragem em julho de 2010. As áreas dos círculos são proporcionais à abundância total de cada ponto amostrado. a) Nêuston Superior e b) Nêuston Inferior.

Figure 6. Total abundance distribution of Zooneuston at Saint Peter and Saint Paul Archipelago at each sampling station in July 2010. The areas of the circles are proportional to total abundance of each sampled point. a) Epineuston and b) Hyponeuston.

Abundância total de Euphausiacea

Foram identificados 948 indivíduos, com uma abundância média de 2,65 ind.m⁻³ (até 30,4 ind.m⁻³), pertencentes a doze espécies e quatro gêneros da família Euphausiidae: *Euphausia* Dana, 1850; *Nematoscelis* G. O. Sars, 1883; *Stylocheiron* G. O. Sars, 1883 e *Thysanopoda* Milne Edwards, 1830 (Tabela III). A comunidade de eupausiáceos foi composta principalmente por larvas (estágios caliptopis e furcília), contribuindo com mais de 80% de todos os indivíduos (43,4% e 37,6%, respectivamente). As larvas do gênero *Euphausia* foram as mais abundantes, com 56,4% de todos os indivíduos capturados (31,6% de caliptopis e 24,8% de furcília). Durante o dia, predominaram as larvas de

Euphausia, apesar de apresentar abundâncias totais mais baixas (média: 0,4 ind.m⁻³). A abundância de caliptopis variou de 0,1 a 14 ind.m⁻³, com valores significativamente maiores à noite (Teste Mann-Whitney, U = 262, N1 = 30, N2 = 30, P = 0,005). Para as furcílias, a abundância variou entre 0,1 e 11,1 ind.m⁻³, com valores mais altos também à noite (Teste Mann-Whitney, U = 271,5, N1 = 30, N2 = 30, P = 0,008). Os adultos representavam 24,5% da comunidade. Os táxons mais abundantes foram *Euphausia* spp. (30,8%), *E. americana* (23%), *S. carinatum* (19,1%), *E. tenera* (8,6%), *E. similis* (4,3%), e *S. suhmii* (4,3%) (Tabela III). Considerando todos os adultos, a abundância variou entre 0,1 e 2,8 ind.m⁻³, com maior abundância à noite (Teste Mann-Whitney, U = 251, N1 = 30, N2 = 30, P = 0,003).

Tabela III. Abundância relativa (RA) e abundância média dos eupausiáceos coletados no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, de junho/2010 a outubro/2011. n.id=não identificado.

Table III. Relative abundance (RA) and mean abundance of euphausiids sampled at Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil, from June 2010 to October 2011. n.id. = not identified.

Táxon	Estágio de desenvolvimento	AR (%)	ind.m ⁻³		ind.m ⁻³	
			Média		Máximo	
			Dia	Noite	Dia	Noite
<i>Euphausia</i> Dana, 1850 n. id	larva calyptopis	31,6	0,45	1,20		
<i>Euphausia</i> n. id	larva furcilia	24,8	0,35	0,90		
<i>Euphausia</i> n. id	adulto	7,6	0,10	0,30		
<i>E. americana</i> Hansen, 1911	adulto	5,6	< 0,01	0,29	0,17	
<i>E. tenera</i> Hansen, 1905	adulto	2,1	0,05	0,07	1,36	
<i>E. similis</i> G.O. Sars, 1885	adulto	1,1		0,06		
<i>E. diomedae</i> Ortmann, 1894	adulto	0,1		< 0,01		
<i>Nematoscelis</i> G. O. Sars, 1883 n. id	larva, adulto	0,3		0,01		
<i>N. atlantica</i> Hansen, 1916	adulto	0,6	0,02	0,02	0,17	
<i>N. megalops</i> G.O. Sars, 1883	adulto	0,1	0,01		0,17	
<i>Stylocheiron</i> G. O. Sars, 1883 n. id	larva calyptopis	0,2	0,01	0,01		
<i>Stylocheiron</i> n. id	larva furcilia	3,8	0,08	0,12		
<i>Stylocheiron</i> n. id	adulto	0,4		0,02		
<i>S. abbreviatum</i> G.O. Sars, 1883	adulto	0,2	0,01		0,17	
<i>S. affine</i> Hansen, 1910	adulto	0,1	< 0,01		0,17	
<i>S. carinatum</i> G.O. Sars, 1883	larva, adulto	6,2	0,05	0,30		
<i>S. carinatum</i>	furcilia larvae	4,8	0,05	0,20		
<i>S. suhmi</i> G.O. Sars, 1883	larva, adulto	1,1	0,06	0,03	0,85	
<i>Thysanopoda</i> Milne Edwards, 1830 n. id	larva, adulto	0,6		0,03		
<i>T. aequalis</i> Hansen, 1905	larva, adulto	0,6		0,03		
<i>T. tricuspidata</i> Milne Edwards, 1837	larva, adulto	0,6	< 0,01	0,03	0,17	
Euphausiacea Dana, 1852 (others)	larvae	6,5	0,07	0,27	0,66	
Euphausiacea (total)	larva, adulto	100	1,3	4,0		

Discussão

A heterogeneidade da distribuição da comunidade zooplancônica epipelágica e neustônica do ASPSP respondeu apenas ao fator turno de amostragem, onde um significativo aumento no período noturno da biomassa sestônica, abundância total do zooneuston e abundância total de eufausiáceos foi verificada. Os padrões espaciais testados em relação às comunidades alvo mostrou-se menos importante neste pequeno e isolado sistema insular.

Biomassa sestônica - A média da biomassa sestônica registrada no presente estudo apresentou valores semelhantes aos observados por Díaz (2007) e ligeiramente maiores aos encontrados por Melo *et al.* (2012) com dados obtidos durante o período chuvoso na mesma área de estudo. A hipótese de diferenças da biomassa quanto ao fator turno foi verificada, onde a média noturna foi significativamente maior, sendo este resultado das agregações noturnas na região epipelágica como consequência da migração vertical diária (DVM) dos organismos. Mudanças na biomassa diária de frações de diferentes tamanhos revelaram que a DVM ocorreu mais fortemente em animais maiores (HAYS *et al.*, 2001). Logo, sugerimos que a diferença registrada no presente trabalho entre a biomassa sestônica diurna e noturna possa ocorrer em resposta ao tamanho da malha da rede utilizada (300µm) o que favoreceu a captura de organismos de tamanhos maiores, considerados fortes migradores. Especialmente a biomassa sestônica registrada a jusante do ASPSP foi superior à verificada a montante da ilha. Segundo Condie e Condie (2016) a interação da corrente com a topografia da ilha pode causar a jusante: produção de vórtices, enriquecimento (nutrientes provenientes das profundezas do oceano) e retenção que estão associados com habitat favorável para a reprodução e recrutamento de muitas espécies de peixes. Assim, as áreas a jusante das ilhas oceânicas são locais de alta biomassa planctônica (ARAUJO e CINTRA, 2009).

Abundância total de copépodes - Os valores médios de abundância observados no presente trabalho são considerados similares a outros registrados em ambientes Tropicais (LÓPEZ e ANADÓN, 2008). Os poucos trabalhos realizados no ASPSP, no contexto físico (ARAUJO e CINTRA, 2009) e biológico, mostraram que a produção de fitoplâncton (DE QUEIROZ, 2014) e zooplâncton (DÍAZ *et al.*, 2009) aumentam durante a estação chuvosa. A amostragem do presente estudo ocorreu durante o fim de Julho e início de Agosto de 2012 (estação seca), onde o valor médio de abundância verificado foi muito próximo e muitas vezes superior aos registrados no período considerado produtivo no ASPSP (MELO *et al.*, 2012, 2014). Uma abundância de copépodes superior ao apresentado no referido estudo foi registrado por Macedo-Soares *et al.* (2009) e Diaz (2007) através de arrastos subsuperficiais realizados para investigar o mesozooplâncton no ASPSP.

A abundância total de copépodes não diferiu significativamente em relação aos turnos amostrados, embora sua média noturna tenha apresentado um valor numérico mais elevado do que a diurna. A ausência de diferenças na distribuição da abundância de copépodes em relação ao turno de amostragem também foi observada por Melo *et al.* (2012), Melo *et al.* (2014) estudando a assembleia de copépodes no ASPSP. O aumento da abundância de copépodes durante a noite é um indicativo de agregações, provocado pela migração realizada por esses organismos (WIEBE, 1970). Porém, fatores bióticos como a pressão de predação realizada principalmente durante o dia por peixes zooplancívoros que residem no ASPSP a exemplo das famílias Myctophidae, Scombridae, Hemiramphidae e Exocoetidae, corresponde a um importante controlador da abundância de copépodes (SANTANA, 2015). Diferenças estatísticas não foram registradas quanto ao fator espacial sobre

a abundância, porém numericamente o valor à jusante da ilha foi maior que o registrado a montante. Lira (2013) e Santana (2015) estudando o zooneuston com ênfase em decapoda e larvas/ovos de peixes respectivamente registraram uma abundância média elevada à jusante do ASPSP. Embora a hipótese de diferença espacial não tenha sido comprovada é importante ressaltar que o aumento da produtividade pelágica e bentônica principalmente a jusante do ASPSP é resultado da ação superficial da corrente sul equatorial (SEC) transportando larvas de organismos. Assim, o resultado da interação da SEC com a topografia do ASPSP cria um ambiente favorável para o recrutamento larval em águas oceânicas (ARAUJO e CINTRA, 2009).

Zoonêuston - A comunidade do zoonêuston no entorno do ASPSP foi caracterizada com 18 táxons em nível de grandes grupos, a maioria dos grupos já haviam sido previamente registrados na área (GARCIA-DIÁZ *et al.*, 2009; MELO *et al.*, 2012, LIRA *et al.*, 2017) e também em outros sistemas insulares do Atlântico Tropical como o Atol das Rocas (PINTO *et al.*, 1997) e o Arquipélago de Fernando de Noronha (LIRA *et al.*, 2014, 2017). Destaca-se no presente trabalho, o registro do inseto pertencente ao gênero *Halobates*, o qual foi amplamente registrado nas águas tropicais do Oceano Atlântico Norte e Sul entre 40°N e 30–40°S para a espécie *Halobates micans* Eschscholtz, 1822 (CHENG e SCHULZ-BALDES, 1981) e provavelmente se trata da mesma espécie do ASPSP. Também foi verificada nessa comunidade o raro decápode *Amphionides reynaudii* (H. Milne Edwards, 1833) (LIRA *et al.*, 2017), representado por apenas um único exemplar. Dentre os grupos taxonômicos registrados na comunidade neustônica, a Subclasse Copepoda se destacou como a mais frequente e abundante em ambas as interfaces do nêuston. *Undinula vulgaris* foi a espécie que dominou em ambos os turnos e interfaces investigadas no entorno do ASPSP. *U. vulgaris* é um dos Calanoida mais abundantes e indicador de águas oceânicas, também ocorrendo em regiões neríticas, com ampla

distribuição em águas tropicais e subtropicais dos oceanos Atlântico, Pacífico e Índico (NEUMANN-LEITAO *et al.*, 2008).

A variação diurna vs. noturna foi marcante na abundância total de indivíduos do zoonêuston, sendo significativamente maior no período noturno. Esse aumento da abundância total do plâncton subsuperficial no período noturno apesar ter sido corroborado para a comunidade de larvas de Decapoda no ASPSP (BRANDÃO *et al.*, 2013), não é um padrão facilmente registrado em ambientes insulares para grupos de zooplâncton no ASPSP (DIAZ, 2007; MELO *et al.*, 2012). Essa variabilidade entre as amostras é parcialmente explicada pela agregação dos organismos planctônicos na superfície e pela migração vertical noturna que é comum para as comunidades planctônicas e organismos maiores (BRANDÃO *et al.*, 2013).

Abundância de Euphausiacea - O presente estudo observou maior abundância de larvas de Euphausiacea (caliropis e furcilia) em relação aos adultos. Isso pode ser explicado pelo processo contínuo de reprodução desses organismos, comum em áreas tropicais (FERNÁNDEZ *et al.*, 2002). As espécies de eupausiáceos (*E. americana*, *S. carinatum* e *E. tenera*) apresentaram altas abundâncias em regiões epipelágicas, especialmente à noite. Entre as espécies encontradas neste estudo, *E. americana* é endêmica do Atlântico e a mais abundante na camada superficial da costa leste brasileira (ANTEZANA e BRINTON, 1981). A maior abundância deste táxon à noite indica forte migração vertical, comportamento característico do grupo. Este pode ser uma resposta a vários fatores, como a disponibilidade de alimento e características físicas da coluna de água (ANTEZANA e BRINTON, 1981; GIBBONS *et al.*, 1999). O número de espécies (12) registradas para o ASPSP foi semelhante à riqueza de espécies registrada para ecossistemas altamente produtivos, como uma frente ao sul da Califórnia, com 11 espécies (LARA-LOPEZ *et al.*, 2012) e o ecossistema de ressurgência no

Chile com 10 espécies (FERNÁNDEZ *et al.*, 2002). Além disso, também foi superior à riqueza de espécies observada em latitudes mais altas, como na plataforma norueguesa, onde apenas cinco espécies foram registradas. Onze das espécies verificadas no presente estudo no ASPSP já haviam sido registradas anteriormente neste sistema insular (MACEDO-SOARES, *et al.*, 2009).

Considerações Finais

- > Sugerimos que o aumento significativo da biomassa sestônica verificada no período noturno no entorno do ASPSP no ano de 2012 seja reflexo do tamanho da malha da rede utilizada no presente estudo, favorecendo a captura de animais de tamanho corpóreo maior, sendo estes considerados fortes migradores;
- > Uma maior biomassa sestônica foi registrada a jusante do ASPSP no ano de 2012. Mecanismos de concentração animal e características hidrodinâmicas locais são presumivelmente os principais responsáveis pela distribuição da biomassa sestônica no ASPSP, no entanto, são necessárias mais investigações, já que este representa um importante local de pesca onde os ovos e larvas de peixes permanecem no entorno da ilha, contribuindo para o aumento da produtividade pelágica, bentônica e da biomassa planctônica;
- > A abundância de copépodes no entorno do ASPSP não diferiu entre os turnos de amostragens (dia vs. noite) nem espacialmente (jusante vs. montante), embora os valores tenham se apresentado numericamente maiores à noite e a jusante da ilha respectivamente. Isto pode ser resultado da alta taxa de predação provocada por peixes residentes no ASPSP (o que é comum em montes submarinos), interferindo no efeito da migração realizada pelos copépodes;
- > A abundância total do Zoonêuston durante a noite no ASPSP é bem maior em relação ao período diurno;
- > A comunidade neustônica do ASPSP é homogênea em relação a distribuição entre os lados da ilha e entre as interfaces do nêuston superior e inferior;
- > A assembleia de copépodes neustônicos esteve representada por espécies consideradas pela literatura 'verdadeiramente' neustônica' por apresentarem adaptações morfológicas para este ambiente (*Labidocera nerii* e *Pontellina plumata*) e por espécies pelágicas presentes no neuston, sobretudo pela oferta de alimento (*Undinula vulgaris*, *Euchaeta marina* e *Farranula gracilis*).
- > Os dados referentes aos eupausiáceos demonstraram a forte migração vertical desse grupo, representados principalmente pelos gêneros *Euphausia* e *Stylocheiron* no ASPSP.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao programa PROARQUIPÉLAGO e a Marinha do Brasil por toda assistência logística na realização das amostragens no ASPSP, cujo material resultou em dados de trabalhos de monografias, dissertações e teses de alunos da UFC e UFPE. Agradecemos também a toda tripulação do TRANSMAR I e II e ao suporte de pesquisadores que auxiliaram com as coletas dos referidos projetos.

Referências Bibliográficas

ANTEZANA, T. and BRINTON, E. **Euphausiacea. Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo com el zooplancton marino.** Publicación especial del INIDEP, Mar del Plata. p. 681-698. 1981.

ARAUJO, M. and M. CINTRA. **Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** In: D. L. Viana, F. H. V. Hazin; M. A. C. Souza. (Org.). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. SECIRM, Brasília, 107–114. 2009.

BAKER, A.C.; BODEN, B.P. and BRINTON, E. **A practical Guide to the Euphausiids of the World.** Natural History Museum Publications, London, pp 96. 1991.

BOEHLERT, G.W. **Current-topography interactions at mid-ocean seamounts and the impact on pelagic ecosystems.** *Geo Journal*, 1: 45–52. 1988.

BRANDÃO, M.C.; KOETTKER, A. G. and FREIRE, A. S. **Abundance and composition of decapod larvae at Saint Paul's Rocks (equatorial Atlantic),** *Marine Ecology*. p. 1–15. 2013.

BRANDINI, F.P., R.M. LOPES, K.S. GUTSEIT, H.L. SPACH, H. L. and SASSI, R. **Planctonologia na plataforma continental do Brasil: diagnóstico e revisão bibliográfica.** Rio de Janeiro: *Femar*, pp. 1–196. 1997.

BRINTON, E.; OHMAN, M.D.; TOWNSEND, A.W.; KNIGHT, M.D. and BRIDGEMAN, A.L. **Euphausiids of the World Ocean.** *Springer Verlag*, New York. 1999.

CHENG, L. and SCHULZ-BALDES, M. **Frequency and population composition of Halobates micans (Heteroptera: Gerridae) from the central and south Atlantic Ocean.** *Meteor Forschung-Ergebnisse*. 33: 17-27. 1981.

CONDIE, S. and R. CONDIE. **Retention of plankton within ocean eddies.** *Global Ecology*. Biogeography 25: 1264–1277. 2016.

DENMAN, K.L., H.J. FREELAND and D.L. MACKAS, Comparisons of time scales for biomass transfer up the marine food web and coastal transport processes. In: Effects of ocean variability on recruitment and an evaluation of parameters used in stock assessment models. 1989.

DIAZ, X. F. G. **Zooplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** Thesis (Master). Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Oceanografia. Recife. 2007.

DÍAZ, X.F.G., L.M.O. GUSMÃO and S. NEUMANN-LEITÃO. **Biodiversidade e dinâmica espaço - temporal do zooplâncton.** In: D. L. Viana, F. H. V. Hazin; M. A. C. Souza.

(Org.). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. SECIRM, Brasília 12–490. 2009.

DOTY, M. and M. OGURI. **The island mass effect,** *Journal du Conseil / Conseil Permanent International pour l'Exploration de la Mer* 22, 33–37. 1956.

EDWARDS A. and LUBBOCK R. **Marine zoogeography of St. Paul's Rocks.** *J Biogeogr.* p. 10: 65-72. 1983.

FERNÁNDEZ, D.; ESCRIBANO, R.; and HIDALGO, P. **Distribución de eupausídeos en el sistema de resurgencia frente a la península de Mejillones (23°S) asociada a condiciones previas y durante El Niño 1997-98.** *Investigaciones Marinas*, 30 (1): 25- 43. 2002.

FRONTIER, S. **Diseño de muestreos.** In: Boltovskoy, D. (ed.) **Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino.** Mar del Plata, INIDEP 103–108. 1981.

GARCÍA-DÍAZ, X.F. Zooplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (NE, Brasil). 84 f. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2007.

GIBBONS, M.J.; SPIRIDINOV, V.A. and TARLING, G.A. **Euphausiacea.** In: **Boltovskoy D (ed) South Atlantic Zooplankton.** Backhuyus Publishers, Leiden, pp 1241-1279. 1999.

HAVENS, K.E., **Size structure and energetics in a plankton food web.** *Oikos* 81: 346–358. 1998.

HAYS, G.C.; HARRIS, R.P. and HEAD, R.N. **Diel changes in the near-surface biomass of zooplankton and the carbon content of vertical migrants.** *Deep-Sea Research II* 48: 1063 –1068. 2001.

LALLI, C. M., AND T. R. PARSONS. **Biological oceanography: An introduction.** *Pergamon Press Ltd.*, Oxford. 301 p. 34.50. 1993.

LARA-LOPEZ, A.L.; DAVISON, P. and KOSLOW, J.A. **Abundance and community composition of micronekton across a front off Southern California.** *Journal of Plankton Research* 34: 828 – 848. 2012.

LIRA, S.M.A. Distribuição e composição do Zoonêuston em ambientes insulares do Oceano Atlântico Tropical, com ênfase em Decapoda. Dissertação de Mestrado em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife. 2013.

- LIRA, S.M.A., SANTANA, C.S., LIMA, C.D.M., MONTES, M.J.F. and SCHWAMBORN, R. 2017. **New records of the larval forms *Cerataspis monstrosa* and *Amphionides reynaudii* (Crustacea: Decapoda) from the western tropical Atlantic.** *Zootaxa*, 4237: 335–346. 2017.
- LIRA, S.M.A.; TEIXEIRA, I.A.; LIMA, C.D.M.; SANTOS, G.S.; NEUMANN-LEITÃO S. and SCHWAMBORN, R. **Spatial and nycthemeral distribution of the zooneuston of Fernando de Noronha, Brazil.** *Brazilian Journal of Oceanography* 62: 35–45. 2014.
- LÓPEZ, E. and ANADÓN R. **Copepod communities along an Atlantic Meridional transect: Abundance, sizes structure, and grazing rates.** *Deep Sea Research Part I: Oceanographic* 887 Research Papers 55: 1375 –1391. 2008.
- MACEDO-SOARES, L.C.P.; A.S. FREIRE, A.G.; KOETTKER, B.S.; MENEZES, D.B. and FERNÁNDEZ, M.C. 552 Brandão, Zooplâncton. In: Viana, D. L.; Hazin, F. H. V.; Souza, M. A. C. (Orgs.). **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.** Brasília: SECIRM, p. 554 128–137. 2009.
- MELO, P. A. M. C.; DIAZ, X. F. G.; MACEDO, S. J. and S. NEUMANN-LEITÃO. **Diurnal and spatial variation of the mesozooplankton community in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic.** *Marine Biodiversity Record* 5: 121–135. 2012.
- MELO, P.A.M.C., MELO JUNIOR, M.; MACEDO, S.J.; ARAUJO, M. and NEUMANN-LEITÃO, S. 2014. **Copepod distribution and production in a Mid-Atlantic Ridge archipelago.** *Annals of the Brazilian Academy of Sciences* 86: 1719 –1733. 2014.
- MONTÚ, M.A. **Chave de fases larvais, calíptopis e furcílias de eufausidos subantárticos, setor patagônico.** *Brazilian archives of biology and technology.* 26:523-534. 1983.
- NEUMANN-LEITAO, S.; GUSMAO, L. M. D. O.; NASCIMENTO-VIEIRA, D. A.; PARANAGUA, M. N. and SCHWAMBORN, R. **Diversity and distribution of the mesozooplankton in the tropical Southwestern Atlantic.** *Journal of Plankton Research*, v. 30, p. 795-805. 2008.
- OMORI, M. and T. IKEDA. **Methods in marine zooplankton ecology.** J. Wiley, New York. 1894.
- PARANAGUÁ, M.N.; NASCIMENTO-VIEIRA, D.A.; GUSMÃO, L.M.O.; NEUMANN-LEITÃO, S. and SCHWAMBORN, R. **Estrutura da comunidade zooplanctônica.** In: Eskinazi-Leça, E.; Neumann-Leitão, S.; Costa, M.F. (Ed.). *Oceanografia: um cenário tropical.* Recife: Bargaço & UFPE, p. 441-459. 2004.
- PINTO, N. C. T.; MAFALDA, P. and SANTOS, A.T. **Caracterização do zooplâncton da Reserva Biológica do Atol das Rocas, na Campanha de Março-1991 (verão).** *Trabalhos Oceanográficos da Universidade Federal de Pernambuco*, 25: 31-46. 1997.
- RODRIGUEZ, J. and M.M. MULLIN. **Relation between biomass and body-weight of plankton in a steady-state oceanic ecosystem.** *Limnology and Oceanography* 31 (2): 361–370. 1986.
- SANTANA, J. R. Variabilidade espacial do ictioneuston ao largo de ilhas oceânicas do Nordeste do Brasil. Dissertação (Mestrado). Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Recife. 2015.
- WIEBE, P.H. **Small-scale spatial distribution in oceanic zooplankton.** *Limnology and Oceanography.* 15, 205–207. 1970.

Diversidade e padrões espaço-temporais no Ictionêuston e Ictioplâncton do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Silvia Helena Lima Schwamborn¹

Jana Ribeiro Santana¹

Tatiana Beltrão Alves da Costa²

Nicole Malinconico¹

Sigrid Neumann Leitão¹

03

Abstract

The ichthyoneuston and ichthyoplankton were investigated in waters around the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), an isolated and remote Brazilian oceanic island along the Mid-Atlantic Ridge. Eggs and larvae were sampled through three oceanographic expeditions in 2010 and 2012. Abundance values of eggs and larvae of the ichthyoneuston and ichthyoplankton were typical of oligotrophic oceanic waters. Eggs and larvae were more abundant at night, as well as, near the archipelago than in oceanic waters. Identification resulted in 27 taxa distributed among 13 families of teleost fish. Larvae from epipelagic, mesopelagic and reef fish families represented the community. Myctophidae larvae were the most abundant and well distributed taxon, occurring at insular and oceanic waters. According to our findings, SPSPA seems to contribute, differentiated, to the formation and maintenance of assemblages of oceanic, as well as, demersal and benthonic fishes. Therefore, it is highly recommended to establish a long-term monitoring program to evaluate spatial and temporal responses of the ichthyoplankton to anthropogenic pressures, as well as, climatic changes.

Introdução

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) é o menor e mais distante ($0^{\circ}55'01''\text{N}$, $29^{\circ}20'44''\text{W}$) grupo de ilhas oceânicas do Brasil (MACEDO-SOARES *et al.*, 2012). O ambiente oceanográfico é oligotrófico e está principalmente sob a influência do ramo norte da Corrente Sul Equatorial (nCSE) (PETERSON e STRAMMA, 1991; ARAÚJO e CINTRA, 2009), que flui na direção Oeste, com velocidade entre 0,2 e 0,4m/s (LUMPKIN e GARZOLI, 2005). Subsuperficialmente, entre 40 e 150m (STRAMMA e SCOTT, 1999), o arquipélago tem o fluxo da Subcorrente Equatorial (SCE) (PETERSON e STRAMMA, 1991; ARAÚJO e CINTRA, 2009). Nesse contexto oceanográfico, o ASPSP é um "hotspot" de biodiversidade (VASKE *et al.*, 2005; MACEDO-SOARES *et al.*, 2012), apresentando o mais elevado endemismo insular (9%), quando comparado aos de outras ilhas oceânicas brasileiras como o Arquipélago de Fernando de Noronha (5%) e Trindade/Martin Vaz (5,7%) (ROSA *et al.*, 2015). É um importante sítio de reprodução e alimentação para diversas espécies pelágicas migratórias (VASKE *et al.*, 2003; LESSA *et al.*, 1999). A fauna de peixes pelágicos e recifais é diversificada, compreendendo 64 e 52 espécies respectivamente, dentre as quais se destacam cinco espécies endêmicas (ver capítulo 08). Além disso, compreende um dos mais remotos sítios de pesca de atuns, carangídeos e peixes-voadores, sendo a pesca de atuns a mais representativa desde a década de 1950 (VIANA *et al.*, 2015).

A maior parte dos peixes teleósteos tem uma etapa no seu ciclo de vida no plâncton, quer seja como ovo e/ou como larva; inclusive espécies que possuem ovos presos ao substrato (bentônicos), têm fase larval planctônica (RUSSEL, 1976). Nessa fase, ovos e larvas compreendem

1 Universidade Federal de Pernambuco
(sigridnl@uol.com.br);

2 Universidade Federal Rural de Pernambuco.

comunidades efêmeras no zooplâncton, as quais são denominadas: ictionêuston e ictioplâncton. Enquanto o ictioplâncton se distribui em toda massa d'água desde a superfície até profundidades maiores, o ictionêuston está limitado aos primeiros centímetros da superfície do mar, concentrando-se na interface ar-água (PARRISH *et al.*, 1981). A fase planctônica, considerada o período mais sensível do ciclo de vida dos peixes (WESTERNHAGEN, 1988), tem influência sobre o tamanho, estrutura e dinâmica das populações adultas de peixes (SMITH e SINERCHIA, 2004). Além disso, estudos sobre o ictioplâncton são fundamentais para a caracterização das comunidades de peixes que utilizam determinadas regiões como local de desova e desenvolvimento larval, incluindo espécies de interesse econômico (por ex. famílias Scombridae e Clupeidae) e de importância ecológica (por ex. famílias Myctophidae e Phosichthyidae) (CUSHING, 1996).

Como em outras ilhas remotas (BOEHLERT e MUNDY, 1993; MACEDO-SOARES *et al.*, 2009) a diferenciada produtividade associada ao ASPSP poderia ser explicada por processos de enriquecimento da coluna d'água, os quais elevam a produtividade primária, biomassa planctônica e, em consequência, elevaria a biomassa geral associada (HERNÁNDEZ-LÉON *et al.*, 2001). Nesse contexto, diversos estudos foram conduzidos para investigar a existência de processos oceanográficos físicos e químicos de enriquecimento da coluna d'água (TRAVASSOS *et al.* 1999; ARAÚJO e CINTRA, 2009; MACEDO-SOARES *et al.*, 2011), como também, foram realizados para se entender a variação espaço-temporal da composição e abundância do fitoplâncton (QUEIROZ *et al.*, 2015), zooplâncton (MACEDO-SOARES *et al.* 2009; KOETTKER *et al.*, 2010; BRANDÃO *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2012; MELO *et al.*, 2014; MELO *et al.*, 2015) e ictioplâncton na área do ASPSP (PINTO *et al.*, 2002; LESSA *et al.*, 1999; MAFALDA Jr. e SOUZA, 2009; EKAU *et al.*, 1999; MACEDO-SOARES *et al.*, 2011; MACEDO-SOARES *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2016; OLIVAR *et al.*, 2018). Apesar de não se ter evidenciado, conclusivamente, processos físicos e químicos de

enriquecimento da coluna d'água (TRAVASSOS *et al.* 1999; ARAÚJO e CINTRA, 2009; MACEDO-SOARES *et al.*, 2011), a maior parte dos estudos sobre diversidade, abundância e distribuição do plâncton mostra que, mesmo em pequena escala espacial (estações distando entre menos de 50 e 1500m do ASPSP), há uma tendência para maiores valores de abundância do zooplâncton (MACEDO-SOARES *et al.* 2009; KOETTKER *et al.*, 2010; BRANDÃO *et al.*, 2013; MELO *et al.*, 2012; MELO *et al.*, 2014; MELO *et al.*, 2015) e ictioplâncton em estações mais próximas das ilhas do ASPSP (MACEDO-SOARES *et al.*, 2011; MACEDO-SOARES *et al.*, 2012; LIMA *et al.*, 2016). Contudo, verifica-se uma escassez geral de informações sobre a variação vertical, bem como, espacial em maior escala (acima de 1500 m de distância) do plâncton no ASPSP. Como consequência, padrões de composição, abundância e distribuição podem não ser completamente entendidos.

Nesse contexto, o presente trabalho aborda a biodiversidade e variações espaço-temporais no ictionêuston e ictioplâncton, visando contribuir para o conhecimento da dinâmica populacional deste local tão importante à pesca no Atlântico Sul Equatorial.

Material e Métodos

O ictionêuston e o ictioplâncton no ASPSP foram amostrados, de 14 a 23/07/2010, de 29/09 a 01/10/2012 (projetos Camadas Finas - CF I, 2010 e II, 2012) e de 07 a 14/07/2012 (projeto Distribuição Vertical da Diversidade e Produtividade -COMPAREM). No projeto CF, o ictionêuston foi coletado através de arrastos diurnos e noturnos, com 20 minutos de duração. Utilizou-se um catamarã de alumínio náutico, tipo David-Hempel, onde estão acopladas duas redes cilíndrico-cônicas com boca retangular, com malha de 500 μm , as quais amostram no nêuston superior (0 – 7,5 cm) e no nêuston inferior (7,5 – 22,5 cm). O ictioplâncton foi amostrado através de arrastos oblíquos de 100 m de profundidade até a superfície, nos turnos diurno

e noturno, utilizando-se rede do tipo Bongô com malha de 500 μm . Todas as redes (ictioplâncton, e ictionêuston) foram equipadas com fluxômetro. Três estações foram amostradas (A, C e E) em duas transecções nos lados Leste e Oeste ao ASPSP, de acordo com o sentido da corrente Sul Equatorial (Figura 1). Em termos de distância do ASPSP a estação A distava (1 – 2 km, 2010 e 2012), a estação C (3 km, 2010 e 2 – 4 km, 2012) e a estação E (5-7 km, 2010 e 5-9 km, 2012).

Através do projeto COMPAREM, amostrou-se apenas o ictioplâncton. As amostragens foram realizadas por meio de arrastos subsuperficiais diurnos e noturnos, com duração de 10 minutos, utilizando-se redes cilíndrico-cônicas, com malha de 500 μm . Quatro estações de coleta foram estabelecidas: cabeça e enseada, bem como, A e C, sendo essas duas localizadas na transecção Leste, ao longo do eixo principal da corrente Sul Equatorial (Figura 1).

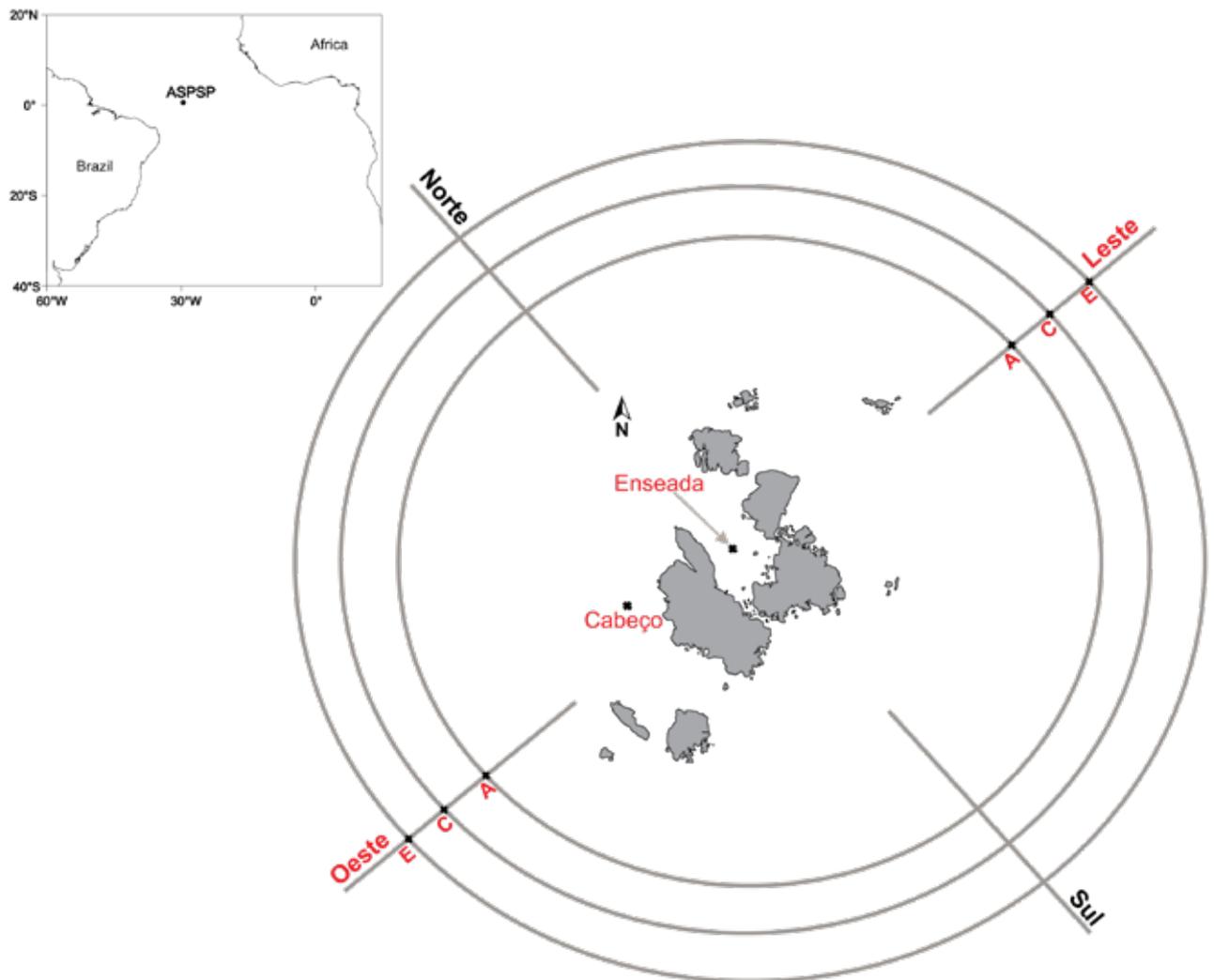


Figura 1. Desenho esquemático amostral para o ictionêuston e ictioplâncton, no Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), através dos projetos “Camadas Finas” I (2010) e II (2012) e “Distribuição Vertical da Diversidade e Produtividade” (2012).

Figure 1. Schematic sampling design to the ichthyoneuston and ichthyoplankton in the Saint Peter and Paul Archipelago, through “Camadas Finas” I (2010) e II (2012), and “Distribuição Vertical da Diversidade e Produtividade” (2012) projects.

Ovos e larvas de peixes foram triados das amostras originais, na sua totalidade, com auxílio de um estereomicroscópio. Em seguida foram acondicionados em recipientes Eppendorff, contendo etanol à 70%. Posteriormente, todas as larvas foram medidas (comprimento da cabeça, diâmetro do olho, comprimento pré-anal, comprimento da cauda e comprimento padrão e caracterizadas morfológica e meristicamente), sob estereomicroscópio. Durante a caracterização morfológica, identificou-se o estágio de flexão da notocorda, cuja terminologia utilizada seguiu aquela em Richards (2006) e a definição de larva transicional seguiu a descrição em Neira *et al.* (1998). Após todas as caracterizações, as larvas foram identificadas até a menor unidade taxonômica possível, utilizando compêndios literários especializados, assim como artigos científicos, trabalhos monográficos e catálogos sobre o ictioplâncton. Todo o material biológico identificado foi depositado na Coleção de Ictioplâncton (COLICT) do Museu Oceanográfico Petrônio Alves Coelho (MOUFPE).

Dados de abundância foram padronizados para ovos e larvas/100 m³, sendo os mesmos organizados em uma matriz de dados de abundância por táxon. Para testar diferenças espaciais (Transecção, estações de coleta, camadas do nêuston) e no tempo (anos, turnos de coleta) foi utilizada a análise de variância não paramétrica (Teste de Kruskal-Wallis), considerando-se um nível de significância de 0,05. No caso de diferenças significativas entre grupos, foi realizado teste *post-hoc* de comparações múltiplas para a análise de variância de Kruskal-Wallis, com nível de significância de 0,05.

Resultados e Discussão

Valores de densidade no ictionêuston variaram entre 0,80 e 311,10 ovos/100 m³ (média de 33,25 ovos/100m³) e entre 13,3 e 157,6 larvas/100m³ (média de 22,42). Já no ictioplâncton variaram

entre 0,57 e 158,79 ovos/100m³ (média de 15,39 ovos/100m³) e entre 0,35 e 8,22 larvas/100m³ (média de 1,83 larvas/100m³). O ASPSP está inserido em um sistema pelágico influenciado preponderantemente pelas águas oligotróficas da corrente Sul Equatorial, resultando em uma região das menos produtivas do sistema pelágico brasileiro (EKAU e KNOPPERS, 1999). Ekau *et al.* (1999) observaram densidades de larvas de peixes variando entre 5 e 77 larvas/50 m³ nas regiões de plataforma e águas oceânicas das costas Norte e Nordeste do Brasil (Ceará e Pernambuco), entre 3 e 9° Sul e 34 e 38° Oeste. Verificaram uma uniformidade nos valores de abundância em toda a área estudada, mas leve decréscimo em direção às águas oceânicas, onde valores de densidade não foram superiores a 30 larvas/50m³. Souza e Mafalda (2008) e Mafalda e Souza (2009), estudando o ictioplâncton em águas oceânicas da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) da região Norte do Brasil, observaram valores de densidade entre 0,1 e 150 larvas/100m³ no ictioplâncton. Em contraste, valores de densidade estiveram situados entre 0,08 e 18 larvas/100m³ (média de 2,54 larvas/100m³) em águas oceânicas da ZEE do Nordeste do Brasil (EKAU *et al.*, 1999, BARROS *et al.*, 2007; MAFALDA *et al.*, 2009; MAFALDA e SOUZA, 2009; SOUZA *et al.*, 2010). Dessa forma, a abundância de larvas no ictioplâncton do ASPSP apresentou-se dentro da faixa de variação de valores densidade para águas oceânicas da região Norte e Nordeste do Atlântico Sul.

Foram coletadas 409 larvas no ictionêuston e ictioplâncton, considerando todos os anos. Essas estiveram representadas por 15 famílias (Tabela I), seis gêneros, sendo possível a identificação de oito espécies (Figura 2). Os Myctophidae representaram 65% (N = 265) do total de larvas coletadas, seguidos pelos Tripterygiidae e Exocoetidae, respectivamente, 13 (N = 54) e 12% (N = 51) (Tabela I). A maioria das larvas encontrava-se em estágio de pré-flexão da notocorda (51,3%), seguido dos estágios de flexão (39,1%) e pós-flexão (8%), indicando que a

maioria era recém eclodida. Os táxons encontrados compreendem uma comunidade representativa de peixes, que na fase adulta, são epipelágicos, pelágicos, meso e bentopelágicos oceânicos, além daqueles associados aos ambientes bentônicos do arquipélago. Os epipelágicos e pelágicos oceânicos estiveram representados por Exocoetidae, Hemiramphidae (*Oxyporhamphus micropterus*), Scombridae, e Coryphaenidae, enquanto que os meso e bentopelágicos foram representados pelos Myctophidae (*Ceratoscopelus maderensis*, *C. warmingii*, *Lampadena luminosa*, *L. urophaos*, *Lampanyctus nobilis*, *Myctophum* sp.), Trachipteridae, Gempylidae, Gonostomatidae

e Diretmidae. As famílias Lutjanidae, Bothidae (*Bothus ocellatus*), Scorpaenidae e Tripterygiidae (*Enneanectes smithi*) representaram peixes associados aos ambientes bentônicos do ASPSP. Todas essas famílias, com exceção dos Diretmidae, foram citadas em outros trabalhos realizados no ASPSP, sejam como larvas, juvenis ou adultos (VASKE *et al.*, 2005, LESSA *et al.*, 1999, MACEDO-SOARES *et al.*, 2008, MACEDO-SOARES *et al.*, 2012, LIMA *et al.*, 2016). Com relação aos Trachipteridae, Macedo-Soares *et al.* (2012), Lima *et al.* (2016) e o presente trabalho apresentam os primeiros registros de ovos e larvas dessa família para a região Nordeste do Brasil.

Tabela I. Composição geral e abundância relativa de larvas de peixes (ictonêuston e ictioplâncton) coletadas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, entre 2010 e 2012.

Table I. Composition and relative abundance of fish larvae (Ichthyoplankton and ichthyoplankton) collected at Saint Peter and Paul Archipelago, between 2010 and 2012.

Família	Espécie	N	Abundância relativa (%)
Gonostomatidae		2	< 1
Myctophidae		265	65
	<i>Ceratoscopelus maderensis</i>		
	<i>Ceratoscopelus warmingii</i>		
	<i>Lampadena luminosa</i>		
	<i>Lampanyctus nobilis</i>		
	<i>Lampadena uraphaos</i>		
	<i>Myctophum</i> sp.		
Trachipteridae		1	< 1
Mugilidae		1	< 1
Atherinidae		1	< 1
Exocoetidae		51	12
Hemiramphidae		22	5
	<i>Oxyporhamphus micropterus</i>		
Diretmidae		1	< 1
Scorpaenidae		1	< 1
Coryphaenidae		3	1
Lutjanidae		1	< 1
Tripterygiidae		54	13
	<i>Enneanectes smithi</i>		
Gempylidae		3	1
Scombridae		2	< 1
Bothidae		1	< 1
	<i>Bothus ocellatus</i>		
		409	

Dentre as famílias observadas, os Myctophidae (peixes lanterna) foram, em geral, mais abundantes no ASPSP, em todos os anos, no ictionêuston (0,80 – 152,93 larvas/100m³). No ictioplâncton, essa família foi a segunda mais abundante, com densidades entre 0,27 - 4,52 larvas/100m³. Além disso, larvas dessa família distribuíram-se, amplamente, ocorrendo em 100% de toda a área abrangida no tempo de estudo. Outras famílias abundantes foram os Exocoetidae (0,41 – 36,74 larvas/100m³), Hemiramphidae (0,27 - 19,65 larvas/100m³) e Tripterygiidae (apenas no ictioplâncton; 1,01 e 6,85 larvas/100 m³), os quais ocorreram, essencialmente, nas proximidades do arquipélago. Larvas dessa última família, representadas pela espécie *Enneanectes smithi*, representou o táxon mais abundante do ictioplâncton na enseada, no período noturno. Essa, uma das cinco espécies endêmicas do ASPSP (FEITOZA *et al.*, 2003; VASKE *et al.*, 2005), é limitada espacialmente aos habitats bentônicos do arquipélago (VASKE *et al.*, 2005), como os da enseada, onde foi mais abundantemente coletada. Outros estudos sobre o ictioplâncton do ASPSP, como Lessa *et al.* (1999), Macedo-Soares *et al.* (2012) e Lima *et al.* (2016) encontraram assembleias recifais na comunidade ictioplânctônica do ASPSP, contudo, não registraram larvas de Tripterygiidae, apesar de seus esquemas de amostragem incluírem coletas em estações com menos de 100 m de distância do arquipélago. Entre fatores que influenciam a formação de assembleias no ictioplâncton estão espaço e tempo (maré, fase lunar, turno e estação do ano) de desova (BOEHLERT e MUNDY, 1993). A elevada abundância de *E. smithi* no ictioplâncton da enseada do ASPSP pode ter sido resultado de evento recente de desova da espécie. Sendo essa espécie bentônica endêmica, a continuidade de sua população no ASPSP depende de estratégia que permita que ovos e larvas estejam próximos dos habitats definitivos ou, se dispersas, seus retornos aos mesmos. Estratégia similar foi observada em larvas de espécies de Tripterygiidae do nêuston da costa Nordeste da Nova Zelândia, as quais se moveram

em pulsos para habitats recifais próximos da costa, durante o verão (TRICKLEBANK *et al.*, 1992). Como a corrente Sul Equatorial flui no sentido Leste-Oeste (MACEDO-SOARES *et al.*, 2012), a enseada representa o local mais abrigado do efeito dispersivo dessa corrente (LESSA *et al.* 1999) sobre o ictionêuston e ictioplâncton, resultando, em um possível processo de retenção (auto-recrutamento) de ovos e larvas de *E. smithi* próximos dos habitats bentônicos da enseada.

No nêuston, em julho de 2010, as espécies *Ceratoscopelus maderensis* (1,00 – 1,70 larvas/100m³), *Lampadena luminosa* (0,80 – 1,70 larvas/100 m³) e *Lampanyctus nobilis* (2,60 e 5,20 larvas/100m³) foram as mais representativas na região oceânica. Diferenciada abundância de peixes lanterna em áreas mais oceânicas do entorno de ilhas tem sido registrada, também, por outros autores (EKAU *et al.*, 1999; NONAKA *et al.*, 2000; RODRÍGUEZ *et al.*, 2001). Apesar disso, *C. warmingii* (0,90 – 1,50 larvas/100m³), uma espécie não identificada do gênero *Myctophum* (1,35 larvas/100m³), no nêuston e *Lampadena urophaos* (0,27 – 4,52 larvas/100m³), no ictioplâncton, foram mais abundantes nas proximidades do ASPSP. Juntamente com essas espécies de peixes lanterna, outra espécie que se apresentou mais abundante nas proximidades do ASPSP foi uma espécie de peixe voador, *Oxyporhamphus micropterus* (Hemiramphidae; 1,60 – 1,80 larvas/100m³). Esses resultados corroboram o que foi observado por Macedo-Soares *et al.* (2012) para as espécies *C. warmingii*, *L. urophaos* e *O. micropterus*, que foram as mais representativas em distâncias de até 500 metros das ilhotas do ASPSP. Em contrapartida, Lima *et al.* (2016) colocam *L. urophaos* e *O. micropterus* como sendo uma assembleia oceânica do ASPSP. A presença de gradientes abruptos de profundidade entre águas do entorno do arquipélago e áreas oceânicas (MACEDO-SOARES *et al.*, 2012), bem como, condições de circulação, como transporte de táxons oceânicos em direção às águas do entorno do ASPSP pelo fluxo da Leste-Oeste da corrente Sul Equatorial (LESSA *et al.*, 1999), devem contribuir

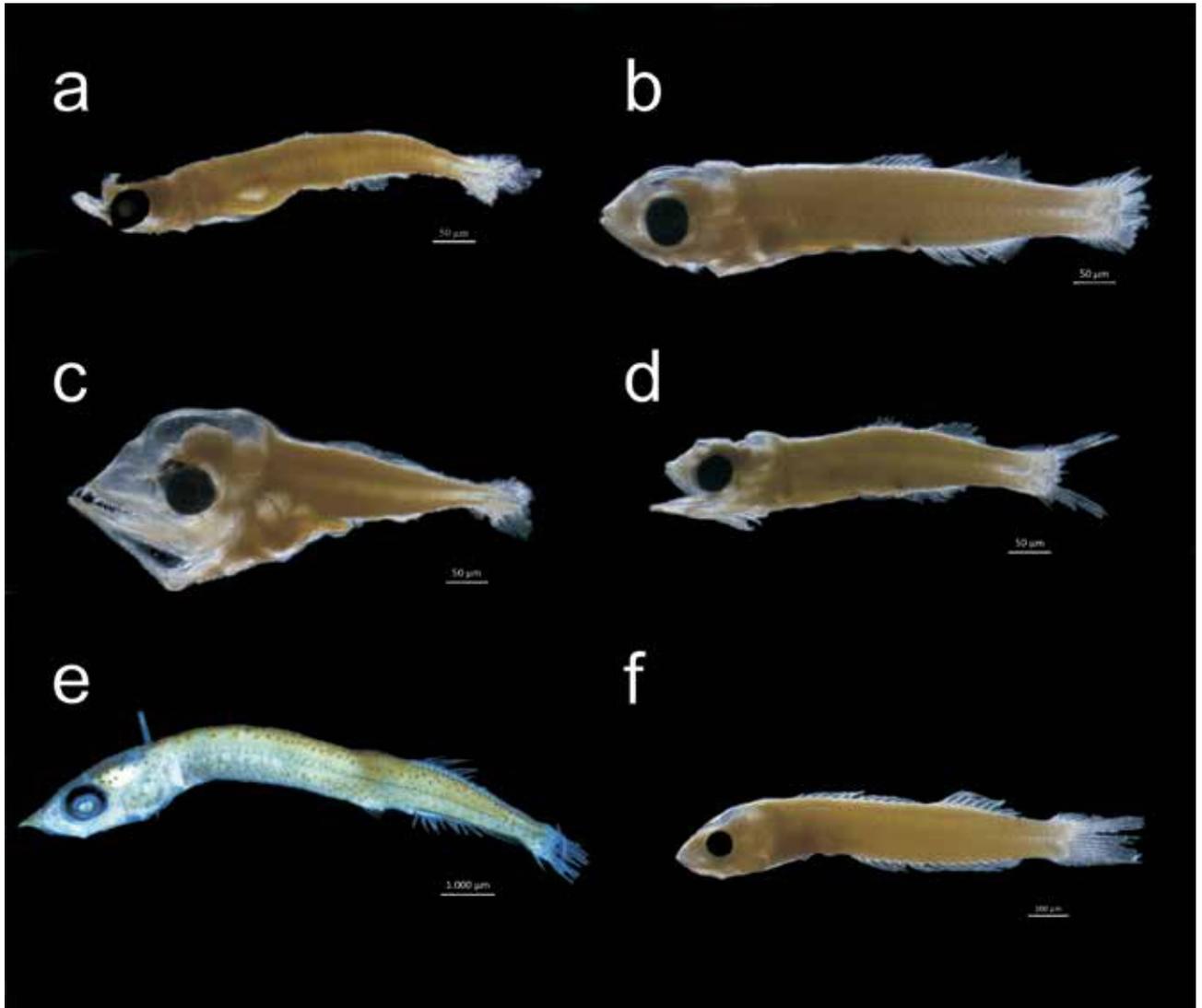


Figura 2. a – *Lampadena luminosa* (Garman, 1899); b – *Lampadena urophaos* Paxton, 1963; c – *Lampanyctus nobilis* Tåning, 1928; d - *Ceratoscopelus maderensis* (Lowe, 1839); e – *Oxyporhamphus micropterus* (Valenciennes, 1847); f - *Enneanectes smithi* Lubbock & Edwards, 1981.

Figure 2. a – *Lampadena luminosa* (Garman, 1899); b – *Lampadena urophaos* Paxton, 1963; c – *Lampanyctus nobilis* Tåning, 1928; d - *Ceratoscopelus maderensis* (Lowe, 1839); e – *Oxyporhamphus micropterus* (Valenciennes, 1847); f - *Enneanectes smithi* Lubbock & Edwards, 1981.

para uma mistura de táxons oceânicos de diversas regiões e de ambientes bentônicos insulares. Essa seria uma explicação possível para a ampla distribuição dos mesopelágicos Mictophidae e dos pelágicos Hemiramphidae (*O. micropterus*) tanto em águas oceânicas, como insulares no ASPSP.

Lessa e Vaske (2009) reportam que *O. micropterus* adultos, geralmente, predominam no arquipélago em dois períodos: entre dezembro e março, bem como, entre maio e outubro, utilizando a área como sítio de desova. No presente estudo, *O. micropterus* ocorreu no nêuston, apenas em julho de 2010.

Ainda de acordo com Lessa e Vaske (2009), adultos de *Cypselurus cyanopterus*, a mais representativa dentre os Exocoetidae, também se aproximam do ASPSP, entre novembro e abril, para desovar ovos filamentosos, que se aderem aos substratos vegetados do arquipélago. Lessa *et al.* (1999) explicam, por esse motivo, a elevada abundância de larvas de Exocoetidae nas proximidades do ASPSP, corroborado pela ausência de relação entre abundância de larvas de *C. cyanopterus* e forçantes oceanográficas.

Como parte da estratégia reprodutiva de espécies da família Hemiramphidae, está a produção de ovos grandes, que podem ser flutuantes ou demersais/bentônicos (COLLETTE *et al.*, 1984) e dos Exocoetidae, a produção de ovos bentônicos filamentosos (BERKELEY e HOUDE, 1978; COLLETTE *et al.*, 1984). No caso de *O. micropterus*, ovos apresentam-se esféricos, transparentes, exibem numerosos espinhos curtos na superfície do córion e não apresentam gotículas de óleo (KAWAKAMI *et al.*, 2010), sendo essas duas últimas características, típicas de ovos demersais. Dessa forma, a desova das espécies dessas duas famílias, no ASPSP, parece ser fortemente dependente da estrutura física do arquipélago e isso pode explicar a maior abundância de suas larvas nas proximidades do ASPSP. Desovas demersais/bentônicas demandam espaço, tornando esse um recurso limitante, que pode influenciar na sobrevivência dos ovos (HILBORN e WATERS, 1999). Entretanto, períodos de desova não coincidentes para *O. micropterus* e *C. cyanopterus*, como os reportados por Lessa e Vaske (2009), devem reduzir a pressão competitiva entre essas espécies pelo espaço disponível aos seus ovos e, assim potencializar, estrategicamente, a sobrevivência de larvas dessas espécies no ASPSP. Apesar de diferentes causas para a formação de assembleias em águas insulares ou oceânicas do ASPSP, a manutenção das mesmas, em cada uma dessas áreas, envolve mecanismos de retenção, condições ambientais favoráveis e disponibilidade de alimento, bem como, a interação entre elas.

Em 2010, na transecção Leste, sob incidência direta da corrente predominante (Sul Equatorial), houve uma concentração de ovos e larvas do ictionêuston na região mais oceânica (Estação E) (Figura 3). Em contraposição, na transecção Oeste, mais abrigada do efeito da corrente Sul Equatorial, houve uma concentração maior de ovos e larvas de peixes na área mais insular (Estações A) (Figura 3). No ano de 2012, a maior concentração de ovos e larvas do ictionêuston e ictioplâncton foi observada nas proximidades do arquipélago (Ictionêuston, nas estações A e C; Ictioplâncton, na enseada e cabeço) das duas transecções. Estudo realizado por Macedo-Soares *et al.* (2011) mostrou a mesma tendência de maiores valores de densidade de larvas próximas às ilhas do ASPSP. Macedo-Soares *et al.* (2012) observaram que a abundância média das larvas de peixes recifais decresceu com o aumento da distância às ilhotas. Lima *et al.* (2016), estudando o ictioplâncton em águas do ASPSP em distâncias entre menos que 100 e 1500 metros em relação às ilhotas, encontraram que as maiores densidades de larvas ocorreram à noite, no período chuvoso e em estações entre menos de 100 e 500 metros. Esses autores argumentam que a interação de ventos de Sudeste e Nordeste sobre o lado oeste da ilha, bem como, a corrente Sul Equatorial, fluindo de leste, criam vórtices superficiais no entorno do arquipélago, os quais parecem ser responsáveis pela retenção de larvas em águas insulares. Contudo, Lessa *et al.* (1999) encontraram maiores concentrações de larvas de peixes à Oeste, lado mais abrigado do efeito da corrente Sul Equatorial, como observado, também, no presente estudo, em 2010 e 2012. De acordo com esses autores, a maior concentração de larvas na transecção Oeste do ASPSP deve-se a uma menor velocidade de fluxo da corrente incidente.

Outros fatores, como maior produtividade nas proximidades do ASPSP, podem contribuir para uma maior disponibilidade de alimento e, conseqüentemente, para o aumento da sobrevivência de larvas de peixes nas

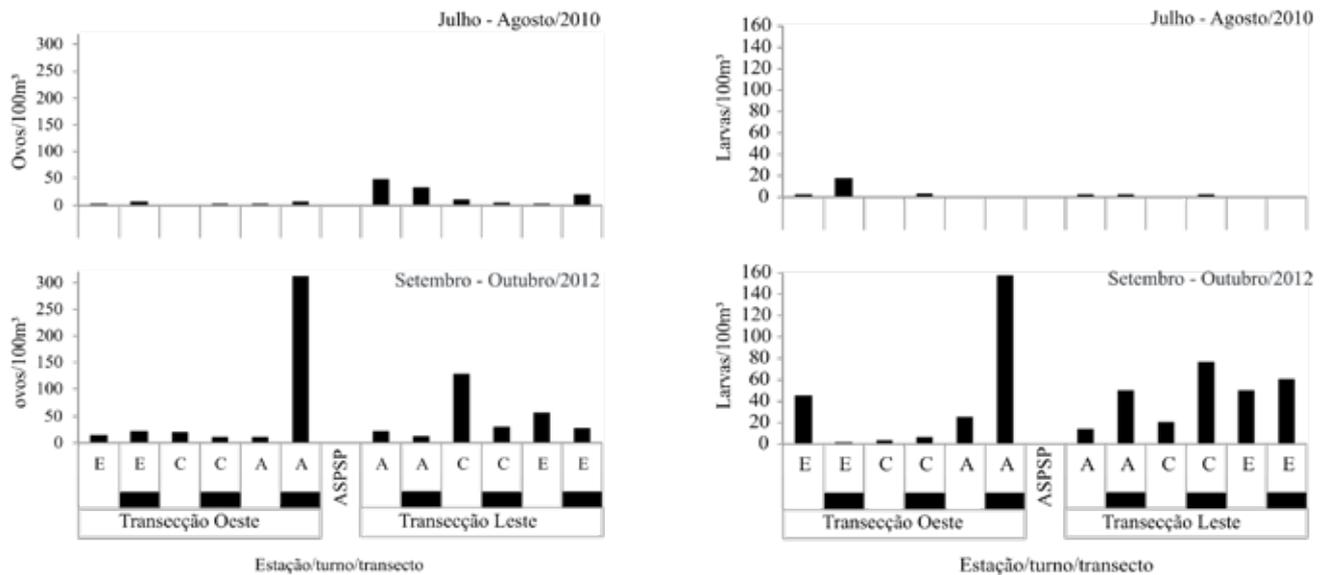


Figura 3. Densidade do ovos e larvas no nêuston Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), através dos projetos Camadas Finas I (2010) e II (2012).

Figure 3. Density values for eggs and larvae in the nêustonic layer of the Saint Peter and Paul Archipelago, through projects "Camadas Finas" I (2010) e II (2012).

proximidades do arquipélago. Diversos estudos, como o presente, têm mostrado essa tendência. Por exemplo, Macedo-Soares *et al.* (2009) observaram densidades de zooplâncton comparativamente mais elevadas no ASPSP do que na costa Nordeste do Brasil. Já Koettker *et al.* (2010) encontraram densidades no ASPSP relativamente mais altas do que valores típicos de áreas oceânicas. Além disso, Melo *et al.* (2014) observaram existir diminuição da produção secundária de copépodes com o aumento da distância em relação à ilha. Apesar disso, recentemente, Queiroz *et al.* (2015), investigando distribuição vertical e horizontal do fitoplâncton no ASPSP, no mesmo esquema de amostragem do projeto Camadas Finas I e II do presente trabalho, observaram que valores de densidade do fitoplâncton foram espacialmente uniformes e típicos de águas oligotróficas. Alguns estudos prévios na área de estudo descartaram eventos de ressurgência devido a interação entre correntes e topografia (TRAVASSOS *et al.*, 1999) ou não encontraram parâmetros biológicos que indicassem

a mesma (BROCKEL e MEYERFOFER, 1999). Contudo, Travassos *et al.* (1999) sugerem que a mistura vertical das correntes Sul Equatorial e Equatorial Submersa pode promover a desestratificação vertical e assim ascensão de águas mais profundas em direção à superfície. Por outro lado, outros autores (ARAÚJO e CINTRA, 2009, MELO *et al.*, 2015) argumentam que a interação de correntes e topografia pode ser responsável por vórtices e mecanismos pontuais de ressurgência. É inferido, ainda que a variância nos valores de temperatura superficial da água do mar, maiores densidades de larvas de peixes próximas à ilha e correlações fortes entre larvas de peixes (Myctophidae - peixes lanterna) e concentração de clorofila-a, são evidências do "efeito ilha" no entorno do ASPSP (MACEDO-SOARES *et al.*, 2011). Assim, a tendência geral para uma maior produtividade observada no presente trabalho e em outros para o ictionêuston, ictioplâncton e zooplâncton no entorno do ASPSP pode estar relacionada a interação de fatores, tais como, processos de enriquecimento, mecanismos

de retenção e biológicos, tais como aqueles relacionados à biologia adulta e larvar, entre tais, os que são associados às ecologias reprodutiva e trófica das espécies que ocorrem no arquipélago.

No ictionêuston, houve tendência de concentrar mais larvas de peixes à noite, enquanto os ovos foram bem distribuídos nos dois turnos, com tendência a aumentar no período noturno. Lessa *et al.* (1999), verificaram que a densidade de larvas no nêuston do ASPSP, tanto em estações insulares, como oceânicas, apresentava valores mínimos durante o dia e máximos à noite. Já Macedo-Soares *et al.* (2012) encontraram quatro assembleias de larvas de peixes, uma recifal, uma nerítica, uma noturna oceânica e uma diurna oceânica. O predomínio de larvas de peixes no período noturno pode estar evidenciando desova, bem como, eclosão de larvas. Esse, por exemplo, é o caso de algumas espécies de Exocoetidae e Scombridae, que têm ilhas como sítios de desova (BOEHLERT e MUNDY, 1994; LESSA *et al.*, 2000). Lessa *et al.* (1999) estudando o ictionêuston no ASPSP, observou que larvas de peixes voadores (Exocoetidae) foram as mais abundantes e sugeriu que a maior densidade de larvas no ASPSP no período noturno pode estar relacionada à movimentos migratórios ou ao período de desova de espécies dessa família. Por outro lado, larvas de muitas espécies de peixes são capazes de realizar migração vertical com periodicidade de 24 horas (NEILSON e PERRY, 1990), sendo um padrão comum migrar para estratos mais profundos durante o dia e à superfície à noite (TSUKAMOTO *et al.*, 2001; MELO *et al.*, 2015). Diversas explicações sobre esse comportamento migratório têm sido propostas (NEILSON e PERRY, 1990), tais como otimizar a eficiência de forrageio ou taxas de crescimento e/ou evitar risco de predação (AHENSTORFF *et al.*, 2011). No contexto de aumentar a eficiência de forrageio, trabalhos têm mostrado que a migração vertical de espécies de peixes está associada diretamente à migração noturna vertical do zooplâncton, sugerindo acoplamento trófico entre esses dois compartimentos. No ASPSP, em todas as estações do seu entorno, Koettker *et al.* (2010) observaram

densidades de zooplâncton mais elevadas no período noturno. Melo *et al.* (2012), investigando o mesozooplâncton na enseada e próxima ao cabeço, também, encontrou maiores densidades no período noturno. Portanto, um acoplamento trófico entre esses dois compartimentos, zoo e ictioplâncton não pode ser descartado como fator biológico estruturador de ambas comunidades. Dessa forma, elucidar as causas para a maior densidade de larvas no período noturno, especialmente nas proximidades do ASPSP, merece atenção em estudos posteriores.

A distribuição espacial, abundância e diversidade em comunidades ictioplanctônicas pode ser influenciada pela biologia da população adulta (local, época de desova, por exemplo) (KIM e BANG, 1990; NORCROSS e SHAW, 1984; PARRISH *et al.*, 1981), pela biologia/comportamento larvar (condições ambientais, disponibilidade de presas, condição fisiológica, entre outros) (MCCORNICK e MOLONY, 1992; FROST e BOLLENS, 1992; LEVINTON, 1995; INCZE *et al.*, 2001), assim como, processos oceanográficos diversos, os quais podem manter ovos e larvas próximos aos seus ambientes de desova ou dispersá-los dos mesmos. Em contrapartida, eventos e processos relativos a vida de peixes na fase planctônica influenciam a composição e o tamanho das populações adultas (DOHERTY, 1981, SALE, 1988, DOHERTY e WILLIAMS, 1988). Diversos estudos sobre o ictionêuston e ictioplâncton do ASPSP (LESSA *et al.*, 1999, MACEDO-SOARES *et al.*, 2009, MACEDO-SOARES *et al.*, 2012), incluindo o presente, mostram que esse arquipélago contribui, relevantemente, para a manutenção de assembleias de larvas de peixes oceânicos de diversas regiões, bem como, demersais e bentônicos insulares. Assim, é esperado que contribua diferenciadamente para a manutenção de populações de diversas espécies pelágicas e recifais do ASPSP (VASKE *et al.*, 2005, LUIZ *et al.*, 2015 e ROSA *et al.*, 2015).

Decreto Presidencial (Brasil, 2018) estabelece duas unidades de conservação para o ASPSP: Área

de Proteção Ambiental (APA) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (com 40.705.236 hectares) e o Monumento Natural do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (40.705.236 hectares). Tendo em vista que, mesmo com a criação dessas unidades, atividades antropogênicas, como a pesca, ainda serão permitidas na maior parte da APA, recomenda-se que futuros estudos sobre o ictioplâncton incluam investigações em escala espacial, incluindo variação vertical, que abranja a extensão da APA, assim como, em série temporal para se obter respostas face às pressões da pesca, bem como, de mudanças climáticas.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Marinha do Brasil por todo o suporte concedido, sem o qual não seria possível a realização do presente trabalho. Agradecemos aos tripulantes do Navio Oceanográfico Cruzeiro do Sul – H38, bem como, das embarcações de apoio Transmar I e III. Por fim, somos gratos ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelos recursos financeiros concedidos aos projetos Camadas Finas I e II, bem como, “Distribuição Vertical da Diversidade e Produtividade” e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelas bolsas de estudos para estudantes de pós-graduação.

Referências Bibliográficas

- AHRENSTORFF, T. *et al.* **Seasonally Dynamic Diel Vertical Migrations of Mysis diluviana, Coregonine fishes, and Siscowet Lake Trout in the Pelagia of Western Lake Superior.** *Transactions of the American Fisheries Society*, 140(6),1504-1520. 2011.
- ARAÚJO, M. and CINTRA, M. Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial. In: HAZIN, F. H. Z. (ed.). **O arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de estação científica.** SECIRM: Brasília, 2009.
- BARROS, F. B. A. G. *et al.* **Description and distribution of the larvae of two species of Fistulariidae (Teleostei, Syngnathiformes) in the southeastern Brazil.** *Biotropica*, 7(1). 2007.
- BERKELEY, S. A. and HOUDE, E. D. **Biology of two exploited species of halfbeaks, Hemiramphus brasiliensis and H. balao from southeast Florida.** *Bulletin of Marine Science*, 28, 624–644. 1978.
- BOEHLERT, G. W. and MUNDY, B. C. **Ichthyoplankton assemblages at seamounts and oceanic islands.** *Bulletin of Marine Science*, 53(2), 336-361. 1993.
- BOEHLERT, G. W. and MUNDY, B. C. **Vertical and onshore-offshore distributional patterns of tuna larvae in relation to physical habitat features.** *Marine Ecology Progress Series*, 107, 1-13.1994.
- BRANDÃO, M. C. *et al.* **Abundance and composition of decapod larvae at Saint Paul’s Rocks (equatorial Atlantic).** *Marine Ecology*, 34(2), 171-185. 2013.
- BRASIL. Decreto nº 9.313, de 19 de março de 2018. **Cria Área de Proteção Ambiental do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e o Monumento Natural do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** Diário Oficial, Brasília, DF, 19 mar. 2018.
- BRÖCKEL, K. and MEYERHÖFER, M. **Impact of the Rocks of Sao Pedro and Sao Paul upon the quantity and quality of suspended organic matter.** *Archive of Fishery and Marine Research*, 47, 223-238. 1999.
- COLLETTE, B. B. *et al.* **Beloniformes: development and relationships.** *American Society of Ichthyologists and Herpetologists Spec. Publ. No. 1*, 335–354. 1984.
- DOHERTY, P. J. and WILLIAMS, D. M. **The replenishment of coral reef fish populations.** *Oceanographic Marine Biology Annual Review*, 26(48), 551. 1988.
- EKAU, W. AND KNOPPERS, B. **An introduction to the pelagic system of the North-East and East Brazilian shelf.** *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2/3), 113-132. 1999.
- EKAU, W.; WESTHAUS-EKAU, P. and MEDEIROS, C. **Large scale distribution of fish larvae in the continental shelf waters off North-East Brazil.** *Archive of Fishery and Marine Research*, 47(2-3), 183-200. 1999.
- FEITOZA, B. M *et al.* **Reef fishes of St. Paul’s Rocks: new records and notes on biology and zoogeography.** *Aqua*, 7(2), 61-82. 2003.

FROST, B. W., BOLLENS, S. M. **Variability of diel vertical migration in the marine planktonic copepod *Pseudocalanus newmani* in relation to its predators.** *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 49: 1137-1141. 1992.

INCZE, L. S. *et al.* **Changes in copepod distributions associated with increased turbulence from wind stress.** *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 213: 229-240. 2001.

KIM, S.; BANG, B. **Oceanic dispersion of larval fish and its implication for mortality estimates: case study of walleye pollock larvae in Shelikof Strait, Alaska.** *Fishery Bulletin*, 88(2): 303-311. 1990.

KOETTKER, A. G.; FREIRE, A. S. and SUMIDA, P. Y. **Temporal, diel and spatial variability of decapod larvae from St Paul's Rocks, an equatorial oceanic island of Brazil.** *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*, 90(6), 1227-1239. 2010.

LESSA, R. *et al.* 1999. **Distribution and abundance of ichthyoneuston at seamounts and islands off north-eastern Brazil.** *Archive of Fishery Research*, 47, 133-146. 1999.

LESSA, R. *et al.* **Composição, distribuição e abundância do ictionêuston da Zona Econômica Exclusiva do Nordeste do Brasil (1995-2000): Programa REVIZEE.** Recife: Comissão Interministerial para os Recursos do Mar, Programa REVIZEE, 2000.

LESSA, R. P. and VASKE, T. A ictiofauna com ênfase aos pexes-voadores (Exocoetidae). IN: Viana, D. L. *et al.* **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.** Brasília: SECIRM, 2009. 218 - 224.

LEVINTON, J.S. **Marine biology.** Oxford University Press. 640p. 1995.

LIMA, A. R., BARLETTA, M. and COSTA, M. F. **Seasonal-dial shifts of ichthyoplankton assemblages and plastic debris around an Equatorial Atlantic archipelago.** *Frontiers in Environmental Science*, 4, 56. 2016.

LUMPKIN, R., and GARZOLI, S. L. **Near-surface circulation in the Tropical Atlantic Ocean.** *Deep-Sea Res.* 1 52, 495-518. 2005. doi: 10.1016/j.dsr.2004.09.001.

MACEDO-SOARES, L. C. P. *et al.* **Variabilidade temporal e espacial da temperatura superficial do mar e da clorofila-a no entorno do Arquipélago São Pedro e São Paulo e seus efeitos na comunidade ictioplanctônica.** XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR. *Anais... Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto-SBSR, Curitiba, PR*, 7129-7136. 2011.

MACEDO-SOARES, L. C. P. *et al.* Zooplâncton. IN: Hazin, F. H. V. **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.** Brasília: SECIRM, 2009.

MACEDO-SOARES, L. C. P., FREIRE, A. S. and MUELBERT, J. H. **Small-scale spatial and temporal variability of larval fish assemblages at an isolated oceanic island.** *Marine Ecology Progress Series*, 444, 207-222. 2012.

MAFALDA Jr., P. O. *et al.* **Oceanografia biológica: avaliação espacial e temporal do ictioplancton na ZEE da região Nordeste do Brasil.** IN: HAZIN, F. H. V. **Oceanografia Biológica: biomassa primária e secundária, macrozooplâncton, ictioplancton, ictionêuston, macrofauna bentônica.** Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro, 2009. Parte VIII, 103 - 119.

MAFALDA, P. O. and SOUZA, C. S. **Oceanografia biológica: Estrutura da comunidade de larvas de peixes na ZEE da região Nordeste do Brasil.** IN: HAZIN, F. H. V. **Oceanografia Biológica: biomassa primária e secundária, macrozooplâncton, ictioplancton, ictionêuston, macrofauna bentônica.** Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro, 2009. Parte IX, p. 120 - 165.

MCCORMICK, M. I. AND MOLONY, B. W. **Effects of feeding history on the growth characteristics of a reef fish at settlement.** *Marine Biology*, 114(1), 165-173. 1992.

MELO, P. A. *et al.* **The first occurrence of the Order Mormonilloida (Copepoda) in the Tropical Southwest Atlantic Ocean.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87(1), 233-237. 2015

MELO, P. A. M. C. *et al.* **Copepod distribution and production in a Mid-Atlantic Ridge archipelago.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 86(4), 1719-1733. 2014.

MELO, P. A. M. C. *et al.* **Diurnal and spatial variation of the mesozooplankton community in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic.** *Marine Biodiversity Records*, v. 5, 2012.

NEILSON, J. D. and PERRY, R. I. **Diel Vertical Migrations of Marine Fishes: an Obligate or Facultative Process?** *Advances in Marine Biology*, 26, 115-168. 1990.

NEIRA, F. J. *et al.* **Larvae of temperate Australian fishes: laboratory guide for larval fish identification.** Nedlands: University of Western Australian Press, 1998.

NOGUEIRA, M. M. *et al.* **The influence of abiotic and biotic factors on the composition of Tetraodontiforms larvae (Teleostei) along the Brazilian Northeast Exclusive Economic Zone (1°N - 14°S).** *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 7(1), 10-20. 2012.

- NONAKA, R.H.; MATSUURA, Y. and SUZUKI, K. **Seasonal variation in larval fish assemblages in relation to oceanographic conditions in the Abrolhos Bank region off eastern Brazil.** *Fishery Bulletin*, 98(4),767-784. 2000.
- NORCROSS, B. L. and SHAW, R. F. **Oceanic and estuarine transport of fish eggs and larvae: a review.** *Transactions of the American Fisheries Society*, 113(2), 153-165. 1984.
- OLIVAR, M. P. *et al.* **Variation in the diel vertical distributions of larvae and transforming stages of oceanic fishes across the tropical and equatorial Atlantic.** *Progress in Oceanography*, 160, 83-100. 2018.
- PARRISH, R. H. *et al.* **Transport mechanisms and reproductive success of fishes in the California Current.** *Biological Oceanography*, v.1, n. 2, p. 175–203. 1981.
- PARRISH, R.H.; NELSON, C.S. and BAKUN, A. Transport mechanisms and reproductive success of fishes in the California Current. *Biological Oceanography*, 1: 175-203, 1981.
- PETERSON, R. G. and STRAMMA, L. **Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean.** *Progress in oceanography*, 26(1), 1-73. 1991.
- QUEIROZ, A. R. *et al.* **Vertical and horizontal distribution of phytoplankton around an oceanic archipelago of the Equatorial Atlantic.** *Marine Biodiversity Records*, 8. 2015.
- RICHARDS, W. J. Introduction. IN: RICHARDS, W. J. (Ed.). **Early stages of Atlantic fishes: an identification guide for western central North Atlantic.** Boca Raton: CRC Press. 2006.
- RODRÍGUEZ, J.M. *et al.* **Mesozooplankton and ichthyoplankton distribution around Gran Canaria, an oceanic island in the NE Atlantic.** *Deep Sea Research I*, 48(10), 2161 -2183. 2001.
- Rosa, M. R. *et al.* **Mesophotic reef fish assemblages of the remote St. Peter and St. Paul's Archipelago, Mid-Atlantic Ridge, Brazil.** *Coral Reefs*, 35(1), 113-123. 2015.
- RUSSELL, F.S. **The eggs and planktonic stages of British marine fishes.** Academic Press, London, 1976.524pp.
- SALE, P. F. **Perception, pattern, chance and the structure of reef fish communities.** *Environmental Biology of Fishes*, 21, 1-15. 1988.
- SMITH, K.A. and SINERCHIA, M. **Timing of recruitment events, residence periods and post-settlement growth of juvenile fish in a seagrass nursery area, south-eastern Australia.** *Environmental biology of fishes*, 71 (1), 73-84, 2004.
- SOUZA, C. S. and MAFALDA, P. O. **Distribution and Abundance of Carangidae (Teleostei, Perciformes) associated with Oceanographic Factors along the Northeast Brazilian Exclusive Economic Zone.** *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 51(6), 1267-1278. 2008.
- SOUZA, C. S. *et al.* **Padrões espaciais e Temporais de Scaridae (Pisces: Perciformes) no Nordeste do Brasil e suas relações com os fatores oceanográficos.** *Brazilian Journal of Aquatic Science and Technology*, 14(2), 1-11. 2010.
- STRAMMA, L., and SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean.** *Deep-Sea Res. II* 46, 279–303. 1999. doi: 10.1016/S0967-0645(98)00109-X.
- TRAVASSOS, P. *et al.* **Thermohaline structure around seamounts and islands off north-eastern Brazil.** *Archive of Fishery and Marine Research*, 47, 211–222. 1999
- TRICKLEBANK, K. A. *et al.* **Composition, distribution and abundance of neustonic ichthyoplankton off northeastern New Zealand.** *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 34(3), 263-275. 1992.
- TSUKAMOTO, Y. *et al.* **Vertical distribution of fish larvae in the Kuroshio-Oyashio transition region in early summer.** *Bulletin of the National Research Institute of Fisheries Science*, 16, 39–56. 2001.
- VASKE, T. *et al.* **A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Journal of Applied Ichthyology*, 21(1), 75-79. 2005.
- VIANA, D. F. *et al.* **Fisheries in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago: 13 years of monitoring.** *Bol. Inst. Pesca*, 41(2), 239 – 248. 2015.

Ostracodes (Crustacea) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

João Carlos Coimbra¹
Nathália Carvalho da Luz¹
Silvia Regina Bottezini¹

04

Abstract

The Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), along with Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Trindade and Martin Vaz islands, make up the Brazilian oceanic islands. Although several studies have been carried out on SPSPA faunas only three of them, published in the last five years, dealt with ostracods. In this chapter, the current knowledge on benthic ostracods of the SPSPA is synthesized as well as data from the ongoing studies at Laboratório de Microfósseis Calcários (LMC) from the Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IGeo-UFRGS). A total of 14 species, ten genera and eight families have been identified, including the description of a new genus and species of Hemicytheridae, and two new species of the genus *Xestoleberis*. Ecological and zoogeographical remarks complement the faunal data.

Introdução

A classe Ostracoda constitui um grupo de pequenos crustáceos aquáticos cujo registro paleontológico abrange praticamente todo o Fanerozoico. De acordo com Coimbra e Bergue (2011) a maioria dos autores entende que os fósseis mais antigos de ostracodes sejam do Eo-ordoviciano. Contudo, recentemente Harvey *et al.* (2012) registraram uma mandíbula de Ostracoda no Cambriano Superior da Formação Deadwood cuja morfologia e dimensões são compatíveis com os dois maiores subgrupos viventes, Myodocopa e Podocopa. O corpo dos ostracodes está encapsulado por uma carapaça bivalve quitino-calcítica secretada pela epiderme, e o comprimento do adulto em geral fica entre 0,4 e 1 mm. Embora também ocorra em ambientes semiterrestres, dulciaquícolas e mixoalinos, é nos oceanos que o grupo apresenta sua maior diversidade (COIMBRA e BERGUE, 2011). São de especial interesse paleontológico pelo abundante e extenso registro fóssil e por suas aplicações em estudos paleoambientais, bioestratigráficos e evolutivos. Como os demais artrópodes, o crescimento se dá por ecdises e, conseqüentemente, as carapaças descartadas contribuem para o aumento no número de fósseis destes microcrustáceos. Até atingir a fase adulta, um ostracode passa por até oito estágios de crescimento e, em cada um deles, uma nova carapaça é sintetizada. Diferente de outros crustáceos, o carbonato de cálcio utilizado para a sua síntese não é reabsorvido, provindo totalmente da água (BERGUE, 2006).

Os estudos sobre ostracodes marinhos em ilhas oceânicas iniciaram no final do século XIX, mas apenas na década de 1980 é que se intensificaram as pesquisas sobre esta fauna. O primeiro trabalho

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (joao.coimbra@ufrgs.br).

abrangente a respeito dos ostracodes insulares marinhos bentônicos foi realizado por Allison e Holden (1971), na Ilha Clipperton, Oceano Pacífico, sendo que as ilhas deste oceano e do Oceano Índico concentram a maioria dos estudos desta natureza.

No Oceano Atlântico, as ilhas do Arquipélago de Cabo Verde (WOUTERS, 2003), Arquipélago das Bermudas (KEYSER e SCHONING, 2000) e Atol das Rocas e Trindade (COIMBRA *et al.*, 2009; COIMBRA e CARREÑO, 2012) possuem trabalhos sobre a fauna de ostracodes bentônicos de suas águas costeiras. Além disso, Antonietto *et al.* (2012), Coimbra *et al.* (2013) e Luz e Coimbra (2014) publicaram artigos tratando de ostracodes do ASPSP. Importante salientar que o artigo de Coimbra *et al.* (2013) faz uma discussão detalhada com os resultados obtidos por Antonietto *et al.* (2012), refutando alguns deles.

O presente capítulo tem por objetivo sintetizar o conhecimento da ostracofauna bentônica do ASPSP, bem como apontar as pesquisas ora em andamento ou ainda em fase de projeto no Laboratório de Microfósseis Calcários (LMC) do Instituto de Geociências da UFRGS, localizado em Porto Alegre.

Material e Métodos

No LMC estão sendo estudados ostracodes de diferentes ilhas oceânicas do Brasil, incluindo o ASPSP. Parte do material analisado do ASPSP permitiu duas publicações acima já referidas, *i.e.*, Coimbra *et al.* (2013) e Luz e Coimbra (2014). Nelas foram estudadas 22 amostras de sedimentos e algas coletadas na enseada do arquipélago entre os meses de julho e agosto de 2010 (Figura 1; Tabela I). As coletas ocorreram por mergulho livre em profundidades que variaram de 2 a 11 m. O material foi acondicionado em potes plásticos em campo. Para recuperação de ostracodes do substrato alga foi triada a amostra completa. Já para as amostras de sedimento, o conteúdo foi fracionado e 20 ml de cada amostra foi triado. As carapaças (vivos) de ostracodes recuperadas foram fixadas em álcool 70% e as valvas (mortos) acondicionadas em lâminas de células múltiplas. Maiores informações sobre as coletas estão em Coimbra *et al.* (2013).

Figura 1. Enseada do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, indicando as três áreas de coleta (modificado de COIMBRA *et al.*, 2013).

Figure 1. Saint Peter and Saint Paul Archipelago cove, showing the three sampling area (modified from COIMBRA *et al.*, 2013).



A triagem dos ostracodes foi realizada com o auxílio de microscópio estereoscópico. As imagens foram obtidas através de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV), no Centro de Microscopia Eletrônica da UFRGS, e Microscopia Óptica (MO), no LMC.

Tabela I. Área de coleta na enseada, número da amostra, substrato e profundidade.

Table I. Sampling area in the cove, sample number, substrate and depth.

Amostra	Área de Coleta	Substrato	Prof. (~m)	Amostra	Área de Coleta	Substrato	Prof. (~m)
M 1001-N	Área A	Alga (<i>Cauleroa racemosa</i>)	2	M 1018-N	Área A	Alga sp. 1	2
M 1002-N	Área A	Alga sp. 1	2	M 1021-N	Área A	Alga (<i>Cauleroa racemosa</i>)	2
M 1003-N	Área A	Sedimento	5	M 1022-N	Área C	Alga sp. 1	4
M 1004-N	Área A	Sedimento	5	M 1023-N	Área C	Alga (<i>Caulerpa racemosa</i>)	4
M 1005-N	Área A	Sedimento	5	M 1025-N	Área C	Alga (<i>Caulerpa racemosa</i>)	4
M 1008-N	Área A	Sedimento	5	M 1026-N	Área C	Alga sp. 2	-
M 1010-N	Área A	Sedimento	10	M 1030-N	Área C	Alga sp. 2	5
M 1011-N	Área A	Alga sp. 1	3	M 1031-N	Área C	Alga (<i>Caulerpa racemosa</i>)	5
M 1012-N	Área B	Sedimento	11	M 1032-N	Área C	Alga (<i>Caulerpa racemosa</i>)	5
M 1014-N	Área B	Sedimento	11	M 1035-N	Área C	Alga (<i>Caulerpa racemosa</i>)	5
M 1017-N	Área A	Alga sp. 1	2	M 1036-N	Área C	Alga sp. 2	5

Resultados e Discussão

Riqueza e abundância

No material analisado por Coimbra *et al.* (2013) foram reconhecidas 14 espécies (Figuras 2 e 3), dez gêneros e oito famílias, tendo sido descrito um gênero e espécie novos para a família Hemicysteridae, *Berguecythere insularis* Coimbra, Bottezzini e Machado, 2013 (Figuras 2J-K). Onze espécies foram deixadas em nomenclatura aberta pelos autores, que já apontaram para a provável existência de outras espécies novas, especialmente devido ao isolamento deste arquipélago e à

ausência de estágio larval pelágico nos ostracodes bentônicos. Um ano depois, Luz e Coimbra (2014) propuseram duas espécies novas, ambas da família Xestoleberididae e aparentemente endêmicas para o ASPSP, *Xestoleberis brasiliinsularis* e *X. machadoae* (Figuras 3I-L). Entretanto, esta endemidade não é mais corroborada, pois N.C.L. registrou, em 2016, espécimes de *X. brasiliinsularis* e *X. machadoae* em amostras da Ilha da Trindade que farão parte de uma nova publicação.

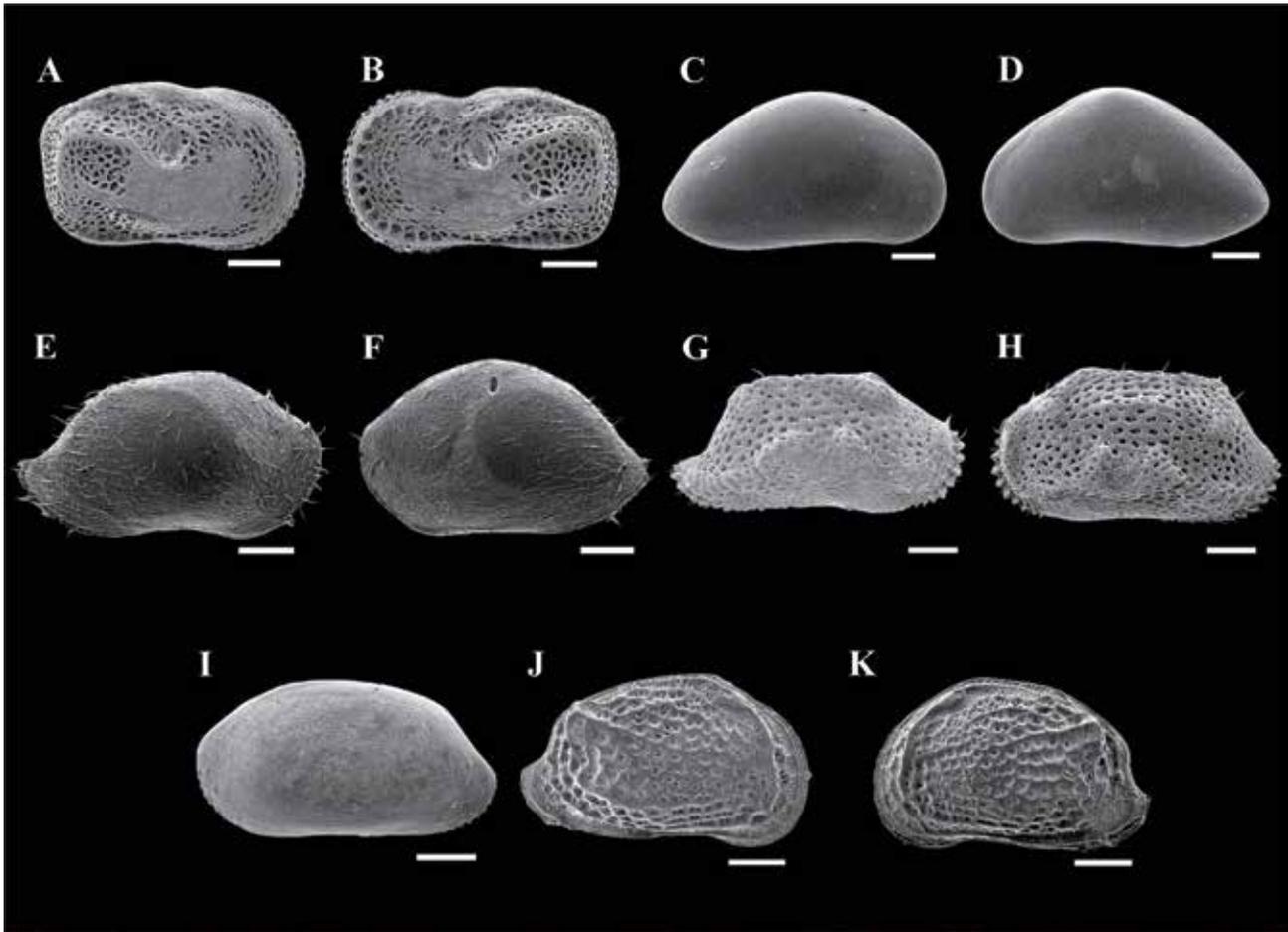


Figura 2. Espécies registradas para o ASPSP. A,B-*Keijcyoidea* sp.: A, valva direita; B, valva esquerda. C,D-*Propontocypris* sp.: C, valva direita; D, valva esquerda. E,F-*Neonesidea* sp.: E, valva direita; F, valva esquerda. G,H-*Triebelina sertata* TRIEBEL, 1948: G, valva direita; H, valva esquerda. I, *Triebelina* sp., valva esquerda. J,K-*Berguecythere insularis* COIMBRA, BOTTEZINI e MACHADO, : J, valva direita; K, valva esquerda. Escalas = 100 µm.

Figure 2. Species registered in the SPSPA. A,B-*Keijcyoidea* sp.: A, right valve; B, left valve. C,D-*Propontocypris* sp.: C, right valve; D, left valve. E,F-*Neonesidea* sp.: E, right valve; F, left valve. G,H-*Triebelina sertata* TRIEBEL, 1948: G, right valve; H, left valve. I, *Triebelina* sp., left valve. J,K-*Berguecythere insularis* Coimbra, Bottezzini e Machado, : J, right valve; K, left valve. Scale bars =100 µm.

Dentre os 5.795 espécimes coletados, sendo 29% vivos e 71% mortos, a espécie *Loxocorniculum tricornatum* Krutak, 1971 é de longe o ostracode mais abundante no ASPSP, perfazendo um total de 4.214 espécimes (1.150 coletados vivos). *Keijcyoidea* sp. (539 espécimes, sendo 153 vivos) e *Xestoleberis machadoae* (179 indivíduos, sendo 69 vivos) ocupam o segundo e o terceiro lugar em abundância, respectivamente. Além de abundantes,

as três espécies estão bem distribuídas na enseada do arquipélago, tendo maior representação de espécimes vivos no sedimento do que no substrato alga. *Loxocorniculum tricornatum* contabilizou 1.056 indivíduos vivos no sedimento e 94 no substrato alga. *Keijcyoidea* sp. ocorreu com 144 espécimes vivos no sedimento e nove no substrato alga. *Xestoleberis machadoae* foi encontrada com 64 vivos no sedimento e somente cinco no

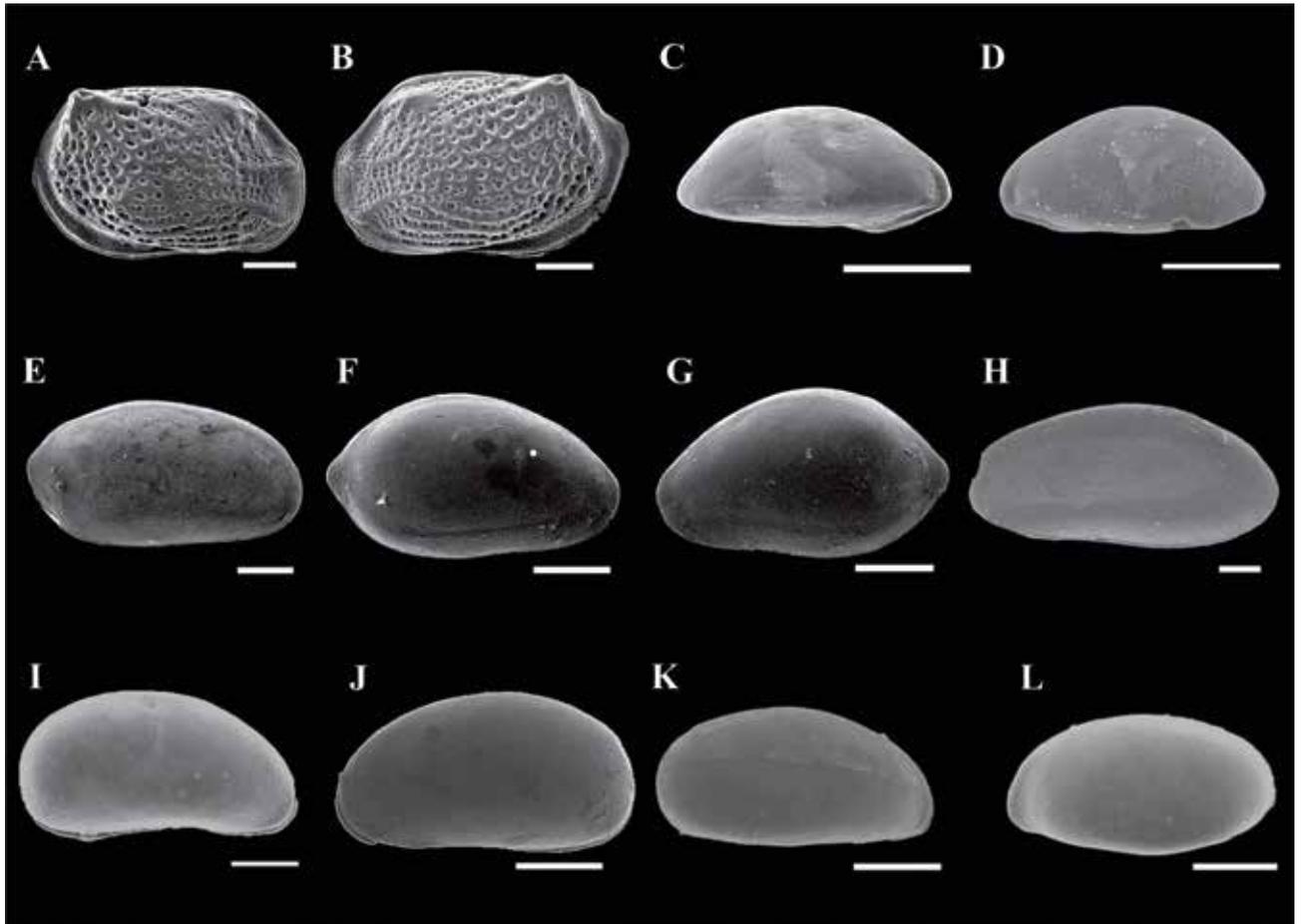


Figura 3. Espécies registradas para o ASPSP. A,B-*Loxocorniculum tricornatum* Krutak, 1971, : A, valva direita; B, valva esquerda. C,D-*Microcythere* sp.: C, valva direita; D, valva esquerda. E-*Paradoxostoma* sp. 1, valva direita. F,G-*Paradoxostoma* sp. 2: F, valva direita; G, valva esquerda. H-*Paradoxostoma?* sp. 3, valva esquerda. I,J-*Xestoleberis brasiliensis* Luz e Coimbra, 2014, : I, valva direita; J, valva esquerda. K,L-*Xestoleberis machadoae* Luz e Coimbra, 2014, : K, valva direita; L, valva esquerda. Escalas =100 µm.

Figure 3. Species registered in the SPSPA. A,B-*Loxocorniculum tricornatum* Krutak, 1971, : A, right valve; B, left valve. C,D-*Microcythere* sp.: C, right valve; D, left valve. E-*Paradoxostoma* sp. 1, right valve. F,G-*Paradoxostoma* sp. 2: F, right valve; G, left valve. H-*Paradoxostoma?* sp. 3, left valve. I,J-*Xestoleberis brasiliensis* Luz e Coimbra, 2014, : I, right valve; J, left valve. K,L-*Xestoleberis machadoae* Luz e Coimbra, 2014, : K, right valve; L, left valve. Scale bars =100 µm.

substrato alga. Por outro lado, entre as espécies pouco abundantes, destaca-se *Cytherella* sp. com apenas um indivíduo jovem. *Paradoxostoma?* sp. 3 e *Triebelina* sp. foram representadas por seis espécimes cada (*Triebelina* sp. somente mortos), enquanto *Microcythere* sp. contabilizou 19

espécimes (sendo 17 vivos). Cabe ainda salientar que das espécies registradas nos trabalhos de Coimbra *et al.* (2013) e Luz e Coimbra (2014), a dominância de indivíduos jovens sobre adultos foi a regra, exceto para *X. machadoae* (Figura 4).

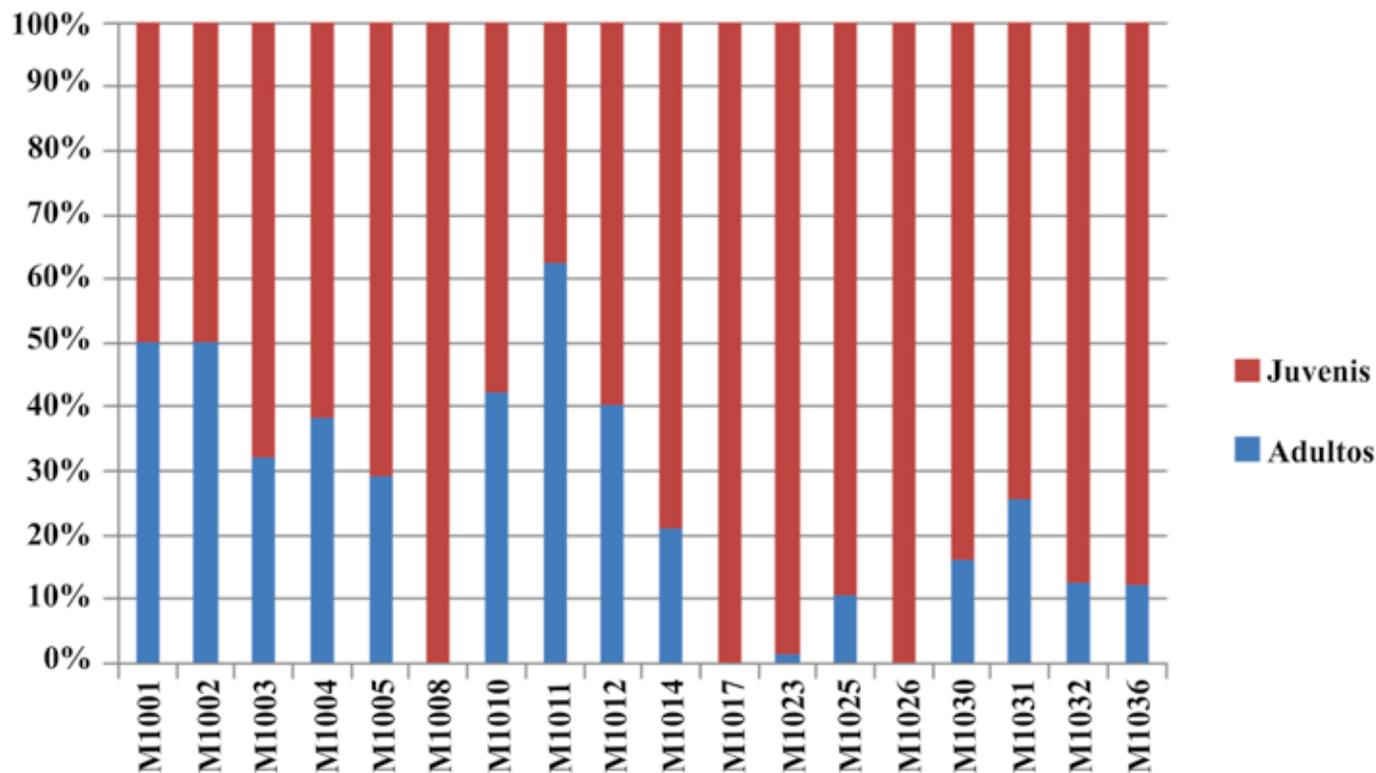


Figura 4. Total (%) de adultos e juvenis por amostra.
Figure 4. Total (%) of adults and juveniles per sample.

Aspectos zoo- e paleozoogeográficos

Larwood e Whatley (1993) e Coimbra *et al.* (2009), estudando ostracodes de ilhas oceânicas, destacaram que o isolamento físico e geográfico é um fator determinante tanto para a especiação quanto para que sejam criados elevados índices de endemismo. Uma das muitas causas do isolamento é a imposição de barreiras físicas. Assim, áreas profundas dos oceanos servem de barreira para a dispersão de organismos bentônicos restritos às águas mais rasas das plataformas continentais. Em ilhas oceânicas permanentemente isoladas ao longo de milhares ou mesmo milhões de anos, os índices de endemismo são maiores do que as que mantêm – ou já mantiveram – algum tipo de ligação com continentes ou outras ilhas.

Cronin (1988) destacou que, ao contrário da maioria dos demais crustáceos, ostracodes marinhos bentônicos não apresentam larvas planctônicas, e sua dispersão e potencial de colonização de ilhas oceânicas isoladas apresenta uma série de fatores limitantes, como a profundidade, as mudanças na temperatura da água e a duração da jornada. A migração pode ser ativa ou passiva. A colonização ativa ocorre quando os ostracodes migram “passo a passo” de uma região para outra, ou por invasão e adaptação de faunas originalmente de águas profundas; este último caso foi bem demonstrado por Whatley *et al.* (1997). Para a colonização passiva, têm sido aventadas as seguintes possibilidades: (i) que os ostracodes “viajem” sobre algas flutuantes e/ou sedimentos em suspensão de um local para outro através de correntes superficiais (veja também TEETER, 1973; MACHADO *et al.*, 2005); (ii) que os

ostracodes e/ou seus ovos sejam ingeridos por aves marinhas migratórias e dispersos nas suas rotas (ou levados nas suas patas e/ou penas, como propôs BOLD, 1976); (iii) que embarcações transoceânicas façam o transporte e a consequente distribuição dos ostracodes retidos na água de lastro (veja discussão em WITTE, 1993). Contudo, Teeter (1973) sustentou apenas as propostas (i) e (iii) como viáveis. Em relação à hipótese (ii), ele a considerou improvável devido à profundidade da água em que estes ostracodes marinhos vivem, à ausência de ovos resistentes à dessecação em ostracodes marinhos, e à falta de correspondência entre as rotas de aves migratórias e a área de distribuição dos ostracodes. Teeter (1973) ressaltou, ainda, que outros meios de dispersão de ostracodes marinhos bentônicos citados na literatura, inclusive no trato intestinal de aves e peixes, e transporte pelo vento, também são improváveis. Finalmente, é da opinião dos autores do presente capítulo que a hipótese (iii), embora defendida por Teeter (1973), não seja a mais adequada para explicar a distribuição dos ostracodes, já que como demonstraram Cronin (1988) e Coimbra *et al.* (1999) – para citar apenas dois exemplos – o estudo dos fósseis tem revelado que muitas espécies atuais, cuja origem está no Neogeno, já apresentavam ampla distribuição geográfica desde o Plioceno ou mesmo do Mioceno.

A fauna de ostracodes insulares do ASPSP, comparada com outras ilhas oceânicas do Oceano Atlântico, apresenta menor diversidade e abundância dada à minúscula área da enseada amostrada e, provavelmente, ao seu grande isolamento geográfico.

A ostracofauna do ASPSP, quando comparada com a Ilha da Trindade, possui três espécies em comum, *Triebelina sertata*, *Xestoleberis brasilinsularis* e *X. machadoae*. Já o Atol das Rocas registra duas espécies que estão presentes também no ASPSP: *Loxocorniculum tricornatum* e *T. sertata*. Estes dois ostracodes são ainda compartilhados com a ostracofauna das regiões de águas quentes da plataforma continental brasileira (MACHADO, 2008; COIMBRA *et al.*, 2009).

Segundo Coimbra *et al.* (2009), *Triebelina sertata* é uma espécie relictica, com origem no oceano Indo-Pacífico e ampla distribuição nos mares tropicais rasos. Apresenta pouca variação morfológica mesmo entre populações que estão geograficamente distantes, sendo que Whatley e Jones (1999) registraram discreto polimorfismo em populações da Ilha da Páscoa.

Loxocorniculum tricornatum aparentemente tem seu registro mais antigo para o Mioceno da República Dominicana (BOLD, 1988), de onde se dispersou atingindo outras regiões caribenhas, o Golfo do México e a plataforma continental do Brasil (COIMBRA *et al.*, 1992; MACHADO, 2008) e, finalmente, as ilhas oceânicas acima citadas.

Se comparada à fauna do Arquipélago de Cabo Verde, o ASPSP aparentemente não possui nenhuma espécie em comum (WOUTERS, 2003). Contudo, dentre as espécies que foram deixadas em nomenclatura aberta, é possível que haja alguma que seja comum aos dois arquipélagos, o que somente poderá ser desvendado através de novos estudos taxonômicos tanto dos ostracodes do ASPSP quanto de Cabo Verde.

A provável ausência de similaridade da ostracofauna do ASPSP com as de outras regiões pode ser observada também para a costa tropical do oeste africano (WITTE, 1993). Porém, a falta de estudos sobre a ostracofauna marinha das áreas tropicais da África limitam as comparações de cunho taxonômico e zoogeográfico.

Contrariando a hipótese inicial, espécies pandêmicas de mares rasos e quentes, como *Kotoracythere incospicua* (Brady, 1880), *Neomonoceratina mediterranea* (Ruggieri, 1953), *Keijia demissa* (Brady, 1868), *Tenedocythere ex. gr. transoceanica* (Teeter, 1975) e *Kangarina abyssicola* (Müller, 1894) não foram encontradas no ASPSP. É provável que isso ocorra porque, não raro, estas espécies desenvolvem populações muito pequenas, detectadas somente com esforço amostral muito além do usual. Coimbra (1995) e Coimbra *et al.* (1999), examinando em torno

de 340 amostras ao longo de toda a plataforma equatorial do Brasil, registraram menos de 20 indivíduos (valvas isoladas sendo contabilizadas também como um indivíduo) para as duas primeiras espécies, menos de 50 para as duas seguintes e menos de 100 para a última.

O aparente significativo grau de endemismo da fauna de ostracodes do ASPSP pode ser explicado pela ausência de “ligação” com o continente, diferente do que ocorre com a Ilha da Trindade que é “ligada” à costa brasileira por uma cadeia de montanhas submarinas e, portanto, até o momento não apresentou nenhum ostracode marinho endêmico. O mesmo ocorre com o Atol das Rocas, cuja ostracofauna do norte e nordeste do Brasil deve ter “utilizado” os montes submarinos do alinhamento da Zona de Fratura de Fernando de Noronha para atingir a região do Atol (COIMBRA *et al.*, 2009), num processo de dispersão passiva.

Perspectivas

As pesquisas com ostracodes do ASPSP seguem com intuito de aprofundar o conhecimento taxonômico e (paleo) zoogeográfico do grupo, para um melhor entendimento da relação desta fauna com outras ilhas do Oceano Atlântico e com a plataforma brasileira. Além destes estudos, vem se desenvolvendo também pesquisa sobre o potencial de preservação dos ostracodes. Esta abordagem consiste na avaliação do quanto do sinal biológico fica preservado nas acumulações de carapaças encontradas no sedimento (KIDWELL e TOMAŠOVÝCH, 2013).

Um dos meios de avaliar o potencial de preservação é a comparação entre as associações viva e morta através de vários aspectos ecológicos (composição faunística, dominância, riqueza, etc.). A realização deste tipo de estudo requer coletas contínuas devido à existência de espécies raras, com populações pequenas, que em um único censo podem não estar representadas.

Para grupos com partes resistentes, como os ostracodes, os indivíduos mortos têm a capacidade de resistir aos efeitos de processos bióticos e abióticos por décadas ou até milhares de anos. Esta associação morta pode resumir no sedimento populações de várias gerações bem como registrar mudanças de curto prazo no ambiente (KIDWELL e BOSENCE, 1991; KIDWELL, 2007; KIDWELL e TOMAŠOVÝCH, 2013), diferindo substancialmente da comunidade vivente no local. Este tipo de análise permite o reconhecimento dos limites do uso destes organismos em estudos paleontológicos, além de sua aplicabilidade na biologia da conservação.

Referências Bibliográficas

- ALLISON, E.C. e HOLDEN, J.C. **Recent ostracodes from Clipperton Island Eastern Tropical Pacific.** *Transactions of San Diego Society of Natural History*, 16, 165-214. 1971. <http://dx.doi.org/10.5962/bhl.part.15458>
- ANTONIETTO, L.S.; MACHADO, C.P.; CARMO, D.A. e ROSA, J.W.C. **Recent Ostracoda (Arthropoda, Crustacea) from São Pedro-São Paulo Archipelago, Brazil: a preliminary approach.** *Zootaxa*, 3335, 29-53. 2012.
- BERGUE, C.T. **A aplicação dos ostracodes (Crustacea) em pesquisas paleoceanográficas e paleoclimáticas.** *Terrae Didactica*, 2, 54-66. 2006.
- BOLD, W. **Distribution of species of the Tribe Cyprideidini (Ostracoda, Cytherideidae) in the Neogene of the Caribbean.** *Micropaleontology*, 22, 1-43. 1976. <http://dx.doi.org/10.2307/1485319>
- BOLD, W. **Neogene Paleontology in the northern Dominican Republic 7. The subclass Ostracoda (Arthropoda, Crustacea).** *Bulletins of American Paleontology*, 94, 1-105. 1988.
- COIMBRA, J.C. e BERGUE, C.T. **Ostracodes.** In: CARVALHO, I.S. (Ed.) *Paleontologia: microfósseis e paleoinvertebrados*. 3ed. Rio de Janeiro: Interciência, 35-51. 2011.
- COIMBRA, J.C.; BOTTEZINI, S.R. e MACHADO, C.P. **Ostracoda (Crustacea) from the Archipelago of São Pedro and São Paulo, Equatorial Atlantic, with emphasis on a new Hemicytheridae genus.** *Iheringia, Série Zoologia* 103, 289-301. 2013. <http://dx.doi.org/10.1590/S0073-47212013000300012>

- COIMBRA, J. C. e CARREÑO, A. L. **Richness and palaeozoogeographical significance of the benthic Ostracoda (Crustacea) from the oceanic Island of Trindade and Rocas Atoll, Brazil.** *Revista Brasileira de Paleontologia*, 15, 189-202. 2012.
- COIMBRA, J.C.; GHILARDI, V.G.; CASSETA, G.M. e BERGUE, C.T. **Ostracoda Ostracodes (Crustacea; Podocopida) da Ilha da Trindade e do Atol das Rocas, Brasil.** In: L. MOHR, V. et al. (Eds.) *Ilhas Oceânicas Brasileiras: da Pesquisa ao Manejo, volume 2*. Brasília: Ministério do Meio Ambiente/ IBAMA, 125-141. 2009.
- COIMBRA, J.C.; PINTO, I.D.; WÜRDIG, N. e CARMO, D.A. **Zoogeography of Holocene Podocopina (Ostracoda) from the Brazilian continental shelf.** *Marine Micropaleontology*, 37, 365-379. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8398\(99\)00025-0](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8398(99)00025-0)
- COIMBRA, J.C.; RAMOS, M.I.F. e SANGUINETTI, Y.T. **Sub-Recent ostracodes of the Tamandaré Bay, Northeastern Brazil: a preliminary report on biofacies.** *Pesquisas*, 19, 94-105. 1992.
- COIMBRA, J.C.; SANGUINETTI, Y.T. e BITENCOURT-CALCAGNO, V.M. **Taxonomy and distribution patterns of recent species of *Callistocythere Ruggieri*, 1953 (Ostracoda) from the Brazilian continental shelf.** *Revista Española de Micropaleontología*, 27, 177-186. 1995.
- CRONIN, T. M. **Geographical isolation in marine species: evolution and speciation in Ostracoda.** In: HANAI, T. et al. (Eds.) *Evolutionary Biology of Ostracoda: its fundamentals and applications*. Developments in Paleontology and Stratigraphy, 11, 871- 889. 1988.
- HARVEY, T.H.P.; VÉLEZ, M.I. e BUTTERFIELD, N.J. **Exceptionally preserved crustaceans from western Canada reveal a cryptic Cambrian radiation.** *Proceedings from the National Academy of Sciences of the United States of America*, 109, 1589-1594. 2012. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1115244109>
- KEYSER, D. e SCHÖNING, C. **Holocene Ostracoda (Crustacea) from Bermuda.** *Senckenbergiana Lethaea*, 80, 567-591. 2000. <http://dx.doi.org/10.1007/BF03043366>
- KIDWELL, S.M. **Discordance between living and death assemblages as evidence for anthropogenic ecological change.** *PNAS*, 104, 7701-17706. 2007. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0707194104>
- KIDWELL, S.M. e BOSENCE, D.W.J. **Taphonomy and time-averaging of marine shelly faunas.** In: ALLISON, P.A. e BRIGGS, D.E.G. (Eds.) *Taphonomy*. New York: Plenum Press, 115-209. 1991.
- KIDWELL, S.M. e TOMAŠOVÝCH, A. **Implications of time-averaged death assemblages for ecology and conservation biology.** *Annual Review of Ecology and Systematics*, 44, 539-563. 2013. <http://dx.doi.org/10.1146/annurev-ecolsys-110512-135838>
- LARWOOD, J. e WHATLEY, R.C. **Tertiary to Recent evolution of Ostracoda in isolation on seamounts.** In: MACKENZIE, K.G. e JONES, P. (Eds.) *Ostracoda in the life sciences*, 513-549. 1993.
- LUZ, N.C. e COIMBRA, J.C. **New species of Xestoleberididae (Crustacea, Ostracoda) from Archipelago of São Pedro and São Paulo, Equatorial Atlantic.** *Iheringia, Série Zoologia*, 104, 470-477. 2014. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-476620141044470477>
- MACHADO, C.P. **(Paleo)zoogeografia dos Ostracodes Holocênicos das Regiões Leste e Nordeste da Plataforma Continental Brasileira.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Tese 000652948. 2008.
- MACHADO, C.P.; COIMBRA, J.C. e CARREÑO, A.L. **The ecological and zoogeographical significance of the sub-Recent Ostracoda off Cabo Frio, Rio de Janeiro State, Brazil.** *Marine Micropaleontology*, 55, 235-253. 2005. <http://dx.doi.org/10.1016/j.marmicro.2005.03.002>
- TEETER, J.W. **Geographic distribution and dispersal of some recent shallow-water marine Ostracoda.** *The Ohio Journal of Science*, 73, 46-54. 1973.
- WHATLEY, R.C. e JONES, R.L. **The marine podocopid Ostracoda of Easter Island: a paradox in zoogeography and evolution.** *Marine Micropaleontology*, 37, 327-343. 1999. [http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8398\(99\)00021-3](http://dx.doi.org/10.1016/S0377-8398(99)00021-3)
- WHATLEY, R.C.; STAUNTON, M. e KAESLER, R.L. **The depth distribution of Recent marine Ostracoda from the southern Strait of Magellan.** *Journal of Micropaleontology*, 16, 121-130. 1997. <http://dx.doi.org/10.1144/jm.16.2.121>
- WITTE, L.J. **Taxonomy and biogeography of West African beach ostracods.** *Verhandelingen Koninklijke Nederlandse Akademie van Wetenschappen, (Natuurkunde)*, 39, 13-105. 1993.
- WOUTERS, K. **Taxonomy and zoogeography of intertidal Ostracoda (Crustacea) from the Cape Verde Islands (Atlantic Ocean).** *Bulletin Koninklijk Belgisch Instituut voor Natuurwetenschappen, Biologie*, 71, 137-159. 2003.

Biotecnologia Marinha aplicada ao desenvolvimento de Fármacos Anticâncer a partir de Microrganismos Marinhos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Paula C. Jimenez¹
Elthon G. Ferreira²
Larissa A. Guimarães²
Amaro E. Trindade-Silva²
F. Andréa S. Oliveira²
Diego V. Wilke²
Alison B. Silva²
M. Conceição M. Torres³
Otilia D. L. Pessoa²
Letícia V. Costa-Lotufo⁴

05

Abstract

Biotechnology has expanded the use of marine resources far beyond food to include other valuable resources. In such case, pharmaceuticals have gained especial attention with the recognition of the astonishing chemical diversity of secondary metabolites produced by marine organisms with biological properties of therapeutic value. In Brazil, pharmacological prospection of the coastline is merely in the initial stages, however findings have been mounting and exciting. The enisled regions, nevertheless, remain mostly untapped in this regard, and represent an equally stimulating opportunity for bioprospection. Herein, the present study describes the results obtained within the project entitled "Sustainable prospection in oceanic islands" contemplated within the 2013 PROARQUIPELAGO grant call, which ventured to collectively search microorganisms from Brazil's oceanic islands, including the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, for interesting molecules with anticancer activity. Different search strategies were used, from a traditional approach, beginning with the screening of a large number of bacterial extracts against cancer cells, then identifying the active ones and selecting the most interesting to proceed with identification and isolation of active principles, to innovative approaches, as a target-oriented methodology to recognize molecules that modulate a specific group of proteins, and also a genomic search, aiming at looking at gene clusters relevant for secondary metabolism.

Introdução

A descoberta acidental do primeiro antibiótico, a penicilina, por Alexander Fleming, em 1928, enquanto observava culturas de bactérias contaminadas por fungo do gênero *Penicilium*, revolucionou não só a história da medicina, mas de toda a humanidade. Desde então, os microrganismos foram reconhecidos como uma profícua fonte de moléculas com aplicação farmacológica. Nesse contexto, fungos e bactérias terrestres dominaram essa área quase que exclusivamente até os anos 90, quando o ambiente marinho passou a ser também considerado pelo potencial de seus microrganismos como fonte de medicamentos.

O ambiente marinho possui alta diversidade microbiológica e abundâncias estimadas em 10⁶ microrganismos/mL de água do mar e 10⁹/cm³ de sedimento (FENICAL e JENSEN, 2006). Mais além, suas características químicas, físicas e biológicas parecem ter contribuído para a seleção de vias metabólicas produtoras de moléculas com estruturas diferentes daquelas sintetizadas por microrganismos terrestres (IMHOFF *et al.*, 2011). Assim, a produção de tais moléculas está relacionada à adaptação dos microrganismos aos fatores abióticos incidentes nos oceanos, bem como à interação entre os organismos nesse

-
- 1 Universidade Federal de São Paulo;
 - 2 Universidade Federal do Ceará;
 - 3 Universidade Estadual da Paraíba;
 - 4 Universidade de São Paulo (costalotufu@gmail.com).

meio. Há, ainda, a noção de que invertebrados marinhos estão associados a um grande número de microrganismos, sendo estes um recurso igualmente propício à prospecção (LOPANIK, 2014).

O medicamento anticâncer Yondelis® foi desenvolvido a partir do princípio ativo trabectedina, um alcalóide isolado da ascídia caribenha *Ecteinascidia turbinata*, e é usado clinicamente desde 2007. O suprimento comercial desta molécula é garantido por um processo de semi-síntese a partir de um composto intermediário (cianosafracina B) obtido da bactéria *Pseudomonas fluorescens* (CUEVAS e FRANCESCH, 2009). Mais recentemente, no entanto, foi evidenciado que o produtor da trabectedina era, de fato, uma proteobactéria simbiote da ascídia, a *Candidatus endoecteinascidia frumentensis*, que, por análises genômica, provou ser dotada de genes competentes à biossíntese desse composto (SCHOFIELD *et al.*, 2015).

As proteobactérias, entre as bactérias marinhas, respondem por cerca de 12% das moléculas bioativas já isoladas desse ambiente, superadas pelas cianobactérias, com 33% e, também pelas actinobactérias, que respondem por 40% dessas moléculas (WILLIAMS, 2009). Nesta vitrine, merece destaque a salinosporamida A, uma γ -lactama- β -lactona bicíclica produzida por *Salinispora tropica*, uma actinobactéria estritamente marinha recuperada do sedimento das Bahamas, coletado em expedição realizada em 1989. Além de produtora, é a própria actinobactéria que fornece esta molécula para os ensaios clínicos em pacientes, sendo a salinosporamida A, desenvolvida sob a denominação de Marizomib®, a única molécula em testes clínicos suprida por processo de fermentação salina (FENICAL *et al.*, 2009).

Embora os estudos estejam em expansão, no cenário da bioprospecção – definida como a busca por produtos e processos funcionais a partir da biodiversidade – a costa brasileira e, sobremaneira, as áreas insulares, encontram-se sub-exploradas.

Vale destacar, que habitats pouco estudados e regiões abastadas de endemismos ou de uma diversidade biológica peculiar, como ilhas oceânicas, podem oferecer bioprodutos inéditos ou singulares, visto que a quimiodiversidade de um ambiente se encontra em direta relação à sua biodiversidade (SNELGROVE, 2016). Mais além, regiões tropicais concentram a maior biomassa e riqueza de espécies (BROWN, 2014; MANNION *et al.*, 2014) e, ainda que contestável, há um entendimento de que as interações entre os organismos são mais intensas e especializadas em latitudes baixas (SCHEMSKE *et al.*, 2009; MOLES e OLLERTON, 2016), podendo refletir numa maior diversidade metabólica.

Neste capítulo, serão apresentados resultados do projeto “Prospecção sustentável em ilhas oceânicas (ProspecMar-Ilhas)”, contemplado na chamada do Programa Arquipélago e Ilhas Oceânicas (PROARQUIPÉLAGO) de 2013. Este projeto focou, entre outros aspectos, na obtenção de moléculas com potencial anticâncer desde microrganismos e invertebrados marinhos, aventurando-se, ineditamente, na bioprospecção coletiva das ilhas oceânicas brasileiras, inclusive o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP).

Prospecção fenotípica de actinobactérias recuperadas do sedimento do ASPSP

A bioprospecção farmacológica tradicional, também chamada de fenotípica, é pautada, inicialmente, na identificação de atividade biológica de interesse em extratos obtidos dos organismos, seguido pelo isolamento e identificação do princípio ativo e, por fim, pelo estudo de seu modo de ação. Este estudo, cujo objetivo foi acessar o potencial anticâncer dos metabólitos produzidos por actinobactérias associadas ao sedimento do ASPSP que, por sua vez, não estavam prontamente acessíveis

para investigação, contou ainda com uma etapa preliminar, compreendendo a recuperação de tais bactérias das amostras de sedimento.

As actinobactérias são produtoras de esporos, o que as torna mais resistentes a certas condições de estresse em relação as bactérias Gram negativas e outras Gram positivas como elas, porém que não esporulam. Visando otimizar a obtenção de actinobactérias, o sedimento coletado foi submetido a dois processamentos distintos. O método 1 consistiu na secagem da amostra seguida de carimbo com esponja. O método 2 foi realizado através de aquecimento do sedimento diluído em água do mar (Figura 1). Três meios de cultura solidificados com ágar em diferentes condições nutricionais foram utilizados, a saber, SWA (meio mínimo, apenas água do mar estéril), TMA (meio com metais em quantidades traço) e

SCA (meio enriquecido com diversas fontes de carbono, de nitrogênio e de micronutrientes). Estes processos levaram à obtenção de 268 cepas de bactérias recuperadas do sedimento do ASPSP entre actinobactérias e outros táxons (FERREIRA *et al.*, 2016). Destas, 65% foram obtidas pelo método 1 e os 35% restantes pelo método 2. Pelo método 1 foram obtidos percentuais parecidos de bactérias isoladas nos 3 meios, com um rendimento discretamente maior do meio de cultura nutricionalmente mais pobre (SWA). Pelo método 2, os meios rico (SCA) e com metais-traço (TMA) mostraram melhor recuperação de cepas.

Dentre as cepas isoladas, 75 foram cultivadas em meio de cultura líquido visando a fermentação e extração química em três solventes diferentes – acetato de etila (AcOEt), *n*-butanol (BuOH) e metanol (MeOH) gerando, portanto, três extratos para cada

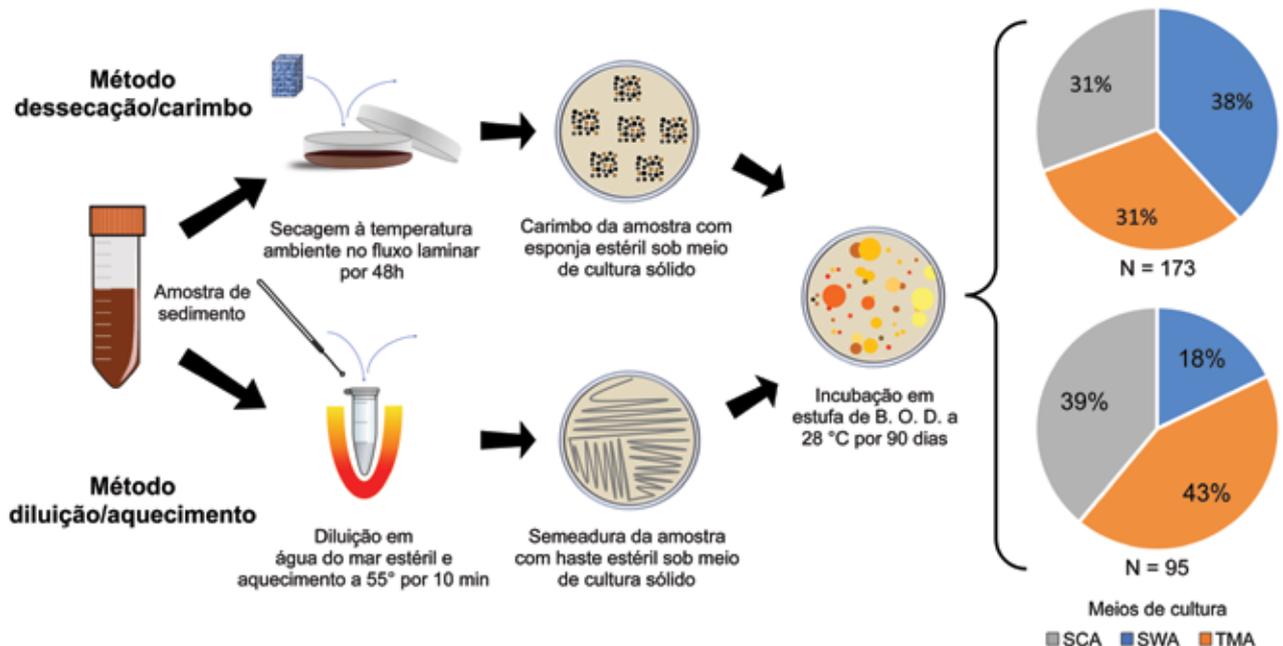


Figura 1. Métodos utilizados para processamento dos sedimentos coletados no ASPSP, e proporções do número de cepas de bactérias recuperadas nos diferentes métodos e meios utilizados.

Figure 1. Methods used to process the sediments collected at the SPSPA, and proportions of the number of bacterial strains recovered in the different methods and media used.

cepa (Figura 2A). O efeito antiproliferativo em células tumorais de cada extrato obtido foi avaliado *in vitro* contra uma linhagem de carcinoma colorretal humano (HCT 116), através do ensaio de MTT. Este ensaio (Figura 2A) baseia-se na conversão de um sal de tetrazólio de coloração amarela, a formazan, de coloração roxa, resultante da atividade de enzimas mitocondriais (MOSMANN, 1983). Os extratos que causaram inibição >75% na concentração de 50µg/mL foram considerados ativos. Dos 224 extratos testados, 50 (22%) foram citotóxicos às células HCT-116, sendo que metade destes foi

obtida em AcOEt. Outros 23 extratos (37%) foram obtidos em BuOH, (Figura 2B). Mais além, a partir do cálculo da CI_{50} – concentração que causa 50% do efeito máximo – os extratos foram classificados por sua potência em alta ($CI_{50} < 1 \mu\text{g/mL}$), moderada ($1 \leq CI_{50} \leq 10 \mu\text{g/mL}$) ou baixa ($CI_{50} > 10 \mu\text{g/mL}$) (Figura 2C). A maior parte dos extratos apresentou potência alta e, destes, os extratos obtidos em AcOEt foram maioria (Figura 2C). Assim, estes resultados evidenciam que o sedimento do ASPSP hospeda microrganismos produtores de substâncias com potencial anticâncer.

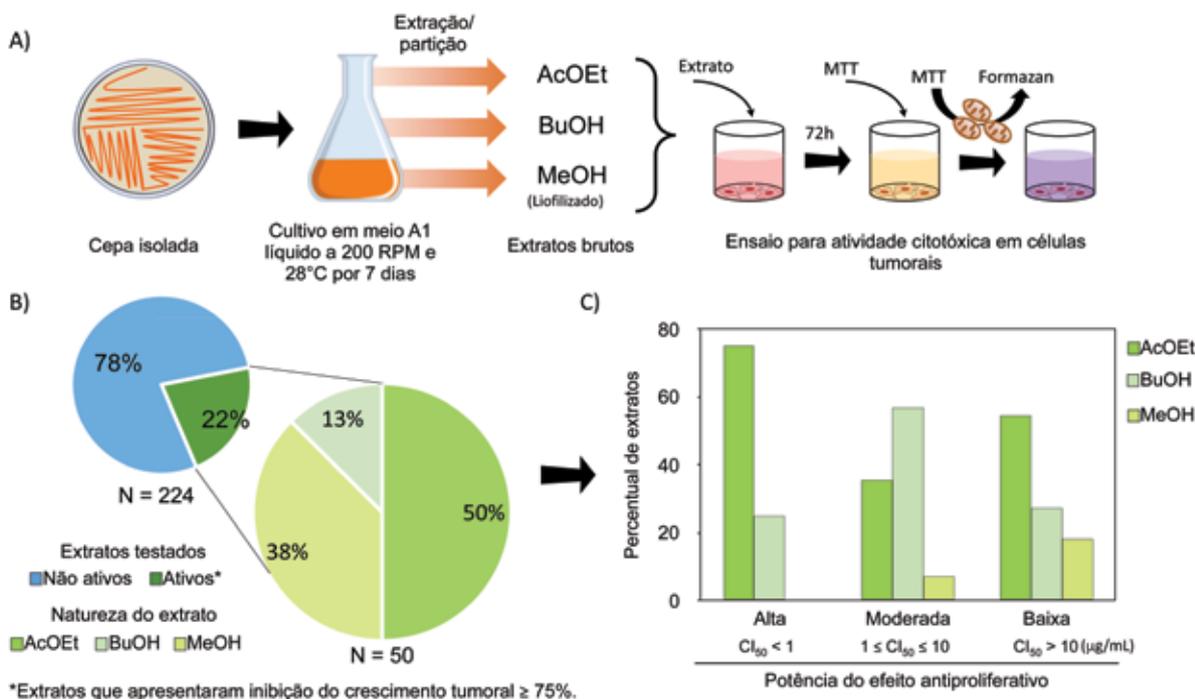


Figura 2. A) Estratègia de obtenção dos extratos das actinobactèrias através do cultivo em meio líquido e extração com diferentes solventes, seguida de evaporação, e avaliação da atividade citotóxica em células tumorais usando o teste do MTT (MOSMANN, 1983). B) Percentual de extratos considerados ativos, e sua distribuição entre os diferentes solventes utilizados para extração. C) Quantidade de extratos por categoria de atividade: alta ($IC_{50} < 1 \mu\text{g/mL}$), moderada ($1 \leq IC_{50} \leq 10 \mu\text{g/mL}$) e baixa ($IC_{50} > 10 \mu\text{g/mL}$).

Figure 2. A) Strategy applied for extract obtention, by growth in liquid culture of actinobacteria and extraction with different solvents, followed by evaporation and evaluation of cytotoxic activity in tumor cells using the MTT assay (MOSMANN, 1983). B) Percentage of extracts considered active, and their distribution among the different solvents used for extraction. C) Extracts by activity category: high ($IC_{50} < 1 \mu\text{g/mL}$), moderate ($1 \leq IC_{50} \leq 10 \mu\text{g/mL}$) and low ($IC_{50} > 10 \mu\text{g/mL}$).

Investigação química de extratos produzidos por cepas de actinobactérias recuperadas do sedimento do ASPSP

Três cepas produtoras de extratos citotóxicos, identificadas como *Salinispora arenicola* (BRA-132), *Actinomadura* sp. (BRA-177) e *Streptomyces* sp. (BRA-199), foram selecionadas para prosseguir em estudos, visando a identificação ou o isolamento de substâncias ativas. Para tanto, as bactérias foram crescidas em 10L de meio de cultura sob agitação e posteriormente extraídas com AcOEt, que após evaporação a vácuo do solvente, obteve-se os respectivos extratos brutos.

O extrato de BRA-132 (30,0 mg) foi submetido à cromatografia de adsorção em gel de sílica usando como eluente os solventes hexano, AcOEt e MeOH, puros ou em misturas binárias em ordem crescentes de polaridade, resultando em dez frações. Essas frações foram analisadas por LC-MS (MS/MS e UV), seguido por consulta ao banco de dados *AntiMarin*, um sistema que contém dados de quase 60 mil substâncias químicas (BLUNT *et al.*, 2012). A partir dessas análises foi possível identificar as seguintes

substâncias: salinicetal A (1), salinicetal B (2), rifamicina S (3), rifamicina B (4), estaurosporina (5), *N*-metil-estaurosporina (6), hidroximetil-estaurosporina (7) e *N*-carboxamida-estaurosporina (8), conforme mostrados na figura 3 (FERREIRA *et al.*, 2016).

O extrato de BRA-177 (390,0 mg) foi submetido à cromatografia de adsorção em gel de sílica usando como eluente os solventes hexano, AcOEt e MeOH, puros ou em misturas binárias. A análise destas frações por HPLC, usando coluna de fase reversa (C-18) e, como fase móvel, uma mistura isocrática de CH₃CN-H₂O (9:1), permitiu o isolamento de substâncias da classe das prodigininas, identificadas como metil-ciclooctilprodigiosina (9), ciclononilprodigiosina (10) e nonilprodigiosina (11), indicadas na figura 4 (SILVA *et al.*, 2017).

O extrato de BRA-199 (170,0 mg) foi fracionado em gel de sílica, utilizando os solventes hexano, hexano/AcOEt, AcOEt, AcOEt/MeOH e MeOH como eluentes. A análise por HPLC da fração hexano/AcOEt 2:1, utilizando um método isocrático constituído de CH₃CN-H₂O 25:75%, resultou no isolamento do composto 12, identificado como piericidina A. A análise por HPLC da fração AcOEt/MeOH 4:1, usando

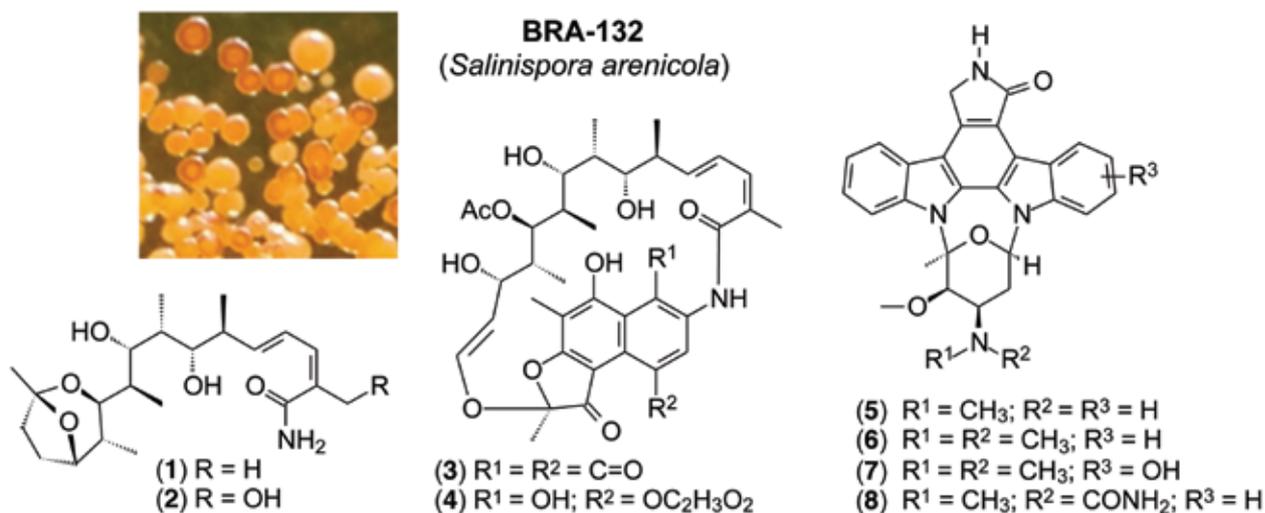


Figura 3. *Salinispora arenicola* (BRA-132) e estruturas das substâncias identificadas.
Figure 3. *Salinispora arenicola* (BRA-132) and structures of identified substances.

BRA-177
(*Actinomadura* sp.)

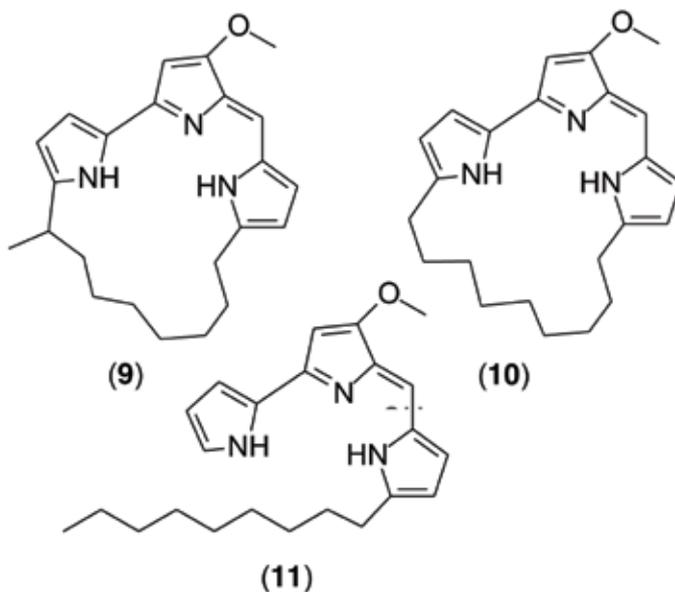


Figura 4. *Actinomadura* sp. (BRA-177) e estruturas das prodigininas isoladas.

Figure 4. *Actinomadura* sp. (BRA-177) and structures of isolated prodiginines.

BRA-199
(*Streptomyces* sp.)

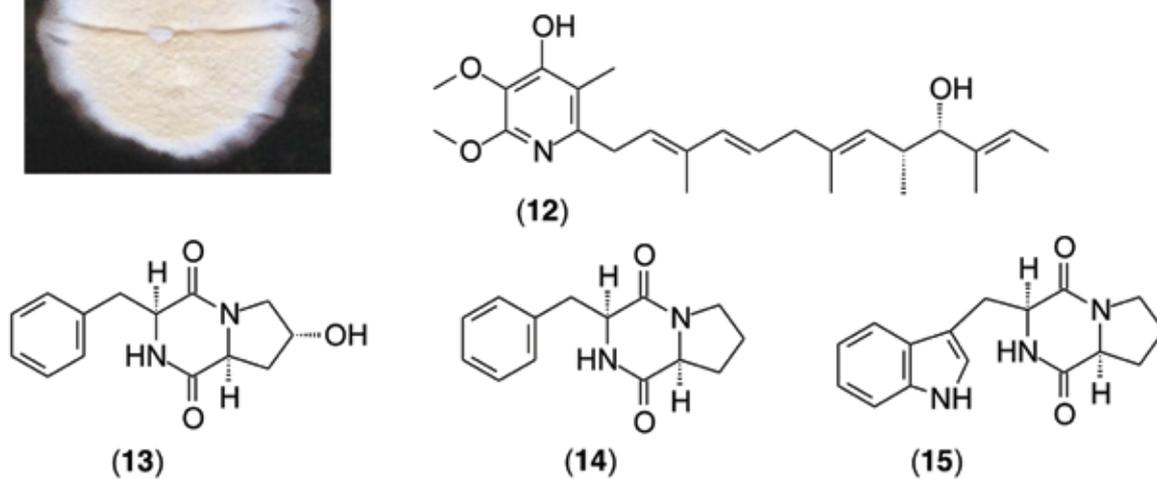


Figura 5. *Streptomyces* sp. (BRA-199) e estruturas das substâncias isoladas.

Figure 5. *Streptomyces* sp. (BRA-199) and structures of isolated substances.

como fase móvel um gradiente composto por MeOH-H₂O, variando de 30 a 60% de MeOH em 15 min, permitiu o isolamento das dicetopiperazinas ciclo(L-Phe-*trans*-4-OH-L-Pro) (13) ciclo(L-Phe-L-Pro) (14) e cis-ciclo(L-Trp-L-Pro) (15) (FERREIRA *et al.* 2016), como mostrado na figura 5.

Prospecção alvo-direcionada de extratos de actinobactérias do sedimento do ASPSP

Tradicionalmente, a prospecção de novos fármacos a partir de fontes naturais parte da identificação da atividade biológica em extratos orgânicos dos organismos, isolamento da molécula ativa, e por fim, o estudo aprofundado de sua atividade biológica, envolvendo a elucidação do alvo molecular e do mecanismo de ação. Esse tipo de abordagem fenotípica tem grande valor, visto o grande número de moléculas funcionais, inclusive de fármacos, que contam histórias de sucesso trilhadas por este caminho. Contudo, esta metodologia pode conduzir à redescoberta de moléculas após um laborioso processo de isolamento, além de demandar um trabalho igualmente prolixo para elucidação do alvo de ação.

Sendo assim, abordagens inovadoras fazem-se necessárias à prospecção de novos fármacos (KOEHN e CARTER, 2005), principalmente em se tratando do câncer, cuja terapia precisa de medicamentos mais seletivos e de novas estratégias terapêuticas afim de aumentar a eficácia do tratamento e reduzir a resistência tumoral e os efeitos colaterais. Nessa conjuntura, a abordagem alvo-direcionada, que vem se alargando em anos recentes, recorre à inversão da ordem clássica de prospecção, partindo de um alvo celular específico, relevante no contexto da patologia que se deseja tratar, e buscando moléculas que modulem este alvo.

A técnica denominada "cromatografia funcional" (Figura 6) consiste numa cromatografia por bioafinidade, cuja fase estacionária é uma resina incorporada da proteína-alvo e a fase móvel é o extrato natural a ser testado (LAU *et al.*, 2015; KANG *et al.*, 2014). Pelo princípio deste método, espera-se, pois, que se substâncias presentes nos extratos possuírem afinidade a tal proteína, estas ficarão retidas na resina, ao passo que as demais serão facilmente removidas por lavagem. As substâncias retidas – às quais convencionamos chamar de "hits" –, por sua vez, serão eluídas com solvente e reconhecidas quanto às suas massas moleculares (M) ou, mais especificamente, pela razão massa/carga (m/z) de partículas ionizadas ($[M+H]^+$), através de análises por LC-MS (cromatografia líquida acoplada à espectrometria de massas) seguida por pesquisa em banco de dados.

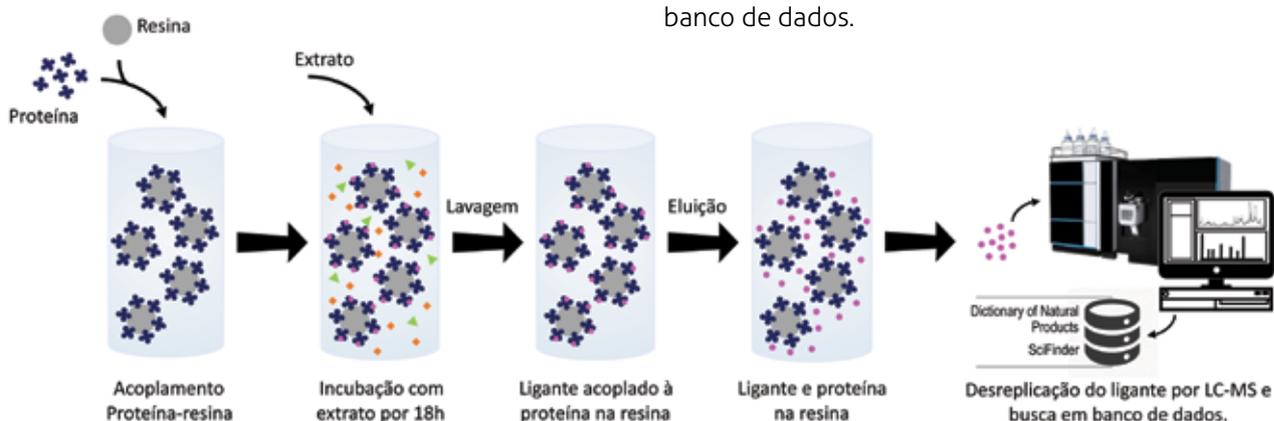


Figura 6. Técnica de cromatografia funcional.

Figure 6. Functional chromatography technique.

Os extratos obtidos a partir de microrganismos recuperados do sedimento do ASPSP foram testados, por esta abordagem, em uma classe específica de proteínas inibidoras de caspases, as chamadas proteínas inibidoras da apoptose (IAPs), a saber survivina, livina, XIAP e cIAP-2. Algumas IAPs encontram-se superexpressas em células tumorais, sendo que a evasão aos sinais pró-apoptóticos, promovida em parte por proteínas desse grupo, está associada à progressão tumoral e à resistência a quimioterápicos (DYNEK e VUCIC, 2013). Vale ressaltar, pois, que no contexto da prospecção alvo-direcionada, a cromatografia funcional tem revelado resultados surpreendentes na otimização do processo, viabilizando a busca por ligantes de alvos proteicos não-enzimáticos ou desprovidos de moduladores farmacológicos, levando praticamente ao reconhecimento simultâneo da massa molecular do ligante e seu alvo de ação (LA CLAIR e RODRIGUEZ, 2011; LEAR *et al.*, 2009).

A tabela I, a seguir, apresenta os resultados dos cinco extratos de actinobactérias recuperadas do sedimento do ASPSP que apresentaram "hits" às IAPs, visto que as análises por LC-MS do material eluído após cada processo de cromatografia funcional mostrou substâncias retidas na resina. As substâncias "hits" em cada extrato estão identificadas pela *m/z* da sua partícula ionizada ($[M+H]^+$) e considerando a magnitude de sua ocorrência em cada um dos alvos. É importante ponderar, ainda que preliminares, que estes resultados se mostram extremamente promissores à medida que podem ter revelado possíveis ligantes das IAPs, um grupo de proteínas que não possui qualquer modulador farmacológico. Os próximos passos deste estudo consistem no isolamento das substâncias identificadas por este processo e na validação da interação alvo-ligante e da atividade biológica em modelos celulares.

Tabela I. Extratos de actinobactérias e respectivos "hits" às IAPs (survivina, livina, XIAP e c-IAP2) identificados pela técnica de cromatografia funcional. A quantidade de "+" representa a magnitude da ocorrência de cada "hit" para cada alvo, sendo +++, alta; ++, moderada; +, baixa; e -, inexistente.

Table I. Extracts of actinobacteria and their respective hits to IAPs (survivin, livina, XIAP and c-IAP2) identified by the functional chromatography technique. The amount of "+" represents the magnitude of the occurrence of each hit for each target, being +++, high; ++, moderate; +, low; and - non-existent.

Extrato	<i>m/z</i> [M+H] ⁺	Alvos			
		survivina	livina	XIAP	c-IAP2
BRA-134	511,2347	++	++	++	++
	497,2192	++	++	+	++
BRA-180	284,3308	++	++	++	++
	312,3625	++	++	++	++
BRA-214	670,4050	++	+++	++	++
	704,3900	++	+++	++	++
	752,3892	++	+++	++	++
	684,4204	++	+++	++	++
BRA-249	613,3350	++	+++	++	++
	481,2250	++	++	+	+
	467,2095	+++	+++	++	++
	497,2203	++	++	+	+
BRA-258	304,2995	++	++	+	-
	481,2228	++	++	+	++
BRA-263	467,2082	++	++	++	++
	269,2000	-	++	++	++
	304,2989	++	++	++	++
	284,3295	++	++	++	++
	312,3612	++	++	++	++

Prospecção genômica

No começo dos anos 2000, o sequenciamento do genoma de *Streptomyces coelicolor* A3(2) e *S. avermitilis*, linhagens, então, extensamente exploradas por métodos do estado-da-arte em microbiologia, química e genética devido à sua singular versatilidade para produção de substâncias bioativas, revelou uma ampla gama de genes envolvidos no metabolismo secundário e ainda não caracterizados (OMURA *et al.*, 2001, BENTLEY *et al.*, 2002; IKEDA *et al.*, 2003). Muitos destes genes não puderam ser correlacionados à síntese de toda a diversidade de estruturas químicas então conhecida para essas linhagens, compondo assim vias crípticas, ou seja, vias biossintéticas rigorosamente reguladas e com expressão silenciada nas condições aplicadas para cultivo *in vitro*. Desde então, e principalmente após a implementação de plataformas de sequenciamento multiplex em meados de 2005, reduzindo vertiginosamente os custos de sequenciamento, as análises genômicas ganharam *status* de pilar na prospecção ou mineração de novos fármacos a partir da versatilidade metabólica dos microrganismos.

Um dos alicerces que alavancou o desenvolvimento de uma profusão de ferramentas de bioinformática para a prospecção *in silico* é o paradigma de que, nos genomas microbianos, os genes envolvidos na biossíntese, modificação, regulação e resistência (no caso de antibióticos), estão comumente agrupados em um único *locus*, como vias ou grupamentos biossintéticos. Tais arranjos gênicos foram descobertos a partir dos trabalhos pioneiros de Hopwood e colaboradores na mutação, clonagem e recombinação gênica de *Streptomyces* (revisão em HOPWOOD, 1999).

Atualmente, ferramentas de bioinformática publicamente disponíveis e com potentes fluxos de trabalho automatizados, permitem que projetos de prospecção de potenciais novos fármacos sejam iniciados pela perspectiva da genômica.

Dentre estas ferramentas pode-se destacar: i) “antibiotics & Secondary Metabolite Analysis Shell” (antiSMASH) (WEBER *et al.*, 2015), ii) EvoMining (CRUZ-MORALES *et al.*, 2016), e iii) “Biosynthetic Gene Cluster Comparative Synteny Software” (BioCompass) (LEAO *et al.*, 2017). O antiSMASH e o EvoMining são algoritmos para detectar vias de biossíntese de metabólitos secundários de classes conhecidas ou novas, sendo que o primeiro é embasado em perfis ocultos de Markov, e o segundo em filogenômica e no conceito de que essas vias surgem de expansões (de substrato) de famílias de proteínas do metabolismo central. Por fim, o BioCompass lança mão de análises de similaridade e sintonia gênica para agrupar as vias biossintéticas em “famílias”, permitindo a desrepliação genômica da diversidade química.

O nosso grupo vem implementando a prospecção genômica de actinomicetos marinhos isolados do ASPSP e detentores de atividades citotóxicas. Duas das linhagens descritas anteriormente, *Actinomadura* sp. (BRA-177) e *Streptomyces* sp. (BRA-199), tiveram seus genomas sequenciados na plataforma Illumina MiSeq da Central de Genômica e Bioinformática (CeGenBio), localizada na Universidade Federal do Ceará. Em ambos os casos, os dados brutos de sequência foram submetidos a montagem utilizando o programa SPAdes (BANKEWICH *et al.*, 2012), gerando-se rascunhos (draft) dos genomas de alta qualidade (> 100 vezes de cobertura), e com tamanho estimado compatível com o esperado para esses gêneros de actinomicetos: *Actinomadura* sp. BRA-177 de ~8,4Mb (SILVA *et al.*, 2017) e *Streptomyces* sp. BRA-199 de ~ 6,2Mb (dados não publicados). Os genomas foram anotados no servidor RAST (AZIZ *et al.*, 2008) e prospectados para produção de produtos naturais utilizando-se algumas das ferramentas acima referenciadas (SILVA *et al.*, 2017).

Ao total, foram recuperados 22 e 34 grupamentos gênicos envolvidos na biossíntese de metabólitos

secundários nos genomas das linhagens BRA-177 e BRA-199, incluindo vias de PKS e NRPS multifuncionais e multimodulares para produção de policetídeos e peptídeos complexos, além de genes para síntese de terpenos, lantipeptídeos, sideróforos, dentre outros (Figura 7). Apesar do notório potencial do gênero *Streptomyces* para produção de substâncias bioativas, deve-se ressaltar que o draft genoma da BRA-199 tem maior fragmentação (contigs = 1079 e N50 = 19.966 pb) em relação ao genoma de BRA-177 (contigs = 735 e N50 = 21.775 pb) e, por isso, algumas das vias biossintéticas, como aquelas compostas por enzimas multimodulares (PKS e NRPS), podem estar segmentadas em dois ou mais contigs.

A desreplcação gênica feita pelo antiSMASH contra o banco de dados do MIBiG (MEDEMA *et al.*, 2015) demonstrou que a linhagem BRA-199 contém cinco grupamentos com alta similaridade (>45% dos genes apresentando similaridade) para

vias de produção de substâncias caracterizadas de actinobactérias: o osmoprotetor ectoína (100%), o bloqueador do complexo I da cadeia transportadora de elétron piericidina A1 (75%), o peptídeo lantibiótico SapB (75%), o sideróforo mirubactina (50%) e o aminoglicosídeo antibiótico kanamicina (46%). BRA-177, por sua vez, também contém via homóloga à de produção de ectoína (75%), além de vias para a biossíntese dos terpenóides hopeno (46%) e 2-metil-isoborneol (100%), este último encontrado em actinobactérias e cianobactérias, e do antibiótico tripirrólico da classe das prodigininas, undecilprodiginina (54%). Finalmente, 22 grupamentos gênicos de BRA-199 e 10 de BRA-177 apresentaram similaridades entre baixa e intermediária (2% ≥ 33% dos genes apresentando similaridade) para novas vias já descritas em actinobactérias, além de vias únicas, ou seja, sem similaridade para a diversidade de grupamentos gênicos catalogados no MIBiG (dados não mostrados).

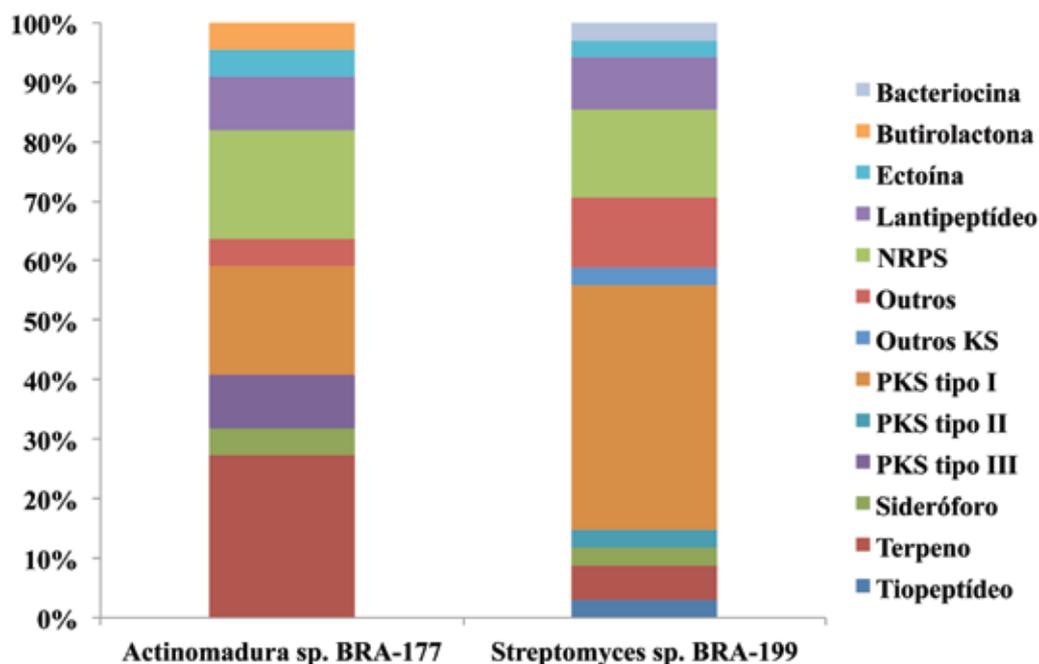


Figura 7. Abundância relativa das classes de vias de biossíntese para metabólitos secundários detectadas nos genomas de *Actinomadura* sp. (BRA-177) e *Streptomyces* sp. (BRA-199).

Figure 7. Relative abundance of biosynthesis pathways for secondary metabolites detected in the genomes of *Actinomadura* sp. (BRA-177) and *Streptomyces* sp. (BRA-199).

Como observado, a prospecção genômica das linhagens BRA-199 e BRA-177 detectou, além das vias de biossíntese de piericidina A1 e de prodigininas, respectivamente antecipadas pelos fracionamentos e purificação química das substâncias, uma gama de vias órfãs ou crípticas, cujas substâncias ainda não foram detectadas *in vitro*. Por outro lado, o isolamento químico de três substâncias da família das prodigininas 9 - 11, levaram a uma análise genômica especificamente voltada à caracterização detalhada da via de biossíntese destas substâncias. Assim, caracterizou-se o grupamento gênico *non* de ~ 68,6 Kb divididos em dois contigs do genoma de BRA-177 e com 21 genes codificando para toda enzimologia envolvida na biossíntese de prodigininas tipicamente encontradas em actinobactérias, além de genes para regulação da via, arranjada em três unidades transcricionais (SILVA *et al.*, 2017).

Análises filogenéticas demonstraram que as sequências de aminoácidos para as proteínas hipotéticas da via *non* – tioesterase (NonJ), PKS tipo I (NonL), e Rieske oxigenase (NonG) – agrupam-se separadamente das respectivas enzimas homólogas de linhagens de *Streptomyces* produtoras de prodigininas. Como em *Streptomyces* sp., essas enzimas tiveram papel bioquímico comprovado em etapas-chave de clivagem (RedJ/NonJ), ativação (RedL/NonL) e ciclização (RedG/NonG) de substrato para a formação de undecilprodigosina e prodigininas relacionadas (HU *et al.*, 2016), esses resultados corroboraram com a teoria de que essas atividades catalíticas tem especificidades alteradas em linhagens do gênero *Actinomadura*, e sugere que as substâncias 9 e 10 são assinaturas químicas deste gênero de actinobactérias (SILVA *et al.*, 2017).

Considerações Finais

Os ecossistemas marinhos brasileiros, em especial aqueles de lugares como o ASPSP, que permanecem praticamente inexplorados, têm uma importância estratégica para o país. Contudo, o aproveitamento destes recursos permanece um desafio de difícil equacionamento, uma vez que as lacunas que temos no conhecimento básico não nos permite ter uma real dimensão da diversidade biológica associada a esse ambiente e ponderar sobre sua fragilidade, tampouco avaliar as oportunidades de inovação. Neste contexto, o projeto ProspecMar-Ilhas buscou um paradigma de bioprospecção pautado na sustentabilidade, com foco na microbiota cultivável associada a diferentes matrizes, como sedimento, água, e organismos holobiontes como esponjas, cnidários e ascídias. De partida, o banco de cepas gerado é, em si, um patrimônio de alto valor agregado, e garante a preservação, armazenamento e acesso às bactérias isoladas do ASPSP por tempo indeterminado. Mais além, os resultados aqui apresentados quanto à atividade anticâncer ressaltam a riqueza biotecnológica do ASPSP e o potencial farmacológico abrigado nessas bactérias.

Há que se ressaltar, na cadeia produtiva do desenvolvimento de medicamentos, que a busca por novos princípios ativos é o ponto fundamental para gerar inovação. Nessa vereda, as substâncias de origem marinha têm originado bioprodutos relevantes com a descoberta de moléculas com estruturas peculiares associadas a potentes propriedades farmacológicas, sobremaneira se considerado o contexto da terapia do câncer. O presente projeto levou ao isolamento de mais de 250 cepas de bactérias, das quais 31 continuam a ser estudadas. Assim, as perspectivas de geração de produtos inovadores a partir deste material são extremamente animadoras, ainda mais se ponderado com o emprego de diferentes estratégias de prospecção.

Agradecimentos

Esse projeto recebe financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq # 458548/2013-8) no âmbito do programa PROARQUIPÉLAGO, e na forma de um projeto temático da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP # 2015/17177-6). Os autores também agradecem suas bolsas de pesquisa das agências: CAPES, CNPQ e FUNCAP. Um especial agradecimento deve ser feito a Secretaria da Comissão Interministerial dos Recursos do Mar (SECIRM) que fornece todo o apoio às expedições científicas.

Referências Bibliográficas

- AZIZ, R. K.; BARTELS, D.; BEST, A. A.; DEJONGH, M.; DISZ, T.; EDWARDS, R. A.; FORMSMA, K.; GERDES, S.; GLASS, E. M.; KUBAL, M.; MEYER, F.; OLSEN, G. L.; OLSON, R.; OSTERMAN, A. L.; OVERBEEK, R. A.; MCNEIL, L. K. and *et al.* **The RAST Server: Rapid Annotations using Subsystems Technology**, *BMC Genomics*, 9(75). 2008.
- BANKEVICH, A.; NURK, S.; ANTIPOV, D.; GUREVICH, A. A.; DVORKIN, M.; KULIKOV, A. S.; LESIN, V. M.; NIKOLENKO, S. I.; PHAM, S.; PRJIBELSKI, A. D.; PYSHKIN, A. V.; SIROTKIN, A. V.; VYAHHI, N.; TESLER, G.; ALEKSEYEV, M. A. and PEVZNER, P. A. **SPAdes: A New Genome Assembly Algorithm and Its Applications to Single-Cell Sequencing**, *Journal of Computational Biology*, 19(5), 455–477. 2012.
- BENTLEY, S. D.; CHATER, K. F.; CERDEÑO-TÁRRAGA, A. M.; CHALLIS, G. L.; THOMSON, N. R.; JAMES, K. D.; HARRIS, D. E.; QUAIL, M. A.; KIESER, H.; HARPER, D.; BATEMAN, A.; BROWN, S.; CHANDRA, G.; CHEN, C. W.; COLLINS, M.; CRONIN, A. and *et al.* **Complete genome sequence of the model actinomycete *Streptomyces coelicolor* A3(2)**, *Nature*, 417(6885), 141–147. 2002.
- BLUNT, J.; MUNRO, M. and UPJOHN, M. **The Role of Databases in Marine Natural Products Research**, E. Fattorusso, W. H. Gerwick, O. Tagliatalata-Scafati (eds.), *Handbook of Marine Natural Products*, Springer Science+Business Media B.V. 2012.
- BROWN, J.H. **Why are there so many species in the tropics?**, *Journal of Biogeography*, 41(1), 8 – 22, 2014.
- CRUZ-MORALES, P.; KOPP, J. F.; MARTÍNEZ-GUERRERO, C.; YÁÑEZ-GUERRA, L. A.; SELEM-MOJICA, N.; RAMOS-ABOITES, H.; FELDMANN, J. and BARONA-GÓMEZ, F. **Phylogenomic Analysis of Natural Products Biosynthetic Gene Clusters Allows Discovery of Arseno-Organic Metabolites in Model Streptomyces**, *Genome Biology and Evolution*, 8(6), 1906–1916. 2016.
- CUEVAS, C. and FRANCESH, A. **Development of Yondelis (trabectedin, ET-743): a semisynthetic process solves the supply problem**, *Natural Products Reports*, 26 (3), 322 – 337, 2009.
- DYNEK, J.N. and VUCIC, D. **Antagonists of IAP proteins as cancer therapeutics**, *Cancer Letters*, 332(2), 206-214, 2013.
- FENICAL, W. and JENSEN, P.R. **Developing a new resource for drug discovery: marine actinomycete bacteria**, *Nature Chemical Biology*, 2(12), 666-673, 2006.
- FENICAL, W.; JENSEN, P.R.; PALLADINO, M.A.; LAM, K.S.; LLOYD, G.K. and POTTS, B.C. **Discovery and development of the anticancer agent salinosporamide A (NPI-0052)**, *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 17(6), 2175 – 2180, 2009.
- FERREIRA, E.G.; TORRES, M.C.M.; SILVA, A.B.; COLARES, L.L.F.; PIRES, K.; LOTUFO, T.M.C.; SILVEIRA, E.R.; PESSOA, O.D.L.; COSTA-LOTUFO, L.V. and JIMENEZ, P. C. **Prospecting anticancer compounds in actinomycetes recovered from the sediments of Saint Peter and Saint Paul's Archipelago, Brazil**, *Chemistry & Biodiversity* 13(9), 1149 – 1157, 2016.
- HOPWOOD, D. A. **Forty years of genetics with Streptomyces: from in vivo through in vitro to in silico**, *Microbiology*, 145(Pt9), 2183–2202. 1999.
- HU, D. X.; WITHALL, D. M.; CHALLIS, G. L. and THOMSON, R. J. **Structure, Chemical Synthesis, and Biosynthesis of Prodiginine Natural Products**, *Chemical Reviews*, 116(14), 7818–7853. 2016.
- IKEDA, H.; ISHIKAWA, J.; HANAMOTO, A.; SHINOSE, M.; KIKUCHI, H.; SHIBA, T.; SAKAKI, Y.; HATTORI, M. and ÔMURA, S. **Complete genome sequence and comparative analysis of the industrial microorganism *Streptomyces avermitilis***, *Nature Biotechnology*, 21(5), 526–531. 2003.
- IMHOFF, J. F.; LABES, A. and WIESE, J. **Bio-mining the microbial treasures of the ocean: New natural products**, *Biotechnology Advances*, 29(5): 468 – 482, 2011.

KANG, M.J.; WU, T.; WIJERATNE, E.M.; LAU, E.C.; MASON, D.J.; MESA, C.; TILLOTSON, J.; ZHANG, D.D.; GUNATILAKA, A.A.; LA CLAIR, J.J. and CHAPMAN, E. **Functional chromatography reveals three natural products that target the same protein with distinct mechanisms of action**, *ChemBiochem*, 15(14): 2125-2131, 2014.

KOEHN, F.E. and CARTER, G.T. **The evolving role of natural products in drug Discovery**, *Nature Reviews on Drug Discovery*, 4(3), 206-220, 2005.

LA CLAIR, J.J. and RODRÍGUEZ, A.D. **Isolation of β -galactosphingolipid coniferoside using a tumor cell proteome reverse affinity protocol**, *Bioorganic and Medicinal Chemistry*, 19(22): 6645-6653, 2011.

LAU, E.C.; MASON, D.J.; EICHHORST, N.; ENGELDER, P.; MESA, C. WIJERATNE, E.M.K.; GUNATHERATH, G.M.K.B.; GUNATILAKA, A.A.L.; LA CLAIR, J.J. and CHAPMAN, E. **Functional chromatographic technique for natural product isolation**, *Organic & Biomolecular Chemistry*, 13(8): 2255-2259, 2015.

LEAO, T.; CASTELÃO, G.; KOROBAYNIKOV, A.; MONROE, E. A.; PODELL, S.; GLUKHOV, E.; ALLEN, E. E.; GERWICK, W. H. and GERWICK, L. **Comparative genomics uncovers the prolific and distinctive metabolic potential of the cyanobacterial genus *Moorea***, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(12), 3198-3203. 2017.

LEAR, M.J.; SIMON, O.; FOLEY, T.L.; BURKART, M.D.; BAIGA, T.J.; NOEL, J.P.; DIPASQUALE, A.G.; RHEINGOLD, A.L. and LA CLAIR, J.J. **Laetirobin from the parasitic growth of *Laetiporus sulphureus* on *Robinia pseudoacacia***, *Journal of Natural Products*, 72(11), 1980-1987, 2009.

LOPANIK, N.B. **Chemical defensive symbioses in the marine environment**, *Functional Ecology*, 28(2), 328 - 340, 2014.

MANNION, P.D.; UPCHURCH, P.; BENSON, R.B.J. and GOSWAMI, A. **The latitudinal biodiversity gradient through deep time**, *Trends in Ecology & Evolution*, 29(1), 42 - 50, 2014.

MEDEMA, M. H.; KOTTMANN, R.; YILMAZ, P.; CUMMINGS, M.; BIGGINS, J. B.; BLIN, K.; BRUIJN, I.; CHOOI, Y. H.; CLAESSEN, J.; COATES, R. C.; CRUZ-MORALES, P.; DUDELA, S.; DÜSTERHUS, S.; EDWARDS, D. J.; FEWER, D. P.; GARG, N. and *et al.* **Minimum Information about a Biosynthetic Gene cluster**, *Nature Chemical Biology*, 11, 625-631. 2015.

MOLES, A.T. and OLLERTON, J. **Is the notion that species interactions are stronger and more specialized in the tropics a zombie idea?** *Biotropica*, 48(2), 141 - 145, 2016.

MOSMANN, T. **Rapid colorimetric assay for cellular growth and survival: application to proliferation and cytotoxicity assays**. *Journal of Immunological Methods* 65(1-2), 55 - 63, 1983.

ŌMURA, S.; IKEDA, H.; ISHIKAWA, J.; HANAMOTO, A.; TAKAHASHI, C.; SHINOSE, M.; TAKAHASHI, Y.; HORIKAWA, H.; NAKAZAWA, H.; OSONOE, T.; KIKUCHI, H.; SHIBA, T.; SAKAKI, Y. and HATTORI, M. **Genome sequence of an industrial microorganism *Streptomyces avermitilis*: deducing the ability of producing secondary metabolites**, *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 98(21), 12215-12220. 2001.

SCHEMSKE, D.W.; MITTELBACH, G. G.; CORNELL, H.V.; SOBEL, J.M. and ROY, K. **Is there a latitudinal gradient in the importance of biotic interactions?** *Annual Review of Ecology, Evolution & Systematics*, 40, 245 - 269, 2009.

SCHOFIELD, M.M.; JAIN, S.; PORAT, D., DICK, G.J. and SHERMAN, D.H. **Identification and analysis of the bacterial endosymbiont specialized for production of the chemotherapeutic natural product ET-743**. *Environmental Microbiology*, 17(10), 3964 - 3975, 2015.

SILVA, A.E.T.; GUIMARÃES, L.A.; FERREIRA, E.G.; TORRES, M.C.M.; SILVA, A.B.; BRANCO, P.C.; OLIVEIRA, F.A.S. SILVA; G.G.Z.; WILKE, D.V.; SILVEIRA, E.R.; PESSOA, O.D.L.; JIMENEZ, P.C.; and COSTA-LOTUFO, L.V. **Bioprospecting anticancer compounds from the marine-derived actinobacteria *Actinomadura* sp. collected at the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (Brazil)**, *Journal of the Brazilian Chemical Society*, 28(3), 465-474, 2017.

SNELGROVE, P. **An ocean of discovery: biodiversity beyond the Census of Marine Life**, *Planta Medica*, 82(09/10), 790-799, 2016.

WEBER, T.; BLIN, K.; DUDELA, S.; KRUG D.; KIM, H. U.; BRUCCOLERI, R.; LEE, S. Y.; FISCHBACH, M. A.; MÜLLER, R.; WOHLLEBEN, W.; BREITLING, R.; TAKANO, E. and MEDEMA, M. H. **antiSMASH 3.0—a comprehensive resource for the genome mining of biosynthetic gene clusters**, *Nucleic Acids Research*, 43(W1), W237-243. 2015.

WILLIAMS, P.G. **Panning for chemical gold: marine bacteria as a source of new therapeutics**, *Trends in Biotechnology*, 27(1), 45-52, 2009.

Estrutura Populacional da Lagosta *Panulirus echinatus* no Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Françoise Dantas de Lima¹
Camila Aguirre Góes Rudorff¹
Helena Fagundes Bouth*
Allysson Pontes Pinheiro²
José Agripino Neto¹
Mauro Sergio Pinheiro Lima¹
Lorena Candice de Araújo Andrade³
Jorge Eduardo Lins Oliveira¹

06

Abstract

The predominant lobster species in the oceanic islands off northeast Brazilian coast (Rocas Atoll, Fernando de Noronha Archipelago, and Saint Peter and Saint Paul Archipelago) is the brown spiny lobster (*Panulirus echinatus* Smith, 1969), with nocturnal habits and inhabiting depths from 1 to 40 meters, mainly in waters less than 25 meters. Due to the increase of its market interest, insufficient scientific knowledge of the species, and a lack of fisheries legislation, it is extremely important to assess its bioecological information in order to guideline sustainable catches from such resource. For this study, the individuals were caught using cages called "covos", in the area of Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), which are very similar to those used by the commercial fleet of Rio Grande do Norte state. The findings show that the brown spiny lobster is the most abundant species of the Archipelago, with the catch per unit of effort (CPUE) of 6.58 Kg/covo/day, exhibiting higher catches than Rio Grande do Norte coast region. Considering the average length of first maturation (L50) for the species (13.5 mm), it was found that higher catches in the SPSPA were of individuals above this value. The average lengths were 192.1 mm and 177.3 mm TL, for males and females, respectively. Males were significantly more abundant than females for the majority of length classes. Taken into account seasonal period, the sexual rate was superior during raining season (5,3:1), in relation to dry season (3,6:1). On the other

hand, the biggest individuals, considering length and weight, occurred during the dry season. In general, according to this study, it was verified that lobster fishery in the SPSPA were mainly focused on adult individuals. However, control measures of fisheries effort and artefacts are necessary and must be implemented as management actions in order to guarantee sustainable catches for the brown spiny lobster in the SPSPA.

Introdução

Os estudos apontam a ocorrência de três espécies de lagosta no litoral do Brasil, a saber: *Panulirus argus* Latreille, 1804, denominada de lagosta vermelha, *Panulirus laevicauda* (Latreille, 1817), conhecida como lagosta verde, e *Panulirus echinatus* (Smith, 1869), como lagosta pintada (Izquierdo *et al.*, 2011).

As lagostas da família Palinuridae são conhecidas como lagostas espinhosas devido ao fato de possuírem espinhos no cefalotórax e nos segmentos basais do segundo par de antenas (PHILLIPS e KITAKA, 2000). Fazem parte de uma das pescarias mais rentáveis do mundo, sendo o Brasil o terceiro maior produtor mundial (FAO, 2010 e 2013). No Brasil, as capturas concentram-se

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte (jorgelins@ufrnet.br);

2 Universidade Regional do Cariri;

3 Fundação Universidade de Rondônia;

* in memoriam.

na Região Nordeste, onde se destaca o Estado do Ceará como o principal produtor, seguido pelo Rio Grande do Norte, onde esta atividade representa um dos mais importantes recursos econômicos da Região (IVO e PEREIRA, 1996; AMARAL *et al.*, 2008; LINS OLIVEIRA *et al.*, 2008; IBAMA, 2008; CUNHA *et al.*, 2014).

Devido principalmente à crescente demanda do mercado internacional e aos altos preços alcançados, este recurso pesqueiro vem sofrendo, nos últimos anos, um aumento considerável não somente do esforço de pesca, mas, sobretudo da pesca com artefatos não regulamentados, causando a diminuição significativa das capturas (BREEN, 1994; PINHEIRO e LINS OLIVEIRA, 2006; IBAMA, 2008). Apesar das medidas de manejo adotadas desde os anos 80, o estoque de lagostas do Nordeste do Brasil, ainda é considerado em sobrepesca (PHILLIPS, 2006; FONTELES-FILHO, 2007; IBAMA, 2008; IZQUERDO *et al.*, 2011; SILVA e FONTELES-FILHO, 2011; CUNHA *et al.*, 2014).

Estudos realizados no Arquipélago São Pedro e São Paulo (ASPSP) mostraram que dentre as três espécies mais capturadas comercialmente no nordeste do Brasil, a lagosta pintada (*Panulirus echinatus*) é a que atinge a maturidade sexual com o menor tamanho, possuindo também uma baixa fecundidade (PINHEIRO e LINS OLIVEIRA, 2006; PINHEIRO *et al.*, 2009). Em relação à dieta sabe-se que essa espécie é onívora, alimentando-se principalmente de peixes, crustáceos e algas (GÓES e LINS OLIVEIRA, 2009). Devido a crescente demanda do mercado, aliada ao fato dessa espécie ser ainda pouco conhecida cientificamente e ainda não haver legislação que regulamente sua captura, torna-se de fundamental importância o levantamento de informações biológicas que ajudem a promover uma exploração ordenada e sustentável deste recurso.

Dessa forma, os estudos realizados no ASPSP tiveram como objetivo principal caracterizar a dinâmica populacional da lagosta *Panulirus echinatus* (Figura 1), gerando dados que subsidiem a elaboração



Figura 1. A lagosta Pintada (*Panulirus echinatus*).
Figure 1. The brown spiny lobster (*Panulirus echinatus*).

de estratégias de regulamentação, manejo e conservação.

Área de Estudo

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo está localizado a cerca 1.100 quilômetros da costa do Rio Grande do Norte (Figura 2), sendo constituído por um grupo de pequenas ilhas, onde a maior possui dimensões de aproximadamente 100 x 150 m. As quatro maiores (Belmonte, São Paulo, São Pedro e Barão de Teffé) estão separadas entre si por estreitos canais que formam uma enseada em forma de ferradura, com dimensões médias de 100 m de comprimento, 50 m de largura e 6 m de profundidade. O relevo emerso do ASPSP é acidentado, e seu ponto culminante (18 m de altitude) situa-se na ilha São Pedro (OLIVEIRA *et al.*, 1997; PORTO, 2005).

No Arquipélago ocorrem duas estações climáticas distintas, uma chuvosa (janeiro-junho) e outra seca (julho-dezembro), e os valores de salinidade na região variam entre 33‰ e 36‰ (MACEDO, *et al.*, 2008). O ASPSP está inserido no Sistema Equatorial de Correntes, sofrendo a influência direta da Corrente Sul-Equatorial e da Corrente Equatorial Submersa (PORTO, 2005).

Material e Métodos

Coleta de dados

As lagostas da espécie *P. echinatus* foram capturadas no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, durante o período noturno, em profundidades que variaram entre 10 e 40 metros, utilizando-se armadilhas denominadas "covos", durante as



Figura 2. Ilhas que compõem o Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Figure 2. The islands that form Saint Peter and Saint Paul Archipelago.

estações seca e chuvosa dos anos de 2008 a 2010. Todos os indivíduos capturados foram medidos (comprimento total – CT mm), e determinado o sexo através da visualização dos caracteres morfológicos externos (pleópodos presentes no abdômen da fêmea e ausente em machos). O peso total (PT) foi determinado a partir do CT, utilizando-se as equações CT (machos: $PT = 0.0251 CT^3,1779$ e fêmeas: $PT = 0.0404 CT^2,9649$, propostas por Pinheiro *et al.* (2006). Machos e fêmeas foram agrupados em classes de tamanho, com intervalos de 15 mm, e peso (intervalos de 50 g) para análise de estrutura da população. Para análise de abundância populacional, considerou-se a captura por unidade de esforço (CPUE - Kg/covo/dia).

Estatística

Os testes estatísticos ANOVA one-way, ANOVA fatorial e ANCOVA foram realizados para análise dos parâmetros populacionais e suas relações com as variáveis sazonais. O teste de Tukey HSD foi utilizado para avaliações *a posteriori*. Para verificar

as diferenças significativas em relação à razão sexual foi utilizado o método Qui-quadrado. Os programas utilizados para desenvolver as análises estatísticas foram Statistica 7.0, Systat 12 e BioEstat 5.0.

Resultados

Estrutura populacional

Foram capturadas 2.287 lagostas, das quais 1.815 machos e 472 fêmeas. O comprimento total (CT) dos indivíduos variou de 135 a 250mm para os machos e de 125 e 220mm para fêmeas. Os machos estão presentes em todas as classes de tamanho e predominaram nas classes que variam de 180 a 225 mm. Já a população de fêmeas está mais concentrada entre as classes 165 e 195mm (Figura 3).

O peso mínimo encontrado para os machos foi de 98,1 g e o máximo de 695,3 g, enquanto para as fêmeas o peso variou de 72,2 a 385,9 g.

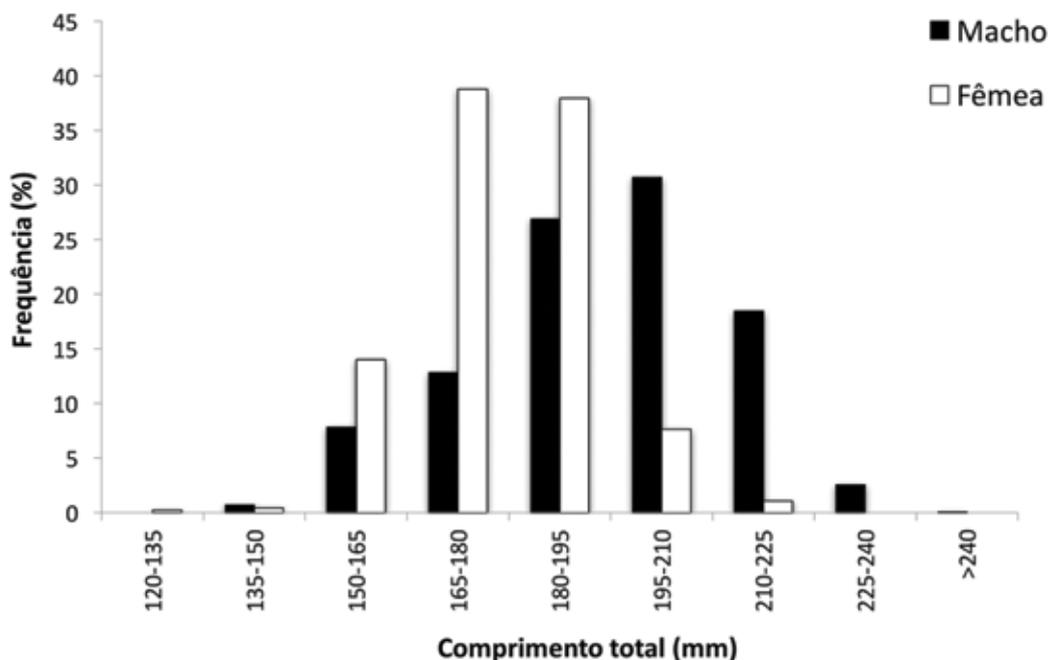


Figura 3. Distribuição de fêmeas e machos de *Panulirus echinatus* em classes de tamanho (mm).

Figure 3. Distribution of females and males of *Panulirus echinatus* in size classes (mm).

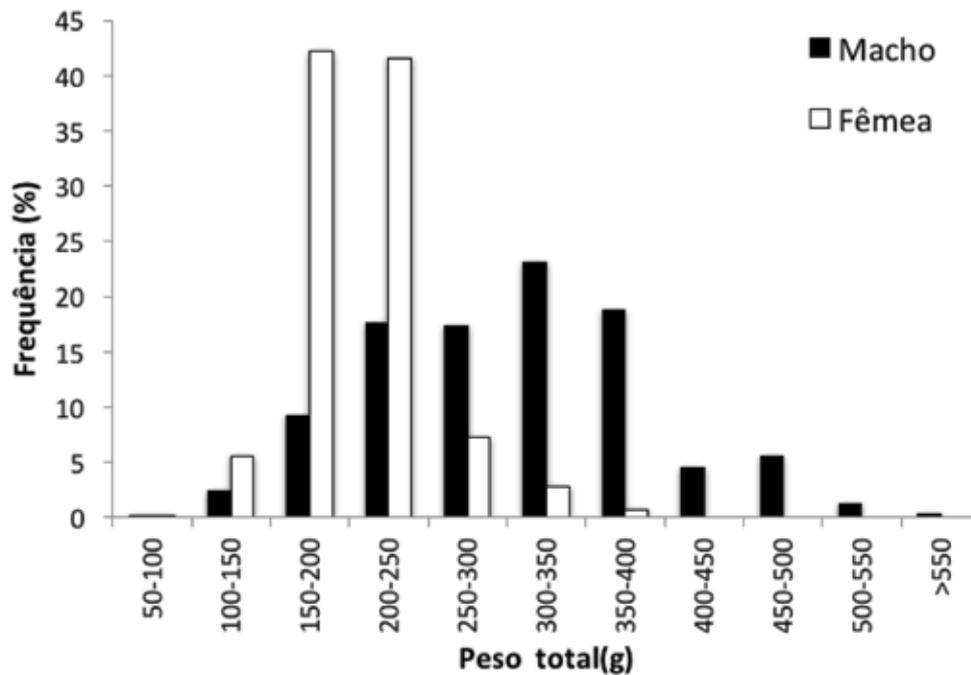


Figura 4. Distribuição de fêmeas e machos de *Panulirus echinatus* em classes de peso (g).

Figure 4. Distribution of females and males of *Panulirus echinatus* in weight classes (g).

Os machos apresentaram-se mais homogeneamente distribuídos entre as classes de peso intermediárias, enquanto as fêmeas estavam mais concentradas entre as classes 150,0 e 250,0 g (Figura 4).

Os machos mostraram-se significativamente maiores que as fêmeas, apresentando uma média de 192,1 mm de CT, enquanto as fêmeas apresentaram um tamanho médio de 177,3 mm ($F = 272,00$; $df = 1$; $p = 0,00$). O comprimento médio registrado para a estação chuvosa não diferiu significativamente da estação seca ($F = 0,45$; $df = 1$; $p = 0,50$). Entretanto, houve diferenças significativas em relação ao tamanho dos indivíduos, considerando-se as estações e os anos ($F = 13,54$; $df = 3$; $p = 0,00$) (Figura 5).

O peso médio (310,2 g) registrado para os machos de *P. echinatus* foi significativamente maior que a média encontrada para as fêmeas (206,7 g - $F = 593,41$; $df = 1$; $p = 0,00$). Entre as estações seca e chuvosa, o peso não diferiu significativamente (F

= 0,84; $df = 1$; $p = 0,36$), porém entre as estações e os anos observa-se uma diferença significativa ($F = 14,64$; $df = 3$; $p = 0,00$) (Figura 6).

Captura por Unidade de Esforço (CPUE) e razão sexual

A CPUE média, considerando todas as capturas, foi de 6,6 Kg/covo/dia. Por outro lado, quando considerado os anos de coleta separadamente, foi observado que a abundância medida através de valores da CPUE não mostra diferenças significativas ($F = 2,82$; $gl = 2$; $p = 0,09$). Porém, entre os anos e estações seca e chuvosa, os índices de captura de lagostas foram diferentes ($F = 10,44$; $gl = 3$; $p = 0,000$). O valor médio da CPUE na estação seca foi de 7,9 Kg/covo/dia sendo significativamente superior ao da estação chuvosa ($F = 6,09$; $gl = 1$; $p = 0,01$), que atingiu um valor médio de 3,6 Kg/covo/dia (Figura 6). O maior valor de CPUE foi registrado na estação seca do ano 2008 (5,1 kg/covo/dia), e o menor na estação chuvosa de 2008 (1,1 kg/covo/dia).

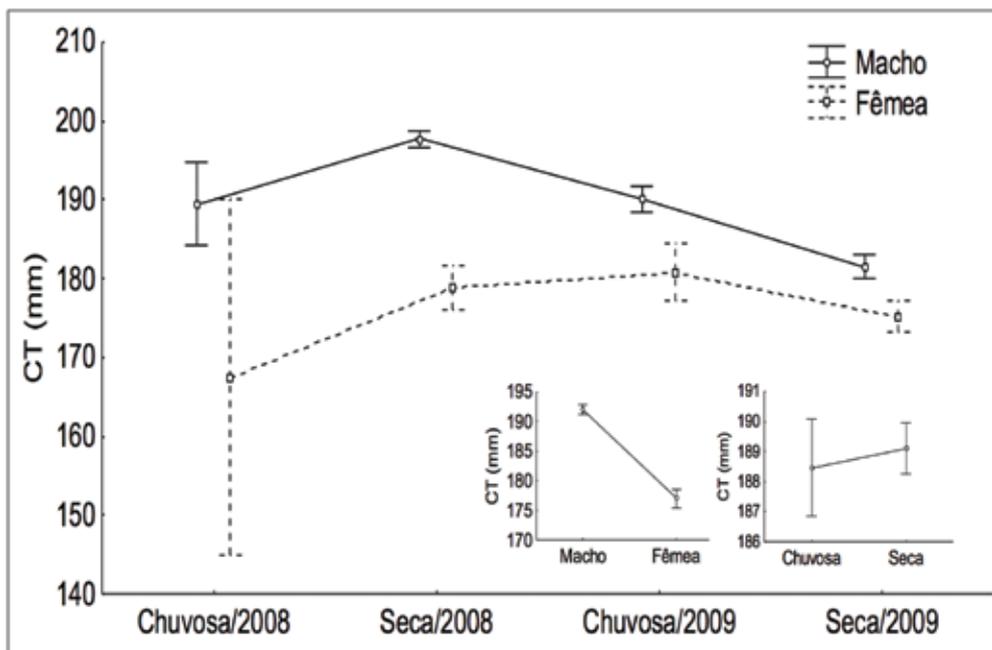


Figura 5. Média e intervalo de confiança (barras verticais) do comprimento total para machos e fêmeas de *Panulirus echinatus* nas estações seca e chuvosa dos anos 2008 e 2009.

Figure 5. Total length mean and confidence intervals (vertical bars) for males and females of *Panulirus echinatus* in the dry and rainy seasons in 2008 and 2009 years.

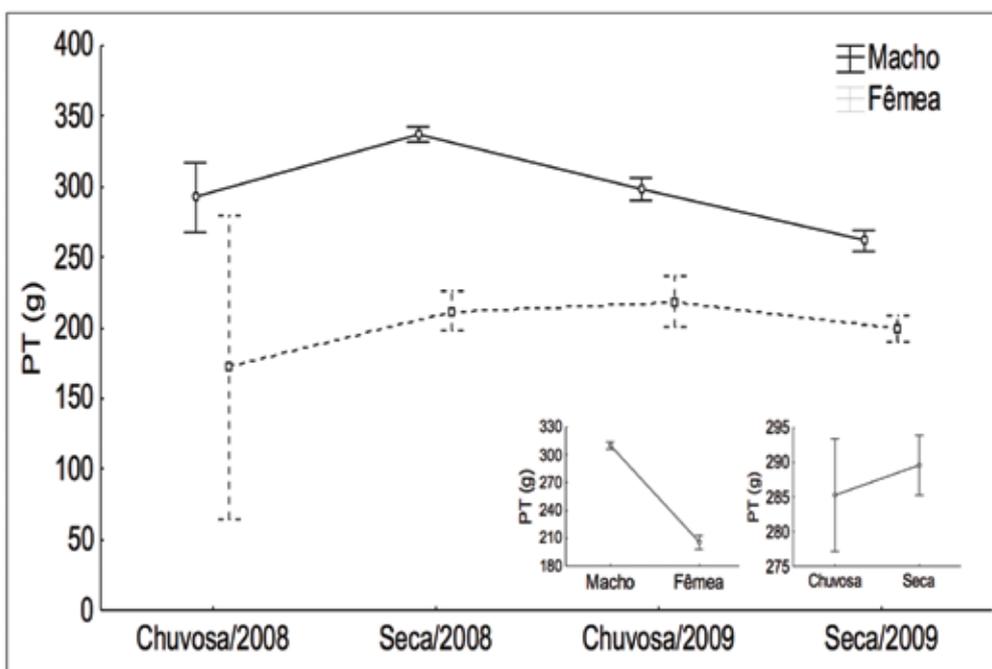


Figura 6. Médias e intervalos de confiança (barras verticais) do peso total para machos e fêmeas de *Panulirus echinatus* nas estações seca e chuvosa, durante os anos de 2008 e 2009.

Figure 6. Total weight mean and confidence intervals (vertical bars) for males and females of *Panulirus echinatus* in the dry and rainy seasons in 2008 and 2009 years.

Verificou-se também que os machos de *Panulirus echinatus* são mais abundantes e capturados mais frequentemente, atingindo valores médios de CPUE significativamente maiores do que as fêmeas (machos = 5,4 Kg/covo/dia e fêmeas = 1,9 Kg/covo/dia) ($F = 36,92$; $gl = 1$; $p = 0,00$). A maior CPUE registrada para machos ocorreu na estação seca de 2008 (9,6 Kg/covo/dia) e para fêmeas na estação seca de 2009 (2,2 Kg/covo/dia). Os menores valores de CPUE para machos e fêmeas, respectivamente 2,2

Kg/covo/dia e 0,1 Kg/covo/dia, foram encontrados no período chuvoso de 2008 (Figura 7).

Agrupando-se os indivíduos capturados por ano, sexo e estação climática, observou-se que para todas as capturas realizadas, o número de machos foi significativamente superior ao de fêmeas. Em relação à sazonalidade, foi verificado que na estação chuvosa a razão sexual se apresentou superior à estação seca (Tabela I).

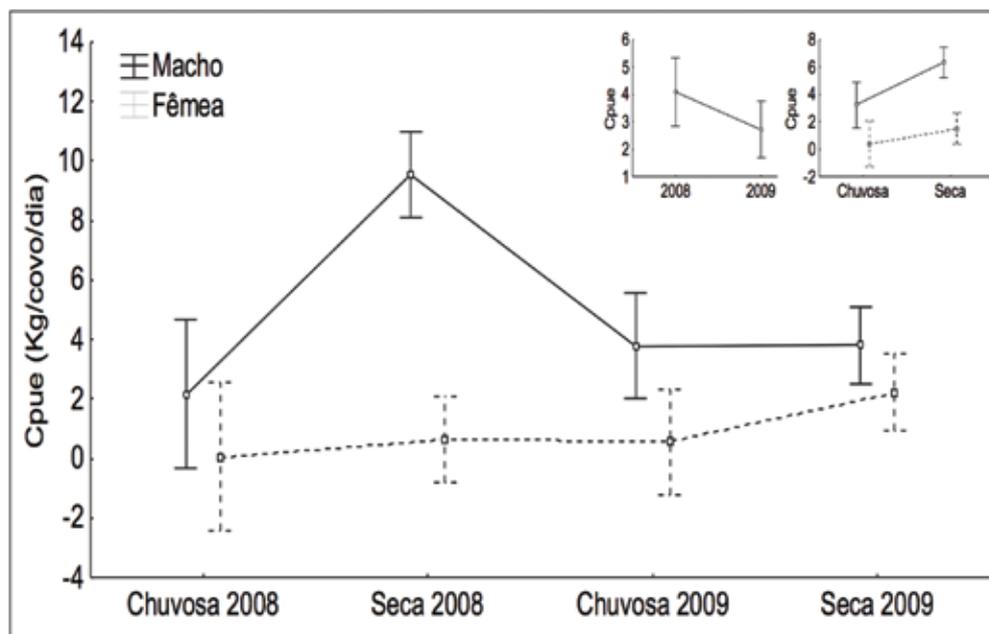


Figura 7. Captura Média por Unidade de Esforço (CPUE) para machos e fêmeas de *Panulirus echinatus* capturados no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, nas estações seca e chuvosa, durante o período de 2008 a 2009.

Figure 7. Capture per Unit of Effort (CPUE) mean for males and females of *Panulirus echinatus* captured in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, during the dry and rainy seasons in 2008 to 2009 years.

Tabela I. Frequência absoluta de machos e fêmeas, razão sexual e valores do teste Qui-quadrado (χ^2), de *Panulirus echinatus* capturadas durante as estações seca e chuvosa dos anos de 2008 e 2009, no Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Table I. Absolute frequency of males and females, sex ratio and Chi-square test (χ^2) of *Panulirus echinatus* collected during the dry and rainy seasons in 2008 and 2009 years.

Estação	Machos	Fêmeas	χ^2 teste	p valor	Razão sexual
Chuvosa/2008	37	3	72.25	< 0.0001	12.3:1
Seca/2008	962	122	60.06	< 0.0001	7.9:1
Chuvosa/2009	380	76	44.43	< 0.0001	5.0:1
Seca/2009	436	271	5.45	0.019	1.6:1

Com relação ao comprimento dos indivíduos, observou-se que os machos foram significativamente mais abundantes que as fêmeas na maioria das classes de comprimento, exceto na classe de 165 a 180 mm e de 120 a 135 mm, na quais predominaram as fêmeas (Tabela II).

Com relação ao peso dos indivíduos capturados, verificou-se uma predominância de machos (Tabela III) na maioria das classes de peso, exceto na classe de 150 a 200 g, na qual predominaram as fêmeas.

Tabela II. Frequência absoluta de machos e fêmeas e valores do teste Qui-quadrado (χ^2) por classe de tamanho, de lagostas *Panulirus echinatus* capturadas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, durante o período de 2008 a 2009.
Table II. Absolute frequency of males and females and Chi-square test (χ^2) per size class of *Panulirus echinatus* lobsters captured in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago during 2008 and 2009.

Classes de comprimentos (mm)	Machos	Fêmeas	Total	χ^2 teste	p valor
120-135	0	1	1	100	< 0.0001
135-150	13	2	15	53.79	< 0.0001
150-165	142	66	208	13.35	0.0003
165-180	233	183	416	1.45	0.2294
180-195	488	179	667	21.45	< 0.0001
195-210	557	36	593	77.19	< 0.0001
210-225	335	5	340	94.21	< 0.0001
225-240	46	0	46	100	< 0.0001
>240	1	0	1	100	< 0.0001

Tabela III. Frequência absoluta de machos e fêmeas e valores do teste Qui-quadrado (χ^2) por classes de peso (g), de lagostas *Panulirus echinatus* capturadas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, durante o período de 2008 a 2009.
Table III. Absolute frequency of males and females and chi-square test (χ^2) per weight class of *Panulirus echinatus* lobsters captured in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago during 2008 and 2009.

Classes de peso (g)	Macho	Fêmea	Total	χ^2 teste	p valor
50-100	1	1	2	0.00	1,000
100-150	43	26	69	6.07	0.0134
150-200	168	199	367	0.71	0.3987
200-250	320	196	516	5.79	0.0162
250-300	314	34	348	65.74	< 0.0001
300-350	420	13	433	88.36	< 0.0001
350-400	340	3	343	96.55	< 0.0001
400-450	81	0	81	100	< 0.0001
450-500	100	0	100	100	< 0.0001
500-550	23	0	23	100	< 0.0001
>550	5	0	5	100	< 0.0001

Discussão

Considerando-se o comprimento médio de primeira maturação sexual ($L_{50} = 135,0$ mm CT) para a espécie proposto por Pinheiro e Lins Oliveira (2006), constata-se que a quase totalidade das lagostas capturadas no ASPSP estava acima deste comprimento mínimo. Este fato permite inferir que o esforço de pesca no Arquipélago de São Pedro e São Paulo está sendo exercido sobre a parcela de indivíduos adultos do estoque, preservando-se portanto, os indivíduos juvenis, que ainda não compõe o estoque reprodutor. É importante considerar que o apetrecho de captura utilizado durante o estudo realizado, é idêntico aos utilizados pelas embarcações lagosteiras que operam no Estado do Rio Grande do Norte.

O comprimento máximo de *P. echinatus* registrado no ASPSP de 250 mm e o peso de 834,5 g, são consideravelmente superiores às medidas registradas em regiões continentais, onde a pescaria de lagostas é mais intensa. No Estado da Paraíba, Oliveira (2008) encontrou comprimento e peso total máximo para a espécie de 200,0 mm e 289,7 g, respectivamente, enquanto Barreto *et al.* (2009), em Tamandaré - PE, registraram um comprimento máximo de 206,4 mm LT. Já na reserva biológica de proteção integral do Atol das Rocas, Silva *et al.* (2001) citam a ocorrência de *P. echinatus* de até 257,0 mm LT, o que evidencia a importância de se proteger e manejar as áreas de ocorrência dessa espécie, permitindo a existência de condições favoráveis para o seu pleno desenvolvimento.

Constatou-se que os machos de *P. echinatus* capturados no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, atingem tamanhos e pesos significativamente maiores que as fêmeas. Segundo Kanciruk (1980), este crescimento diferencial resulta das diversas formas de alocação de energia entre os sexos das lagostas da família Palinuridae, principalmente após a maturação. Phillips (1980), cita que os machos normalmente direcionam mais

energia para o crescimento somático, enquanto as fêmeas aumentam sua demanda metabólica para desenvolver e manter os processos reprodutivos, como a produção e maturação dos ovos, diminuindo, dessa forma, suas taxas de crescimento corporal. Por esse motivo, segundo o autor, as fêmeas são mais frequentes nas menores classes de tamanho e peso.

Embora diversos estudos corroborem esses resultados, autores como Ivo e Pereira (1996), Tuck *et al.* (1997), Pinheiro (2000) e Pinheiro *et al.* (2009), destacam ainda que os valores das taxas de crescimento e o tamanho máximo dos indivíduos podem ser influenciados por fatores bióticos e abióticos peculiares de cada região, tais como temperatura, disponibilidade de alimentos, predação, competição e a pressão pesqueira. A exemplo disso, Silva *et al.* (2001), citam que na reserva biológica de proteção integral do Atol das Rocas, não existem diferenças significativas nos tamanhos entre machos e fêmeas. Já Guzman *et al.* (2008), em estudos realizados no Parque Nacional Coiba, no Panamá, com a espécie *Panulirus gracilis*, citam que as fêmeas desta região são significativamente maiores que os machos.

Em relação à CPUE, observou-se que o valor médio (6,6 Kg/covo/dia), pode ser considerado alto em relação às capturas de lagostas registradas para o litoral brasileiro. Fonteles-Filho (1997) registrou uma média de 0,373 Kg/covo/dia para a região Norte-Nordeste do Brasil, enquanto Vasconcelos *et al.* (1994) encontrou uma média de 0,193 Kg/covo/dia para a pesca de *Panulirus argus* e *P. laevicauda* no Rio Grande do Norte, e de 0,024 e 0,119 Kg/covo/dia de pesca para Pernambuco em 2011 (OLIVEIRA *et al.*, 2015). Pode-se inferir que um dos principais fatores que explicam os altos índices de CPUE encontrados no ASPSP se deve principalmente ao difícil acesso de embarcações, não havendo portanto, ao contrário do que se observa na região continental, um intenso esforço

de pesca. É importante destacar que o Arquipélago de São Pedro e São Paulo compõe desde 1986, em conjunto com o Atol das Rocas e o Arquipélago de Fernando de Noronha, uma Área de Proteção Ambiental - APA (Decreto no 92.755, de 05 de junho de 1986).

Na estação seca foram registrados os maiores valores de CPUE, sendo consideravelmente superiores aos encontrados na estação chuvosa. No primeiro semestre do ano, caracterizado por apresentar os maiores índices pluviométricos, são encontradas maiores concentrações de carbonato de cálcio na água (BORZONE *et al.*, 1999), um composto essencial para a formação do exoesqueleto dos crustáceos durante o processo de ecdise. Segundo Cobb e Phillips (1980), devido à alta vulnerabilidade das lagostas durante o processo de muda, elas migram para regiões mais profundas a fim de se protegerem, evitando a predação e, consequentemente, diminuindo as chances de serem capturadas pelas armadilhas de pesca.

A razão sexual (1,3:1) encontrada por Pinheiro *et al.* (2003) para a população de *P. echinatus* do ASPSP nos anos de 1998 e 1999 foi significativamente inferior ao resultado encontrado no presente estudo, realizado 10 anos depois. Considerando que a maioria das lagostas coletadas no ASPSP estava acima do comprimento médio de primeira maturação sexual (L50 = 13,5 mm LT), Skud (1969) afirma que é realmente esperada uma alta proporção de machos. Este autor propõe que as fêmeas, particularmente as imaturas, são mais abundantes nas menores classes, enquanto os machos são mais frequentes nas classes superiores. Isso está relacionado ao processo de ecdise, no qual as fêmeas fazem a muda com menos frequência do que os machos, permanecendo um período de tempo maior em tamanhos menores, enquanto os machos prosseguem com o crescimento realizando várias ecdises (GOÑI *et al.*, 2003). Além disso, segundo Kanciruk (1980), para lagostas, a diferença nos

índices de captura entre machos e fêmeas pode estar relacionada ao comportamento reprodutivo diferenciado entre os sexos. Neste sentido, Hartnoll e Gould (1988) citam que as fêmeas carregam seus ovos aderidos aos pleópodos e durante o período reprodutivo se escondem em locais mais profundos para se protegerem de predadores, diminuindo seu tempo de forrageamento. Neste período os machos, que são forrageadores mais ativos e constantes, se tornam mais susceptíveis a serem capturados.

A elevada proporção de machos foi observada em todas as capturas, o que também foi registrado por Barreto *et al.* (2003) para a população de *P. echinatus* nos recifes costeiros de Tamandaré - PE. Entretanto, a estação chuvosa apresentou uma maior razão de machos em relação às fêmeas quando comparada a estação seca, resultado semelhante ao encontrado por Oliveira (2008). No ASPSP, a estação chuvosa (de janeiro a junho) coincide com o período de maior atividade reprodutiva das lagostas (PINHEIRO, 2000; PINHEIRO *et al.*, 2009). É possível inferir, como citado por Cobb e Phillips (1980) e Ivo e Pereira (1996), que as fêmeas se deslocam para regiões mais escondidas e protegidas, diminuindo suas taxas de captura pela pesca em áreas mais rasas. Essas diferenças na proporção podem também ser resultado da interação de diversos fatores, dentre eles, aumento da pressão de pesca (PINHEIRO e LINS OLIVEIRA, 2006), fatores ambientais (OLIVEIRA, 2008; PINHEIRO, 2000) e migração reprodutiva (COBB e PHILLIPS, 1980; IVO e PEREIRA, 1996). Por fim, Morgan (1980) destaca que se deve também considerar que a estimativa da razão sexual para uma população de lagostas capturadas através de armadilhas de pesca pode ser distorcida devido às intensas mudanças comportamentais relacionadas às variações sazonais nos processos de ecdise e reprodução. Essas mudanças influenciam os padrões de migração e alimentação o que tem um efeito direto no aumento ou redução dos índices de capturas.

De uma forma geral, os resultados obtidos indicam que a pesca de lagostas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo incide sobre o estoque adulto e que o significativo comprimento dos indivíduos capturados e os altos valores de CPUE observados, pode ser considerados indícios de que o estoque encontra-se em equilíbrio, entretanto, estudos complementares onde se considerem séries temporais de dados de captura mais extensas, são necessárias para que se possa ter uma maior clareza sobre o estado atual do estoque. Pelo fato da espécie *Panulirus echinatus* ser pouco conhecida cientificamente e ter sua distribuição restrita ao Atlântico Sul, principalmente em ilhas oceânicas, e que ainda não há legislação que regulamente sua captura, é fundamental que, a partir dos resultados obtidos, medidas tais como: comprimento mínimo de captura e de controle do esforço e artes de pesca, devam ser implementadas como medidas de gestão pesqueira, de forma a permitir a sustentabilidade do estoque.

Agradecimentos

Esse projeto recebeu financiamento do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), no âmbito do Programa PROARQUIPELAGO. Um especial agradecimento a Secretaria da Comissão Interministerial dos Recursos do Mar (SECIRM) – Marinha do Brasil, pelo apoio às expedições científicas. Agradecemos também aos pescadores da empresa Transmar por nos auxiliar nas capturas e medições dos espécimes utilizados nesse estudo.

Referências Bibliográficas

- BREEN, P. A. **Population Dynamics and Stock Assessment of Lobsters: A Review.** *Crustaceana*, 67: 239-255. 1994.
- COBB, J.S., PHILLIPS, B.F. **The Biology and Management of Lobsters: Ecology and management.** Academic Press, 1980 - 390 p. 1980.
- COELHO, P. A., LINS OLIVEIRA, J. E. **Estágios Mais Avançados de *Panulirus Echinatus* Smith, 1969 (Decapoda, Palinuridae).** *Boletim Técnico-Científico do CEPENE (IBAMA)*, 3:49-55, Tamandaré – Pernambuco. 1995.
- CUNHA, V. L.; SILVA, A. C.; FONTELES, A. A. **Características e dinâmica das pescarias de lagosta no nordeste do Brasil.** *Arquivos de Ciências do Mar* 47:5-18.
- FAO, 2010. **El Estado Mundial de la Pesca y la Acuicultura**, Roma, FAO. 219p. 2010.
- FAO, 2013. **STATISTICAL YEARBOOK World Food and Agriculture**, Rome, FAO, 289 p. 2014
- FONTELES - FILHO, A. A. **Síntese sobre a lagosta vermelha (*Panulirus argus*) e a lagosta-verde (*Panulirus laevicauda*) do nordeste do Brasil.** In: HAIMOVICI, M. **A prospecção pesqueira e abundância de estoques marinhos no Brasil nas décadas de 1960 a 1990: Levantamento de dados de avaliação crítica.** Brasília: MMA/SMCQA, p. 257-265. 2007
- GÓES, C. A., CARVALHO, M., **Análise da Distribuição de Larvas de Lagostas (CRUSTACEA: DECAPODA: PALINURIDAE) na Costa do Nordeste do Brasil Utilizando Sistema de Informações Geográficas.** Anais XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Goiânia. 2195-2202. 2005.
- GÓES, C. A., **Análise da Dispersão de Larvas de Lagostas no Atlântico Tropical a partir de Correntes Geostroóficas Superficiais Derivadas por Satélites.** Dissertação de Mestrado. Instituto de Pesquisas Espaciais. São José dos Campos. 2006.
- GOÑI, R., A. QUETGLAS, and REÑONES. O. **Differential catchability of male and female European spiny lobster *Palinurus elephas* (Fabricius, 1787) in traps and trammelnets.** *Fisheries Research* 65: 295-307. 2003.
- IBAMA - Instituto Brasileiro Do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. - **Plano de gestão para o uso sustentável de lagosta no Brasil: *Panulirus argus* (Latreille, 1804) e *Panulirus laevicauda* (Latreille, 1817).** Brasília: IBAMA. 121p. 2008.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE (ICMBio), **Plano de Manejo da Área de Proteção Ambiental (APA) de Fernando de Noronha – Rocas – São Pedro e São Paulo, Unidade de Conservação (UC)**. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 156 p. 2017.

IVO, C.T.C., PEREIRA, J. A. **Sinopse das principais observações sobre as lagostas *Panulirus argus* (Latreille) e *Panulirus laevicauda* (Latreille) capturadas em águas costeiras do Brasil, entre os estados do Amapá e do Espírito Santo. Bol. Tec. Cient. CEPENE**, Tamandaré, v. 4, n. 1, p. 7-94. 1996.

IZQUIERDO, R.C; Lima R. N. MARINHO, R.A.; JUARES COELHO BARROSO, J. E.; HOLANDA, J. S.; FÉLIX, C. de S.; MARTINS, M. E de O; SANTOS, F. S.; SILVA, K. C. A.; NETO, M. A. de A. F. **Metodologias de amostragem para avaliação das populações de lagosta: plataforma continental do Brasil**. Fortaleza :UFC/LABOMAR / NAVE;UH/ CIM. 142p. 2011.

KANCIRUK, P. **Ecology of juvenile and adult Palinuridae (spiny lobster)**. In: **Cobb, J. S., Phillips, B. F. The biology and management of lobster**. New York: Academic Press, v.2 : Ecology and management, 59-96. 1980.

LINS OLIVEIRA, J.E., VASCONCELOS, J.A., REY, H. 1993. **Problemática da pesca de lagostas no nordeste do Brasil. B. Técn. Cient. CEPENE**, Rio Formoso 1 (1): 187-210.

LINS OLIVEIRA, J. E., VASCONCELOS, J. A., CUNHA, K. M. F., **Aspectos Legais da Captura de Lagostas no Nordeste do Brasil. In: VII COLACMAR - Congresso Latino-Americano sobre Ciências do Mar**, 2:83-85, Anais do VII COLACMAR (resumos expandidos), Santos - São Paulo. 1997.

OLIVEIRA, V. S.; ANDRADE, H. A.; HAZIN, F. H. V.; CANDEIAS, A. **Pesca da lagosta com covos na costa central de Pernambuco: Taxas de captura da lagosta e fauna acompanhante. Boletim do Instituto de Pesca** 41:373-385. 2015.

PHILLIPS, B. F., KITTAKA, J. 2000. **Spiny lobsters: fisheries and culture. Fishing News Books**. 679 p.

PHILLIPS, B.F. B.F. **Lobsters: biology, management, aquaculture and fisheries. Wiley-Blackwell**. 506 p. 2006.

PINHEIRO, A. P. **Estrutura populacional e aspectos reprodutivos da Lagosta Pintada *Panulirus echinatus* no Arquipélago de São Pedro e São Paulo - Brasil**. Monografia em Ciências Biológicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte. 2000.

PINHEIRO, A. P., FREIRE, F. A. M., LINS OLIVEIRA, J. E. **Population biology of *Panulirus echinatus*, Smith, 1869 (Decapoda: Paulinuridae) from São Pedro and São Paulo Archipelago, Northeastern Brazil. Náuplius**, 11:27-95. 2003.

PINHEIRO, A. P., LINS OLIVEIRA, J. E. **Reproductive Biology of *Panulirus echinatus* (Crustacea: Palinuridae) from São Pedro and São Paulo Archipelago, Brazil. Nauplius** 14(2): 89-97. 2006.

PINHEIRO, A. P. RUDORFF, C. A. G. LINS OLIVEIRA, J. E. **As Lagostas. In: Danielle de Lima Viana, Fabio Hissa Hazin, Marco Antonio Carvalho de Souza. (Org.). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo 10 anos de Estação Científica**. 1ed.Brasilia: v. 1 , p. 205-211. 2009.

SILVA, A. C.; FONTELES-FILHO, A. A. **Avaliação do defeso aplicado à pesca da lagosta no Nordeste do Brasil**. Fortaleza: Expressão Gráfica, 2011.

SILVA, M.B., CAMPOS, C.E.C., TARGINO, S.G., Melo, C.E.D.C.A. **Aspectos populacionais da lagosta pintada *Panulirus echinatus* Smith, 1869 na Reserva Biológica do Atol das Rocas, Brasil. Holos Environment**. 1(2): 187-198. 2001.

SKUD, B. E., **The effect of fishing on size composition and sex ratio of offshore lobster stock. Fiskeridirektoratets Skrifter Serie Havundersokelser** 15:295-399. 1969.

TUCK, I. D., CHAPMAN, C. J., ATKINSON, R. J. A. **Population biology of the Norway lobster, *Nephrops norvegicus* (L.) in the Firth of Clyde, Scotland – I: Growth and density. ICES Journal of Marine Science**, 54: 125–135. 1997.

YEUNG, C., MCGOWAN, M. F. **Differences in inshore-offshore phyllosoma and vertical distribution of larvae of *Panulirus*, *scyllarus* and *sillarides* in the Florida Keys in May June. 1989. Bull Mar Sci** 49: 699-714. 1999.

Carioevolução e aspectos da Filogeografia Insular de peixes do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Wagner Franco Molina¹
Karlla Danielle Amorim¹
Rodrigo Xavier Soares¹
Gideão Wagner Werneck Félix da Costa¹
Clóvis Coutinho da Motta Neto¹
Allyson Santos de Souza¹
Paulo Augusto de Lima Filho²

07

Abstract

The Saint Peter and Saint Paul's archipelago (SPSPA) represents an extreme distribution point for a set of fish species of the Western Atlantic. Effects of geographical isolation and endemism, demonstrate the action of particular evolutionary factors in this region, which are reflected in the divergence of genetic, cytogenetics and morphological patterns of its species/population. Cytogenetical information (conventional and cytogenomics) has substantially increased, covering a considerable parcel of species, including all the most abundant. Chromosomal evolution aspects of assorted groups, interpopulational levels of karyotype divergence, sexual chromosome systems, are among some of the best-known aspects. Phylogeographic and taxonomical aspects of some reef species, indicate genetic structuration with other islands and the Brazilian coast, as well as question the taxonomic status of endemic species. Divergences of the population morphological patterns with other oceanic regions reflect the occurrence of particular evolutionary factors in SPSPA. Biogeographic and taxonomical integrated contexts with other insular and continental regions have provided a broad vision, on the evolutionary processes present in the Brazilian oceanic islands.

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte. Departamento de Biologia Celular e Genética, Laboratório de Genética de Recursos Marinhos – LGRM (molinawf@yahoo.com.br);

2 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte – IFRN.

Multiabordagens na análise de padrões evolutivos em peixes do ASPSP

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo, remoto grupo de ilhas integrantes da região Meso-Atlântica, apresenta condições particularmente propícias ao estudo de processos evolutivos em suas espécies de peixes. Sua posição geográfica na região Meso-Atlântica constitui um ponto extremo de distribuição de espécies do Atlântico Ocidental (FERREIRA *et al.*, 2004) e área de passagem e atração para diversas espécies pelágicas (LESSA e VASKE-JR., 2009). A diversidade de espécies no Arquipélago São Pedro e São Paulo é bastante baixa, quando comparada com outros atóis e ilhas, revelando a presença de razoável grau de endemismos (FEITOZA *et al.*, 2003; VASKE JR. *et al.*, 2005; FLOETER *et al.*, 2008; CARVALHO-FILHO *et al.*, 2016).

Entre todos os ambientes marinhos, as ilhas oceânicas possibilitam as melhores condições para a análise dos processos de divergência interpopulacional e especiação. Geograficamente posicionado a cerca de 1.100 km do litoral nordeste do Brasil, o ASPSP tem como regiões emersas mais próximas o Arquipélago de Fernando de Noronha e o Atol das Rocas, que se localizam respectivamente à 630 km e 720 km à sudeste. Apesar da ocorrência de endemismos e de espécies compartilhadas com o Atlântico Oriental, essa região oceânica compartilha a maioria de suas espécies de peixes recifais com a costa e ilhas oceânicas do Atlântico Ocidental (JOYEUX *et al.*, 2001, FLOETER *et al.*, 2008). Desta forma, a migração contemporânea ou histórica a partir de outras regiões insulares (Atol das Rocas e Arquipélago de Fernando de Noronha) e da costa ocidental do Atlântico, tem papel importante na compreensão dos processos de colonização e diversificação evolutiva no ASPSP (CUNHA *et al.*, 2014; SOUZA *et al.*, 2017).

As especificidades ambientais e geográficas, relações simplificadas da fauna pouco diversa de espécies recifais e interações destas com espécies pelágicas, promovem pressões seletivas particulares no ASPSP. Neste sentido, análises conjuntas envolvendo aspectos moleculares, citogenéticos e morfológicos integradas são efetivas na identificação dos processos evolutivos em curso nestas ilhas (MOLINA *et al.*, 2006b; CUNHA *et al.*, 2014, SOUZA *et al.*, 2017).

Estudos cromossômicos constituem uma abordagem valiosa para pesquisas genômicas comparativas e têm se mostrado eficientes na compreensão da evolução e organização genômica (CIOFFI *et al.*, 2012). Em espécies do ASPSP e de outras regiões insulares do Atlântico, análises da diversidade genética e cromossômica em peixes marinhos têm contribuído substancialmente para a identificação de espécies crípticas (LIMA-FILHO *et al.*, 2012; 2016), politípicas (SOUZA *et al.*, 2016; 2017), identificação da variabilidade interpopulacional (CUNHA *et al.*, 2014; AMORIM *et al.*, 2017), inferências filogenéticas e evolutivas (LIMA-FILHO *et al.*, 2012; SOARES *et al.*, 2017a), ampliação da informação genética sobre espécies pelágicas de grande porte e interesse da pesca comercial e piscicultura marinha (SOARES *et al.*, 2013; 2014; COSTA *et al.*, 2014), distribuição e organização física de genes nos cromossomos (COSTA *et al.*, 2015; AMORIM *et al.*, 2016) e em meta-análises sobre macrotendências evolutivas do cariótipo (MOLINA *et al.*, 2014a, 2014b).

No ambiente marinho gradientes ambientais ou condições regionais particulares podem ter reflexos significativos na variação morfológica e padrões evolutivos das populações (LIMA-FILHO *et al.*, 2017). Análises genéticas associadas a comparações morfológicas têm sido crescentemente utilizadas na compreensão dos processos envolvidos na diversificação filogenética de diferentes grupos de peixes (COOPER e WESTNEAT, 2009). Em espécies

Atlânticas, análises populacionais têm demonstrado que algumas espécies apresentam padrões morfológicos corporais distintos ao longo de uma distribuição geográfica norte-sul no litoral brasileiro (MOLINA *et al.*, 2006a; LIMA-FILHO *et al.*, 2012; 2017).

Comparações morfológicas interpopulacionais que envolvem populações do ASPSP e outras regiões insulares têm indicado marcado dinamismo morfológico em resposta as suas condições ambientais particulares e de áreas adjacentes (MOLINA *et al.*, 2006b; Souza *et al.*, em preparação).

A perspectiva de abordagens integradas no ASPSP vem demonstrando que essa região apresenta tanto particularidades relativas à coesão genética de algumas de suas populações de peixes recifais, como também condições adaptativas próprias. Como ponto mais extremo e isolado da distribuição de diversas espécies representa um modelo apropriado para investigações de processos evolutivos em ambientes insulares nacionais.

Aspectos citogenômicos de espécies de peixes do ASPSP

Os aspectos citogenéticos de peixes marinhos têm fornecido informações úteis em inferências filogenéticas, evolução cromossômica, divergências interespecíficas, variabilidade populacional, identificação de espécies crípticas, sistemas de cromossomos sexuais e marcadores citotaxonômicos com aplicabilidade na piscicultura comercial. Adicionalmente, processos especiativos são frequentemente acompanhados por rearranjos cromossômicos indicando sua importância filogenética e evolutiva (KING, 1993), sobretudo em ambientes insulares.

As primeiras informações sobre aspectos cromossômicos em espécies com ocorrência insular se iniciaram há quase duas décadas (MOLINA, 2007). Apesar dos desafios logísticos envolvidos, desde então, por meio de apoios institucionais, principalmente do Programa PROARQUIPÉLAGO/CNPq, o conhecimento sobre os aspectos citogenéticos dos peixes recifais e pelágicos do ASPSP têm crescido consideravelmente (e.g., LIMA *et al.*, 2011; SOARES *et al.*, 2014; AMORIM *et al.*, 2016).

Dados citogenéticos estão disponíveis para 22 espécies com ocorrência no ASPSP (Tabela I). Destas, todas as espécies recifais mais frequentes tiveram seus aspectos citogenéticos analisados. O espectro taxonômico tem se ampliado com pelo menos uma espécie analisada para as famílias Pomacentridae, Labridae, Balistidae, Holocentridae, Monacanthidae, Blenniidae, Carangidae, Coryphaenidae, Scombridae, Chaetodontidae, Muraenidae.

Tabela I. Dados citogenéticos de espécies de peixes recifais e pelágicos do ASPSP.

Table I. Cytogenetical data available for reef and pelagic fishes of the SPSPA.

Espécies	2n	Fórmulas cariotípicas	NF	Referências
<i>Caranx lugubris</i>	48	6sm + 42a	54	JACOBINA <i>et al.</i> , 2014
<i>Coryphaena equiselis</i>	48	2m+6sm+40a	56	SOARES <i>et al.</i> , 2014
<i>Coryphaena equiselis</i>	47	3m+6sm+38a	56	SOARES <i>et al.</i> , 2014
<i>Coryphaena hippurus</i>	48	2m+4sm+42a	54	SOARES <i>et al.</i> , 2014
<i>Coryphaena hippurus</i>	47	3m+4sm+40a	54	SOARES, 2017b
<i>Chromis multilineata</i>	48	48a	48	CUNHA <i>et al.</i> , 2014
<i>Halichoeres radiatus</i>	48	48a	48	AMORIM <i>et al.</i> , 2017
<i>Bodianus insularis</i>	48	4 m+12sm+14st+18a	78	MOLINA <i>et al.</i> , 2012b
<i>Ophioblennius trinitatis</i>	46	6m+12st+28a	64	GALVÃO <i>et al.</i> , 2011
<i>Acanthocybium solandri</i>	48	2st+ 46a	50	SOARES <i>et al.</i> , 2013
<i>Thunnus albacares</i>	48	2m+2st+44a	52	SOARES <i>et al.</i> , 2013
<i>Thunnus obesus</i>	48	2m+2st+44a	52	SOARES <i>et al.</i> , 2013
<i>Melichthys niger</i>	40	40a	40	LIMA <i>et al.</i> , 2011
<i>Cantherhines macrocerus</i>	40	40a	40	LIMA <i>et al.</i> , 2011
<i>Myripristis jacobus</i>	48	48a	48	BACURAU e MOLINA, 2004
<i>Gymnothorax miliaris</i>	84	14m+18sm+10st	84	VASCONCELOS e MOLINA, 2009
<i>Enchelycore nigricans</i>	68	6m+8sm+12st+16a	68	VASCONCELOS e MOLINA, 2009
<i>Muraena pavonina</i>	52	6m+4sm+32a	52	VASCONCELOS e MOLINA, 2009
<i>Abudefduf saxatilis</i>	52	2m+2sm+44a	52	MOLINA, 2007
<i>Stegastes sanctipauli</i>	48	22m+22sm+4a	92	MOLINA E GALETTI, 2004
<i>Chaetodon striatus</i>	48	48a	48	Dados não publicados
<i>Elagatis bipinnulata</i>	48	2st+46a	50	SOARES, 2017b
<i>Seriola rivoliana</i>	48	2sm+2st+44a	52	SOARES, 2017b
<i>Holocentrus ascensionis</i>	50	2m+6sm+16st+26a	74	BACURAU e MOLINA, 2004

Dentre os grupos pelágicos, representantes dos gêneros *Acanthocybium* e *Thunnus* (Scombridae), cujas espécies são de grande importância comercial e encontram-se significativamente impactadas pela pesca comercial, foram, pela primeira vez, investigadas cromossomicamente. Apesar deste grupo apresentar caracteres extensamente conservados, *Thunnus albacares* ($2n=48$; $2m+2st+44a$; $NF=52$) coletado no ASPSP apresentou variação cariotípica quando comparado à população do Pacífico ($2n=48$; $2m+2sm+2st+42a$; $NF=54$) (SOARES *et al.*, 2013).

Análises citogenômicas em *Coryphaena hippurus* e *C. equiselis* com distribuição circunglobal, revelaram um peculiar sistema de cromossomos sexuais múltiplos $X1X1X2X2/X1X2Y$ (SOARES *et al.*, 2014; SOARES, 2017). Ao que temos conhecimento, estes são os primeiros sistemas de cromossomos sexuais múltiplos identificados em um grande teleosteo pelágico. O compartilhamento de organização dos genes ribossomais e de aspectos estruturais dos cromossomos sexuais indicam uma condição sinapomórfica compartilhada há pelo menos 20 M.a., desde a divergência destas espécies (SOARES *et al.*, 2017a). Outras espécies como *Caranx lugubris* e *Elagatis bipinnulata* (Carangidae) compartilham mesmos números diploides, mas apresentam estruturas cariotípicas particulares (JACOBINA *et al.*, 2014; SOARES *et al.*, 2017a).

Em áreas do Atlântico Ocidental, dados citogenéticos têm sido aplicados no mapeamento da diversidade genética de peixes marinhos aferindo divergências cariotípicas entre populações do litoral nordeste (LIMA-FILHO *et al.*, 2012), entre populações do nordeste e sudeste do Brasil (SENA e MOLINA, 2007; ACCIOLY *et al.*, 2012), ou entre o Atlântico Sul e Caribe (MOLINA *et al.*, 2012a; MOTTA-NETO *et al.*, em preparação).

Comparações cariotípicas interpopulacionais em espécies com ocorrência no ASPSP e outras áreas oceânicas do Atlântico Ocidental indicam, em geral, um cenário citogenético conservativo com ausência

de variações na macroestrutura cariotípica, mesmo envolvendo amostragens em vastas áreas geográficas. Alguns exemplos da ausência de variação cariotípica entre populações e outras áreas foi identificada em *Myripristis jacobus* (BACURAU e MOLINA, 2004), *Abudefduf saxatilis* (MOLINA, 2007), *Chromis multilineata* (CUNHA *et al.*, 2014), assim como *Melichthys niger* e *Chaetodon striatus* (dados não publicados).

A distribuição e organização de sequências repetitivas (e.g., DNAr, histonas, elementos transponíveis, microssatélites, sequências teloméricas) identificadas por mapeamento físico nos cromossomos, crescentemente empregados em estudos citogenéticos populacionais, ampliam as perspectivas de detecção de variabilidade cromossômica. De fato, comparações populacionais entre amostras de *Halichoeres radiatus* do ASPSP e do Arquipélago de Fernando de Noronha, ambas com $2n=48$ ($NF=48$), se diferenciam quanto à frequência de sítios DNAr nos cromossomos, sugerindo algum nível de estruturação populacional entre essas regiões insulares (AMORIM *et al.*, 2017).

Dentre os grupos marinhos, a ordem Tetraodontiformes apresenta marcantes diversificações citogenéticas entre suas linhagens, sobretudo envolvendo mecanismos de fusões cêntricas e *in tandem*, fissões cêntricas e inversões pericêntricas (SÁ-GABRIEL e MOLINA, 2005). Entre as espécies com ocorrência no ASPSP, *Melichthys niger* (Balistidae) e *Cantherhines macrocerus* (Monacanthidae) apresentam redução do número diploide ($2n=40a$; $NF=40$) e cariótipos com cromossomos de tamanho grande, indicações de diversificação cromossômica principalmente mediadas por fusões cêntricas ou *in tandem* (LIMA *et al.*, 2011), que em alguns casos podem ser seguidas por inversões pericêntricas (KITAYAMA e OJIMA, 1984).

Em geral, os padrões cariotípicos detectados em peixes marinhos tendem a ser menos diversificados

em relação às espécies dulcícolas (BRUM, 1995). Entre as causas destacam-se um menor número de barreiras geográficas e presença de correntes marinhas homogeneizantes (fatores físicos), características biológicas associadas à dispersão (fatores espécie-específicos) e fatores intrínsecos dos cromossomos (fatores ortosseletivos) de alguns grupos (BRUM e GALETTI, 1997; SOARES *et al.*, 2013; MOLINA *et al.*, 2014a, b).

Grandes avanços têm sido obtidos na identificação dos padrões carioevolutivos em grupos de peixes com ocorrência no ASPSP (Figura 1). Em função do progresso no acesso às espécies pelágicas e de profundidade nesta região oceânica, espera-se a ampliação dos dados para um maior número de espécies, sobretudo em grupos cujas informações citogenéticas ainda são desconhecidas (e.g., Exocoetidae, Aulostomidae, Gempylidae, Istiophoridae). Neste intuito, a utilização de técnicas citogenômicas integradas contribuirá para o esclarecimento do papel das mudanças cromossômicas na evolução da ictiofauna do ASPSP.

Aspectos filogeográficos de peixes do Arquipélago São Pedro e São Paulo

As áreas de distribuição geográfica de espécies de peixes marinhos, sejam pelágicos ou recifais, podem ser consideravelmente extensas. No ASPSP, cerca de 80% das espécies têm ocorrência compartilhada com regiões costeiras do Atlântico Ocidental e outras ilhas oceânicas mais próximas (FERREIRA *et al.*, 2009). Nestas condições, o mapeamento da distribuição espacial da diversidade genética permite delimitar populações, estimar a variabilidade genética e o fluxo gênico interpopulacional, bem como compreender fatores que atuam na demografia histórica das espécies (SOUZA *et al.*, 2015). Apesar disso, estimativas da

conectividade genética das populações de peixes recifais do ASPSP com outras regiões oceânicas ainda são escassas (CUNHA *et al.*, 2014; NEVES *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2017; SOUZA *et al.*, em preparação).

Os vastos espaços oceânicos têm papel ambíguo como efetivas barreiras geográficas à dispersão, seja de ovos, juvenis ou adultos. Por vezes, representam marcante impedimento ou restrição ao fluxo gênico (SHULMAN e BERMINGHAM, 1995; ROCHA *et al.*, 2002). Em outros casos, seja pela ação conjunta de correntes marinhas ou por características biológicas das espécies, a homogeneidade genética entre populações é mantida mesmo ao longo de grandes extensões marinhas (LACSON, 1992; CRAIG *et al.*, 2007).

A análise da diversidade genética de espécies que se distribuem em vastas áreas continentais e insulares do Atlântico Ocidental oferece a oportunidade de estimar a estrutura populacional, bem como a influência de fatores ambientais ou físicos sobre a coesão genética. Análises populacionais por meio de sequências da região controle do DNA mitocondrial da garoupa *Cephalopholis fulva*, das ilhas de Fernando de Noronha e Atol das Rocas e outras seis localidades da costa brasileira, indicam que a espécie apresenta alta variabilidade genética e um fluxo gênico entre as localidades, bem como expansões populacionais contrastantes entre as áreas continentais e insulares oceânicas, associadas a geomorfologia das ilhas e costa brasileira frente às mudanças no nível do mar ocorridas durante o Pleistoceno (SOUZA *et al.*, 2015).

Alguns peixes recifais como *Chromis multilineata* (Pomacentridae), com ampla distribuição geográfica são modelos evolutivos no ambiente marinho. A população desta espécie no ASPSP é a única em toda a área de distribuição no Atlântico, que exhibe padrões anômalos de coloração do corpo (JOYEUX *et al.*, 2001).



Figura 1. Algumas espécies de peixes representativas do ASPSP, cujas relações filogeográficas têm sido estabelecidas com áreas continentais e insulares do Atlântico. a. *Chromis multilineata*; b. *Abudefduf saxatilis* e *Stegastes "sanctipauli"* (Pomacentridae), respectivamente; c. *Bodianus insularis*; e d. *Halichoeres radiatus* (Labridae). Fotos: Rodrigo Soares.

Figure 1. Some representative fish species of the SPSPA, whose phylogeographic relationships are known regarding others continental and insular Atlantic regions. a. *Chromis multilineata*; b. *Abudefduf saxatilis* and *Stegastes "sanctipauli"* (Pomacentridae), respectively; c. *Bodianus insularis*; and d. *Halichoeres radiatus* (Labridae). Photos: Rodrigo Soares.

Análises filogeográficas utilizando sequências parciais da região D-loop em populações de *C. multilineata*, distribuídas na costa brasileira (RN, BA) e nas ilhas do ASPSP e Fernando de Noronha indicaram uma estruturação genética em três grupos populacionais. O primeiro abrange indivíduos do Rio Grande do Norte e do Arquipélago de Fernando de Noronha, o segundo é formado pelos indivíduos da Bahia e o último corresponde à população do ASPSP, condizente

com fluxo gênico restrito nesta última região. O alto grau de homogeneidade genética entre os indivíduos do ASPSP indica processos de auto-recrutamento e algum grau de endogamia, fatores que possivelmente estão associados à ocorrência de colormorfos nesta região (CUNHA *et al.*, 2014). Padrões similares de estruturação genética no ASPSP também têm sido relatados para outras espécies (NEVES *et al.*, 2016).

A estrutura genética das populações marinhas reflete a interação histórica e contemporânea entre uma série de processos ecológicos, demográficos, comportamentais, genéticos, oceanográficos, climáticos e tectônicos (BENZIE, 1999; CHOAT, 2006). O efeito do isolamento geográfico do ASPSP se mostra uma causa importante da configuração zoogeográfica, como também dos padrões genéticos de suas populações, apesar do variável potencial dispersivo das espécies recifais.

Status taxonômico de *Stegastes sanctipauli* (Pomacentridae) e *Bodianus insularis* (Labridae): espécies endêmicas ou sinônimas?

Apesar de contínuos inventários da fauna de peixes no ASPSP, o status taxonômico de espécies consideradas endêmicas, e portanto importantes do ponto de vista da conservação, não têm sido motivo de questionamentos. Dentre as espécies consideradas endêmicas da região, destacadamente duas são mais conhecidas, o pomacentrídeo *Stegastes sanctipauli* e o labrídeo *Bodianus insularis*. Esta última com área de distribuição expandida para as ilhas Meso-Atlânticas de Ascensão e Santa Helena (GOMON, 2006).

É bem conhecido que o conceito de espécies é um dos temas evolutivos mais debatidos. Envolve inúmeros aspectos, entre eles características morfológicas, reprodutivas, ecológicas, etológicas e filogenéticas (e.g., HAUSDORF, 2011; FREUDENSTEIN *et al.*, 2017), todos com limitações à conceituação, impostas por características particulares dos grupos analisados.

Algumas das espécies de *Stegastes* são consideradas endêmicas de ambientes insulares do Atlântico Sul, como *S. rocasensis* (EMERY, 1972), no Atol das Rocas e Arquipélago de Fernando de Noronha, e *S. sanctipauli* LUBBOCK e EDWARDS, 1981, exclusivamente presente no ASPSP. Neste

gênero a classificação é muito dependente de critérios de coloração, uma vez que suas espécies apresentam morfologia conservativa (ALLEN, 1991). Com vistas a esclarecer o status taxonômico e as relações filogenéticas destas espécies insulares *S. rocasensis* e *S. sanctipauli*, SOUZA *et al.* (2017) analisaram a divergências genética e morfológica entre ambas e em relação a outras espécies do Atlântico.

As análises de sequências dos genes 16S, COI, Cytb, rag1 e Rhod indicaram que *S. rocasensis* (RA e FNA) e *S. sanctipauli*, são geneticamente indistintas. Variações morfológicas sem diferenciação genética, em geral, têm sido explicadas como plasticidade fenotípica, isolamento recente, limites incompletos entre espécies, ou produto de seleção (SCHULTZ *et al.*, 2007). Aparentemente, apesar da distância física entre as localidades de ocorrência de *S. rocasensis* e *S. sanctipauli*, esses espaços oceânicos parecem não garantir bloqueio efetivo à migração.

Padrões corporais obtidos por morfometria geométrica também evidenciaram uma elevada semelhança morfológica entre indivíduos de *S. rocasensis* do Arquipélago de Fernando de Noronha e *S. sanctipauli* (SOUZA *et al.*, 2017)

As evidências genéticas e morfológicas indicam que *S. rocasensis*+*S. sanctipauli* constituem uma mesma espécie, sugerindo a ocorrência de politipismo, modelado e mantido por pressões seletivas diferenciais entre estas regiões insulares. Assim, *S. sanctipauli* LUBBOCK e EDWARDS, 1981 representa uma sinônima de *S. rocasensis* (EMERY, 1972), nomenclatura taxonômica precedente, pela qual os indivíduos de ambas as localidades devem ser reportados.

Bodianus insularis é uma das espécies com distribuição estritamente insular e uma das cinco espécies reconhecidas para o gênero no Atlântico (GOMON, 2006). Sua distribuição abrange o ASPSP, e as ilhas de Santa Helena e Ascensão, todas situadas na região Meso-Atlântica. Informação biológicas sobre a espécie são reduzidas e seus

padrões de divergência genética com outras espécies do Atlântico são desconhecidos.

Entre as espécies do Atlântico, *Bodianus pulchellus* (POEY, 1860) é a única com distribuição anfi-Atlântica, ocupando áreas do Atlântico Ocidental que se estendem de Bermuda, recifes da costa da Carolina do Norte ao litoral de São Paulo, e o arquipélago de São Tomé e Príncipe, no Atlântico Oriental (GOMON, 2006; WIRTZ *et al.*, 2007). Esta espécie exibe acentuado compartilhamento de características morfológicas e de contagens com *B. insularis*, diferindo principalmente quanto ao padrão de colorido do corpo. Entre os caracteres morfológicos diferenciados, apenas o número de escamas pré-dorsais e daquelas abaixo da linha lateral exibem alguma variação, apesar de ainda apresentarem alguma sobreposição.

Dentro do gênero *Bodianus*, uma divergência genética média de 12.48% do gene COI foi identificada entre amostras de *B. perditio* da Austrália e da África do Sul (ZEMBLAK *et al.*, 2009). Por outro lado, comparações das sequências dos genes COI e rodopsina, entre *B. insularis* e *B. rufus* indicaram uma divergência genética de 3.1%, mas de apenas 0.1% em relação à *B. pulchellus*. Análises prévias dos aspectos citogenômicos dessas três espécies demonstraram padrões cariotípicos similares entre *B. insularis* e *B. pulchellus* (MOLINA *et al.*, 2012b).

Em termos taxonômicos, a discriminação de *B. insularis* em relação a *B. pulchellus* em grande parte se apoia no padrão de coloração e isolamento geográfico que apresentam (GOMON, 2006). A acentuada similaridade genética entre *B. insularis* e *B. pulchellus* e de que padrões de coloração apresentam rápida mudança evolutiva (FEDDERN, 1963; GRAY e MCKINNON, 2007; MAAN e SEFEC, 2013), não descartam que em termos evolutivos, *B. insularis* constitua um enclave populacional alopátrico interno à distribuição de *B. pulchellus*. A população do ASPSP, e as outras presentes em Ascensão e Santa Helena, merecem análises futuras, contudo, sugerem um estágio incipiente de

diferenciação. Embora *B. insularis* possivelmente constitua uma unidade evolutiva significativa, o seu status como espécie parece questionável.

Considerações Finais

Padrões citogenéticos, morfológicos e genéticos das populações e espécies consideradas do Arquipélago São Pedro e São Paulo, têm revelado conjuntamente o nível de divergência evolutiva em relação ao litoral brasileiro e outras ilhas oceânicas. O mapeamento físico de sequências repetitivas nos cromossomos identificou aspectos da sua evolução cariotípica e insuspeitas regiões cromossômicas de elevada complexidade. Entre as espécies pelágicas, tem sido apresentados sistemas de cromossomos sexuais múltiplos X1X1X2X2/X1X2Y na família Coryphaenidae e aspectos carioevolutivos como marcadores citotaxonômicos particulares em espécies de atuns e afins de grande porte de elevado interesse econômico. Revalidações taxonômicas baseadas em padrões de divergência molecular em *Stegastes sanctipauli* e *Bodianus insularis*, consideradas endêmicas ou restritas às ilhas Meso-Atlânticas, levantaram questionamentos quanto à sua validade taxonômica o que retrata a forte influência das condições ambientais do ASPSP sobre as espécies que lá se estabelecem. Abordagens multi e interdisciplinares voltadas à integração de dados citogenômicos, genético-populacionais, morfométricos e evolutivos em populações e espécies de peixes das ilhas oceânicas brasileiras, decorrem de uma larga base de informações científicas, e têm sido sistematicamente obtidos para espécies do ASPSP. Estudos de longa duração, como os que vêm sendo realizados, são relevantes por possibilitarem uma consistência amostral/temporal e cobertura de maior espectro taxonômico. Os dados obtidos auxiliam no entendimento sobre os mecanismos que atuam na diferenciação evolutiva do componente íctico marinho, e suscitam novas questões a serem respondidas no futuro para a particular comunidade de peixes do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Agradecimentos

Os autores expressam seus agradecimentos ao Dr. José Garcia Jr. (Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio Grande do Norte), Dr. Ricardo de Souza Rosa (Universidade Federal da Paraíba) e Dr. Oscar Akio Shibatta (Universidade Estadual de Londrina) pelo auxílio na identificação taxonômica das espécies do ASPSP.

Referências Bibliográficas

- ACCIOLO, I.V.; BERTOLLO, L.A.C.; COSTA, G.W.W.F.; JACOBINA, U.P. and MOLINA, W.F. **Chromosomal population structuring in carangids (Perciformes) between the north-eastern and south-eastern coasts of Brazil.** *African Journal of Marine Science*, v. 34, p. 383-389, 2012.
- ALLEN, G.R. **Damselfishes of the world.** *Mergus Publications*, Germany. 1991
- AMORIM, K.D.; CIOFFI, M.B.; BERTOLLO, L.A.; SOARES, R.X., SOUZA, A.S.; COSTA, G.W.W.F. and MOLINA, W.F. **Co-located 18S/5S rDNA arrays: an ancient and unusual chromosomal trait in Julidini species (Labridae, Perciformes).** *Comparative Cytogenetics*, 10(4), 555-570. 2016.
- AMORIM, K.D.J.; CIOFFI, M.B.; BERTOLLO, L.A.C.; SOARES, R.X.; CALADO, L.L.; BORGES, A.T.; COSTA, G.W.W.F. and MOLINA, W.F. **Interregional cytogenetic comparisons in Halichoeres and Thalassoma wrasses (Labridae) of coastal and insular regions of the southwestern Atlantic.** *Genetics and Molecular Research*, 16(2). 2017.
- BACURAU, T.O.F. and MOLINA, W.F. **Karyotypic diversification in two atlantic species of Holocentridae (Pisces, Beryciformes).** *Caryologia*, 57, 300-304. 2004.
- BENZIE, J.A.H. **Major genetic differences between crown-of-thorns starfish (Acanthaster planci) populations in the Indian and Pacific Oceans.** *Evolution*, 53(6), 1782-1795. 1999.
- BRUM, M.J.I. **Correlação entre a filogenia e a citogenética dos peixes teleósteos.** *Sociedade Brasileira de Genética. Série Monografias* 2, 5-42. 1995.
- BRUM, M.J.I. and GALETTI JR., P.M. **Teleostei plan ground karyotype.** *Journal of Applied Bioinformatics e Computational Biology*, 2, 91-102. 1997.
- CARVALHO-FILHO, A.; MACENA, B.C.L. and NUNES, D.M. **A new species of Anthiadinae (Teleostei: Serranidae) from São Pedro and São Paulo Archipelago, Brazil, Equatorial Atlantic.** *Zootaxa* 4139, 585-592. 2016.
- CHOAT, J.H. **Phylogeography and reef fishes: bringing ecology back into the argument.** *Journal of Biogeography*, 33(6), 967-968. 2006.
- CIOFFI, M.B.; MOLINA, W.F.; ARTONI, R.F. and BERTOLLO, L.A.C. **Chromosomes as tools for discovering biodiversity the case of Erythrinidae Fish Family.** In: Padma Tirunilai. (Org.). Recent trends in cytogenetic studies - Methodologies and Applications. 1ed.: *InTech*, 1, 125-146. 2012.
- COOPER, W. J. and WESTNEAT, M. W. **Form and function of damselfish skulls: rapid and repeated evolution into a limited number of trophic niches.** *BMC Evolutionary Biology*, 9, 24. 2009.
- COSTA, G.W.W.F.; CIOFFI, M.B.; BERTOLLO, L.A.C. and MOLINA, W.F. **Unusual dispersion of histone repeats on the whole chromosomal complement and their colocalization with ribosomal genes in *Rachycentron canadum* (Rachycentridae, Perciformes).** *Cytogenetic and Genome Research*, 144, 62-67, 2014.
- COSTA, G.W.W.F.; CIOFFI, M.B.; BERTOLLO, L.A.C. and MOLINA, W.F. **Structurally complex organization of repetitive DNAs in the genome of cobia (*Rachycentron canadum*).** *Zebrafish* (Larchmont, NY), p. 150226081847007, 2015.
- CRAIG, M.T.; EBLE, J.A.; BOWEN, B.W. and ROBERTSON, D.R. **High genetic connectivity across the Indian and Pacific Oceans in the reef fish *Myripristis berndti* (Holocentridae).** *Marine Ecology Progress Series*, 334, 245-254. 2007.
- CUNHA, I.M.C.; SOUZA, A.S.; DIAS JR, E.A.; AMORIM, K.D.J.; SOARES, R.X.; COSTA, G.W.W.F.; MACHADO, E.G.; GALETTI JR., P.M. and MOLINA, W.F. **Genetic multipartitions based on D-Loop sequences and chromosomal patterns in *Brown Chromis* (Pomacentridae), in the Western Atlantic.** *BioMed Research International*, 2014, 1-11, 2014.
- FEDDERN, H.A. **Color pattern changes during growth of *Bodianus pulchellus* and *B. rufus* (Pisces, Labridae).** *Bulletin of Marine Science*, 13(2), 224-224. 1963.
- FEITOZA, B.M.; ROCHA, L.A.; LUIZ-JR, O.J.; FLOETER, S.R. and GASPARINI, J.L. **Reef fishes of St. Paul's Rocks: new records and notes on biology and zoogeography.** *Aqua, Journal of Ichthyology and Aquatic Biology*, 7, 61-82. 2003.

- FERREIRA, C.E.L.; FLOETER, S.R.; GASPARINI, J.L.; FERREIRA, B.P. and JOYEUX, J.C. **Trophic structure patterns of Brazilian reef fishes: a latitudinal comparison.** *Journal of Biogeography*, 31(7), 1093-1106. 2004.
- FLOETER, S.R. *et al.*, **Atlantic reef fish biogeography and evolution.** *Journal of Biogeography*, 35, 22-47. 2008.
- FREUDENSTEIN, J.V.; BROE, M.B.; FOLK, R.A. and SINN, B.T. **Biodiversity and the species concept—Lineages are not enough.** *Systematic Biology*, 66, 644-656. 2017.
- GALVAO, T.B.; BERTOLLO, L.A.C. and MOLINA, W.F. **Chromosomal complements of some Atlantic Blennioidei and Gobioidae species (Perciformes).** *Comparative Cytogenetics*, 5(4), 259-275. 2011.
- GOMON, M.F. **A revision of the labrid fish genus *Bodianus* with descriptions of eight new species.** *Sydney [NSW]: Australian Museum*, 133pp. 2006.
- GRAY, S.M. and MCKINNON, J.S. **Linking color polymorphism maintenance and speciation.** *Trends in Ecology and Evolution*, 22(2), 71-79. 2007.
- HAUSDORF, B. **Progress toward a general species concept.** *Evolution*, 65: 923-931. 2011.
- JACOBINA, U.P.; MARTINEZ, P.A.; CIOFFI, M.B.; GARCIA, J.; BERTOLLO, L.A.C. and MOLINA, W.F. **Morphological and karyotypic differentiation in *Caranx lugubris* (Perciformes: Carangidae) in the St. Peter and St. Paul Archipelago, mid-Atlantic Ridge.** *Helgoland Marine Research*, v. 68, p. 17-25, 2014.
- JOYEUX, J.-C.; FLOETER, S.R.; FERREIRA, C.E.L. and GASPARINI, J.L. **Biogeography of tropical reef fishes: the South Atlantic puzzle.** *Journal of Biogeography*, 28, 831-841. 2001.
- KING, M. **Species evolution. The role of chromosome change.** *Cambridge University Press, Cambridge*. 1993.
- KITAYAMA, E. and OJIMA, Y. **A preliminary report on the phylogeny of five balistid fish in terms of several chromosome banding techniques in combination with a statistical analysis.** *Proc. Japan Acad., Ser. B: Phys. Biol. Sci.* 60(3), 58-61. 1984.
- LACSON, J.M. **Minimal genetic variation among samples of six species of coral reef fishes collected at La Parguera, Puerto Rico, and Discovery Bay, Jamaica.** *Marine Biology*, 112, 327-331. 1992.
- LESSA, R. and VASKE-JR., T. **A ictiofauna com ênfase aos peixes-voadores (Exocoetidae).** In: VIANA D.; HAZIN F.; CARVALHO M. A. (Eds.) **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.** v.1, p. 228-224. 2009.
- LIMA, L.C.B.; MARTINEZ, P.A. and MOLINA, W. F. **Cytogenetic characterization of three Balistoidea fish species from the Atlantic with inferences on chromosomal evolution in the families Monacanthidae and Balistidae.** *Comparative Cytogenetics*, 5, 61-65. 2011.
- LIMA-FILHO, P.A.; CIOFFI, M.B.; BERTOLLO, L.A.C. and MOLINA, W.F. (2012) **Chromosomal and morphological divergences in Atlantic populations of the frillfin goby *Bathygobius soporator* (Gobiidae, Perciformes).** *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, v. 434-435, p. 63-70. 2012.
- LIMA-FILHO, P.A.; ROSA, R.S.; SOUZA, A. S.; COSTA, G. W.W.F.; OLIVEIRA, C. and MOLINA, W.F. **Evolutionary diversification of Western Atlantic *Bathygobius* species based on cytogenetic, morphologic and DNA barcode data.** *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. 26, 119-121. 2016.
- LIMA-FILHO, P.A.; BIDAU, C.J.; ALENCAR, C.E.R.D. and MOLINA, W.F. **Latitudinal influence on the sexual dimorphism of the marine fish *Bathygobius soporator* (Gobiidae: Teleostei).** *Evolutionary Biology*, 44(3), 374-385. 2017.
- MAAN, M.E. and SEFEC, K.M. **Colour variation in cichlid fish: developmental mechanisms, selective pressures and evolutionary consequences.** *Seminars in Cell e Developmental Biology*. 24(6-7), 516-528. 2013.
- MOLINA, W.F. and GALETTI JR. P.M. **Multiple pericentric inversions and chromosome divergence in the reef fishes *Stegastes* (Perciformes, Pomacentridae).** *Genetics and Molecular Biology* 27, 543-548. 2004.
- MOLINA, W.F. and BACURAU T.O.F. **Structural and numerical chromosomal variation in marine Perciformes (Priacanthidae and Gerreidae).** *Cytologia* 71: 237-242. 2006a.
- MOLINA, W.F.; SHIBATTA, O.A. and GALETTI JR., P.M. **Multivariate morphological analyses in continental and island populations of *Abudefduf saxatilis* (Linnaeus) (Pomacentridae, Perciformes) of Western Atlantic.** *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 1(2), 49-56. 2006b.
- MOLINA, W.F. **Chromosomal changes and stasis in marine fish groups.** In: **Fish cytogenetics** (Pisano, E, Ozouf-Costaz, C, Foresti, F., Kapoor, B.G., eds.). *Science Publishers, Enfield*, 69-110. 2007.

MOLINA, W.F.; COSTA, G.W.W.F.; CIOFFI, M.B. and BERTOLLO, L.A.C. **Chromosomal differentiation and speciation in sister-species of Grammatidae (Perciformes) from the Western Atlantic.** *Helgoland Marine Research*, 66, 363-370. 2012a.

MOLINA, W.F.; MOTTA-NETO, C.C.; SENA, D.C.S.; CIOFFI, M.B. and BERTOLLO, L.A.C. **Karyoevolutionary aspects of Atlantic hogfishes (Labridae).** *Marine Genomics*, v. 6, p. 25-31, 2012b.

MOLINA, W.F.; MARTINEZ, P.A.; BERTOLLO, L.A.C. and BIDAU, C.J. **Evidence for meiotic drive as an explanation for karyotype changes in fishes.** *Marine Genomics*, 15, 29-34, 2014a.

MOLINA, W.F.; MARTINEZ, P.A.; BERTOLLO, L.A.C. and BIDAU, C.J. **Preferential accumulation of sex and Bs chromosomes in biarmed karyotypes by meiotic drive and rates of chromosomal changes in fishes.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências, Epub.* v. 86, p. 1801-1812, 2014b.

NEVES, J.M.M.; LIMA, S.M.Q.; MENDES, L.F.; TORRES, R.A.; PEREIRA, R.J. and MOTT, T. **Population structure of the Rockpool Blenny *Entomacrodus vomerinus* shows source-sink dynamics among ecoregions in the tropical southwestern Atlantic.** *PLoS ONE* 11(6), e0157472. 2016.

ROCHA, L.A.; BASS, A.L.; ROBERTSON, R. and BOWEN, B.W. **Adult habitat preferences, larval dispersal, and the comparative phylogeography of three Atlantic surgeonfishes (Teleostei: Acanthuridae).** *Molecular Ecology*, 11, 243-252. 2002.

SÁ-GABRIEL, L.G. and MOLINA, W.F. **Karyotype diversification in fishes of the Balistidae, Diodontidae and Tetraodontidae (Tetraodontiformes).** *Caryologia*, 58, 229-237. 2005.

SCHULTZ, J.K.; PYLE, R.L.; DEMARTINI, E. and BOWEN, B.W. **Genetic connectivity among color morphs and Pacific archipelagos for the flame angelfish, *Centropyge loriculus*.** *Marine Biology*, 151, 167-175. 2007.

SENA, D.C.S. and MOLINA, W.F. **Chromosomal rearrangements associated with the larval dispersal ability in Labridae (Perciformes, Labridae).** *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 353, 203-210. 2007.

SHULMAN, M.A. and BERMINGHAM, E. **Early life histories, ocean currents, and the population genetics of Caribbean reef fishes.** *Evolution* 49, 897-910. 1995.

SOARES, R.X.; BERTOLLO, L.A.C.; COSTA, G.W.W.F. and MOLINA, W.F. **Karyotype stasis in four Atlantic Scombridae fishes: mapping of classic and dual-color FISH markers on chromosomes.** *Fisheries Science*, 79(2), 177-183. 2013.

SOARES, R.X.; BERTOLLO, L.A.C.; CIOFFI, M.B.; COSTA, G.W.W.F. and MOLINA, W.F. **Chromosomal distribution of two multigene families and the unusual occurrence of an X1X1X2X2/X1X2Y sex chromosome system in the dolphinfish (Coryphaenidae): evolutionary aspects.** *Genetics and Molecular Research*, 13, 2470-2479, 2014.

SOARES, R.X., CIOFFI, M.B., BERTOLLO, L.A.C., BORGES, A.T., G.W.W.F. and MOLINA, W.F. **Chromosomal evolution in large pelagic oceanic apex predators, the barracudas (Sphyraenidae, Percomorpha).** *Genetics and Molecular Research*, 16(2). 2017a.

SOARES, R.X. **Prospecção de marcadores citogenéticos em grandes peixes pelágicos marinhos.** 114f. Tese, Programa de Pós-graduação em Biotecnologia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Rio Grande do Norte, 2017b.

SOUZA, A.S.; DIAS JR, E. A.; GALETTI JR, P.M.; GARCIA-MACHADO, E.; PICHORIM, M. and MOLINA, W.F. **Wide-range genetic connectivity of Coney, *Cephalopholis fulva* (Epinephelidae), through oceanic islands and continental Brazilian coast.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 87, 121-136, 2015.

SOUZA, A.S.; SOUZA ROSA, R.; SOARES, R.X.; LIMA-FILHO, P.A.; OLIVEIRA, C.; SHIBATTA, O. A. and MOLINA, W.F. **A reappraisal of *Stegastes* species occurring in the South Atlantic using morphological and molecular data.** *Helgoland Marine Research*, 70(20). 2017.

VASCONCELOS, A.J.M. and MOLINA, W.F. **Cytogenetical studies in five Atlantic Anguilliformes fishes.** *Genetics and Molecular Biology*, 32(1), 83-90. 2009.

VASKE JR., T.; LESSA, R.P.; NÓBREGA, M.F.; MONTEALEGRE-QUIJANO, S.; SANTANA, F.M. and BEZERRA, L. JR. **A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul's Archipelago, Brazil.** *Journal of Applied Ichthyology*, 21: 75-79. 2005.

ZEMLAK, T.S.; WARD, R.D.; CONNELL, A.D.; HOLMES, B.H. and HEBERT, P.D. **DNA barcoding reveals overlooked marine fishes.** *Molecular Ecology Resources*, 9, 237-242. 2009.

WIRTZ, P. *et al.* **Coastal fishes of São Tomé and Príncipe islands, Gulf of Guinea (Eastern Atlantic Ocean)-an update.** *Zootaxa*, 1523, 1-48. 2007.

Variação Temporal das Comunidades Recifais no Arquipélago de São Pedro e São Paulo: ações do Projeto de Monitoramento de Longa Duração (PELD)

Juan P. Quimbayo^{1,2}

Thiago C. Mendes^{2,3}

Cesar A. M. M. Cordeiro²

Guilherme O. Longo⁴

Vinicius J. Giglio^{2,3}

Diana C. Vergara⁵

Sergio R. Floeter¹

Roberto Villaça²

Andrea S. Freire¹

Ronaldo B. Francini-Filho⁵

Carlos E. L. Ferreira²

08

Abstract

The Long-Term Monitoring Program of Brazilian Oceanic Islands (PELD - ILOC), whose main goal is monitoring various components of the reef environments in the Brazilian oceanic island, started its activities in 2013. During the last five years, researchers have been gathering data on reef fish assemblages, benthic communities, coral health and its associated zooxanthellae. In this chapter, we present an overview of the activities developed by the PELD - ILOC in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), with special attention to the composition of fish assemblages, structure of benthic community, and demography of the intertidal crab *Grapsus grapsus*. The density of fishes varied little throughout the sampled period with a slight decrease by 2015 and an apparent stability until 2017. Fish biomass was more constant throughout the years, with high contribution of the omnivore *Melichthys niger* and different species of moray eels. Turf and encrusting calcareous algae, and the zoanthid *Palythoa caribaeorum* presented the higher benthic cover, with varying contribution depending on year and depth strata. For instance, shallow reefs (3 – 10 m deep) were mainly covered by turf algae and *P. caribaeorum*, while encrusting calcareous algae and other invertebrates were more important on deep reefs (12 – 18 m deep). The density of *G. grapsus* showed a decrease throughout the time. Although neither the sizes of males nor females has varied through time, the average size of ovigerous female has been decreasing. This fact has important consequences for fecundity rates and larvae production. Mutilation was relatively common in crabs, being observed in up to 49% of the sampled individuals, and is driven by the harsh local environment. Reefs in the SPSPA

are spatially limited and characterized by a depauperate biota in comparison to coastal areas. Nevertheless, a high proportion of endemic species and a high fish biomass can be observed in the region, reinforcing the importance of this unique system. The low species richness observed in SPSPA is reflected in a low functional redundancy and consequently high vulnerability to different anthropogenic and natural impacts. Long-term monitoring is an essential tool to understand the temporal dynamics of these fragile isolated reef communities, and an important strategy to manage and conserve this archipelago.

Introdução

O Programa Ecológico de Longa Duração (PELD)

O programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (PELD) foi criado pelo Governo Federal no ano de 1999 como forma de promover a pesquisa e o monitoramento de ecossistemas importantes através da coleta e interpretação de longas séries temporais de dados. Esta iniciativa foi inspirada pelo programa norte americano conhecido como LTER (*Long-Term Ecological Research*) fundado em 1980 e financiado pelo *National Science Foundation*, um órgão equivalente ao CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico) no Brasil. Atualmente o PELD conta com 30 sítios de monitoramento distribuídos ao longo de todo o território brasileiro, incluindo diversos biomas importantes como o pampa,

-
- 1 Universidade Federal de Santa Catarina;
 - 2 Universidade Federal Fluminense (carlosferreira@id.uff.br);
 - 3 Universidade Federal do Rio de Janeiro;
 - 4 Universidade Federal do Rio Grande do Norte;
 - 5 Universidade Federal da Paraíba.

florestas, cerrado, ambientes costeiros e, mais recentemente, oceânicos. Abordagens de longo prazo são fundamentais para o entendimento do funcionamento dos ecossistemas, suas respostas aos constantes e crescentes impactos humanos, e de que forma essas mudanças podem afetar os serviços ecossistêmicos que utilizamos. Além da perspectiva do entendimento ecológico, o programa PELD estimula a produção e utilização dessas informações de longo prazo para a tomada de decisões que favoreçam bons modelos de manejo e uso dos recursos e serviços ecossistêmicos. O programa PELD tem ainda um papel fundamental na formação de recursos humanos especializados através da participação ativa de alunos de graduação e pós-graduação, bem como na estruturação e consolidação de grupos de pesquisa (TABARELLI *et al.*, 2013).

PELD/ Ilhas Oceânicas

Embora o PELD tenha sido criado no final da década de 90 e incluído ecossistemas marinho-costeiros entre os seus sítios pioneiros, apenas em 2013 os ambientes oceânicos passaram a ser monitorados consistentemente através do PELD-Ilhas Oceânicas (PELD-ILOC - <http://www.sisbiota.ufsc.br/peld.html>). Alinhado às principais visões do programa, o PELD-ILOC tem atuado desde 2013 nas quatro ilhas oceânicas brasileiras: Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Fernando de Noronha, Atol das Rocas e Arquipélago de Trindade e Martin Vaz, gerando dados temporais sobre os ecossistemas recifais, contribuindo para o entendimento de processos que influenciam sua resiliência, aprimorando as estratégias de conservação e uso dos recursos nas ilhas, mas também capacitando recursos humanos. O PELD-ILOC representa a continuidade de esforços do grupo que compõe a Rede SISBIOTA-Mar (<http://www.sisbiota.ufsc.br>) que buscou estabelecer uma linha de referência sobre as comunidades de organismos recifais ao longo da costa brasileira e atualmente é composto por pesquisadores e alunos de 10 universidades

e instituições de pesquisa de norte a sul do Brasil. Os resultados da Rede indicaram que as ilhas oceânicas se destacam por apresentarem melhores indicadores de saúde ecossistêmica quando comparados a recifes costeiros, como por exemplo, maior biomassa total de peixes recifais (em especial de peixes predadores de topo; MORAIS *et al.*, 2017) e corais em melhor estado de saúde. Este cenário está particularmente associado ao grau de isolamento das ilhas oceânicas brasileiras e o menor impacto humano em comparação aos recifes costeiros. Além disso, algumas das ilhas fazem parte de unidades de conservação federais de proteção integral, como parte do Arquipélago de Fernando de Noronha (Parque Nacional) e o Atol das Rocas em sua totalidade (Reserva Biológica). No caso do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e do Arquipélago de Trindade e Martin Vaz, ambos contam com programas de pesquisa continuada com o apoio logístico da Marinha do Brasil e financiamento do CNPq, além de serem ocupadas por poucas pessoas, características que facilitaríamos a implementação de ações de manejo e conservação com menos conflitos em comparação às áreas costeiras. Propostas adicionais para o manejo e conservação dessas áreas estão em tramitação na esfera governamental.

Atividades realizadas pelo PELD-ILOC

O objetivo principal do PELD-ILOC é monitorar em longo prazo as comunidades recifais das ilhas oceânicas brasileiras. Os componentes biológicos monitorados pelo PELD-ILOC incluem as comunidades bentônicas (*e.g.* algas, corais e outros invertebrados) e peixes recifais, variáveis oceanográficas (*e.g.* oscilações na temperatura da água), além de indicadores de microrganismos associados aos corais, bem como a diversidade genética e funcional desses componentes nas ilhas oceânicas brasileiras. A associação das informações obtidas em cada um desses componentes produz bons indicadores da saúde e funcionamento do ecossistema frente aos impactos antropogênicos, incluindo mudanças globais (Figura 1).



Figura 1. Estrutura para pesquisa e diversidade de organismos marinhos no ASPSP. (A) Vista da estação científica desde a enseada; (B) Fundo marinho dominado pela alga *Caulerpa racemosa* var *peltata*; (C) Pesquisador estendendo trena para o monitoramento da assembleia de peixes recifais no arquipélago; (D) Cardumes de espécies pelágicas (*Caranx crysos*) que usam o Arquipélago como área de refúgio e forrageamento. Fotos: Edson Faria-Jr.

Figure 1. Structure for research and diversity of marine organisms in the SPSPA. (A) View of the scientific station from the Enseada; (B) Marine bottom dominated by the algae *Caulerpa racemosa* var *peltata*; (C) Researcher performing underwater visual census to assess the fish assemblage in the Archipelago; (D) Group of pelagic species (*Caranx crysos*) that use the archipelago as an area of refuge and foraging. Photos: Edson Faria-Jr.

Resultados do Monitoramento de Longa Duração

Peixes recifais

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) é um dos menores e mais isolados arquipélagos tropicais do mundo. Apesar de ser reconhecido como um dos locais com o menor número de espécies de peixes recifais já registrado (FEITOZA *et al.*, 2003; KULBICKI *et al.*, 2013), apresenta uma elevada taxa de endemismo (9,5%) dentro do

Atlântico (ROBERTSON 2001; FLOETER *et al.*, 2008). Em comparação a outras ilhas oceânicas brasileiras, a ictiofauna do ASPSP é bem conhecida dentre os recifes considerados rasos de até 50 m de profundidade (LUBBOCK e EDWARDS, 1981; VASKE *et al.*, 2005; LUIZ *et al.*, 2015). Por outro lado, seus recifes profundos ou mesofóticos ainda são pouco

estudados, mas explorações recentes descreveram a estrutura das comunidades de peixes até 90 m de profundidade (ANDERSON *et al.*, 2017; ROSA *et al.*, 2015), sendo que novas espécies foram amostradas em recifes mais profundos (VASKE *et al.*, 2008a). Até o momento, foram citadas um total de 60 espécies pertencentes a 24 famílias de peixes recifais para o ASPSP, sendo Muraenidae e Labridae (7 espécies cada), Carangidae e Pomacentridae (5 espécies cada), as mais importantes em termos de riqueza, abundância e biomassa (FEITOZA *et al.*, 2003; LUIZ *et al.*, 2015). Dentre as espécies endêmicas pode-se citar *Prognathodes obliquus* (Chaetodontidae;

Figura 2A), *Enneanectes smithi* (Tripterygiidae), *Choranthias salmopunctatus* (Serranidae; Figura 2B), *Emblemariopsis* sp. (Chaenopsidae) e *Stegastes sanctipauli* (Pomacentridae; Figura 2C) - a espécie endêmica mais abundante (LUIZ *et al.*, 2015), além de morfotipos diferenciados de *Holacanthus ciliaris*, os quais por causa do isolamento geográfico, apresentam padrões de cor e forma diferenciados dos espécimes comumente observados na costa (morfo-tipo azul; Figura 2D) (LUIZ-JUNIOR, 2003). A maior parte das espécies presentes no Arquipélago (40%) possui ampla distribuição no Oceano Atlântico e são espécies consideradas generalistas.



Figura 2. Espécies endêmicas de peixes recifais encontradas no ASPSP. (A) *Prognathodes obliquus*; (B) *Choranthias salmopunctatus*; (C) *Stegastes sanctipauli*; e (D) morfotipo azul de *Holacanthus ciliaris*. Fotos: Luiz A. Rocha.

Figure 2. Endemic species of reef fish found in SPSPA. (A) *Prognathodes obliquus*; (B) *Choranthias salmopunctatus*; (C) *Stegastes sanctipauli*; and (D) blue morphotype of *Holacanthus ciliaris*. Photos: Luiz A. Rocha.

O monitoramento das assembleias de peixes no ASPSP tem sido realizado anualmente, sempre durante a mesma estação sazonal ao longo dos últimos cinco anos. A amostragem é realizada através de censos visuais utilizando transectos de 40m² (20x2) replicados (n=30 dividido por 3 profundidades) dentro da enseada, entre 5 e 20 metros de profundidade e, até o momento totaliza 344 censos. Nesse método o mergulhador nada pelo transecto desenrolando uma trena com sua extremidade presa ao substrato, enquanto anota em uma placa de PVC as espécies de peixes presentes na coluna d'água, o número de indivíduos e tamanho estimado de cada um com base no seu comprimento total (CT). Ao final de cada transecto, o mergulhador retorna recolhendo a trena e anotando os mesmos dados referentes às espécies associadas ao fundo e de hábitos crípticos. A biomassa dos indivíduos é estimada usando a conversão alométrica de comprimento-peso: $W = a \cdot TL^b$, onde os parâmetros a e b são constantes específicas da espécie obtidas da literatura (FROESE e PAULY, 2016), TL é o comprimento total estimado em centímetros de cada indivíduo durante os censos visuais e W é o peso em gramas. As espécies de peixes recifais observadas durante os censos visuais foram classificadas em quatro grupos tróficos (planctívoro, bentívoro, onívoro, carnívoro) baseadas em informações sobre suas dietas e modos de alimentação (FERREIRA *et al.*, 2004).

Nossos primeiros resultados das comunidades de peixes, mostram que 90% do total de espécies reportadas no ASPSP têm sido observadas ao longo dos anos de monitoramento. Adicionalmente, observamos pequenas variações na densidade e na biomassa de peixes (Figura 3). Por exemplo, foi verificada uma diminuição na densidade média geral de peixes recifais entre os anos de 2011 e 2015, seguida de um período de estabilização com uma pequena tendência ao aumento no ano de 2017 (Figura 3A). Entretanto, este padrão não foi seguido por uma variação correspondente na biomassa total da assembleia de peixes, a qual se

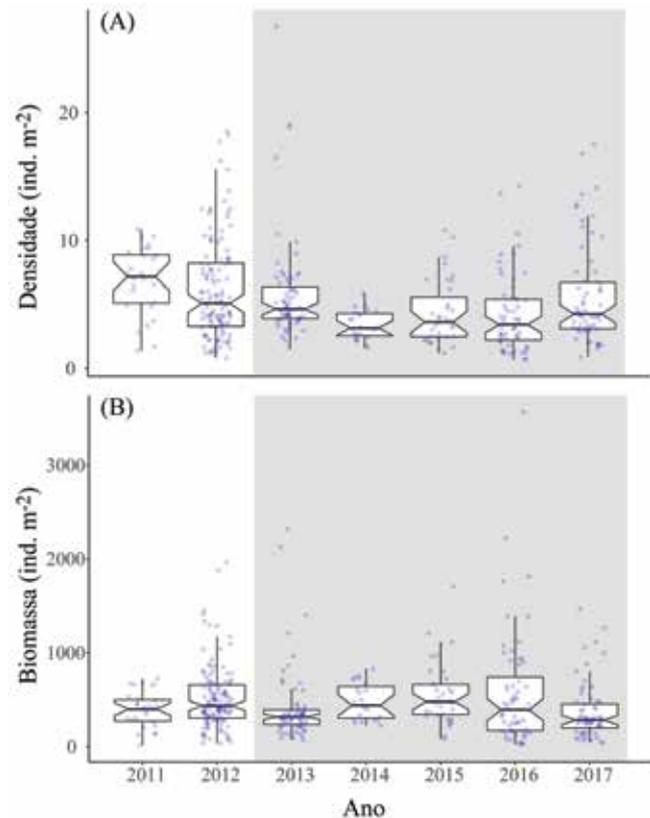


Figura 3. Variação temporal da assembleia de peixes recifais no ASPSP em relação à densidade (A) e biomassa (B). O período sombreado é relativo ao período de atuação do projeto PELD-ILOC. As caixas representam a mediana (linha preta), os quartis superiores-inferiores e os intervalos de confiança 95%.

Figure 3. Temporal variation of the reef fish assemblage in in SPSPA in relation to density (A) and biomass (B). The shaded period is related to the period of operation of the PELD-ILOC project. The boxes represent the median (black line), the upper-lower quartiles and the 95% confidence intervals.

mostrou estável ao longo dos anos com pequenas variações sendo detectadas (Figura 3B).

Por outro lado, tanto a densidade quanto a biomassa de grupos tróficos ao longo do tempo variaram provavelmente devido à presença de numerosas espécies formadoras de cardumes, como os abundantes *Chromis multilineata* (espécie

planctívora) e *Melichthys niger* (espécie onívora), ou ainda devido a eventos de recrutamento de populações locais, como no caso de *Stegastes sanctipauli*, cujos pequenos recrutas são comumente observados até profundidades de 25 metros. Desde o início do PELD em 2013 foram realizadas cinco expedições nas quais nenhuma espécie de tubarão recifal foi registrada. De fato, LUIZ e EDWARDS (2011) sugerem que *Carcharhinus galapagensis* esteja funcionalmente extinto no ASPSP devido à grande diminuição de sua população que era abundante na Enseada em tempos históricos. Dados de telemetria, entretanto, tem indicado que essa espécie e outras de tubarões tem sido detectadas em locais mais afastados das ilhas (HAZIN *et al.*, Capítulo 10). O uso de BRUVs (*Baited Remote Underwater Videos*) poderá gerar informações complementares sobre o estado das populações de grandes predadores ao

redor do ASPSP. Esses métodos utilizam câmeras remotas, são menos invasivos e mais eficientes para detecção de espécies de predadores de topo de cadeia, como tubarões. A série temporal de dados sobre peixes recifais no ASPSP ainda é curta para a determinação de padrões de médio e longo prazo, ressaltando a importância da manutenção e incremento de programas de monitoramento para entender a dinâmica local das populações de peixes recifais e outros organismos.

Seguindo as tendências temporais observadas para os valores de densidade e biomassa, o tamanho médio das espécies em grupos tróficos observados nos recifes do ASPSP apresentou pouca variação, com exceção dos peixes carnívoros que tiveram uma tendência de aumento de tamanho entre os anos 2013 e 2015, retornando a valores médios nos dois últimos anos de monitoramento (Figuras 4 e 5).

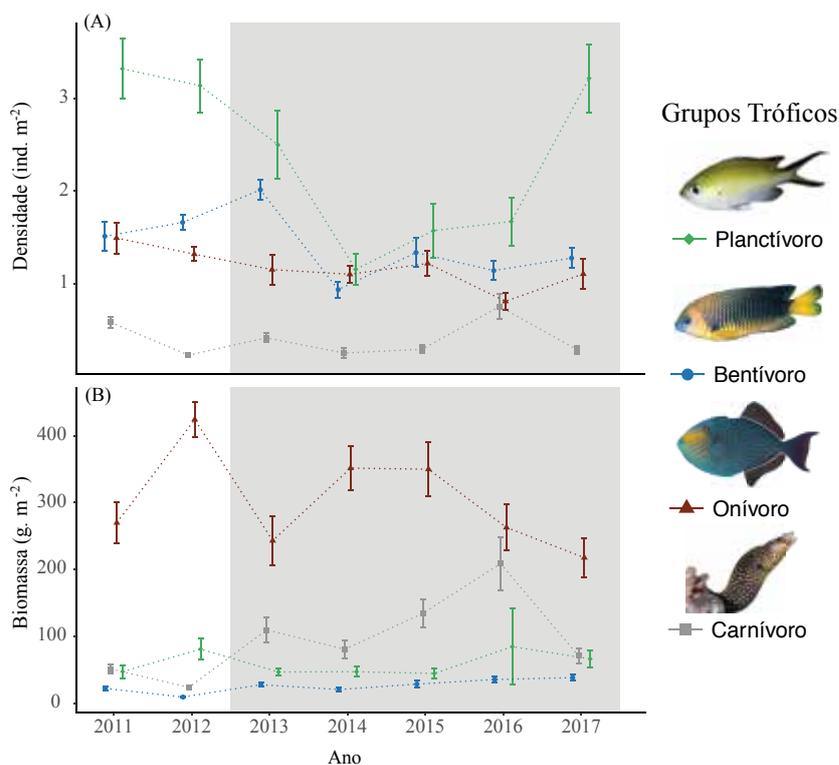


Figura 4. Variação temporal de (A) densidade e (B) biomassa (média + DP) dos grupos tróficos mais abundantes dentre os peixes recifais no ASPSP. O período sombreado é relativo ao período de atuação do projeto PELD-ILOC.

Figure 4. Temporal variation of (A) density and (B) biomass (mean + SD) of the most abundant trophic groups of reef fish in SPSPA. The shaded period is related to the period of operation of the PELD-ILOC project.

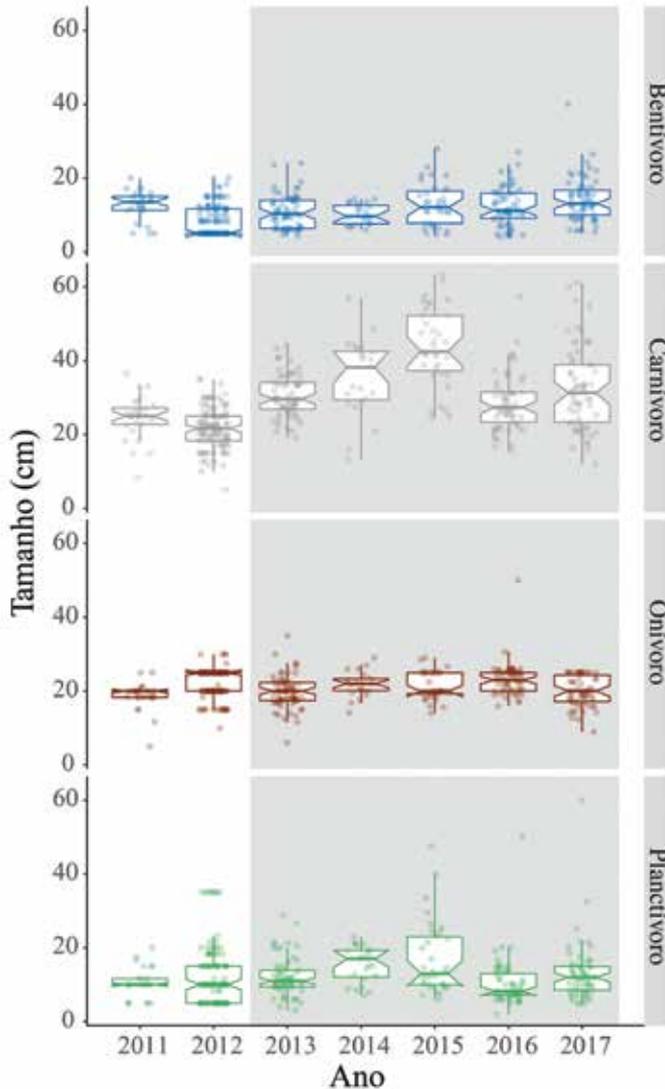


Figura 5. Variação temporal do tamanho corporal médio dos peixes recifais de acordo com os grupos tróficos observados no ASPSP. O período sombreado é relativo ao período de atuação do projeto PELD-ILOC. As caixas representam a mediana (linha preta), os quartis superiores-inferiores e os intervalos de confiança 95%.

Figure 5. Temporal variation of mean body size of reef fish according to the trophic groups observed in SPSPA. The shaded period is related to the period of operation of the PELD-ILOC project. The boxes represent the median (black line), the upper-lower quartiles and the 95% confidence intervals.

Comunidades bentônicas

No ASPSP as comunidades bentônicas cobrem substratos rochosos em quatro ambientes distintos: 1) piscinas de maré na zona emersa do arquipélago; 2) dentro da enseada, com fundo com inclinações entre 10° e 45° e profundidades entre 0-35 m; 3) nos paredões expostos no entorno do arquipélago com inclinação acentuada (70-90°), estendendo-se até a zona afótica (> 150 m); e 4) em pequenos platôs, como na face NE da ilha Belmonte e em recifes fundos em frente a enseada (70-150 m). O impacto das ondas e o hidrodinamismo são relativamente elevados ao longo de todo o ano, mas particularmente altos no verão e em períodos de maré grande (luas cheia e nova), com condições mais amenas na face NO, incluindo a enseada. A primeira amostragem das comunidades bentônicas do ASPSP foi realizada em 1979, na expedição de Cambridge (EDWARDS e LUBBOCK, 1983). Estes autores dividiram as comunidades bentônicas do ASPSP em seis fisionomias diferentes:

- 1) piscinas-de-maré, dominadas pelos zoantídeos *Palythoa caribaeorum* e *Zoanthus sociatus*, algas calcárias incrustantes e tufo filamentosos;
- 2) zona exposta (face NE-E) do ASPSP, dominado por macroalgas frondosas e algas calcárias em profundidades de até 4 m;
- 3) zona do infralitoral na face protegida do ASPSP (NO; dentro da enseada) entre 1-8 m de profundidade; dominância de *P. caribaeorum* com áreas dominadas por *Caulerpa racemosa* var. *peltata* e algas calcárias incrustantes em microhabitats com maior hidrodinamismo;
- 4) "zona da *Caulerpa*", com substrato dominado por densas florestas de *C. racemosa* em profundidades de até 36 m, com áreas alternadas recobertas por esponjas e o briozoário *Margaretta buski* na porção mais funda;
- 5) zona de sub-*Caulerpa* (36-60 m), onde há o desaparecimento dessa alga e a comunidade

passa a ser substituída pelas macroalgas *Dictyota* sp., *Bryopsis pennata* e *Gelidiosis* sp., algas calcárias incrustantes e o briozoário *M. busquei*;

6) zona composta por substratos não consolidados, constituído por seixos e sedimento grosseiro na entrada da enseada e que se acumula em pequenos platôs em zonas mais fundas em frente a enseada. Os únicos dois corais escleractíneos zooxantelados registrados no ASPSP (*Madracis decactis* e *Scolymia wellsii*) ocorrem predominantemente em profundidades abaixo dos 30m, na zona de sub-*Caulerpa*, e por isso ainda não são monitorados devidamente como nas outras ilhas.

Mais recentemente, levantamentos de fauna e flora de organismos bentônicos foram realizados com listas de espécies que incluem algas, cnidários, crustáceos e moluscos (PEREIRA *et al.*, 2010; AMARAL *et al.*, 2010). No presente estudo, as comunidades bentônicas do ASPSP foram amostradas quantitativamente utilizando-se imagens padronizadas (foto-quadrados) do fundo (MAGALHÃES *et al.*, 2015). Estes resultados quantitativos, apesar de mais detalhados, descrevem um padrão geral que concorda com as descrições feitas por Edwards e Lubbock (1983). Algumas diferenças incluem: a zona dominada por *P. caribaeorum* dentro da enseada que se estende mais fundo do que previamente registrado (0-20 m) e a alta prevalência de algas filamentosas (tufos), os quais não foram registrados por Edwards e Lubbock (1983) (MAGALHÃES *et al.*, 2015). As comunidades bentônicas da zona mesofótica entre 30-90 m do ASPSP incluem extensas florestas de corais negros ramificados do gênero *Tanacetipathes*, as quais são utilizadas como refúgio por espécies endêmicas de peixes como *Bodianus insularis* e *Prognathodes obliquus* (ROSA *et al.*, 2016).

Os resultados aqui mostrados correspondem aos anos de 2013 a 2017 onde as amostragens foram realizadas por fotografia subaquática, utilizando quadrados de 50x50 cm, e posteriormente

analisadas no computador com o software CPCe (*Coral Point Count with Excel extensions*). Os dados foram divididos em duas profundidades: raso (3-10 m) e fundo (12-18 m), sempre dentro da enseada.

Os organismos avaliados foram agrupados em oito categorias diferentes pelas características comuns entre eles:

- 1) Algas calcárias articuladas (ACA), ocorrendo sozinhas ou acompanhadas de outras algas formando tufos, pertencentes predominantemente ao Filo Rhodophyta (algas vermelhas). Exemplos de algumas espécies (Figura 6E) de ACA no ASPSP: *Jania adhaerens*, *J. capillacea*, *J. rubens*, *J. cubensis* e *J. pumila* (MAGALHÃES *et al.*, 2015);
- 2) algas calcárias incrustantes (ACI) fazem parte das algas calcárias vermelhas num sentido mais amplo, mas diferem das outras porque seu crescimento vai formando uma camada sobre o fundo;
- 3) alga cenocítica estolonífera (ACE), onde unicamente se posiciona a Chlorophyta (algas verdes) *Caulerpa racemosa* var. *peltata* (Figura 6C), a maior espécie deste gênero no mundo com ramos podendo chegar a 57 cm de altura (PRECIOSO, 2010);
- 4) alga foliácea (AFO) referente à espécie *Dictyota menstrualis* (Figura 6D), que faz parte das Phaeophyceae (algas pardas) e é conhecida por ser muito rica em substâncias bioativas;
- 5) ascídias (ASC), invertebrados solitários ou predominantemente coloniais heterotróficos que no ASPSP se encontram tanto no fundo como no raso (Figura 6D), sendo as principais espécies no local: *Didemnum* sp., *Lissoclinum fragile*, *Trididemnum* sp. (MAGALHÃES *et al.*, 2015);
- 6) porifera (POR); as esponjas possuem diversas formas de crescimento como indivíduos solitários, coloniais, ramificados e incrustantes,

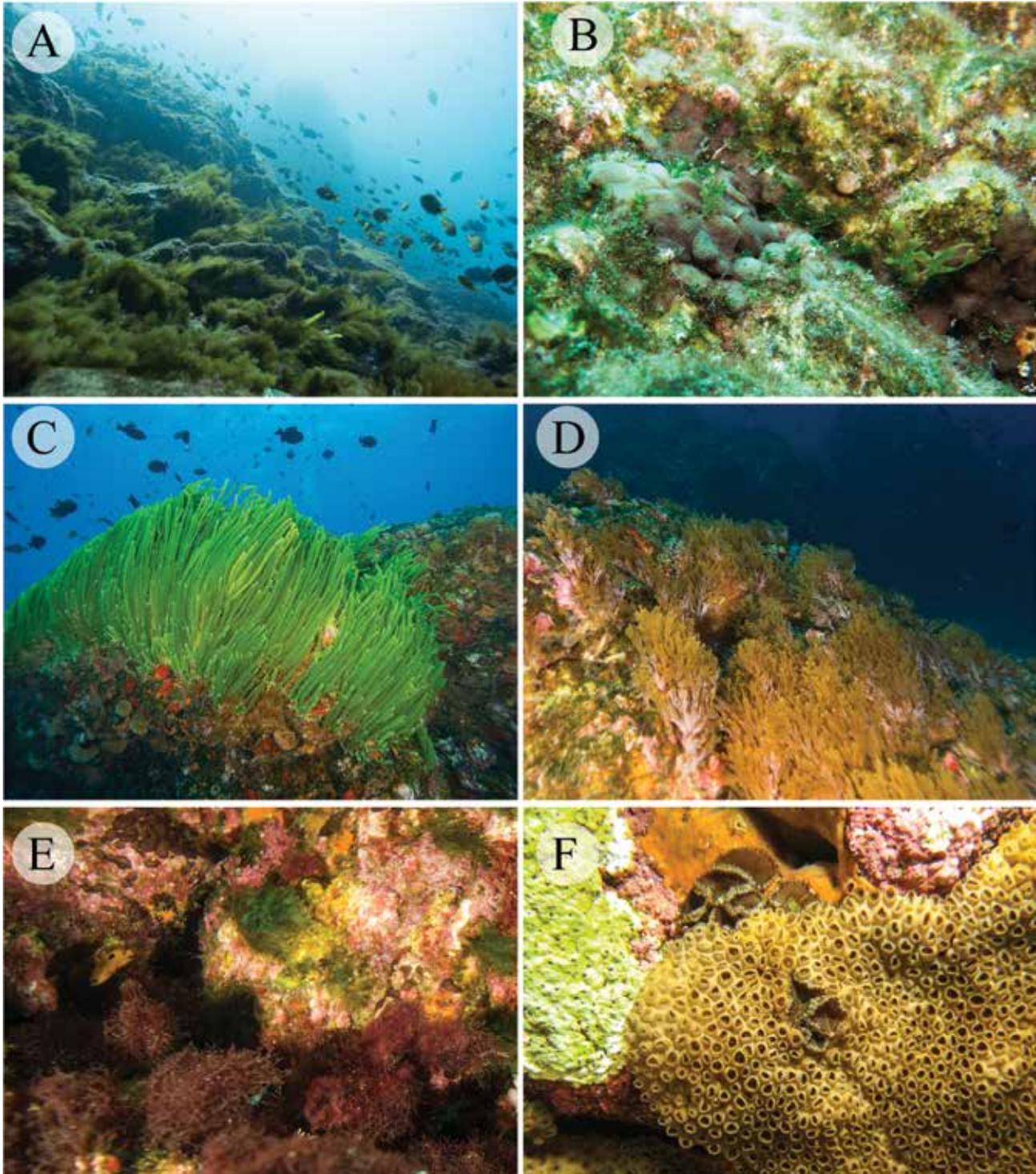


Figura 6. Comunidade bentônica observada no ASPSP. (A) Tufos filamentosos (TUR), (B) ascídias (ASC), (C) *Caulerpa racemosa* var. *peltata*, (D) *Dictyota menstrualis*, (E) algas calcárias articuladas (ACA), e (F) zoantídeos (ZOA), representados por *Palythoa caribaeorum* e *Zoanthus* sp. Fotos: Edson Faria-Jr.

Figure 6. Benthic community observed in SPSPA. (A) Filamentous turf (TUR), (B) Ascidians (ASC), (C) *Caulerpa racemosa* var. *peltata*, (D) *Dictyota menstrualis*, (E) articulated calcareous algae (ACA) and (F) zoanthids (ZOA), represented by *Palythoa caribaeorum* and *Zoanthus* sp. Photos: Edson Faria-Jr.

sendo reconhecidas por suportarem fortes distúrbios e terem alta capacidade de regeneração (WULFF, 2006). Algumas esponjas ocorrem predominantemente associadas à zona dominada por *C. racemosa* já que esta alga parece funcionar como refúgio (micro-habitat) ideal para elas (MORAES *et al.*, 2009). Para o Arquipélago existem os registros de *Discodermia dissoluta*, *Crella brasiliensis*, *Asteropus niger*, entre outras (MAGALHÃES *et al.*, 2015);

7) tufos filamentosos (TUR), são algas filamentosas formando tapetes, com ciclos de vida curtos e em geral oportunistas (liberam muitos esporos várias vezes ao longo do ano), o que naturalmente reflete variações de dominância em intervalos de tempos longos ou curtos (STENECK e DETHIER, 1994). Algumas espécies que compõem os tufos no ASPSP são: clorofíceas - *Caulerpella ambigua*, *Cladophora vagabunda*, *Bryopsis pennata* – e rodofíceas - *Gelidiopsis planicaulis*, *Ceramium spp.*, *Falkenbergia sp.* entre outras (Figura 6A);

8) zoantídeos (ZOA) são invertebrados coloniais de crescimento massivo, como *P. caribaeorum* e *Zoanthus sp.* (Figura 6F), os quais têm maior cobertura no raso.

Ao longo do tempo de monitoramento do PELD-ILOC, observou-se que as categorias com maior cobertura foram TUR, ACI e ZOA (Figura 7), com alguma variação dependendo da profundidade. TUR e ZOA apresentaram maior cobertura no raso. Essas informações são coincidentes com Edwards e Lubbock (1983) e Magalhães *et al.* (2015) exceto pela pouca participação da alga *Caulerpa racemosa* var. *peltata* (ACE) a qual ocorre predominantemente nas paredes verticais nas margens da enseada e no entorno da ilha. Por outro lado, as ACI, que são um conglomerado de espécies na verdade, tem uma maior cobertura no fundo. Em geral, ambientes em que essas algas predominam sofrem estresses bióticos ou abióticos de forma intensa já que elas possuem poucas estratégias para evitar o

sobrecrescimento de seus talos. No caso do ASPSP, a ação hidrodinâmica é relativamente elevada e uma variável ambiental importante, já que a pressão de herbivoria por exemplo, não é evidente pela quase ausência de ouriços-do-mar, moluscos raspadores e poucas espécies de peixes herbívoros (LUIZ *et al.*, 2015).

As categorias com menor cobertura no ASPSP foram AFO e POR (Figura 7). No caso da primeira (AFO), que se refere a *D. menstrualis*, sua presença é verificada apenas na faixa de profundidade entre 12 e 18 m, porém com baixa cobertura em alguns

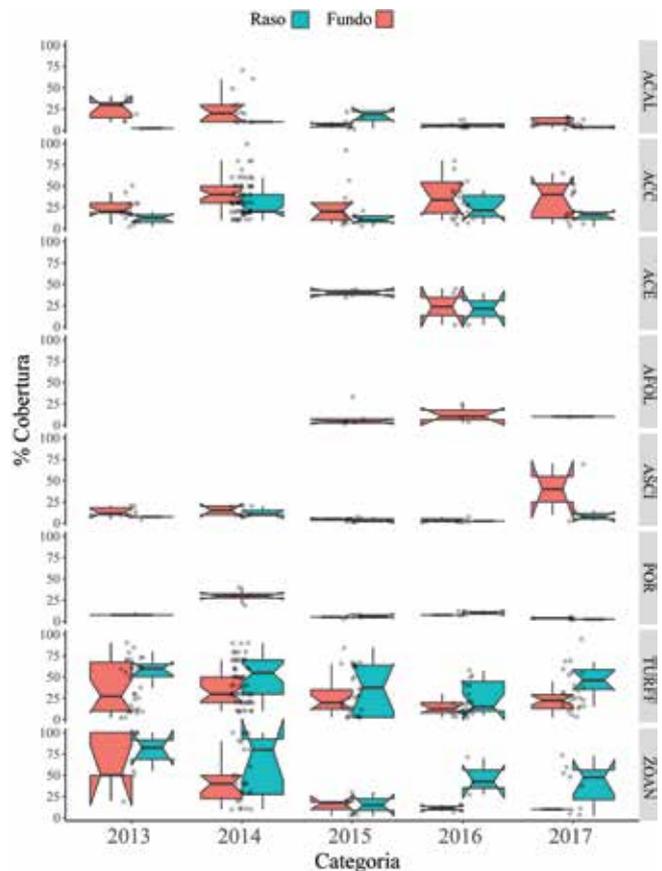


Figura 7. Variação temporal das categorias de organismos bentônicos, encontrados no ASPSP. As caixas representam a mediana (linha preta), os quartis superiores-inferiores e os intervalos de confiança 95%.

Figure 7. Temporal variation of the benthic categories found in SPSPA. The boxes represent the median (black line), the upper-lower quartiles and the 95% confidence intervals.

transectos. Essa profundidade corresponde de fato ao seu limite superior de distribuição (EDWARDS e LUBBOCK 1983; MAGALHÃES *et al.*, 2015). Por sua fragilidade de talo e de fixação, essa distribuição parece ser um refúgio espacial contra o forte hidrodinamismo das profundidades menores. No caso de esponjas (POR) é possível que a pouca cobertura observada tenha sido resultado de uma subestimação pelo método de amostragem já que a tendência das esponjas é se localizar sob as frondes de *C. racemosa* var. *peltata* ou em fendas, tocas e locais ao abrigo da luz direta, dificultando assim a sua visualização em fotoquadrados.

Dinâmica do caranguejo aratu (*Grapsus grapsus*)

Devido ao isolamento do ASPSP, a produtividade do ambiente recifal está associada a alterações locais do fluxo de correntes e à transferência de matéria e energia do Arquipélago, para as águas rasas adjacentes. O caranguejo aratu, *Grapsus grapsus* (Linnaeus, 1758), é muito abundante no supra litoral dos costões rochosos nas ilhas (Figura 8), sendo uma espécie chave na ligação entre o ambiente emerso e recifal. *Grapsus grapsus* forrageia frequentemente nos costões rochosos alimentando-se de algas epilíticas e fauna



Figura 8. *Grapsus grapsus*. (A) agregações de *G. grapsus*, (B) posicionamento dos caranguejos na região entre marés, (C) Macho adulto de caranguejo *G. grapsus*. Fotos João Paulo Krajewski.

Figure 8. *Grapsus grapsus*. (A) Aggregations of *G. grapsus*, (B) positioning of the crabs in the intertidal region, (C) adult male *G. grapsus*. Photos: João Paulo Krajewski.

associada, enriquecendo continuamente as águas rasas com suas pelotas fecais. Esses caranguejos predam ovos e filhotes recém eclodidos de aves marinhas e tartarugas, tendo polvos e moreias como seus principais predadores (FREIRE *et al.*, 2010). No Atlântico Sul Ocidental, *G. grapsus* ocorre somente nas ilhas oceânicas brasileiras, tornando a espécie vulnerável a mudanças ambientais nos oceanos. Uma vez que os pequenos caranguejos recrutam na parte superior dos costões rochosos, a espécie utiliza apenas correntes marinhas superficiais para dispersão, não utilizando os montes submersos como trampolins ecológicos. Existe conectividade genética com as populações do Atol das Rocas e Fernando de Noronha (TESCHIMA *et al.*, 2016), mas uma vez que as larvas iniciais estão restritas a 500 metros de distância do ASPSP (BRANDÃO *et al.*, 2012), a população local deve ser mantida por auto-recrutamento. A reprodução contínua de *G. grapsus* ao longo do ano introduz uma grande quantidade de matéria – na forma de larvas – no habitat recifal submerso (BRANDÃO *et al.*, 2012; KOETTKER *et al.*, 2009). Assim como em outros ambientes marinhos, a maioria das larvas de caranguejos são imediatamente predadas por larvas de peixes logo que entram na coluna d'água. O monitoramento em longo prazo das populações do caranguejo-aratu justifica-se pela sua influência direta no sistema pelágico recifal e por sinalizar as condições ambientais dos costões rochosos adjacentes.

Indivíduos de *G. grapsus* foram contados ao longo de dez transecções de 20x2 m na parte central da Ilha Belmonte para a estimativa de sua abundância. Os parâmetros populacionais foram obtidos com a captura e posterior liberação de 100 caranguejos. Os caranguejos foram medidos com paquímetro (largura da carapaça, LC), identificados o sexo, a presença de massa ovígera e formato do abdômen nas fêmeas, e o padrão de coloração. A mutilação foi avaliada pela ausência de pereiópodos (patas) e quelípodos (garras), e presença de bolsa de regeneração de apêndices. Em relação à abundância de caranguejos a grande

variabilidade dos dados entre 2003 e 2005 deve-se aos diferentes locais amostrados, enquanto que durante o PELD-ILOC a estimativa foi realizada preferencialmente na região central da Ilha Belmonte. De forma geral, existe uma tendência à diminuição da abundância de caranguejos ao longo do tempo, atingindo um valor mais baixo em 2017 (Figura 9).

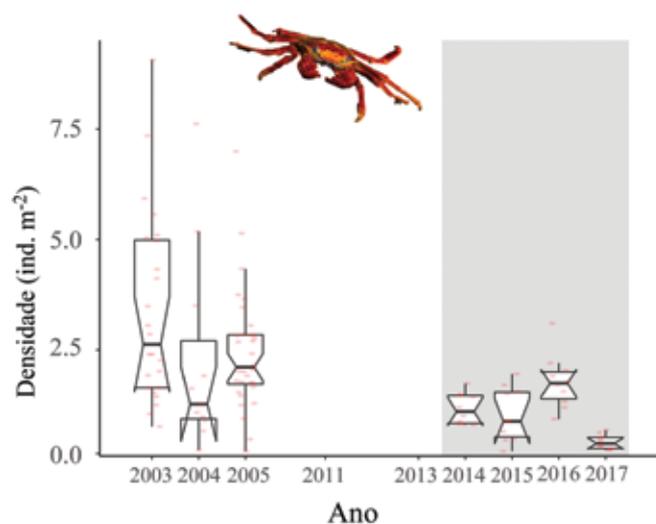


Figura 9. Variação na densidade de *Grapsus grapsus* ao longo do tempo no ASPSP. As caixas representam a mediana (linha preta), os quartis superiores-inferiores e os intervalos de confiança 95%.

Figura 9. Density variation of *Grapsus grapsus* in time in SPSPA. The boxes represent the median (black line), the upper-lower quartiles and the 95% confidence intervals.

A distribuição de tamanhos de caranguejos machos e fêmeas manteve-se estável ou com pequenas variações a partir de 2011 (Figura 10). A amostragem do PELD-ILOC concentrou-se em indivíduos maiores do que em amostragens anteriores. Houve uma tendência de diminuição do tamanho das fêmeas ovígeras a partir de 2011 (Figura 10), um resultado interessante para o monitoramento dessa população. Caso essa tendência seja confirmada nos próximos anos, haverá conseqüentemente uma diminuição da taxa de fecundidade e fornecimento de larvas para o ambiente recifal.

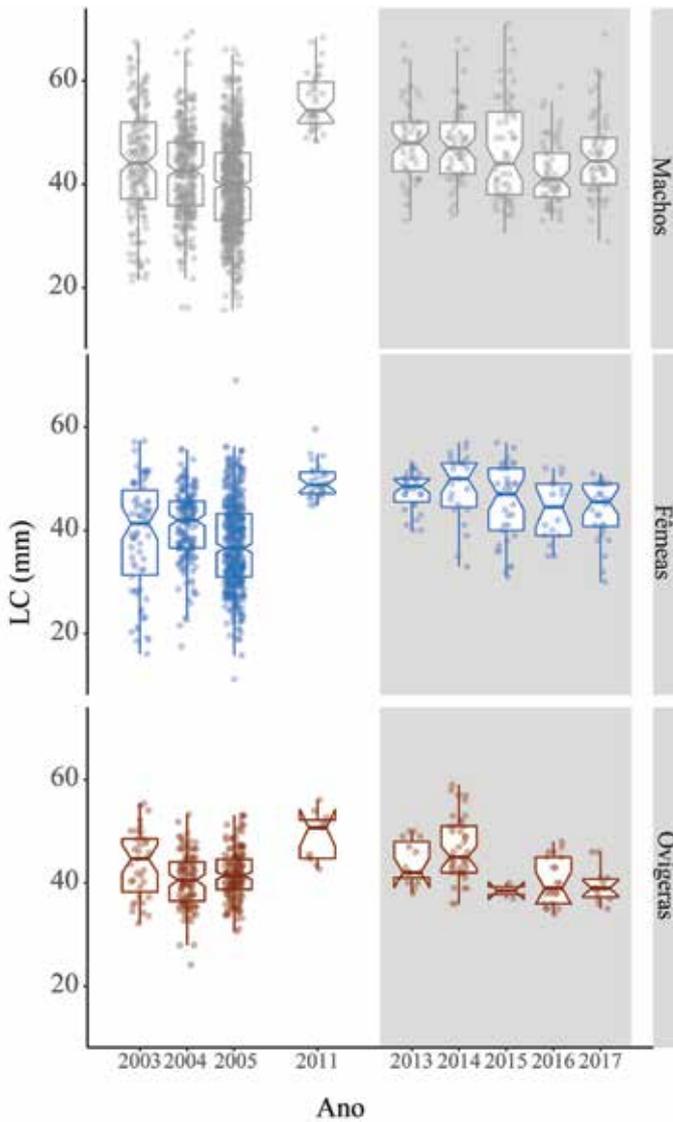


Figura 10. Variação no tamanho da carapaça (LC) ao longo do tempo em machos, fêmeas e fêmeas ovíferas no ASPSP. As caixas representam a mediana (linha preta), os quartis superiores-inferiores e os intervalos de confiança 95%.

Figure 10. Variation in carapace size (LC) over time of males, females and ovigerous females in SPSPA. The boxes represent the median (black line), the upper-lower quartiles and the 95% confidence intervals.

A proporção de caranguejos registrados com ausência de patas, patas em regeneração, ou perfurações na carapaça foi muito alta, chegando a aproximadamente metade da população em alguns anos (Tabela I). Nas amostragens entre 2003 e 2005, em média apenas 24% dos caranguejos apresentava mutilações (FREIRE *et al.*, 2011). A elevada mutilação tem efeitos no crescimento e maturidade sexual, alterando a estrutura populacional, e está relacionada a diferentes condições ambientais que favorecem o canibalismo. No momento, não é possível saber quais fatores ambientais contribuíram para essa alta taxa de mutilação. Houve grande variabilidade na proporção de fêmeas ovíferas, com destaque para o baixíssimo valor em 2015.

Tabela I. Parâmetros populacionais: porcentagem de fêmeas ovíferas (FO) e taxa de mutilação de *Grapsus grapsus*.

Table I. Population parameters: percentage of ovigerous females (FO) and mutilation rate of *Grapsus grapsus*.

Ano	FO (%)	Mutilação (%)
2013	33.3	48
2014	65.7	30
2015	5.1	49
2016	56.8	21
2017	36.4	46

A estrutura da população do caranguejo-aratu, *G. grapsus*, parece estar estável ao longo do tempo. Uma vez que dados pretéritos sugerem que a população se mantém por auto-recrutamento, com a continuidade do monitoramento, parâmetros de risco para abundância de caranguejos como a taxa mutilação e tamanho médio de fêmeas ovíferas poderão ser acompanhados. É necessária uma série temporal mais longa para verificação das tendências observadas na estrutura da população e abundância de caranguejos.

Perspectivas futuras sobre o monitoramento das comunidades recifais no ASPSP

Os ambientes insulares como o do ASPSP, únicos em termos de diversidade e endemismo comparados à costa do Brasil, ainda sem os impactos comuns ocasionados pela alta taxa populacional costeira, necessitam do monitoramento de longo prazo como medida essencial ao entendimento de diversos aspectos sobre a dinâmica temporal e espacial das comunidades recifais. Isso tem importância vital no que diz respeito à possível fragilidade das cadeias tróficas do ASPSP frente a quaisquer impactos. Em consequência da baixa riqueza de espécies comparado à costa, devido ao isolamento, o ASPSP também possui uma baixa redundância funcional. Efeitos da pesca desordenada podem, por exemplo, diminuir ou até extinguir espécies que tenham um papel funcional importante e que não tenham substitutos. Ainda nos dias atuais, ocorre na região a pesca de espécies de peixes pelágicos de passagem como o atum e dourado e outros residentes como o xaréu e o peixe-rei, esses últimos com interações tróficas importantes nos recifes (VASKE *et al.*, 2006; 2008b). Tanto a pesca dos pelágicos de passagem, bem como o efeito da pesca intensa de espinhel no passado na região, tiveram efeitos nas cadeias tróficas que ainda não foram descritos. Porém, predadores de topo como tubarões foram certamente afetados em décadas passadas (LUIZ e EDWARDS, 2011). Além dos impactos da pesca no entorno do arquipélago, ocorre também o descarte localizado de resíduos orgânicos, que também tem efeitos ainda desconsiderados e devem ser monitorados em longo prazo.

Além do avanço científico, as informações geradas pelo projeto PELD-ILOC podem subsidiar tomadas de decisão para mitigar esses impactos como, por exemplo, no ordenamento da pesca e na gestão de unidades de conservação. Quanto ao monitoramento de peixes e comunidades bentônicas, pretende-se estender as atividades para os recifes mesofóticos, com profundidades entre 30 e 90 metros utilizando

veículos subaquáticos operados remotamente, complementando levantamentos iniciados recentemente com uso de armadilhas lançadas entre 170 e 700 metros nas adjacências do ASPSP, com importantes registros de novas ocorrências e prováveis novas espécies (NUNES *et al.*, 2016; 2017). Informações sobre os recifes profundos brasileiros são escassas, mas evidências apontam que mesmo esses ambientes já estão impactados pela pesca e poluição.

Tanto nos recifes rasos, quanto nos profundos, dados de temperatura medidos *in situ* serão também trabalhados associados a dados de correntes de modo a construir um modelo de previsão de mudanças climáticas. Um aspecto relevante é que os dados gerados pelo projeto PELD-ILOC devem servir de base e apoio para outras pesquisas na região. Visto tratar-se de um projeto em rede (www.sisbiotamar.ufsc.br), todos os dados estão disponíveis. Da mesma maneira, o monitoramento a longo prazo no ASPSP tem um papel importante na formação de recursos humanos. Durante os cinco anos de monitoramento, dezenas de estudantes de graduação e pós-graduação tiveram a oportunidade de vivenciar expedições de pesquisa científicas em um dos locais mais remotos do oceano Atlântico, sendo capacitados com as técnicas mais atuais sobre monitoramento da biota recifal.

O atual cenário de corte de recursos para a pesquisa no Brasil é desafiador. O monitoramento atualmente conta com recursos do CNPq por meio do Programa de Pesquisa Ecológica de Longa Duração (<http://cnpq.br/sitios-peld>). Porém o aporte de recursos atual fomenta apenas as atividades basais de coleta de dados. Um dos desafios futuros para o programa de monitoramento é a captação de recursos para a continuidade e ampliação das atividades. Em um cenário ideal, e sendo as pesquisas de monitoramento vitais no entendimento da dinâmica dos ecossistemas e sua gestão, futuras verbas de compensação e outras de cunho governamentais do uso do mar, devem dar prioridade ao monitoramento contínuo do ASPSP.

Referências Bibliográficas

- AMARAL F.M.D. *et al.* **Biodiversidade de cnidários bentônicos.** Em: Vaske Jr. T *et al.* 2010. Arquipélago de São Pedro e São Paulo: Histórico e Recursos Naturais. ISBN: 978-85-7563-515-5. Nave/Labomar. Fortaleza. 242 p. 2010
- ANDERSON W.D. *et al.* **Redescription of the Jeweled Gemfish, *Anthias asperilinguis* (Serranidae: Anthiadae), with comments on its ontogeny, phylogeny, and ecology.** *aqua, International Journal of Ichthyology.* 18(1): 25–30. 2017.
- BRANDÃO M.C. KOETTKER A.G. SANTAROSA-FREIRE A. **Distribution of decapod larvae in the surface layer of an isolated equatorial oceanic archipelago: the cases of benthic *Grapsus grapsus* (Brachyura: Grapsidae) and pelagic *Sergestes edwardsi* (Dendrobranchiata: Sergestidae).** *Helgoland Marine Research.* 67(1): 155–65. 2012.
- EDWARDS A. LUBBOCK R. **The Ecology of Saint Paul's Rocks (Equatorial Atlantic).** *Journal of Zoology.* 200(1): 51–69. 1983.
- FEITOZA B.M. *et al.* **Reef fishes of St. Paul's Rocks: new records and notes on biology and zoogeography.** *Journal of Ichthyology and Aquatic Biology.* 7(2): 61–82. 2003.
- FERREIRA C.E.L. *et al.* **Trophic structure patterns of Brazilian reef fishes: a latitudinal comparison.** *Journal of Biogeography.* 31: 1093–1106. 2004.
- FLOETER S.R. *et al.* **Atlantic reef fish biogeography and evolution.** *Journal of Biogeography.* 35: 22–47. 2008.
- FREIRE A.S. PINHEIRO M.A.A. KARAM-SILVA H. TESCHIMA. M.M. **Biology of *Grapsus grapsus* (Linnaeus 1758) (Brachyura, Grapsidae) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic Ocean.** *Helgoland Marine Research.* 65(3): 263–273. 2010.
- FROESE R. PAULY D. **FishBase. World wide web electronic publication.** Available: www.fishbase.org. Accessed 13 Jul 2016
- KOETTKER A.G. FREIRE A.S. SUMIDA P.Y.G. **Temporal diel and spatial variability of decapod larvae from St Pauls Rocks, an equatorial oceanic island of Brazil.** *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom.* 90(6): 1227–1239. 2009.
- KULBICKI *et al.* **Global Biogeography of Reef Fishes: A Hierarchical Quantitative Delineation of Regions.** *PlosOne.* 8(2): e81847. 2013.
- LUBBOCK R. EDWARDS A.J. **The fishes of Saint Paul's rocks.** *Journal of Fish Biology.* 18: 135–157. 1981.
- LUIZ O.J. EDWARDS A.J. **Extinction of a shark population in the Archipelago of Saint Paul's Rocks (equatorial Atlantic) inferred from the historical record.** *Biological conservation.* 144: 2873–2881. 2011.
- LUIZ O.J. *et al.* **Community structure of reef fishes on a remote oceanic island (St Peter and St Paul's Archipelago equatorial Atlantic): the relative influence of abiotic and biotic variables.** *Marine and Freshwater Research.* 66(8): 739–749. 2015.
- LUIZ-JUNIOR., O.J. **Colour morphs in a queen angelfish *Holacanthus ciliaris* (Perciformes: Pomacanthidae) population of St. Paul's Rocks, NE Brazil.** *Tropical Fish Hobbyist.* 51(5): 82–90. 2003.
- MAGALHÃES, G.M. *et al.* **Changes in benthic communities along a 0-60 m depth gradient in the remote St. Peter and St. Paul Archipelago (Mid-Atlantic Ridge Brazil).** *Bulletin of Marine Science.* 91(3): 377–96. 2015.
- MORAES F. *et al.* **As esponjas: passado, presente e futuro.** Em: Danielle de Lima Viana *et al.*, 2009. O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica. SECIRM. Brasília. 158–165. 2009.
- MORAIS R.A. FERREIRA C.E.L. FLOETER S.R. **Spatial patterns of fish standing biomass across Brazilian reefs, Southwestern Atlantic.** *Journal of Fish Biology.* 91: 1642–1667. 2017.
- NUNES D.M. FERREIRA R.C.P. HAZIN, F.H.V., FIDELIS, J. **Deep sea decapod crustaceans of São Pedro and São Paulo Arquipélago, Equatorial Atlantic, Brazil.** *Zootaxa.* 4324(2): 331–347. 2017.
- NUNES D.M. TRAVASSOS P. FERREIRA R. HAZIN F. **Distribution, relative abundance and diversity of deep-sea species at São Pedro and São Paulo Archipelago, Brazil.** *Latin American Journal of Aquatic Research.* 44(2): 228–237. 2016.
- PEREIRA S.M.B. BURGOS D.C.R. BANDEIRA-PEDROZA M.E. **Representantes da Flora.** Em: Vaske Jr.T. *et al.* 2010. Arquipélago de São Pedro e São Paulo: Histórico e Recursos Naturais. ISBN: 978-85-7563-515-5. Nave/Labomar. Fortaleza. 242 p. 2010.
- PRECIOSO N.L. **Aspectos ecológicos de *Caulerpa racemosa* var. *peltata* (Labouroux) Eubank do**

Arquipélago de São Pedro São Paulo. Monografia, Universidade Federal Fluminense. 2010

ROBERTSON D.R. **Population maintenance among tropical reef fishes: Inferences from small-island endemics.** *Proceedings of the National Academy of Sciences.* 98(10): 5667–70. 2001.

ROSA M.R. *et al.* **Mesophotic reef fish assemblages of the remote St. Peter and St. Paul's Archipelago Mid-Atlantic ridge, Brazil.** *Coral Reefs.* 35(1): 113–23. 2015.

STENECK R.S. DETHIER M.N. **A functional group approach to the structure of algal-dominated communities.** *Oikos.* 69: 476–498. 1994.

TABARELLI M. DUARTE DA ROCHA C.F. ROMANOWSKI H.P. DRUDE DE LACERDA L. PELD-CNPq **Dez anos do programa de pesquisas ecológicas de longa duração no Brasil: Achados, Lições e Perspectivas.** Ed. Universitária UFPE, Recife, Brasil. 2013.

TESCHIMA M.M. *et al.* **Large-scale connectivity of *Grapsus grapsus* (Decapoda) in the southwestern Atlantic oceanic islands: Integrating genetic and morphometric data.** *Marine Ecology.* 37(6): 1360–72. 2016.

VASKE Jr T. *et al.* **A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Journal of Applied Ichthyology.* 21(1): 75–79. 2005.

VASKE Jr T. *et al.* **A pesca comercial de peixes pelágicos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil.** *Tropical Oceanography.* Recife, 36 (2): 47–54. 2008b.

VASKE Jr T. HAZIN F.H.V. LESSA E.R.P. **Pesca e hábitos alimentares do peixe-rei, *Elagatis bipinnulata* (Quoy & Gaimard, 1825) (Pisces: Carangidae) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo.** *Arquivo de Ciências do Mar.* 39: 61–65. 2006.

VASKE Jr T. LIMA K.L. RIBEIRO A. LESSA R.P. **Record of the St. Helena scorpionfish, *Pontinus nigropunctatus* (Günther) (Scorpaeniformes: Scorpaenidae), in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Pan-American Journal of Aquatic Sciences.* 3(1): 46–48. 2008a.

WULFF J.L. **Resistance vs recovery: morphological strategies of coral reef sponges.** *Functional Ecology.* 20: 699–670. 2006.

Peixes pelágicos e prospecção em águas profundas no Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Fabio Hissa Vieira Hazin ¹
Alessandra Maria Advíncula Pires¹
Andréa Carla Lira dos Santos¹
Daniel Fadigas Viana²
Danielle de Lima Viana^{1,3}
Diogo Martins Nunes⁴
Ilka Siqueira Lima Branco Nunes¹
Isa Marielle Coutinho¹
Mariana Ribeiro Porto Araújo¹
Pollyana Christine Gomes Roque¹
Rafael de Santa Clara Gaston Filho¹
Rômulo Costa Pires Ferreira⁵
Vanessa Basante¹

09

Abstract

The Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) is a group of rocky islands, located in a strategic region for the development of research in various branches of marine science. However, most of the research so far conducted in SPSPA has been restricted to 50 m depth. To fill this gap, deep water surveys were carried out in the vicinity of SPSPA. As a result, a large number of different species of deep-water fish and crustaceans were collected, generating essential information about the diversity, ecology and biology of these groups, with several new species being recorded. Nine new species of teleost were recorded, increasing the current list of bony fish species in SPSPA by 9,3% and bringing the total number to 117. Six new species of crustaceans were also caught, all belonging to the order Decapoda, raising the number of species from 17 to 23. Fishing activity around SPSPA has also been monitored since 1998. Fisheries production in the SPSPA for all species showed an average of 150 t per year, with a peak of 250 t in 2003 and 2004 and a minimum of 64 t in 1998, when monitoring started. Yellowfin tuna accounted for more than half of the total catches in all years. Wahoo represented about 20% of the landings, followed by flying fish (10%) and rainbow runner (3%). No strong oscillations were observed in CPUE values of the main species caught in SPSPA over 18 years of monitoring, with values staying relatively stable over the years. Complementarily, the reproductive biology of pelagic species were also studied. All species studied so far have a higher reproductive activity, including spawning, in the first half of the year.

Introdução

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) é formado por um grupo de pequenas ilhas rochosas, desprovidas de qualquer tipo de vegetação, localizadas a cerca de 1.100 quilômetros do litoral do Estado do Rio Grande do Norte, em região privilegiada para o desenvolvimento de pesquisas em diversos ramos da ciência. A posição geográfica do ASPSP lhe confere uma significativa importância estratégica, por se localizar na rota de peixes de comportamento migratório, entre os quais alguns com alto valor econômico, como os atuns e a cavala. Desde a instituição do Programa Arquipélago, em julho de 1998, várias pesquisas vêm sendo realizadas sobre os peixes presentes nesse ecossistema insular. Durante muito tempo, porém, os esforços de pesquisa estiveram restritos às camadas mais rasas no entorno da ilha (até 50 m de profundidade) (LUBBOCK e EDWARDS, 1981, FEITOZA *et al.*, 2003, LUIZ-JR, 2003, VASKE *et al.*, 2003, VASKE *et al.*, 2005, FLOETER *et al.*, 2008, PINHEIRO *et al.*, 2011, BEZERRA *et al.*, 2011, VIANA, *et al.*, 2012, VIANA, *et al.*, 2013, LUIZ *et al.*, 2015), permanecendo uma grande lacuna de informações sobre as regiões mais profundas, que no entorno do ASPSP atingem uma profundidade de 4.000 m, a uma grande proximidade da porção emersa. Em razão disso, no intuito de suprir essa lacuna, no presente trabalho foram iniciadas campanhas exploratórias em águas profundas, que se somaram à continuidade das pesquisas sobre os peixes

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco (fhvhazin@terra.com.br);

2 University of California Santa Barbara;

3 Institut de Recherche pour le Développement;

4 Unidade Acadêmica de Serra Talhada (UAST/UFRPE);

5 Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Ceará.

pelágicos, com o objetivo, principalmente, de melhor conhecer a diversidade biológica do ASPSP.

A partir desse esforço, um número importante de diferentes espécies de peixes e de crustáceos de profundidade foram coligidos, contribuindo para gerar dados essenciais sobre a diversidade, ecologia e biologia desses grupos nas adjacências do ASPSP e, assim, de uma maneira mais ampla, nas ilhas oceânicas do Oceano Atlântico. Nesse capítulo, portanto, são apresentados os resultados dos últimos anos de pesquisa relacionados à ecologia de peixes pelágicos e os resultados das primeiras prospecções de espécies demersais, assim como o monitoramento da atividade pesqueira no entorno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Reprodução de peixes pelágicos

A reprodução dos peixes é um aspecto de grande importância para a manutenção dos estoques e equilíbrio ecológico do ambiente aquático (WELCOMME, 1979). Estudos sobre o ciclo de vida dos peixes ajudam a melhor compreender a sua interação com fatores abióticos e como os mesmos se adaptam aos novos ambientes. No presente estudo, a biologia reprodutiva de *Canthidermis sufflamen* (Mitchill, 1815), *Caranx lugubris* Poey, 1860, *Coryphaena hippurus* Linnaeus, 1758, *Ruvettus pretiosus* Cocco, 1829 e *Promethichthys prometheus* (Cuvier, 1832) foi estudada na expectativa de que as informações geradas possam contribuir para uma melhor compreensão sobre a biologia dessas espécies e, assim, para assegurar a sua conservação e exploração sustentável.

Prospecção em águas profundas

Após várias décadas de atividade pesqueira, campanhas exploratórias e prospecções no entorno do ASPSP, os dados atinentes à fauna de águas profundas na região ainda são incipientes (VIANA *et al.*, 2012; VIANA *et al.*, 2015; FERREIRA *et al.*, 2016; NUNES *et al.*, 2016). Diante disso,

cruzeiros exploratórios estão sendo realizados desde 2012, não apenas com a intenção de elevar o conhecimento sobre a biodiversidade local, mas também de compreender aspectos da biologia e pesca dessas espécies, extremamente frágeis e vulneráveis, que apresentam, em geral, ciclos de vida longos e maturação sexual tardia (SOARES e SCHEIDT, 2005; ARANA *et al.*, 2009; PEZZUTO e SANT'ANA, 2009; BISCOITO *et al.*, 2015). O inventário das espécies de águas profundas nessa região representa, assim, uma importante contribuição não apenas para o conhecimento da biodiversidade no ASPSP, mas, de uma forma mais ampla, para o entendimento da biogeografia de espécies demersais em todo Oceano Atlântico. Durante as campanhas de investigação pesqueira em profundidades superiores a 200 m, Nunes *et al.* (2016) coletaram material biológico que tem proporcionado novos conhecimentos em termos de diversidade biológica, particularmente com relação aos peixes e crustáceos de profundidade. Com base no material recolhido, alguns novos registros para o ASPSP foram descritos (FERREIRA *et al.*, 2016; NUNES *et al.*, 2016), com exemplares tendo sido depositados em coleções de referência no Museu de Oceanografia Petrônio Alves Coelho- UFPE e no Museu da Universidade de São Paulo-USP.

Monitoramento da atividade pesqueira

A pesca comercial nas proximidades do ASPSP foi iniciada por embarcações japonesas arrendadas no final da década de 1950, a partir do porto de Recife- PE. Os primeiros registros de embarcações pesqueiras nacionais no ASPSP, porém, foram relatados somente em meados da década de 1970, a partir do porto de Natal- RN, de forma, entretanto, extremamente esporádica, em razão da sua grande distância da costa. Somente a partir de meados de 1980 é que as embarcações pesqueiras nacionais começaram a pescar regularmente no ASPSP, particularmente durante o quarto e o primeiro trimestre do ano, devido à elevada abundância de albacora-laje, *Thunnus albacares* (Bonnaterre, 1788) (OLIVEIRA *et al.*, 1997). A atividade pesqueira no

ASPSP tem como espécie-alvo, além da albacorajade, a cavala-impigem *Acanthocybium solandri* (Cuvier, 1832), o peixe-voador *C. cyanopterus* (Valenciennes, 1847) e o peixe-rei *Elagatis bipinnulata* (Quoy e Gaimard, 1825), as quais juntas compõem cerca de 90% da captura total do ASPSP (VIANA *et al.*, 2015). Nos períodos de entressafra, quando a captura das espécies-alvo é substancialmente reduzida, o peixe-prego, *R. pretiosus*, também se torna, eventualmente, uma espécie importante nas capturas (VIANA *et al.*, 2008). Existem três técnicas de pesca atualmente predominantes para a captura de peixes no ASPSP: o puçá, a linha-de-mão e o corrico-múltiplo. Além dessas espécies, o dourado *Coryphaena hippurus* Linnaeus, 1758, e a barracuda *Sphyrna barracuda* (Edwards, 1771) também são eventualmente capturados.

Material e Métodos

Reprodução de peixes pelágicos

Após a captura, os espécimes foram identificados, mensurados e eviscerados. As gônadas foram coletadas e fixadas em formol a 10%, sendo transferidas para álcool 70% após 48h. Para verificar as fases de desenvolvimento do aparelho reprodutor, foram realizadas análises histológicas com a escala de maturação adaptada de Murua *et al.* (2003). O Índice Gonadal (IG) foi calculado pela equação proposta por Schaeffer e Orange (1956). Apenas indivíduos capazes de se reproduzir foram incluídos no cálculo do IG. Os tamanhos de primeira maturação sexual (L_{50}) foram determinados pela função sigmoide da fórmula $Mf = 1 / [1 + \exp(a + b * CF)]$, sendo Mf a fração dos indivíduos capazes de reproduzir e a e b os coeficientes de regressão linear. No ajuste da curva logística foi utilizado o método de máxima verossimilhança. A fecundidade foi estimada a partir da metodologia adaptada de Hunter (1985), Murua *et al.* (2003), Kjesbu *et al.* (2003) e Evans *et al.* (2007), por meio do método gravimétrico.

Prospecção em águas profundas

Para investigar a composição e índices de captura de diferentes armadilhas (retangular grande/média e cônico-redonda) em águas com profundidade entre 100 m e 700 m, foram realizadas nove campanhas exploratórias, em duas áreas diferentes (ASPSP e Banco de Oeste) com as armadilhas permanecendo na água entre 7 e 27 horas por lançamento. Os índices de captura, em termos da CPUE (indivíduos/armadilha/hora), foram analisados para cada fator separadamente e entre os modelos de armadilhas utilizados. Também foram investigadas a distribuição vertical, a abundância relativa e a diversidade das espécies de profundidade capturadas. Todos os exemplares foram identificados ao menor nível taxonômico possível. Para cada exemplar capturado foram mensurados os principais parâmetros biométricos e morfológicos, utilizados em estudos de identificação taxonômica. As espécies mais abundantes foram estudadas em laboratório sobre os principais aspectos da sua biologia.

Monitoramento da atividade pesqueira

O monitoramento da atividade pesqueira foi baseado nos dados de captura de seis embarcações de pesca que operaram no ASPSP, de julho de 1998 a dezembro de 2015, com um total de 375 desembarques. A CPUE foi calculada em termos de quilos de peixe por dia de pesca, haja vista que o número de dias de pesca nas proximidades do ASPSP (15 dias) é geralmente constante para cada desembarque. Apesar de não contabilizada no presente estudo, o número de horas de pesca em um dia pode variar ao longo do ano, dependendo da abundância de espécies-alvo e condições ambientais. Para cada estrato (ano ou mês), a CPUE média foi calculada como a relação entre a soma das capturas e a soma do esforço. Esse cálculo é equivalente a CPUE média ponderada por esforço (QUINN *et al.*, 1982).

Resultados e Discussão

Reprodução de peixes pelágicos

C. sufflamen - Dos 720 indivíduos capturados, 637 foram sexados, sendo 339 fêmeas (52,2%) e 298 machos (46,8%), com razão sexual de 1,14F:1M e leve dominância de fêmeas na maioria dos meses. O comprimento total (CT) dos espécimes variou entre 33,0 e 54,0 cm, com fêmeas alcançando maiores tamanhos. Nenhum indivíduo em estágio imaturo foi encontrado e o estágio maduro foi o de maior ocorrência durante todo o período amostrado. A partir da análise histológica das gônadas, sugere-se uma reprodução assincrônica em dois grupos. As médias mensais do índice gonadal (IG) observadas para as fêmeas variaram de 8,7 a 70,6 com pico no mês de março. Para os machos, as médias mensais do índice gonadal variaram entre 8,1 a 54,9, com pico no mês de maio, sugerindo que a reprodução ocorre no primeiro semestre do ano.

C. lugubris - Dos 1.087 indivíduos capturados, a proporção sexual foi de 0,7F:1M, com os machos predominando em quase todo o ano, com exceção dos meses de janeiro, maio e dezembro, quando a quantidade de fêmeas foi maior. O CT dos espécimes variou de 27 a 86,5 cm com as fêmeas apresentando comprimentos maiores. Ambos foram mais frequentes no intervalo de 32 a 52 cm. A análise histológica das gônadas mostrou predominância de fêmeas em processo de desenvolvimento e maduras no período de novembro a maio, enquanto as gônadas masculinas se mostraram em processo de desenvolvimento, maduras e esvaziadas ao longo de praticamente todo o ano. O IG calculado para fêmeas e machos adultos, porém, apresentou valores mais elevados no período de novembro a maio, sugerindo uma maior atividade reprodutiva para a espécie nos meses quentes do ano no ASPSP. A estimativa de fecundidade média por lote foi igual a 608.326 ovócitos, variando entre 140.478 e 1.512.776 ovócitos hidratados, em fêmeas com o comprimento situando-se entre 50 e 70 cm. A partir

da análise histológica das gônadas de fêmeas maduras foi verificada a presença simultânea de ovócitos em vários estágios diferentes de desenvolvimento, indicando que a espécie apresenta um padrão de desovas múltiplas por lote durante o período de desova.

C. hippurus - 862 indivíduos foram capturados entre os anos de 2007 e 2011. Foi possível identificar o sexo em 782 espécimes (271 machos e 511 fêmeas) e os níveis de maturação gonadal em 536 (175 machos e 361 fêmeas). O comprimento zoológico (CZ) dos indivíduos analisados variou de 27 a 150 cm. A proporção sexual foi de 1M: 1,9F, não apresentando diferença estatisticamente significativa em abril ($\chi^2=0,08$), agosto ($\chi^2=0,82$) e outubro ($\chi^2=3,63$). No entanto, em relação à classe de comprimento, a proporção sexual foi de 1M: 1F para CZ entre 120 e 130 cm. O índice gonadal (IG) apresentou seus valores mais altos em fevereiro para machos e em abril para fêmeas. A maioria dos machos maduros foi encontrada em fevereiro enquanto as fêmeas nesse estágio foram mais frequentes em maio. O L_{50} estimado para machos e fêmeas foi de 70,6 cm e 68,6 cm de CZ, respectivamente. Os resultados sugerem que o período de maior atividade reprodutiva ocorre entre abril e junho, imediatamente após o período de maior abundância do peixe-voador no local, o que indica que a reprodução do dourado é influenciada principalmente pelo fator trófico.

R. pretiosus - Entre janeiro de 2007 e setembro de 2011, foram analisados 691 fêmeas e 51 machos com o comprimento zoológico (CZ) variando de 48,6 a 176,0 cm, para as fêmeas, e de 48,6 a 138,0 cm, para os machos. O peso dos ovários variou de 6,8 a 4.222,0 gramas. As fases de desenvolvimento ovocitário, indicaram uma maior frequência de fêmeas maduras nos primeiros meses do ano, com os maiores valores de IG registrados entre dezembro e março, indicando que este é o provável período de desova. O tamanho de primeira maturação (L_{50}) foi estimado

em 111,7 cm para as fêmeas indicando que mais de 67% das fêmeas capturadas estavam acima do L_{50} , aspecto positivo para a sustentabilidade da pesca no local.

P. prometheus - Entre abril de 2010 e julho de 2015, 149 fêmeas foram capturadas como fauna acompanhante na pesca do *R. pretiosus*. O CT dos espécimes variou entre 50,5 e 109 cm. Foi observada uma maior frequência de fêmeas maduras nos primeiros meses do ano, com um pico em abril. A média mensal do IG para fêmeas variou de 4,9 a 7,1, com os maiores valores tendo sido observados também em abril e os menores de janeiro a março. O L_{50} foi estimado em 63 cm. Os resultados indicam que a reprodução ocorre provavelmente durante o primeiro semestre do ano, assim como para muitas outras espécies estudadas nos arredores do ASPSP.

Prospecção em águas profundas

Entre 2012 e 2015, foram efetuados 53 lançamentos nas imediações do ASPSP, resultando em um esforço total de 142 armadilhas lançadas e 702 horas de imersão. Considerando-se todas as amostras em conjunto, 900 indivíduos foram capturados, distribuídos em três grupos, sendo compostos por seis espécies de crustáceos, dez de peixes e três de moluscos. As capturas em número de indivíduos foram compostas principalmente de crustáceos (83,6%), seguidos dos peixes (15,8%) e moluscos (0,7%). Individualmente, o caranguejo-africano, *Chaceon gordonae* (Ingle, 1985) apresentou uma elevada participação relativa (78,1%), seguido do peixe *Physiculus* sp. (10,22%). Todas as outras espécies em conjunto responderam por 11,7% das capturas. Para as espécies mais abundantes (>10 indivíduos) e grupos de espécies foi registrada uma CPUE mais elevada no Banco de Oeste, exceto para *Nematocarcinus gracilipes* Filhol, 1884, e no período noturno, exceto para *Pontinus nigropunctatus* (Günther, 1868) e para o grupo dos moluscos (Tabela I).

Verticalmente, as espécies de crustáceos coletadas apresentaram distribuições batimétricas semelhantes, sendo mais abundantes entre os 400 e 500 m, com exceção de *Bathynectes longispina* (Stimpson, 1871) que ocorreu exclusivamente entre 100 e 300 m. Apenas *C. gordonae* e *N. gracilipes* foram coletados no estrato mais profundo (600 a 700 m), assim como uma espécie de congriídeo e duas outras espécies da classe Cephalopoda não identificados até o presente. A maioria dos peixes ocorreu em profundidades entre 200 e 600 m (Figura 1).

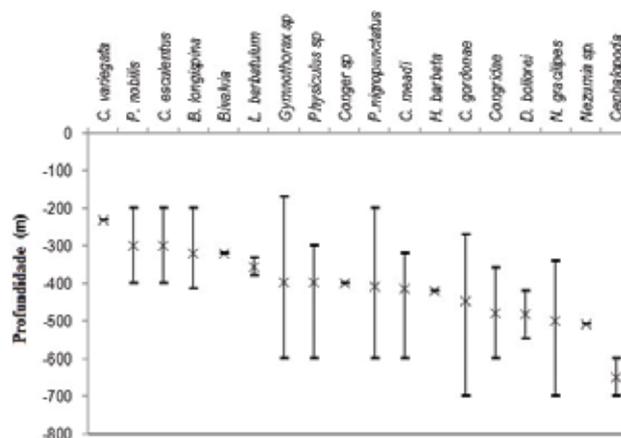


Figura 1. Distribuição batimétrica de espécies capturadas durante cruzeiros de pesquisa com armadilhas no ASPSP. Asteriscos representam a média e as linhas descontinuas indicam a amplitude de ocorrência observada durante os intervalos de profundidade (máximo e mínimo).

Figure 1. Bathymetric distribution of species caught during research cruises with traps in SPSPA. Asterisks represent the mean the discrete lines indicate the amplitude of occurrence observed during the depth intervals (maximum e minimum).

O dendrograma derivado dos valores transformados ($\log x+1$) de abundância para os grupos taxonômicos demonstraram a presença de quatro grupos através do gradiente batimétrico e locais de coleta (similaridade de Bray-Curtis de 35%) (Figura 2). O cluster 1 (Grupo A) envolve as estações mais rasas (média de profundidade de 341,13m) e localizadas principalmente na área do ASPSP.

Tabela I. Composição das capturas e CPUE (nº de indivíduos/armadilha/lançamento) para espécies de águas profundas capturadas em cruzeiros de pesquisa com armadilhas no ASPSP.**Table I.** Catch composition e CPUE (number of individuals / trap / release) for deep-water species caught in research cruises with traps in the SPSPA.

Família/Classe	Espécie	N	%	Total	CPUE			
					Área		Período	
					Banco Oeste	ASPSP	Dia	Noite
Crustáceos		752	83,56	5,55	6,70	4,52	3,11	6,53
Geryonidae	<i>Chaceon gordonae</i>	703	78,11	5,19	6,27	4,24	2,95	6,02
Portunidae	<i>Bathynectes longispina</i>	15	1,67	0,12	0,19	0,06	0,02	0,20
Dromiidae	<i>Dromia bollorei</i>	9	1,00	0,06	0,11	0,01	0,00	0,10
Homolidae	<i>Homola mínima</i>	1	0,11	0,01	0,00	0,01	0,00	0,01
Nematocarcinidae	<i>Nematocarcinus gracilipes</i>	23	2,56	0,04	0,02	0,05	0,04	0,04
Pandalidae	<i>Plesionika martia</i>	1	0,11	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Peixes		142	15,78	1,06	1,29	0,86	0,70	1,26
Moridae	<i>Physiculus</i> sp.	92	10,22	0,71	0,91	0,54	0,33	0,92
	<i>Laemonema barbatulum</i>	2	0,22	0,02	0,01	0,02	0,00	0,03
Macrouridae	<i>Nezumia</i> sp.	1	0,11	0,01	0,00	0,02	0,00	0,02
Colocongridae	<i>Coloconger meadi</i>	13	1,44	0,09	0,04	0,13	0,00	0,09
Congridae	<i>Conger esculentus</i>	2	0,22	0,02	0,04	0,00	0,03	0,02
	<i>Conger</i> sp.	1	0,11	0,01	0,02	0,00	0,03	0,00
Myrocongridae	<i>Myroconger compressus</i>	1	0,11	0,01	0,01	0,01	0,01	0,00
Muraenesocidae	<i>Cynoponticus savanna</i>	1	0,11	0,01	0,01	0,00	0,01	0,00
Scorpaenidae	<i>Pontinus nigropunctatus</i>	15	1,67	0,10	0,11	0,10	0,21	0,06
Polimixiidae	<i>Polimixia nobilis</i>	2	0,22	0,02	0,04	0,00	0,03	0,02
Muraenidae	<i>Gymnothorax</i> sp.	12	1,33	0,08	0,11	0,05	0,02	0,12
Moluscos		6	0,67	0,04	0,06	0,02	0,11	0,00
Ranellidae	<i>Charonia variegata</i>	1	0,11	0,01	0,00	0,01	0,00	0,00
Bivalvia	espécie não identificada	1	0,11	0,01	0,00	0,01	0,00	0,33
Cephalopoda	espécie não identificada	4	0,44	0,02	0,06	0,01	0,06	0,00
Total		900	100,00	6,65	7,99	5,38	3,81	7,80

Já o cluster 2 (Grupo B) foi representado pelas profundidades intermediárias (466,42 m), seguido do cluster 3 (Grupo D), que incluiu águas mais profundas (profundidade máxima de 546 m). O grupo C foi excluído das análises por possuir menos de duas amostras. A técnica não métrica de escalonamento multidimensional (MDS) para as espécies de profundidade apresentou um valor global R de 0,766 (Figura 3), indicando que os lançamentos individualmente dentro de cada grupo são mais similares em termos de composição de espécies que qualquer outro cluster. O grau de diferença entre os clusters, testados com ANOSIM, demonstrou que a maioria dos valores de R situaram-se próximos de zero, significando que os indivíduos dentro de cada cluster não são muito similares.

Devido ao caráter pioneiro desses levantamentos, esforços devem ser empenhados na busca por elevar o conhecimento sobre a fauna profunda (>200 m) em regiões de quebra de plataforma, talude superior, ilhas e bancos oceânicos no Brasil, devendo-se empregar para tal, não apenas diferentes técnicas de pesca, mas também métodos de observações subaquáticas para garantir uma adequada estimativa da biodiversidade e abundância dessas espécies.

Para os teleósteos, foram realizados dez novos registros para a localidade, gerando um incremento de 9,3% na lista atual de peixes ósseos com ocorrência confirmada, elevando o número para 117 espécies (VASKE-JR *et al.*, 2005; VASKE-JR *et al.*, 2008a; BEZERRA *et al.*, 2011; VIANA *et al.*, 2012; CARVALHO-FILHO *et al.*, 2016). Os levantamentos de diversidade e demais pesquisas científicas realizadas no ASPSP desde a instalação da estação científica em 1998 têm revelado diversas informações sobre os mais variados grupos taxonômicos locais, indicando, inclusive, a ocorrência de espécies endêmicas e novos registros para o Arquipélago e para a ciência.

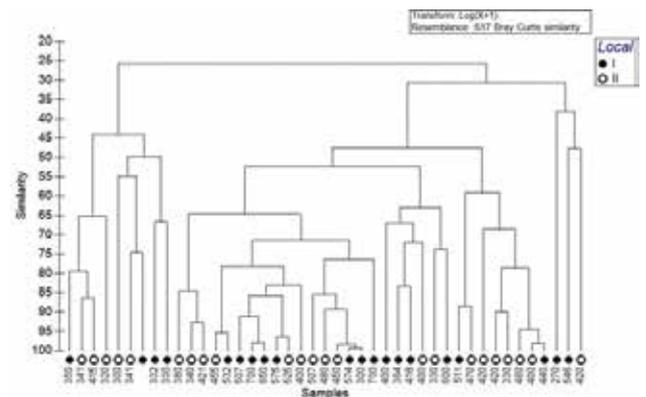


Figura 2. Dendrograma dos lançamentos usando agrupamentos através do índice de similaridade de Bray-Curtis por estrato de profundidade em termos de abundância (número de indivíduos/armadilha/lance) do total capturado durante cruzeiros de pesquisa no ASPSP (Local I: Banco de Oeste, e Local II: ASPSP). A linha superior indica grupos com nível de 35% de similaridade.

Figure 2. Dendrogram of sets using groupings by the Bray-Curtis similarity index by depth stratum in terms of abundance (number of individuals / trap / bid) of the total number caught in SPSPA (Local I: West Seamount, e Local II: SPSPA). The upper row indicates groups with 35% similarity level.

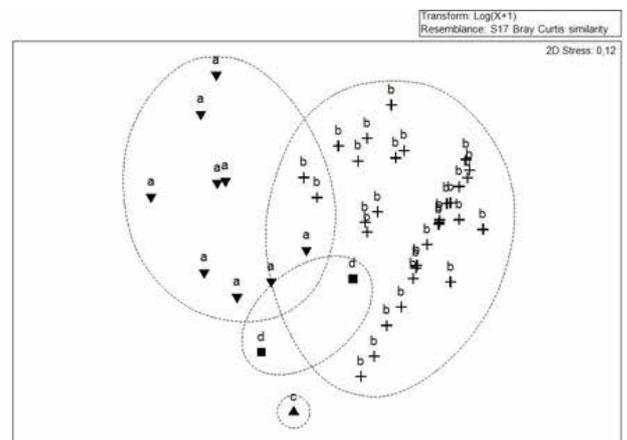


Figura 3. Técnica não métrica de escalonamento multidimensional (MDS) para espécies de profundidade agrupadas de acordo com o cluster. As linhas tracejadas indicam níveis de similaridade de 35%. Global $R = 0.766$.

Figure 3. Non-metric multidimensional scaling technique (MDS) for deep-water species grouped according to the cluster. Dashed lines indicate similarity levels of 35%. Global $R = 0.766$.

Taxonomicamente, os teleosteos distribuíram-se em: três espécies da família Moridae (*Laemonema barbatulum* Goode e Bean, 1883, *Nezumia* sp., *Physiculus* sp.); duas da família Congridae (*Conger esculentus* Poey, 186, *Conger* sp), 1 da família Berycidae (*Beryx splendens* Lowe, 1834), uma da família Colocongridae (*Coloconger meadi* Kanazawa, 1957), uma da família Muraenesocidae (*Cynoponticus savanna* (Bancroft, 1831)), uma da família Myrocongridae (*Myroconger compressus* Günther, 1870), uma da família Muraenidae (*Gymnothorax* sp.), uma da família Scorpaenidae (*Pontinus nigropunctatus* (Günther, 1868)) e uma da família Polimixiidae (*Polymixia nobilis* Lowe, 1836 Figura 4). Com exceção de *P. nigropunctatus* (VASKE-JR *et al.*, 2008a), todas as espécies encontradas representam novos registros para o ASPSP. *Gymnothorax* sp., moréia ainda não identificada ao nível de espécie, a despeito das outras oito espécies da família Muraenidae já registradas no arquipélago, também pode vir a representar um novo registro, enquanto *Physiculus* sp., é espécie nova em processo de descrição e, portanto, endêmica.

A partir da captura de 61 exemplares do *Physiculus* sp. foi possível observar uma tendência de maior concentração de fêmeas na população, predominância normalmente encontrada em espécies de peixes demersais e também em outras espécies de profundidade do mesmo gênero, como *P. japonicus* Hilgendorf, 1879, que ocorre no Japão. A maior média do Índice Gonadal (IG) foi verificada em janeiro, o que sugere um ciclo reprodutivo sazonal, com a desova ocorrendo nos primeiros meses do ano, a exemplo de várias outras espécies já estudadas no ASPSP.

Kitagawa e Nagahora (1983) encontraram valores de IG para *P. japonicus* próximos aos encontrados para *Physiculus* sp. no ASPSP. Apesar da intercessão de valores entre as duas populações, nenhum *Physiculus* sp. imaturo foi encontrado no presente trabalho, enquanto que Kitagawa e Nagahora (1983) não encontraram nenhum indivíduo maduro. Essa diferença pode estar relacionada à profundidade de amostragem, já que *P. japonicus* foi coletado entre as profundidades de 50 e 330 m (KITAGAWA e NAGAHORA, 1983) e *Physiculus* sp. entre 300 e 600 m, podendo indicar que esses animais realizam a sua

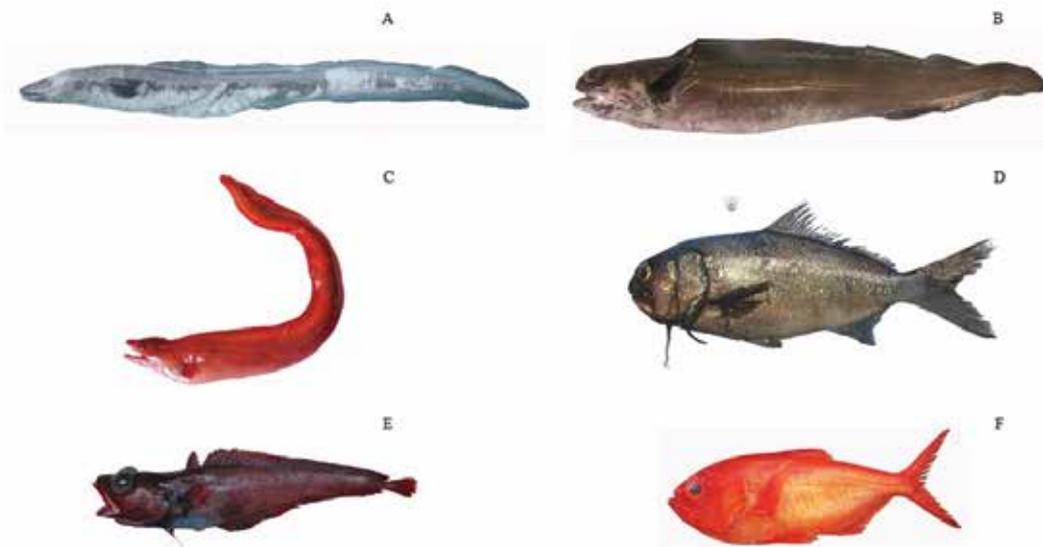


Figura 4. Espécies de teleosteos de profundidade coletados no entorno do ASPSP: A) *Conger esculentus*, B) *Coloconger meadi*, C) *Myroconger compressus*, D) *Polymixia nobilis*, E) *Physiculus* sp., F) *Beryx splendens*.

Figure 4. Species of deep-water teleosts collected in the vicinity of the SPSPA: A) *Conger esculentus*, B) *Coloconger meadi*, C) *Myroconger compressus*, D) *Polymixia nobilis*, E) *Physiculus* sp., F) *Beryx splendens*.

reprodução em ambientes mais profundos. Quanto ao padrão de desova, a presença de ovócitos em diferentes estágios de desenvolvimento, sugerem uma desova parcelada de *Physiculus sp.*, com desenvolvimento assincrônico, similar ao encontrado em outros Gadiformes (PÁJARO e MACCHI, 2001).

Apesar da estabilidade físico-química das águas profundas, diversos estudos têm comprovado que os peixes demersais podem ter ciclos reprodutivos sincronizados com as mudanças que ocorrem nas camadas superiores, decorrentes da produção primária e secundária, por meio da migração vertical da fauna mesopelágica (MARSHAL e MERRETT, 1977, GAGE e TYLER, 1991, MATARRESE *et al.*, 1998). A aparente sazonalidade encontrada no ciclo reprodutivo de *Physiculus sp.* no entorno do ASPSP sugere esse fato, indicando ademais que os fenômenos físico-químicos que influenciam intensamente as águas superficiais desse ecossistema, os quais resultam em uma elevada atividade reprodutiva de diversas espécies durante o primeiro semestre do ano e na incidência de grandes organismos filtradores, como o tubarão-baleia

Rhincodon typus, Smith, 1828 e a raia *Mobula tarapacana* (Philippi, 1892), estendem a sua influência a águas bem mais profundas (MENDONÇA, 2011, MACENA e HAZIN *et al.*, 2016)

Foram capturadas seis espécies de crustáceos, todas pertencentes à ordem Decapoda: *C. gordonae*, *B. longispina*, *Dromia bollorei* Forest, 1974, *Homola minima* Guinot e Richer de Forges, 1995, *N. gracilipes* e *Plesionika martia* (A, Milne-Edwards, 1883). Esses novos registros representam um aumento de 17 para 23 espécies de crustáceos conhecidos que habitam na área do ASPSP (NUNES *et al.*, 2017).

Quanto aos aspectos zoogeográficos das espécies coletadas neste estudo, *H. minima* é encontrado no Atlântico ocidental, enquanto que o *B. longispina* e o *D. bollorei* são distribuídos ao longo do Atlântico equatorial, com limites ocidentais e orientais de sua distribuição, respectivamente. *N. gracilipes* foi descrito para a Dorsal Meso Atlântica dos Açores até o Brasil e *P. martia* com ocorrências no Atlântico e Pacífico, embora este seja o primeiro registro da espécie para o ASPSP (Tabela II, Figura 5).

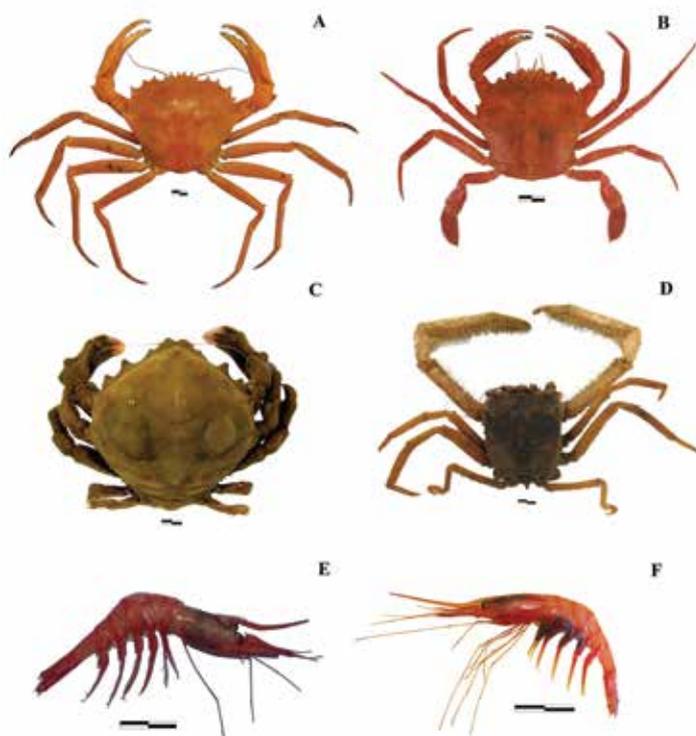


Figura 5. Espécies de crustáceos de profundidade coletados no entorno do ASPSP: A) *Chaceon gordonae*, B) *Bathynectes longispina*, C) *Dromia bollorei*, D) *Homola minima*, E) *Nematocarcinus gracilipese* e F) *Plesionika martia*.

Figure 5. Species of deep-water crustaceans collected in the vicinity of the SPSPA: A) *Chaceon gordonae*, B) *Bathynectes longispina*, C) *Dromia bollorei*, D) *Homola minima*, E) *Nematocarcinus gracilipese* e F) *Plesionika martia*.

Tabela II. Distribuição no Oceano Atlântico Tropical das seis espécies de crustáceos de profundidade capturados no ASPSP.
Table II. Distribution in the Tropical Atlantic Ocean of the six species of deep-water crustaceans caught in SPSPA.

Espécies	Regiões					
	Caribe	ASPSP	Ascensão	St. Helena	Cabo Verde	Oeste Africano
<i>Chaceon gordonae</i>		+	+	+		+
<i>Bathynectes longispina</i>	+	+				
<i>Dromia bollorei</i>		+	+			+
<i>Homola minima</i>	+	+				
<i>Nematocarcinus gracilipes</i>		+			+	+
<i>Plesionika martia</i>		+				+

Essas informações são cruciais para se entender a distribuição dessas espécies no Oceano Atlântico e os fatores que controlam seus movimentos, como luminosidade, disponibilidade de alimentos e ciclo reprodutivo, aspectos fundamentais para assegurar a sua conservação.

Monitoramento da atividade pesqueira

A produção pesqueira no ASPSP para todas as espécies apresentou uma média aproximada de 150 t por ano, com um pico de 250 toneladas em 2003 e 2004 e mínimo de 64 toneladas em 1998, ano em que se iniciou o monitoramento (Figura 6). As albacoras representaram mais de metade do total das capturas em todos os anos, exceto para 1998. Embora a albacora-bandolim, *T. obesus* (Lowe, 1839), albacora-branca, *T. alalunga* (Bonnaterre, 1788) e albacorinha, *T. atlanticus* (Lesson, 1831) também sejam capturadas, a grande maioria das capturas é composta pela albacora-laje (*T. albacares*). A cavala impigem representou 20% dos desembarques, seguido pelo peixe-voador (10%) e pelo peixe-rei (3%). Outras espécies capturadas incluíram: xaréu-preto (*Caranx* spp.), peixe-prego (*R. pretiosus*), espadarte (*Xiphias gladius* Linnaeus, 1758), dourado (*C. hippurus*), agulhões (*Istiophorus albicans* (Latreille, 1804), *Makaira nigricans* Lacepède, 1802, *Kajikia albida* (Poey, 1860)), guarassuma (*Caranx crysos* (Mitchill, 1815)), guarajuba (*Carangoides bartholomaei* (Cuvier, 1833)), cangulo-fernando (*C.*

sufflamen), cangulo-preto (*Melichthys niger* (Bloch, 1786)), bonito (*Katsuwonus pelamis* (Linnaeus, 1758)) e barracuda (*S. barracuda*).

Apesar de uma razoável variação anual, nenhuma tendência clara na CPUE da albacora foi observada durante o período monitorado (Figura 6). Oscilações anuais da CPUE podem estar associadas tanto a fatores intrínsecos ao ASPSP, como a abundância de organismos forrageiros na área, como extrínsecos, decorrentes do ciclo migratório da espécie ao longo de toda a sua área de distribuição no Oceano Atlântico. De acordo com a última avaliação do estoque realizada pela ICCAT (*International Commission for the Conservation of Atlantic Tunas*), em 2011, o estoque se encontrava levemente sobrepescado, com uma biomassa cerca de 5% abaixo da biomassa necessária para assegurar o Rendimento Máximo Sustentável- RMS, mas não estava sofrendo sobrepesca, com uma mortalidade por pesca cerca de 23% abaixo do nível compatível com o RMS. Na oportunidade, o RMS foi estimado em 126.304 t, enquanto as capturas realizadas em 2016, último ano com estatísticas disponíveis, atingiram valores próximos a 128.000 t, portanto, um pouco acima do RMS. No entanto, as capturas da espécie realizadas no ASPSP anualmente, cerca de 100 t, representam menos de 0,1% do total capturado no Oceano Atlântico, de forma que o seu impacto sobre o estoque é completamente desprezível, além do Arquipélago não se constituir em uma área de reprodução para a espécie, mas de alimentação.

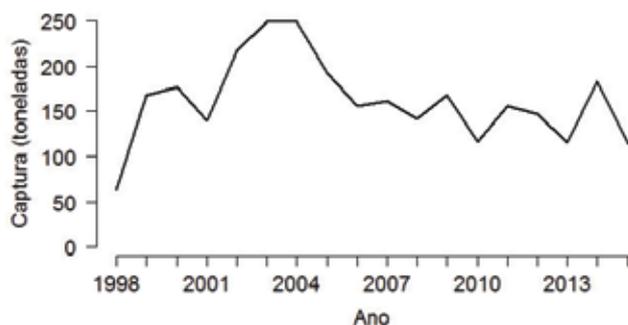


Figura 6. Produção total (toneladas por ano) dos peixes capturados no ASPSP entre julho de 1988 e dezembro de 2015.

Figure 6. Total production of fish (tons per year) captured in the SPSPA between July 1988 e December 2015.

Valores mensais da CPUE, no entanto, mostraram um padrão sazonal claro (Figura 7B), com valores elevados de novembro a março e reduzidos de julho a setembro, provavelmente em razão das altas concentrações de peixe-voador de novembro a abril, no ASPSP, para fins reprodutivos (LESSA *et al.*, 1999). O peixe-voador é uma importante presa para a albacora-laje (VASKE *et al.*, 2003), que utiliza o ASPSP como área de alimentação durante sua migração de retorno da costa oeste do Atlântico para a costa africana (HAZIN, 1993). Dados biométricos da albacora-laje indicam que a grande maioria dos indivíduos capturados no ASPSP são jovens, com um comprimento médio de 99,6 cm (VASKE *et al.*, 2008b), enquanto que o L_{50} de espécimes desta espécie capturados com espinhel é de 140 cm (ALBARET, 1977). Esta informação suporta a hipótese de que os atuns utilizam o ASPSP para a alimentação e não para reprodução.

A CPUE da cavala impigem, por sua vez, apresentou oscilações anuais moderadas (Figura 7C), sem uma tendência aparente. A variação mensal da CPUE da cavala, no entanto, diferentemente da oscilação observada pela albacora, apresentou dois ciclos claros, com valores elevados em janeiro e fevereiro e de julho a setembro (Figura 7D). Uma vez que esta espécie usa o ASPSP para reprodução nos primeiros meses do ano (VIANA *et al.*, 2013), o aumento da CPUE durante janeiro-fevereiro está provavelmente

relacionado a uma migração reprodutiva. Já a ascensão da CPUE de julho a setembro está provavelmente relacionada a um aumento de esforço de pesca direcionado à espécie devido à redução das capturas de albacora durante o mesmo período.

CPUEs anuais do peixe-rei não apresentaram tampouco oscilações importantes (Figura 7E), embora tenham exibido uma tendência sazonal semelhante à albacora, com valores elevados de outubro a março (Figura 7F). Valores altos da CPUE no último trimestre do ano parecem ocorrer previamente ao seu período de desova no ASPSP, que acontece entre janeiro e maio (PINHEIRO *et al.*, 2011). O aumento do consumo de alimentos e, portanto, a busca por áreas com elevada abundância de presas antes do período de desova é um comportamento comum observado em muitos peixes em decorrência da alta energia exigida para maturação gonadal. Durante meses de desova, no entanto, os valores tendem a diminuir, sugerindo uma possível interferência da atividade reprodutiva sobre a variação sazonal da CPUE.

A CPUE do peixe-voador apresentou forte declínio a partir de 2005 devido à captura baixa ou inexistente (Figura 7G). A diminuição da captura, nesse caso, se deve principalmente ao baixo valor comercial do peixe-voador, associado aos gastos com transporte e armazenamento, não compensando, em muitos casos, o esforço de pesca. A variação sazonal da CPUE, porém, apresenta uma tendência clara, com valores baixos de junho a novembro e relativamente altos nos meses restantes, com picos em dezembro e abril (Figura 7H). A alta concentração de peixes-voadores nessa época do ano é principalmente consequência da intensa atividade reprodutiva da espécie, que utiliza rochas e algas do ASPSP para a fixação dos ovos (LESSA *et al.*, 1999).

Informações relacionadas à produção pesqueira do ASPSP ao longo do tempo são cruciais para se compreender os possíveis impactos desta atividade no ecossistema insular, essencial para uma gestão

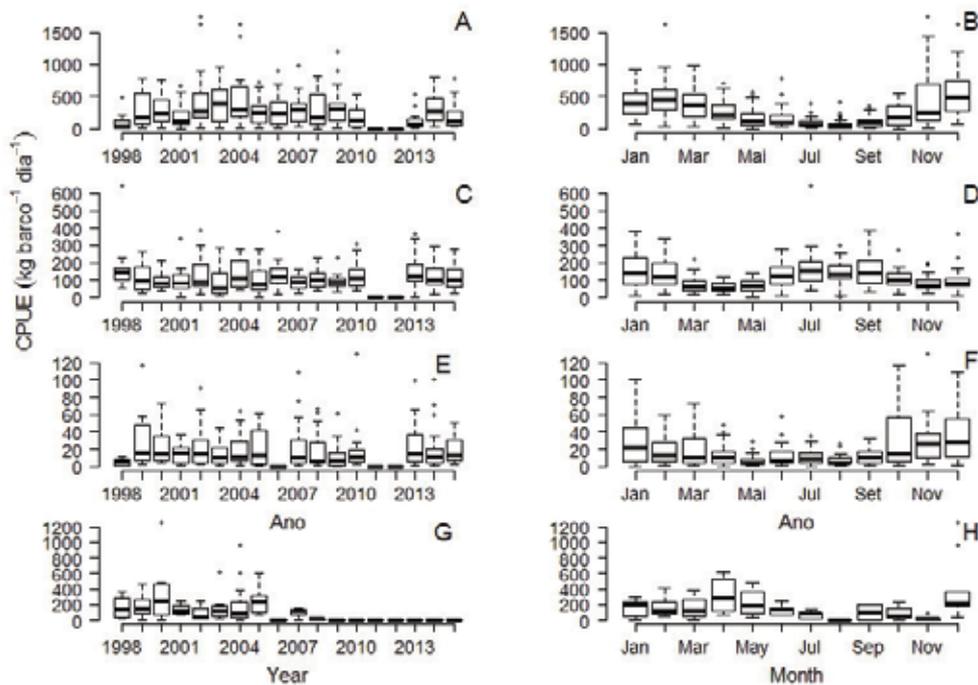


Figura 7. CPUE anual e mensal ($\text{kg barco}^{-1} \text{ dia}^{-1}$) de atuns (A e B), cavala (C e D), peixe-rei (E e F) e peixe-voador (G e H) capturados no ASPSP entre julho de 1998 e dezembro de 2015. Centro das barras representam as médias de CPUE anual e mensal.

Figure 7. Annual and monthly CPUE ($\text{kg boat}^{-1} \text{ day}^{-1}$) of tunas (A and B), wahoo (C and D), rainbow runner (E and F) and flying fish (G and H) caught in the SPSPA between July 1998 and December 2015. Center of the bars represent the medium of annual and monthly CPUE.

eficiente dos recursos naturais no ASPSP. Embora as espécies estudadas tenham comportamento migratório e utilizem o ASPSP sobretudo para alimentação, a pesca excessiva pode causar depleções localizadas dos estoques, conduzindo a perdas econômicas e ecológicas importantes. Espécies que utilizam o ASPSP para fins de reprodução, como o peixe-voador, o peixe-rei e a cavala impingem são particularmente vulneráveis, já que uma pesca excessiva pode afetar o seu recrutamento. No entanto, ao longo dos 18 anos de monitoramento, valores de CPUE das principais espécies capturadas no ASPSP não apresentaram fortes oscilações, permanecendo relativamente estáveis ao longo dos anos. Isso indica que a atividade pesqueira no ASPSP não parece comprometer a sustentabilidade dos estoques explorados, não havendo indícios de uma depleção localizada dos estoques de peixes monitorados.

Agradecimentos

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e concessão de bolsas. Um especial agradecimento à Secretaria da Comissão Interministerial dos Recursos do Mar (SECIRM) e Marinha do Brasil, pelo apoio às expedições científicas, e, em particular, às tripulações dos barcos de apoio à pesquisa, por nos auxiliarem nas capturas e medições dos espécimes utilizados nesse estudo. A empresa Transmar, pela colaboração no fornecimento das informações relacionadas ao monitoramento das atividades pesqueiras na área do ASPSP.

Referências Bibliográficas

- ALBARET, J.J. **La reproduction de l'albacore (*Thunnus albacares*) dans le Golfe de Guinée. Cahiers ORSTOM. Série Océanographie**, 15(4): 389-419. 1977.
- ARANA, P.; PEREZ, J.A.A and P.R. PEZZUTO. **Deep-sea fisheries off Latin America: a introduction. Lat. Am. J. Aquat. Res.**, 37(3): 281-284. 2009.
- BEZERRA, N.P.A.; TRAVASSOS, P.; HAZIN, F.H.V.; VIANA, D.L. and MACENA, B.C.L. **Occurrence of blackfin tuna *Thunnus atlanticus*, Lesson 1931 (Scombridae) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. Pan-Ame Journal of Aquatic Sciences**, 6 (1), 68–70. 2011.
- BISCOITO, M.; FREITAS, M.; PAJUELO, J.G.; TRIAY-PORTELLA, R.; SANTANA, J. I.; COSTA, A.L.; DELGADO, J. and GONZÁLEZ, J.A. **Sex-structure, depth distribution, intermoult period and reproductive pattern of the deep-sea red crab *Chaceon affinis* (Brachyura, Geryonidae) in two populations in the north-eastern Atlantic. Deep-Sea Research I**, 95: 99-114. 2015.
- CARVALHO-FILHO, A.; MACENA, B. C. L. and NUNES, D. M. **A new species of Anthiadiinae (Teleostei: Serranidae) from São Pedro and São Paulo Archipelago, Brazil, Equatorial Atlantic. Zootaxa** 4139 (4): 585–592. 2016.
- EVANS, R. D.; RUSS, G.R. and KRITZER, J.P. **Batch fecundity of *Lutjanus carponotatus* (Lutjanidae) and implications of no-take marine reserves on Great Barrier Reef, Australia., 2008. Coral Reefs**. 27; 179-189. 2007.
- FEITOZA, B.M; ROCHA, L. A.; LUIZ JUNIOR, O. J.; FLOETER, S. R. and GASPARINI, J. L. **Reef fishes of St. Paul's Rocks: new records and notes on biology and zoogeography. Aqua. J. Ichthyol. Aquat. Biol.** 7: 61–823. 2003.
- FERREIRA, R. C. P.; NUNES, D. M.; SHINOZAKI-MENDES, R. A.; PIRES, A.M.A. and HAZIN, F. H. V. **First record and preliminary information on the biology of the deep-sea African crab, *Chaceon gordonae* Ingle, 1985 (Brachyura: Geryonidae) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil. Lat. Am. J. Aquat. Res.**, 44(2): 392-400. 2016.
- FLOETER, S.R.; ROCHA, L.A.; ROBERTSON, D.R.; JOYEUX, J.C.; SMITH-VANIZ, W.F.; WIRTZ, P. and EDWARDS, A.J. *et al.* **Atlantic reef fish biogeography and evolution. Journal of Biogeography** 35, 22–47. 2008.
- GAGE, J. D., and TYLER, P. A. **Deep-sea biology: a natural history of organisms at the deep-sea floor.** (Cambridge: Cambridge University Press). 1991.
- HAZIN, F.H.V. Fisheries oceanographical study on tuna, billfishes and sharks in the southwestern equatorial Atlantic Ocean. Tokyo. 286p. (Tese de Doutorado, Tokyo University of Fisheries). 1993
- HUNTER, J. R.; MACEWICZ, B. and SIBERT, J. R. **The spawning frequency of skipjack tuna, *Katsuwonus pelamis*, from the South Pacific. Fisheries Bulletin.** 84; 895-903. 1985.
- ICCAT 2011 *Report of the 2011 ICCAT yellowfin tuna stock assessment session.* San Sebastián, Spain - September 5 to 12, 113p. 2011.
- KITAGAWA, D. and NAGAHORA, S. **Estimation of the spawning season of the morid fish *Physiculus maximowiczii* collected from the coastal waters of Iwate Prefecture, Japan. Bulletin of the Japanese Society of Scientific Fisheries**, v. 49, p. 1649-1654, 1983.
- KJESBU, O. S.; HUNTER, J.R., and WITTHAMES, P.R. Modern approaches to assess maturity and fecundity of warm-and cold-water fish and squids. Report of the Working Group. Bergen. 137p. 2003.
- LESSA, R.P.T.; MAFALDA-JR., P.; ADVINCULA, R.; LUCCHESI, R.B.; BEZERRA-JR., J.L.; VASKE-JR., T. and HELLEBRANDT, D. **Distribution and abundance of ichthyoneuston at seamounts and islands off North-Eastern Brazil. Arch. Fishery and Marine Research**, 47: 239-252. 1999.
- LUBBOCK, R. and EDWARDS, A.J. **The fishes of Saint Paul's rocks. Journal of Fish Biology.** 18:135-157. 1981:
- LUIZ, O.J.; MENDES, T.C.; BARNECHE, D.R.; FERREIRA, C.G.W.; NOGUCHI, R.; VILLAÇA, R.C.; RANGEL, C.A.; GASPARINI, J.L. and FERREIRA, C.E.L. **Community structure of reef fishes on a remote oceanic island (St Peter and St Paul's Archipelago equatorial Atlantic): the relative influence of abiotic and biotic variables. Marine and Freshwater Research** 66 (8):739–749. 2015.
- LUIZ-JR., O.J. **Colour morphs in a queen angelfish *Holocanthus ciliaris* (Perciformes: Pomacanthidae) population of St. Paul's Rocks, NE Brazil. Tropical Fish Hobbyist** 51(5):82-90. 2003.
- MACENA BCL and HAZIN FHV. **Whale Shark (*Rhincodon typus*) seasonal occurrence, abundance and demographic structure in the Mid-Equatorial Atlantic Ocean. PLoS ONE**, 11(10): e0164440. 2016.
- MARSHALL, N. B. and MERRETT, N. R. **The existence of a benthopelagic fauna in the deep sea. Deep-Sea Research** 24, 483-497. 1977.

MATARRESE, A.; D'ONGHIA, G.; BASANISI, M. and MASTROTOTARO, F. **Spawning and recruitment of *Phycis blennoides* (Phycidae) from the north-western Ionian Sea (Middle-eastern Mediterranean).** *Italian Journal of Zoology* 65, 203-209. 1998.

MURUA, H.; KRAUS, G.; SABORID-REY, F.; WITTHAMES, P. R.; THORSEN, A. and JUNQUERA, J. **Procedures to estimate fecundity of marine fish species in relation to their reproductive strategy.** *Journal of Northwest Atlantic Fishery Science* 33, 33-53. 2003.

NUNES, D. M.; FERREIRA, R. C. P.; HAZIN, F. H. V.; TRAVASSOS, P. E. and SOUZA-FILHO, J. F. **Deep sea decapod crustaceans of São Pedro e São Paulo Archipelago, Equatorial Atlantic, Brazil.** *Zootaxa* 4324 (2): 331-347. 2017.

NUNES, D.M.; TRAVASSOS, P.E.; FERREIRA, R.P. and HAZIN, F.H.V. **Distribution, relative abundance and diversity of deep-sea species at São Pedro e São Paulo Archipelago, Brazil.** *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 44(2): 228-237. 2016.

OLIVEIRA, G.M.; EVANGELISTA J.E.V. and FERREIRA B.P. **Considerações sobre a biologia e a pesca no Arquipélago dos Penedos de São Pedro e São Paulo.** *Boletim Técnico Científico do CEPENE*, 5(1): 31-52. 1997.

PÁJARO, M. and MACCHI, G. J. **Spawning pattern, length at maturity, and fecundity of the southern blue whiting (*Micromesistius australis*) in the south-west Atlantic Ocean.** *New Zealand Journal of Marine and Freshwater Research* 35, 375-385. 2001.

PEZZUTO, P.R. and SANT'ANA, R. **Sexual maturity of the deep-sea crab *Chaceon ramosae* Manning, Tavares and Albuquerque, 1989 (Brachyura: Geryonidae) in southern Brazil.** *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 37(3): 297-312. 2009.

PINHEIRO, P.B.; HAZIN, F.H.V.; TRAVASSOS, P.; OLIVEIRA, P.G.V.; CARVALHO, F. and RÉGO, M.G. **The reproductive biology of the rainbow runner, *Elagatis bipinnulata* (Quoy and Gaimard, 1825) caught in the São Pedro and São Paulo Archipelago.** *Brazilian Journal of Biology*, 71(1): 99-106. 2011.

QUINN, T.J.; HOAGS, S.H. and SOUTHWARD, G.M. **Comparison of two methods of combining catch-per-unit-effort data from geographical regions.** *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Science*, 39: 837-846. 1982.

SCHAEFFER, M. B. E. and ORANGE, C. J. **Studies of the sexual development and spawning of yellowfin tuna (*Neothunnus macropterus*) and skipjack (*Katsuwonus pelamis*) in the three areas of the Eastern Pacific Ocean, by examination of gonads.** *Buletin Inter-American Tropical Tuna Comissioon* 1, 281-302. 1956.

SOARES, A.L.S. and SCHEIDT, G.S.S. **Exportações brasileiras de caranguejos de profundidade (*Chaceon ramosae* e *Chaceon notialis*) 1999 – Março de 2004.** *Braz. J. Sci. Technol.*, 9(1): 13-17. 2005.

VASKE, T. JR., LESSA, R.P., NÓBREGA, M.F., MONTEALEGRE-QUIJANO, S., SANTANA, F.M. and BEZERRA, L. JR. **A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Journal of Applied Ichthyology*, 21 (1), 75-79. 2005.

VASKE-JR, T.; LIMA, K.L.; RIBEIRO, A.C.B. and LESSA, R.P. **Record of the St. Helena deepwater scorpionfish, *Pontinus nigropunctatus* (Günter) (Scorpaeniformes: Scorpaenidae), in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Panan. J. Aquat. Sci.*, 3(1): 46-48. 2008a.

VASKE-JR., T.; LESSA, R.P.T.; RIBEIRO, A.C.B.; NOBREGA, M.F.; PEREIRA, A.A. and ANDRADE, C.D.P. **A pesca comercial de peixes pelágicos no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil.** *Tropical Oceanography*, 36(1/2): 47-54. 2008b.

VASKE-JR., T.; VOOREN, C.M. and LESSA, R.P.T. **Feeding strategy of Yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), and Wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Boletim do Instituto de Pesca*, 29(2): 173-181. 2003.

VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V.; NUNES, D.; CARVALHO, F.; VÉRAS, D. and TRAVASSOS, P. **The wahoo *Acanthocybium solandri* Fishery in the Vicinity of Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil, from 1998 to 2006.** *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*. 62:1662-1670. 2008.

VIANA, D.; BRANCO, I.; FERNANDES, C.; FISCHER, A.; CARVALHO, F.; TRAVASSOS, P. and HAZIN, F.H.V. **Reproductive biology of the wahoo, *Acanthocybium solandri* (Teleostei: Scombridae) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *International Journal of Plant and Animal Sciences*, 1(4):49-57. 2013.

VIANA, D.F.; HAZIN, F.H.V.; ANDRADE, H.A.; NUNES, D.M. and VIANA, D.L. **Fisheries in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago: 13 years of monitoring.** *Bol. Inst. Pesca, São Paulo*, 41(2): 239-248. 2015.

VIANA, D.L.; TOLOTTI, M.T.; PORTO, M.; ARAÚJO, R.J.V.; VASKE-JR, T. and HAZIN, F.H.V.. **Diet of the oil fish *Ruvettus pretiosus* (Perciformes: Gempylidae) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Brazilian Journ. Oceanogr.*, 60(2): 183-190. 2012.

WELCOMME, R.L. *Fisheries ecology of floodplain rivers.* Longman Inc., New York. 317 p., 1979.

Elasmobrânquios do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Fabio Hissa Vieira Hazin ¹

Bruno César Luz Macena Rocha¹

Danielle de Lima Viana^{1,2}

Fernanda de Oliveira Lana¹

Luiza Paoliello Pacheco de Oliveira¹

Natália Priscila Alves Bezerra¹

Sibele Alves Mendonça¹

10

Abstract

Pelagic sharks and rays represent only 6% of the world's elasmobranch species, and only 64 of them inhabit oceanic regions. Twenty of these species have been recorded in Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), including 6 new records for the region. The data examined here were obtained between 2008 and 2016 through a research program using conventional tag/recapture, acoustic and satellite telemetry, and visual censuses (photo-identification). One hundred and one small longline sets were carried out, with 129 elasmobranchs caught in 78 of these sets, including 121 sharks and 8 rays. The family Carcharhinidae accounted for 84.5% of the catch, with a strong predominance of silky sharks, *Carcharhinus falciformis*, both in frequency of occurrence and CPUE. Of the elasmobranchs caught, 51 were tagged with conventional tags, 47 sharks and 4 rays. All recaptures occurred only a few days after tagging. Between January 2009 and July 2015, 15 sharks of the genus *Carcharhinus* were also tagged with acoustic transmitters. There were 5 *C. falciformis* and 3 *C. galapagensis* detected by the acoustic receivers during the 63 months monitored. Detection rate of *C. galapagensis* was much higher than for *C. falciformis*, demonstrating that *C. galapagensis* are significantly more associated with the insular ecosystem. Thirty-one elasmobranchs were tagged with satellite transmitters, 22 sharks and 9 rays. The dive patterns indicated that *C. falciformis* remained largely at depths from surface to 70 m and temperatures from 26° to 28°C. The horizontal displacements of tagged silky sharks revealed a high association with SPSPA, although they also used a wide area in the surroundings. However, no long-term

migration was detected. All tagged *S. lewini* showed an oceanic migratory pattern, but maintained a possible circadian behavior when close to SPSPA. In general, the daily patterns of vertical movement shown by the scalloped hammerheads indicated a preference for warmer waters, above 25°C and depths greater than 150 m. Whale sharks spent most of their time in warm surface waters (above 10 m), particularly during the evening. Eventually, however, they performed deep dives, including a world record depth of 1,976 m and a minimum temperature of 3.8°C. Chilean devil rays (*Mobula tarapacana*) were sighted in SPSPA almost year round and performed constant dives both during day and night, at depths ranging from the surface to 1.754 m. There was a greater frequency in daytime dives, usually between 100 and 300 m. Despite the preference for temperatures of 25°-28°C, Chilean devil rays reached temperatures of 4.8°C. However, satellite and acoustic transmitter tagging indicate that individuals do not remain around the SPSPA for long periods of time.

Introdução

O conhecimento acerca do comportamento e uso do habitat por grandes peixes pelágicos é essencial para uma adequada avaliação de sua dinâmica populacional e consequente implementação de medidas apropriadas de ordenamento e conservação. Apesar da grande importância desse tipo de conhecimento haver sido reconhecida já há muitos anos, foi apenas recentemente, particularmente a

1 Universidade Federal Rural de Pernambuco (fhhvazin@terra.com.br);

2 Institut de Recherche pour le Développement.

partir dos anos 1990, com a popularização do enfoque ecossistêmico, que os estudos para a identificação de habitats essenciais passaram a tomar um maior impulso. No caso dos tubarões pelágicos esse tipo de estudo torna-se especialmente relevante em razão das graves ameaças à sua conservação (DULVY *et al.*, 2008; CORTÉS *et al.*, 2010; TOLOTTI *et al.*, 2015). Além das suas características biológicas intrínsecas, como baixa fecundidade e crescimento lento, essas espécies vêm sendo capturadas tanto como espécie alvo, como fauna acompanhante, por uma série de frotas, desde a artesanal costeira até embarcações industriais que operam em águas distantes (BONFIL, 1994).

Um método eficiente para se identificar habitats críticos e elucidar o padrão de deslocamento de animais, em geral, é a marcação-recaptura. Marcas externas e internas têm sido utilizadas por séculos em peixes para determinação do padrão de distribuição e migração, identificação e delimitação de seus estoques. (KOHLENER e TURNER, 2001). Além disso, estudos de marcação são capazes de fornecer ainda informações valiosas sobre a mortalidade, idade, crescimento e tamanho de uma determinada população. Além das marcas convencionais, de baixo custo e amplamente utilizadas em uma grande variedade de estudos, marcas que enviam informações à distância, através de pulsos sonoros de alta frequência (telemetria acústica ou ultrassônica) ou pulsos de rádio- frequência (telemetria via satélite) passaram a ser utilizadas em períodos mais recentes. Essas técnicas permitem a obtenção de informações sobre os animais marcados, de forma rápida e detalhada, permitindo o estudo de suas preferências de habitat e atividade circadiana, além de variações sazonais nos seus padrões de movimento (NELSON, 1990).

A habilidade de se localizar remotamente e de se obter dados fisiológicos e comportamentais de animais de vida livre por meio de técnicas de

telemetria biológica, ou biotelemetria, resultou em um grande avanço na compreensão do comportamento e da dinâmica populacional de animais selvagens (SIBERT e NIELSEN, 2001, NIELSEN *et al.*, 2006). A biotelemetria é uma ferramenta que vem sendo amplamente utilizada para expandir os conhecimentos sobre a biologia de diferentes espécies de animais (mamíferos terrestres ou marinhos, aves, peixes e até invertebrados), particularmente, para rastrear os movimentos de peixes pelágicos e outros organismos marinhos cuja observação contínua não é possível. Essas tecnologias inovadoras e de baixo impacto para os animais estudados têm permitido a identificação de locais de alimentação (GARLA *et al.*, 2006), berçário (RECHISKY e WETHERBEE, 2003) e a elucidação de inúmeros aspectos etológicos, migratórios e da influência do ambiente em peixes (BRILL e LUTCAVAGE, 2001). O uso de marcas eletrônicas tem permitido, assim, a obtenção de informações importantes sobre a profundidade de distribuição, preferências de temperatura e movimentos migratórios de várias espécies de tubarão (SIMS *et al.*, 2003; BONFIL *et al.*, 2005; WENG *et al.*, 2005; TOLOTTI *et al.*, 2015; MACENA, 2016; LANA, 2016; BEZERRA, 2017).

O ASPSP situa-se estrategicamente entre os hemisférios norte e sul e entre os continentes americano e africano, exercendo forte influência no ciclo de vida de várias espécies migratórias. É uma zona de alimentação bem conhecida para a albacora-laje (*Thunnus albacares*) e de reprodução para várias outras espécies (VIANA *et al.*, 2009). Os estudos atualmente em curso no ASPSP objetivam avaliar a composição específica, a abundância relativa, a estrutura populacional e os padrões de movimentação de tubarões e raias que utilizam esse ecossistema. As informações geradas são importantes para se compreender a ecologia das espécies presentes e conseqüentemente para se desenvolver estratégias de gerenciamento capazes de assegurar a sua conservação.

Material e Métodos

Os dados foram obtidos por meio de: (1) prospecção pesqueira para marcação/ recaptura; (2) monitoramento remoto (telemetria acústica e via satélite); e (3) censo visual (foto-identificação) de elasmobrânquios presentes no ASPSP.

Monitoramento com prospecção pesqueira:

Nesse trabalho foram analisados dados de captura provenientes de lançamentos com linhas de espera entre os anos de 2010 e 2015, em duas boias de ancoragem (B1 e B3) localizadas nas imediações do ASPSP (Figura 1).

Após capturados, os animais foram acomodados no convés de forma a reduzir o estresse da manipulação, cobrindo-se os seus olhos com um

tecido molhado e mantendo-se uma mangueira com fluxo contínuo de água salgada na boca para oxigenação. Em seguida, os animais foram identificados, sexados, medidos e marcados com marcas convencionais e eletrônicas (acústica e via satélite) para monitoramento remoto, sempre aplicadas na primeira nadadeira dorsal, sendo também coletadas amostras do tecido muscular para posterior análise molecular. Ao final do procedimento, os anzóis foram retirados e os animais libertados. Caso o comprimento do tubarão ultrapassasse 2 m, os procedimentos de coleta de dados eram realizados *in situ*, com o auxílio do bote inflável, e com o animal imobilizado ao lado do bote para não comprometer a segurança da tripulação ou do tubarão. Como indicador da abundância relativa, utilizou-se a captura por unidade de esforço-CPUE, calculada como o número de indivíduos capturados por cada 10 anzóis.

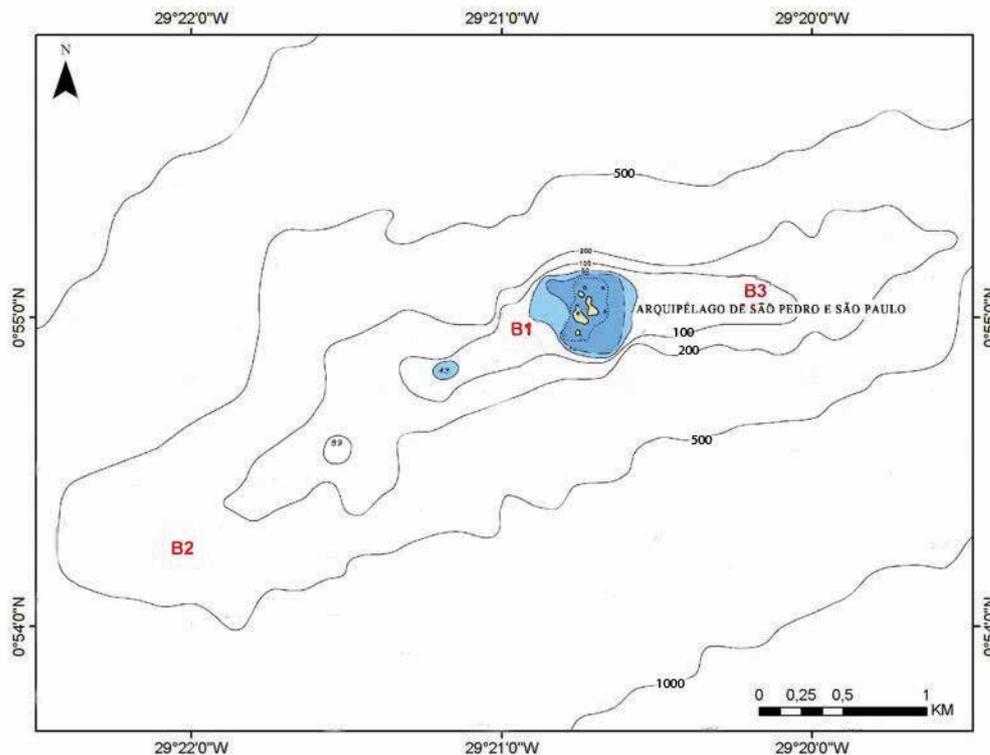


Figura 1. Localização das boias de ancoragem (com hidrofones) no entorno do ASPSP, próximas às quais foram realizadas operações de pesca. B1: oeste, B2: sudoeste e B3: leste.

Figure 1. Location of mooring buoys (set with hydrophones) around the SPSPA, where fishing surveys were carried out. B1: west, B2: southwest, and B3: east.

Monitoramento remoto (telemetria acústica e via satélite) e por censo visual

O sistema acústico foi composto por três receptores (hidrofonos) fixos, instalados a uma profundidade de 15 m, dispostos em três boias de ancoragem situadas no entorno do ASPSP (Figura 1), com o objetivo de detectar os sinais individuais emitidos pelos transmissores ultrassônicos fixados aos tubarões e raias previamente marcados. Já os transmissores via satélite coletam e armazenam dados sobre o comportamento do animal marcado enviando os mesmos para o usuário, via satélite. Nesse trabalho foram utilizados dois tipos de transmissores via satélite: a marca *Pop-up satellite archival transmitting tag*-PSAT (modelos Mk10 e MiniPAT); e a *Smart position or temperature transmitting tag*-SPOT. A PSAT coleta e armazena dados a respeito da profundidade, temperatura da água e luminosidade (convertido em estimativas de localização por meio de algoritmos de geolocalização). Após o período pré-programado, a marca se desprende, flutuando até a superfície, de onde envia os dados para o sistema de satélites Argos e daí à plataforma de pesquisa em terra. Já a SPOT é capaz de armazenar dados de temperatura por algumas horas, enviando essas informações sempre que o animal marcado alcança a superfície e a antena do transmissor fica para fora da água para possibilitar a conexão com o satélite, fornecendo, dessa forma, um rastreamento em tempo quase real. Uma estimativa acurada da posição, porém, depende de um número suficiente de recepções dos sinais enviados para o satélite, a cada passagem do mesmo. Quatro espécies de elasmobrânquios têm sido estudadas com esse tipo de metodologia no ASPSP: *C. falciformis* e *S. lewini*, marcadas por meio de prospecção pesqueira; e *Mobula tarapacana* e *Rhincodon typus*, marcadas em mergulho, quando do monitoramento por censo visual. Além do monitoramento eletrônico, foram realizados também censos visuais por superfície, a bordo da embarcação de apoio, e por mergulho livre nos arredores do ASPSP.

Resultados e Discussão

Ao longo de 60 dias, transcorridos em 16 expedições, foram realizados 101 lances de pesca, em 23 dos quais não houve captura. Nos demais 78 lances foram capturados 129 elasmobrânquios, sendo 121 tubarões e oito raias. A família Carcharhinidae foi responsável por 84,5% da captura dos elasmobrânquios (90% dos tubarões), com forte predominância, tanto na frequência de ocorrência quanto na CPUE, do *C. falciformis*, seguido pelo *C. galapagensis* e pelo *C. obscurus*. Além dos elasmobrânquios, foram capturados 94 teleósteos, divididos em oito taxa: *Ruvettus pretiosus* (29); *Acanthocybium solandri* (26); *Thunnus albacares* (25); *T. atlanticus* (8); *Caranx crysos* (2); *Coryphaena hippurus* (2); *T. obesus* (1) e *Uraspis* sp. (1) (Tabela I).

Quinze espécies de elasmobrânquios já foram registradas para o ASPSP (VASKE JR *et al.*, 2005; FERREIRA *et al.*, 2009). O presente programa de monitoramento obteve seis registros adicionais: *C. obscurus*, *Galeocerdo cuvier*, *Hexanchus griseus*, *Isistius brasiliensis*, *Manta birostris* (MENDONÇA *et al.*, 2012) e *Sphyrna zygaena* (BEZERRA *et al.*, 2017).

A CPUE média para *C. falciformis* foi igual a 0,43, 0,11 *C. galapagensis* e 0,04 *C. obscurus*. A CPUE para *C. falciformis* apresentou indícios de declínio entre os anos, reduzindo de 1,56, em 2010, para 0,05, em 2015. Já a CPUE para *C. galapagensis*, de forma inversa, exibiu tendência de aumento a partir de 2012 (CPUE= 0,02), quando capturado pela primeira vez no presente monitoramento, apresentando valor igual a 0,25 no ano de 2015, respectivamente. Já a CPUE por local de lançamento apresentou diferença significativa para *C. falciformis* (B1= 0,17; B3= 0,49) (ANOVA, F= 5,28, p= 0,02) e *C. galapagensis* (B1= 0,30; B3= 0,05) (ANOVA, F= 8,77, p< 0,01), com essas espécies ocorrendo predominantemente nas boias leste (B3) e oeste (B1), respectivamente (PAOLIELLO, 2017).

Foram marcados 51 elasmobrânquios com marcas convencionais, sendo 47 tubarões (36 *C. falciformis*; 7 *C. galapagensis*; 2 *C. obscurus* e 2 *S. lewini*) e 4 raias *M. thurstoni*. As recapturas ocorreram em quatro ocasiões e variaram desde poucos dias (17) após as marcações até 11 meses de liberdade (média= 135,7 dias; D.P.= 135,2). Entre janeiro de 2009 e julho de 2015, 15 tubarões do gênero *Carcharhinus*, nove *C. falciformis*, cinco *C.*

galapagensis e um *C. obscurus* foram marcados também com transmissores acústicos, cada um contendo um código único de identificação. Cinco *C. falciformis* e três *C. galapagensis* foram detectados pelos receptores acústicos durante os 63 meses amostrados. Apesar de os outros sete tubarões terem sido liberados em boas condições de vida após a marcação, estes não apresentaram detecções.

Tabela I. Composição das capturas em número (N) e frequência relativa de ocorrência (F%), de elasmobrânquios no ASPSP, entre 2010 e 2015. *Primeiro registro.

Table I. Catch composition in number (N) and in relative frequency (F%), in the vicinity of SPSPA, between 2010 and 2015. *First record.

Espécie	N	F%	CPUE(*10)
Tubarão-lombo-preto (<i>C. falciformis</i>)	81	62.8	0.43
Tubarão-das-Galápagos (<i>C. galapagensis</i>)	20	15.5	0.11
Tubarão-fidalgo (<i>C. obscurus</i>)*	8	6.2	0.04
Carcharhinus	109	84.5	0,58
Tubarão-martelo-recortado (<i>S. lewini</i>)	7	5.4	0.04
Tubarão-martelo-liso (<i>S. zygaena</i>)*	1	0.8	0.01
Tubarão-mako (<i>I. oxyrinchus</i>)	3	2.3	0.02
Outros tubarões	1	0.8	0.01
Tubarões	121	93.8	0,64
Raia-manta-mirim (<i>M. thurstoni</i>)	8	6.2	0.04
Raias	8	6.2	0.04
Elasmobrânquios	129	57.8	0,69
Teleósteos	94	42.2	0,47
TOTAL	223	100	-

As detecções acústicas dos *C. falciformis* se apresentaram mais intervaladas ao longo do tempo do que as do *C. galapagensis*. O período de dias em sequência com detecções para os *C. galapagensis* (média = 20,7 ± 3; n=3) foi muito maior do que para *C. falciformis* (4,6 ± 3,9; n=5), demonstrando que os *C. galapagensis* estão muito mais associados com o ecossistema insular e corroborando o caráter mais residente e associado às ilhas oceânicas desta espécie (MEYER *et al.*, 2010). As detecções de *C. falciformis* não apresentaram diferença significativa por turno (ANOVA, F= 2,45, p= 0,13), enquanto as detecções dos *C. galapagensis* foram

significativamente mais frequentes no período diurno (06-18h) (ANOVA, F= 14,24, p< 0,01) (Figura 2). O número de detecções para o *C. galapagensis* foi significativamente maior do que para o *C. falciformis* (ANOVA, F= 6,89, p= 0,04). O número de detecções por espécie também apresentou diferença significativa entre as duas localizações (ANOVA, F= 311451, p< 0,01), com o *C. falciformis* estando quase que completamente associado ao lado leste (98,75% das detecções) e o *C. galapagensis* completamente associado ao lado oeste (100%). Este padrão está em consonância com a distribuição espacial das capturas analisadas na prospecção pesqueira.

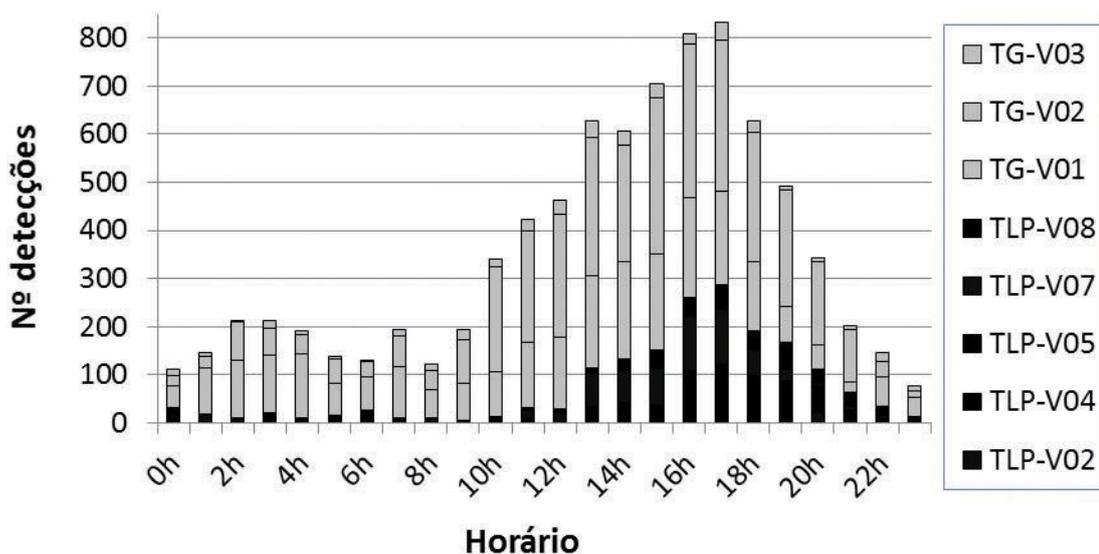


Figura 2. Número de detecções ao longo do dia, por hora, para os tubarões *C. falciformis* (TLP) e *C. galapagensis* (TG).
Figure 2. Number of hourly detections during the day for *C. falciformis* (TLP) and *C. galapagensis* (TG).

Em 2011, a população de *C. galapagensis* do ASPSP foi declarada extinta, baseando-se em relatos históricos reportados na literatura (LUIZ e EDWARDS, 2011). No entanto, devido à carência de estudos específicos sobre tubarões no arquipélago e a dificuldade inerente na identificação de espécies do gênero *Carcharhinus* é possível que a espécie não tenha sido corretamente identificada ao longo dos últimos anos. Nossos estudos indicam que o *C. galapagensis* ainda está presente no arquipélago, mesmo após um longo período sem registro de ocorrência, e que está apresentando uma tendência de aumento de abundância, em contraste com uma aparente tendência de redução do *C. falciformis* ao longo dos últimos anos, o que sugere uma competição interespecífica por espaço (PAOLIELLO, 2017). A redução na abundância de *C. galapagensis* no entorno do arquipélago foi provavelmente ocasionada pelo intenso esforço de pesca local realizado no passado (LUIZ e EDWARDS, 2011), tendência, no entanto, que parece estar sendo revertida de forma surpreendentemente rápida, a partir da descontinuidade da captura de

tubarões na área, em 2012, devido a normatização da SECIRM. Além disso, devem ter contribuído também as restrições à pesca de *C. falciformis* no Oceano Atlântico implementadas pela Comissão Internacional para a Conservação do Atum do Atlântico- ICCAT, em 2011, a qual foi internalizada no Brasil por meio da Instrução Normativa Interministerial nº 8, de 06 de novembro de 2014.

Monitoramento remoto (telemetria acústica e via satélite)

Entre os anos de 2010 e 2014, foram marcados dez *C. falciformis* com transmissores via satélite, sendo oito com PSAT (3 Mk10 e 5 MiniPAT) e dois com SPOT (LANA 2012, 2016). O tempo de monitoramento destes tubarões variou entre 6 e 248 dias. Sete das dez marcas reportaram dados ao satélite como programado, uma reportou prematuramente e duas nunca reportaram. A maioria dos *C. falciformis* marcados permaneceu a maior parte do tempo em profundidades de 0-70 m e em temperaturas entre

26° e 28°C, raramente alcançando profundidades superiores a 70 m ou temperaturas inferiores a 20°C, demonstrando hábito estritamente epipelágico, particularmente no período diurno. Foram observadas, porém, algumas incursões à zona mesopelágica, com mergulhos esporádicos em profundidades de 450 m, principalmente durante o período noturno atingindo temperaturas de até 8°C.

Os *C. falciformis* rastreados permaneceram a maior parte do tempo nas imediações do ASPSP, embora também tenham utilizado uma ampla área no seu entorno (Figura 3), sugerindo um grau de independência desse ecossistema insular, possivelmente governado por razões de

forrageamento ou por competição interespecífica por nicho ecológico com o *C. galapagensis* (PAOLIELLO, 2017). Um longo tempo de permanência de *C. falciformis* próximos a locais de agregação de animais marinhos, como objetos à deriva (*Fish Aggregating Devices*-FADs) e ilhas oceânicas, foi igualmente relatado por outros autores (FILMALTER *et al.*, 2015).

Sete *S. lewini* também foram marcados com transmissores via satélite, sendo 6 com PSAT e um com SPOT (BEZERRA, 2017). Embora os transmissores tenham sido pré-programados para ficarem afixados aos animais por 70 ou 120 dias, houve o desprendimento prematuro das duas primeiras marcas (HS-1 e HS-2) implantadas, após

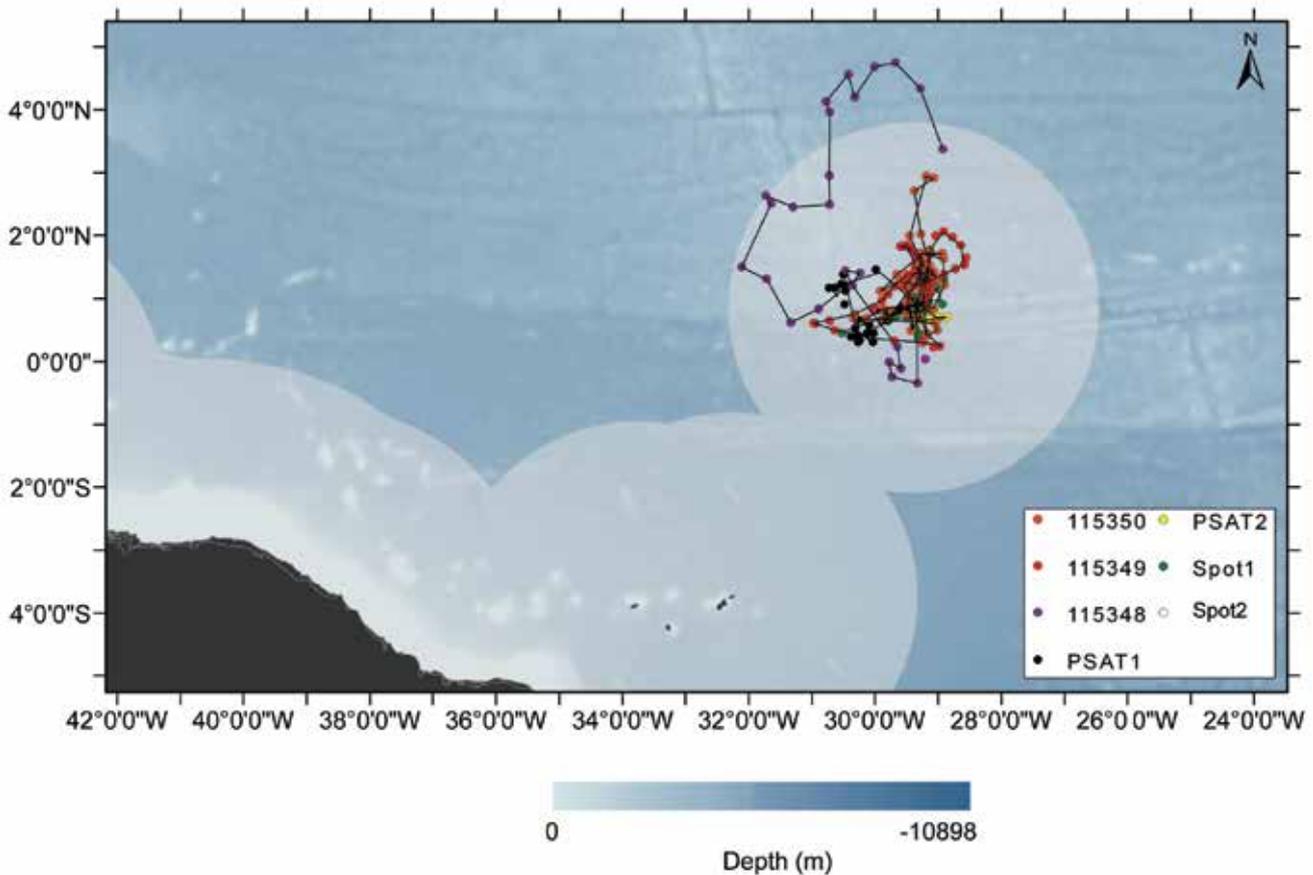


Figura 3. Rotas mais prováveis dos tubarões lombo-preto (*C. falciformis*) marcados com transmissores via satélite no entorno do ASPSP.

Figure 3. Most probable tracks of silky sharks tagged with satellite tags in SPSPA.

sete e cinco dias, respectivamente. Além disso, a marca SPOT fixada ao HS-4 nunca transmitiu. Os dados de luminosidade das marcas PSAT indicaram que todos os espécimes permaneceram em modo migratório oceânico, ou seja, não se deslocaram em direção ao continente, e mantiveram, possivelmente, um comportamento circadiano de afastamento e aproximação do ASPSP (Figura 4). A utilização das ilhas e montes submarinos como áreas preferenciais para a espécie já foi reportada por outros autores (BESSUDO *et al.*, 2011; KETCHUM *et al.*, 2014) e sugere uma possível fidelidade do *S. lewini* ao ASPSP.

De modo geral, o padrão diário de movimentação vertical dos tubarões monitorados indicou preferência por águas mais aquecidas, acima dos 25°C, e por profundidades superiores a 150 m. Contudo, a despeito dessa faixa preferencial, os

exemplares marcados também realizaram incursões frequentes em profundidades superiores a 150 m. Todos os mergulhos realizados pelos tubarões às zonas de maiores profundidades (>500 m) foram registrados exclusivamente durante o período noturno. A máxima profundidade atingida foi de 728 m em duas ocasiões durante à noite, onde a temperatura mínima registrada foi igual a 5,6°C. Os padrões de movimentação vertical indicam que o *S. lewini* frequenta uma grande amplitude de profundidade e temperatura na coluna d'água, entre as zonas epipelágicas e mesopelágicas. Incursões a grandes profundidades provavelmente estão associadas à busca por presas, a exemplo dos cefalópodes que ocorrem em profundidades superiores a 300 m (VASKE JR *et al.* 2009), e/ou por uma menor competição intra- e interespecífica por alimento nas adjacências do ASPSP (BEZERRA, 2017).

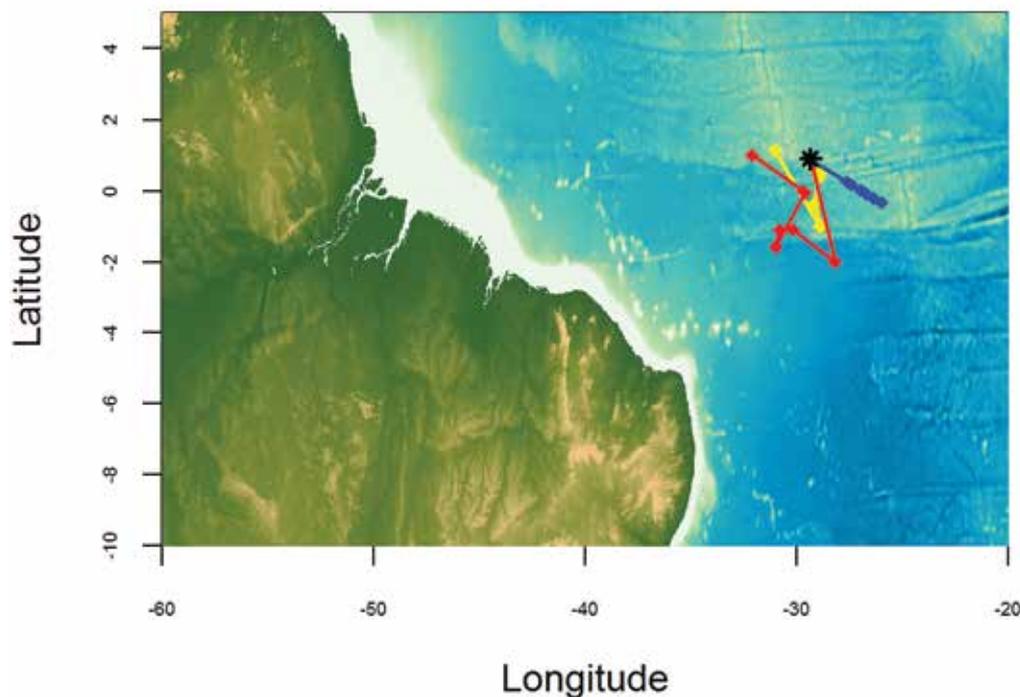


Figura 4. Rotas mais prováveis dos tubarões-martelo (*S. lewini*) monitorados a partir do ASPSP (asterisco). As linhas correspondem a movimentação dos tubarões HS-5 (amarelo), HS-6 (vermelho) e HS-7 (azul).

Figure 4. Most probable track of scalloped hammerhead sharks from the SPSPA. The black asterisk represents the SPSPA and the lines represent HS-5 (yellow), HS-6 (red) and HS-7 (blue) most probable tracks.

O tubarão-baleia (Figura 5) apresenta distribuição circungal, em regiões costeiras e oceânicas de águas tropicais e subtropicais nos três grandes oceanos. De comportamento altamente migratório, é capaz de atravessar longas distâncias e de cruzar bacias oceânicas inteiras, razão pela qual o estudo de sua ecologia e biologia torna-se particularmente difícil e logisticamente complexo (ROWAT e BROOKS, 2012). A abundância do tubarão-baleia encontra-se geralmente associada a fatores ambientais que propiciam o enriquecimento das águas, governando seus movimentos migratórios para locais com alta disponibilidade de alimento (ROWAT e BROOKS, 2012). Por essa razão, acredita-se que o forrageamento seja o principal motivo de formação de agregações para a espécie. Agregações alimentares ocorrem principalmente próximas à costa e são formadas tipicamente por indivíduos imaturos. Por outro lado, agregações de

tubarões-baleia maduros são raramente observadas e sua ocorrência é frequentemente relacionada a ambientes oceânicos.

Distribuído nas províncias nerítica e oceânica do Brasil, o tubarão-baleia possui registros de ocorrência em toda a costa e também em ilhas oceânicas, incluindo o Atol das Rocas e os Arquipélagos de Fernando de Noronha, Abrolhos e ASPSP (SOTO e NISA-CASTRO-NETO, 2000), sendo este último o local do território brasileiro com a maior frequência de ocorrência da espécie (HAZIN *et al.*, 2008, MACENA e HAZIN, 2016).

No presente estudo, aspectos ecológicos, populacionais e comportamentais de tubarões-baleia foram avaliados por meio de censo visual com foto-identificação e telemetria via satélite com o objetivo de compreender a estrutura da população e a importância do ASPSP, um ambiente



Figura 5. Tubarão-baleia fotografado nas imediações do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Crédito: Bruno Macena.
Figura 5. Whale shark photographed in the vicinity of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago.

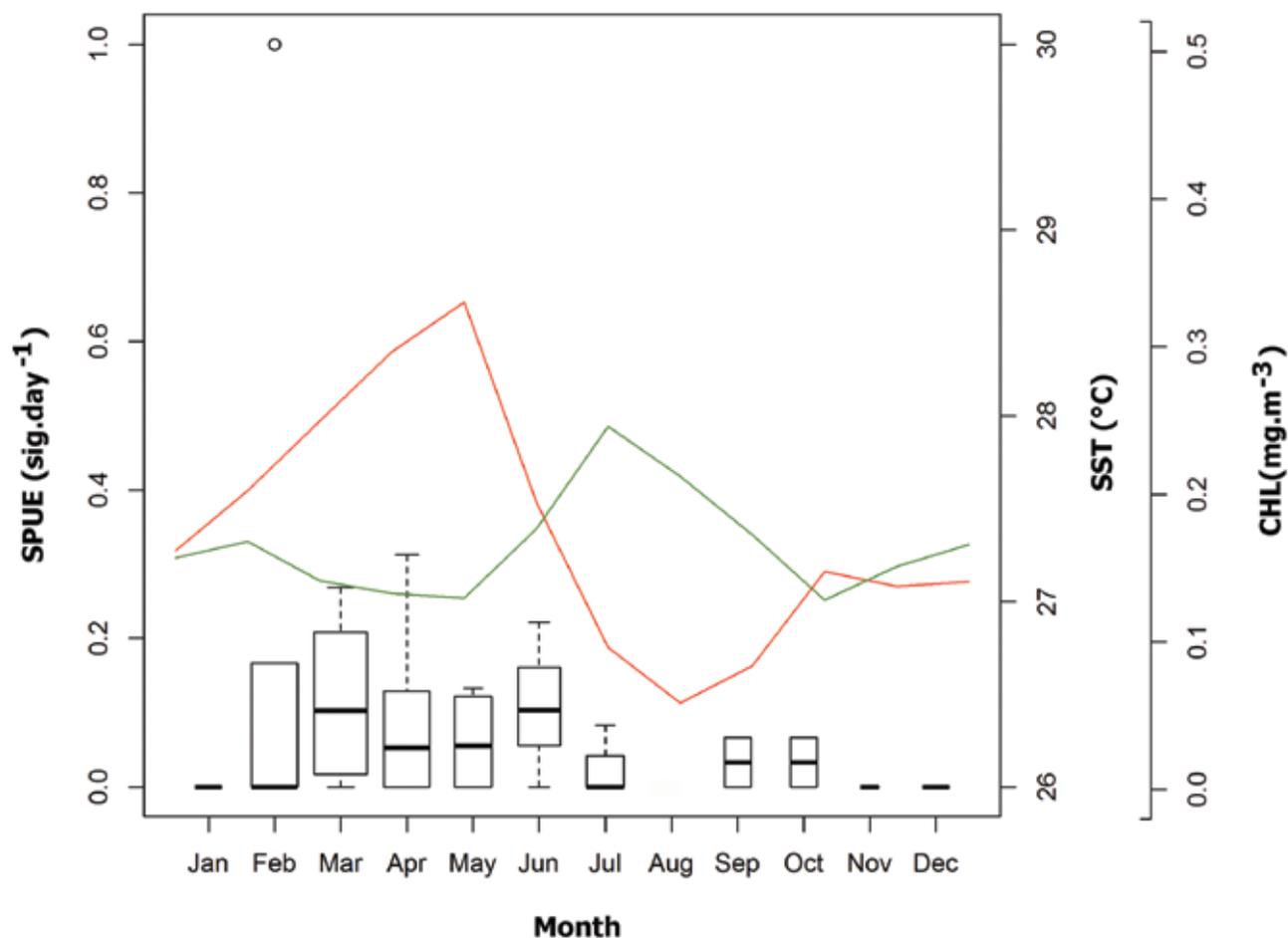


Figura 6. Avistamento por unidade de esforço (SPUE; avistamento/dia) em relação à temperatura da superfície do mar (SST, vermelho) e concentração de Clorofila-a (CHL, verde), entre janeiro de 2005 e dezembro de 2014. Crédito: Macena e Hazin 2016.

Figure 6. Sighting per Unit of Effort (SPUE) in relation to sea surface temperature (SST; red) and Chlorophyll-a concentration (CHL; green), from January 2005 to December 2014.

insular oceânico, na sua história de vida (MACENA, 2016). Entre fevereiro de 2005 e junho de 2017, 55 tubarões-baleia foram observados, com o maior número de avistamentos tendo ocorrido entre fevereiro e junho, com picos em março e abril (Figura 6). Geralmente os tubarões-baleia são avistados solitários, no entanto já foram registrados grupos de até 3 indivíduos ao mesmo tempo. Durante esse período, as correntes marinhas estão mais fracas e as águas enriquecidas com ovos e larvas de peixes e invertebrados (MACEDO-SOARES *et al.*, 2012) que se reproduzem nessa época do ano e,

por consequência, atraem vários animais marinhos para o forrageio (*e.g.* atuns, cavala-impingem, raias-manta), incluindo o tubarão-baleia que se aproveita oportunamente da abundância desses organismos planctônicos para se alimentar durante sua passagem pelo ASPSP.

Os tubarões-baleia possuem um padrão de manchas único em seu flanco, semelhante a uma impressão digital, por meio do qual é possível se identificar individualmente os espécimes de uma população (HOLMBERG *et al.*, 2009). No

presente trabalho, 768 fotos e 118,58 minutos de vídeo foram produzidos, com 27 tubarões-baleia tendo sido foto-identificados. No entanto, após inspeção de qualidade da imagem, apenas 16 foto-impressões foram consideradas adequadas e utilizadas para identificação individual. Quatro indivíduos identificados foram reavistados, sendo dois deles após um período de 3 e 4 dias e outros dois entre anos diferentes. Adicionalmente, o banco de imagens dos tubarões-baleia observados no ASPSP foi comparado com a biblioteca mundial de foto-identificação da espécie (*Wildbook for Whale Sharks* www.whaleshark.org) para verificação de conectividade com outros locais do mundo, não tendo sido observado, entretanto, nenhum emparelhamento (MACENA e HAZIN, 2016).

Os tubarões-baleia apresentaram comprimento estimado variando entre 2,5 e 14 m e uma média de 8,2 m, não tendo havido diferença significativa de tamanho entre os meses do ano. Os tubarões foram classificados por estágio de maturação, de acordo com o tamanho, sendo imaturos os indivíduos menores que 8 m (32,5%) e maduros os maiores que 9 m (46,5%). Apesar da ampla variação de comprimento dos tubarões, houve equilíbrio entre o número de jovens e de adultos, não apresentando indícios de segregação ontogenética. Esse tipo de estrutura populacional é singular mundialmente, já que a maioria dos locais de ocorrência é dominada por jovens, e algumas poucas por adultos, em ambientes insulares oceânicos (ROWAT e BROOKS, 2012).

Evidências de atividade reprodutiva em fêmeas adultas (ex. abdômen abaulado e marcas de mordidas de cópula nas nadadeiras peitorais) e o registro de comportamento de cortejo de um macho, sugerem que parte do ciclo reprodutivo da espécie possa ocorrer no ASPSP. Essa hipótese é reforçada pelo registro de neonatos capturados em águas relativamente próximas ao arquipélago (WOLFSON, 1983; KUKUYEV, 1995).

Para conhecer os deslocamentos do *R. typus* nas imediações do ASPSP, cinco indivíduos foram

marcados com transmissores via satélite do tipo PSAT, entre os quais três enviaram com sucesso o sinal contendo dados sobre a localização geográfica, profundidade e temperatura da água (MACENA, 2016). Dois tubarões-baleia nadaram em direção oeste e um na direção leste. Os tubarões passaram a maior parte do tempo em águas quentes superficiais (até 10 m) particularmente durante o período noturno, realizando mergulhos profundos eventuais, atingindo a marca recorde de 1,976 m de profundidade e temperatura mínima de 3,8°C. O comportamento dos mergulhos foi influenciado pelo período do dia e fase lunar, com o tubarão alcançando as maiores profundidades durante o dia e na lua nova. Embora o propósito dos mergulhos profundos ainda não seja bem compreendido, é possível que estejam relacionados com a alimentação ou metabolismo, ou mesmo com a reprodução. A forma de uso da coluna d'água em diferentes regiões do mundo parece ter relação com condições ambientais locais e sazonais. Os tubarões-baleia imaturos e maduros parecem se utilizar do ASPSP para diferentes propósitos. Independentemente do tipo de uso da área, este habitat insular oceânico funciona como um ponto de encontro para jovens e adultos no meio do oceano Atlântico, possuindo, assim, um papel ecológico importante no ciclo de vida da espécie.

Três espécies de raia-manta (*M. tarapacana*, *M. thurstoni* e *M. mobular*) e uma de jamanta-oceânica (*Mobula birostris*), todas pertencentes à família *Mobulidae*, foram registradas entre dezembro de 2008 e maio de 2016. Essas espécies de raia ocorrem comumente em áreas ricas em produtividade primária, em função de seus hábitos alimentares planctófagos. São espécies pelágicas que se distribuem em todos os oceanos tropicais e subtropicais (COUTURIER *et al.*, 2012). As três raias-manta observadas no presente estudo já foram registradas anteriormente no ASPSP (VASKE JR. *et al.*, 2005). No entanto, *M. birostris* foi registrada pela primeira vez como resultado do programa de monitoramento de elasmobrânquios realizado neste estudo (MENDONÇA *et al.*, 2012).

A *M. birostris* (Figura 7a), presente nos três grandes oceanos, é a maior de todas as raias conhecidas, podendo alcançar cerca de 8 m de largura de disco. Essa espécie foi pouco avistada durante o censo visual, com apenas oito indivíduos tendo sido observados: um macho com 2,5 m, duas fêmeas com 3,0 m e 4,5 m de largura de disco, e cinco outros espécimes cujos sexo e tamanho não foi possível identificar. A *M. mobular* também foi pouco observada durante o censo visual, havendo o registro de apenas alguns indivíduos nadando solitariamente. Todos os encontros foram realizados a uma distância que impossibilitou a coleta de informações individuais detalhadas.

M. thurstoni (Figura 7b), por outro lado, é ocasionalmente capturada nas linhas de espera da prospecção e liberada com vida. Essa espécie de raia é comumente avistada nos arredores do ASPSP realizando saltos para fora da água. Nessas ocasiões, o corpo do animal sai completamente da água, gira em torno do seu eixo longitudinal e retorna ao mar. Tal comportamento pode estar

associado à fuga de predadores, retirada de possíveis parasitas ou também ao comportamento social de comunicação e/ou corte. Além dos saltos, foram observados grandes grupos com até 18 indivíduos e comportamentos relacionados à reprodução da espécie, como a formação de trens de perseguição para cortejo, com quatro ou cinco raias nadando se revezando em fila; e o registro de machos com os cláspers abrasados em decorrência de possível cópula. Além disso, uma fêmea prenhe, em início de gestação, foi capturada incidentalmente por um barco da frota comercial (MENDONÇA *et al.*, 2012). Essas evidências sugerem que o ASPSP se apresenta como um importante local de agregação para acasalamento dessa espécie, embora estudos mais aprofundados precisem ainda ser realizados para compreender melhor essa relação.

A raia-manta-chilena *M. tarapacana* (Figura 7a) está presente em todas as zonas tropicais e subtropicais dos oceanos. De hábito oceânico, costuma formar grandes grupos próximos a bancos e ilhas oceânicas,



Figura 7. a) *M. birostris* (dir.) e *M. tarapacana* (esq.) interagindo e b) *M. thurstoni* nas imediações do ASPSP. Créditos: a) Rômulo Pires b) Sibeles Mendonça.

Figure 7. a) *M. birostris* (right) and *M. tarapacana* (left) interacting and b) *M. thurstoni*, around the SPSPA.

onde se concentram para se alimentar de organismos planctônicos (NOTARBARTOLO-DI-SCIARA, 1987). Essa espécie foi a mais frequentemente observada no entorno do ASPSP, tornando possível um estudo mais detalhado sobre a população que visita o local (MENDONÇA, 2011). Ao longo de 355.3 h de observação de superfície, em 330 dias de expedição, 507 *M. tarapacana* foram avistadas no entorno do ASPSP, entre as quais 174 eram fêmeas e 102 machos, não tendo sido possível identificar o sexo dos demais. As raias foram observadas solitariamente, em duplas ou grupos de até 27 indivíduos. Houve o registro da presença da espécie no ASPSP em todos os meses do ano, exceto em novembro. No entanto, apesar da sua presença em praticamente todo o ano, a espécie apresenta uma probabilidade muito maior de ocorrência durante os seis primeiros meses, com as maiores abundâncias tendo sido observadas em fevereiro e junho.

O tamanho estimado das raias variou entre 1,8 e 3,3 m de largura de disco (LD), com médias de 2,7 m e 2,6 m para machos e fêmeas, respectivamente. O tamanho de primeira maturação sexual para machos e fêmeas foi estimado em torno de 2,5 e 2,7 m, na Indonésia (WHITE *et al* 2006). Assim, a *M. tarapacana* observada no ASPSP compreende um misto de espécimes jovens e adultos, com uma grande quantidade de indivíduos estando provavelmente no tamanho de primeira maturação.

Entre janeiro de 2009 e dezembro 2012, 33 *M. tarapacana* foram marcadas com marcas convencionais (12 machos e 21 fêmeas). Embora cinco recapturas visuais (15,2%) tenham ocorrido durante o monitoramento, a data de reavistagem foi sempre próxima à data de marcação, variando em torno de 1 a 9 dias (média de 3,6). Vinte e oito *M. tarapacana* (21 fêmeas, 6 machos e 1 espécime

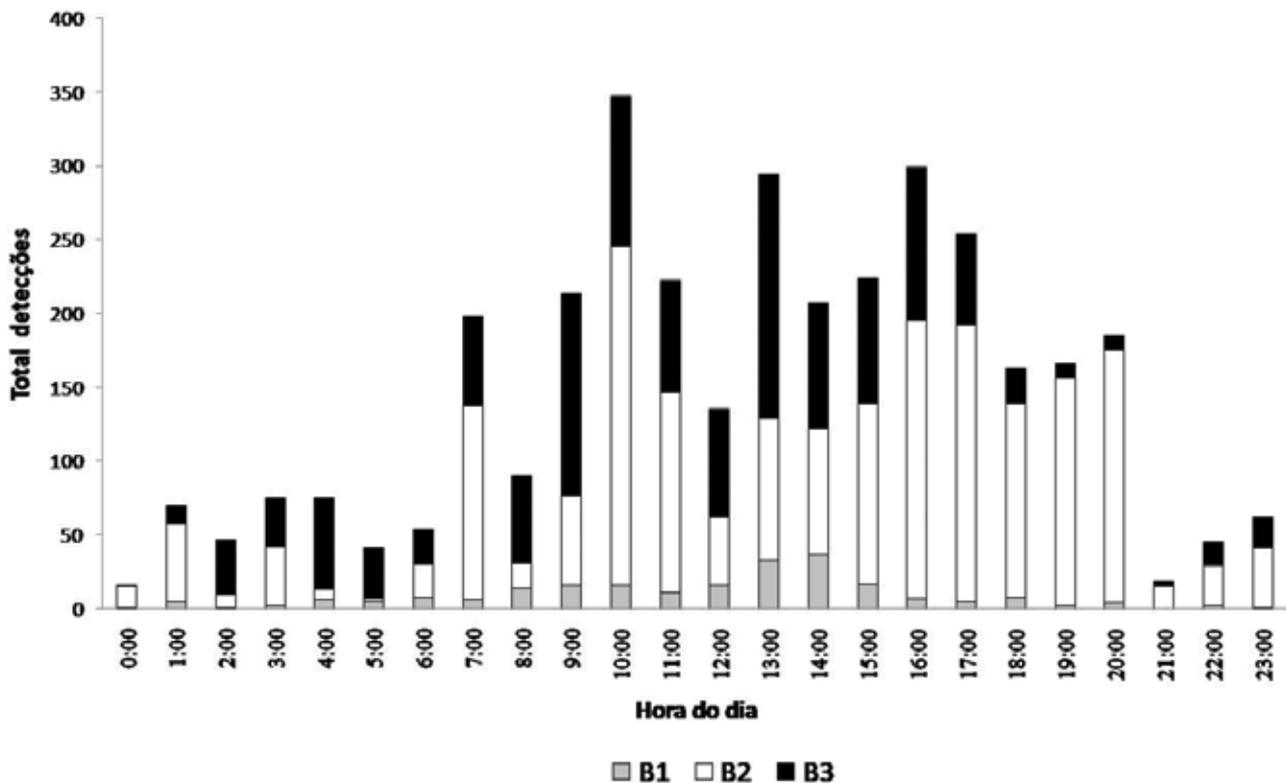


Figura 8. Número de detecções ao longo do dia, por hora, para *M. tarapacana*. B1, B2 e B3 indicam as localizações dos receptores em oeste, sudoeste e leste do ASPSP, respectivamente.

Figure 8. Number of detections along the day per hour for *M. tarapacana*. B1, B2 and B3 indicate the receiver location on west, southwest and east of SPSPA, respectively.

com sexo não identificado) foram marcadas com transmissores acústicos por meio de mergulho livre, sem ter havido a necessidade de captura. O período de permanência das raias marcadas próximo ao ASPSP variou de 1 a 74 dias, com o máximo de 7 dias consecutivos de detecção e média de 2 dias. Das 28 raias marcadas, somente 1 (MT-03) retornou, em 2 oportunidades, após 10 e 6 meses de ausência de detecções. Do total de 3.501 detecções, 56,6% ocorreram na região sudoeste (B2), 37% no leste (B3), e 6,4% no oeste (B1). O sudoeste foi a área mais frequentada pelas raias no entorno do ASPSP, com 10 das 28 raias marcadas tendo sido detectadas nesse local. A maior parte das detecções ocorreram no período do dia (73%), entre 6:00h e 18:00h (Figura 8).

Nove *M. tarapacana* (7 fêmeas e 2 machos) com LD variando de 1,8 m a 2,8 m foram marcadas com transmissores PSAT. O período monitorado variou de 6 a 134 dias. Foram observados mergulhos constantes tanto durante o dia quanto à noite, em profundidades que variaram de 0 a 1.754 m. As raias apresentaram uma maior frequência de mergulhos durante o dia e passaram a maior parte do tempo entre 100 e 300 m de profundidade (Figura 8). No período noturno houve uma redução na frequência de mergulhos profundos, com as raias permanecendo a maior parte do tempo, também, em profundidades mais rasas, acima dos 80 m de profundidade. As raias apresentaram uma maior preferência por águas com temperaturas entre 25°C e 28°C, apesar de fazerem mergulhos até águas com temperaturas de 4.8°C. Apesar de *M. tarapacana* ter sido avistada no ASPSP praticamente o ano todo, as marcações com transmissores acústicos e via satélite indicam que os exemplares examinados não permanecem no entorno do ASPSP por períodos longos de tempo. O fato de uma das raias (MT-03) haver retornado em duas oportunidades, porém, sugere a possibilidade de que o ASPSP esteja inserido no ciclo migratório da espécie, que frequenta esse ecossistema insular intermitentemente. Padrão semelhante de uso sazonal do habitat com período curto de tempo

de permanência no ASPSP foi também observado para o tubarão-baleia, que também é um grande planctófago migratório (MACENA e HAZIN, 2016).

A diversidade relativamente elevada de elasmobrânquios no ASPSP, aliada às características peculiares do local, particularmente em decorrência do seu isolamento e localização geográfica, torna o Arquipélago uma importante área de pesquisa para esse grupo. Desde 2008, o programa de monitoramento investiga os aspectos da ecologia e biologia dos elasmobrânquios presentes nas imediações do ASPSP, avaliando a composição específica, abundância relativa, estrutura populacional e genética e os padrões de movimentação (utilização do habitat, padrão de residência, comportamentos de mergulho e migração). O monitoramento eletrônico dos elasmobrânquios com uso de telemetria acústica e via satélite, em decorrência da preocupação em se utilizar métodos de investigação modernos e não letais, tem auxiliado bastante na compreensão de padrões comportamentais das espécies, algumas delas, inclusive, ameaçadas de extinção. Os resultados obtidos permitiram compreender as relações inter- e intraespecíficas e as suas respectivas funções na dinâmica desse ecossistema insular, gerando informações inéditas que contribuirão de forma importante para o manejo e conservação dos elasmobrânquios.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo suporte financeiro e concessão de bolsas. Um especial agradecimento à Secretaria da Comissão Interministerial dos Recursos do Mar (SECIRM) e Marinha do Brasil, pelo suporte logístico às expedições científicas e aos pescadores da empresa Transmar por nos auxiliarem nas capturas e marcações dos espécimes utilizados nesse estudo.

Referências Bibliográficas

- BESSUDO, S.; SOLER, G.A.; KLIMLEY, A.P.; KETCHUM, J.T.; HEARN, A. & ARAUZ, R. **Residency of the scalloped hammerhead shark, *Sphyrna lewini* at Malpelo Island and evidence of migration to other islands in the Eastern Tropical Pacific.** *Envi Biol Fish*, 91: 165–176, 2011.
- BEZERRA NPA, MACENA BLM, MENDONÇA AS, BONFIL R, HAZIN F. **First record of the smooth hammerhead shark (*Sphyrna zygaena*) in Saint Peter and Saint Paul Archipelago: range extension for the equatorial region.** *Lat. Am. J. Aquat. Res.*, 45(2), 2017. DOI: 10.3856/vol45-issue2-fulltext-x.
- BEZERRA, NPA. Biologia pesqueira dos tubarões martelo (SPHYRNA SPP.) no Oceano Atlântico Sudoeste e Equatorial. Trabalho de conclusão de curso (Tese de doutorado), Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. 129 p; 2017.
- BONFIL, R. **Overview of World Elasmobranch Fisheries.** *FAO Fisheries Technical Paper*. v.341, 119p. 1994.
- BONFIL, R., *et al.* **Transoceanic migration, spatial dynamics, and population linkages of white sharks.** *Science*, v. 310: 100-103p, 2005.
- BRILL, R. W e LUTCAVAGE, M. E. **Understanding environmental influences on movements and depth distributions of tunas and billfishes can significantly improve population assessments.** *American Fisheries Society Symposium*, 25: 179-198, 2001.
- CORTÉS E, *et al.* **Ecological risk assessment of pelagic sharks caught in Atlantic pelagic longline fisheries.** *Aquat Living Resour.* 23:25-34, 2010.
- DULVY, N.K. *et al.* **You can swim but you can't hide: the global status and conservation of oceanic pelagic sharks and rays.** *Aquatic Conservation*. v.18, p.459-482, 2008.
- COUTURIER, L. I. E., MARSHALL, A. D., JAINE, F. R. A., KASHIWAGI, T., PIERCE, S. J., TOWNSNED, K. A., WEEKS, J. S., BENNET, M. B. & RICHARDSON, A. J. **Biology, ecology and conservation of the Mobulidae.** *J Fish Biol*, 80: 1075-1119, 2012.
- FERREIRA CEL *et al.* **Peixes recifais: síntese do atual conhecimento.** Em: *O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica*. Orgs. Danielle de Lima Viana *et al.* Brasília, DF: SECIRM, p. 245-250, 2009.
- FILMALTER J. D, COWLEY, P., FORGET, F., DAGORN, L. **Fine-scale 3-dimensional movement behavior of silky sharks *Carcharhinus falciformis* associated with fish aggregating devices (FADs).** *Mar Ecol Prog Ser*. Vol. 539: 207–223, doi: 10.3354/meps11514. 2015.
- GARLA, R. C., CHAPMAN, E. D., WETHERBEE, B. M. e SHIVJI, E.M. **Movement patterns of young Caribbean reef sharks, *Carcharhinus perezi*, at Fernando de Noronha Archipelago, Brazil.** The potential of marine protected areas for conservation of a nursery ground. *Marine Biology*. 149,189-199, 2006.
- HAZIN FHV, VASKE-JÚNIOR T, OLIVEIRA PGV, MACENA BCL, CARVALHO FC. **Occurrences of whale shark (*Rhincodon typus* Smith, 1828) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Braz J Biol*. 68(2): 385-389; 2008.
- HOLMBERG J, NORMAN B, ARZOUMANIAN Z. **Estimating population size, structure, and residency time for whale sharks *Rhincodon typus* through collaborative photo-identification.** *Endang Species Res*. 2009; 7: 39±53
- KETCHUM, J.T.; HEARN, A.; KLIMLEY, A.P.; ESPINOZA, E.; PEÑAHERRERA, C. & LARGIER J. **Seasonal changes in movements and habitat preferences of the scalloped hammerhead shark (*Sphyrna lewini*) while refuging near an oceanic island.** *Mar Biol*, 161: 755–767, 2014.
- KOHLER, N. E. e TURNER, P. A.. **Shark tagging: a review of conventional methods and studies.** *Environmental Biology of Fishes* 60(1-3): 191–223, 2001.
- KUKUYEV EI. **The new finds in recently born individuals of the whale shark *Rhiniodon typus* (*Rhiniodontidae*) in the Atlantic Ocean.** *J. Ichthyol.* 36: 203–205; 1996.
- LANA, F. O. Ecologia do tubarão lombo-preto, *Carcharhinus falciformis* (Bribon, 1939), na Margem Ocidental do Oceano Atlântico Equatorial. Dissertação de Mestrado. Departamento de Pesca e Aquicultura, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 2012.
- LANA, F.O. Morfologia, identificação molecular e movimentação do tubarão lombo-preto, *Carcharhinus falciformis* (Bribon, 1939), no Atlântico Oeste Tropical. Tese de Doutorado. Departamento de Pesca e Aquicultura, Universidade Federal Rural de Pernambuco. 175p. 2016.
- LUIZ OJ; EDWARDS AJ. **Extinction of a shark population in the Archipelago of Saint Paul's Rocks (equatorial Atlantic) inferred from the historical record.** *Biol Cons*, p. 1–9, 2011.
- MACEDO-SOARES LCP, FREIRE AS, MUELBERT J H. **Small-scale spatial and temporal variability of larval fish assemblages at an isolated oceanic island.** *Mar Ecol Prog Ser*. 444: 207–228; 2012.

- MACENA BCL and HAZIN FHV. **Whale Shark (*Rhincodon typus*) seasonal occurrence, abundance and demographic structure in the Mid-Equatorial Atlantic Ocean.** *PLoS ONE*, 11(10): e0164440. 2016.
- MACENA BCL. Habitats adequados e aspectos ecológicos do tubarão-baleia (*Rhincodon typus* Smith 1828) no Oceano Atlântico Sudoeste e Equatorial. Trabalho de conclusão de curso (Tese de doutorado), Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife/PE, Brasil. 159 p; 2016.
- MENDONÇA SA, MACENA BCL, CREIO E, VIANA DL, VIANA DF, HAZIN FHV. **Record of a pregnant *Mobula thurstoni* and occurrence of *Manta birostris* (Myliobatiformes: Mobulidae) in the vicinity of Saint Peter and Saint Paul Archipelago (Equatorial Atlantic).** *Pan Am J of Aqua Sci* 7(1): 21-26, 2012.
- MENDONÇA SA. Abundância relativa, sazonalidade e comportamento de *Mobula tarapacana* (Philippi, 1892) (Chondrichthyes: Mobulidae) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo- Brasil. Trabalho de conclusão de curso (Dissertação de mestrado). Curso de Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, 59p, 2011.
- MEYER CG; PASTAMATIYOU Y P; HOLLAND KN. **A multiple instrument approach to quantifying the movement patterns and habitat use of tiger (*Galeocerdo cuvier*) and Galapagos sharks (*Carcharhinus galapagensis*) at French Frigate Shoals, Hawaii.** *Mar Biol* v. 157, n. 8, p. 1857–1868, 2010.
- NELSON, D. R. **Telemetry studies of sharks: a Review, with applications in resource management.** In: Elasmobranchs as living resources: advances in the Biology, Ecology, Systematics, and the status of the fisheries. H. L. Pratt, S. H. Gruber and T. Taniuchi, *NOAA Technical Report NMFS* 90: 239-256, 1990.
- NIELSEN, J.L.; ARRIZABALAGA, H.; FRAGOSO, N.; HOBDA, A.; LUTCAVAGE, M.; SIBERT, J. **Tagging and Tracking of Marine Animals with Electronic Devices.** Series: Reviews: Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries, Vol. 9. 400 p. 2009.
- NOTARBARTOLO-DI-SCIARA, G. **A revisionary study of the genus *Mobula* Rafinesque, 1810 (Chondrichthyes: Mobulidae) with the description of a new species.** *Zool. J. Linn. Soc.* 91(1):1-91, 1987.
- PAOLIELLO, LPO. 2017. Abundância relativa e uso do habitat por tubarões do gênero *Carcharhinus* (*C. falciformis*, *C. galapagensis* e *C. obscurus*) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo- Brasil. Dissert. de Mestrado, Universidade Federal de Pernambuco, PE, Brasil. 79 p.
- RECHISKY, E. L. e WETHERBEE, B. M. **Short-term movements of juvenile sandbar sharks, *Carcharhinus plumbeus*, on their nursery grounds in Delaware Bay.** *Environmental Biology of Fishes* 68, 113–128, 2003.
- SIBERT, J.R.; NIELSEN, J.L. **Electronic Tagging and Tracking in Marine Fisheries.** Series: Reviews: Methods and Technologies in Fish Biology and Fisheries, Vol. 1. 484 p, 2001.
- ROWAT D, BROOKS KS. **A review of the biology, fisheries and conservation of the whale shark *Rhincodon typus*.** *J Fish Biol.* 2012; 80, 1019±1056.
- SIMS, D.W., SOUTHALL, E.J., RICHARDSON, A.J., REID, P.C. & METCALFE, J.D. **Seasonal movements and behaviour of basking sharks from archival tagging: No evidence of winter hibernation.** *Marine Ecology Progress Series* 248, pp. 187-196. 2003.
- SOTO JMR and NISA-CASTRO-NETO W. **Sobre a presença do tubarão-baleia *Rhincodon typus* Smith, 1829 (Chondrichthyes, Rhincodontidae) na costa brasileira.** *Biociências.* 8(2): 137-152; 2000.
- TOLOTTI, M.T. Pesca e ecologia do tubarão galha-branca oceânico (*Carcharhinus longimanus*, Poey 1861) no Atlântico Oeste tropical. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco. 46p. 2011.
- VASKE JR, T.; LESSA, R. P.; NOBREGA, M.; MONTEALEGRE-QUIJANO, S.; MARCANTE SANTANA, F. & BEZERRA JR., J. L. **A checklist of fishes from Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *J. Appl. Ichthyol.* 21, 75–79, 2005.
- VASKE T, VOOREN CM & LESSA R. **Feeding strategy of the Night Shark (*Carcharhinus signatus*) and Scalloped Hammerhead Shark (*Sphyrna lewini*) near seamounts off northeastern Brazil.** *Braz J Oceanog*, 57: 97-104, 2009.
- VIANA D; HAZIN FHV; CARVALHO de SOUZA MA. (Orgs). *Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.* Brasília, DF: SECIRM, 348 p, 2009.
- WENG, K.C. *et al.* **Satellite tagging and cardiac physiology reveal niche expansion in salmon sharks.** *Science* 310, pp. 104 – 106, 2005.
- WHITE, T. W., GILES, J., DHARMADI & POTTER, I. C. **Data on the bycatch fishery and reproductive biology of mobulid rays (Myliobatiformes) in Indonesia.** *Fish Res* 82: 65-73, 2006.
- WOLFSON FH. **Records of seven juveniles of the Whale Shark (*Rhincodon typus*).** *J Fish Biol.* 22: 647–655; 1983.

Mais do que Ômega-3: Compostos Orgânicos Bromados (Antrópicos e Naturais) em albacora-laje (*Thunnus albacares*) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Mariana B. Alonso¹
Dhoone M. Sousa¹
Jacira S. Oliveira¹
Ana Carolina P. da Costa¹
João Paulo Torres¹
Olaf Malm¹



Abstract

Yellowfin tunas caught in waters near by Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) were investigated in order to detect the anthropogenic and natural organobrominated compounds in their tissues. The Archipelago is located in the Equatorial Atlantic Ocean and belongs to the Brazilian Economic Zone. Muscle and liver tissue samples from yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) males (n = 13) were analyzed. The samples were extracted with CH₂Cl₂: hexane (1:1) and the clean up step was performed with sulfuric acid and alumina columns. Compound determination was obtained on GC-MS in NCI mode on 15m column. The mean concentrations of PBDE were 6.74 ng/g lw in muscle and 5.06 ng/g lw in liver, and MeO-BDEs were 236 ng/g lw in muscle and 192 ng/g lw in liver. Muscle was the organ with the highest concentrations. Mean 2'-MeO-BDE-68/6-MeO-BDE-47 ratios was 4, which indicates that sponges and/or associated bacteria would be the predominant MeO-BDE biosynthesis source in the SPSPA yellowfin tuna ecosystem, contrary to what happens in the Northern hemisphere. PBDE concentrations were one to two orders of magnitude lower and MeO-BDEs were similar in the present study to those observed in blue tunas from Mediterraneo. The values of anthropogenic compounds obtained in the present samples are below those allowed for human consumption and do not pose a risk to human health. International efforts are necessary for the preservation of Atlantic yellowfin tuna stocks, since they perform migrations between

the American and African continents and may contain in their tissues PBDE residues from electronic waste from developed countries. And also because it is a species of high commercial and ecological value, and it belongs to a stock with low contamination by PBDEs.

Introdução

Compostos Orgânicos Bromados

Por séculos o ambiente marinho vem recebendo detritos líquidos e sólidos provenientes de atividades humanas, tais como industriais, domésticas, portuárias, urbanas além da lixiviação decorrente de zonas agrícolas, transformando-o em um grande corpo receptor de rejeitos antrópicos (CLARK, 2001). Talvez por se acreditar na grande capacidade que os oceanos têm de diluir e depurar substâncias, pouca atenção tem sido focada sobre a saturação desse meio, tornando-o um sítio de armazenamento final de substâncias tóxicas criadas pelo homem (ALONSO *et al.*, 2012a).

Os contaminantes orgânicos halogenados estão entre os principais compostos responsáveis por afetarem os ecossistemas aquáticos e terrestres. Dentre eles estão os Poluentes Orgânicos Persistentes (POPs). Esses compostos tem como características principais, toxicidade a organismos, baixa reatividade no meio ambiente (persistência) e alto alcance atmosférico podendo atingir regiões remotas do globo (WHO, 1994). O uso e a produção dos POPs são regulados através da Convenção de Estocolmo.

1 Instituto de Biofísica Carlos Chagas Filho, Universidade Federal do Rio de Janeiro (alonso.mb@gmail.com).

Antrópicos

Compostos orgânicos bromados retardantes de chama são utilizados em numerosos materiais para reduzir o risco de fogo em produtos como plásticos, têxteis, móveis, eletro-eletrônicos, entre outros (de WIT, 2002; ALAEE *et al.*, 2003). Os mais comuns são os difenis éter polibromados (PBDEs) (ALAEE *et al.*, 2003). Atividades como lavagem com ácidos, incineração de componentes de computadores, cabos e fios a céu aberto, deposição de motores e transformadores em lixo comum, podem resultar na descarga de efluentes contendo esses compostos no ambiente (PENG *et al.*, 2007).

Desde o início de sua produção na Alemanha, a demanda das primeiras misturas comerciais de PBDEs tem aumentado exponencialmente (ALCOCK *et al.*, 2003). O consumo global estimado mostra que seu uso está em ascensão: durante o período de 1990 a 2000, houve mais do que uma duplicação, aproximadamente de 145 para 310 mil toneladas. Além disso, as mais altas concentrações desses compostos são encontradas em animais das cadeias alimentares marinhas em comparação com as terrestres (de WIT, 2002). Os PBDEs já foram detectados em sedimentos, água, ar, biota e também em leite humano (ALONSO *et al.*, 2014; LAW *et al.*, 2003).

O risco potencial dos PBDEs na vida selvagem têm mostrado diversos efeitos a saúde humana e animal, tais como indução das enzimas do fígado, efeitos neurotóxicos e imunológicos, propensão a desregulação dos hormônios da tireóide e dos níveis de vitamina A (de WIT, 2002). Devido aos efeitos adversos desses compostos aos seres vivos; a Europa, os EUA e o Japão regularam seu uso e produção a partir da primeira década dos anos 2000 (WHO, 1994; ALAEE *et al.*, 2003). Recentemente (2009), as misturas penta- e octa-BDE foram adicionadas à lista da Convenção de Estocolmo. Apesar do Brasil ser signatário deste tratado, os PBDEs estão presentes nos tecidos de mamíferos marinhos costeiros (ALONSO *et al.*, 2012a).

Naturais

Compostos recentemente encontrados pela ciência no ambiente marinho são os produtos naturais, que segundo Gribble (2010), são mais de 4.700 compostos organohalogenados e que esse número tende a aumentar devido a novas pesquisas na área. Esses compostos são sintetizados de forma abiótica e biogênica, sendo os principais organismos responsáveis por sua síntese as algas (Clorófitas, Feófitas e, especialmente, Rodófitas), plantas, bactérias, invertebrados de corpo mole (tunicados, moluscos, cnidários, briozoários e esponjas), microorganismos (bactérias de manguezais, bactérias marinhas, cianobactérias e fungos) e fitoplâncton (BLUNT *et al.*, 2014; GRIBBLE, 2010). A maioria dos compostos organohalogenados naturais marinhos são únicos e sintetizados por organismos individuais. Devido à salinidade dos oceanos, não é de surpreender que os organohalogenados sejam abundantes nas mais de 500.000 espécies de organismos marinhos existentes (GRIBBLE, 2010).

Entre os compostos orgânicos bromados de origem natural, estão os metoxilados de polibromodifenis éteres (MeO-BDEs). Embora esses compostos sejam sintetizados por organismos (VETTER *et al.*, 2004), sua fonte e efeitos biológicos vêm sendo investigados pela ciência (HARAGUCHI *et al.*, 2009). Se destacam devido a possibilidade de apresentar inúmeras atividades biológicas. Em particular, os de origem marinha são de grande interesse e mostram um grande potencial para o tratamento de doenças humanas contra o câncer, a malária, inflamação e a tuberculose, entre outras (GRIBBLE, 2010). Até o presente momento, sabe-se que alguns compostos organohalogenados naturais possuem funções antipredatórias, antibióticas, antibacterianas, antifúngicas, antivirais, anti-tumorais, antimicrobianas, anti-inflamatórias, anti-incrustantes, neurotóxicas, ictiotóxicas, citotóxicas e inseticidas em estudos *in vivo* e *in vitro* (BLUNT *et al.*, 2014; GRIBBLE, 2010).

MeO-BDEs foram recentemente detectados na cadeia trófica marinha em diferentes regiões (HARAGUCHI *et al.*, 2009), incluindo algas vermelhas, mexilhão azul (*blue mussel*), esponjas marinhas, peixes e mamíferos (VETTER, 2001, ALONSO *et al.*, 2012a). Foram descobertos recentemente pela ciência e acredita-se serem sintetizados por algas e esponjas em associações com bactérias, e biomagnificam na cadeia trófica. Igualmente aos organobromados antrópicos, os MeO-PBDEs são encontrados acumulados nos tecidos de organismos marinhos, e as mais altas concentrações foram encontradas em predadores de topo, principalmente de regiões tropicais (ALONSO *et al.*, 2014, 2012a). Em golfinhos do Brasil e de Zanzibar foram encontrados as concentrações mais elevadas, ultrapassando até os níveis dos organohalogenados antrópicos (ALONSO *et al.*, 2012a; ALONSO *et al.*, 2014). Apesar destes compostos terem sua origem natural (VETTER, 2006), seus efeitos biológicos ainda não são claros (HARAGUCHI *et al.*, 2009).

Área de Estudo

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) (00°55' N, 29°21' W) encontra-se distante 1.100 km da costa de Natal (RN) e é o menor arquipélago oceânico brasileiro. Devido a seu posicionamento geográfico estratégico entre os dois hemisférios e ainda entre os continentes sul-americano e africano, o ASPSP exerce uma forte influência no ciclo de vida de várias espécies migratórias, tais como peixes, crustáceos e as aves que utilizam esta região como zona para alimentação, reprodução e abrigo (VIANA *et al.*, 2008). Além disso, o ASPSP, localizado próximo a linha do Equador (00°55' N, 29°21' W) encontra-se sob a influência de massas de ar provenientes do noroeste do continente africano e da porção norte da Corrente Equatorial Sul (CES) que flui em sentido oeste alimentada pela Corrente de Bengala na costa da África (STRAMMA, 1999). Tais influências atmosféricas, marinhas e até

mesmo migratórias são extremamente importantes no transporte das substâncias mencionadas acima dos continentes para este arquipélago, mesmo que oceânico.

Em consequência de sua alta produtividade, o ASPSP é uma importante área pesqueira para todo o nordeste do Brasil. A albacora-laje está entre as principais espécies de peixes capturadas na região. Segundo o monitoramento dos desembarques dos barcos atuneiros comerciais operando na região de 1998 a 2006, foram capturados 905 ton de albacora-laje e o arquipélago é um local importante para a alimentação dessa espécie (VIANA *et al.*, 2008; VASKE-JUNIOR *et al.*, 2003).

Devido a grande distância da costa e localização, o ASPSP apresenta um elevado grau de endemismo, caracterizando-se como áreas de grande relevância para a conservação da biodiversidade. O monitoramento e a avaliação da saúde dos ecossistemas que envolvem esse arquipélago são extremamente importantes, gerando informações para uma melhor compreensão das populações estudadas e das dinâmicas de micropoluentes em ilhas remotas de regiões tropicais.

Espécie-alvo

O atum albacora, ou albacora-laje (*Thunnus albacares*) assim como outras espécies de atuns, pertence a família Scombridae tem distribuição mundial em mares tropicais e subtropicais (COLLETE e NAUEN, 1983). É classificada como uma espécie oceânica e epipelágica que ocorre acima e abaixo das termoclinas (RIEDE, 2004). Os cardumes se segregam principalmente por tamanho, em grupos monoespecíficos ou multiespecíficos. Durante a fase juvenil, podem formar cardumes mistos com o bonito-listrado (*Katsuwonus pelamis*) e com a albacora-bandolim (*Thunnus obesus*). O comprimento máximo da espécie foi 239 cm, sendo o comprimento de 150 cm o mais comum (IGFA, 2001). A partir de 100 cm são considerados

adultos. Se alimentam de crustáceos, cefalópodes e outros peixes pelágicos (COLLETE *et al.*, 2011). No ASPSP sua principal presa é o peixe-voador (*Cypselurus cyanopterus*) e em menor porcentagem lulas, crustáceos e tunicados (VASKE-JUNIOR *et al.*, 2003).

Através de estudos de marcação e recaptura, foi considerada a existência de um único estoque de *T. albacares* em todo o Oceano Atlântico (FONTENEAU, 1991, BARD e SCOTT, 1992). A existência de uma única população é corroborada por trabalhos sobre genética de populações (ICCAT, 2006). Pesquisas demonstraram a existência de duas áreas principais de desova da espécie no Atlântico: uma no leste (Golfo da Guiné) e outra no oeste (Golfo do México e mar do Caribe) (AROCHA, 2000).

Por ser um peixe migratório, capturado por vários países, o ordenamento de sua pesca é efetuado por organizações internacionais. No Oceano Atlântico, a organização responsável pelo gerenciamento da pescaria deste recurso é a Convenção Internacional para a Conservação dos Atuns do Atlântico (ICCAT), constituída atualmente por mais de 50 países. O volume das capturas tem aumentado nos últimos anos, devido ao aumento do esforço pesqueiro. A redução das capturas por unidade de esforço sugere a depleção de alguns estoques (FAO, 2007). No Atlântico, as capturas apresentam-se em torno de 120.000 toneladas, enquanto no Brasil a captura alcançou em 2005 a marca de 7.223 ton. Entretanto, a captura da albacora-laje no Brasil está em declínio, apresentando captura inferior a 3.000 ton. desde 2012 (ICCAT, 2016).

O atum, bem como outros peixes da família Scombridae são importantes recursos econômicos e alimentares em todo o mundo e esta espécie é principalmente comercializada para enlatados e sashimi (FAO, 2015). A espécie ocorre em águas brasileiras, principalmente na costa nordeste do país. É um importante recurso pesqueiro nas águas de ASPSP e é a principal espécie de atum capturada na ZEE do nordeste do Brasil (VASKE-JUNIOR *et al.*,

2003). A albacora-laje constitui a principal fonte de proteínas alimentares e ácidos graxos ômega-3 para grandes populações na região. Além de ser um predador de topo marinho, a albacora-laje é um peixe de alto desempenho com taxas metabólicas muito elevadas e altas taxas de ingestão de alimento, fatores que aumentam a exposição aos POPs (PENA-ABAUUREA *et al.*, 2009). Esta espécie pelágica apresenta um alto padrão migratório, que pode estar expondo a diferentes padrões de contaminação, dependendo da sua área de alimentação.

O objetivo proposto do presente trabalho é determinar as concentrações de compostos orgânicos bromados antrópicos (retardantes de chama) e naturais (metoxilados de bromados) em albacoras-laje capturados no Arquipélago de São Pedro e São Paulo.

Materiais e Métodos

Amostragem

As amostras biológicas das albacoras-laje (*Thunnus albacares*) foram coletadas através de pescaria com artefato de currico no Arquipélago de São Pedro e São Paulo dentro do Projeto PROARQUIPÉLAGO (CNPq 039/2012) nos anos 2014 e 2015 e encontram-se na tabela I. Os tecidos hepáticos e musculares de albacoras-laje foram congelados e posteriormente liofilizados para as análises para a determinação de compostos organobromados. Para este trabalho foram escolhidos apenas indivíduos machos, para não causar um viés nos resultados, devido as fêmeas transferirem os contaminantes orgânicos halogenados para seus filhotes, assim como ocorre nos mamíferos (ALONSO *et al.*, 2012a). Os machos adultos possuem as maiores concentrações dos poluentes, portanto foram os indivíduos escolhidos para as análises.

Tabela I. Número de amostras biológicas analisadas de acordo o tecido das albacoras-laje coletadas no ASPSP em 2014 e 2015.

Table I. Number of biological samples analyzed according to the tissue of yellowfin tuna collected in SPSPA, 2014 and 2015.

Tecidos	n
Hepático	08
Muscular	05
TOTAL	13

Procedimentos analíticos

O método utilizado nesse estudo foi adaptado de Alonso *et al.* (2012b). A extração das amostras foi feita em aparato soxhlet. Foram extraídas 2 g de tecido liofilizado com a mistura de n-hexano e diclorometano na proporção (1:1) (v/v). As amostras biológicas foram previamente liofilizadas e pesadas. Após a extração foi feita a determinação dos lipídios por métodos gravimétricos. A purificação dos extratos foi realizada em duas etapas: 1a) por ácido sulfúrico concentrado (96%) e agitados durante 1 minuto para garantir a hidrólise completa dos lipídios. Após esse período, os tubos de reação foram colocados em centrífuga por 60 minutos. A fase hexânica foi separada e lavada com 10 mL de água livre de orgânicos 2 vezes agitando-se essa mistura heterogênea por 1 minuto. Esse procedimento foi repetido por 3 vezes, seguindo metodologia descrita em Alonso *et al.* (2012a). Após a purificação por ácido, foi realizada a segunda etapa. 2a) purificação por coluna cromatográfica de alumina desativada 5% com a mistura de n-hexano e diclorometano na proporção (1:2) (v/v).

Procedimentos Cromatográficos

Em todas as baterias de amostras foram realizados brancos analíticos. Os brancos foram submetidos a procedimentos exatamente idênticos aos quais passaram as amostras. As identificações e quantificações dos compostos organobromados foram feitas em cromatógrafo a gás acoplado a um espectrômetro de massas (GC-MS) em modo de ionização química negativa (NCI) em uma coluna de 15m, seguindo método descrito em Alonso *et al.* (2012a) com algumas otimizações. Padrões cromatográficos foram adicionados aos extratos antes da extração (padrões internos BDE-181, PCB-103 e 198) e antes da injeção (padrão interno cromatográfico TCMX) para a quantificação dos compostos organobromados. Curvas de calibração foram feitas para as análises e também testes de recuperação do método, onde padrões dos compostos alvo foram adicionados em amostras triplicatas e quantificadas para avaliar as suas recuperações. Também foram obtidos os limites de quantificação do método (LOQ) e limite de detecção do método (LOD), segundo metodologia descrita em Alonso *et al.* (2012a).

Resultados e Discussão

As substâncias alvo deste estudo foram os organobromados retardantes de chama (PBDEs) e produtos naturais MeO-BDEs. As concentrações dos congêneres individuais e a média destes grupos de compostos (antrópicos - PBDEs e naturais - MeO-BDEs) nos tecidos muscular e hepático de cada exemplar de albacora-laje macho coletado em ASPSP, estão apresentadas na Tabela II.

Tabela II. Concentrações dos congêneres individuais de organobromados e as médias dos congêneres totais (ng.g^{-1} peso lipídico) no músculo e fígado de albacoras-laje machos de ASPSP.

Table II. Concentrations of organobrominated congeners and the total mean (ng.g^{-1} lipid weight) in the muscle and liver of male yellowfin tuna from SPSPA.

Compostos	Músculo								Fígado				
	ATM 13	ATM 17	ATM 18	ATM 19	ATM I	ATM II	ATM III	ATM XV	ATF 17	ATF 19	ATF 21	ATF II	ATF III
BDE-28	0.1	0.9	0.9	4.1	nd	nd	nd	1.4	5.9	3.1	8.4	0.3	0.0
BDE-47	0.1	7.4	7.4	1.1	0.3	0.5	0.7	1.8	3.0	nd	nd	nd	0.5
6-MEOBDE-47	9.3	183	183	32	40	38	33	104	68	63	16	61	35
2-MEOBDE-68	46	393	393	135	150	130	137	415	162	260	59	214	141
BDE-100	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.5	nd	nd	0.4	nd	nd	nd
5-MEOBDE-47	nd	nd	nd	nd	1.5	0.0	nd	nd	nd	0.0	nd	0.9	0.8
4-MEOBDE-49	nd	nd	nd	nd	0.9	0.7	0.5	nd	nd	0.6	nd	0.6	0.7
BDE-99	nd	0.7	0.7	0.2	0.1	nd	0.1	0.3	0.6	0.0	nd	nd	nd
5-MEOBDE-100	nd	0.6	0.6	nd	1.0	0.1	nd	0.4	0.3	0.4	0.3	0.7	0.3
4-MEOBDE-103	nd	0.1	0.1	nd	0.2	0.1	0.1	0.4	0.2	0.7	0.4	0.4	0.4
BDE-154	0.1	0.5	0.5	0.1	0.2	0.1	0.2	0.4	0.3	0.5	0.2	0.2	0.2
5-MEOBDE-99	nd	0.7	0.7	0.2	nd	0.2	nd	0.3	2.3	nd	0.9	0.6	nd
4-MEOBDE-101	nd	0.8	0.8	0.4	nd	nd	nd	nd	0.3	0.4	nd	0.3	nd
BDE-153	0.2	1.0	1.0	0.4	nd	nd	nd	nd	0.3	nd	nd	0.0	nd
BDE-183	nd	0.4	0.4	0.3	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	0.4	nd
PBDEs	0.5	10.9	10.9	6.3	0.6	0.7	1.4	3.8	10.2	3.9	8.6	0.8	0.7
MeO-BDEs	55.2	578	578	167	193	169	171	520	232	325	77.2	279	179

nd = não detectado

As concentrações médias de PBDEs obtidas no presente estudo foram de 6,74 ng/g de lipídio (lw) no músculo e 5,06 ng/g lw no fígado e de MeO-BDEs foram 236 ng/g lw no músculo e 192 ng/g lw no fígado (Tabela II). Na tabela III estão apresentadas as razões dos dois congêneres de metoxilados mais abundantes nas amostras. Se essa razão for maior do que 1 indica uma influência de esponjas na área de estudo ou na dieta do organismo estudado e se o valor for menor do que

1, uma influência predominante de algas (VETTER, 2006). A média das razões 2'-MeO-BDE-68/6-MeO-BDE-47 foi 4 para o músculo e 3 para o fígado, o que indica que esponjas e/ou bactérias associadas seriam a fonte predominante de MeO-BDE no habitat ou na dieta dos atuns capturados no ASPSP. O contrário ocorre no hemisfério Norte, onde o congêner 6-MeO-BDE-47 é o MeO-BDE dominante em espécies marinhas (ALONSO *et al.*, 2014).

Tabela III. Concentrações de organobromados (ng.g^{-1} , peso seco e peso lipídico) no músculo e no fígado, comprimento furcal (CF) e razão de MeO-BDEs em albacoras-laje machos de ASPSP.

Table III. Organobrominated compound concentrations (ng.g^{-1} , dry weight and lipid weight) in muscle and liver, furcal length (CF) and MeO-BDEs ratio in SPSPA male yellowfin tuna.

Músculo	ng.g-1 p.seco		ng.g-1 p. lipídico		Razão	
	PBDEs	MeO-BDEs	PBDEs	MeO-BDEs	CF (CM)	2-MeOBDE 68/6-47
ATM 17	1,00	53,2	10,9	578	99	5
ATM 18	0,51	17,3	5,56	188	107	2
ATM II	0,06	15,5	0,68	169	109	5
ATM III	0,13	3,30	1,41	35,6	117	4
ATM 19	0,58	15,4	6,28	167	124	4
ATM I	2,28	17,8	24,8	193	130	4
ATM 13	0,05	5,08	0,53	36,4	133	4
ATM XV	0,35	47,9	3,80	520	138	4
Média	0,62	21,9	6,74	236	120	4
Fígado						
ATF 17	1,4	32,4	10,2	232	99	2
ATF II	0,12	38,9	0,8	279	109	4
ATF III	0,1	24,9	0,7	179	117	4
ATF 19	0,5	10,8	8,6	77,2	124	3
ATF 21	1,20	10,7	8,6	77,2	-	4
Média	0,54	26,7	5,06	192	112	4

Concentrações versus parâmetros biológicos

As amostras tiveram comprimentos furcais entre 99 e 138 cm (Tabela II). Como indivíduos com o comprimento furcal acima de 100 cm são considerados adultos, totalizaram 8 animais adultos, um juvenil e um indivíduo de comprimento não determinado.

Os valores, quando expressos em peso seco, possuem uma ordem de grandeza a menos do que quando expressos em ng.g^{-1} de lipídio, fato que já era esperado devido ao baixo conteúdo lipídico dos órgãos analisados (Tabela III e Figura 1). Ocorre uma diferença notável quando comparamos os valores expressos em peso lipídico ou peso

seco no tecido muscular com o hepático. Se as concentrações forem expressas por peso lipídico, o órgão que apresenta os maiores valores de PBDEs e MeO-BDEs é o músculo. Porém, caso os valores sejam expressos em peso seco, o fígado é o órgão que apresenta as maiores concentrações desses compostos. Isso se deve à porcentagem de gordura que cada órgão contém na espécie estudada (9% no músculo e 13% no fígado, Sprague *et al.*, 2012). Esses dados corroboram com os obtidos em golfinhos da costa do Brasil, onde o órgão com maior concentração de organohalogenados expressos em lipídios foi o tecido muscular (ALONSO *et al.*, 2015).

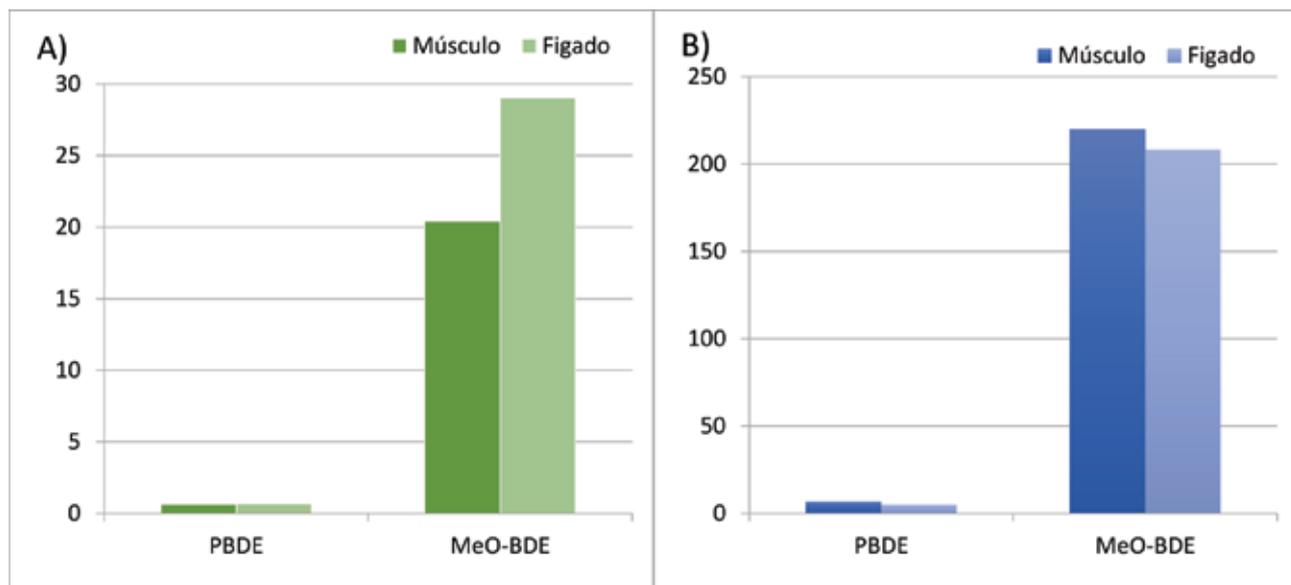


Figura 1. Concentrações médias de PBDEs e MeO-BDEs em albacoras-laje machos de ASPSP no tecido hepático e muscular em A) peso seco (ng.g⁻¹ dw) e B) peso lipídico (ng.g⁻¹ lw).

Figure 1. Mean concentrations of PBDEs and MeO-BDEs in male SPSPA yellowfin tunas in the hepatic and muscular tissues in A) dry weight (ng.g⁻¹ dw) and B) lipid weight (ng.g⁻¹ lw).

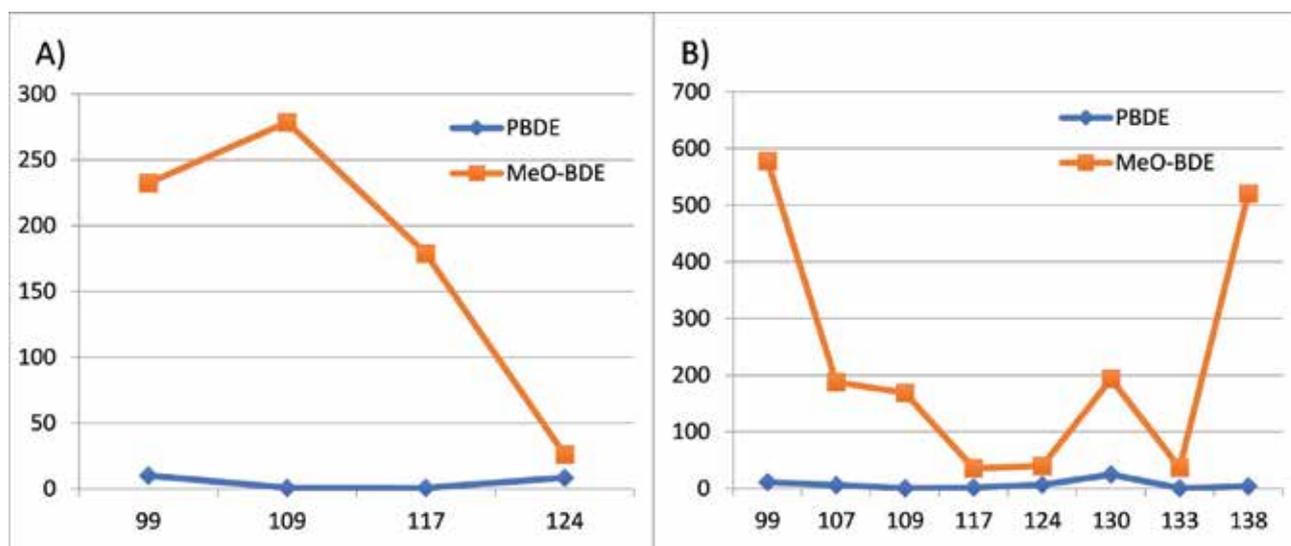


Figura 2. Concentrações (ng.g⁻¹ lw) de PBDEs e MeO-BDEs em albacoras-laje machos de ASPSP de acordo com o comprimento furcal (cm) em diferentes tecidos. A) Tecido hepático, B) Tecido muscular.

Figure 2. Concentrations (ng.g⁻¹ lw) of PBDEs and MeO-BDEs in male SPSPA yellowfin tunas according to furcal length (cm) in different tissues. A) Liver tissue, B) Muscle tissue.

Em relação ao comprimento furcal de cada indivíduo, os metoxilados possuem tendências diferentes de acordo com cada tecido (Figura 2). No tecido hepático (Figura 2-A) os indivíduos maiores possuíram concentrações menores. Enquanto no tecido muscular (Figura 2-B), houve uma parábola, onde os atuns com menores e maiores comprimentos possuíram as maiores concentrações desses produtos naturais.

Esse fato pode ser devido a uma diluição dos compostos em seus tecidos de acordo com o crescimento do organismo ou uma metabolização dos mesmo no fígado. Enquanto que no músculo, eles podem estar bioacumulando de acordo com a área de ocorrência, pois essa espécie realiza migrações sazonais para o continente africano e depois voltam a costa nordeste do Brasil, seguindo as correntes oceânicas (COLLETE *et al.*, 2011). Isso pode estar diretamente associado as albacoras-laje estarem frequentando áreas de ocorrência dos sintetizadores de compostos bromados metoxilados (esponjas, algas e ou bactérias marinhas) em diferentes regiões de acordo com os comprimentos furcais.

Comparações de PBDEs e MeO-BDEs em atuns ao redor do globo

As maiores concentrações de compostos organobromados antrópicos (PBDEs) em atuns foram encontradas nos atuns verdadeiros (*Thunnus thynnus*) do mar Mediterrâneo (PENA-ABAURREA *et al.*, 2009; CHIESA *et al.*, 2016). No estudo de Pena-Abaurrea *et al.* (2009) e de Chiesa *et al.* (2016) exemplares da costa da Itália (Mediterrâneo, FAO área 37), as concentrações de PBDEs nos músculos variaram de 17-219 ng.g⁻¹ lw e os níveis máximos foram de 291 ng/g lw, respectivamente. Isso indica níveis de PBDE de uma a duas ordens de magnitude maiores nesta espécie no mar Mediterrâneo, do que os apresentados em *T. albacares* no presente estudo em águas abertas brasileiras (Atlântico Oeste, FAO area 41) (Tabela IV).

Enquanto que as menores concentrações de PBDEs ocorreram em atuns do oceano Índico, como <LOD em albacoras-laje da ilha Reunião e 1,8 ng/g lw em bonito-listrado da Baía de Bengal, com valores da mesma ordem de grandeza que o presente estudo (TORRES *et al.*, 2009; UENO *et al.*, 2004).

Apenas um estudo foi encontrado onde MeO-BDEs foram determinados em tecidos de atuns. Esse foi com os atuns verdadeiros da costa da Itália, onde os valores encontrados no músculo desses atuns foram similares aos encontrados no músculo das albacoras-laje do presente trabalho (PENA-ABAURREA *et al.*, 2009; Tabela IV).

As concentrações de compostos antrópicos (PBDEs) obtidas nas presentes amostras estão abaixo dos valores permitidos para consumo humano, não colocando em risco a saúde humana (PENA ABAURREA *et al.*, 2009). Isso mostra que os atuns capturados nas proximidades do ASPSP (área FAO 41) estão com concentrações baixas de compostos retardantes de chama bromados e com concentrações similares a dos produtos naturais bromados metoxilados em comparação com outras espécies de atuns do Mar Mediterrâneo (Tabela IV). O ômega-3 existe naturalmente nos tecidos dos atuns e é um anti-inflamatório conhecido, que atua na promoção da saúde cardiovascular e protege contra certas condições neurológicas e inflamatórias (SPRAGUE *et al.*, 2012). Quanto aos MeO-BDEs, ainda não foi comprovado se estes compostos possuem efeitos benéficos ou maléficos à saúde dos atuns e dos humanos. Entretanto, compostos quimicamente semelhantes mostraram ter propriedades antifúngicas, antibacterianas, antibióticas e anticancerígenas em estudos *in vitro* (GRIBBLE, 2010).

Tabela IV. Médias de concentrações de organobromados ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ peso lipídico) de acordo com a espécie de atum, o tecido e o local de coleta em diferentes regiões do globo.

Table IV. Mean concentrations of organobrominated compounds ($\text{ng}\cdot\text{g}^{-1}$ lipid weight) according to the tuna species, tissue and location in different regions of the globe.

PBDEs	MeO-BDEs	Espécie	Tecido	Local de coleta	Ref.*
6,7	236	<i>T. albacares</i>	Músculo	ASPSP (Atlântico Oeste)	1
5,0	192	<i>T. albacares</i>	Fígado	ASPSP (Atlântico Oeste)	1
<LOD ^a	-	<i>T. albacares</i>	Músculo	Ilha Reunião (Índico Oeste)	2
<LOD ^a	-	<i>T. albacares</i>	Fígado	Ilha Reunião (Índico Oeste)	2
58	134	<i>T. thynnus</i>	Músculo	Costa da Itália (Mediterrâneo)	3
74	167	<i>T. thynnus</i>	Músculo	Costa da Itália (Mediterrâneo)	3
43 ^b	-	<i>T. thynnus</i>	Músculo	Costa da Espanha (Mediterrâneo)	4
42 ^b	-	<i>T. thynnus</i>	Fígado	Costa da Espanha (Mediterrâneo)	4
13 ^c	-	<i>T. thynnus</i>	Músculo	FAO área 51 (Índico Oeste)	5
3,8 ^c	-	<i>T. thynnus</i>	Músculo	FAO área 71 (Pacífico Centro Oeste)	5
2,1 ^c	-	<i>T. thynnus</i>	Músculo	FAO área 34 (Atlântico Centro Leste)	5
291 ^c	-	<i>T. thynnus</i>	Músculo	FAO área 37 (Mediterrâneo)	5
16 ^c	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Pacífico Norte	6
19	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Leste do Japão (Pacífico Oeste)	6
20 ^c	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Mar do Japão (Pacífico Oeste)	6
34 ^c	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Leste da China (Pacífico Oeste)	6
53	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Norte do Taiwan (Pacífico Oeste)	6
21	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Sul da China (Pacífico Oeste)	6
14	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Filipinas (Pacífico Oeste)	6
1,8	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Baía de Bengal (Índico Leste)	6
3,1	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Indonésia (Índico Leste)	6
13	-	<i>K. pelamis</i>	Músculo	Sudeste do Brasil (Atlântico Oeste)	6

^a - abaixo do limite de detecção; ^b - peso seco transformado para peso lipídico levando em conta a porcentagem de 9 e 13 de lipídio para músculo e fígado, respectivamente; ^c - valor máximo; *Referências: 1 - presente estudo; 2 - Torres *et al.* (2009); 3 - Pena-Abaurrea *et al.* (2009); 4 - Sprague *et al.* (2012); 5 - Chiesa *et al.* (2016); 6 - Ueno *et al.* (2004).

Migração das albacoras-laje e sua possível contaminação por PBDEs

Através de estudos de marcação e recaptura e, juntamente com informações sobre genética de populações, a estrutura de estoque da albacora-laje atualmente aceita é a de um único estoque para todo o Oceano Atlântico. Entretanto, a espécie realiza migrações transatlânticas e também migrações de diferentes escalas no oceano Atlântico tropical, relacionadas com reprodução e também alimentação (FONTENEAU

e MARCILLE, 1993; BARD e SCOTT, 1992; ICCAT, 2006). Estudos de distribuição e abundância da espécie esclarecem que durante o primeiro e segundo trimestre do ano, logo após a realização da desova no Golfo de Guiné, na costa da África, a albacora-laje migra no sentido Leste-Oeste através da Corrente Sul Equatorial. Após a permanência dos peixes na região do Atlântico noroeste equatorial, os mesmos retornam para a costa da

África durante o terceiro trimestre do ano, através da Contracorrente Norte Equatorial (HAZIN, 1998; LAN *et al.*, 2011). Neste sentido, a população de albacora-laje do Oceano Atlântico, através de suas migrações, pode estar sujeita à exposição e absorção de contaminantes provenientes de áreas pontuais.

O lixo eletrônico de nações com estritas regulamentações ambientais ainda continua a ser enviado para países onde estas regulamentações não são restritas e/ou o trabalho é mais barato. Tansel (2017) mostrou dados de que diversos países desenvolvidos, nos quais a maioria dos aparelhos eletrônicos são consumidos, acabam por enviar seus resíduos para países subdesenvolvidos ou em desenvolvimento como o Brasil, países no Norte e Centro da África e alguns países asiáticos, para um possível processo de reciclagem ou como lixo ilegal (BABAYEMI *et al.*, 2014).

No oceano Atlântico são evidenciados os países africanos da Nigéria, Benin, Togo e Gana e a região sudeste do Brasil como possíveis receptores de lixo eletrônico de países desenvolvidos como os Estados Unidos e países Europeus. O gerenciamento incorreto destes equipamentos, quando são descartados, pode gerar sérios problemas para o meio ambiente, para a biota e conseqüentemente para a saúde humana. Uma vez que, os PBDEs são liberados no ambiente, estes são capazes de ser acumulados pela biota e transferidos aos demais níveis tróficos (FU *et al.*, 2012; BABAYEMI *et al.*, 2014). As albacoras-laje, objetos deste estudo, podem ter adquirido PBDEs ao longo de suas trajetórias durante as migrações no Atlântico Sul na costa da África ou do Brasil, áreas pontuais de descarte de resíduos eletrônicos. Isso indica que para o correto manejo da saúde desses animais tanto para a preservação da espécie como para o consumo humano, são necessários esforços internacionais a fim de se obter sucesso na conservação desse importante recurso alimentar sendo ele uma peça chave no equilíbrio das cadeias pelágicas marinhas.

Conclusões

Foram analisadas amostras de indivíduos machos de albacora-laje do ASPSP a fim de se obter dados de acumulação de compostos organobromados (antrópicos e naturais) em seus tecidos. O órgão que teve as maiores concentrações foi o músculo, como observado em mamíferos marinhos.

As concentrações de PBDEs no presente estudo foram de uma a duas ordens de grandeza inferiores aos encontrados em atuns verdadeiros do mar Mediterrâneo. Estes valores nos músculos dos albacora-laje foram próximos aos encontrados em outras espécies de atuns do oceano Índico. Isso indica que os valores obtidos foram abaixo do que os permitidos para o consumo humano para que não haja riscos a saúde.

Existem poucos estudos que avaliaram MeO-BDEs em tecidos de atuns ao redor do globo. Comparando ao único trabalho existente, os valores de MeO-BDEs encontrados no presente trabalho foram similares aos encontrados nos atuns da costa da Itália. Porém, o congêner mais abundante de MeO-BDE nas albacora-laje capturados em águas brasileiras, indica uma influência no habitat ou na dieta desses atuns proveniente de esponjas ou bactérias associadas. Enquanto no hemisfério Norte, provém de águas onde as algas provavelmente são os sintetizadores mais abundantes de MeO-BDEs.

Por se tratar de uma espécie migratória, as albacora-laje podem ter adquirido os PBDEs acumulados em seus tecidos durante sua trajetória ao continente Africano ou na costa do Brasil, onde encontram-se diversos lixões eletrônicos provenientes de rejeitos descartados por países desenvolvidos. São necessários esforços internacionais urgentes para a preservação da albacora-laje, por se tratar de uma espécie de alto valor comercial e ecológico, e por ser um estoque ainda pouco contaminado por PBDEs.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a SECIRM e a Marinha do Brasil pelo apoio logístico nas operações realizadas no Arquipélago, ao CNPq pelo financiamento (PDJ) de MBA e (Mestrado) de DMS. Aos alunos, professores e técnicos do Laboratório de Radioisótopos pela parceria e auxílio nos procedimentos analíticos, nas coletas de campo e na cooperação com o projeto.

Referencias Bibliográficas

- ALAE, M., ARIAS, P., SJODIN, A., BERGMAN, A. **An overview of commercially used brominated flame retardants, their applications, their use patterns in different countries/ regions and possible modes of release.** *Environment International* 29, 683–689. 2003.
- ALCOCK, R. E.; SWEETMAN, A. AND JONES, K. C.. **Assessment of organic contaminants fate in waste water treatment plants.** I: selected compounds and physicochemical properties. *Chemosphere* 38, 2247–2262. 1999.
- ALONSO, MARIANA B.; ELJARRAT, ETHEL; GORGA, MARINA; SECCHI, EDUARDO R.; BASSOI, MANUELA; BARBOSA, LUPÉRCIO; BERTOZZI, CAROLINA P.; MARIGO, JULIANA; CREMER, MARTA; DOMIT, CAMILA; AZEVEDO, ALEXANDRE F.; DORNELES, PAULO R.; TORRES, JOÃO PAULO M.; LAILSON-BRITO, JOSÉ; MALM, OLAF; BARCELÓ, DAMIÀ. **Natural and anthropogenically-produced brominated compounds in endemic dolphins from Western South Atlantic: Another risk to a vulnerable species.** *Environmental Pollution*, 170:152-160. 2012a.
- ALONSO, MARIANA B.; FEO, MARIA LUISA; CORCELLAS, CAYO; VIDAL, LARA G.; BERTOZZI, CAROLINA P.; MARIGO, JULIANA; SECCHI, EDUARDO R.; BASSOI, MANUELA; AZEVEDO, ALEXANDRE F.; DORNELES, PAULO R.; TORRES, JOÃO PAULO M.; LAILSON-BRITO, JOSÉ; MALM, OLAF; ELJARRAT, ETHEL; BARCELÓ, DAMIÀ. **Pyrethroids: A new threat to marine mammals?** *Environment International*, 47:99-106. 2012b.
- ALONSO, MARIANA B.; AZEVEDO, ALEXANDRE; TORRES, JOÃO PAULO M.; DORNELES, PAULO R.; ELJARRAT, ETHEL; BARCELÓ, DAMIÀ; LAILSON-BRITO, JOSÉ; MALM, OLAF. **Anthropogenic (PBDE) and naturally-produced (MeO-PBDE) brominated compounds in cetaceans - A review.** *Science of the Total Environment*, 481:619-634. 2014.
- ALONSO, MARIANA B.; FEO, MARIA LUISA; CORCELLAS, CAYO; GAGO-FERRERO, PABLO; BERTOZZI, CAROLINA P.; MARIGO, JULIANA; FLACH, LEONARDO; MEIRELLES, ANA CAROLINA O.; CARVALHO, VITOR L.; AZEVEDO, ALEXANDRE F.; TORRES, JOÃO PAULO M.; LAILSON-BRITO, JOSÉ; MALM, OLAF; DIAZ-CRUZ, M. SILVIA; ELJARRAT, ETHEL; BARCELÓ, DAMIÀ. **Toxic heritage: Maternal transfer of pyrethroid insecticides and sunscreen agents in dolphins from Brazil.** *Environmental Pollution*, 207:391-402. 2015.
- AROCHA, F., LEE, D.W., MARCANO, L.A., MARCANO, J.S. **Preliminary studies on the spawning of yellowfin tuna, *Thunnus albacares*, in the western Central Atlantic.** *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 51(2):538-551. 2000.
- BARD, F.X. & SCOTT, E.D. **Results of transatlantic tagging of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) up to 1/10/91.** *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT*, 39(1): 46-49. 1992.
- BLUNT, J.W.; COPP, B.R.; KEYZERS, R. A; MUNRO, M.H.G.; PRINSEP, M.R. **Marine natural Products.** *Natural Products Reports* 31: 160–258. 2014.
- CLARK, R.B. **Marine Pollution.** 5th Edition. *Oxford University Press*. 172p. 2001.
- CHIESA, L. M.; LABELLA, G. F.; PANSERI, S.; PAVLOVIC, R.; BONACCI, S.; ARIOLI, F. **Distribution of persistent organic pollutants (POPs) in wild Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*) from different FAO capture zones.** *Chemosphere*. 153:162-169. 2016.
- DE WIT, C.A., **An overview of brominated flame retardants in the environment.** *Chemosphere* 46: 583–624. 2002.
- FAO. **Fisheries and Aquaculture Department. Tuna resources.** COLLETTE B.B. *FAO Fisheries and Aquaculture Department*. <http://www.fao.org/fishery>. 2007.
- FAO. **Fisheries and Aquaculture Department. Tuna resources.** JACEK MAJKOWSKI. *FAO Fisheries and Aquaculture Department*. Rome. 2015.
- FONTENEAU, A. & MARCILLE, J. **Resources, fishing and biology of the tropical tunas of the Eastern Central Atlantic.** *FAO Fisheries Document Paper*. No. 292. Rome, FAO. 354p. 1993.
- FU, J.; WANG, T.; WANG, P.; QU, G.; WANG, Y.; ZHANG, Q.; ZHANG, A.; JIANG. **Temporal trends (2005-2009) of PCDD/Fs, PCBs, PBDEs in rice hull from an e-waste dismantling area after stricter environmental regulations.** *Chemosphere*. 88: 330-335. 2012.
- GRIBBLE, G.W. **Naturally Occurring Organohalogen Compounds - A Comprehensive Update.** *Ed. Springer*. 300p. 2010.

- HARAGUCHI, K.; KOTAKI, Y.; RELOX JR, JUAN R.; ROMERO, M. L. J.; TERADA, R. **Monitoring of naturally produced brominated phenoxyphenols and phenoxyanisoles in aquatic plants from the Philippines.** *J. Agric. Food Chem.* 58: 12385-12391. 2010.
- HAZIN, F. H. V. **Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva MMA – REVIZEE. Análise/Refinamento dos Dados Pretéritos Sobre Prospecção Pesqueira. Grandes Pelágicos do Nordeste (atuns, agulhões e tubarões).** Ministério de Meio Ambiente, Brasil. 42 p. 1998.
- ICCAT - *International Commission for the Conservation Atlantic Tuna. Field Manual, chapter 2.1.1: yellowfin tuna.* 26p. 2006.
- ICCAT - *International Commission for the Conservation Atlantic Tuna. Statistical Bulletin.* 43(1) (1960-2016). Madrid, 196p. 2016.
- IGFA. **Database of IGFA angling records until 2001.** IGFA, Fort Lauderdale, USA. 2001.
- IBAMA. **Relatório de reunião sobre a pesca de sardinha-verdadeira nas regiões nas regiões Sudeste e Sul.** Itajaí, 33p. 2004.
- LAN, KW, LEE, MA, LU, HJ, SHIEH, WJ, LIN, WK AND KAO, SC. **Ocean variations associated with fishing conditions for yellowfin tuna (*Thunnus albacares*) in the equatorial Atlantic Ocean.** *ICES Journal of Marine Science*, 68(6): 1063–1071. 2011.
- LAW, R.J., ALAEE, M., ALLCHIN, C.R., BOON, J.P., LEBEUF, M., LEPOM, P., STERN, G.A., (2003). **Levels and trends of polybrominated diphenylethers (PBDEs) and other brominated flame retardants in wildlife.** *Environment International* 29: 757–770.
- PENG, J.H., HUANG, C.W., WENG, Y.M., YAK, H.K. **Determination of polybrominated diphenyl ethers (PBDEs) in fish samples from rivers and estuaries in Taiwan.** *Chemosphere* 66: 1990-1997. 2007.
- PENA-ABAURREA, M.; WEIJS, L.; RAMOS, L.; BORGHESI, N.; CORSOLINI, S.; NEELS, H.; BLUST, RONNY, COVACI, A. **Anthropogenic and naturally-produced organobrominated compounds in bluefin tuna from the Mediterranean Sea.** *Chemosphere.* 76:1477-1482. 2009.
- RIEDE, K. **Global register of migratory species - from global to regional scales. Final Report of the ReD-Projekt 808 05 081.** Federal Agency for Nature Conservation, Bonn, Germany. 329 p. 2004.
- SPRAGUE, M.; DICK, J. R.; MEDINA, A.; TOCHER, D. R.; BELL, J. G.; MOURENTE. **Lipid and fatty acid composition, and persistent organic pollutant levels in tissues of migrating Atlantic Bluefin tuna (*Thunnus thynnus*, L.) broodstock.** *Environmental Pollution.* 171: 61-71. 2012.
- TAKAHASHI, S.; OSHIHOI, T.; RAMU, K.; ISOBE, T.; OHMORI, K.; TSUNEMI, K.; TANABE, S. **Organohalogen compounds in deep-sea fishes from the western North Pacific off-Tohoku, Japan: Contamination status and bioaccumulation profiles.** *Marine Pollution Bulletin.* 60: 187-196. 2010.
- TANSEL, B. **From electronic consumer products to e-wastes: Global outlook, waste quantities, recycling challenges.** *Environmental International.* 98: 35-45. 2017.
- UENO, D.; KAJIWARA, N.; TANAKA, H.; SUBRAMANIAN, A.; FILLMANN, G.; LAM, P.K.S.; ZHENG, G.; MUCHITAR, M.; RAZAK, H.; PRUDENTE, M.; CHUNG, K.H.; TANABE, S. **Global pollution monitoring of polybrominated diphenyl ethers using skipjack tuna as a bioindicator.** *Environmental Science and Technology.* 38: 2312-2316. 2004.
- VASKE-JÚNIOR, T., C.M. VOOREN, AND R.P. LESSA. **Feeding strategy of yellowfin tuna (*Thunnus albacares*), and wahoo (*Acanthocybium solandri*) in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Brazil.** *Boletim do Instituto de Pesca, São Paulo* 29: 173-181. 2003.
- VETTER W, SCHOLZ E, GAUS C, MÜLLER JF, HAYNES D. **Anthropogenic and natural organohalogen compounds in blubber of dolphins and dugongs (*Dugong dugon*) from Northeastern Australia.** *Arch Environ Contam Toxicol* 41:221–31. 2001.
- VETTER, W.; HAHN, M.E.; TOMY, G.; RUPPE, S.; VATTER, S.; CHAHBANE, N.; LENOIR, D.; SCHRAMM, K.W.; SCHERER, G. **Biological Activity and Physicochemical Parameters of Marine Halogenated Natural Products 2,3,3',4,4',5,5'-Heptachloro-1'-Methyl-1,2'-Bipyrrole and 2,4,6- Tribromoanisole.** *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 48: 1–9. 2004.
- VETTER, W. **Marine halogenated natural products of environmental relevance.** *Rev. Environ. Contam. Toxicol.* 188, 1–57. 2006.
- VIANA, D. L., F.H.V. HAZIN, D. NUNES, F. CARVALHO, D. VÉRAS, P. TRAVASSOS. **The wahoo *Acanthocybium solandri* fishery in the vicinity of the Saint Peter and Saint Paul archipelago, Brazil, from 1998 to 2006.** *Collect. Vol. Sci. Pap. ICCAT* 62(5): 1662-1670. 2008.
- WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Brominated Diphenyl Ethers.** *Environmental Health Criteria*, 162. 1994.

Os Grandes Atobás-Marrons do pequeno Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Guilherme Tavares Nunes¹
Patrícia Luciano Mancini¹
Leandro Bugoni¹

12

Abstract

Although highly mobile, seabirds are highly philopatric, shedding light on the factors disrupting gene flow in this group. The brown booby (*Sula leucogaster*) is a strictly marine bird occurring in all ocean basins and with strong phylogeographic structure. In the present study, brown boobies breeding in the Brazilian archipelagos of Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), Fernando de Noronha, Abrolhos, Rocas Atoll, Cagarras, and Moleques do Sul, along a latitudinal gradient of 0–27°S, were used to assess the role of environmental variables in shaping population structure. In addition, foraging behavior, diet, and nest quality were tested as selective pressures for phenotypes in the highly dense colony of SPSPA. Brown boobies' body mass and size were positively correlated with latitude and air temperature, except for the population from SPSPA, which had the largest and heaviest individuals. Boobies from SPSPA were also genetically isolated from the remaining colonies, which were further divided into two clusters: the first related to the oligotrophic South Equatorial Current (Fernando de Noronha and Rocas Atoll), and the second related to the nutrient-rich waters over the continental shelf (Abrolhos, Cagarras, and Moleques do Sul). In SPSPA, larger females were found in high quality nests, suggesting that having large body size is advantageous for females, as they are responsible for obtaining and defending territories. Low quality nests tended to fail during breeding and

the constrained nesting area due to colony landscape could be an important selective pressure in SPSPA, promoting local adaptation and disrupting gene flow with nearby colonies. Thus, brown boobies from SPSPA are isolated from other Brazilian colonies and seem to be mainly influenced by the specific colony landscape, representing an interesting model for studies focusing on microevolutionary processes shaping populations of marine top predators.

Introdução

A heterogeneidade da paisagem pode influenciar as relações entre organismos em diferentes níveis de organização, desde genes até ecossistemas. A caracterização do ambiente é um aspecto-chave para compreender os mecanismos que determinam os padrões de distribuição espacial da biodiversidade, pois permite a identificação de limiares que podem funcionar como barreiras para os organismos e gerar divergência entre espécies ou populações. Nesse contexto, a associação do conhecimento sobre as características da paisagem com informações sobre a distribuição espacial e as relações ecológicas das espécies representa uma valiosa abordagem para a compreensão de estruturas populacionais e também para a gestão de áreas protegidas, inclusive em ecossistemas dinâmicos como aqueles encontrados no ambiente marinho.

1 Universidade Federal do Rio Grande – FURG
(lbugoni@yahoo.com.br).

O gradiente latitudinal observado ao longo da costa brasileira implica em uma heterogeneidade ambiental que pode influenciar no arranjo de populações e espécies no ambiente marinho. O ambiente nerítico é caracterizado por distintas correntes marinhas, desde a região de clima estritamente tropical com águas costeiras influenciadas pela Corrente Norte do Brasil, a mais de 4°N, até a região de clima subtropical influenciada pela Confluência Brasil-Malvinas, a aproximadamente 33°S (PIOLA *et al.*, 2000). Entre esses dois pontos, ocorrem ambientes dinâmicos regidos pela ação das correntes oceânicas e também por fatores locais da plataforma continental, como desembocaduras de rios e baías, e sistemas de mistura da coluna d'água gerados por ventos, topografia de fundo ou pelo encontro de águas de plataforma (PIOLA *et al.*, 2000). Além disso, arquipélagos tropicais localizados fora da plataforma continental e expostos à dinâmica oceanográfica do ambiente pelágico, como o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP), Fernando de Noronha, Atol das Rocas e Ilhas da Trindade e Martin Vaz, compõem o território brasileiro, expandindo a Zona Econômica Exclusiva para além das 200 milhas náuticas asseguradas pela Convenção das Nações Unidas sobre o Direito do Mar.

Uma espécie que está exposta aos diferentes gradientes do ambiente marinho brasileiro é o atobá-marrom (*Sula leucogaster*), uma ave estritamente marinha que utiliza ilhas para reprodução em latitudes tropicais e subtropicais de todos os oceanos. O atobá-marrom apresenta estruturação filogeográfica com forte diferenciação populacional mesmo entre as colônias do Oceano Atlântico, o que tem sido atribuída à alta filopatria natal da espécie (MORRIS-POCOCK *et al.*, 2011). No Brasil, os atobás-marrons reproduzem-se em arquipélagos sobre a plataforma continental, como Moleques do Sul (SC), Cagarras (RJ) e Abrolhos (BA), mas também em arquipélagos fora da plataforma continental, como o Atol das Rocas (RN), Fernando de Noronha (PE), e o ASPSP, o qual está localizado

a 0°55'N sobre a Dorsal Meso-Atlântica (Figura 1a). Embora as colônias de atobá-marrom nos referidos arquipélagos apresentem diferenças em relação às características ambientais, como a distância da costa e a heterogeneidade da paisagem da colônia, e nos aspectos demográficos, como o número de indivíduos, o ASPSP apresenta algumas peculiaridades quanto à sua dinâmica oceanográfica e sua área emersa.

O ASPSP é influenciado pela Corrente Sul Equatorial, que flui de leste para oeste e pela Subcorrente Equatorial, a qual flui em sentido oposto com o núcleo a aproximadamente 80 m de profundidade (ARAUJO e CINTRA, 2009). Quando atinge o relevo submarino do ASPSP, a Subcorrente Equatorial diminui sua velocidade e gera vórtices e ressurgências de pequena escala a leste, misturando a coluna d'água e aumentando o tempo de residência de nutrientes nas águas do entorno do arquipélago, de forma similar ao que ocorre no entorno de montes submarinos (SOUZA *et al.*, 2013). Portanto, embora distante da costa e em ambiente tropical, a dinâmica oceanográfica e o substrato rochoso favorecem a reprodução de peixes no entorno do ASPSP, como os da família Exocoetidae (peixes-voadores) (LESSA *et al.*, 1999). Os peixes-voadores são importantes presas tanto para os atobás-marrons, que se reproduzem o ano todo no ASPSP, como para as viuvinhas-pretas (*Anous minutus*) e viuvinhas-marrons (*A. stolidus*), as quais também utilizam o arquipélago para reprodução (MANCINI e BUGONI, 2014; MANCINI *et al.*, 2016).

O espaço para reprodução dos atobás-marrons no ASPSP não é farto como a disponibilidade de alimento no entorno. A população de aproximadamente 380 indivíduos, estimados em 2001 e 2002 (BARBOSA-FILHO e VOOREN, 2010), ou cerca de 500 indivíduos, estimados em 2012 e 2013 (MANCINI *et al.*, 2016) utiliza para reprodução uma área emersa total de aproximadamente 0,01 km². Essa limitação de espaço restringe as atividades reprodutivas da espécie às áreas mais altas do arquipélago por conta da ação das ondas, resultando

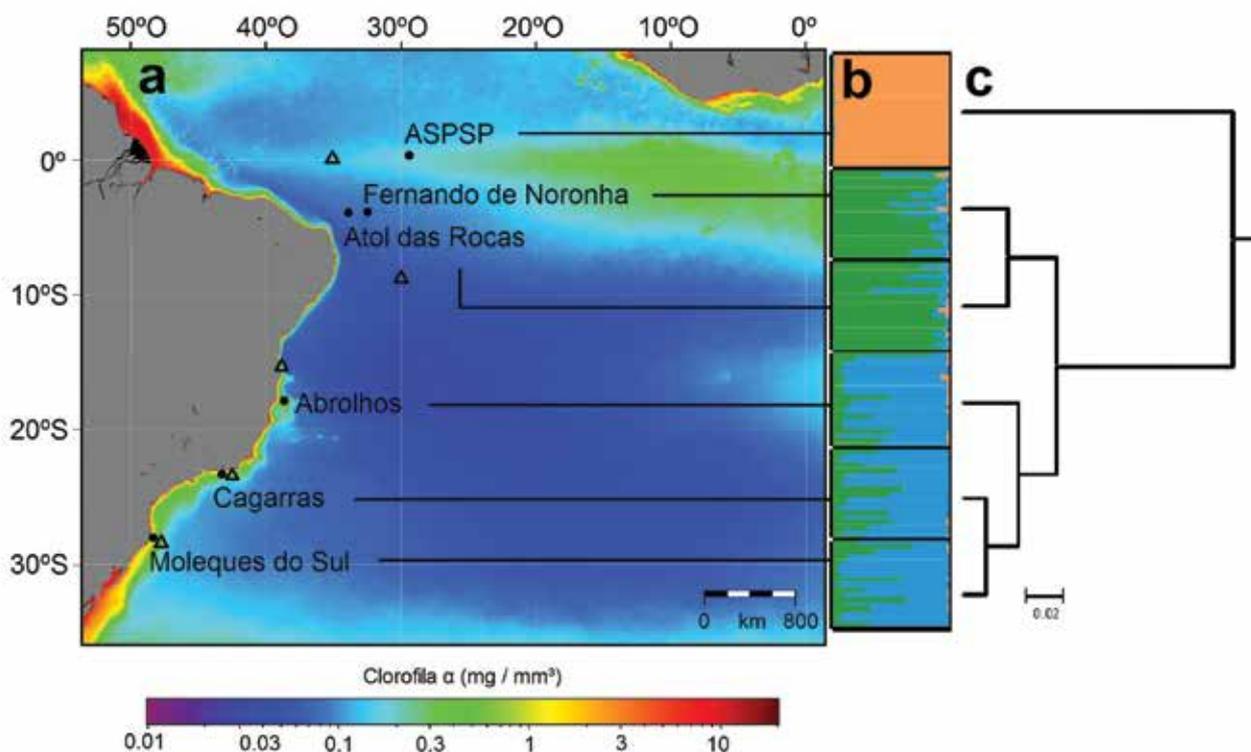


Figura 1. Mapa da área de estudo, com colônias de atobás-marrons (*Sula leucogaster*) identificadas por círculos fechados, e boias oceanográficas identificadas por triângulos abertos (a). Análise Bayesiana de agrupamento considerando três grupos (b). Análise de agrupamento baseada na distância genética pareada entre colônias (F_{ST}), (c). **Figure 1.** Map of the study area with Brown Booby (*Sula leucogaster*) colonies represented by closed circles and oceanographic buoys represented by open triangles (a). Bayesian clustering analysis considering three clusters (b). Clustering analysis based on between-colony pairwise genetic distances (F_{ST}) (c).

em uma colônia com alta densidade, e distância média entre ninhos de apenas 1 m (KOHLRASUCH, 2003). Portanto, dadas as diferenças observadas no ASPSP em relação às demais colônias de atobás-marrons no Brasil, o presente estudo estimou a estruturação populacional da espécie entre as colônias do ASPSP, Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Abrolhos, Cagarras, e Moleques do Sul. Para isso, foram analisados dados fenotípicos e genotípicos, os quais foram confrontados com informações sobre a paisagem marinha no entorno dos arquipélagos, densidade populacional, e amplitude de nicho isotópico. Além disso, foram utilizadas informações sobre características dos ninhos, relações tróficas, e comportamento de

forrageio durante o período reprodutivo dos atobás do ASPSP para identificar as variáveis que agem como forças seletivas sobre essa população.

Materiais e Métodos

Dados médios de concentração de clorofila entre 2002 e 2014 foram obtidos para o entorno do ASPSP, Fernando de Noronha, Atol das Rocas, Abrolhos, Cagarras, e Moleques do Sul, através do satélite Aqua/NASA. Dados de temperatura do ar e temperatura da superfície do mar foram obtidos através das boias oceanográficas fixas do

programa PIRATA e do Programa Nacional de Boias, considerando o período entre a data de lançamento de cada boia até março de 2015.

A densidade demográfica de atobás-marrons (Figura 2) para cada arquipélago foi determinada pelo número de indivíduos/km², utilizando estimativas populacionais obtidas de fontes bibliográficas. Além disso, as estimativas de tamanho populacional de atobás-marrons no ASPSP foram atualizadas através de contagem direta dos indivíduos de 2010 a 2013. De 2010 a 2014 foram coletados dados de massa corporal e morfometria (corda da asa, comprimentos do tarso e do cúlmen) de atobás-marrons adultos nas seis colônias estudadas. Durante as amostragens foram coletadas amostras de sangue, as quais foram utilizadas para amplificação de 9 *loci* de microssatélites (TAYLOR *et al.*, 2010), e para medição de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio, os quais foram utilizados para

estimar a amplitude do nicho isotópico de cada colônia (JACKSON *et al.*, 2011).

Foram coletados dados morfométricos e de massa corporal de todos os atobás-marrons reproduzindo no ASPSP em maio e junho de 2014, e junho e julho de 2015, os quais foram utilizados para gerar um índice de tamanho corporal através da Análise de Componentes Principais. Os indivíduos foram ordenados quanto ao tamanho corporal e divididos em pequenos (quantil de 0–20%), intermediários (40–60%) e grandes (80–100%), considerando cada sexo como universos amostrais distintos em função do dimorfismo sexual. A partir disso, os indivíduos em cada grupo de tamanho corporal foram aleatoriamente amostrados quanto à dieta e ao comportamento de forrageio.

Para isso, por volta das 04:00 h (UTC -2) foram fixados GPS miniaturizados nas três penas centrais



Figura 2. O atobá-marrom (*Sula leucogaster*) no ASPSP.
Figure 2. The brown booby (*Sula leucogaster*) in the SPSPA.

da cauda dos atobás-marrons, configurados para registrar posições a cada 1 s, durante as viagens de alimentação. Às 18:00 h do mesmo dia, os aparelhos foram recuperados para obtenção dos dados. Durante o manuseio para recuperação dos aparelhos, foram coletados itens regurgitados espontaneamente, e também amostras de soro sanguíneo para medição de isótopos estáveis, indicativos de alimentação ocorrida nos dias/horas prévios à amostragem. A partir disso, foi estimada a contribuição dos itens regurgitados para a dieta dos atobás através do índice de importância relativa presa-específico (%PSIRI), e de modelos de mistura isotópicos utilizando o soro dos atobás e o músculo das presas regurgitadas.

Todos os ninhos ativos e não ativos do ASPSP foram georreferenciados através do método RTK com uma base fixa e uma estação móvel, obtendo dados de altitude, latitude e longitude com aproximadamente 20 mm de precisão. Um esquema para classificar os ninhos quanto à sua qualidade foi construído seguindo uma combinação de parâmetros, como altitude global, distância e altitude em relação aos ninhos vizinhos, distância da borda da colônia,

e suscetibilidade à ação das ondas. Os diversos aspectos metodológicos utilizados neste estudo são descritos em detalhes em Nunes *et al.* (2018).

Resultados

No total, foram medidos e pesados 135 machos e 141 fêmeas ao longo da costa brasileira. Houve diferença significativa ($P < 0,001$) de tamanho e massa corporal dos indivíduos entre as colônias para ambos os sexos, com os atobás-marrons do ASPSP caracteristicamente maiores e mais pesados (Figura 3). O modelo linear que melhor explicou a variabilidade fenotípica conteve temperatura do ar, e uma interação entre clorofila α e temperatura superficial do mar.

Também foi identificada estrutura populacional baseada nos genótipos dos 119 atobás-marrons que tiveram os microssatélites analisados, de modo que os indivíduos do ASPSP foram fortemente diferenciados dos demais. Assim, as variáveis que melhor explicaram a diferenciação populacional dos atobás do ASPSP em relação às demais colônias

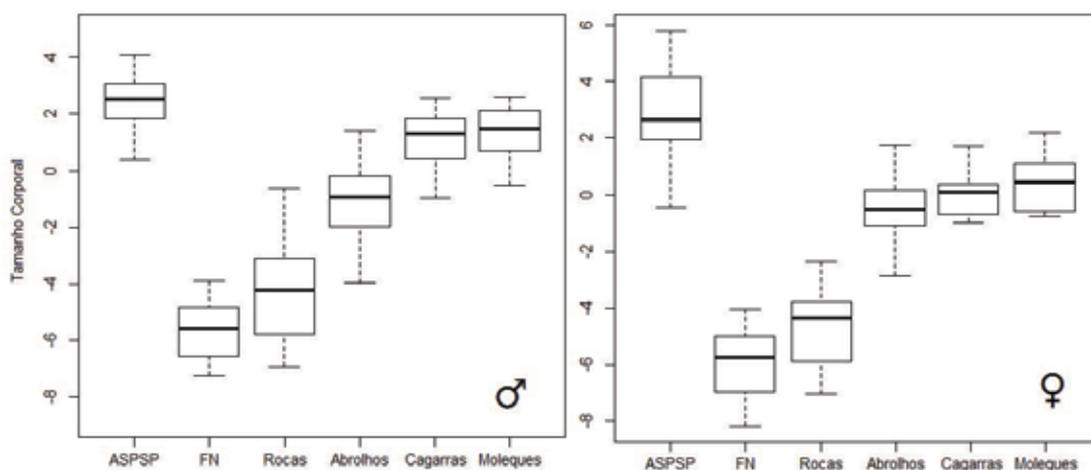


Figura 3. Variabilidade fenotípica de machos e fêmeas entre as colônias brasileiras de atobás-marrons. O índice de tamanho corporal representa dados morfométricos e de massa corporal convertidos em um componente principal.

Figure 3. Phenotypic diversity of male and female brown boobies breeding in Brazilian archipelagos. The body size index represents body mass and size converted into a principal component.

foram densidade demográfica e distância da costa. Embora mais fraco, também foi identificado agrupamento entre Fernando de Noronha e Atol das Rocas, e também entre as colônias costeiras (*i.e.* Abrolhos, Cagarras, e Moleques do Sul) (Figura 1b, c).

No ASPSP foram medidos e pesados 159 machos e 160 fêmeas, e georreferenciados 304 ninhos, embora apenas 112 ninhos ativos em 2014 e 2015 tenham sido classificados quanto à qualidade (Figura 4). A média de tamanho corporal de fêmeas ocupando ninhos de alta qualidade foi significativamente maior em relação aos ninhos de média ($P=0,02$) e baixa qualidade ($P=0,0002$), mas não foi encontrada relação de tamanho corporal com qualidade de ninho para machos.

No total, foram registradas 258 viagens de alimentação de 97 indivíduos (52 fêmeas e 45 machos), com médias de duração = $57 \pm 27,5$ min, distância máxima da colônia = $7,1 \pm 4,3$ km, e distância total percorrida = $27 \pm 13,7$ km. No entanto, não foram observadas diferenças significativas nos parâmetros das viagens de forrageio entre sexos, e entre grupos de tamanho corporal para cada sexo (Figura 5).

Foram analisados 72 conteúdos estomacais e 307 presas de 60 indivíduos (36 fêmeas e 24 machos), as quais foram identificadas em nível de espécie na sua totalidade. Os peixes-voadores foram predominantes: *Exocoetus volitans* apresentou a maior importância relativa para os atobás-marrons (%PSIRI=62,8%), seguido por *Oxyporhamphus micropterus* (17,6%). No entanto, o %PSIRI e os modelos de mistura isotópicos não indicaram diferenças entre sexos e entre os grupos de tamanho corporal quanto à composição da dieta.

A partir dos censos realizados regularmente através de contagens diretas dos atobás-marrons, um aumento da população dos atobás-marrons foi observado na última década. O número médio de indivíduos passou de 377 para 588 entre 2001 e 2013.

Discussão

A diferenciação populacional de atobás-marrons observada ao longo do Oceano Atlântico sudoeste sugere haver influência de características ambientais interferindo nas taxas de dispersão entre colônias, visto que a espécie possui alta mobilidade. A forte diferenciação fenotípica observada entre populações adjacentes (ASPSP vs. Fernando de Noronha e Atol das Rocas) e a similaridade entre atobás do ASPSP e as colônias costeiras poderiam ser explicadas como convergência adaptativa causada pela existência de características ambientais agindo como pressões seletivas e estimulando a adaptação local (NUNES *et al.*, 2017). Essa hipótese é reforçada pelo acentuado isolamento genético do ASPSP em relação às demais colônias e também pelo agrupamento de Fernando de Noronha com Atol das Rocas, e entre as colônias costeiras, o que pode ser explicado à luz da heterogeneidade da paisagem marinha, detalhada em Nunes e Bugoni (2018).

As elevadas taxas de dispersão entre as colônias costeiras e o agrupamento entre elas podem estar associadas às similaridades ambientais entre os arquipélagos, os quais estão localizados sobre a plataforma continental e, portanto, expostos à dinâmica oceanográfica e à alta produtividade primária do ambiente nerítico. O mesmo ocorre com as colônias de Fernando de Noronha e Atol das Rocas, as quais estão separadas por apenas 150 km e são influenciadas pelas mesmas águas oligotróficas da Corrente Sul Equatorial. Teias tróficas marinhas tendem a apresentar uma correlação negativa entre a disponibilidade de nutrientes e o número de níveis tróficos, ou seja, em ambientes com baixa disponibilidade de nutrientes, os organismos basais tendem a apresentar menor tamanho corporal, o que aumenta o número de níveis intermediários entre a base e o topo (CASTELLO e KRUG, 2015). Isso ocasiona uma maior dissipação de energia ao longo do processo e, conseqüentemente, viabiliza predadores de topo de cadeia trófica com menor tamanho

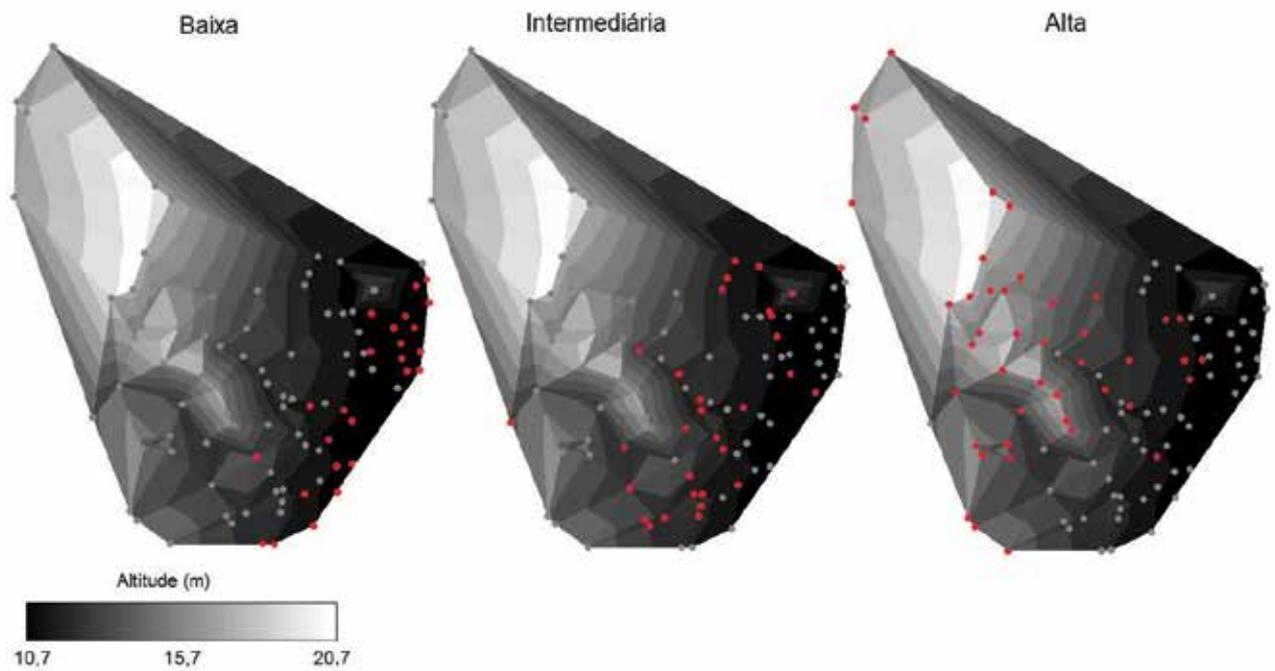


Figura 4. Ninhos de atobás-marrons do ASPSP classificados de acordo com sua qualidade.
Figure 4. Brown Booby nests in the SPSPA classified according to quality.

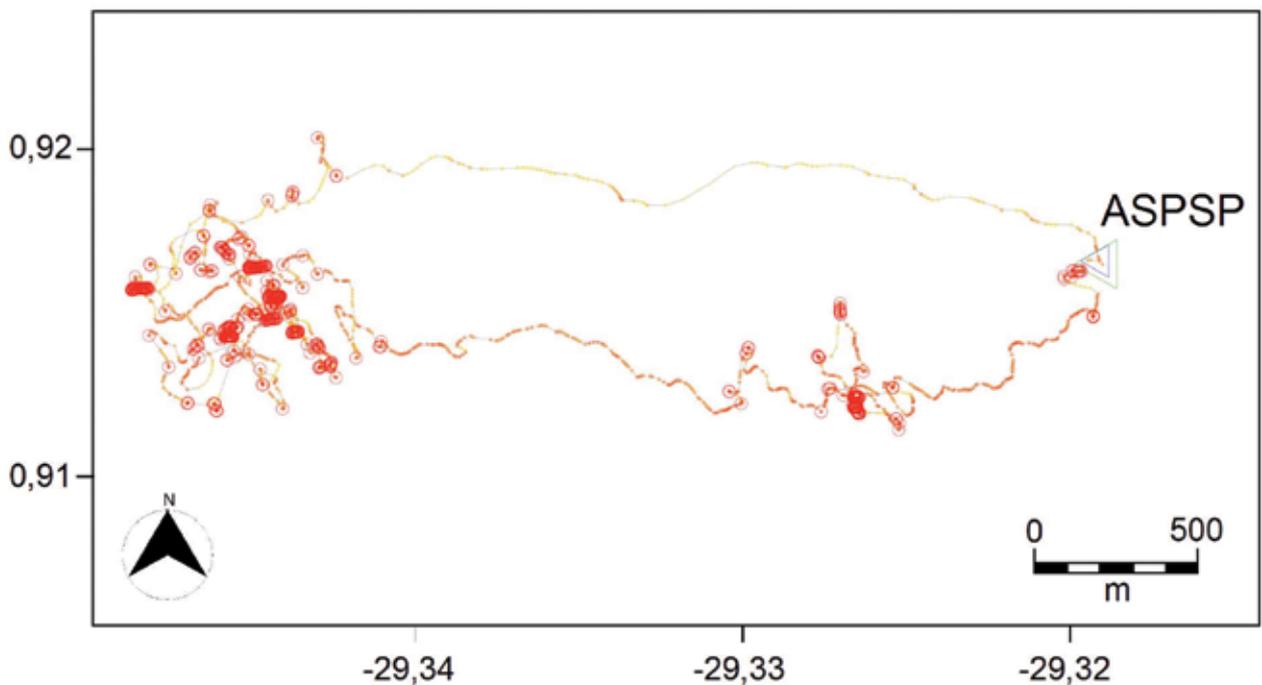


Figura 5. Exemplo de viagem de forrageio de um atobá-marron no ASPSP, registrada com GPS miniaturizados (1 posição/s). Pontos vermelhos indicam velocidades $< 5 \text{ km/h}$.

Figure 5. Example of a foraging trip of a Brown Booby in the SPSPA, recorded with miniaturized GPS (1 fix/s). Red dots represent speed $< 5 \text{ km/h}$.

corporal. Portanto, embora não o único, um provável mecanismo de diferenciação fenotípica e genotípica entre as colônias costeiras e o grupo formado por Fernando de Noronha e Atol das Rocas pode ser a adaptação local, influenciada pelas diferenças na paisagem marinha entre o ambiente nerítico tropical/subtropical e o ambiente pelágico tropical.

Por sua vez, os resultados da ampla amostragem da população de atobás-marrons do ASPSP demonstraram que as características da paisagem da colônia podem estar promovendo a seleção de fenótipos de maior tamanho corporal, o que, conseqüentemente, estaria isolando a população geneticamente, também através da adaptação local (NUNES *et al.*, 2018). De fato, a peculiar alta densidade de ninhos e a heterogeneidade da paisagem da colônia sugerem haver uma organização hierárquica na escolha do local para nidificação baseada no tamanho corporal das fêmeas. A forte pressão para conquista e defesa dos territórios pode ser ilustrada através dos registros de canibalismo intraespecífico observados no ASPSP, o que tem sido sugerido como uma forma de inviabilizar os ninhos vizinhos (NEVES *et al.*, 2015). A diferença de tamanho corporal de fêmeas entre as categorias de qualidade de ninho indicaram a existência de uma pressão seletiva relacionada à conquista e defesa de territórios, visto que fêmeas são predominantemente responsáveis por tais tarefas naquela população (KOHLRAUSCH, 2003). A nidificação em territórios altos, ou em áreas protegidas das ondas, da chuva, e dos próprios vizinhos conspecíficos, pode ser crucial para o sucesso da reprodução no ASPSP. Portanto, a ocupação de territórios de alta qualidade parece representar uma força seletiva mais importante do que a obtenção do recurso alimentar para os atobás-marrons do ASPSP.

No entanto, as estimativas de tamanho populacional do ASPSP sugerem um aumento no número de indivíduos nos últimos anos, indicando que a espécie está ampliando as potenciais áreas de nidificação, mesmo em locais com baixa qualidade

de ninho, como nas ilhotas ao redor da Ilha Belmonte, onde é cada vez mais comum observar os ninhos de atobás ao longo do ano (MANCINI *et al.*, 2016).

De modo geral, neste estudo foi demonstrada forte estruturação populacional de atobás-marrons no Brasil, a qual pode ser explicada pelas características oceanográficas e também pelas características da paisagem da colônia, como observado no ASPSP. Embora inserido no ambiente pelágico tropical e exposto às águas oligotróficas da Corrente Sul Equatorial, o ASPSP sofre influência da Subcorrente Equatorial, a qual promove um efeito de monte submarino no entorno do arquipélago, aumentando a produtividade local. No entanto, a pequena área emersa do arquipélago faz com que a população seja limitada e pressionada primariamente pela disponibilidade de espaço para nidificação, e não pela obtenção de alimento. As viagens de alimentação de curta duração e próximas à colônia, em comparação com colônias em outros oceanos, demonstra facilidade na obtenção de alimento. Além disso, a heterogeneidade da paisagem da colônia acentua as disputas por territórios de maior qualidade, o que é sugerido nesse estudo ser uma explicação plausível para o maior tamanho e massa corporal dos atobás-marrons do ASPSP e para o isolamento genético, impulsionado pela adaptação local.

Finalmente, foi demonstrado que as colônias de atobás-marrons do Brasil, por conta da ampla distribuição e exposição a diferentes gradientes ambientais, representam importantes modelos para o estudo da ecologia e genética de paisagem marinha, dois temas que ainda são pouco estudados em predadores de topo marinhos. Além disso, a colônia do ASPSP, em função do seu isolamento genético e da aparente forte dependência das condições ambientais locais, apresenta potencial para a condução de estudos que buscam compreender os processos microevolutivos que moldam populações naturais de predadores marinhos de topo de cadeia.

Agradecimentos

À SECIRM pelo suporte logístico e ao CNPq pelo financiamento do projeto (processo 405497/2012-1). Ao ICMBio e à FATMA pelas autorizações de coleta e ao CEMAVE/ICMBio pelo fornecimento das anilhas metálicas. Ao projeto Ilhas do Rio pelos dados das ilhas Cagarras. À Sophie Bertrand pelo suporte com análises estatísticas e espaciais, e a Arel Hadi e Thomas Campos pelo auxílio com a obtenção e processamento de dados de SIG no ASPSP.

Referências Bibliográficas

- ARAUJO, M. C. e CINTRA, M. M. Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial. In: VIANA, D. L.; HAZIN, F. H. V. e SOUZA, M. A. C. (eds.). **O arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de estação científica**. Brasília: SECIRM, pp 107–113, 2009.
- BARBOSA-FILHO, R. C. e VOOREN, C. M. **Abundância, estrutura etária e razão sexual do atobá-marrom *Sula leucogaster* (Pelecaniformes: Sulidae) no Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Brasil**. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 18: 157–163, 2010.
- CASTELLO, J. P. e KRUG, L. C. **Introdução às ciências do mar**. Pelotas: Editora Textos, 2015.
- JACKSON, A. L.; INGER, R.; PARNELL, A. C. e BEARHOP, S. **Comparing isotopic niche widths among and within communities: SIBER – Stable Isotope Bayesian Ellipses in R**. *Journal of Animal Ecology*, 80: 595–602, 2011.
- KOHLRAUSCH, A. B. **Biologia reprodutiva, comportamento e ecologia de atobás (Sulidae): implicações para a evolução do dimorfismo sexual no tamanho**. 130f. Tese de Doutorado – Ciências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- LESSA, R. P.; MAFALDA-JR, P.; ADVÍNCULA, R.; LUCCHESI, R. B.; BEZERRA-JR, J. L.; VASKE-JR, T. e HELLEBRANDT, D. **Distribution and abundance of ichthyoneuston at seamounts and islands off north-eastern Brazil**. *Archive of Fishery and Marine Research*, 47: 239–252, 1999.
- MANCINI, P. L. e BUGONI, L. **Resources partitioning by seabirds and their relationship with other consumers at and around a small tropical archipelago**. *ICES Journal of Marine Sciences*, 71: 2599–2607, 2014.
- MANCINI, P. L.; SERAFINI, P. P. e BUGONI, L. **Breeding seabird populations in Brazilian oceanic islands: historical review, update and a call for census standardization**. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 24: 94–115, 2016.
- MORRIS-POCOCK, J. A.; ANDERSON, D. J. e FRIESEN, V. L. **Mechanisms of global diversification in the brown booby (*Sula leucogaster*) revealed by uniting statistical phylogeographic and multilocus phylogenetic methods**. *Molecular Ecology*, 20: 2835–2850, 2011.
- NEVES, F. M.; MANCINI, P. L.; MARQUES, F. P.; NUNES, G. T. e BUGONI, L. **Cannibalism by brown booby (*Sula leucogaster*) at a small tropical archipelago**. *Revista Brasileira de Ornitologia*, 23: 299–304, 2015.
- NUNES, G. T. e BUGONI, L. **Local adaptation drives population isolation in a tropical seabird**. *Journal of Biogeography*, 45: 332–341, 2018.
- NUNES, G. T.; BERTRAND, S. e BUGONI, L. **Seabirds fighting for land: phenotypic consequences of breeding area constraints at a small remote archipelago**. *Scientific Reports*, 8: 665, 2018.
- NUNES, G. T.; MANCINI, P. L. e BUGONI, L. **When Bergmann's rule fails: evidences of environmental selection pressures shaping phenotypic diversification in a widespread seabird**. *Ecography*, 40: 365–375, 2017.
- PIOLA, A. R.; CAMPOS, E. J. D.; MÖLLER-JR, O. O.; CHARO, M. e MARTINEZ, C. **Subtropical shelf front off eastern South America**. *Journal of Geophysical Research*, 105: 6565–6578, 2000.
- SOUZA, C. S.; LUZ, J. A. G.; MACEDO, S.; MONTES, M. J. F. e MAFALDA-JR, P. **Chlorophyll α and nutrient distribution around seamounts and islands of the tropical south-western Atlantic**. *Marine and Freshwater Research*, 64: 168–184, 2013.
- TAYLOR, S. A.; MORRIS-POCOCK, J. A.; SUN, Z. e FRIESEN, V. L. **Isolation and characterization of ten microsatellite loci in blue-footed (*Sula nebouxii*) and Peruvian boobies (*Sula variegata*)**. *Journal of Ornithology*, 151: 525–528, 2010.

Os Golfinhos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Lilian Sander Hoffmann¹
Thales Renato O. de Freitas¹

13

Abstract

A recent discovery of bottlenose dolphin population (*Tursiops truncatus*) in the surrounding waters of Saint Peter Saint Paul Archipelago (SPSPA) offers a unique opportunity to study its biology and ecology in an oceanic environment. Since 2006, field expeditions have been conducted to study the dolphins through photo-identification, genetics, and bioacoustics surveys. During this period of observation, it was possible to identify a resident population of at least 25 individuals, with strong site fidelity to the area and occupying preferentially waters close to the archipelago. This is the only resident population of the species around an oceanic island, providing extremely important data concerning its evolutionary biology. Genetic studies using microsatellites revealed that the majority of individuals are non-related, then there is no inbreeding (as would be expected for small and reproductively isolated populations). From a phylogeographic perspective, SPSPA individuals share mtDNA haplotypes with North Atlantic inshore and offshore individuals, revealing that the SPSPA population is not closed, suggesting that some immigration and emigration occurs in the population. Bioacoustics study to verify the repertoire characteristics showed that almost all whistles parameters analyzed had higher frequencies than others populations. The differences seem to be related to distinct environmental characteristics or a possible partial geographic isolation. Such condition

might represent the absence of constant contact with other groups and a consequent isolation of the acoustic repertoire. Further discoveries on the species biology can still be achieved in the region; therefore, the continuity of the study is strongly recommended. The permanent monitoring of this population is essential for its conservation since the group certainly represents a single conservation unit of evolutionary importance. The information generated until now is essential for subsidizing conservation strategies, management plans and for targeting priority research actions in oceanic environments.

Introdução

Uma vez que a Convenção das Nações Unidas sobre os Direitos do Mar estabeleceu, em 1982, a garantia do direito de explorar os recursos naturais da Zona Econômica Exclusiva, é imprescindível que haja um esforço no sentido de superar a falta de conhecimento, ainda significativa, a respeito das espécies da fauna brasileira dos nossos mares. O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPP) localiza-se num ponto estratégico do ponto de vista de diversas espécies. Existem 44 espécies de cetáceos confirmadas para águas brasileiras, e

1 Universidade Federal do Rio Grande do Sul (liliansander@gmail.com).

embora algumas como a baleia-franca (*Eubalaena australis*) e o boto-cinza (*Sotalia fluviatilis*) sejam mais facilmente avistadas próximas à costa, muitas outras ainda são pouco conhecidas, principalmente por possuírem distribuição oceânica. A recente descoberta de uma população de golfinhos-nariz-de-garrafa (*Tursiops truncatus*), nos entornos do ASPSP, oferece uma oportunidade única para a comunidade científica estudar a biologia e ecologia dessa espécie em ambiente oceânico, contribuindo para seu conhecimento a um nível global.

O golfinho-nariz-de-garrafa

Um dos cetáceos mais conhecidos do público e da comunidade científica, o golfinho-nariz-de-garrafa, *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821), também conhecido como golfinho-flíper ou boto-da-tainha,

é uma espécie com ampla distribuição, ocorrendo nas zonas tropicais e temperadas de todo o mundo (Figura 1). É frequentemente encontrado formando populações residentes ao longo da sua distribuição, principalmente em regiões costeiras. Possui um corpo robusto, pesando em média 350 kg e podendo chegar a 3,9m (WELLS e SCOTT, 2002; LODI e BOROBIÁ, 2013).

Em algumas regiões, *T. truncatus* apresenta duas formas ou ecótipos, uma costeira e outra oceânica (HOELZEL *et al.*, 1998). Contudo, suas variações geográficas assim como a estrutura de suas populações ainda são escassamente conhecidas, principalmente pela dificuldade em se obter dados de populações oceânicas. A falta de identificação acurada da espécie e o desconhecimento dos limites geográficos e pressões que cada população e subpopulação sofrem na costa brasileira (como degradação do habitat, colapsos nas populações



Figura 1. O golfinho-nariz-de-garrafa, *Tursiops truncatus*, registrado nas águas do entorno do ASPSP. Foto: Lilian S. Hoffmann.

Figure 1. The bottlenose dolphin, *Tursiops truncatus*, recorded in the surrounding waters of Saint Peter Saint Paul Archipelago (SPSPA). Photo: Lilian S. Hoffmann.

de peixes, poluição e captura acidental em redes de pesca) constituem suas principais ameaças. Estas informações são indispensáveis para elaborar planos de manejo adequados à espécie, que no Brasil encontra-se sob uma grande pressão antrópica, devido, principalmente, às capturas acidentais.

Dentre as várias abordagens utilizadas para o estudo de mamíferos marinhos, as técnicas moleculares surgiram como uma potente ferramenta para estudos taxonômicos e populacionais, uma vez que permite a identificação de indivíduos ou espécies, a determinação de estoques e fluxo gênico e também revela informações sobre a estrutura social do grupo (HOELZEL *et al.*, 1998; NATOLI *et al.*, 2005). Com isto, é possível entender o grau de isolamento de uma população, visto que, para a biologia da

conservação, quanto mais isolada uma população, maiores os riscos de redução da sua variabilidade genética, causando diminuição no potencial reprodutivo e na sobrevivência dos indivíduos.

Outra técnica utilizada para o estudo de cetáceos é o uso do registro fotográfico para a identificação individual através das marcas naturais dos animais (Figura 2). Dados coletados a partir da foto-identificação, combinados com modelos de marcação-recaptura, vêm sendo utilizados com êxito para estimar o tamanho de populações e outros parâmetros demográficos importantes, como intervalos de nascimentos, taxas de sobrevivência e sazonalidade reprodutiva (WELLS e SCOTT, 1990; HOFFMANN, 2004; FRUET *et al.*, 2015; LAPORTA *et al.*, 2016; VERMEULEN *et al.*, 2017), subsidiando estudos que acessem o estado de conservação da população.



Figura 2. Um dos golfinhos da população do ASPSP fotografado a partir da proa da embarcação de apoio, no ângulo ideal para a foto-identificação. Foto: Lilian S. Hoffmann.

Figure 2. One of the SPSPA population dolphin, photographed from the support vessel bow, showing an ideal angle for photo-identification purposes. Photo: Lilian S. Hoffmann.

Considerada uma ciência recente, a bioacústica é uma poderosa ferramenta para o estudo de animais silvestres, principalmente pelas informações que revela. Na natureza, a transmissão dos conhecimentos adquiridos pelo grupo, como locais e técnicas de forrageamento, é de extrema importância para a sobrevivência. Nos cetáceos, a especificidade dos sinais individuais, ou mesmo de um grupo ou população, frequentemente reflete o comportamento e o sistema social da espécie. Os golfinhos produzem um amplo repertório de complexas vocalizações, e estudos vêm mostrando a existência de variações geográficas nos assobios (BAZÚA-DURAN, 2004; HOFFMANN *et al.*, 2012). O assobio (Figura 3) é um som de frequência modulada de banda estreita, extremamente comum entre a maioria das espécies de odontocetos e apresenta uma importante função na comunicação nos delphinídeos, como reconhecimento individual e coesão do grupo. Dentre as técnicas usadas, a extração dos parâmetros acústicos dos assobios é uma ferramenta que vêm se mostrando extremamente eficiente para a compreensão do

comportamento e organização social dos grupos (JANIK e SLATER, 1998).

Os assobios de *T. truncatus* apresentam a frequência fundamental usualmente abaixo de 20 kHz, com durações entre 0,05 e 3,2s (BAZÚA-DURAN e AU, 2002). Frequências tão baixas como 1 ou 2 kHz também já foram registradas (SCHULTZ *et al.*, 1995), podendo indicar variações regionais. Os autores acreditam que a complexidade de sons emitidos por *T. truncatus* associado com sua ampla distribuição geográfica deve levar a diferenças regionais nos sons. A análise dos assobios tem sido usada tanto para a caracterização de espécies quanto para comparações entre grupos e populações (e.g., WANG *et al.*, 1995; RENDELL *et al.*, 1999; BAZÚA-DURAN e AU, 2002; AZEVEDO e VAN SLUYS, 2005; HOFFMANN *et al.*, 2012). A comparação entre populações pode oferecer informações acerca da diversidade de repertórios, graus de compartilhamento, funções específicas e adaptações ecológicas. Pesquisas direcionadas para caracterização e correlação de tais aspectos trarão um maior entendimento de sua biologia e conservação.

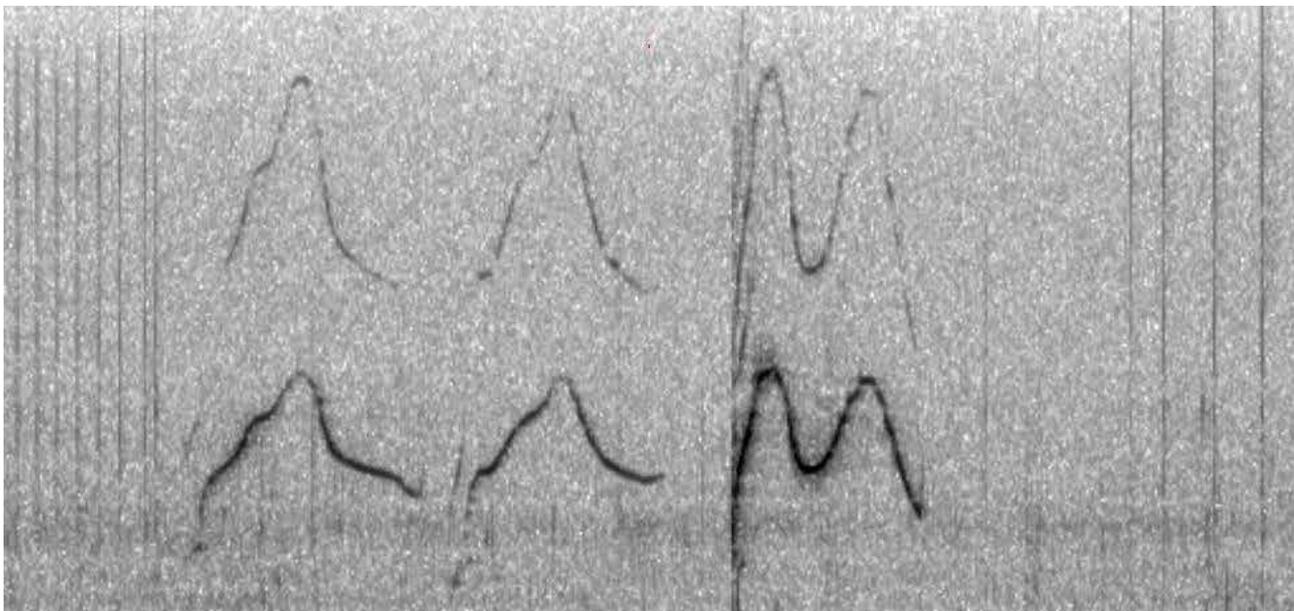


Figura 3. Espectrograma mostrando uma sequência de três assobios, com o padrão típico de frequência modulada da espécie. Imagem: Lilian S. Hoffmann.

Figure 3. Spectrogram shows a sequence of three whistles, with a typical modulated frequency pattern of the species. Image: Lilian S. Hoffmann.

Material e Métodos

Foto-identificação dos golfinhos do Arquipélago

Para a identificação de cada golfinho do grupo ocorrente nas águas do ASPSP, foi utilizada a técnica da foto-identificação, que permite o reconhecimento dos indivíduos através de marcas naturais. O monitoramento fotográfico também possibilita a aquisição de outras informações, como nascimento de filhotes (Figura 4), aparecimento de indivíduos adultos não previamente avistados, desaparecimento de um animal previamente identificado, além de revelar graus de residência e fidelidade à área.

A foto-identificação segue a metodologia já consolidada pela comunidade científica para diversas espécies (WÜRSIG e WÜRSIG, 1977). Com o auxílio de câmeras digitais e lentes zoom 70-300 mm, os animais foram fotografados até que se assumisse ter obtido pelo menos uma fotografia de boa qualidade de cada indivíduo. Considerando-se a duração do estudo, foram utilizadas apenas marcas de longa duração, como manchas pigmentadas permanentes, cicatrizes e cortes na nadadeira dorsal (Figura 5).



Figura 4. Dupla mãe-filhote registrada nas águas do ASPSP. Foto: Lilian S. Hoffmann.

Figure 4. A mother-calf pair recorded around the SPSPA. Photo: Lilian S. Hoffmann.



Figura 5. Marcas permanentes usadas para foto-identificação dos golfinhos do ASPSP, como uma grande mancha na lateral do corpo (esquerda) e cortes no topo da nadadeira dorsal (direita). Fotos: Lilian S. Hoffmann.

Figure 5. Permanent marks used to SPSPA dolphins' photo-identification, like a conspicuous spot on the side of the body (left), and cuts on the top of dorsal fin (right). Photos: Lilian S. Hoffmann.

O grupo de golfinhos do ASPSP foi monitorado a partir de duas plataformas de observação, do bote inflável e do barco de apoio. A coleta de dados ocorreu em um raio de aproximadamente 2 km ao redor do ASPSP. Para cada grupo avistado e fotografado, foram anotados dados como tamanho de grupo, atividade, posição geográfica e número de filhotes, possibilitando assim a avaliação de outras características, como, por exemplo, uso de área, grau de fidelidade e residência ao local, intervalos de nascimento, taxas reprodutivas, estimativas de sobrevivência, mortalidade e organização social.

Diversidade genética e estrutura populacional dos golfinhos do Arquipélago

Material biológico dos golfinhos ocorrentes no entorno do ASPSP foram coletados por meio de biópsias (Figura 6) nos dois primeiros projetos deste grupo de pesquisa (Editais MCT/CNPq nº 56/2005 e 26/2009), tendo sido obtido um total de 19 amostras de tecido epitelial. Para a análise do material genômico e verificação da variabilidade genética, foram utilizados marcadores mitocondriais (região controladora) e nucleares

(12 locos de microssatélites), sendo a sexagem realizada a partir da amplificação dos fragmentos dos genes SRY (cromossomo Y) e ZFX (cromossomo X) (CASTILHO *et al.*, 2015).

Bioacústica dos golfinhos do Arquipélago

Aquisição das vocalizações

As vocalizações dos golfinhos foram gravadas com um hidrofone C-54XRS (Cetacean Research Technology), conectado a um gravador portátil (Fostex FR-2 Digital Memory Field Recorder), sendo armazenadas em arquivos de som com extensão *wave*. Os espectrogramas dos assobios foram calculados pelo aplicativo Raven versão 1.4 (Cornell Laboratory of Ornithology, NY). A configuração de análise utilizada foi FFT com 512 amostras, janela de Hanning e 50% de nível de sobreposição.

Avaliação quantitativa dos assobios

Para cada assobio, foi realizada a extração dos parâmetros espectrais e temporais (Figura 7), gerando um banco de dados acústicos para a população do ASPSP, o que permite futuras comparações com populações de outras localidades.



Figura 6. Golfinhos sendo amostrados a partir da proa da embarcação de apoio, de onde as pesquisas em geral são conduzidas. Foto: Lilian S. Hoffmann.

Figure 6. Dolphins being sampled from the support vessel bow, from which surveys are generally conducted. Photo: Lilian S. Hoffmann.

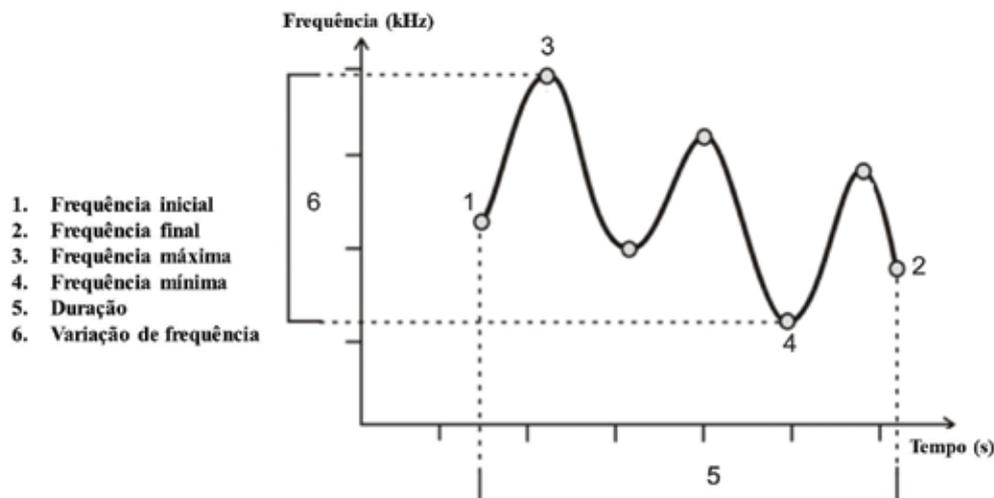


Figura 7. Representação da frequência de um assobio demonstrando os parâmetros acústicos extraídos dos espectrogramas. (Adaptado de Hoffmann, 2004).

Figure 7. Whistle fundamental frequency representation exhibiting the acoustic parameters extracted from the spectrograms. (Adapted from Hoffmann, 2004).

Resultados e Discussão

Desde 2006, foram realizadas 18 expedições, onde foram coletados dados de foto-identificação, genética e acústica. As expedições cobriram todas as épocas do ano, com 4 a 5 expedições realizadas para cada estação. O tamanho dos grupos observados variou desde um único indivíduo a 18 animais, e em todas as expedições foi observada a presença de pelo menos um filhote.

Os animais foram observados sempre em águas próximas ao ASPSP, principalmente no quadrante leste-sudeste (Figura 8). Estudos recentes de uso de habitat corroboram com essa informação, apontando esta seção como a mais ocupada pelos animais (MILMANN *et al.*, 2017).



Figura 8. Dois golfinhos-nariz-de-garrafa na região mais ocupada pelo grupo, na porção leste-sudeste do entorno do ASPSP. Foto: Lilian S. Hoffmann.

Figure 8. Two bottlenose dolphins recorded in the region more occupied by the group, in the southeastern side of SPSPA. Photo: Lilian S. Hoffmann.

Foto-identificação

Ao longo das expedições, foram tiradas mais de 16.000 fotos, permitindo a foto-identificação de no mínimo 28 animais (Figura 9). A população, entretanto, é um pouco maior, uma vez que existem animais sem marcas conspícuas que permitam sua identificação precisa, assim como filhotes que, em geral, não apresentam marcas permanentes, adquiridas ao longo da vida. Os resultados obtidos até o momento indicam que a espécie é residente nas águas do entorno do ASPSP, e alguns indivíduos apresentam considerável grau de fidelidade à

região (CAON *et al.*, 2010; DOMIT *et al.*, 2016). Como a população é dinâmica, com o nascimento e morte ou migração de animais, existe a necessidade de acompanhamento da população ao longo do tempo. A manutenção do catálogo de foto-identificação é de extrema importância para que a população possa ser monitorada adequadamente, possibilitando a detecção de alterações naturais ou de causas antrópicas, como diminuição do tamanho populacional, aparecimento de doenças, etc.



Figura 9. Exemplos de foto-identificação dos golfinhos ocorrentes nas águas do ASPSP, baseado em marcas naturais da nadadeira dorsal. Fotos: Lilian S. Hoffmann.

Figure 9. Examples of dolphins photo-identification occurring in SPSPA waters, based on dorsal fin natural marks. Photos: Lilian S. Hoffmann.

Diversidade genética e estrutura populacional

O estudo genético da população de golfinhos do ASPSP foi baseado no material coletado a partir de 17 indivíduos (CASTILHO *et al.*, 2015). Foram identificados seis fêmeas e 11 machos, obtendo-se uma proporção sexual de 1:1,83, diferente da esperada de 1:1, observada em estudos prévios (HERSH *et al.*, 1990; SERGEANT *et al.*, 1973).

O resultado obtido para a população do ASPSP pode ser consequência do viés amostral, uma vez que adultos (presumivelmente fêmeas) acompanhados por filhotes foram deliberadamente não amostrados para evitar o estresse dos indivíduos. Outra explicação seria que as fêmeas podem evitar se aproximar das embarcações

quando os filhotes são muito pequenos. Isto é visto para outras espécies, como o golfinho-rotador (*Stenella longirostris*) onde os machos se aproximam das embarcações, executando comportamentos aéreos, enquanto as fêmeas com filhotes ficam afastadas, um provável comportamento de proteção (NORRIS *et al.*, 1985).

A análise populacional através do microsatélites indicou que em média há 4,54 alelos e uma riqueza alélica de 4,47. Em relação à variabilidade genética esta se mostrou relativamente alta com a heterozigosidade média observada de 0,59, a esperada em 0,64, e um valor baixo para o coeficiente de parentesco ($F=7,81$) (CASTILHO *et al.*, 2015). Os microsatélites também revelaram que a maioria dos indivíduos é não-aparentado (83,8%). O restante dos pares se dividiu em irmãos, meio-irmãos e dois pares de possíveis pais e filhos (CASTILHO *et al.*, 2015).

Numa perspectiva filogeográfica, os indivíduos do ASPSP compartilham haplótipos do mtDNA com indivíduos de alguns grupos *inshore* e *offshore* do Atlântico Norte (Figura 10).

Um estudo prévio, usando somente a região de controle do mtDNA, havia indicado que essa população do ASPSP era pequena e isolada (OTT *et al.*, 2009), contudo o uso de outros marcadores trouxe evidências em direção a um novo cenário. Nosso estudo (CASTILHO *et al.*, 2015) revelou que a população de golfinhos do ASPSP não é fechada (recebe indivíduos de outras populações e alguns também devem emigrar), que a maioria não é relacionada e que não há endocruzamento (o que poderia ser esperado se uma população tão pequena como a do ASPSP fosse isolada reprodutivamente, fato não corroborado pelo presente estudo).

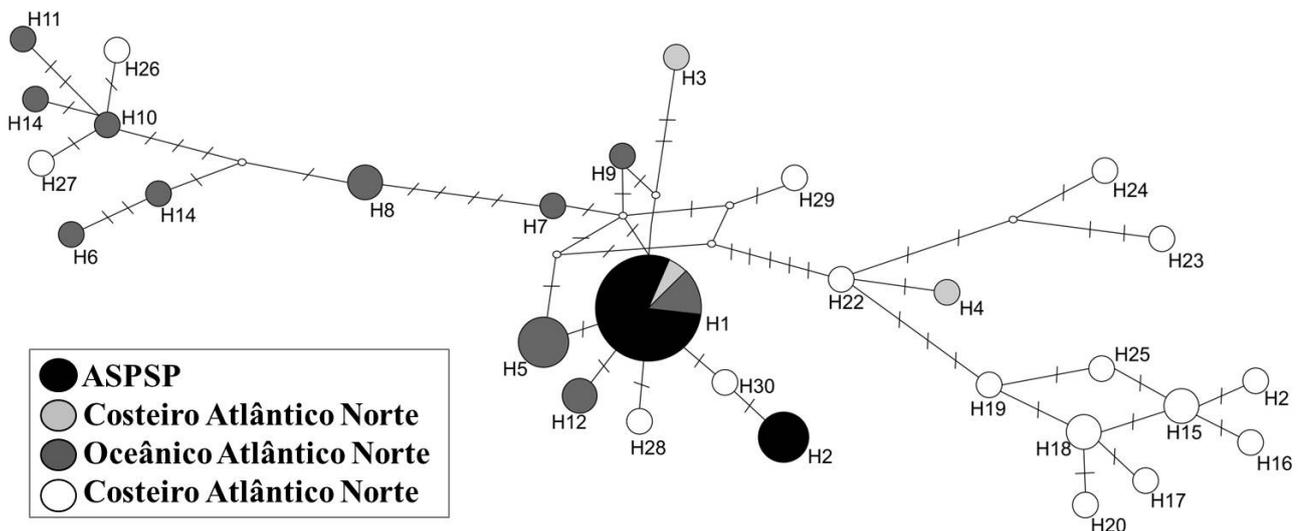


Figura 10. Rede de haplótipos. Os setores são proporcionais ao número de cada haplótipo observado em cada população. (CASTILHO *et al.*, 2015).

Figure 10. Haplotypes network. Sectors are proportional to the numbers of each haplotype observed in each population. (CASTILHO *et al.*, 2015).

Bioacústica - Variação dos Repertórios

Na análise do repertório acústico, os assobios do ASPSP foram comparados com os de uma população costeira, ocorrente no canal de Tramandaí, RS (HOFFMANN, 2004; HOFFMANN *et al.*, 2012). Os assobios do grupo do ASPSP (Figura 11) tiveram valores maiores ($P < 0,0001$) para quase todas as frequências, com exceção da frequência final.

Um possível isolamento geográfico da população do ASPSP pode estar subjacente às diferenças encontradas, uma vez que tal condição pode significar a ausência de contato constante com outros grupos e um consequente isolamento do repertório acústico, o que poderia levar à formação de dialetos (HOFFMANN *et al.*, 2012). Usualmente, as maiores diferenças nas variações dos assobios são encontradas em populações de áreas não adjacentes (WANG *et al.*, 1995).

Outra causa potencial da variação é a adaptação ao ruído ambiental, onde os animais parecem alterar parâmetros como frequência, duração e

modulação a fim de se adaptarem aos níveis de ruído (MATTHEWS *et al.*, 1999). A ausência de obstáculos interferindo em águas abertas pode favorecer o uso de altas frequências, pois permitem o uso mais eficiente de pistas binaurais (WANG *et al.*, 1995). O grupo do ASPSP vive em uma região com baixo nível de ruído, grandes profundidades e águas sem sedimento em suspensão, ao contrário do grupo costeiro, que ocupa um canal raso, com baixa visibilidade devido ao aporte de sedimentos das lagoas costeiras, e intensa atividade antrópica. A adaptação ao ruído pode evitar que o comportamento e coesão do grupo sejam afetados.

Comparações com repertórios de outros grupos podem testar a hipótese e incrementar a atual discussão, oferecendo um melhor entendimento a respeito das variações naturais dos assobios e suas funções (HOFFMANN *et al.*, 2012). A elaboração de um banco de dados das vocalizações da espécie em águas brasileiras pode auxiliar na avaliação de impactos das atividades humanas sobre as populações.

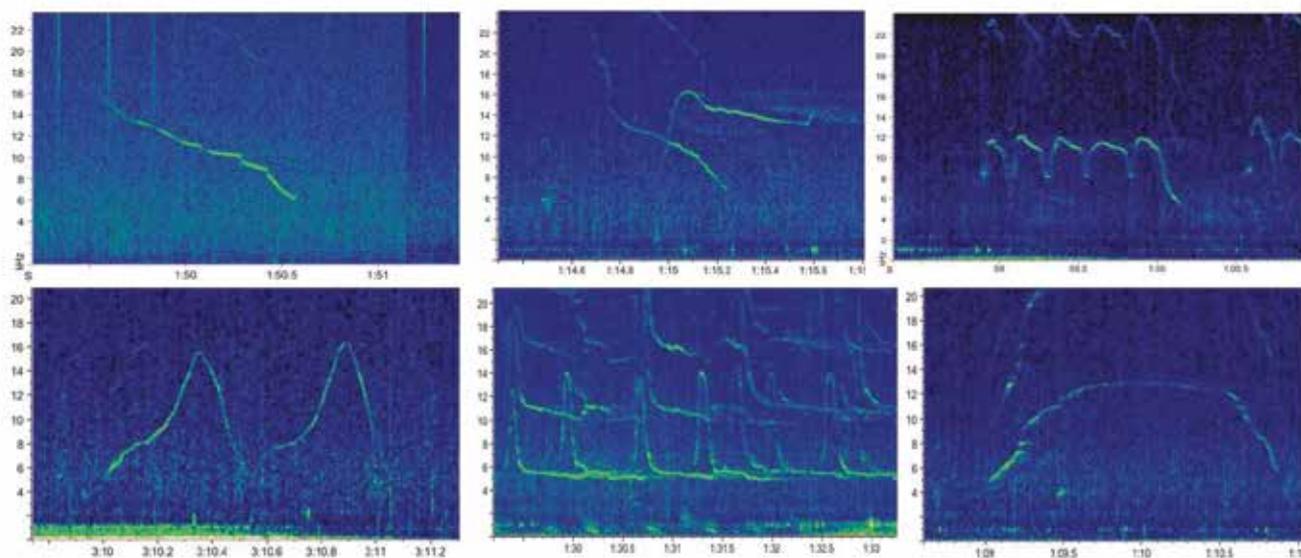


Figura 11. Repertório de assobios registrados para a população de golfinhos do ASPSP. Imagem: Lilian S. Hoffmann.
Figure 11. Repertory of whistles recorded for the SPSPA dolphin population. Image: Lilian S. Hoffmann.

Conclusões

Pesquisas com cetáceos em águas oceânicas são extremamente difíceis, sendo o presente projeto um dos pioneiros nos estudos de comportamento, genética e bioacústica de golfinhos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Contextos como esse são escassos e extremamente importantes, por aportarem informações acerca de espécies oceânicas das quais ainda se tem pouco conhecimento biológico. Nas águas do entorno do Arquipélago vive uma população de golfinhos nariz-de-garrafa, sendo que estes animais vêm sendo monitorados há anos, permitindo a confirmação de um alto grau de residência ao local, ou seja, se alimentam e reproduzem no entorno do Arquipélago praticamente todos os dias. Foram feitos estudos de identificação, ocupação de área, comportamentos alimentar e reprodutivo, bioacústica e genética, o que revelou importantes informações biológicas, que se somaram ao conhecimento prévio da espécie, praticamente restrito ao ambiente costeiro. Estudos como esse devem ser mantidos ao longo do tempo para poder aprofundar o conhecimento da biologia e dinâmica destas populações oceânicas, assim como para garantir que este grupo seja preservado de maneira adequada, evitando impactos ou disrupturas no padrão ecológico atual. Vários avanços ainda podem ser feitos com essa espécie e tantas outras espécies de mamíferos marinhos que ocupam a região do Arquipélago, e por isso recomenda-se fortemente a continuidade do estudo, apoiando-se sempre que necessário em novas tecnologias e ferramentas científicas. O monitoramento dessa população oceânica é essencial para sua conservação, visto que esse grupo com certeza representa uma unidade de conservação única, de grande importância evolutiva. As informações geradas até o presente são essenciais para subsidiar estratégias de conservação, planos de manejo e para direcionar ações prioritárias de pesquisa em ambientes oceânicos.

Agradecimentos

Gostaríamos de deixar nosso agradecimento pelo suporte logístico e financeiro dado pelo Programa Arquipélago e Ilhas Oceânicas, CNPq, FAPERGS, SECIRM, MCTIC, Marinha do Brasil e Empresa TRANSMAR, todas peças-chave na execução do projeto. Também aos diversos pesquisadores do Programa Ilhas Oceânicas, que colaboraram nas expedições e análise de dados, à Dra. Carolina Sokolowicz e aos revisores anônimos, pelos comentários e revisão do texto. As informações aqui apresentadas foram advindas dos trabalhos referentes aos Editais MCT/CNPq nº 56/2005, nº 26/2009 e nº 39/2012.

Referências Bibliográficas

- AZEVEDO, A. F. and VAN SLUYS, M. **Whistles of tucuxi dolphins (*Sotalia fluviatilis*) in Brazil: Comparisons among populations.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, 117 (3), 1456-1464, 2005.
- BAZÚA-DURÁN, C. **Differences in the whistle characteristics and repertoire of bottlenose and spinner dolphins.** *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, 76 (2), 386-392. 2004.
- BAZÚA-DURÁN, C. and AU, W. W. L. **The whistles of Hawaiian spinner dolphins.** *The Journal of the Acoustical Society of America*, 112 (6), 3064-3072. 2002.
- CAON, G.; MOREIRA, M.; HOFFMANN, L. S.; TULLIO, J.; PEDONE, F. V.; FRUET, P. and FREITAS, T. R. O. Os mamíferos marinhos. In: **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica.** Viana, D.; Hazin, F. V. and Souza, M. A. C. (Orgs.) 1 ed. Brasília, DF: SECIRM, v.1, 278-285, 2010.
- CASTILHO, C.; PEDONE, F. V.; BERTUOL, F.; FRUET, P.; GENOVES, R.; TULLIO, J.; CAON, G.; HOFFMANN, L. S. and FREITAS, T. R. O. **Insights about the genetic diversity and population structure of an offshore group of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the MidAtlantic.** *Genetics and Molecular Research*, 14, 3387-3399. 2015.
- DOMIT, C.; LAPORTA, P.; ZAPPES, C.; LODI, L.; HOFFMAN, L. S.; GENOVES, R.; FRUET, P. and AZEVEDO, A. **Report of the Working Group on the Behavioral Ecology of bottlenose**

dolphins in the Southwest Atlantic Ocean. *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 11, 106-120. 2016.

FRUET, P.; DAURA-JORGE, F.; MÖLLER, L.; GENOVES, R. and SECCHI, E. **Abundance and demography of bottlenose dolphins inhabiting a subtropical estuary in the Southwestern Atlantic Ocean.** *Journal of Mammalogy*, 96 (2), 332-343, 2015.

HERSH, S. L.; ODELL, D. K. and ASPER, E. D. Bottlenose dolphin mortality patterns in the Indian/Banana River system of Florida. In: **The Bottlenose Dolphin.** Leatherwood, S. and Reeves, R. (eds.). San Diego: Academic Press, 155-164, 1990.

HOELZEL, A. R.; POTTER, C. W. and BEST, P. B. **Genetic differentiation between parapatric 'nearshore' and 'offshore' populations of the bottlenose dolphin.** *Proceedings of the Royal Society of London B*, 265, 1177-1183. 1998.

HOFFMANN, L. S. Um estudo de longa duração de um grupo costeiro de golfinhos *Tursiops truncatus* (Montagu, 1821) (Cetacea, Delphinidae) no sul do Brasil: aspectos de sua biologia e bioacústica. 2004. 273 f. Tese (Doutorado). PPG Biologia Animal, Universidade Federal Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, 2004.

HOFFMANN, L. S.; FERLIN, E.; FRUET, P.; GENOVÊS, R.; VALDEZ, F.; TULLIO, J.; CAON, G. and FREITAS, T. R. O. Whistles of Bottlenose Dolphins: Group Repertoires and Geographic Variations in Brazilian Waters. In: **The Effects of Noise on Aquatic Life.** Popper, A. N. and Hawkins, A. (eds.). 1° ed. New York: Springer, v.1, 141-144, 2012.

JANIK, V. and SLATER, P. **Context-specific use suggests that bottlenose dolphins signature whistles are cohesion calls.** *Animal Behaviour*, 56, 829-838. 1998.

LAPORTA, P., FRUET, P. F. and SECCHI, E. R. **First estimate of common bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) (Cetacea, Delphinidae) abundance off Uruguayan Atlantic coast.** *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 11 (1-2), 144-154, 2016.

LODI, L. and BOROBIA, M. **Baleias, botos e golfinhos do Brasil: guia de identificação.** Rio de Janeiro: Technical Books, 2013.

MATTHEWS, J. N.; RENDELL, L. E.; GORDON, J. C. D. and MACDONALD, D. W. **A review of frequency and time parameters of cetacean tonal calls.** *Bioacoustics*, 10, 47-71. 1999.

MILMANN, L. C.; DANILEWICZ, D.; BAUMGARTEN, J. and OTT, P. H. **Temporal-spatial distribution of an island-based**

offshore population of common bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in the equatorial Atlantic. *Marine Mammal Science*, 33(2), 496-519. 2017.

NATOLI, A.; BIRKINI, A.; AQUILAR, A.; LOPEZ, A. and HOELZEL, A. R. **Habitat structure and the dispersal of male and female bottlenose dolphins *Tursiops truncatus*.** *Proceedings of the Biological Sciences*, 272, 1217-1226. 2005.

OTT, P. H.; TAVARES, M.; MORENO, I. B.; OLIVEIRA, L. and DANILEWICZ, D. Os cetáceos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. In: **Ilhas oceânicas brasileiras: da pesquisa ao manejo.** Mohr, L. V.; Castro, J. W. A.; Costa, P. M. S. and Alves, R. J. (eds.). Brasília: MMA/ICMBio, v. 2, 283-300, 2009.

RENDELL, L.; MATTHEWS, J.; GILL, A.; GORDON, J. and MACDONALD, D. W. **Quantitative analysis of tonal calls from five odontocete species, examining interspecific and intraspecific variation.** *Journal of Zoology*, 249, 403-410, 1999.

SCHULTZ, K. W.; CATO, D. H.; CORKERON, P. J. and BRYDEN, M. M. **Low frequency narrow-band sounds produced by bottlenose dolphins.** *Marine Mammals Science*, 11, 503-509. 1995.

SERGEANT, D. E.; CALDWELL, D. K. and CALDWELL, M. C. **Age, growth, and maturity of bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) from northeast Florida.** *Journal of the Fisheries Research Board of Canada*, 30 (7), 1009-1011. 1973.

VERMEULEN, E.; BASTIDA, R.; BERNINSONE, L.; BORDINO, P.; FAILLA, M.; FRUET, P.; HARRIS, G.; IÑÍGUEZ, M.; MARCHESI, M.; PETRACCI, P.; REYES, L.; SIRONI, M. and BRÄGER, S. **A review on the distribution, abundance, residency, survival and population structure of coastal bottlenose dolphins in Argentina.** *Latin American Journal of Aquatic Mammals*, 12 (1-2), 02-16, 2017.

WANG, W.; WÜRSIG, B. and EVANS, W. Comparisons of whistles among seven odontocete species. In: **Sensory Systems of Aquatic Mammals.** Kastelein, R. A.; Thomas, J. A. and Nachtigall, P. E. (eds.). Woerden: De Spil, Neth., 299-323, 1995.

WELLS, R. S. and SCOTT, M. D. **Estimating bottlenose dolphin population parameters from individual identification and capture-release techniques.** *Report of the International Whaling Commission* (Special issue 12), 407-415. 1990.

WELLS, R. S. and SCOTT, M. D. Bottlenose dolphins. In: **Encyclopedia of Marine Mammals.** Perrin, W. F., Wursig, B. and Thewissen, J. G. M (eds.). San Diego: Academic Press, 122-128, 2002.

Levantamento Topográfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Atlântico Equatorial) através da Tecnologia Lidar

Arel Hadi Rey Antônio¹
Thomas F da C Campos²
Maurício Veronez¹
Francisco Tognoli¹
Akihisa Motoki*
Susanna Sichel³
Márcia Maia⁴
Kenji Motoki³
Francisco Bezerra²
Carlos Ribeiro²
Reinaldo Petta²

14

Abstract

In this chapter we describe the topographic survey of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) through the use of the LIDAR methodology, aiming at the characterization of SPSPA geomorphological modeling and neotectonic evolution. Emphasizing the geomorphological formation of the islands, the tectonic uplift and the evolution of the current landscape from the analysis of the 3D Digital Outcrop Model (3D-DOM), in order to define the current "Landscape Evolution" of the SPSPA and their relations with the current tectonic uplift of SPSPA. The application of summit level map, seppômen (base level) and sekkokumen (relief amount) are one of the methodological highlights of our research project.

Introdução

O Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP, Figura 1) é constituído por um complexo de rochas ultramáficas situado no Atlântico Equatorial Norte (0°56'N, 29°22'W). Corresponde aos píncaros de uma cadeia submarina intratransformante, sua elevação morfológica possui 100 km de comprimento, 20 km de largura e 3800 m de altura. Enquanto área total emergida é cerca de 13 km², com a altitude máxima a cima do nível do mar de 21 m (ilha Nordeste). As ilhas e os penedos do Arquipélago de São Pedro e São Paulo estão espalhados em uma área de 400 x 200 m, com altitude relativamente nivelada. Observam-se patamares em torno de 4 a 10 m acima do nível do mar que ocupam 27% da área emergida total. Como o Arquipélago não possui praias, o patamar é considerado como plataforma de abrasão marinha (wave-cut bench). O ASPSP ocorre na zona de falha transformante de São Paulo, que possui direção E-W, 630 km de comprimento total e movimento transcorrente dextral. Diferentemente das ilhas dos arquipélagos de Fernando de Noronha, Abrolhos, Trindade e Martin Vaz, o Arquipélago de São Pedro e São Paulo não é constituído por rochas de origem vulcânica, mas sim por rochas de origem mantélicas, nomeadamente por peridotitos serpentinizados do manto abissal (CAMPOS *et al.*, 2003, 2010; SICHEL *et al.*, 2012). O Arquipélago de São Pedro e São Paulo é a única localidade oceânica até hoje conhecida em que ocorre acima do nível do mar no Oceano Atlântico uma exposição in-situ do manto abissal. As rochas ultramáficas encontram-se intensamente fraturadas, o que sugerem a existência de intenso movimento tectônico. Esse tectonismo está ativo até o presente e a formação do ASPSP foi controlada tanto pelas

1 UNISINOS;

2 UFRN (thomas.campos@pq.cnpq.br);

* In memoriam UERJ;

3 UFF;

4 Institute Universitaire Européen de La Mer / Université de Bretagne-Occidentale / France).

movimentações de falha transformante e de seu conjunto de fraturas, como pela expansão diapírica do manto oceânico, o que sugere que este complexo foi encaixado tectonicamente na crosta oceânica, no estado sólido, concomitantemente com a sua milonitização, isto é o ASPSP seria uma extrusão tectônica (CAMPOS *et al.*, 2010). Posteriormente, estas rochas foram serpentinizadas, pois este último processo frequentemente cruza a foliação milonítica, e se encontra associada ao padrão de diaclasamento existente no arquipélago, o que sugere que a serpentinição está associada a movimentos tectônicos tardios, que fraturaram ainda mais estas rochas, concomitantemente com a circulação de fluidos hidrotermais (CAMPOS *et al.*, 2003). A sobreposição destes processos geológicos influenciou diretamente o modelado que está

sendo formado pela ação das ondas no ASPSP. Este arquipélago possui ainda uma cobertura de rocha sedimentar fossilífera, com pouca expressividade e sem continuidade significativa, visto que, no geral, os seus afloramentos estão condicionados ao preenchimento de fundo de uma paléo-plataforma de abrasão marinha, fraturas e microdepressões (marmitas) existentes no substrato rochoso (ilha Belmonte), onde foi possível descobrir a existência de diferentes níveis deste tipo de rocha, com desníveis de até 10 m de altura (Figura 1) (CAMPOS *et al.*, 2010). Contudo, na ilha Sudeste (Challenger) existe um afloramento sedimentar, com cerca de 6 x 4 m, que foi designado por Campos *et al.*, (2010) de Formação Neogênica de São Pedro e São Paulo (CAMPOS *et al.*, 2005, 2010).

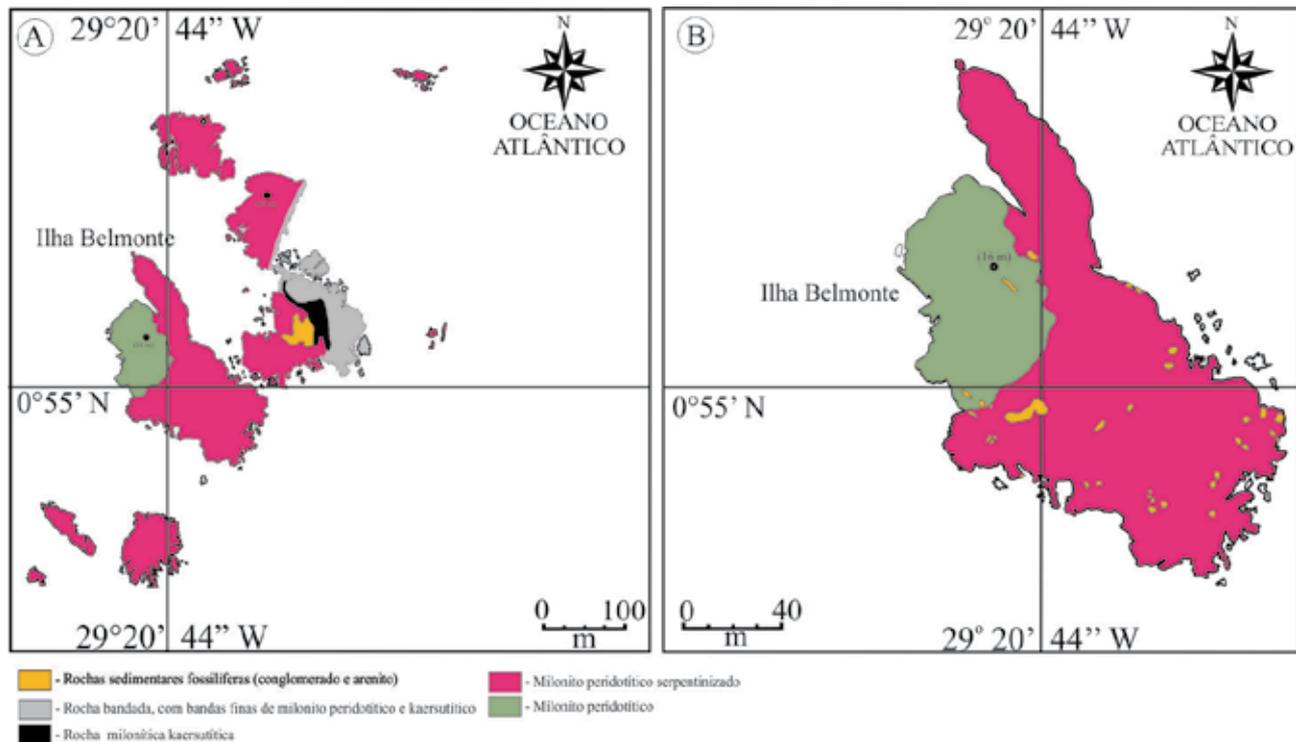


Figura 1. a) Mapa geológico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, b) Mapa geológico da ilha Belmonte, com realce dos terraços da Formação Neogênica de São Pedro e São Paulo (*apud* Campos *et al.*, 2010).

Figure 1. a) Geological map of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, b) Geological map of Belmonte Island, highlighting the terraces of the Neogene Formation of São Pedro and São Paulo (*apud* Campos *et al.*, 2010).

Estas rochas sedimentares (conglomerado polimítico e arenito conglomerático) são formadas essencialmente por materiais provenientes do substrato rochoso do arquipélago, e mais raramente por materiais biogênicos, aglutinados por um cimento carbonatado. Contudo, nos níveis mais inferiores aparecem intercalações de sedimentos brechoides consolidados, de grãos angulosos, subangulosos a subarredondados. A existência de diferentes paléoníveis sedimentares com intercalações de sedimentos brechoides consolidados nas rochas sedimentares do Arquipélago de São Pedro e São Paulo indica ter havido uma variação do nível do oceano, seja através de movimentos sismotectônicos comuns na região do arquipélago (e.g.: subsidência, soerguimento ou movimentação lateral do assoalho oceânico por ação tectônica) ou ainda através de movimentos isostáticos ou geoidais (e.g.: subsidência ou soerguimento do assoalho oceânico por ação conjunta da diferença de densidade da coluna crustal e da força da gravidade), assim como através dos movimentos eustáticos (e.g.: variação do volume de águas oceânicas).

Campos *et al.* (2010) propuseram que o soerguimento do maciço peridotítico de São Pedro e São Paulo deu-se por extrusão tectônica e não por atividade vulcânica. O que implica que o referido maciço está sujeito a uma compressão desde o Holocênico. Com base na datação de fósseis de algas melobésicas existente nos diferentes terraços sedimentares, o mais alto estudado se encontra a 8 ± 1 m do atual nível do mar e que se formou a cerca de 6.400-6200 y/ BP foi possível calcular a taxa de soerguimento do MSPSP em cerca de 1,5 mm/ano. Essa taxa de soerguimento é a mais alta em território brasileiro (CAMPOS *et al.* 2010). O uso pioneiro de técnicas geomorfológicas do tipo “seppômen” (summit level map) e “sekkokumen” (base level) no ASPSP para se calcular a taxa de soerguimento deve-se a Motoki *et al.* (2009). No referido trabalho Motoki *et al.* identificaram duas plataformas de abrasão marinha que abrangem as ilhas Belmonte, Sudeste

e Nordeste. Essas plataformas se encontram na mesma faixa de altitude (plataforma superior entre 7 - 9m e a plataforma inferior entre 4 - 5m), o que sugere que o soerguimento tectônico do ASPSP ocorreu de maneira uniforme, sem basculamento ou soerguimento diferenciado entre as ilhas, pelo menos após a formação das referidas plataformas. Motoki *et al.* (2009) consideraram que a plataforma superior se formou durante a Transgressão Flandriana e que a plataforma inferior formou-se por erosão posterior, com base nessas considerações eles calcularam uma taxa de soerguimento do ASPSP relativo ao nível do mar de cerca 1.9 mm/ano nos últimos 6.000 anos. Como já foi dito, Campos *et al.* (2010) com base em datações Carbono-14 em fósseis melobésicos e de vermitídeos existentes nos depósitos sedimentares biogênicos na plataforma superior da ilha Belmonte, indicativos de ambiente de paleo-enseada, calcularam uma taxa de soerguimento de 1,5 mm/ano para os últimos 6.600 anos. A discrepância no intervalo de tempo de soerguimento entre esse dois autores, deve-se ao erro intrínseco contido na técnica geomorfológica utilizada por Motoki *et al.* (2009), nomeadamente o uso de uma malha com 10 m de intervalo sobre um mapa topográfico 1:500 elaborado pela CPRM (Moraes *et al.*, 1997). A seguir apresenta-se os resultados do projeto de pesquisa financiado pelo CNPq (processo: 404721/2012-5) noemadamente, o levantamento topográfico a laser (LIDAR), cujo produtos principais foram a geração do Modelo Digital do Afloramento (MDA), um mapa topográfico 1:1 em 3D, para tal usou-se um intervalo de malha de 1 m a partir do modelo digital do terreno (LIDAR).

Material e Métodos

O LASER Scanner Terrestre (LST) é uma ferramenta para sensoriamento remoto que compõe a tecnologia LIDAR (Light Detection and Ranging). O sistema LIDAR obtém nuvens de pontos georeferenciadas ou não que podem ser convertidas

em Modelo Digital de Afloramento (MDA). Esse método permite capturar digitalmente afloramentos distando de dezenas até centenas de metros.

A modelagem digital de afloramentos é uma técnica recente, que necessita de pesquisas para o desenvolvimento de procedimentos e ferramentas que permitam superar as dificuldades impostas pelo grande volume de dados e realizar interpretações geológicas diretamente no MDA de forma rápida e eficiente. A tecnologia LIDAR utiliza um sistema óptico-mecânico composto por servomotores (direcionador), LASER (Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation) de baixa energia e baixa divergência (emissor) e sensores sensíveis (receptor), para medir propriedades (e.g: reflectância da superfície rochosa, que varia com o tipo de rocha (CAMPOS INOCENCIO *et al.*, 2014) de um objeto distante (Figura 2). De forma geral a medição da distância entre o equipamento e o alvo utiliza dois princípios básicos: tempo de ida e volta (Time Of Flying - TOF ou pulse echo) e triangulação. Para TOF o processo de aquisição consiste basicamente em emitir pulso de LASER direcionado com o auxílio de espelho de varredura comandado por servo motor, ao atingir o objeto, parte da energia é refletida para o equipamento e captada pelo sensor, esquematizado na Figura 2 (CAMPOS INOCENCIO *et al.*, 2014).

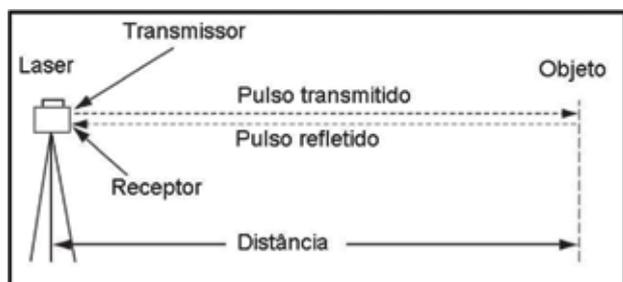


Figura 2. Esboço da tecnologia LIDAR.

Figure 2. Outline of LIDAR technology.

Esta metodologia é capaz de medir ângulos verticais, horizontais e distâncias com alto padrão de precisão e velocidade. Ele obtém informações por meio de um sistema de espelhos

ou prismas que captam feições topográficas de um determinado alvo. Os LSTs possuem diversos métodos para calcular as distâncias dos objetos, sendo os métodos do Tempo de Vôo (Time of Flight - TOF) e Diferença de fase (Phase Shift - PS) os mais utilizados (CAMPOS INOCENCIO *et al.*, 2014). O LST ILRIS 3D da Optech utiliza-se do método de tempo de vôo para calcular as distancias. Este modelo de equipamento emite um pulso laser de alta intensidade sobre um objeto e mede o tempo de retorno do mesmo, dividindo este tempo por dois calcula-se a distância do objeto em questão (Figura 2). A partir do pulso refletido, são adquiridas coordenadas relativas (X, Y e Z) dos pontos medidos, bem como, a intensidade de reflectância (I) (CAMPOS INOCENCIO *et al.*, 2014)). Como os LSTs trabalham com apenas um comprimento de onda, o mesmo calcula a intensidade perdida na reflectância de cada objeto medido, permitindo extrair um valor de "I" para cada ponto da nuvem (CAMPOS INOCENCIO *et al.*, 2014). Além destas informações, uma câmera de 3.1 Mpixel acoplada ao LST captura os valores de RGB (vermelho, verde e azul) para cada ponto da nuvem. Equipamentos como estes coletam milhões de pontos em questão de minutos, permitindo um recobrimento detalhado de afloramentos rochosos.

Para o imageamento 3D dos afloramentos do ASPSP foi utilizado um Laser Scanner Terrestre (LST) ILRIS 3D da OPTECH e Receptor GNSS de dupla frequência da Topcon modelo Lite RTK Plus. Para o pré-processamento das dados brutos obtidos com LST foi utilizado o software PARSER. Para a manipulação das nuvens de pontos foi utilizado o software CloudCompare V2, pelo fato de possuir o plugin QFACETS que permitiu a geração automática de planos.

O imageamento dos afloramentos do ASPSP foi realizado com resolução média de 30 mm entre pontos, resultando em um total de 10,8 milhões de pontos. Pontos estes, obtidos em mais de uma estação com diferentes perspectivas e média de 100 m de distância dos afloramentos (Figura 3).



Figura 3. a) Obtenção de dados do LST com visada N-S, a partir da ilha Cabral, b) Obtenção de dados do LST com visada E-W, a partir da ilha Challenger. (Fotos Arel Hadi).

Figure 3. a) Obtaining LST data with an N-S target, from Cabral Island, b) Obtaining LST data with an E-W target, from Challenger Island. (Arel Hadi's Photo).

Para georreferenciar as nuvens, foram utilizados receptores GNSS a partir da técnica de Levantamento Cinemático em Tempo Real (RTK). Os dados brutos obtidos com o LST foram pré-processados em um arquivo tipo XYZ. Desta forma, cada ponto da nuvem recebe, além das informações de coordenadas (X, Y e Z), as intensidades de reflectância (I) e valores de RGB, provenientes da câmera acoplada ao LST. O formato de arquivo resultante deste processamento pode ser importado em softwares de manipulação de nuvens de pontos (e.g. Cyclone; Polyworks; CloudCompare). Neste trabalho apenas serão utilizados os valores de coordenadas XYZ, já que um dos objetivos da nossa pesquisa é analisar a morfologia das estruturas nos afloramentos.

Uma das etapas mais importantes do tratamento dos dados é a realização da eliminação de ruídos e o alinhamento de todos os conjuntos de nuvens, para gerar um único arquivo XYZ para todo o arquipélago (Figura 4).

São considerados ruídos todos os pontos e/ou planos presentes nas nuvens que não representam a superfície da rocha. Após fundir os fragmentos, a nuvem de pontos completa do

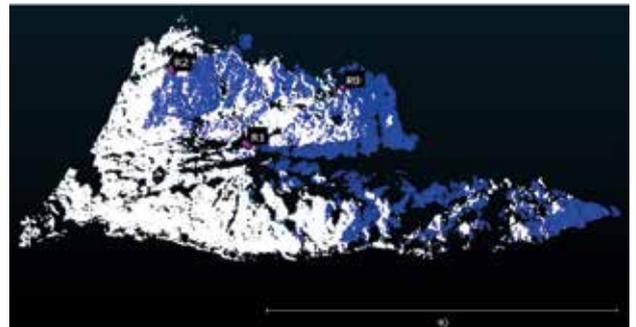


Figura 4. Alinhamento dos fragmentos provenientes das diferentes visadas da ilha Belmonte. R0;R1;R2, representam pontos em comum nas duas nuvens que foram utilizados para alinhá-las.

Figure 4. Fragment alignments from the different visions of the Belmonte islet. R0, R1, R2, represent points in common in the two clouds that were used to align them.

ASPSP pôde ser georreferenciada, utilizando-se das coordenadas obtidas com o GPS. A partir deste momento, a nuvem está pronta para servir de base para modelos digitais tridimensionais de alta resolução. Não obstante, devido aos afloramentos do ASPSP serem rugosos e irregulares optou-se por gerar planos com no mínimo 1200 pontos com a finalidade de extrair a tendência geral, diminuindo o ruído nos dados. Tendo em vista que a nuvem de apenas uma das ilhas possui

milhões de pontos, considerou-se 1200 pontos o valor mínimo para gerar um plano. Valor este que demonstrou ser consistente, gerando planos suficientes sobre a nuvem, a ponto de contemplar suas heterogeneidades (e.g.: diaclasamentos, falhas abertas, e diferentes diques intrusivos) como se pode observar na Figura 5.

Contudo, não foi possível gerar um levantamento que fosse totalmente livre de planos considerados ruidos. Entretanto, foi possível identificar quais planos foram posicionados erroneamente e excluídos da base de dados. Esta etapa foi

realizada observando a nuvem de pontos em conjunto com os planos gerados e classificados por orientação, bem como comparando com fotos dos afloramentos. Isto definiu quais planos foram plotados no diagrama de rosetas, que serviu de base para as interpretações sobre as tendências estruturais destas rochas.

Entretanto, o imageamento não mapeou os afloramentos por completo devido a limitações da linha de visão do equipamento como ilustra a Figura 5a, observou-se no modelo gerado, zonas de sombras sem informação (Figura 5b).

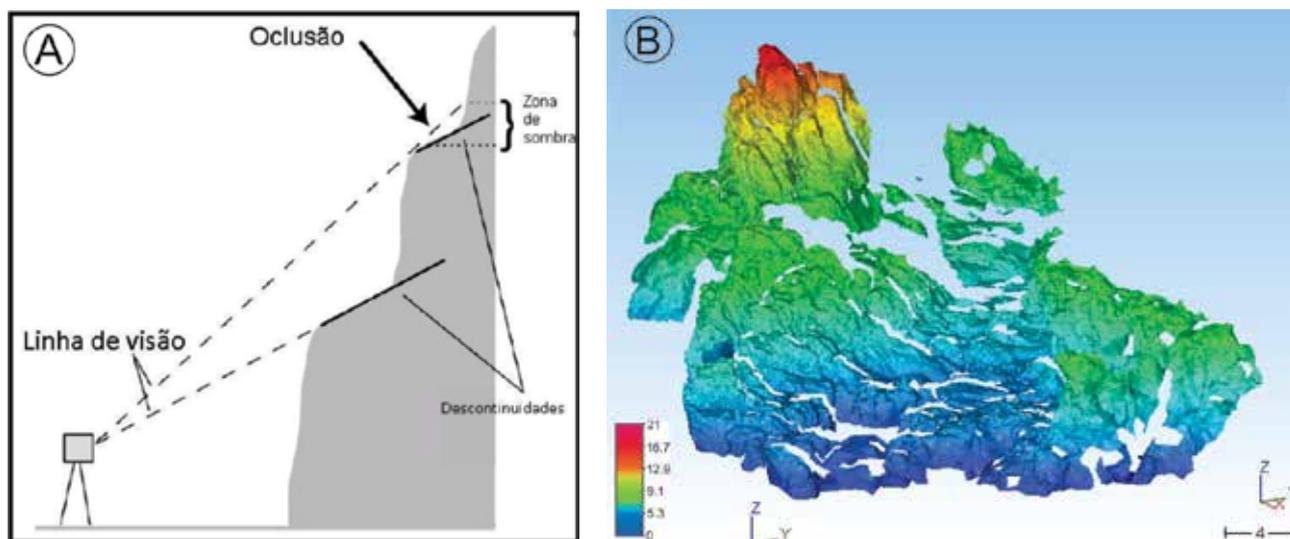


Figura 5. a) Ilustração das limitações do método LIDAR (apud Sturzenegger e Stead, 2009), b) Modelo digital mostrando as descontinuidades geradas em função das oclusões inerentes ao método LIDAR.

Figure 5. a) *Illustration of the LIDAR method limitations (apud Sturzenegger and Stead, 2009), b) Digital model showing the discontinuities generated due to the occlusions inherent to the LIDAR method.*

O modelo digital tridimensional do ASPSP (Figura 6), gerado pela triangulação dos pontos contidos na nuvem, permite visualização do arquipélago de diferentes perspectivas. Pode-se observar feições como as plataformas de abrasão (parte horizontal das ilhas) identificadas por Motoki *et al.* (2009), as macroestruturas das rochas (lineações e fraturas

abertas), diferenças relativas de altitude entre os diferentes blocos que contituem as ilhas, entre outras características. Modelos como estes também permitem que sejam extraídos dados precisos de área e/ou volume de rocha emersa de cada ilha que compõe o ASPSP, além de geração de cartas topográficas, de declividades e de estabilidades de taludes.

Resultados

Nuvens de pontos

A nuvem de pontos completa do ASPSP possui 10,8 milhões de pontos com resolução média de 30 mm entre pontos. A partir desta nuvem foi possível gerar o modelo digital do ASPSP bem como

a extração automatizada de planos. A nuvem de pontos completa permite analisar os afloramentos de diferentes perspectivas (Figura 6).

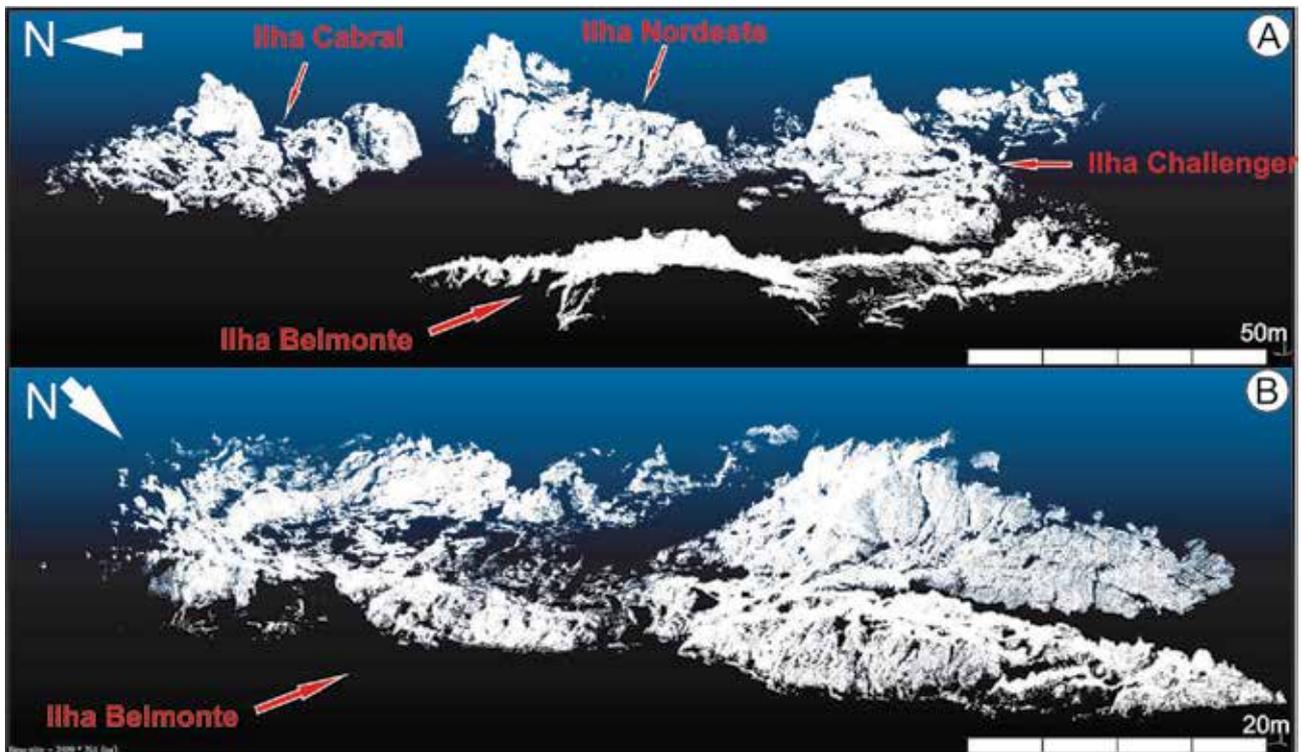


Figura 6. a) Nuvem de pontos completa do ASPSP. B) Nuvem de pontos referente à ilha Belmonte, maior ilha do ASPSP.
Figure 6. a) Complete point cloud from SPSPA. B) The Belmonte island Cloud points to, the largest island of the SPSPA.

Modelo digital tridimensional

O modelo digital 3D dos afloramentos pode ser observado na Figura 7. Originado de uma nuvem com resolução média de 30 mm, o que permite que sejam contemplados quase todos os detalhes morfológicos das rochas. É possível observar os padrões estruturais e erosivos, altitudes relativas entre os blocos de rochas que constituem as ilhas, além das irregularidades, rugosidades e heterogeneidades das rochas.

Cartas Topográficas

A partir do modelo digital 3D também foi possível gerar uma carta topográfica (Figura 8) com curvas de nível de alto detalhe, com espaçamento entre curvas que pode ser reduzido até milímetros. Na Figura 8a, optou-se por um intervalo de 1m para as curvas de níveis.

Observando o espaçamento lateral entre curvas é possível identificar as plataformas de

abrasão marinha. Na Figura 8b apresenta-se o mapa topográfico utilizado por Motoki *et al.* (2009). Percebe-se que o mapa gerado a partir de dados LIDAR permite obter uma resolução significativamente mais detalhada.

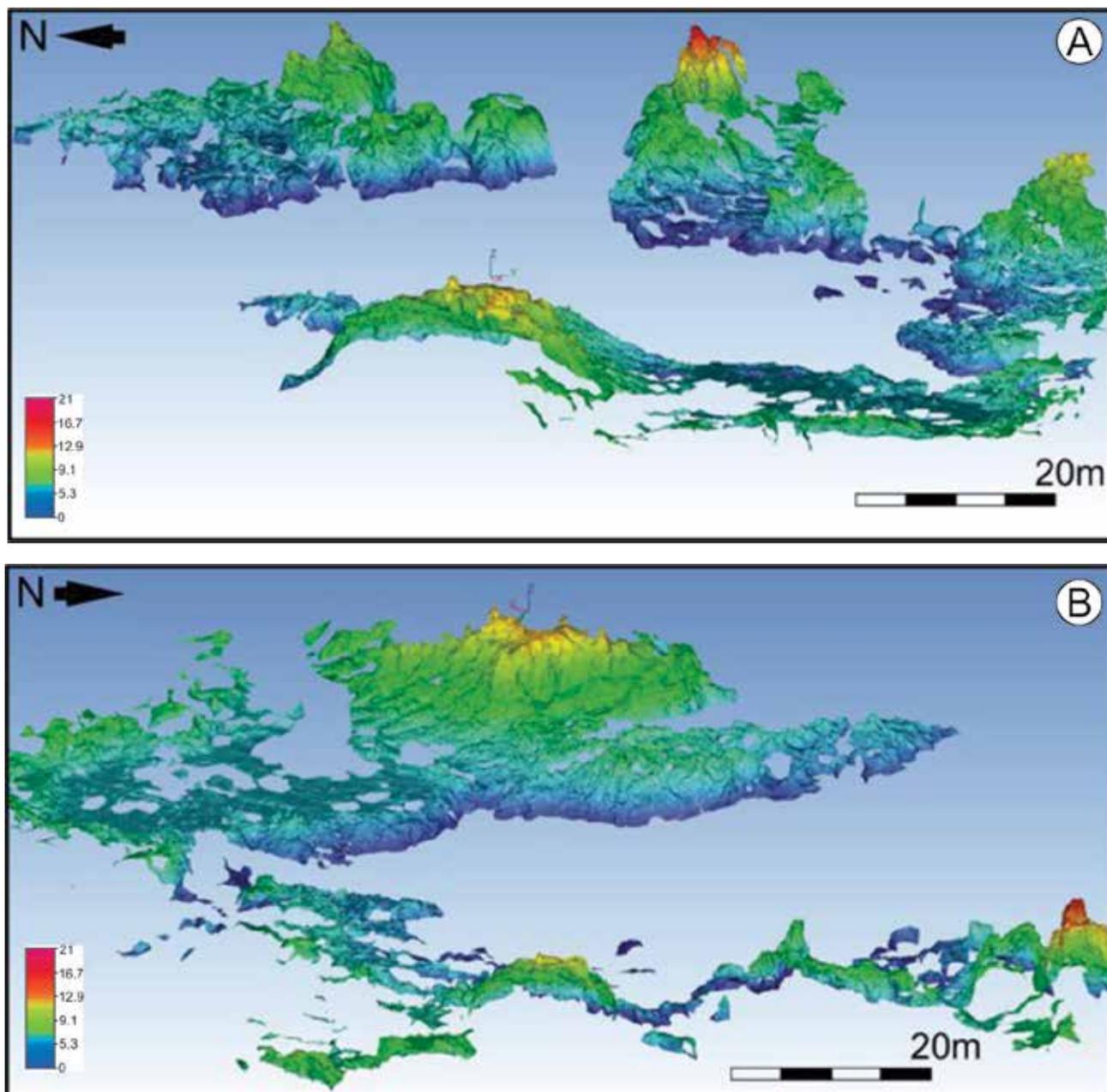


Figura 7. Modelo digital 3D do ASPPA. O modelo está classificado de acordo com a altitude: a) Visão segundo a direção Noroeste, b) Visão segundo a direção Nordeste.

Figure 7. 3D digital model of SPSPA. This model is classified according to altitude: a) Vision according to North-West direction, b) Vision according to North-East direction.

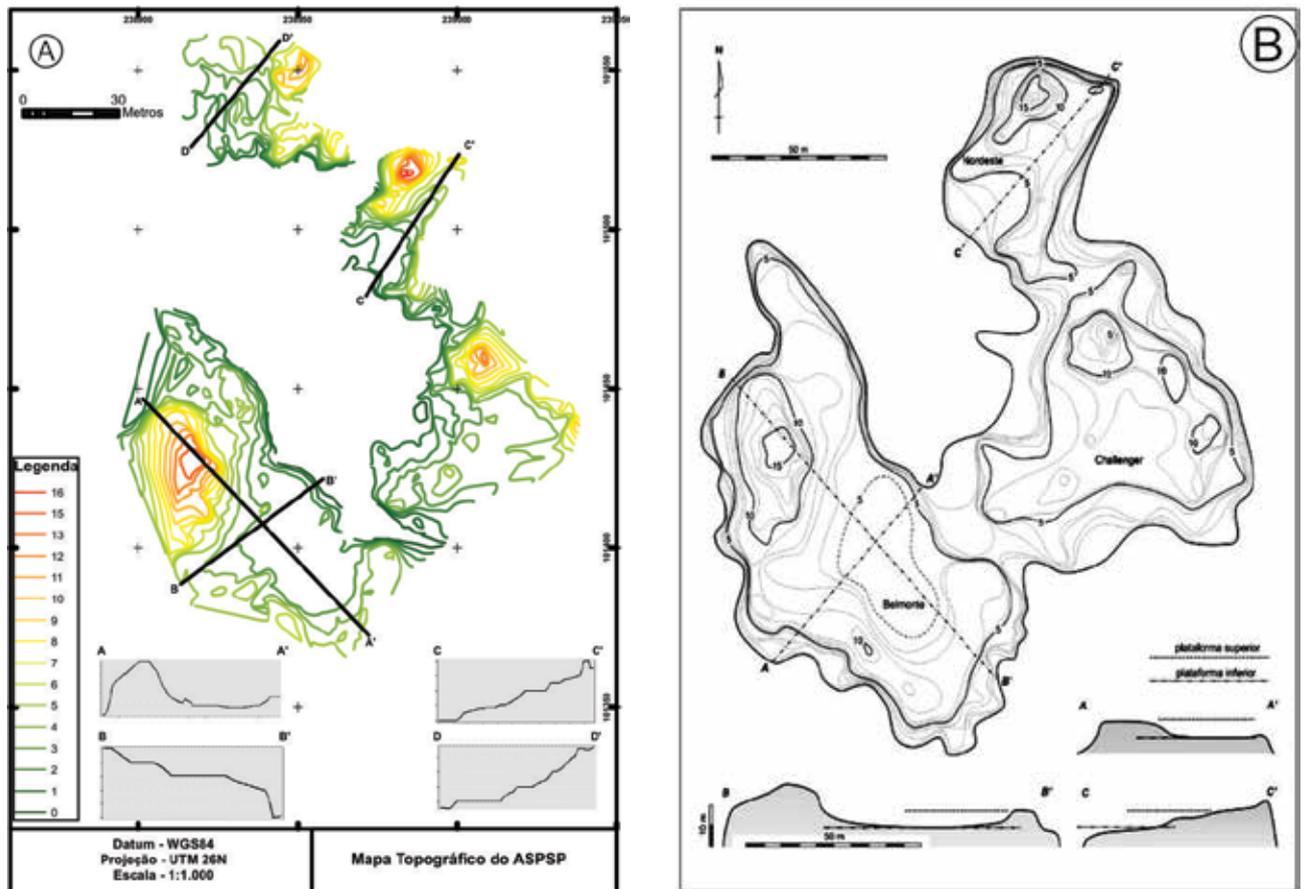


Figura 8. a) Mapa topográfico do ASPSP com intervalo entre as curvas de níveis de 1m, com base no levantamento com a metodologia LIDAR, b) Mapa topográfico do ASPSP com intervalo entre as curvas de níveis de 10 m, segundo Motoki *et al.* (2009) com base no mapa topográfico de Moraes *et al.* (1997).

Figure 8. a) SPSPA Topographic map with interval between curves of 1m levels, based on the LIDAR survey, b) SPSPA Topographic map with interval between curves of 10 m levels, according to Motoki *et al.* (2009) and based on the topographic map of Moraes *et al.* (1997).

Macroestruturas

A extração automática de planos gerou um banco de dados de orientações das estruturas planares amostradas nas nuvens (Figura 9) e estas classificadas de acordo com a direção, como exemplificado na Figura 9a. As orientações obtidas foram plotadas em diagramas de rosetas mostrando as tendências para cada grande ilha do ASPSP. Analisando cada ilha individualmente foi possível identificar diferenças entre as mesmas com demonstram os diagramas na Figura 9b.

Como é possível observar nos diagramas, existe uma direção preferencial aproximadamente N-S em todas as ilhas. Também é possível identificar similaridades entre os diagramas da ilha elmonte e ilha Nordeste, as quais apresentam dados que indicam tendências preferenciais E-W e NW-SE, estas últimas em menor frequência. As ilhas Cabral e Challenger apresentam semelhança entre si devida ausência de dados expressivos na direção E-W.

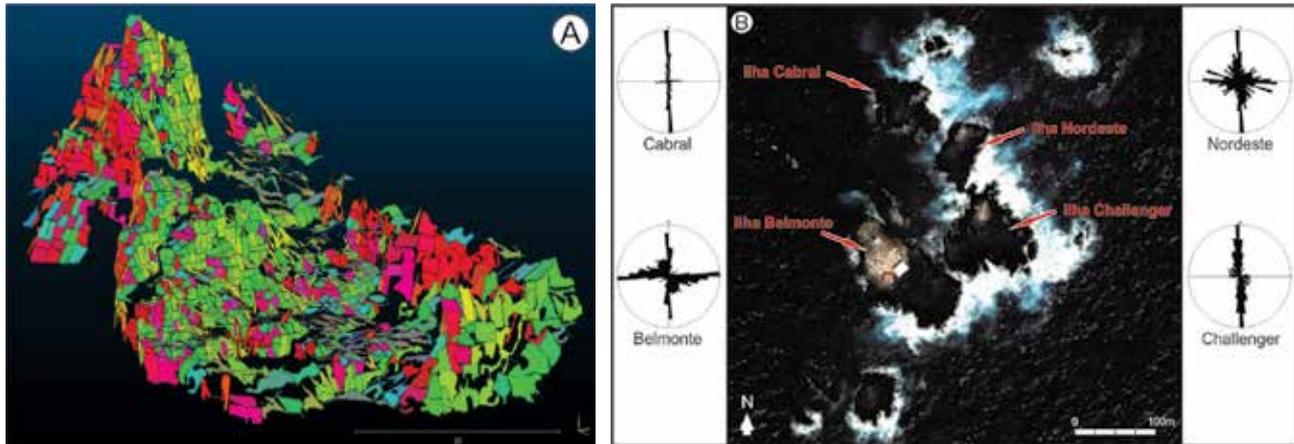


Figura 9. a) Exemplo da amostragem automática de planos na Ilha Nordeste. As cores estão classificadas de acordo com sua orientação. As cores esverdeadas representam os planos com face voltada para Sul. As cores avermelhadas representam os planos com face voltada para Oeste, b) Diagramas de rosetas correspondentes a cada ilha. Percebe-se que as ilhas que possuem semelhança estrutural estão localizadas opostamente (imagem QuickBird, resolução de 1m).

Figure 9. a) Example of automatic sampling of plans in the Northeast Island. Colors are graded according to your orientation. The greenish colors represent the planes facing south. The reddish colors represent the planes facing west, b) Roses Diagram from each island respectively. It is noticed that the islands that have structural similarity are located opposite (image QuickBird, 1m resolution).

Discussão

Os afloramentos rochosos do ASPSP apresentam relevo acidentado e estruturas topográficas irregulares em função de sua evolução geotectônica, somando-se a abrasão marinha ocorrida durante o soerguimento. Sendo que as irregularidades condicionadas pela evolução tectônica são observadas nas macroestruturas e as rugosidades existentes também podem ser atribuídas à abrasão marinha. Isso acarretou em limitações quanto ao imageamento dos afloramentos em sua totalidade, gerando sombras sem informação nos locais onde ocorre oclusão (Figura 7). Entretanto, a técnica LIDAR foi capaz de mapear os afloramentos do ASPSP com resolução média de 30 mm, significativamente mais detalhado se comparado à carta topográfica usada por Motoki *et al.* (2009) com resolução métrica. Foram obtidos modelos georreferenciados de afloramento com nível de detalhe similar para todo o arquipélago, mesmo em locais onde o acesso não foi possível

por razões de segurança e/ou logística, (e.g. Ilha Nordeste). Apenas nos entornos do arquipélago o modelo ficou incompleto, por não haver locais de onde pudessem ser feitas estações com as visadas necessárias, conforme mostra a Figura 7. Tratando-se de um equipamento terrestre há necessidade de base estável para realizar o imageamento, esta limitação pode ser contornada com a utilização de instrumentos similares aerotransportados. Apesar de não identificadas todas as orientações relatadas na literatura, a extração automatizada de planos nas nuvens de pontos permitiu verificar tendências nas orientações estruturais das rochas. Na literatura disponível, as orientações encontradas são valores médios para todo o arquipélago (NNW-SE e mais raramente NNE-SW), sem especificações sobre cada ilha que o compõe (SICHEL *et al.*, 2012). As nuvens obtidas permitiram realizar análise detalhada de cada uma das quatro grandes ilhas do ASPSP (Figura 9). Observando os diagramas de rosetas de cada

ilha (Figura 9), notaram-se diferenças significativas entre suas orientações, apesar da direção N-S estar presente em todas elas. A partir das diferenças e similaridades nas estruturas, as quatro maiores ilhas foram divididas em dois grupos: Ilhas Belmonte e Nordeste e Ilhas Cabral e Sudeste (Challenger). A existência de dois grupos estruturais sugere um controle estrutural semelhante na formação das ilhas que integram cada grupo. Na literatura as orientações NNW-SSE são atribuídas à foliação milonítica e ao sistema de diaclasamento, gerada em condições dúcteis-rúpteis em função do cisalhamento na falha transformante que a morfologia geral do arquipélago é condicionada principalmente pelo sistema de diaclasamento. Portanto, a predominância N-S observada nos nossos dados sugere que essa direção esta associada a movimentos de blocos dos depósitos de vertentes (rock-slide). Já as orientações NW-SE e E-W, observadas apenas nas Ilhas Belmonte e Nordeste, são atribuídas a fraturas tectônicas decorrentes das pressões sofridas durante o soerguimento (SICHEL *et al.*, 2012). Sendo as orientações NW-SE e E-W a principal diferença entre os dois grupos de ilhas, entende-se que o evento que resultou na diferenciação das mesmas foi o soerguimento, concomitantemente a movimentação dos depósitos de vertentes assoada aos abalos sísmicos e ações das vargas.

Considerando os eventos transpressivos, sistemas de fraturas conjugadas de direções E-W e NW-SE são consistentes se comparado às direções dos esforços citados pela literatura (SICHEL *et al.*, 2012). Desta forma, a diferença observada nas macroestruturas dos grupos, pode ser atribuída a possibilidade de um sistema de fraturas conjugadas de direção aproximada E-W e NW-SE estar diretamente relacionado com a formação dos mesmos. Corroborando esta interpretação, observa-se o fato de que as ilhas que apresentam semelhança estrutural estão situadas em posições opostas diagonalmente, como ilustrado na Figura 9.

Conclusão

O levantamento topográfico através da tecnologia LIDAR-LST permitiu gerar o modelo digital do afloramento (MDA) do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP). O MDA obtido por este projeto é capaz de subsidiar diversos focos de pesquisa que ocorra no ASPSP. Pois ele contempla a morfologia das rochas em quase toda sua totalidade, o que torna mais refinado qualquer trabalho que dependa destes tipos de dados (e.g. Soerguimento do ASPSP (MOTOKI *et al.*, 2009, CAMPOS *et al.*, 2010)); paleogeomorfologia dos ASPSP (SICHEL *et al.*, 2012, Campos *et al.*, 2010). Contudo o MDA gerado ficou incompleto em função do LST não fornecer informações sobre o entorno do arquipélago, já que trata-se de um equipamento terrestre, que necessita de estabilidade, ficando limitado a visadas de uma ilha para a outra e das condições de mar, também foram observadas limitações na obtenção de dados devido a existência de oclusões nas visadas devido a irregularidade das superfícies rochosas, o que gera zonas de sombras sem informação. No entanto, a técnica LIDAR foi capaz de cartografar os afloramentos com resolução e cobertura suficiente para gerar o modelo digital de afloramento (MDA) e uma carta topográfica de todo o ASPSP, significativamente mais detalhado que cartas topográficas existentes. Considerando que estas antigas cartas topográficas representavam as únicas informações morfológicas existentes do arquipélago o MDA gerado por esse projeto é um resultado pioneiro. Além disso, constatou-se que as macroestruturas mensuradas nas nuvens de pontos contribuíram com dados estruturais passíveis de interpretação, auxiliando no entendimento da gênese das rochas. A amostragem automática de feições planares identificou estruturas com clara tendência N-S e E-W, que podem ser atribuídas respectivamente as estruturas miloníticas e as fraturas tectônicas. No entanto, a amostragem automática não foi capaz de identificar todas as orientações de estruturas que foram relatadas na bibliografia, expondo uma limitação do método. Acredita-se que isto ocorreu em função

dos afloramentos serem irregulares, o que pode ter aumentado o ruído nos dados estruturais e mascarado as tendências. Ainda assim, os dados estruturais obtidos indicam que as ilhas Belmonte e Nordeste tiveram condições diferentes de formação em relação às ilhas Cabral e Sudeste (Challenger). Infere-se que esta diferença é resultado de um sistema de fraturas conjugadas ter condicionado a formação destas ilhas, bem como pelo efeito do derrocamento dos taludes (rock-slide). Cálculos preliminares sobre a taxa de soerguimento do ASPSP através do uso da técnica Seppömen e Sekkokumen forneceu valores intermédios entre os de Motoki *et al.* (2009) e Campos *et al.* (2010), cerca de 1,7 mm por ano.

Agradecimentos

Ao CNPq, através do financiamento dos projetos inseridos no **Programa Arquipélago e Ilhas Oceânicas**, nomeadamente: "Geomorfologia Superficial do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e seu entorno: prováveis relações com o tectonismo ativo de soerguimento associado à Falha Transformante de São Paulo" (2012-2016, coordenador Thomas Ferreira da Costa Campos, Universidade Federal do Rio Grande do Norte - UFRN); "A Formação São Pedro e São Paulo: uma nova unidade Litoestratigráfica do Atlântico Equatorial Brasileiro" (2004-2006, coordenador Thomas F da C Campos, UFRN). Agradecemos ainda a Secretária Interministerial de Recursos do Mar (SECIRM) e a Base Naval de Natal pelo apoio logístico e pelo excelente convívio com os seus subordinados.

Referências Bibliográficas

CAMPOS *et al.*, **Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion.** *Marine Geology*, v. 271, p. 177-186, 2010.

CAMPOS *et al.*, **Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial.** *Geochimica Brasiliensis*, v. 17, n. 2, p. 81-90, 2003.

MORAES, J.F.S., LINDEN, E.M. e MORAES, F.A.B. **Planta topográfica do arquipélago de São Pedro e São Paulo, escala 1:500.** CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1997.

MOTOKI, A. *et al.*, **Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean.** *REM: Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 3, p. 331-342, 2009. ISSN 0370-4467.

SICHEL, S. E. *et al.*, **Origem e evolução das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial.** *Boletim de Geociencias - Petrobras* 20 (1/2), p 97-128, 2012.

Análise Qualitativa Fractal das estruturas nas Ilhas Belmonte e Challenger e sua relação com a estruturação local - Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Leonardo Mairink Barão¹
Barbara Trzaskos¹
Rodolfo José Angulo¹
Maria Cristina de Souza¹

15

Abstract

This chapter describes the fractal method used to delineate the structures of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA), observed on Belmonte and Challenger Islands. The fractal geometry was observed on multiscale context using drone imaging, photo mosaic interpretation, field data, oriented rock samples and petrography of the rock sample. Those data interpolations allow us to interpret three mainly geological structures. The most prominent structure observed was the primary structure of peridotite rocks, it is mylonitic foliation and a parallel fracture. In general, these structures have NNW-SSE direction and it is penetrative belong the island. Secondly it also observed fractures with E-W direction, sectioning the mylonitic foliation and displaying a spaced compartmentalization on observed scales in this work. The third fractal element observed was the sedimentary injections; these elements take advantage of previous structures as the mylonitic foliation and E-W fractures. All the scales in this chapter repeat this fractal arrangement and has an intimate relationship with the tectonic events affected the SPSPA.

Introdução

O Arquipélago São Pedro e São Paulo (ASPSP) dista cerca de 1.000 km a nordeste da cidade de Natal-RN, situado a aproximadamente 1° a norte da Linha do Equador (ALMEIDA, 2006). O Arquipélago é composto por 10 ilhas (Figura 1A), possuindo área total emersa de 17 km², com altitudes máximas de até 18m. Essas ilhas representam a porção emersa da cadeia submarina transversal à cordilheira mesoceânica (CAMPOS *et al.*, 2010).

A estrutura condicionante do ASPSP possui direção WSW-ENE denominada como Zona de Fratura São Paulo (ZFSP) (Figura 1B). Esta zona de fratura possui cerca de 120 km largura, se estendendo no Oceano Atlântico desde a Dorsal Meso Atlântica até próximo à região continental brasileira (ALMEIDA, 2006).

O ASPSP é formado por rochas texturalmente muito finas e isotrópicas, de cor cinza escuro, aflorantes na porção noroeste da Ilha Belmonte (Figura 2), que corresponde a peridotito milonitizado (MELSON *et al.*, 1967). Já ao sudeste da Ilha Belmonte e no restante das ilhas ocorre o predomínio de rocha heterogênea, de granulação fina, cor variada e intensamente fraturada. Essa rocha trata-se do peridotito milonitizado e serpentinizado devido à ação de fluídos hidrotermais ao longo de microfraturas (CAMPOS *et al.*, 2003).

A heterogeneidade nessa rocha se deve a interação entre as tramas não serpentinizada e serpentinizada, desenvolvida a partir do fraturamento que causa o “consumo” da fase milonítica anteriormente formada, apesar dessas tramas miloníticas estarem em grande parte obliteradas pelos processos de serpentinização e halmirólise (ação da água salobra) (CAMPOS *et al.*, 2010 e 2003).

1 Universidade Federal do Paraná
(leobaraogeo@gmail.com).

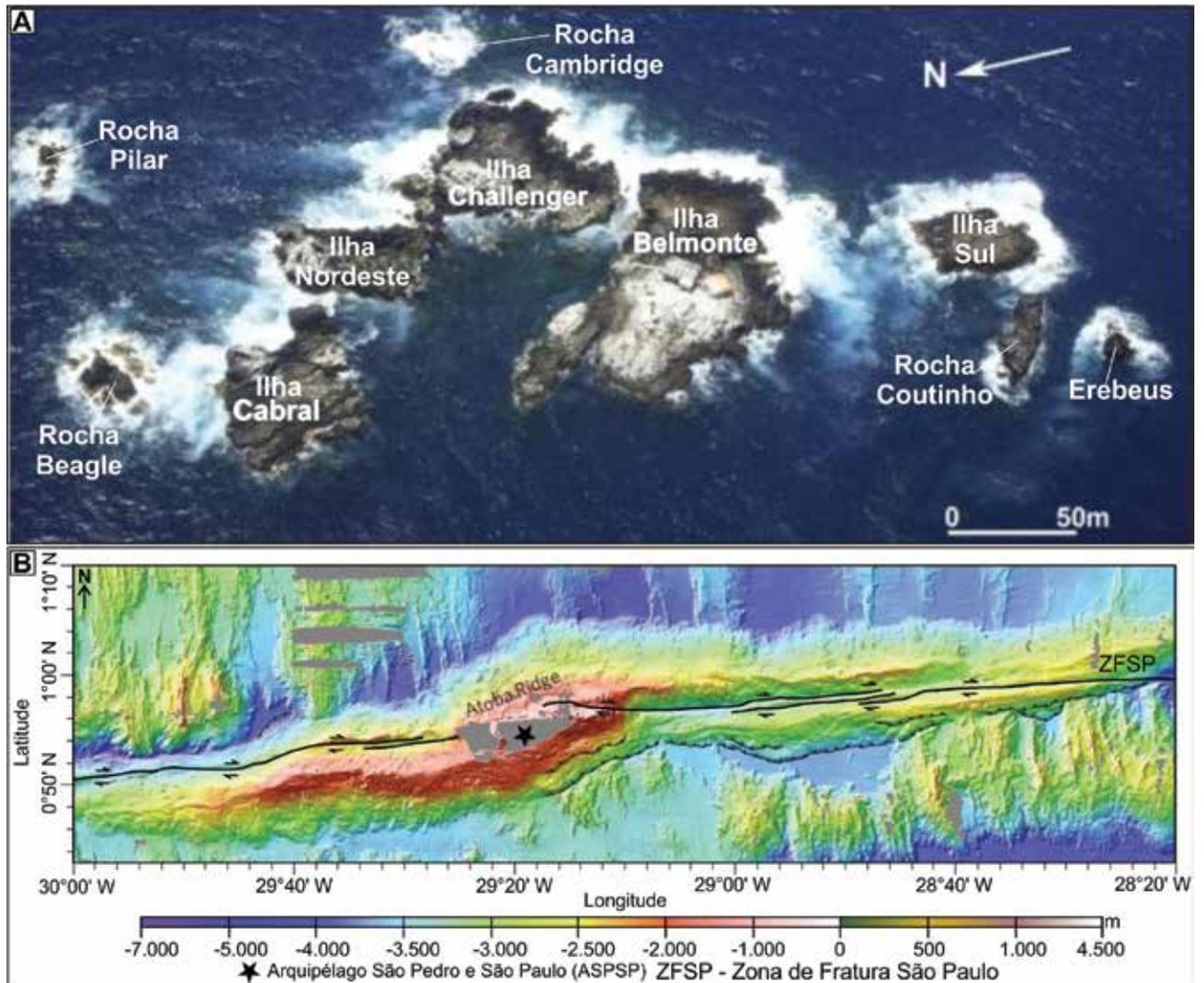


Figura 1. (A) Vista aérea do Arquipélago São Pedro e São Paulo, modificado de ANGULO *et al.* (2012); (B) Configuração tectônica do ASPSP em relação a Zona de Fratura São Paulo (ZFSP), caracterizando a forma sigmoide, modificado de MAIA *et al.* (2016).

Figure 1. (A) Aerial view of Saint Peter and Saint Paul Archipelago, modified of ANGULO *et al.* (2012); (B) tectonic configuration of SPSPA with relation with Saint Paul Fracture Zone (SPFZ), characterizing the sigmoidal, modified of MAIA *et al.* (2016).

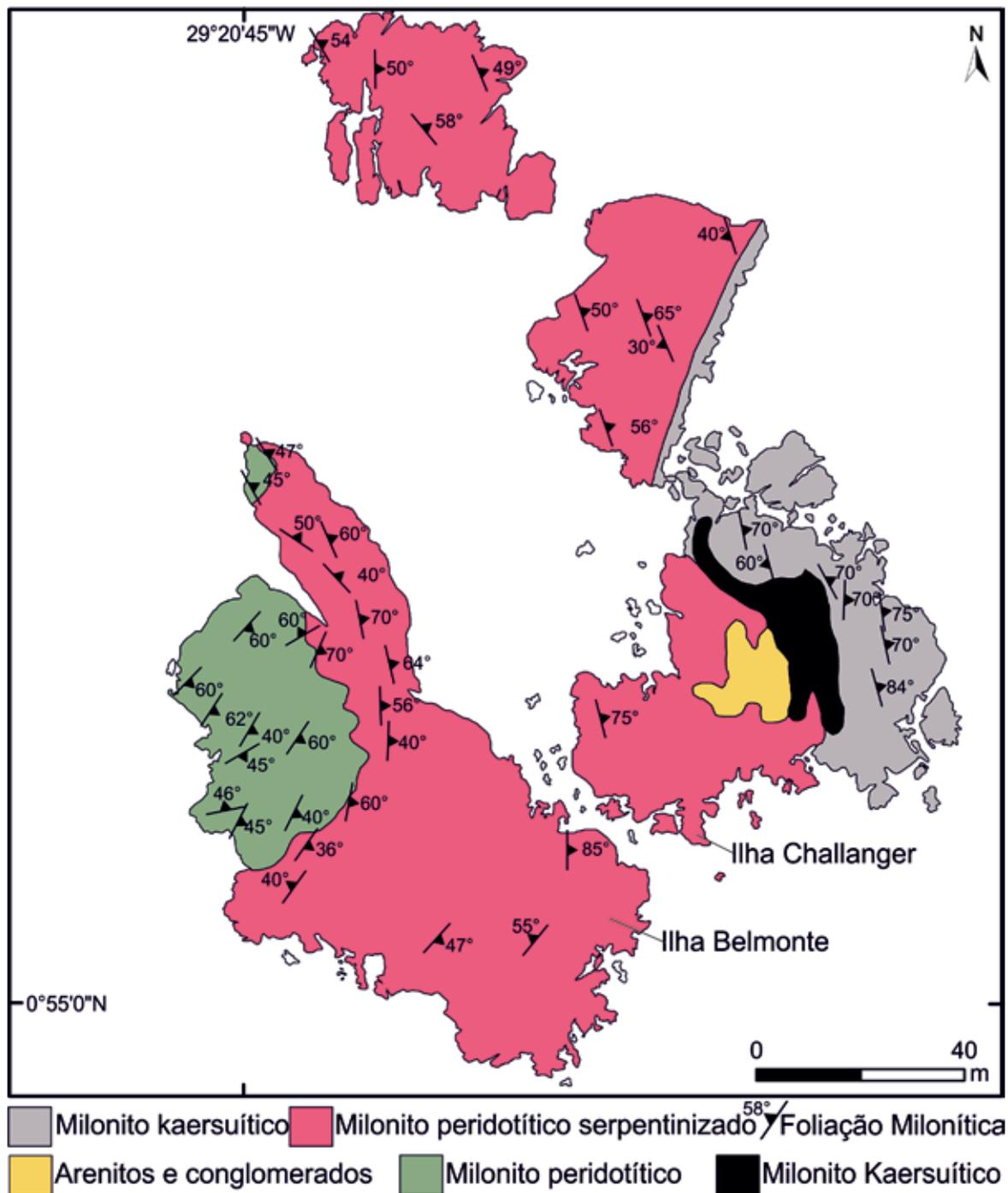


Figura 2. Mapa geológico das principais ilhas do ASPSP, com a indicação das estruturas observadas por Simões *et al.* 2009. Modificado de Campos *et al.* (2010).

Figure 2. Geological map of the main islands of the SPSPA, with structures indications defined by SIMÕES *et al.* (2009). Modified of Campos *et al.* (2010).

A paragênese dessas rochas é de natureza mantélica, evidenciada por porfiroclastos de olivina, piroxênio, anfibólios e espinélios. Os cristais estão fortemente fraturados, fragmentados e envoltos por matriz fina a muito fina (CAMPOS *et al.*, 2003).

Sobre as rochas peridotíticas da Ilha Challenger ocorrem conglomerados e arenitos quaternários (CAMPOS *et al.*, 2002) compostos por clastos líticos e biogênicos, definidos como Formação São Pedro e São Paulo (CAMPOS *et al.*, 2002). Essas rochas teriam sido depositadas aproveitando as zonas de fraqueza de direção NW existentes no peridotito (CAMPOS *et al.*, 2002, 2003).

Segundo aspectos estruturais, os peridotitos estão intensamente cisalhados em estado dúctil, sendo genericamente classificados como ultramilonitos (SIMÕES, *et al.*, 2009). Essas rochas passaram por intensa recristalização associado a deformação plástica (SIMÕES, *et al.*, 2009). A foliação milonítica, detalhada por diversos autores (e.g. MELSON *et al.*, 1972; SIMÕES *et al.*, 2009; SICHEL *et al.*, 2012), apresenta direção entre N10-30W e N20-30E (Figura 2), que é discordante da direção da Zona Transformante São Pedro e São Paulo, e pode estar associada ao padrão sigmoide observado por HEKINIAN *et al.* (2000).

Materiais e Métodos

A fim de definir o arcabouço estrutural e o padrão de estruturação do arquipélago, principalmente das ilhas Belmonte e Challenger, foi realizado o levantamento de imagens a partir de aerolevanteamento de drone e análise de afloramentos, amostras de mão e lâminas petrográficas. Utilizando-se da análise fractal das estruturas foi possível comparar dos padrões estruturais em diferentes escalas de imageamento.

O conceito fractal foi proposto matemático MANDELBROT (1967), se referindo ao adjetivo

fractus, que significa fraturar ou quebrar em fragmentos irregulares. A principal propriedade do fractal é a auto-semelhança, ou seja, a semelhança da estrutura observada independente da escala de observação (GIOVELI, 2010).

A Curva de Hilbert (Figura 3) exemplifica a repetição fractal, criada pelo matemático David Hilbert (1891, *apud* TURCOTTE, 1992), a fim de esboçar a auto-repetição das estruturas reduzidas pela metade do próprio fractal, sendo que mesmo ampliada a estrutura não perde a quantidade de detalhes observados, podendo ser repetida infinitamente.

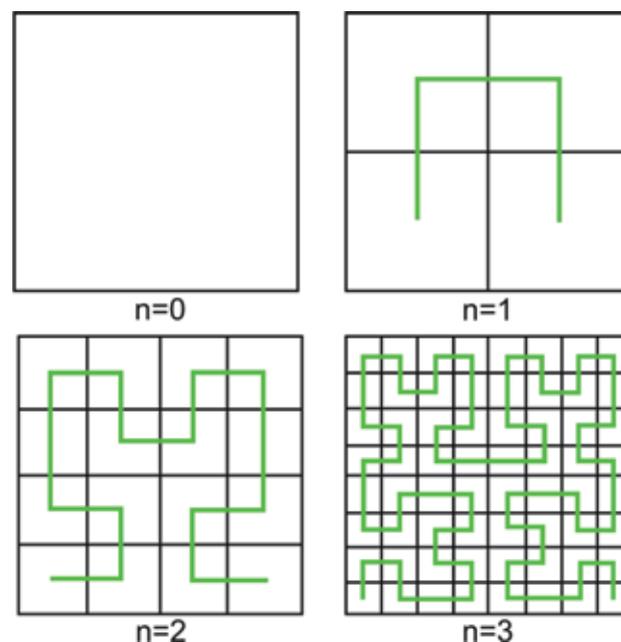


Figura 3. Curva de Hilbert idealizada para esboçar a geometria fractal das estruturas em diferentes escalas sem perda de detalhe ou geometria em cada um de seus quadrantes. Modificado de HILBERT (1891).

Figure 3. The Hilbert Curve idealized to sketch the fractal geometry of structures in different scales, without losing the detail or geometry in each of the quadrants. Modified of HILBERT (1891).

Segundo TURCOTTE (1992), em geologia, a frequência de repetição desses fenômenos fractais é observável na geometria de falhas, na distribuição de fragmentos rochosos, na magnitude de eventos sísmicos, em levantamentos geofísicos e em

depósitos minerais. Seguindo o conceito fractal, se buscou a análise multiescala por imageamento de drone (escala 1:50 – Figura 4), mosaico fotográfico com a composição de cerca de 12 fotos (escala 1:20 – Figura 5), seguido dos levantamentos de campo, petrografia macroscópica (amostras de mão) e microscópica (lâmina petrográfica). Desta maneira foi possível verificar o arranjo fractal qualitativo das estruturas tectônicas (falhas e juntas), bem como a distribuição espacial das estruturas, sua geometria e a estruturação das rochas.

Resultados

Interpretação estrutural na escala 1:50

Na escala 1:50, observável na imagem de drone das ilhas Belmonte e Challenger (Figura 4A), observa-se a forte estruturação das rochas nas duas ilhas. Em geral ela está orientada na direção NNW-SSE e é definida pela maior frequência de lineamentos (Figura 4B). Na porção a leste da Ilha Belmonte os lineamentos possuem maior penetrabilidade, quando comparado a outras porções das ilhas. Na Ilha Challenger o padrão estrutural possui direção preferencial NNE-SSW (Figura 4B), que pode estar relacionado tanto a movimentos tectônicos quanto a distorções na imagem capturada.

Nesta escala os lineamentos de direção E-W são mais espaçados e com maior comprimento quando comparado a elementos de direção

NNE-SSW (Figura 4B). Os lineamentos de direção E-W seccionam a principal estruturação da Ilha Belmonte, o que sugere que foram geradas posteriormente. Esta direção parece ter condicionado a deposição dos arenitos carbonáticos que preenchem estruturas nas ilhas Belmonte e Challenger (Figura 4B). Próximo à estação científica, esses corpos de arenitos carbonáticos possuem direção similar aos lineamentos traçados na região (Figura 4), já a oeste e a leste da ilha Belmonte a orientação está relacionada a estruturação E-W. A fim de buscar o arranjo fractal das estruturas observadas em menor escala foi construído o foto mosaico da Figura 6.

Análise de feições em afloramento rochoso na escala 1:20

As feições na escala 1:20 evidenciam a orientação estrutural semelhante à escala 1:50 (Figuras 4 e 5). Os lineamentos de direção NNW-SSE com espaçamento de 1 a 10cm, predominam e correspondem, possivelmente, a foliação milonítica e a orientação de fragmentos rochosos existentes nas rochas peridotíticas da Ilha Belmonte. Secundariamente são observados lineamentos de direção E-W, que correspondem a fraturas descritas por SICHEL *et al.* (2012).

Na parte central e a norte do mosaico fotográfico (Figura 5) destacam-se as fraturas preenchidas com sedimentos, com forma irregular e sinuosa, que preenchem planos de fraqueza pré-existentes nos peridotitos. rochas da Fm. São Pedro e São Paulo.

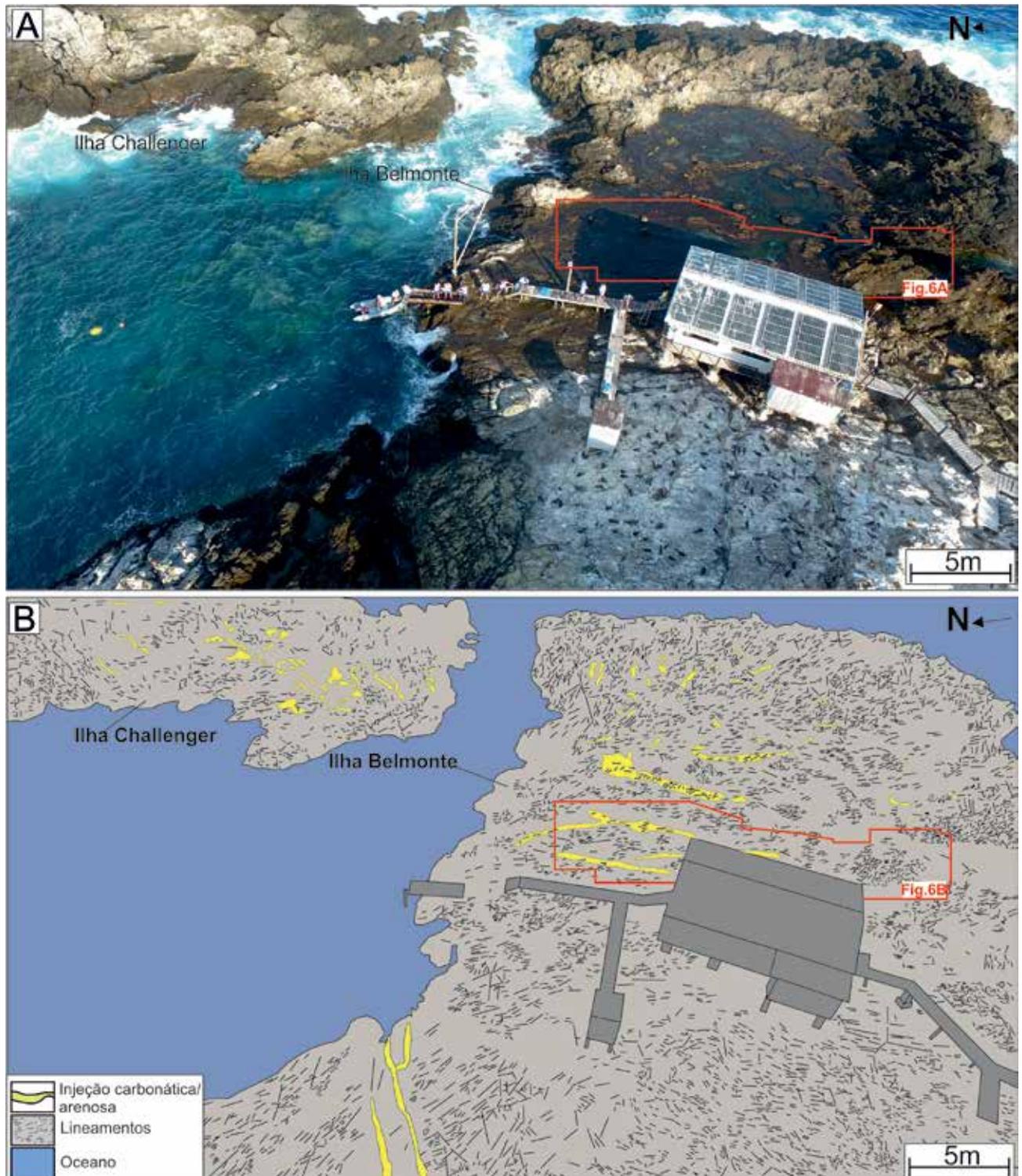


Figura 4. (A) Imagem dos setores sudeste das ilhas Belmonte e Challenger capturada por drone em aerolevantamento; (B) Interpretação do aerolevantamento com a identificação das principais estruturas. Imagem cedida pelo Prof. Jorge Lins.

Figure 4. (A) Image captured by drone in aero survey, (B) Interpreted drone image, identifying the main structures of the Belmonte and Challenger islands. Image provided by Prof. Jorge Lins.

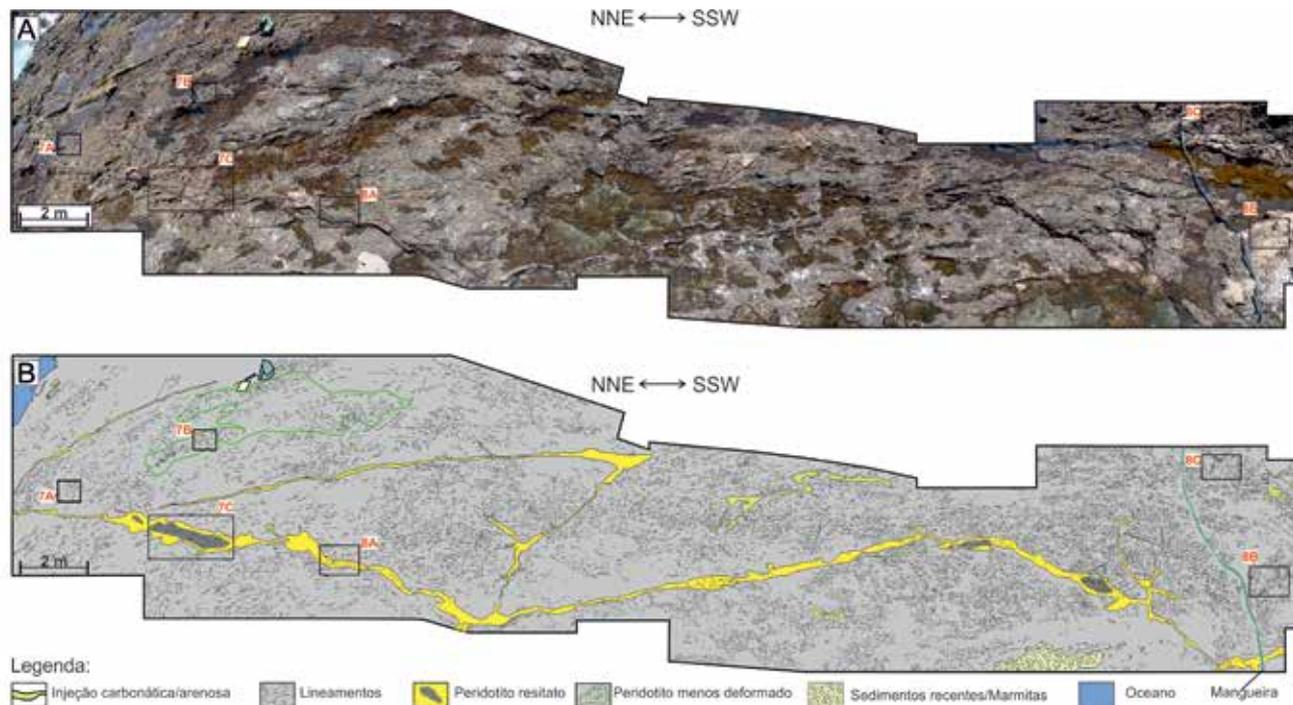


Figura 5. (A) Fotomosaico construído com doze fotos da porção leste da Ilha Belmonte, (B) Feições lineares interpretadas a partir do fotomosaico.

Figure 5. a) Photomosaic composed by twelve photos, b) Linear features interpreted from photomosaic.

Os arenitos englobam fragmentos de rocha e estão alocadas em fraturas, tendo sido descritos em trabalhos anteriores (CAMPOS *et al.*, 2009). A geometria fractal das estruturas em foto mosaico é observada, em escala de afloramento, com padrão similar à escala de detalhe (Figura 6).

À medida que se amplia a escala de trabalho as relações entre as estruturas se torna mais clara e pode ser melhor compreendida. As feições de maior destaque no afloramento, de direção NNW-SSE, são, por vezes, planos descontínuos e de alta penetratividade (Figura 6A, B e 7A), que correspondem a intercalação entre o milonito peridotítico e o ultramilonito.

Ampliando a escala de trabalho, principalmente nas fraturas preenchidas por arenitos (Figuras 6C, 7A e 7B), observa-se o padrão sinuoso (Figuras 6C e 7B), que alguns casos correspondem a fragmentos de peridotitos circundados por arenito (Figura 6C).

As variações entre as bandas de milonito peridotítico e o ultramilonito peridotítico possuem intercalações entre 1 e 5cm, semelhante ao padrão fractal observado em foto mosaico. A trama estrutural, gerada entre as duas foliações anastomosadas (Figura 7C), confere padrão sinuoso e descontínuo. A estruturação principal, de direção NNW-SSE, é seccionada por fraturas contínuas de direção E-W, que possuem maior espaçamento quando comparado à estruturação primária (Figuras 6A, 7B, 7C), com deslocamentos de até 1cm na foliação milonítica (Figura 7C). Os corpos de arenitos carbonáticos possuem ângulos de mergulho entre 40° e 85°. Quando têm ângulos entre 40° a 60°, tendem a possuir direção semelhante a trama milonítica (NNW-SSE) (Figura 6C), entretanto, quando subverticais, parecem estar associadas as fraturas de direção E-W (Figura 7B).

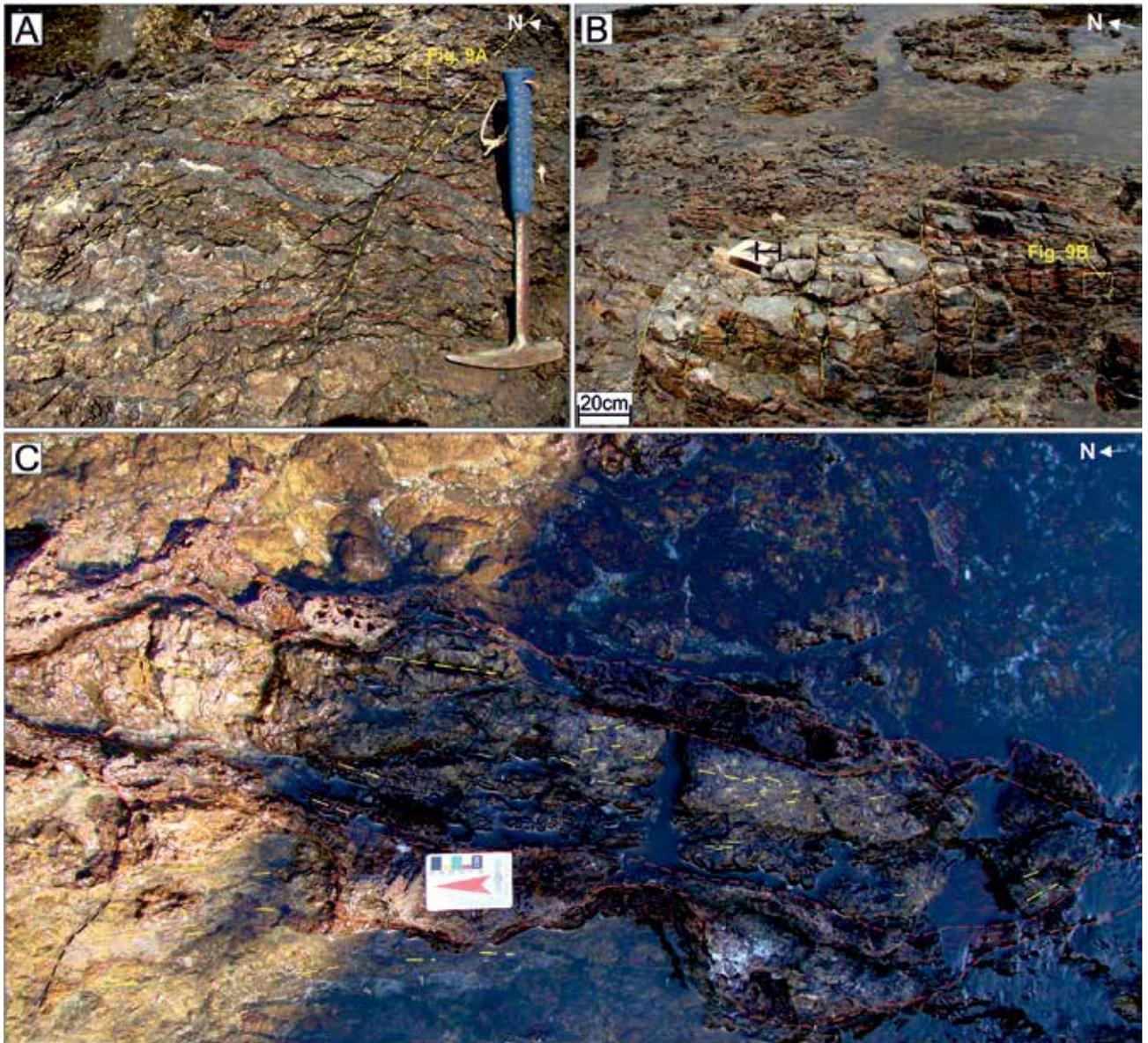


Figura 6. (A) e (B) intercalação de milonito peridotítico (castanho) e ultramilonitos (cinza escuro) que marca a estruturação preferencial, bem definida e destacada pela cor vermelha, (C) rocha peridotítica contornada por injeção sedimentar.

Figure 6. (A) and (B) well marked structural trend highlights by red color, (C) peridotite rock bypassed by carbonate injection.

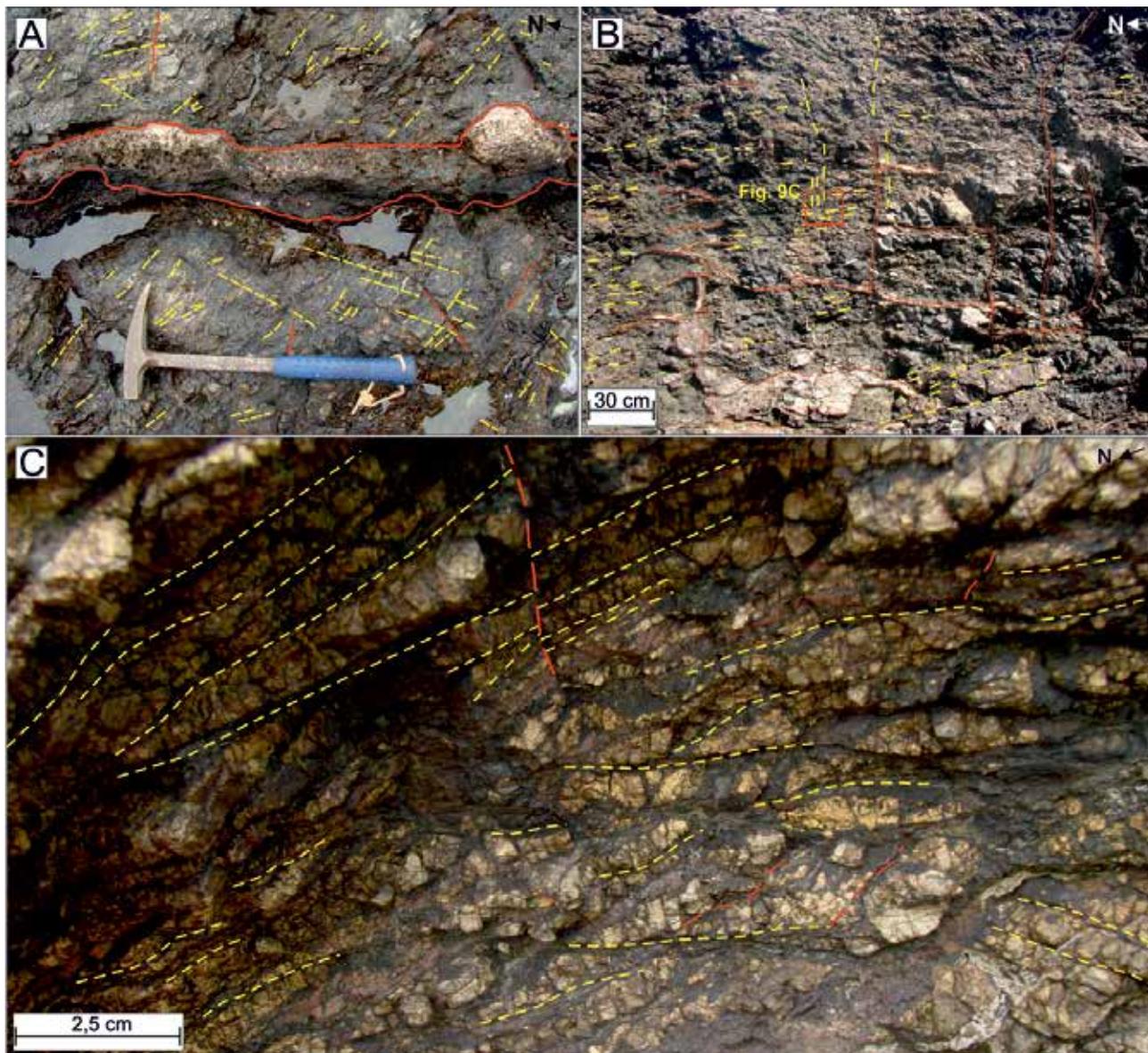


Figura 7. (A) e (B) venulações e injeções carbonáticas em meio a estrutura de direção NNW-SSE, (C) Padrão anastomosado de peridotito milonítico com trama rica em serpentina (material cinza escuro).

Figure 7. (A) and (B) carbonate injections and veins, between structures with NNW-SSE direction, (C) Anastomosed pattern of mylonitic peridotite with the serpentine-rich fabric.

Análise meso e microestrutural

Em meso escala, nas amostras de mão, o padrão é semelhante ao verificado em escalas de menor detalhe, ou seja, seguem o princípio fractal (Figura 8). Em geral verifica-se forte orientação, marcada pela intercalação de bandas de cor cinza escuro esverdeada e amarela, com padrão anastomosado (Figura 8A). Em algumas zonas observa-se o padrão lenticular da trama milonítica e serpentínica (Figura 8B). Fraturas milimétricas são observadas seccionando as bandas, que, em alguns casos, geram microfalhas (Figura 8C) evidenciadas pelo deslocamento das bandas. O padrão de fragmentação é diferente dos anteriormente descritos em escala de afloramento, com feições retilíneas e poligonais (Figura 8C).

Em microescala, a partir da análise de lâminas petrográficas, também foi observado padrão estrutural semelhante as demais escalas (Figura 9). A existência do arranjo estrutural é evidente, onde as fraturas tendem a possuir padrão anastomosado envolvendo fragmentos de peridotitos, sendo

preenchidas por serpentina e pequenos fragmentos de minerais como olivina (Figura 9A), semelhante ao observado em escala de afloramento (Figura 7C) e amostras de mão (Figura 8). Nesta escala podem ser distinguidos três padrões estruturais diferentes. A feição primária corresponde à foliação milonítica, comum nas rochas peridotíticas do ASPSP, que apresenta como característica alta penetratividade e granulação fina (Figura 9b) contornando os porfiroclastos de olivina, cristalizados antes da foliação.

A segunda feição trata de fraturas subparalelas a foliação milonítica e preenchidas por serpentina (Figura 9B). O terceiro padrão observável são as fraturas que seccionam as duas primeiras feições e conferem o padrão anastomosado à rocha (Figura 9B). A disposição geométrica semelhante pode também ser observada nas escalas 1:20, de afloramento (Figuras 6 e 7) e amostras de mão (Figura 8).

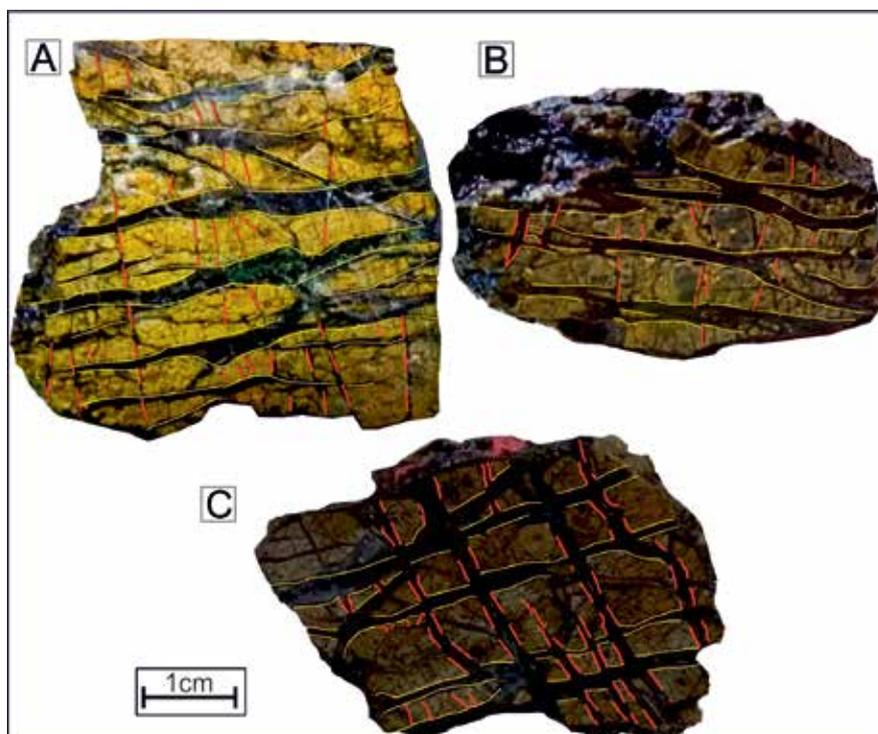


Figura 8. Amostras com mesma geometria fractal observada em outras escalas. (A) e (B) padrão anastomosado seccionado por microfaturas, (C) geometria retilínea causada por microfaturas preenchidas por serpentina.

Figure 8. Samples with the same fractal geometry observed in another scales. (A) and (B) anastomosed feature sectioned by microfractures, (C) rectilinear geometry caused by microfractures filled by serpentine.

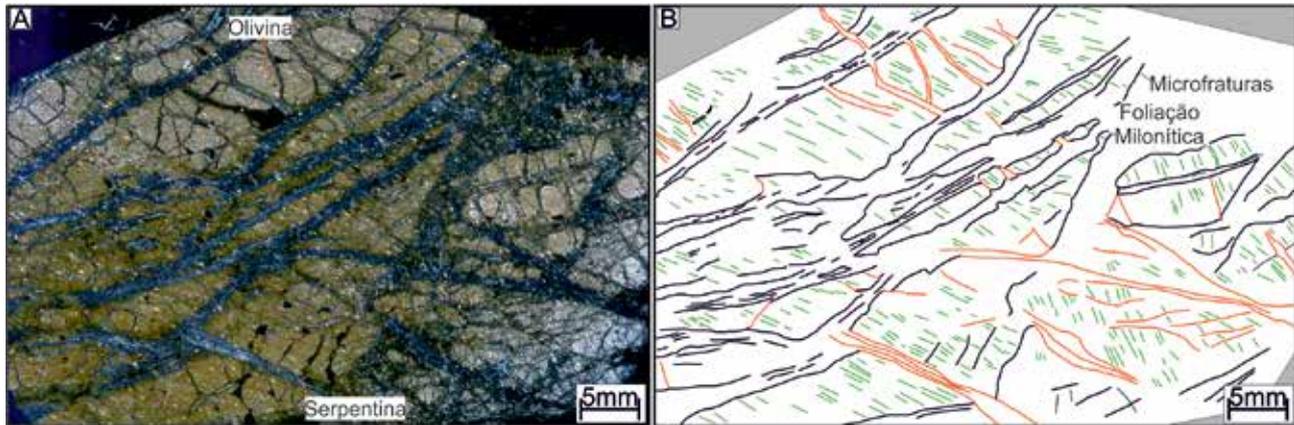


Figura 9. (A) Fotomicrografia de peridotito milonítico serpentinizado sob luz polarizada, (B) interpretação da seção petrográfica, destaca-se a foliação milonítica dos peridotitos (verde) e microfaturas preenchidas por serpentina (vermelho e preto), demonstrando padrão fractal semelhante ao observado em imagens de drone, afloramento e amostras de mão.

Figure 9. (A) photomicrography of mylonitized peridotite serpentinized under orthoscopic, (B) interpreted petrographic thin section, highlighting the mylonitic foliation in peridotites (green) and microfracture (black and red), evidencing similar pattern of fractal geometry observed in drone images, outcrops and hand samples.

Discussões e Conclusões

A técnica fractal permitiu definir a estruturação detalhada de parte das ilhas Belmonte e Challenger. O arranjo fractal observado nas diversas escalas 1:50, 1:20, afloramento, amostra de mão e petrografia (Figuras 4 a 9) mostrou a presença de três feições estruturais distintas. Em alguns afloramentos da Ilha Belmonte é possível identificar os padrões estruturais existentes e estabelecer a cronologia de nucleação, bem como esquematizá-los em blocos diagramas (Figura 10b), como definido a seguir:

(I) A estruturação melhor visualizada em imagem de drone (Figura 4) corresponde as feições de direção NNW-SSE, reflexo da foliação milonítica e do diaclasamento paralelo a essa foliação (Figura 10a). Correspondem a feições anteriormente descritas na literatura (e.g. SIMÕES *et al.*, 2009; SICHEL *et al.*, 2012) como resultado do processo formador das rochas peridotíticas e seu resfriamento, dando origem respectivamente à foliação milonítica e ao

diaclasamento paralelo a foliação milonítica. Associada a essas rochas observa-se forte serpentinização dos peridotitos, devido à ação hidrotermal (SICHEL *et al.*, 2012).

(II) O segundo elemento observado em diferentes escalas corresponde às fraturas de direção E-W (Figuras 4 a 6) que seccionam a foliação milonítica e geram fraturas contínuas e espaçadas em planta (Figuras 5 e 6), em escala de afloramento (Figuras 6 e 7) e amostra de mão (Figura 8). Essas estruturas podem corresponder localmente a pequenas falhas, caracterizadas pelo deslocamento do bandamento (Figuras 8 e 9). A existência de fraturas de direção E-W deve-se principalmente a atividade tectônica associada ao soerguimento do arquipélago, fenômeno associado a tectônica da Falha Transformante São Paulo em momentos transpressivos (SICHEL *et al.*, 2012) e por vezes transtrativos (MAIA *et al.*, 2016).

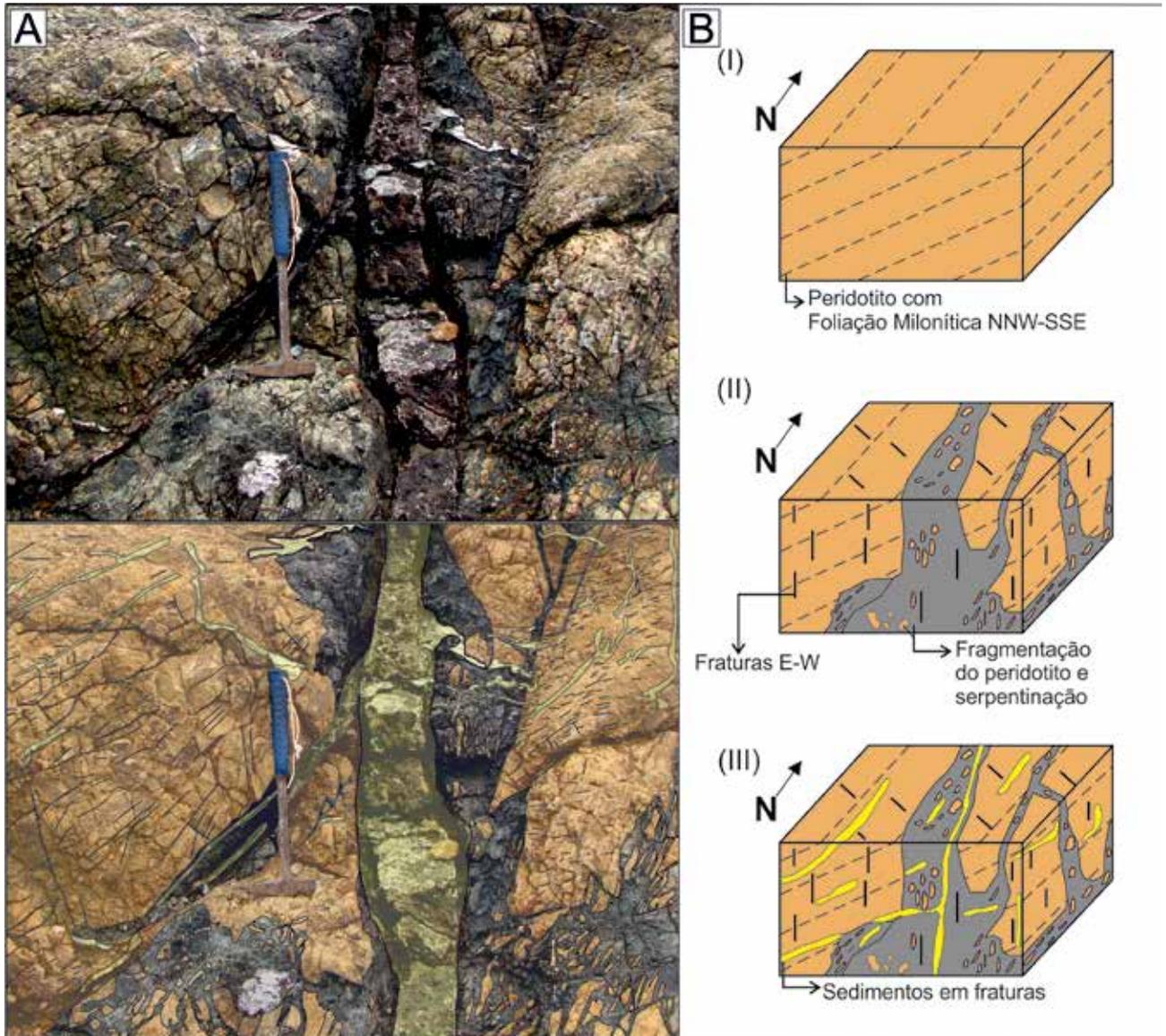


Figura 10. a) afloramento síntese das estruturas observadas em arranjo fractal e sua interpretação abaixo, b) blocos diagramas com a cronologia de eventos pelos quais passaram as rochas do ASPSP, sendo: (I) peridotito com foliação milonítica penetrativa de direção predominante NNW-SSE; (II) serpentinização do peridotito e fraturas de direção E-W; (III) deposição de sedimentos em fraturas pré-existentes, abertas por erosão.

Figure 10. a) outcrop with similar fractal arrangement and its interpretation above, b) block diagram representing the chronological events which affected the SPSPA: (I) peridotite with penetrative mylonitic foliation mainly direct to NNW-SSE; (II) peridotite serpentinized and presence of spaced fracture turned to E-W direction; (III) sedimentary deposits fit into pre-existing structure, opened by erosion.

(III) O terceiro elemento fractal diferenciado nas escalas de trabalho são as fraturas preenchidas por arenito carbonático. Estes depósitos sedimentares aproveitaram fraturas de estruturas pré-existentes, abertas por erosão (CAMPOS *et al.*, 2009, ANGULO *et al.*, 2013), tais como foliação milonítica, diaclases e fraturas de direção E-W. Estas feições podem ser observadas em imagens do drone (Figura 4), foto mosaico (Figura 5) e afloramento (Figuras 6 e 7). O material se alojou na intensa rede de fraturas abertas por erosão que ocorre nas ilhas, permitindo a deposição em planos de direções e dimensões variáveis (CAMPOS *et al.*, 2009, ANGULO *et al.*, 2013).

Conhecendo o cenário de estruturas foi possível estabelecer as relações espaciais e geométricas entre as estruturas geológicas observadas em diferentes escalas fractais, contribuindo diretamente para a compreensão dos aspectos de deformacionais e tectônicos pelo qual passou o ASPSP.

Agradecimentos

RJA, MCS agradecem ao CNPq pelas bolsas de produtividade em pesquisa e pelo apoio financeiro através dos projetos 557299/05-5, 557141/2009-5 e 442865/2015-5. RJA agradece à Fundação Araucária pela bolsa sênior. Os autores agradecem à Secretaria Interministerial de Recursos do Mar (SECIRM) e a Base Naval de Natal (BNN) por todo apoio cedido durante os trabalhos de campo. Também agradecem ao Prof. Jorge Lins pela cessão das imagens de drone.

Referências Bibliográficas

- ALMEIDA F.F.M., **Ilhas oceânicas brasileiras e suas relações com a tectônica atlântica.** *Terrae didática*, v.2, n.1, p.3-18, 2006.
- ANGULO, R.J., SOUZA, M.C., CAMPOS, T.F.C., BEZERRA, F.H.R., FERNANDES, L. A., GIANNINI, P.C.F., PITOMBO, F.B., VEIGA, F.A. **Evidence for Late Quaternary episodic uplift of the São Pedro and São Paulo Archipelago, Equatorial Atlantic.** *Quaternary International*, v. 317, p. 102-111, 2013.
- CAMPOS, T.F.C., BEZERRA, F.H.R., SRIVASTAVA, N.K., VIEIRA, M.M., VITA-FINZI, C. **Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic), consistent with emplacement by extrusion.** *Marine Geology*, v. 271, p. 177-186, 2010.
- CAMPOS, T.F.C., BEZERRA, H.R., SRIVASTAVA, N.K., PETTA, R.A. VIRGENS NETO, J. **As rochas sedimentares e a formação neogênica de São Pedro e São Paulo.** In: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica, p. 75 – 81, 2009.
- CAMPOS, T.F.C., SRIVASTAVA, N.K., MACAMBIRA, M.J.B., PETTA, R.A., AMARAL, R., VIRGENS NETO, J. **A Formação São Pedro e São Paulo: Uma Nova Unidade Litoestratigráfica Quaternária do Atlântico Equatorial Brasileiro.** XLI Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa (PB), p. 353, 2002.
- CAMPOS, T.F.C., VIRGENS NETO, J., AMORIM, V.A., HARTMANN, L.A., PETTA, R.A. **Modificações metassomáticas das rochas milonitizadas do complexo ultramáfico do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Atlântico Equatorial.** *Geochimica Brasiliensis*, v. 17, n. 2, p. 81-90, 2003.
- GIOVELI, Izabel. **Análise e simulação de padrões de fraturas geológicas.** 2010. Disponível em: <<http://www.lume.ufrgs.br/handle/10183/29053>> Acesso 20/06/2017.
- HEKINIAN, R., JUTEAU, T., GRÀCIA, E., SICHLER, S., UDINTSEV, G., APPRIOUAL, R., LIGI, M. **Submersible observations of Equatorial Atlantic mantle: The St. Paul Fracture Zone region.** *Marine Geophysical Researches*, v. 21, p.529-560, 2000.
- HILBERT, D. Über die stetige Abbildung einer Linie auf ein Flächenstück. *Mathematische Annalen*, v.38, p. 459-460, 1891.
- MAIA, M., SICHEL, S., BRIAIS, A., BRUNELLI, D., LIGI, M., FERREIRA, N., CAMPOS, T.F.C. MOUGEL, B., BRHME, I., HÉMOND, C., MOTOKI, A., MOURA, D., SCALABRIN, C., PESSANHA, I., ALVES, E., AYRES, A., OLIVEIRA, P. **Extreme mantle uplift and exhumation along a transpressive transform fault.** *Nature Geoscience*, p.1-6 2016.
- MANDELBROT, B.B. **How long is the coast of Britain? Statistical self-similarity and fractional dimension.** *Science*, v. 156, p.636-638, 1967.
- MELSON W.G., HART, S.R., THOMPSON, G. **St. Paul's Rocks, Equatorial Atlantic: Petrogenesis, Radiometric Ages, and Implications on Sea-Floor Spreading.** *Geol. Soc. Of America*, v. 132, p. 241-272, 1972.
- MELSON W.G., JAROSEWICH, E., BOWEN, V.T., THOMPSON, G. **St. Peter and St. Paul Rocks: A high-temperature mantle-derived intrusion.** *Science*, v.155, n.3769, p.1532-1535, 1967.
- MOTOKI, A., SICHEL, E.S., CAMPOS, T.F.C., SRIVASTAVA, N.K., SOARES, R. **Present-day uplift rate of the Saint Peter and Saint Paul Islets, Equatorial Atlantic Ocean.** *REM: Revista Escola de Minas*, v. 62, n. 3, p. 331-342, 2009. ISSN 0370-4467.
- SICHEL, S. E., MOTOKI, A., CAMPOS, T.F.C., ANGEL-AMAYA, J., GARRIDO, T.C.V., MAIA, M., KOGA, M.S., NETO, J.A.B., MOTOKI, F.K., GORINI, M.A. **Origem e evolução das rochas mantélicas da Cadeia Peridotítica de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial.** *Boletim de Geociências - Petrobras* 20 (1/2), p 97-128, 2012.
- SIMÕES, L.S.A., ANDRADE, G.G., CAMPOS, T.F.C, SICHEL, S.E., MOTOKI, A. **Padrão petro-estrutural das rochas e seu significado no contexto tectônico do Atlântico Equatorial.** In: O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica, p. 92-97, 2009.
- TURCOTE, D. L. **Fractals and chaos in geology and geophysics.** 1ed. Reino Unido Cambridge University Press, 1992.

A Sismicidade na região do Arquipélago de São Pedro e São Paulo - Atlântico Equatorial

Guilherme Weber Sampaio de Melo¹

Aderson Farias do Nascimento¹

Thomas Ferreira da Costa Campos¹

16

Abstract

Earthquakes in the Mid-Atlantic Ridge (MAR) is common due to the tectonic strain generated by the constant movement between the tectonic plates. Since 2011, a seismograph station installed in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA) is recording earthquakes occurring on the Transform of Saint Paul fault. The epicenters were located using the back-azimuth method and the magnitude values were measured through of Magnitude Local (ML) and Magnitude Moment (M_W) scales. For seismic events with $M > 4$, the magnitude values calculated were compared with the mb scale values of global network NEIC (National Earthquake Information Center). Until December 2015, 328 seismic events were recorded, with magnitudes $1 \leq M \leq 5.9$ and epicenters located around of SPSPA region. We observed that a portion of these recorded earthquakes are located on the thrust faults that cause the archipelago uplift, showing a direct relationship with island elevation. The measured ML magnitude values indicated that for earthquakes with epicentral distance < 100 km this scale is more suitable because the differences between the ML and mb scales went small (≤ 0.2 magnitude unit). For Mw scale, we observed that for closer seismic events, the P-wave use in the magnitude measure showed differences higher than the S-wave use, where the differences were ≤ 0.7 m.u for P-wave and ≤ 0.2 m.u for S-wave, indicating that the S-wave use in the measure for epicenters near SPSPA are more suitable.

Introdução

A ocorrência de terremotos nas ilhas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) não é algo incomum. Ocorre com muita frequência, devido a sua localização sobre a área de separação das placas tectônicas Sul-Americana e Africana, a cerca de 1.100 km da cidade de Natal/RN. Esta região é denominada "Fratura Transformante de São Paulo", ou "Transformante de São Paulo" (TSP). A TSP possui uma extensão total de aproximadamente 630 km, na qual a placa Africana se move na direção E, e a Atlântica na direção W (MOTOKI *et al.*, 2010). O ASPSP se situa no bordo norte dessa falha. O movimento divergente entre as placas gera um esforço tectônico que, entre outros fatores, contribui para o soerguimento e a formação das ilhas. A morfologia abissal do ASPSP é caracterizada por uma morfologia que atinge 3.800 m de altura, com cerca de 20 km de largura e 100 km de comprimento (MOTOKI *et al.*, 2009). A taxa de soerguimento é de cerca de 1,5 mm por ano, a depender da intensidade da atividade sismotectônica (CAMPOS *et al.*, 2010). Suas rochas são em maior parte periodotíticas serpentinizadas e milonitizadas, um tipo de rocha que se origina diretamente do manto a altas temperaturas. Esse fenômeno de exposição das rochas mantélicas que ocorre no arquipélago é o único no mundo. Isso dá ao ASPSP uma posição importante no oceano Atlântico, devido a ser a única formação que não é de origem vulcânica, sendo composta por rochas mantélicas que aflora acima do nível do mar.

1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte (aderson@geofisica.ufrn.br).

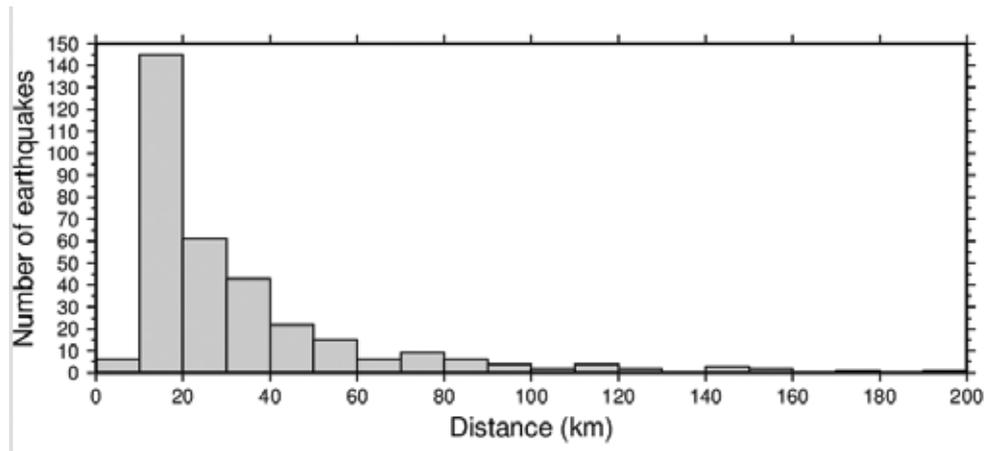


Figura 3. Relação do número de sismos com sua distância epicentral. *Figure 3. Relation of number of epicenter with the epicenter distance.*

Seus epicentros

A análise dos dados registrados pela estação sísmica utilizou-se o software SEISAN (Earthquake Analysis Software, HAVSKOV e OTTEMOLLER, 1999), nas quais mostram que os epicentros estão, em sua maior parte, a distâncias epicentrais < 40 km da ilha de Belmonte (Figura 3), distribuindo-se ao longo direção NE-SW e a SE. Foram gerados os back-azimuths, e a distância foi calculada usando a seguinte equação:

$$D = (t_{Sg} - t_{Pg}) \times 8,59$$

onde t_{Pg} é o tempo de chegada da onda Pg, t_{Sg} é o tempo de chegada da onda Sg e 8,59 o valor gerado a partir da razão $\frac{Vp \cdot Vs}{Vp - Vs}$.

SEARLE (2013) relata que existe uma similaridade entre velocidade sísmica de rochas peridotitas serpentinizadas e de gabros em locais de exposição do manto superior. Logo, foram usados os valores $Vp = 6,5$ km/s e $Vs = 3,7$ km/s, obtidos em Foulger *et al.* (2003). Entende-se que os eventos originam-se pelos esforços tectônicos liberados a partir do movimento das placas na cadeia meso-atlântica. A partir das regiões por onde se distribuem as falhas de cavalgamento descritas por MAIA *et al.* (2016), foi possível notar que em sua maior parte, os tremores mais próximos estão relacionados ao tectonismo transpressivo que provoca o

soerguimento das ilhas do Arquipélago de São Pedro e São Paulo. Eles são gerados a partir de tensões oblíquas de compressão, causados pelas zonas de cavalgamento, de modo que o nível do soerguimento se baseia na intensidade da atividade sismotectônica (CAMPOS *et al.*, 2010).

Além disso, usando dados de mecanismo focal de eventos históricos disponíveis na rede mundial de monitoramento sísmico NEIC, e ocorridos sobre e intra-transformante onde se localiza o arquipélago, foi possível identificar de acordo com a representação da direção dos esforços tectônicos alguns deles localizados sobre a zona de cavalgamento descrita por MAIA *et al.* (2016). Percebe-se que há uma relação direta dos mecanismos focais com o processo de soerguimento do ASPSP (Figura 4). Os eventos mais distantes do ASPSP estão situados sobre as tensões geradas pela falha Transformante de São Paulo, na qual seus epicentros se estendem com distâncias que chegam a mais de 150 km, próximos as zonas de transição com a intra-transformante mais ao sul. Esses eventos, normalmente, possuem magnitudes de valores superiores a 3,0 M, de modo o suficiente para que as ondas sísmicas se propagem até a estação sobre a ilha de Belmonte.

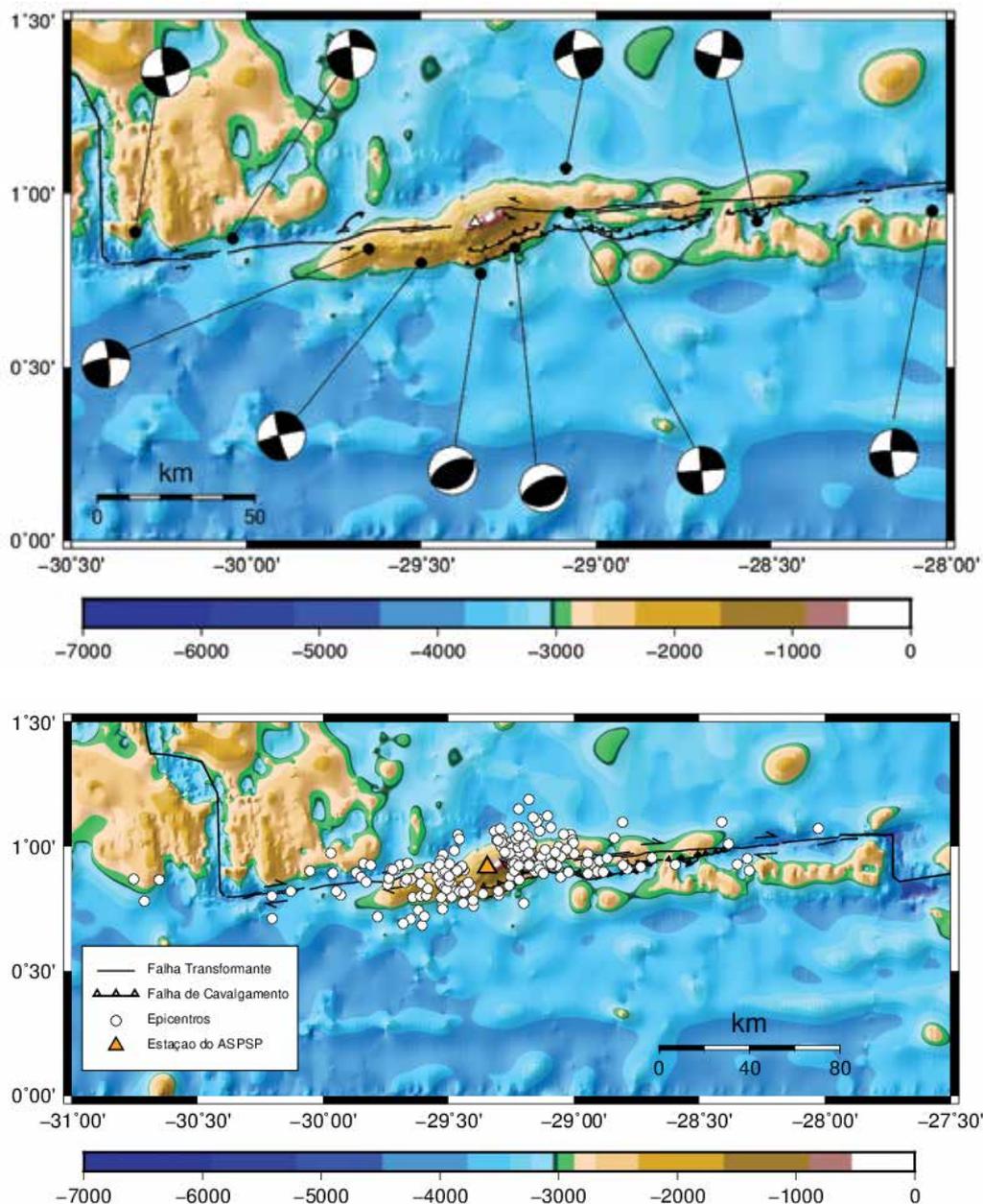


Figura 4. a, Epicentros e dados de mecanismo focal de diferentes tremores ocorridos na intra-transformante norte da TSP, mostram como o tectonismo da dorsal Meso-atlântica se associa com a falha (o quadrante escuro indica compressão e no branco ocorre dilatação).

Figure 4. a, Epicenters and dates of focal mechanisms of different earthquakes occurred in the intra-transform northern of TSP, showing how tectonism of Mid-Atlantic Ridge is associated.

As magnitudes

A magnitude é uma das mais importantes características de um terremoto, pois a partir dela é possível classificar o evento e relacionar a sua intensidade com os efeitos sismotectônicos gerados. Devido à existência de uma única estação, não há possibilidade de calibrar uma escala de magnitude no ASPSP, sendo possível apenas uma comparação entre os valores medidos utilizando uma escala padrão, com os valores registrados por redes globais de monitoramento.

Magnitude Local

Para medição dos eventos em torno das ilhas, foram usadas duas diferentes escalas. A primeira delas foi a escala de Magnitude Local (ML), criada inicialmente no Sudeste da Califórnia/EUA por Charles Richter no ano de 1935 (RICHTER, 1935), e posteriormente recalibrada em diversas partes do mundo. Hutton e Boore (1987) realizaram uma modificação na escala ML, onde nessa nova equação fosse necessário o valor da distância hipocentral ao invés da epicentral como descrito por Richter, além de poder ser usada com instrumentos digitais ao invés dos analógicos. Os autores também mencionam que para epicentros a menos de 100 km, como é o caso da maior parte dos sismos do ASPSP, a diferença de atenuação das ondas sísmicas em outros locais não causará uma mudança no uso da equação comparado a Califórnia. A medição de magnitude com essa nova escala ML apresentou resultados aceitáveis em diversas partes do mundo, e sendo assim o IASPEI (International Association of Seismology and Physics of Earth's Interior) padronizou como a escala de Magnitude Local mundial. Ela é dada pela equação:

$$ML = \log(A) + 1.11 \log(\Delta) + 0.00189\Delta - 2,09$$

onde A é a máxima amplitude do evento em nm medido pelo componente horizontal de um sensor

Wood-Anderson (UHRHAMMER e COLLINS, 1990), e Δ é a distância hipocentral dos eventos, com $\Delta < 1000$ km (HUTTON e BOORE, 1987; BORMANN e DEWEY, 2013). Pelo fato dos atuais sismógrafos de banda larga dividir os registros em três componentes N-S (North-South), E-W (East-West) e Z, tomamos a média aritmética da magnitude entre os componentes N-S e E-W (LAY e WALLACE, 1995).

Magnitude de Momento

A segunda escala de magnitude escolhida para uso no ASPSP foi a Magnitude de Momento (M_w), na qual pode ser medida a partir da obtenção do Momento Sísmico (M_o), dado que descreve os efeitos tectônicos gerados a partir da ruptura da rocha. A escala de magnitude de momento M_w foi descrita inicialmente por Kanamori (1977) e Hanks e Kanamori (1979). A escala é dada por:

$$M_w = \frac{(\log M_o - 9.1)}{1.5}$$

BRUNE (1970) descreve que M_o pode ser calculado usando a seguinte equação:

$$M_o = \frac{4\pi\rho\beta^3 R \sqrt{\Omega_o(Z)^2}}{\Psi_{\phi\theta}}$$

onde para região estudada a densidade ρ é 2850 kg/m³ (ANGULO *et al.*, 2013), é a velocidade da onda P com valor de 6500 m/s, R é a distância hipocentral medida em metros, $\Psi_{\phi\theta}$ é o fator que corrige as amplitudes sísmicas devido ao padrão de radiação da fonte sísmica, na qual para a onda P foi considerado o valor de 0,52 (AKI e RICHARD, 1980). O Ω_o é também estimado a partir do ajuste do espectro da onda P.

Para o caso de eventos a curtas distâncias epicentrais, Ottemoller e Havskov (2003) mostram que é possível calcular o M_w através do espectro de deslocamento para um dado valor de atenuação.

Para esse cálculo, é necessário conhecer o valor da atenuação sísmica Q_p que a onda percorre. Nesse trabalho foi aplicado o valor de $Q_p = 60$ (MENKE *et al.*, 1995). O baixo valor se origina pela rápida atenuação sísmica em regiões formadas por rochas peridotitas, devido às altas temperaturas originadas na compressão tectônica (SATO *et al.*, 1988). Nossa análise espectral feita nesse trabalho foi através da onda P utilizando o componente vertical do sismômetro (HHZ), com o software SEISAN.

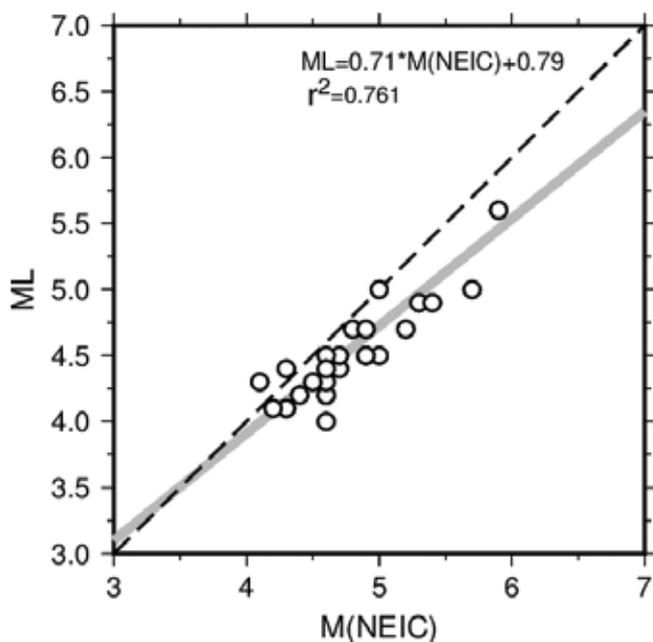


Figura 5. Diferença entre as escala de magnitude ML calculadas usando a estação do ASPSP, com os valores medidos pela NEIC na escala m_b . A linha pontilhada preta representa valores nos quais $ML=mb$. A linha cinza mais espessa representa o ajuste de mínimos quadrados aos valores de ML e m_b observados.

Figure 5. Difference between the M_L magnitude scale values using the SPSPA station and the m_b magnitude scale made by NEIC seismology network. The dashed black line represents $ML=mb$ values. The thick gray line is the least-square fitting of the observed M_L and m_b values.

Resultados

Os terremotos do ASPSP possuem magnitudes menores que 6 M. Mesmo assim, são suficientes para comparar os valores dos eventos acima de 4 M calculados através das escalas ML e M_{wp} , com os valores das magnitudes de telessismos ocorridos próximos as ilhas e registrados pela NEIC (National Earthquake Information Center). As medições da Magnitude Local foram realizadas usando o pacote SEISAN, de modo que o primeiro passo foi a plotagem dos sismogramas referentes aos componentes HHE e HHN. O segundo passo baseia-se na transformação dos registros dos sensores broadband para o sensor Wood-Anderson. O último passo consiste na marcação da maior amplitude da onda S para a medição da escala ML. Comparando os valores obtidos da escala ML com os da m_b (NEIC), é possível observar na Figura 5 que as diferenças de valores variavam entre 0.1 e 0.6 magnitude units (m.u) com uma média de ± 0.27 m.u. Foi identificado que os eventos com distâncias epicentrais < 100 km tinham diferenças de valores de no máximo 0.2 m.u. A diferença de atenuação entre a crosta da Califórnia/EUA e a Dorsal Meso-Atlântica não irá afetar de maneira significativa o valor calculado, pois tende a ser menor que 0.1 m.u devido às baixas distâncias epicentrais dos eventos do ASPSP. Isso pode ser explicado pelo terceiro termo da equação de magnitude local (0.0019Δ) ligado ao fenômeno da atenuação (HAVSKOV *et al.*, 2003). Este termo contribui quantitativamente pouco com o valor de ML, para valores de distância pequenos. As maiores diferenças de valores entre as escalas ML e m_b (NEIC), podem estar relacionadas com a queda abrupta na amplitude das ondas sísmicas. Isso se deve ao fenômeno da forte atenuação sísmica que ocorre nas regiões crustais em torno do ASPSP. Existem diversos fatores que contribuem para a atenuação das ondas, tais como as condições termais e porosidade das rochas. Para a escala de Momento Sísmico (M_{wp}), as magnitudes foram obtidas pelo método da análise espectral de deslocamento da onda P e da onda S. No caso do ASPSP, comparando os valores obtidos

com os m_b (NEIC) dos mesmos 30 eventos, foram identificadas diferenças de magnitude variando entre 0,1 e 0,9 m.u, com média de 0,29 m.u. Analisando as distâncias epicentrais e os valores, foi notado que inversamente ao caso da escala M_L , os eventos com epicentros à < 100 km estavam com maior discrepância nos valores observados; estes valores variavam entre 0,4 a 0,9.m.u. Apesar

de que, para epicentros próximos a superfície, seja mais comum uma mudança de amplitude na onda S (M_{WS}), ao invés da onda P (HAVSKOV e OTTEMOLLER, 2010), notamos que ao calcular a magnitude M_W para os eventos localizados a menos de 100 km, usando agora a onda S, a discrepância diminuiu para valores entre 0,2 a 0,4 m.u. (Figura 6)

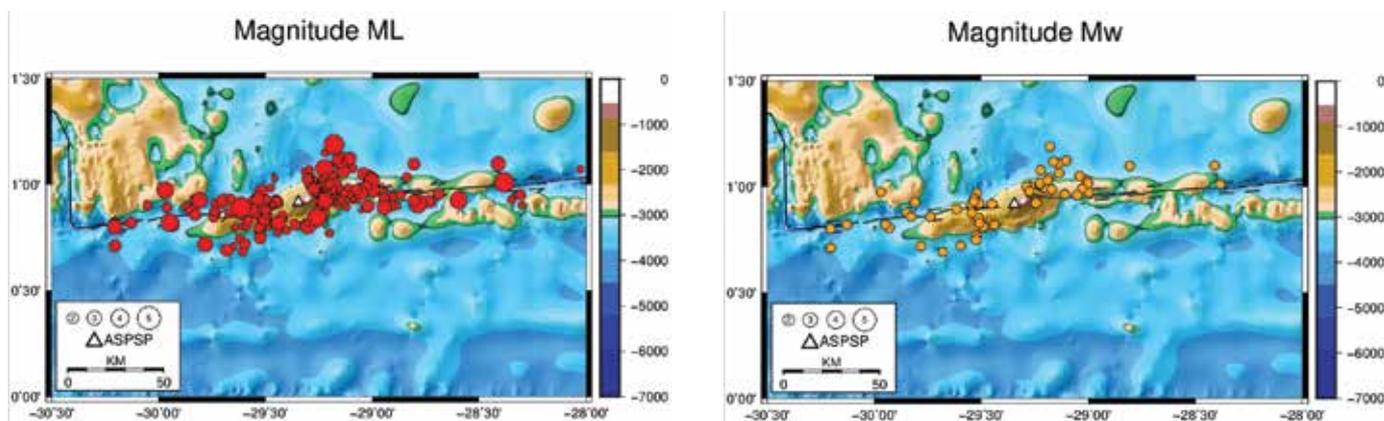


Figura 6. Da esquerda para direita, o primeiro mapa epicentral mostra as magnitudes calculadas com a escala de Magnitude Local, e o segundo as magnitudes na escala de Momento Sísmico.

Figure 6. From left to right, the first epicentral maps show the magnitudes calculated using the Magnitude Local scale, and after that, the second maps show the magnitude values calculated by Magnitude Moment.

Considerações Finais

Nesse trabalho apresentamos os resultados obtidos pelo tratamento de dados da estação sismológica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, cuja interpretação nos fornece informações sobre a sismicidade que ocorre em seu entorno. Consequentemente, foi possível identificar que, a partir das localizações inferidas da relação entre os azimutes e distâncias epicentrais dos eventos registrados, a maior parte dos eventos está a menos de 30 km, distribuindo-se ao longo direção NE-SW e a SE do ASPSP. Tanto a magnitude sísmica, como mecanismo focal e sua localização epicentral sugerem que parte desses eventos registrados são gerados pelas tensões oblíquas de compressão, oriundas de uma zona de cavalgamento que provoca

o soerguimento do ASPSP, cavalgamento esse devidamente identificado por Maia *et al.* (2016) durante o Cruzeiro Colmeia (MAIA *et al.*, 2015). Baseado em amplitudes Wood-Anderson observadas nos registros da estação do ASPSP, comparamos os valores de magnitude gerados a partir da aplicação da escala de M_L elaborada por Hutton e Boore com os de m_b (NEIC). Eventos com distância abaixo de 100 km possuíam diferenças na correlação de valores nas quais são pequenos (≤ 0.2 m.u). Entretanto, para os eventos mais distantes foi identificada uma diferença de magnitude maior, na qual isso pode ser explicado pelos efeitos da diferença de atenuação entre as duas fontes sísmicas no sudeste da Califórnia e no ASPSP. Mesmo assim, diversos outros

trabalhos de magnitude com aplicação da equação de Hutton e Boore tem sido feitos na crosta oceânica do Atlântico (HAVSKOV *et al.*, 2003; GONGORA *et al.*, 2004; TILMANN *et al.*, 2004; VALLEJO *et al.*, 2014). Através da medição dos valores de momento sísmico, foi identificado que em eventos a menos de 100 km de distância a análise espectral da onda P mostravam diferenças de valores em relação aos valores da NEIC mais elevados do que com aqueles utilizando a onda S (≤ 0.7 m.u). Isso indica que para os eventos mais próximos do ASPSP o uso da onda S na medição de momento sísmico tende a resultar em valores mais apropriados. Para os eventos mais distantes, a aplicação da escala M_{wp} mostrou melhores resultados na correlação das magnitudes com as m_b (NEIC), com diferenças de no máximo 0.3 m.u. Além disso, outra pesquisa feita no ASPSP demonstrou como se comporta a medição dos tremores na relação entre as escalas M_w e M_L , na qual é mostrado que eles não seguem um padrão de relação 1:1 entre as duas escalas para eventos menores que $M_w 3.0$ (de MELO e do NASCIMENTO, 2018).

Agradecimentos

Agradecemos ao PIBIC/UFRN pelo suporte financeiro para desenvolvimento do estudo, ao CNPq pela bolsa de produtividade e ao projeto SISMOMAR (CNPq, proc 402274/2013-0). A Dra. Marcia Maia (Université de Bretagne Occidentale / França) pela generosidade de disponibilizar as coordenadas de localização das falhas de cavalgamento e observações feitas. Agradecemos a SECIRM, Marinha do Brasil, pela ajuda e suporte desse trabalho. Agradecemos também ao Prof. Peter Bormann (in memoriam) pelas suas discussões científicas, o incentivo e o entusiasmo contagiante. Os mapas e gráficos foram feitos usando o software GMT - Generic Mapping Tour (WESSEL *et al.*, 2013) e os dados batimétricos disponibilizados em <https://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>.

Referências Bibliográficas

- AKI, K.; RICHARD, P. **Quantitative Seismology**. W. H. Freeman, 932 pp, 1980.
- ANGULO, R.; SOUZA, M.; CAMPOS, T.; BEZERRA, H.; FERNANDES, L.; GEANNINI, P.; PITOMBO, F. e VEIGA, F. **Evidence for Late Quaternary episodic uplift of the São Pedro and São Paulo Archipelago, Equatorial Atlantic**. *Quaternary International*, vol. 317: 102-11, 2013.
- BORMANN, P. e DEWEY, J. W. IS 3.3: **The new IASPEI standards for determining magnitudes from digital data and their relation to classical magnitudes**. In P. Bormann (Ed.), <http://nmsop.gfz-potsdam.de>, 35 pp, 2013.
- BRUNE, J. **Tectonic stress and spectra of shear waves from earthquakes**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 75: 4997-2009, 1970.
- CAMPOS, T.; BEZERRA, H.; SRIVASTAVA, N.; VIEIRA, M. e FINZI, C. **Holocene tectonic uplift of the St. Peter and St. Paul Rocks (Equatorial Atlantic) consistent with emplacement by extrusion**. *Marine Geology*, vol. 271: 177-186, 2010.
- DE MELO, G. W. S., e DO NASCIMENTO, A. F. **Earthquake Magnitude Relationships for Saint Peter and Saint Paul Archipelago, Equatorial Atlantic**. *Pure and Applied Geophysics*, vol.175: 741-756, 2018.
- FOLGER, G. R., DU, Z., e JULIANS, B. R. **Islandic-type crust**. *Geophysical Journal International*, vol.155: 567-590, 2003.
- GONGORA, E.; CARRILHO, F.; e OLIVEIRA, C. S. **Calibration of Local Magnitude M_L in the Azores Archipelago Based on Recent Digital Recordings**. *Pure and Applied Geophysics*, vol.161: 647-590, 2004.
- HANKS, T. C. e KANAMORI, H. 1979. **Moment magnitude**. *Journal of Geophysical Research*, vol. 84: 2348-2350.
- HAVSKOV, J.; PENÁ, J. A.; IBÁÑEZ, J. M.; OTTEMÖLLER, L. e MARTÍNEZ-ARÉVALO, C. **Magnitude scales for very local earthquakes. Application for Deception Island Volcano (Antarctica)**. *Journal of Volcanology and Geothermal Research*, vol.128: 115-133, 2003.
- HAVSKOV, J. e OTTEMÖLLER, L. **Routine data processing in earthquake seismology: with sample data, exercises and software**. *Springer (2)*, 347 pp, 2010.
- HAVSKOV, J. e OTTEMÖLLER, L. The SEISAN earthquake analysis software for Windows, Sun and Linux. Manual

and software. Institute of Solid Earth Physics, University of Bergen, 1999.

HEKINIAN, R.; JUTEAU, T.; GRACIA, E.; SICHLER, B.; SHICHEL, S.; UDINTSEV, G.; APPRIOUAL, R. e LIGI, M. **Submersible observations of Equatorial Atlantic mantle: The St. Paul Fracture Region zone.** *Marine Geophysical Researches*, vol. 21: 529-560, 2000.

HUTTON, L. K. e BOORE, D. M. **The ML scale in southern California.** *Bulletin Seismological Society of America*, vol. 77: 2074-2094, 1987.

KANAMORI, H. **The energy release in great earthquakes.** *Journal of Geophysical Research*, vol. 82: 2981-2987, 1977.

LAY, T.; WALLACE, T. C. **Modern global seismology.** *Academic Press* (1), 521 pp, 1995.

MAIA, M.; BIROT, D.; BRACHET, C.; BREHME, I.; BRIAIS, A.; BRUNELLI, D.; CAMPOS, T.; COLOSIO, A.; DE MORAES, E.; DONVAL, J.; FONTES, F.; GASPARGAR, F.; GUYADER, V.; HEMOND, C.; KONN, C.; MARCONDES, M.; MOTOKI, A.; MOUGEL, B.; MOURA, D.; PESSANHA, I.; SCALABRIN, C.; VALE, E. e SICHEL, S.; DE SOUZA, K. **COLMEIA cruise report - Equatorial Atlantic - St. Paul transform zone.** *Research Paper*, 2015.

MAIA, M.; SICHEL, S.; BRIAIS, A.; BRUNELLI, D.; LIGI, M.; FERREIRA, N.; CAMPOS, T.; MOUGEL, B.; BREHME, I.; HEMOND, C.; MOTOKI, A.; MOURA, D.; SCALABRIN, C.; PESSANHA, I.; ALVES, E.; AYRES, A e OLIVEIRA, P. **Extreme mantle uplift and exhumation along a transpressive transform fault.** *Nature Geoscience*, 2016.

MENKE, W.; LEVIN, V. e SETHI, R. **Seismic attenuation in the crust at mid-Atlantic plate boundary in south-west Iceland.** *Geophysical Journal International*, vol.122: 175-182, 1995.

MOTOKI, A.; SICHEL, S. E.; CAMPOS, T. F. C.; SRIVASTAVA, N. K e SOARES, R. **Taxa de soerguimento atual do arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial.** *Rev. Esc. Minas, Ouro Preto, Brasil*, vol. 62: 331-342, 2009.

MOTOKI, A.; SICHEL, S. E.; CAMPOS, T. F. C.; VARGAS, T.; SOARES, R e MOTOKI, K. F. **Morfologia abissal em torno do Arquipélago de São Pedro e São Paulo, Oceano Atlântico Equatorial, e sua relação ao tectonismo de soerguimento ativo.** *Rev. de Geografia, Recife, Brasil*, vol. 2: 318-330, 2010.

RICHTER, C. F. **An instrumental earthquake magnitude scale.** *Bulletin Seismological Society of America*, vol 25: 1-32, 1995.

SATO, H.; SACKS, S.; MURASE, T.; MUNCILL, G. e FUKUYAMA, H. **Attenuation of compressional waves in peridotite measured as a function of temperature at 200MPa.** *Pure and Applied Geophysics*, vol. 128: 433-447, 1988.

SEARLE, R. **Mid-Ocean Ridges.** Cambridge University Press (1), 318 pp, 2013.

TILMANN, F. **Microearthquake seismicity of the Mid-Atlantic Ridge at 5°S: A view of tectonic extension.** *Journal of Geophysical Research*, vol. 109: B06102, 2004.

UHRHAMMER, R. A.e COLLINS, E. R. **Synthesis of Wood-Anderson seismograms from broadband digital records.** *Bulletin Seismological Society of America*, vol. 80: 702-716, 1990.

VALLEJO, L. I. G.; GARCÍA-MAYORDOMO, J. e INSUA, J. M. **Probabilistic seismic-hazard assessment of the Canary Island.** *Bulletin Seismological Society of America*, vol. 96: 2040-2049, 2014.

WESSEL, P., W. H. F. SMITH, R. SCHARROO, J. F. LUIS, e F. WOBBE. **Generic Mapping Tools: Improved version released, EOS Trans.** American Geophysical Union, vol. 94: 409-410, 2013.

Microssismos registrados na estação sismográfica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo e suas relações com variações da intensidade do vento

Daniel Évora de Queiroz¹

Aderson Farias do Nascimento¹

Martin Schimmel²

Allan Rodrigues Silva³

Thalyta Soares dos Santos³

17

Abstract

Microseisms are continuous vibrations pervasively recorded in the 0.04 – 1 Hz frequency range. Their precise source mechanisms are still a matter of debate but it is agreed that they are related to atmospheric perturbations and ocean gravity waves. The Saint Peter Saint Paul Archipelago is located in the equatorial region of the Atlantic Ocean about 1,100 km distant from the Brazilian northeastern coast. Due to its remote distance from the continent and the lack of cultural noise, this location is a unique location for measuring microseismic noise and to investigate its relation with some climate and oceanographic variables. We analyzed data of microseismic and wind speed in the months of June and December between 2012 and 2015. Our analysis indicates a good correlation between the microseismic energy intensity changes recorded in the archipelago with the change of the Northern Hemisphere wind velocity intensity.

Introdução

Mesmo na ausência de terremotos a superfície da terra está sempre em movimento, especialmente na banda de baixas frequências sísmicas. Este movimento do solo, com frequências menores que 1 Hz, são denominadas de microssismos ou ruído sísmico ambiente. O movimento do solo gerado pelos microssismos é de intensidade baixa, imperceptível sem auxílio de equipamentos (sismógrafo e acelerógrafo).

Os microssismos geralmente são causados por fenômenos naturais associados ao fluxo de água em rios, chuva, vento, movimento de marés, variação de pressão atmosférica e ondas oceânicas, ou por atividades humanas diárias, tais como máquinas de fábricas, motores de automóveis e pessoas se deslocando, (LACOSS e TOKÖZ, 1969; BROMIRSKI *et al.*, 1999; BROMIRSKI, 2001; GERSTOFT E TANIMOTO, 2007; GERSTOFT *et al.*, 2008; GROB *et al.*, 2011).

Na sua maioria, os microssismos são compostos de ondas Rayleigh (LONGUET-HIGGINS, 1950; HAUBRICH e McCAMY, 1969) e são causados principalmente por ondas dos oceanos. O sinal microssísmico pode ser registrado por estações em qualquer localidade, em continente, em ilhas oceânicas, ou mesmo no fundo do mar (STUTZMANN *et al.*, 2009). Portanto, analisar microssismos é uma forma de obter informações sobre as características de fenômenos da natureza.

Os sinais de microssismos dominantes dos oceanos estão relacionados às características das ondas do oceano conhecidas como ondas de gravidade (que têm o vento como seu agente gerador principal e surgem devido a grande diferença entre as densidades do ar e da água na superfície do

-
- 1 Universidade Federal do Rio Grande do Norte (aderson@geofisica.ufrn.br);
 - 2 Instituto de Ciencias de la Tierra "Jaume Almera" - CSIC, Barcelona, Spain;
 - 3 Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE, Unidade Acadêmica de Serra Talhada.

oceano). Essas ondas tem seu período entre cerca de 1s a 30s no espectro dos diversos tipos de ondas presentes no oceano (BLAIR, 1965).

Os microssismos gerados pelas ondas do mar têm a energia da onda que é convertida em energia acústica na superfície do mar e essa onda acústica se propaga até o fundo do oceano e é convertida em energia sísmica. Ou seja, a variação de pressão gerada na superfície do mar propaga-se até o fundo do oceano. A teoria relacionada à forma como se obtém a variação de pressão gerada na camada d'água, provocando assim uma pressão sentida no fundo do oceano, foi apresentada por Longuet-Higgins (1950) e posteriormente por Hasselman (1963).

Em particular, as ondas de gravidade podem ser geradas tanto por ventos próximos ao local de observação (local onde se observa a onda), quanto por ventos intensos e tempestades que podem estar distantes milhares de quilômetros do ponto de observação. Em outras palavras, as ondas nos oceanos viajam milhares de quilômetros a partir do ponto onde foram geradas antes de chegar à costa. Os fatores que influenciam a formação dessas ondas de gravidade estão relacionados à velocidade do vento, ao *fletch* (que é distância de águas livres que o vento sopra, à largura da área afetada pelo *fletch*, à duração do vento que atinge uma determinada área e à profundidade da água). Esses fatores agem conjuntamente na determinação das características físicas finais das ondas de gravidade (DORMAN *et al.*, 1993; TOLMAN, 2009; HOLLIDAY *et al.*, 2006; ARDHUIN *et al.*, 2011).

A energia microssísmica é dividida entre microssismos primários (MP) e microssismos secundários (MS). A figura 1 mostra a Estimativa de Densidade Espectral de Potência pelo método Welch (1967), e exibe MP com frequências entre 0.04 – 0.1 Hz e MS com frequências entre 0.1 – 1 Hz (LONGUET-HIGGINS, 1950; HAUBRICH *et al.*, 1963; HASSELMAN, 1963; HOLCOMB, 1980; WEBB, 1992; CESSARO, 1994; BROMIRSKI e DUENNEBIER, 2002;

TANIMOTO, 2007; WEBB, 2008; SCHIMMEL *et al.*, 2011). Além disso, a figura 1 exibe o microssismo Golfo da Guiné (SHAPIRO *et al.*, 2006, YINGJIE XIA *et al.*, 2013) visível em frequência aproximada de 0.038 Hz (esse microssismo não será discutido no presente estudo).

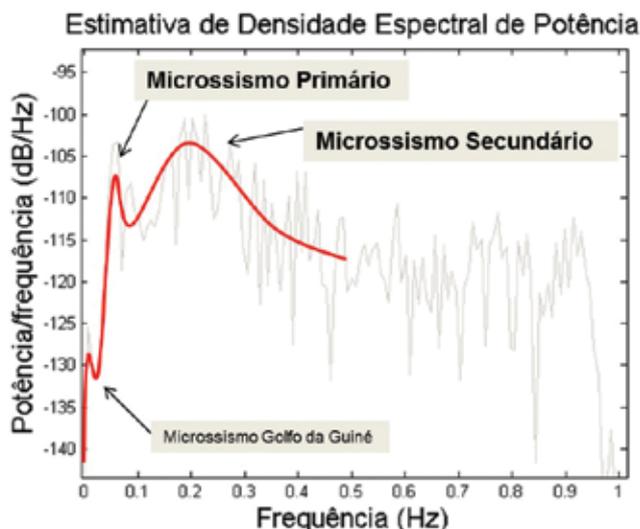


Figura 1. Estimativa da densidade espectral de Potência no ASPSP. A linha de tendência vermelha mostra os picos referentes ao microssismo primário, secundário e do Golfo da Guiné.

Figure 1. Welch Power Spectra Density (PSD) in the Saint Peter Saint Paul Archipelago (SPSPA). The tendency red line shows the peaks referring to the primary, secondary, and Gulf of Guinea microseism.

Os MP segundo Friedrich *et al.*, (1998) pode ser explicado pelo efeito das ondas de gravidade superficiais (ondas do mar gerado por ação dos ventos) interagindo com o fundo do oceano em regiões costeiras. Segundo Hasselmann (1963), em águas profundas (maior do que $\frac{1}{2}$ do comprimento de onda da onda de gravidade) este mecanismo é ineficaz na geração de microssismos primários.

Os MS também é causados por ondas de gravidade superficiais na água, mas de acordo com Friedrich *et al.*, (1998) resulta da interação de ondas com frequências iguais (ou quase iguais) propagando-se em direções opostas. Diferente dos MP, os MS

podem ser gerados em águas profundas e podem se propagar em baixas frequências e por longas distâncias (LONGUET-HIGGINS, 1950; CHEVROT *et al.*, 2007).

A análise de registros de microssismos utilizando-se métodos apropriados de filtragem é capaz de fornecer informações sobre a dinâmica de fenômenos oceânicos e/ou atmosféricos em uma determinada região. Como a natureza destas fontes de microssismos e seus mecanismos de geração ainda não são completamente compreendidos, este trabalho abre mais uma perspectiva para estudos no tema. Logo, este trabalho se constitui numa base inicial para o desenvolvimento de uma ferramenta de monitoramento, em longo prazo, in situ e em tempo real, para a identificação de fenômenos atmosférico-oceânicos a partir da análise de registros de microssismos.

Nesse contexto, o objetivo principal deste trabalho é demonstrar a relação entre os microssismos registrados na estação sismográfica do Arquipélago

de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e suas relações com a intensidade da velocidade dos ventos nas porções norte e sul do oceano Atlântico (QUEIROZ *et al.*, 2017). Sendo assim, a estação sismográfica instalada no ASPSP demonstra uma utilidade científica muito ampla, além do registro de terremotos.

Material e Métodos

O local escolhido para a realização deste trabalho foi o Arquipélago de São Pedro e São Paulo (Figura 2). O ASPSP está situado na região equatorial do Oceano Atlântico, localizado nas coordenadas $00^{\circ}55.1' N$, $29^{\circ}20.7' W$ e distante cerca de 1.100 km do litoral brasileiro (Figura 2a). É a porção de terra pertencente ao território brasileiro mais próximo da África. O ASPSP é constituído de um conjunto de pequenas ilhas rochosas (Figura 2b) que se ergue de uma profundidade de cerca de 4.000 metros, estando todas elas sujeitas a abalos sísmicos e a condições muito severas do oceano e da atmosfera. (SECIRM, 2009).

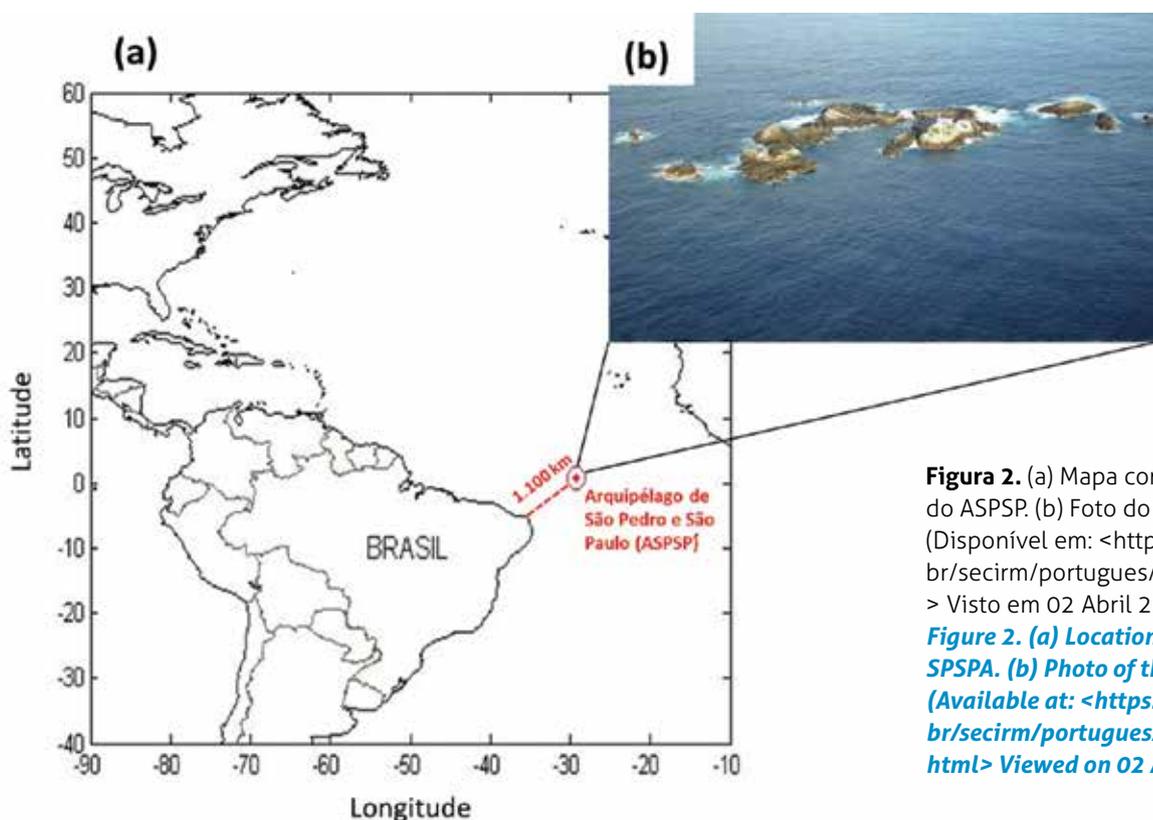


Figura 2. (a) Mapa com a localização do ASPSP. (b) Foto do ASPSP (Disponível em: <<https://www.mar.mil.br/secirm/portugues/arquipelago.html>> Visto em 02 Abril 2017).

Figure 2. (a) Location map of the SPSPA. (b) Photo of the SPSPA (Available at: <<https://www.mar.mil.br/secirm/portugues/arquipelago.html>> Viewed on 02 April 2017).

Devido a seu posicionamento geográfico, entre os hemisférios norte e sul e os continentes africano e americano, o ASPSP reúne condições especiais para o desenvolvimento de pesquisas sismológicas e climáticas. (SECIRM, 2009). Além disso, devido às características de isolamento do ASPSP, os registros da estação sismológica do local estão menos susceptíveis à atividade humana, fornecendo assim importantes informações relacionadas a fenômenos naturais de uma região pouco explorada, principalmente com a utilização de microssismos.

Para a realização desse estudo, foram utilizados dois tipos de dados: Microssismos e velocidade dos ventos.

Os dados de microssismos são da estação de banda larga permanente do ASPSP. Os dados de velocidade dos ventos foram obtidos por meio de modelos numéricos de ondas WAVEWATCH III (WIII), do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA).

As ferramentas de análise utilizadas para o desenvolvimento deste trabalho foram os softwares abaixo, disponíveis no Laboratório de Sismologia da UFRN (LabSis): SAC (Seismic Analysis Code) desenvolvido pelo Lawrence Livermore National Laboratory da Universidade da Califórnia, Estados Unidos (TAPLEY e TULL, 1992) e MATLAB.

Com o objetivo de fazer relações quantitativas e qualitativas entre os dados utilizados neste trabalho realizaram as seguintes etapas:

I. Dados de microssismos:

Pré-Processamentos

Para realizar as análises nos dados sismológicos, foram necessários os seguintes procedimentos:

Retirada da resposta instrumental: O registro em um sismômetro é um conjunto de efeitos causados pela fonte, pela estrutura da Terra e pela resposta do instrumento (equipamento). A resposta do

sismômetro pode ser retirada, permitindo assim que o registro forneça apenas as informações necessárias, ou seja, da fonte e estrutura da terra.

Remoção da média e da tendência linear: Correção de efeitos indesejados no registro sísmico devido à relação entre a fonte e o receptor.

FFT: Utilizamos a transformada rápida de Fourier (FFT) para converter o sinal do domínio do tempo para o domínio da frequência. (WELCH, 1967)

Filtro passa baixa de 1Hz: Como nosso interesse está na análise dos microssismos, frequências abaixo de 1Hz, excluímos as frequências acima de 1Hz.

Processamentos

Espectrograma: Foi gerado o espectrogramas (gráficos de frequência x tempo) dos meses de Junho (2012, 2013, 2014 e 2015) e Dezembro (2012 e 2014).

Correlação entre MP e MS

Para realizar comparações quantitativas entre MP e MS, foram necessários os seguintes procedimentos:

Estimativa da densidade espectral de Potência: Usando o método Welch (1975), foi calculada a Estimativa da densidade espectral de Potência para a identificação das bandas de frequências de MP e MS. Foi feito uma média de todo o ano de 2015 para isso.

Filtros passa banda para separar PM e SM: Com as bandas de frequências de MP e MS identificadas, utilizando filtros de passa banda, foram separados (em arquivos distintos) os PM e SM.

Amostragem dos dados: Utilizando o valor médio, decimamos o dado em amostras de 0.3 mHz (amostras de hora em hora). Isto foi necessário para facilitar o cálculo do coeficiente da correlação de Pearson, permitindo assim as corretas comparações que seriam realizadas no domínio do tempo.

IFFT: Utilizamos a transformada rápida inversa de Fourier (IFFT) para converter o sinal do domínio da frequência para o domínio do tempo.

Normalização dos dados: Como as amplitudes das variáveis MP e MS têm escalas diferentes, foi necessária a normalização destes dados.

Correlação de Pearson: Calculamos os valores da correlação de Pearson (FIGUEIREDO e SILVA, 2010) entre as variáveis MP e MS.

II. Dados de velocidade do vento:

Utilizando os dados de velocidade do tempo (amostras de hora em hora), geramos série temporal de velocidade dos ventos na região do ASPSP e mapas de intensidades dos ventos médios para todo o oceano Atlântico. Foram utilizados dados entre 2012 e 2015 para estimar a média dos meses de Junho e Dezembro.

Os dados utilizados possuem resolução espacial de $0,25^\circ$ (aproximadamente 27,5 km), altura de referência de 10 metros.

Resultados e Discussão

Sabendo que os microsismos podem ser provocados pela ação das ondas do mar induzidas pela variação na atividade atmosférica (vento, variação da pressão ou temperatura), decidimos usar como variável climática a velocidade do vento para nossas análises.

A figura 3 mostra a intensidade da velocidade dos ventos para todo o Atlântico para os meses de Junho (Figura 3a) e Dezembro (Figura 3b). As cores quentes indicam velocidades do vento com maiores intensidades do que as cores frias.

Podemos ver claramente na figura 3 que, predominantemente, os ventos com maiores intensidades (cores quentes) ocorrem em altas latitudes durante sua respectiva época de inverno local, ou seja, em Junho para altas latitudes no hemisfério sul e em Dezembro para altas latitudes no hemisfério norte. Logo, a intensidade da velocidade dos ventos entre os hemisférios norte e sul na região do Oceano Atlântico estão associadas com os períodos de inverno e verão local.

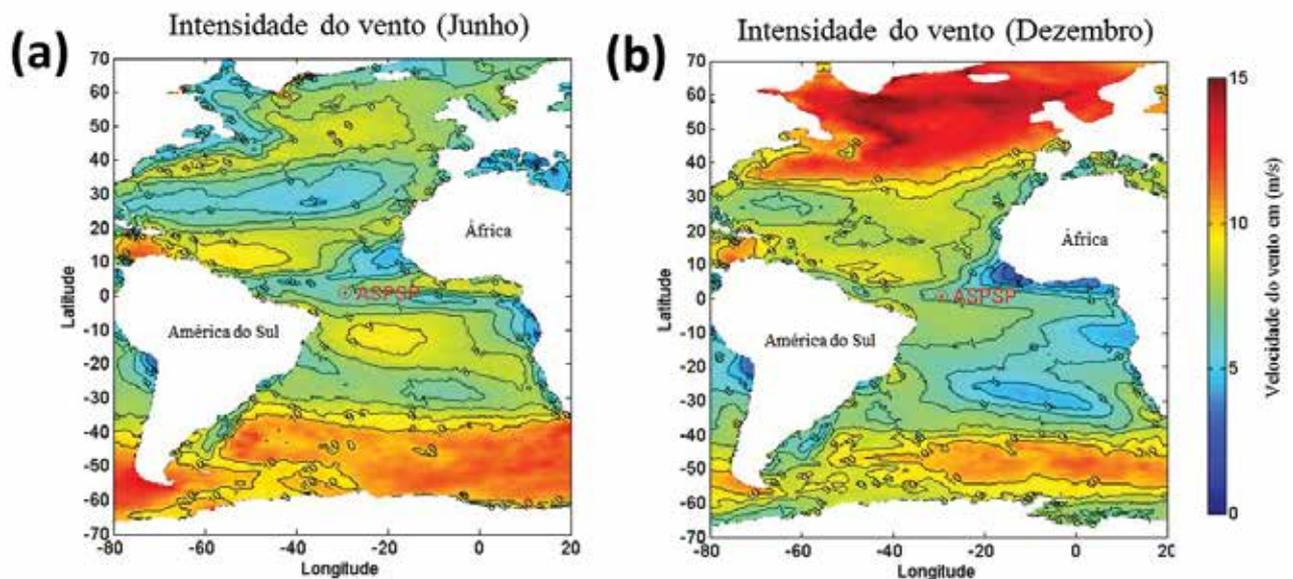


Figura 3. Intensidade da velocidade dos ventos em todo o Oceano Atlântico. Cores quentes indicam maior intensidade da velocidade dos ventos. (a) Junho. (b) Dezembro.

Figure 3. Wind Intensity map along the Atlantic Ocean. Warmer colors for greater wind intensity. (a) June. (b) December.

Para a região do ASPSP (ver ASPSP, em vermelho, no centro das Figuras 3a e 3b), não observamos grandes variações da intensidade da velocidade dos ventos. Esse comportamento estável das velocidades dos ventos no ASPSP pode ser observado na análise temporal da velocidade dos ventos para os meses analisados na figura 4.

A figura 4 mostra a análise temporal (amostras de hora em hora) da velocidade do vento (m/s) para o mês de Junho (curva em azul) e para o mês de Dezembro (curva em verde). O tracejado em azul mostra a média da velocidade do vento para o mês de Junho (~ 6 m/s), enquanto o tracejado em verde mostra a média da velocidade do vento para o mês de Dezembro (~ 6,3 m/s).

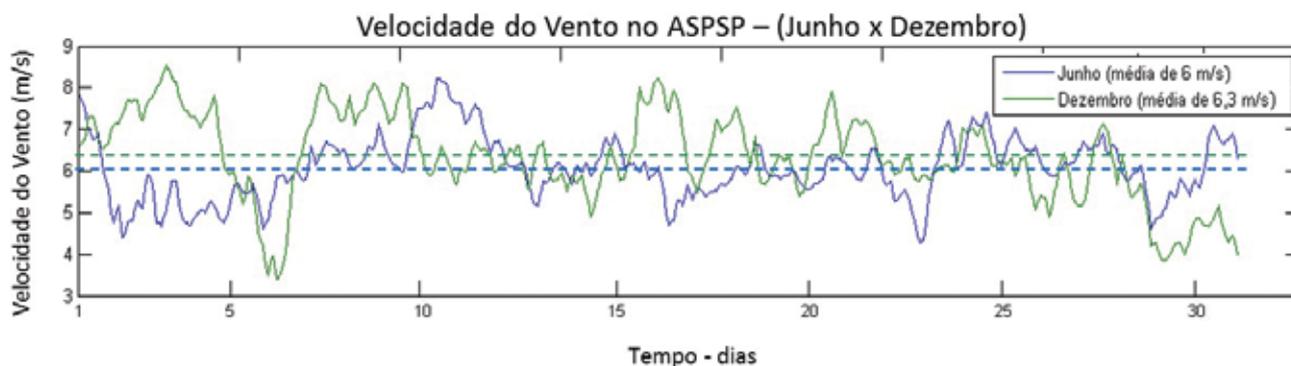


Figura 4. Análise temporal da velocidade do vento para o ASPSP. Linha azul para Junho com média de ~ 6 m/s, e a linha verde para Dezembro com média de ~ 6,3 m/s.

Figure 4. Wind speed temporal analysis for SPSPA. Blue line for June with a mean of 6 m / s, blue line for December with an average of 6.3 m / s.

Percebe-se na figura 4 que a média da velocidade dos ventos para os meses de Junho e para Dezembro é próxima, assim como mostrado qualitativamente na figura 3. Esse comportamento era esperado para a região do ASPSP, devido sua localização próxima a linha do equador, ou seja, exatamente entre os hemisférios norte e sul.

De acordo com Stutzmann *et al.*, (2009), existe uma forte relação entre a intensidade da geração de energia microsísmica no Oceano Atlântico com o período do inverno local do hemisfério norte (Dezembro, Janeiro e Fevereiro). Neste período, as fontes geradoras de energia microsísmica mais forte, registrada em estações próximas ao Oceano Atlântico, estão no hemisfério norte.

As figuras 5 e 6 mostram o espectro de energia microsísmica registrada para os meses de Junho e Dezembro, respectivamente, na estação sismológica

do ASPSP. Para os meses de Junho foi possível obter dados para os anos de 2012, 2013, 2014 e 2015 (Figuras 5a, 5b, 5c e 5d respectivamente). Já para os meses de Dezembro, foi possível apenas obter dados para os anos de 2012 e 2014 (Figuras 6a e 6b respectivamente). Isso infelizmente ocorreu, pois em determinados momentos a estação sismográfica do ASPSP não estava funcionando devido à problemas técnicos.

A intensidade da energia microsísmica nas figuras 5 e 6 são exibidas em forma de cores associadas à amplitude relativa do sinal, em decibéis (escala de cores, horizontal, abaixo das Figuras 5a e 5b). A escala de amplitude relativa (dB) encontra-se na faixa de (-150 à -50). As áreas de registro da energia microsísmica estão destacadas nos tons de cor amarelo e vermelho, onde quanto mais escuro a cor significa maior energia registrada.

Para ambos os meses (junho e dezembro), para frequências abaixo de 0,5 Hz (ver escala de frequências na vertical ao lado esquerdo das Figuras 5 e 6) podemos ver a concentração de energia dividida em duas bandas de frequências. A primeira, com menor destaque, entre 0,04 - 0,12 Hz que está associada aos microssismos primários (MP) e a segunda, com grande destaque, em 0,12 - 0,4 Hz que está associada aos microssismos secundários (MS).

A primeira análise a ser feita é que para os meses de Junho (Figura 5) é observada uma concentração de energia bem menor do que as observadas para os meses de Dezembro (figura 6), apesar de ambas indicarem as mesmas bandas de frequência. Logo, observa-se claramente uma diferença nos registros de energia microssísmica entre os meses de Junho (Figura 5) e Dezembro (Figura 6).

Essa diferença de intensidade de energia microssísmica entre os meses de Junho e Dezembro é bastante perceptível relacionada aos MS (banda de frequência 0,12 - 0,4 Hz). Apesar de também existir, essa variação não é claramente vista no registro de MP (banda de frequência 0,04 - 0,12 Hz).

Ao compararmos as figuras 6 com 3b, observamos que o aumento da energia microssísmica registrada no mês de Dezembro (Figura 6) é o mesmo período em que existe forte intensidade na velocidade dos ventos no Atlântico Norte (Figura 3b). Já quando comparamos as figuras 3a com figura 5, observamos que mesmo existindo uma grande intensidade da velocidade dos ventos no Atlântico Sul no mês de Junho (Figura 3a), isso não se traduz em um grande aumento na intensidade energia microssísmica (Figura 5) quando comparada ao mês de Dezembro (Figura 6).

Estas análises sugerem que as fontes de energia microssísmica registradas no ASPSP estão bem mais associadas ao Atlântico Norte do que ao Atlântico Sul, concordando assim com os resultados de Stutzmann (2009) de que os microssismos

registrados em estações próximas ao Oceano Atlântico tem maiores intensidades associadas a épocas de inverno no hemisfério norte.

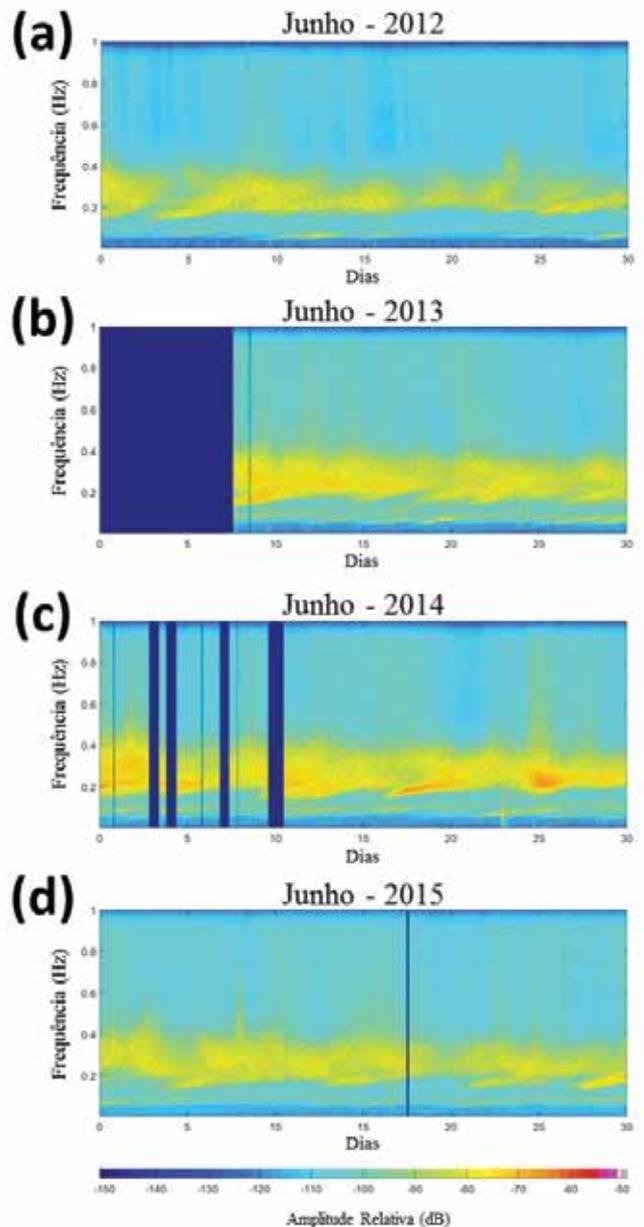


Figura 5. Intensidade da energia microssísmica registrada na estação sismológica do ASPSP para o mês de Junho. Cores quentes indicam maior intensidade da energia microssísmica. (a) 2012. (b) 2013. (c) 2014. (d) 2015.

Figure 5. Spectrogram of microseismic energy distribution for the SPSPA station for June. Warmer colors for greater microseismic energy intensity. (a) 2012. (b) 2013. (c) 2014. (d) 2015.

Como visto nas figuras 5 e 6, variação entre MS entre os meses de Junho e Dezembro é muito maior do que a variação dos microssismos primários (MP). Desta forma, com objetivo de quantificar o tamanho desta diferença entre a variação dos MP e MS, realizamos a correlação de Pearson entre os entre o MP e o MS.

A figura 7 mostra os valores calculados do coeficiente da correlação de Pearson (r) para as correlações de zero-lag entre o MP e MS. Os valores dos coeficientes da correlação de Pearson podem variar entre 0 e 1. O valor "1" indica que o MP e MS são perfeitamente correlacionados, ou seja, tem um comportamento semelhante de aumento ou diminuição (da propriedade correlacionada) ao longo do tempo, enquanto "0" significa que não existe correlação.

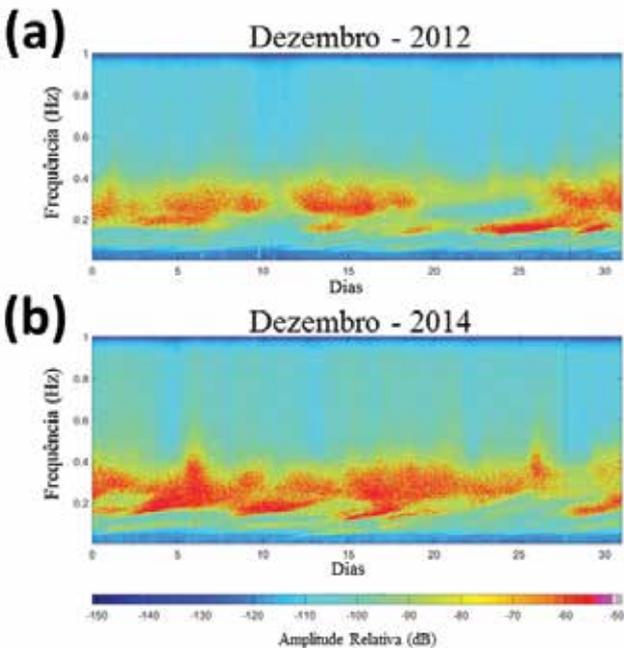


Figura 6. Intensidade da energia microssísmica registrada na estação sismológica do ASPSP para Dezembro. Cores quentes indicam maior intensidade da energia microssísmica. (a) 2012. (b) 2014.

Figure 6. Spectrogram of microseismic energy distribution for the SPSPA station for December. Warmer colors for greater microseismic energy intensity. (a) 2012. (b) 2014.

Coefficientes de Pearson (r) na correlação entre MP e MS

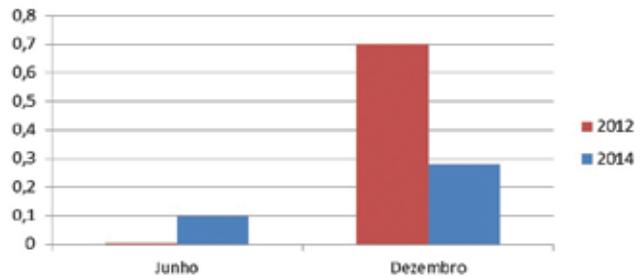


Figura 7. Coeficientes da correlação de Pearson entre microssismos primários (MP) e microssismos secundários (MS) para os meses analisados neste trabalho: junho e dezembro.

Figure 7. Pearson correlation values for the primary microseismic (PM) and secondary microseismic (SM) for the analyzed months in this work: June and December.

Para as análises dessa correlação de Pearson foram escolhidos os anos de 2012 e 2014 devido à disponibilidade de dados de Junho e Dezembro apenas para esses anos.

A figura 7 mostra valores do coeficiente de Pearson para 2012 (vermelho) e 2014 (azul). Para Junho de 2012 (0,0053) enquanto para Dezembro do mesmo ano é de (0,7); já para o ano de 2014 temos Junho (0,1) enquanto para Dezembro temos (0,28). Esses coeficientes podem ser analisados em dois pontos:

- I. Os menores valores do coeficiente de Pearson para Junho de cada ano indica a baixa correlação entre MP e MS para este mês, época de menor intensidade da velocidade dos ventos no hemisfério norte (ver Figura 3a).
- II. Os maiores valores do coeficiente de Pearson para Dezembro de cada ano indica a maior correlação entre MP e MS para este mês, época de alta intensidade da velocidade dos ventos no hemisfério norte (ver Figura 3b).

Essas análises ajudam a visualizar, de forma quantitativa, o que observamos na figura 5 e 6, ou seja, a grande diferença de variações de MP (pouca

variação) e MS (grande variação) entre meses de julho e dezembro.

A falta de correlação entre MP e MS é um indicador de que os sinais são gerados em diferentes locais de acordo com Bromirski *et al.* (2005). Sendo assim, nossas análises demonstram que em Junho, devido à menor correlação entre MP e MS, os MP e MS devem ser devido a diferentes fenômenos meteorológicos. Já para o mês de Dezembro, a maior correlação deve ser um indicativo de que MP e MS são frequentemente relacionadas com os mesmos fenômenos meteorológicos. Isto não quer dizer que a geração de ruído ocorre no mesmo local, mas que a atividade responsável pela geração da onda do mar tem a mesma origem.

Conclusões

Este trabalho teve como objetivo realizar uma análise comparativa entre os microssismos registrados na estação sismográfica do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ASPSP) e a intensidade da velocidade dos ventos ao longo do Oceano Atlântico. As análises foram feitas para os meses de Junho e Dezembro dos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015. Foram feitas análises quantitativas e qualitativas.

Conclui-se que existe uma relação direta entre a variação da intensidade da velocidade do vento e a variação da intensidade da energia microssísmica.

É importante notar que a baixa correlação entre microssismos primários (MP) e microssismos secundários (MS) é durante o verão do hemisfério norte (mês de Junho), quando existe menor intensidade da velocidade do vento no Atlântico Norte. Durante Dezembro, onde existe maior correlação, é inverno no hemisfério norte com forte intensidade da velocidade do vento.

Visto que a média de velocidade do vento no próprio ASPSP não é grande, intensifica a indicação

de que os principais fenômenos naturais fontes de microssismos registrados estão realmente distantes do ASPSP, principalmente no Atlântico Norte.

Portanto, os MS registrados no ASPSP demonstram fortes características associadas à intensidade da velocidade dos ventos no hemisfério norte, o que não é notado claramente com os MP. Outro fato importante é de que os microssismos registrados no ASPSP, apesar de sua localização entre os hemisférios norte e sul, não demonstram ser associadas à variação da velocidade dos ventos no hemisfério sul.

Mesmo sabendo que a correlação de Pearson (r) é um índice adimensional, que reflete a intensidade de uma relação linear entre os conjuntos de dados, onde seu coeficiente mede o grau da correlação linear entre duas variáveis quantitativas, foi utilizado com sucesso para o propósito das análises quantitativas deste trabalho. O sucesso foi devido o fato de nosso interesse ser simplesmente em demonstrar, de forma quantitativa, a boa ou má correlação entre as variáveis (MP e MS) que também pôde ser visualizada de forma qualitativa.

A estação sismológica do ASPSP é a única estação sismológica localizada na região equatorial no meio do oceano atlântico. Sendo assim, esta estação é de importância singular para a comunidade científica, pois devido sua localização singular, é possível desenvolver os mais diversos tipos de estudos no local, desde sismológicos, oceanográficos e climáticos (como foi o propósito deste trabalho).

Sendo assim, este trabalho tem o grande objetivo de servir como base para futuros trabalhos nesta área de correlações entre dados sismológicos e climáticos, não apenas com dados da estação sismológica do ASPSP, mas também em diversos outros locais (ilhas, arquipélagos ou continente) onde tenham estações sismológicas instaladas.

Este trabalho faz parte do Programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPÉLAGO) e

tem participação do Laboratório Sismológico do Departamento de Geofísica (LabSis) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte e da Marinha do Brasil por meio da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM).

Agradecimentos

Os autores agradecem a Marinha do Brasil por meio da Secretaria da Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (SECIRM) pelo apoio financeiro ao projeto do programa Arquipélago de São Pedro e São Paulo (PROARQUIPÉLAGO), ao Laboratório Sismológico do Departamento de Geofísica (LabSis) da Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN) pela disponibilidade dos dados da estação sismológica permanente do ASPSP e pela utilização do laboratório e do software MATLAB e SAC. Ao pesquisador Dr. Mario Pereira da Silva (UFRN) pelas valiosas discussões para o desenvolvimento deste projeto. Os autores também agradecem ao CNPq (402174/2012-7, 484441/2012-4 e 303817/2014-3) pela ajuda financeira em diversas etapas do projeto.

Referências Bibliográficas

- ANGULO, R.J., MARIA CRISTINA DE SOUZA, THOMAS F.C. CAMPOS, FRANCISCO H.R. BEZERRA, LUIZ ALBERTO FERNANDES, PAULO CÉSAR FONSECA GIANNINI, FABIO BETTINI PITOMBO and FERNANDO ALVIM VEIGA. **Evidence for Late Quaternary episodic uplift of the São Pedro and São Paulo Archipelago, Equatorial Atlantic**, *Quaternary International*, Volume 317, 13 December 2013, Pages 102-111, ISSN 1040-6182, <http://dx.doi.org/10.1016/j.quaint.2013.06.023>. 2013.
- ARDHUIN, F., E. STUTZMANN, M. SCHIMMEL, and A. MANGENEY. **Ocean wave sources of seismic noise**, *J. Geophys. Res.*, 116, C09004, doi:10.1029/2011JC006952. 2011.
- BONATTI, E. **Subcontinental mantle exposed in the Atlantic Ocean on St Peter-Paul islets**. *Nature*, v. 345, p.800-802, 1990.
- BROMIRSKI, P. D., AND F. K. DUENNEBIER. **The near-coastal microseism spectrum: Spatial and temporal wave climate relationships**. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 107, No. B8. (22 August 2002), 2166, doi:10.1029/2001jb000265. 2002.
- BROMIRSKI, P. D., F. K. DUENNEBIER, AND R. A. STEPHEN. **Mid-ocean microseisms**, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 6, Q04009, doi:10.1029/2004GC000768. 2005.
- BROMIRSKI, P. D., R. E. FLICK, AND N. GRAHAM. **Ocean wave height determined from inland seismometer data: Implications for investigating wave climate changes in the NE Pacific**, *J. Geophys. Res.*, 104(C9), 20753-20766, doi:10.1029/1999JC900156. 1999.
- BROMIRSKI, P. D.. **Vibrations from the "perfect storm"**, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 2(7), doi:10.1029/2000GC000119. 2001.
- CAMPOS *Et al.*. **Holocene tectonic uplift of the St Peter and St Paul Rocks (Equatorial Atlantic) consistent with emplacement by extrusion**. *Marine Geology* (Print), p. 177-186, 2010.
- CESSARO, R. K.. **Sources of primary and secondary microseisms**, *Bull. Seismol. Soc. Am.*, 84, 142-148. 1994.
- CHEVROT, S., SYLVANDER, M., BENAHMED, S., PONSOLLES, C., LEFÈVRE, J.M. AND PARADIS, D. **Source locations of secondary microseisms in western Europe: Evidence for both coastal and pelagic sources**. *Journal of Geophysical Research* 112: doi: 10.1029/2007JB005059. issn: 0148-0227. 2007.
- DORMAN, L. M., A. E. SCHREINER, L. D. BIBEE, AND J. A. HILDEBRAND. **Deep-water seafloor array observations of seismo-acoustic noise in the eastern Pacific and comparisons with wind and swell, in Natural Physical Sources of Underwater Sound**, edited by B. Kerman, pp. 165 - 174, *Springer*, New York. 1993.
- FIGUEIREDO FILHO, D., SILVA JUNIOR, J.. **Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r)**. *Revista Política Hoje, América do Norte*, 18, jan. 2010. (Disponível em: <http://www.revista.ufpe.br/politicohoje/index.php/politica/article/view/6>. Acesso em: 21 Set. 2014). 2010.
- FRIEDRICH, A., F. KRUGER, AND K. KLINGE. **Ocean-generated microseismic noise located with the Grafenberg array**, *J. Seismol.*, 2, 47-64. 1998.
- GERSTOFT, P., AND T. TANIMOTO. **A year of microseisms in southern California**, *Geophys. Res. Lett.*, 34, L20304, doi:10.1029/2007GL031091. 2007.

- GERSTOFT, P., P. M. SHEARER, N. HARMON, AND J. ZHANG. **Global P, PP, and PKP wave microseisms observed from distant storms**, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L23306, doi:10.1029/2008GL036111. 2008.
- GROB, M., MAGGI, A., STUTZMANN, E.. **Observations of the seasonality of the Antarctic microseismic signal, and its association to sea ice variability**, *Geophys. Res. Lett.*, Vol. 38, L11302, doi:10.1029/2011GL047525. 2011.
- HASSELMANN, K.. **Statistical analysis of the generation of microseisms**. *Rev. Geophys.* 1: 177–210. 1963.
- HAUBRICH, R. A., AND K. MCCAMY. **Microseisms: Coastal and Pelagic Sources**. *Rev. Geophys.*, 7(3), 539–571. 1969.
- HAUBRICH, R. A., W. H. MUNK & F. E. SNODGRASS. **Comparative spectra of microseisms and swell**. *Bull. Seism. Soc. Am.* 53: 27–37. 1963.
- HOLCOMB, L. GARY. **Microseisms: A twenty-six-second spectral line in long-period earth motion**. *Bulletin of the Seismological Society of America*, August 1980, v. 70, p. 1055-1070. 1980.
- HOLLIDAY, N. P., M. J. YELLAND, R. PASCAL, V. R. SWAIL, P. K. TAYLOR, C. R. GRIFFITHS, AND E. KENT. **Were extreme waves in the Rockall Trough the largest ever recorded?** *Geophys. Res. Lett.*, 33, L05613, doi:10.1029/2005GL025238. 2006.
- JEFFREYS, H.. **On the Surface Waves of Earthquakes**. *Geophysical Journal International*, 1: 282–292. doi: 10.1111/j.1365-246X.1925.tb05376.x. 1925.
- KINSMAN, BLAIR. **Wind Waves: Their Generation and Propagation on the Ocean Surface**. *Prentice-Hall, Inc., Englewood Cliffs, New Jersey*, 1965, p. 23. 1965.
- LACOSS, R. T., E. J. KELLY, AND N. M. TOKSO. **Estimation of seismic noise structure using arrays**, *Geophysics*, 34, 21–38. 1969.
- LONGUET HIGGINS, M. S.. **A Theory on the origin of microseisms**. *Philos. Trans. R. Soc. Lond. A.* 243: 1–35. 1950.
- MIGUENS, ALTINEU P.. **Navegação Costeira, Estimada e em Águas Restritas**. *Volume I. Diretoria de Hidrografia e Navegação da Marinha*. Rio de Janeiro, 1995.
- QUEIROZ, DANIEL É. DE; DO NASCIMENTO, ADERSON F.; SCHIMMEL, MARTIN. **Microseismic noise in the Saint Peter and Saint Paul Archipelago, equatorial Atlantic**. *Journal of South American Earth Sciences*, v. 80, p. 304-315, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.09.035>. 2017.
- SCHIMMEL, M., E. STUTZMANN, F. ARDHUIN, AND J. GALLART. **Polarized Earth's ambient microseismic noise**, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, 12, Q07014, doi:10.1029/2011GC003661. 2011.
- SECIRM. **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 anos de Estação Científica / Orgs. Danielle de Lima Viana... [et al.]**. -- Brasília, DF. 2009.
- SHAPIRO, N.M., RITZWOLLER, M.H., BENSEN, G.D.. **Source location of the 26 sec microseism from cross-correlations of ambient seismic noise**, *Geophys. Res. Lett.*, 33, 18, DOI: 10.1029/2006GL027010. 2006.
- STUTZMANN, E., SCHIMMEL, M., PATAU, G., MAGGI, A.. **Global climate imprint on seismic noise**, *Geochem. Geophys. Geosyst.*, Vol. 10, No. 11, Q11004, doi:10.1029/2009GC002619. 2009.
- TAPLEY, W.C., TULL, J.E.. **SAC-Seismic Analysis Code, Users Manual, Revision 4**. *Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA*. 278 pp. 1992.
- TOLMAN, H. L.. **User manual and system documentation of WAVEWATCH III version 3.14**. *NOAA / NWS / NCEP / MMAB Technical Note 276*, 194 pp.+ Appendices. 2009.
- WEBB, S. C.. **The Earth's hum: the excitation of Earth normal modes by ocean waves**, *Geophys. J. Int.*, Vol. 174, pp. 542-566, doi:10.1111/j.1365-246X.2008.03801.x. 2008.
- WEBB, S. C.. **The equilibrium oceanic microseism spectrum**, *J. Acoust. Soc. Am.*, Vol. 92, No. 4-1, pp. 2141-2158, doi:10.1121/1.405226. 1992.
- WELCH, P.D.. **"The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra: A Method Based on Time Averaging Over Short, Modified Periodograms,"** *IEEE Trans. Audio Electroacoustics*, Vol. AU-15 (June 1967), pp.70-73. 1967.
- YINGJIE XIA, SIDAO NI, AND XIANGFANG ZENG, **Twin enigmatic microseismic sources in the Gulf of Guinea observed on intercontinental seismic stations** *Geophys. J. Int.* first published online April 4, 2013 doi:10.1093/gji/ggt076. 2013.
- ZHANG, H.-M., J.J. BATES, AND R.W. REYNOLDS. **"Assessment of composite global sampling: Sea surface wind speed"**. *Geophysical Research Letters*, VOL. 33, L17714, doi:10.1029/2006GL027086. 2006.

Propriedades físicas e biogeoquímicas da região oceânica circundante ao Arquipélago de São Pedro e São Paulo

Moacyr Araujo^{1,2}
Christine C. Tchamabi^{1,3}
Marcus Silva¹
Bernard Boulès^{3,4}
Julia Araujo¹
Carlos Noriega^{1,2}

18

Abstract

The influence of the presence of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (SPSPA, 00°55'06"N-29°20'48"W) on the physical-biogeochemical structure in the tropical Atlantic was investigated using in situ data, satellite observations, and mathematical modeling and numerical simulation efforts. Initially, the Regional Ocean Modeling System (ROMS) was used with high horizontal resolution (1/260°) to simulate climatological scenarios to examine the effects of island on circulation and thermohaline structures. Results were validated by comparing model outputs to observing data, indicating that instabilities generated by the obstacle give rise to subsurface perturbations downstream of SPSPA in the wake of Equatorial Undercurrent (EUC). These mesoscale structures, however, have no significant influence on the thermodynamic properties of the waters around the archipelago. The analysis of observations and biogeochemical model simulations (ROMS-PISCES, Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies) confirm physical modelling finds, indicating that the presence of SPSPA does not induce changes associated to orographic resurgence able to interfere over the nutrient cycle and carbonate system parameters. Thus, the seasonal variability of the physical-biogeochemical properties and air-sea CO₂ exchange in the SPSPA region is shown to be predominantly controlled by the natural variation of the radiative forcing and the large-scale circulation observed in the western portion of the equatorial Atlantic.

Introdução

As ilhas oceânicas cobrem cerca de 3% da superfície da Terra e são ambientes particulares, pois seu isolamento geográfico as possibilita abrigar uma biodiversidade especial, geralmente com muitas espécies endêmicas (FONSECA *et al.*, 2006). Estes ambientes são conhecidos como verdadeiros viveiros da vida marinha, sobretudo quando se encontram inseridos em regiões oceânicas oligotróficas. Essa particularidade é devida, entre outros, às alterações do meio físico no entorno das ilhas, que terminam por promover o enriquecimento de nutrientes dentro da zona fótica, favorecendo assim o aumento da produtividade.

No meio oceânico, as ilhas e montes submarinos são conhecidos por alterar a circulação oceânica. A interação entre as anomalias na topografia, a dinâmica oceânica local, bem como as forçantes atmosféricas, geram perturbações à jusante (*downstream*) das ilhas. Os turbilhões e recirculações de mesoescala que ocorrem nessas ilhas e montes submarinos deslocam águas ricas da subsuperfície para as camadas mais superficiais, aumentando assim a produção primária e conseqüentemente melhorando os fluxos de massa e energia através da cadeia trófica.

-
- 1 Universidade Federal de Pernambuco (moa.ufpe@gmail.com);
 - 2 Rede Brasileira de Pesquisas em Mudanças Climáticas Globais – Rede CLIMA;
 - 3 Institut de Recherche Pour le Développement (IRD), LEGOS, Toulouse, France;
 - 4 Chair in Mathematical Physics and Applications (ICMPA-UNESCO Chair), UAC, Cotonou, Benin.

No Atlântico tropical oeste, uma região oceânica fortemente oligotrófica, existem ilhas brasileiras que são conhecidas como “verdadeiros *hotspots* da vida marinha no deserto oceânico” (HAZIN, 1993). Estes sistemas particulares representam desafios sociais e econômicos do patrimônio marinho brasileiro. Além da ressurgência de quebra de talude, a produtividade da Zona Econômica Exclusiva (ZEE) pode ser elevada por ressurgências orográficas mais localizadas, verificadas em algumas dessas ilhas ou bancos oceânicos (EKAU e KNOPPERS, 1999; TRAVASSOS *et al.*, 1999).

A partir de dados observados *in situ*, Macedo *et al.* (1998), por exemplo, evidenciaram a ocorrência de pequenas regiões de ressurgência em torno das ilhas e montes submarinos da ZEE Nordeste do Brasil. Mafalda *et al.* (2004) observaram também altos valores de biomassa primária e, conseqüentemente, de biomassa zooplânctônica nas ilhas e montes submarinos da região oceânica do Nordeste do Brasil. Essas observações motivaram a realização de estudos mais detalhados nessas ilhas, visando sobretudo obter um melhor conhecimento dos diversos processos físicos e biogeoquímicos responsáveis por estas particularidades.

Neste trabalho focamos as investigações sobre as regiões marinhas adjacentes ao sistema tropical brasileiro Arquipélago de São Pedro e São Paulo (referenciado a seguir por ASPSP) - 00°55'06"N e 29°20'48"W (Figura 1), inserido na ZEE Nordeste do Brasil, historicamente reconhecida como uma região oligotrófica e mesotrófica (EKAU e KNOPPERS, 1999), e onde a estabilidade induzida pela estratificação térmica acentuada mantém a Água Superficial Tropical (TSW - *Tropical Surface Water*) nas camadas superiores do oceano, enquanto a Água Central (CW - *Central Water*) permanece abaixo, inibindo (e mesmo limitando) a ocorrência de possíveis eventos de ressurgência.

A dinâmica oceânica agindo sobre o ASPSP está condicionada à influência da SEC (*South Equatorial*

Current) e da EUC (*Equatorial Undercurrent*) que fluem em sentidos contrários. Ademais, o ASPSP possui relevo peculiar, apresentando-se como um monte submarino que se eleva de profundidades maiores do que 3000 m, aflorando à superfície na forma de ilhas rochosas (CINTRA *et al.*, 2015). A interação das correntes com esta topografia pode ocasionar processos físicos tipicamente observados em montes submarinos, produção de vórtices, com zonas de elevada enstrofia, reduções de velocidades, perturbações da estrutura termohalina e possíveis mecanismos de ressurgência locais. O objetivo principal deste trabalho foi investigar a influência da presença do ASPSP nos padrões de circulação de mesoescala nas regiões oceânicas circundantes, com foco na identificação das modificações de suas propriedades termodinâmicas e biogeoquímicas. Para tal, os padrões e variabilidade sazonal da recirculação observados são comparados e analisados aos resultados das simulações numéricas climatológicas realizadas com o modelo *Regional Ocean Modelling System* (ROMS; SHCHEPETKIN e MCWILLIAMS, 2005), acoplado às rotinas biogeoquímicas do modelo *Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies* (PISCES; AUMONT e BOPP, 2006).

Metodologia

Cruzeiros Oceanográficos

O primeiro conjunto de informações que serviram para verificar o desempenho dos modelos, no que se refere à variável de estado Clorofila-a, é oriundo das campanhas de mar realizadas em janeiro-fevereiro de 1995 (SMOCKS – *Seamounts Oceanic Islands and Saint Peter and Saint Paul Archipelago-LEG4/1*), no âmbito do Projeto de Cooperação Brasil-Alemanha JOPS-II – *Joint Oceanographic Projects – II*. Os dados de Clorofila-a foram obtidos realizando-se estimativas a partir dos perfis publicados em (VON BRÖCKEL e MEYERHÖFER, 1999). A segunda fonte de informações que

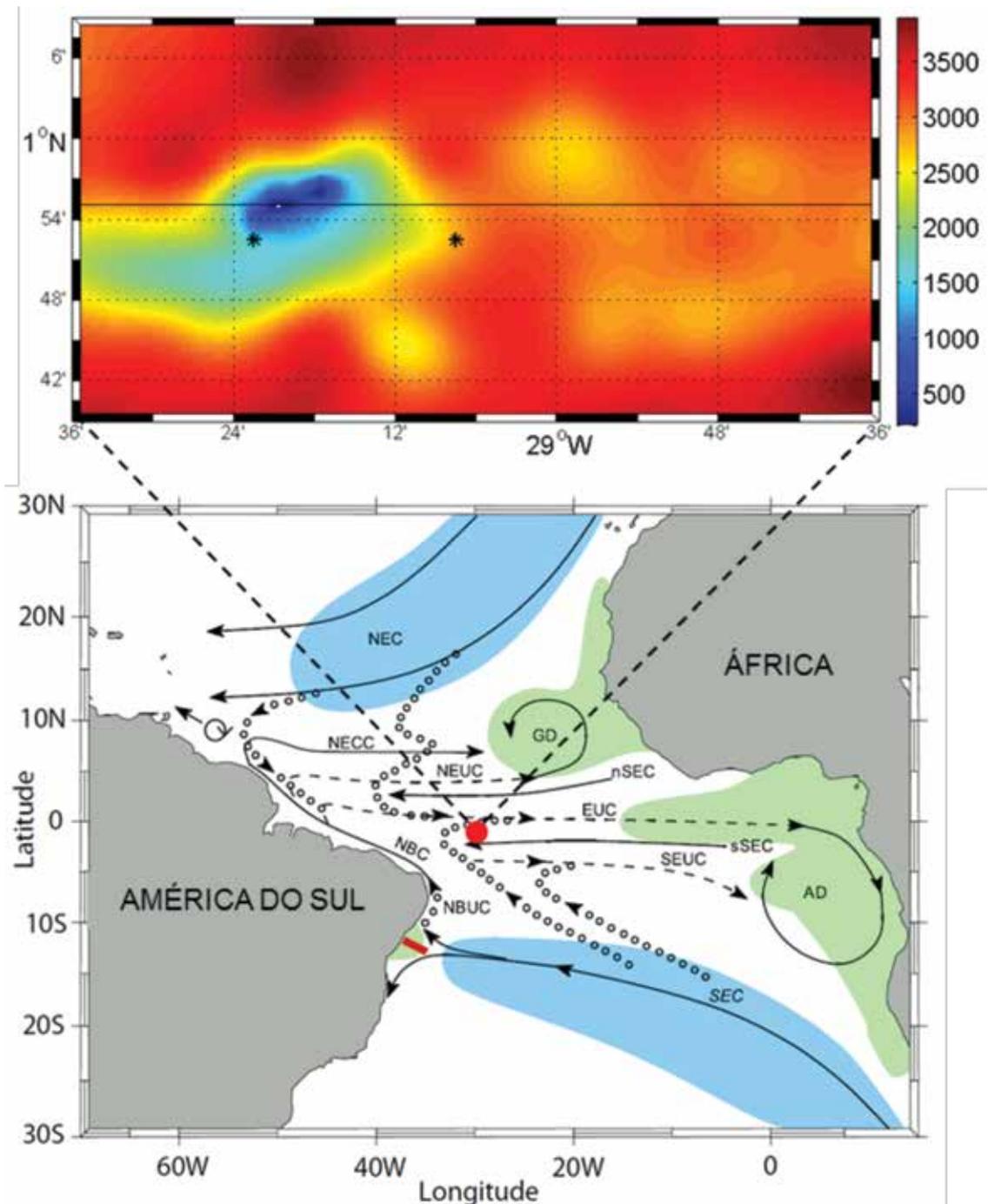


Figura 1. Localização e batimetria [m] da área simulada ao redor do Arquipélago de São Pedro e São Paulo (ponto vermelho), influência simultânea da Corrente Sul Equatorial (SEC – *South Equatorial Current*) e da Subcorrente Equatorial (EUC – *Equatorial Undercurrent*). As estrelas e a linha horizontal preta (painel superior) representam os locais e o transecto zonal onde foram traçados os perfis verticais para as análises dos resultados.

Figura 1. Localization and bathymetry [m] of the Saint Peter and Saint Paul Archipelago (red dot) on the simulation domain, under simultaneous influence of the South Equatorial Current (SEC – *South Equatorial Current*) and the Equatorial Undercurrent (EUC – *Equatorial Undercurrent*). The stars and the horizontal black line (upper panel) represent stations and zonal transect where results were analysed.

foi utilizada nas comparações e validação do modelo advém do Programa REVIZEE-SCORE/NE “Programa de Avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva – Sub-comitê Região Nordeste” (BECKER *et al.*, 2009).

As campanhas utilizadas nas comparações com os resultados numéricos foram a NE-II (verão austral) e NE-III (outono austral). As posições das estações JOPS-II e REVIZEE-SCORE/NE, utilizadas nas comparações, são apresentadas na figura 2 a seguir.

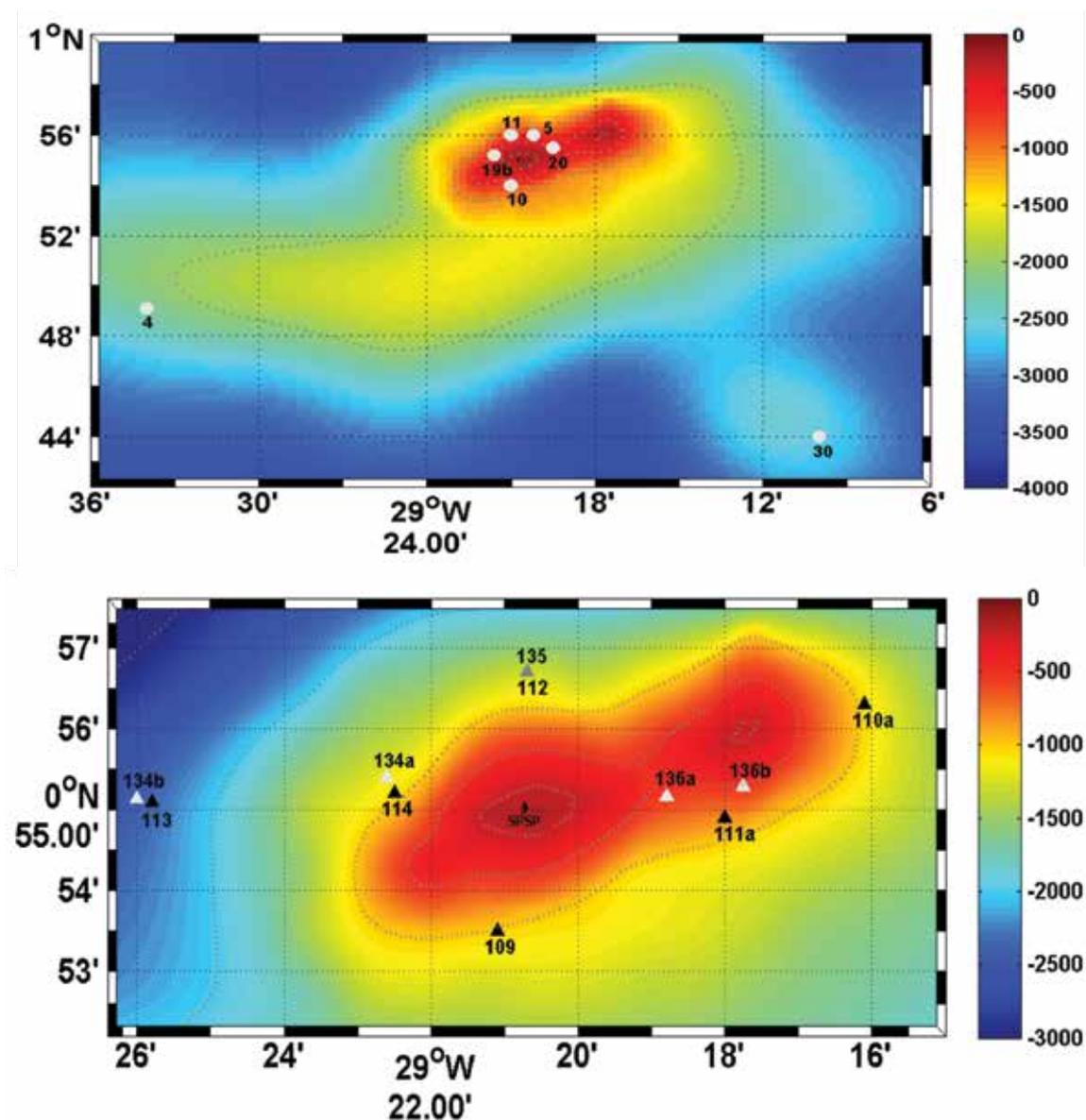


Figura 2. Posição das estações JOPS-II (painel superior) e REVIZEE-SCORE/NE (painel inferior: estações NE-II em branco; estações NE-III em preto; estações NEII e NEIII coincidentes em cinza).

Figura 2. Distribution of sampling stations during JOPS-II (upper panel), REVIZEE-SCORE/NE (lower panel: NE-II stations in white; NE-III stations in black; coinciding NEII and NEIII stations in gray).

Bases de Dados Remotos

Na superfície, usamos o cisalhamento do vento calculado a partir das observações do *Quick Scatterometer* (QuikSCAT) que são produtos mensais climatológicos da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA). Esses dados estão disponíveis numa malha global regular de 0,25°, num intervalo de tempo compreendido entre setembro/1999 a agosto/2007 (RISIEN e CHELTON, 2008). O fluxo de calor, de evaporação e de precipitação derivam do produto climatológico *Comprehensive Ocean Atmosphere Data Set* (COADS; DA SILVA *et al.*, 1994) com uma resolução espacial de 0,5°. Contudo, os dados da temperatura da superfície do mar com uma resolução mais fina (~9,28 km) que COADS, provenientes de *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR) - *Pathfinder* de 1985 a 1997 foram usados no cálculo do fluxo do calor para melhorar a solução numérica.

A variabilidade da temperatura da superfície do mar foi avaliada a partir de diferentes bases: *Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS) e *World Ocean Atlas* (WOA). Estes dados permitiram verificar o desempenho do modelo em reproduzir a evolução sazonal da Temperatura da Superfície do Mar (TSM) da região de estudo. Neste trabalho foi utilizada a TSM do sensor MODIS-Aqua, que é uma climatologia dos dados mensais sobre uma malha regular de 4 km de resolução em longitude e em latitude. MODIS está disponível em gdata1.sci.gsfc.nasa.gov/ para o oceano global. A circulação média da região de estudo é avaliada usando para comparação as observações de corrente de superfície do *Global Drifter Center of the National Oceanic and Atmosphere Administration* (www.aoml.noaa.gov/phod/dac/dacdata.html). O produto (referenciado por DRIFTER) é obtido a partir da observação das velocidades das correntes de superfície provenientes de derivadores rastreados por satélite. Esses dados, com uma resolução espacial de 0,5°, fornecem os campos climatológicos mensais da circulação superficial (LUMPKIN e JOHNSON, 2013).

O WOA, conhecido geralmente como a "Climatologia de Levitus", é um conjunto de dados de oito propriedades (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, percentagem de saturação de oxigênio, aparente utilização do oxigênio, fosfato, silicato e nitrato) da água de mar. O produto aqui é disponibilizado pelo *National Oceanographic Data Center of the National Oceanic and Atmospheric Administration* (NODC/NOAA).

Neste trabalho utilizamos a versão WOA2013, que é o produto de maior resolução espacial da base WOA (www.nodc.noaa.gov/OC5/woa13/pubwoa13.html). Esse campo de dados é usado tanto para inicializar o modelo físico, quanto para a avaliação dos perfis verticais da temperatura e da sazonalidade da temperatura da superfície do mar do modelo.

Para os dados de biogeoquímica, outra climatologia global denominada (*World Ocean Atlas Global dataset for biogeochemical PISCES data* (WOAPISCES), se mostrou bastante útil. A base WOAPISCES fornece os dados globais de ferro, silicato, oxigênio, fosfato carbono orgânico dissolvido, carbono inorgânico dissolvido e de alcalinidade. Para mais informações, consultar AUMONT e BOPP (2006) para as variáveis do ferro e de carbono orgânico dissolvido, e Goyet *et al.* (1999) para o carbono inorgânico dissolvido e alcalinidade. Esse conjunto de dados WOAPISCES foi utilizado para alimentar os limites laterais do modelo acoplado físico-biogeoquímico. É também utilizado para comparar o nitrato simulado pelo modelo. Os dados da Clorofila-a foram obtidos a partir de duas bases de dados: (a) MODIS-Aqua (giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/), com uma resolução horizontal de 4km; e (b) *Sea-Viewing Wide Field-of-View Sensor* (SeaWiFS, (giovanni.sci.gsfc.nasa.gov/giovanni/)). Os dados MODIS-Aqua trazem a climatologia mensal a partir de julho de 2002 para todo o oceano global. O segundo conjunto de dados mensais, SeaWiFS, está disponível em

uma grade de 8km de resolução, para o período novembro/1997 a dezembro/2010. Esses dados permitiram, além de representar a variabilidade espacial da clorofila na área de estudo, avaliar sua Chlorofila-a calculada pelo modelo.

Ainda com o objetivo de avaliar os resultados das simulações dos parâmetros do sistema carbonato foram utilizadas as informações disponibilizadas na Base de dados *Surface Ocean Carbon Atlas – SOCAT* (BAKKER *et al.*, 2016).

Modelos ROMS e PISCES

O modelo *Regional Ocean Modelling System* (ROMS; SHCHEPETKIN e MCWILLIAMS, 2005) é um “descendente” da evolução do código original *Semi Spectral Primitive Equation Model* (SPEM). Este foi originalmente desenvolvido na Universidade de Rutgers, e caracteriza-se pela hipótese de superfície rígida (*rigid lid assumption*) em coordenadas sigma clássicas.

Mais tarde, uma versão melhorada do SPEM, denominada *S-Coordinate Rutgers University Model* (SCRUM; SONG e HAIDVOGEL, 1994) foi desenvolvida. Ela integra uma superfície livre e as coordenadas verticais sigma generalizadas que permitem aumentar a resolução vertical na superfície e no fundo. Isto permite ao modelo representar melhor ambas as camadas de mistura (superfície e de fundo), levando a uma resolução homogênea na camada de superfície.

O ROMS tem sido configurado e empregado em diferentes regiões do mundo (HAIDVOGEL *et al.*, 2000; MALANOTTE-RIZZOLI *et al.*, 2000; PENVEN *et al.*, 2001; LUTJEHARMS *et al.*, 2003; SILVA *et al.*, 2009a,b; CINTRA *et al.*, 2015; TCHAMABI *et al.*, 2017a,b). Ele oferece a possibilidade de implantar traçadores passivos e flutuadores lagrangeanos. A isso, acrescenta-se a possibilidade da integração dos módulos de disciplinas dependentes da

hidrodinâmica como a interação onda-correntes, a sedimentologia, e a biogeoquímica. Para as nossas simulações, nós utilizamos a versão do ROMS desenvolvida no *Institut de Recherche pour le Développement* (IRD). Nesta, o conjunto de rotinas computacionais de processamento/visualização ROMSTOOLS (PENVEN *et al.*, 2008) é utilizado para a configuração inicial e visualização dos resultados.

O modelo *Pelagic Interactions Scheme for Carbon and Ecosystem Studies* (PISCES; AUMONT e BOPP, 2006), que foi acoplado ao modelo físico ROMS, supõe que o crescimento do fitoplâncton é diretamente limitado pela disponibilidade em nutrientes. Sua estrutura considera diferentes compartimentos/variáveis de estado biogeoquímicos (Figura 3), quais sejam: cinco nutrientes (fosfato, nitrato, amônio, silicato, ferro), duas classes de tamanho de fitoplâncton (nanofitoplâncton e diatomácea), duas classes de tamanho de zooplâncton (microzooplâncton e mesozooplâncton) e duas classes de tamanho de detritos. Esta bateria de simulações visou, principalmente, o ajuste de taxas e coeficientes que determinam o fluxo de matéria entre os diversos compartimentos do modelo (ex.: taxa de crescimento planctônico, taxas de oxidação N e P, etc.).

As simulações numéricas realizadas no ASPSP tiveram resolução horizontal de $1/260^\circ$. A necessidade de se trabalhar com discretizações espaciais (e, portanto, temporais) tão elevadas, associadas às rotinas biogeoquímicas (acoplamento física-biogeoquímica), aumentou consideravelmente o esforço computacional.

A área de estudo estendeu-se entre 29.5°W – 28.5°W de longitude e 0.6°N – 1.15°N de latitude (Figura 1), que foi discretizada com uma resolução horizontal de $1/260^\circ$ (i.e., aproximadamente 425 m) e com 40 camadas verticais sigmas ao longo da profundidade. Essa fina resolução espacial permitiu evidenciar os efeitos da presença do ASPSP.

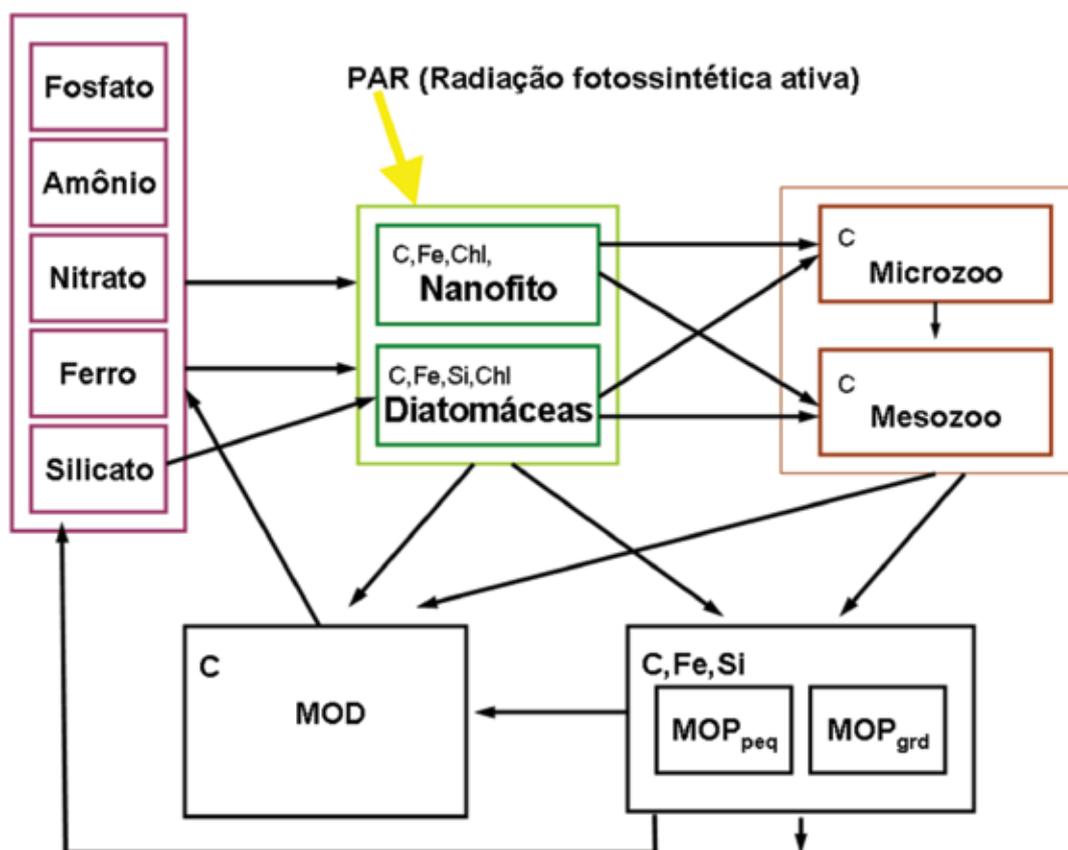


Figura 3. Variáveis de estado e conexões no modelo PISCES. MOD = Matéria Orgânica Dissolvida. MOP = Matéria Orgânica Particulada (www.lodyc.jussieu.fr/~aumont).

Figura 3. State variables and connections in PISCES model. MOD = Dissolved Organic Matter. MOP = Particulate Organic Matter (www.lodyc.jussieu.fr/~aumont).

Resultados e Discussões

A figura 4 mostra a climatologia mensal média da Temperatura da Superfície do Mar na área de estudo baseada nas saídas do modelo (linha azul), MODIS (linha preta) e WOA (linha vermelha). Um ciclo sazonal pronunciado é observado, resultante, entre outros, da variabilidade espaço-temporal da ação acoplada vento-superfície de acordo com a migração sazonal da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT; WALISER e GAUTIER, 1993; HOUNSOU-GBO *et al.*, 2015). As observações e os resultados do modelo apresentam um aumento da TSM de setembro a abril seguido por um

decréscimo de maio a agosto. A estação mais quente ocorre de março a abril, quando é verificada a presença da Piscina Quente de Sudoeste do Atlântico Tropical (*Southwestern Tropical Atlantic Warm Pool - SAWP*), com valores de TSM >28°C (SILVA *et al.*, 2009a,b; HOUNSOU-GBO *et al.*, 2015; CINTRA *et al.*, 2015), e pico de aquecimento em abril. Em contraste, a estação mais fria ocorre entre agosto e novembro (TSM=26,5°C), com os valores mínimos em agosto. Verifica-se que nas épocas de extremos de temperatura, o modelo ROMS apresenta viés médio de cerca de 0,3°C com relação

aos dados observados. Esses comportamentos podem ser explicados pelo fato de que essas diferentes climatologias foram geradas a partir de diferentes séries históricas de dados; a climatologia de WOA contém dados a partir de 1900, enquanto MODIS é baseado num conjunto de 10 anos de dados (2003-2012).

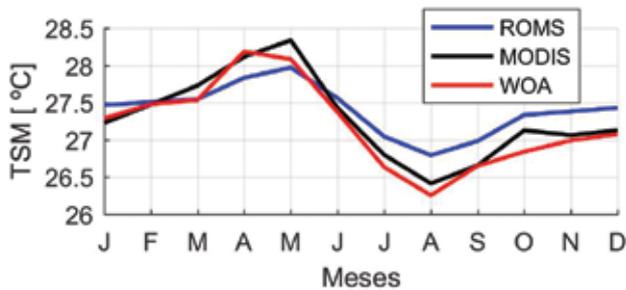


Figura 4. Evolução sazonal da TSM média no domínio simulado: ROMS (linha azul); WOA (linha vermelha); e MODIS (linha preta).

Figura 4. Seasonal evolution of SST averaged over the simulation domain: ROMS (blue line); WOA (red line); and MODIS (black line).

Os perfis verticais da temperatura ao longo dos primeiros 200m de profundidade são representados na figura 5, para os dois diferentes locais indicados no painel superior da figura 1. Esses locais correspondem às posições mais próximas das ilhas do ASPSP, onde os dados de WOA são disponíveis. Os perfis simulados e observados são apresentados para a estação mais quente (abril-maio-junho, cor vermelha) e a estação mais fria (julho-agosto-setembro, cor azul). O modelo e as observações se mostram em boa concordância, com o mínimo viés na estação quente. O limite superior da termoclina é mais profundo na estação fria e fica em torno dos 50 m. As observações e os resultados do modelo confirmam que as camadas superiores do oceano na área de estudo são ocupadas pelo Água Tropical de Superfície (TSW - *Tropical Surface Water*) quente e Água Central (CW - *Central Water*) mais abaixo (STRAMMA e SCHOTT, 1999).

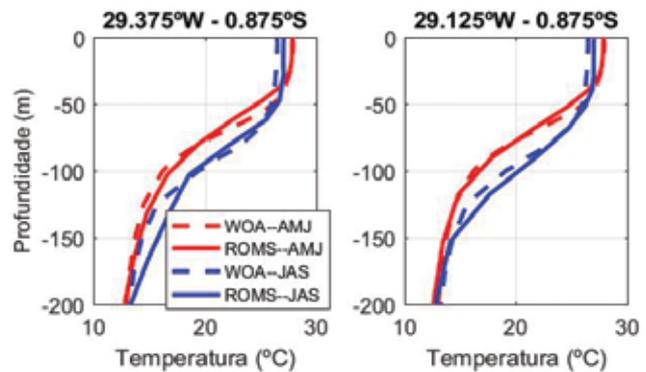


Figura 5. Perfis verticais da temperatura [°C] nos dois pontos nas proximidades do ASPSP (estrelas indicadas na Figura 1). A linha sólida/tracejada corresponde aos resultados do modelo/Dados WOA. Os perfis médios para a estação mais quente (AMJ = Abril-Maio-Junho) são traçados em cor vermelha e os da estação mais fria (JAS = Julho-Agosto-Setembro) são representados em linha azul.

Figura 5. Vertical distribution of temperature [°C] in two stations close to SPSPA (stars indicated on Figura 1). Solid/dashed lines correspond to model results/WOA data. The mean profiles obtained during warmer season (AMJ = April-May-June) are in red and cold season (JAS = July-August-September) are represented in blue.

A evolução sazonal do principal fluxo atuando na região, a Subcorrente Equatorial (EUC – *Equatorial Undercurrent*), com seu núcleo a 80m de profundidade, é apresentada na figura 6. Os resultados do modelo confirmam que a EUC é mais intensa entre março e julho (>0,5 m/s) e relativamente mais fraca no restante do ano. De fato, a intensificação da EUC coincide com o relaxamento da SEC na superfície, o que foi evidenciado em observações e trabalhos numéricos anteriores (BRANDT *et al.*, 2006; ARAUJO e CINTRA, 2009; ARAUJO *et al.*, 2009a; 2009b; CINTRA, 2010).

As seções verticais da corrente zonal no transecto zonal atravessando o ASPSP (ver Figura 1) exibem um fluxo oeste bem raso na superfície. Trata-se do ramo norte da Corrente Sul equatorial (nSEC – *north South Equatorial Current*). O fluxo para leste intenso em subsuperfície (EUC – *Equatorial Undercurrent*) é também evidenciado na figura 7.

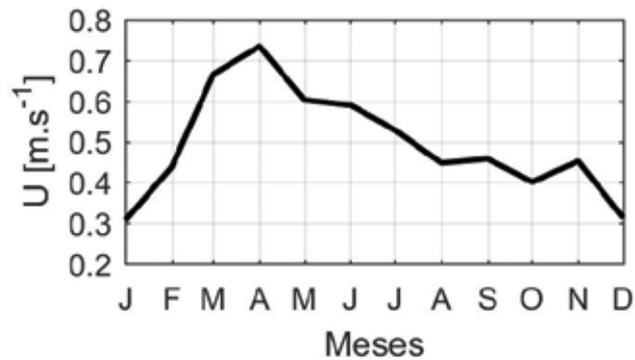


Figura 6. Evolução sazonal da média da corrente EUC (Subcorrente Equatorial, ms^{-1}) a 80 m de profundidade (profundidade do núcleo) no domínio de integração do modelo.

Figura 6. Seasonal evolution of the EUC (Equatorial Undercurrent, ms^{-1}) at 80 m core depth averaged over the model domain.

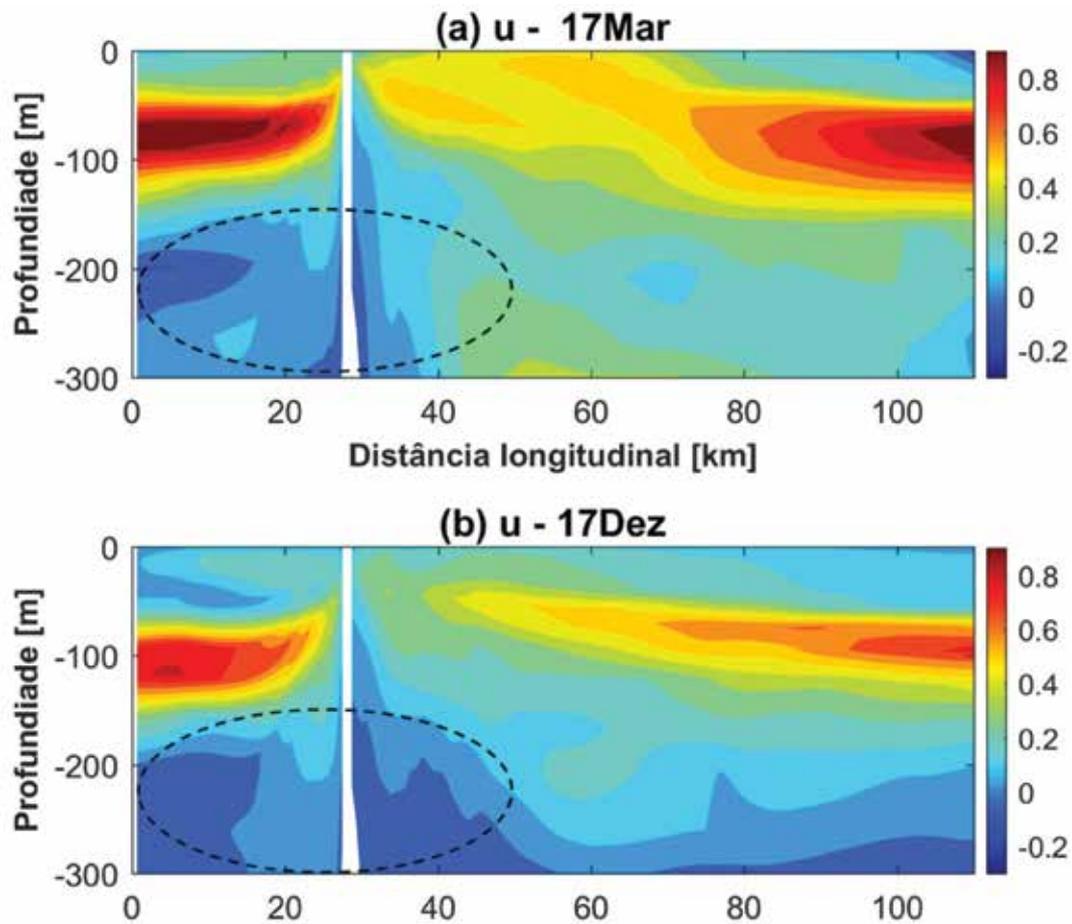


Figura 7. Seção vertical da corrente [ms^{-1}] no transecto zonal (painel superior da Figura 1) em: (a) Março (período de fortalecimento da Subcorrente Equatorial); e (b) Dezembro (período de enfraquecimento da Subcorrente Equatorial). As elipses tracejadas indicam as regiões subsuperficiais onde se verificam reduções de velocidade zonal induzidas pela presença do ASPSP.

Figura 7. Vertical current [ms^{-1}] profile along the zonal section (upper panel in Figura 1) during: (a) March (stronger Equatorial Undercurrent); e (b) December (weaker Equatorial Undercurrent). Dashed ellipses indicate subsurface regions of low zonal currents induced by the presence of SPSPA.

Ao analisar a estrutura vertical média do campo zonal de velocidades, percebe-se que a EUC é forçada a se dividir quando encontra o ASPSP, e gera alguma instabilidade, sobretudo aos 80 m de profundidade, onde se espera que ocorram as velocidades mais intensas. Pode-se ainda verificar a existência de regiões de baixa velocidade resultantes da interação da corrente superficial com o ASPSP, ocorrendo a leste e a oeste do mesmo (elipses tracejadas na Figura 7). Nessa faixa, junto ao arquipélago, as velocidades zonais são reduzidas de intensidade, passando

de cerca de $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ para valores entre $0,03$ e $0,08 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. As velocidades da EUC em 80 m de profundidade estiveram próximas a $0,4 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ e uma zona de baixa velocidade foi verificada a leste do ASPSP decorrente do atrito com o monte submarino, apontando velocidades da ordem de $0,1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ nas proximidades do arquipélago e aumentando na direção leste, de maneira a recompor a estrutura anterior à influência do monte. Ainda em concordância com as observações dos cruzeiros oceanográficos (JOPS-II e REVIZEE-SCORE/NE), os resultados numéricos da figura 7

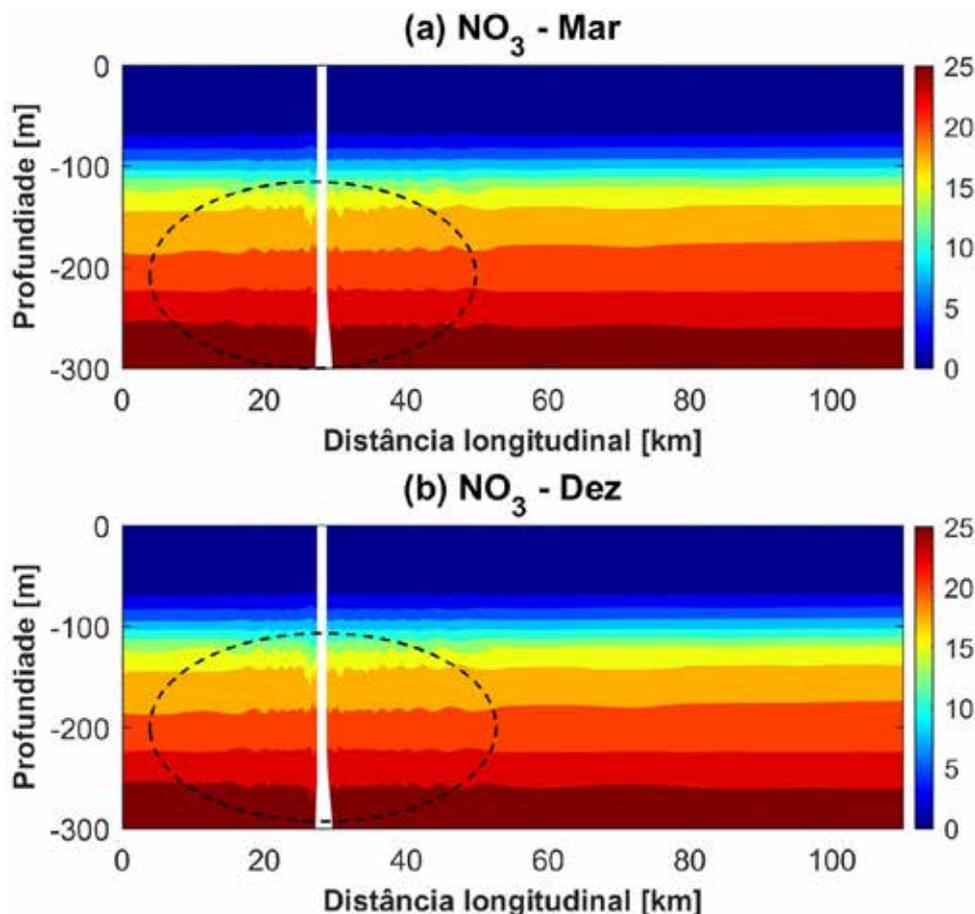


Figura 8. Seção vertical de concentração de Nitrato [$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$] no transecto zonal (painel superior da Figura 1) em: (a) Março (período de fortalecimento da Subcorrente Equatorial); e (b) Dezembro (período de enfraquecimento da Subcorrente Equatorial). As elipses tracejadas indicam as regiões subsuperficiais onde se verificam oscilações verticais de concentração de Nitrato induzidas pela presença do ASPSP.

Figura 8. Vertical profile of Nitrate concentration [$\mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$] along the zonal section (upper panel in Figura 1) during: (a) March (stronger Equatorial Undercurrent); e (b) December (weaker Equatorial Undercurrent). Dashed ellipses indicate subsurface regions of vertical oscillations in Nitrate concentration induced by the presence of SPSPA.

indicam que o núcleo da EUC situa-se entre 50 m e 100 m e que em dezembro este se move entre 75 m e 125 m. O modelo indica ainda que existe uma ressurgência subsuperficial dessa corrente (a oeste). Esses últimos fenômenos, ligados à influência da presença do ASPSP, são gerados a partir das perturbações do escoamento induzidas pela batimetria.

Os perfis verticais de concentração de Nitrato e de Ferro ao longo do transecto zonal cruzando o ASPSP (painel superior na Figura 1) em março (a) e

dezembro (b) são apresentados nas figuras 8 e 9, respectivamente.

As figuras 8 e 9 representam distribuições de concentração de nutrientes típicos de ambientes tropicais oligotróficos, com valores muito baixos próximo da superfície, aumentando ao longo da profundidade (ARAUJO e CINTRA, 2009; ARAUJO *et al.*, 2009a, 2009b; CINTRA, 2010; TCHAMABI *et al.*, 2017a,b). Os resultados das simulações não indicam uma influência significativa do ASPSP sobre a distribuição destes constituintes próximo

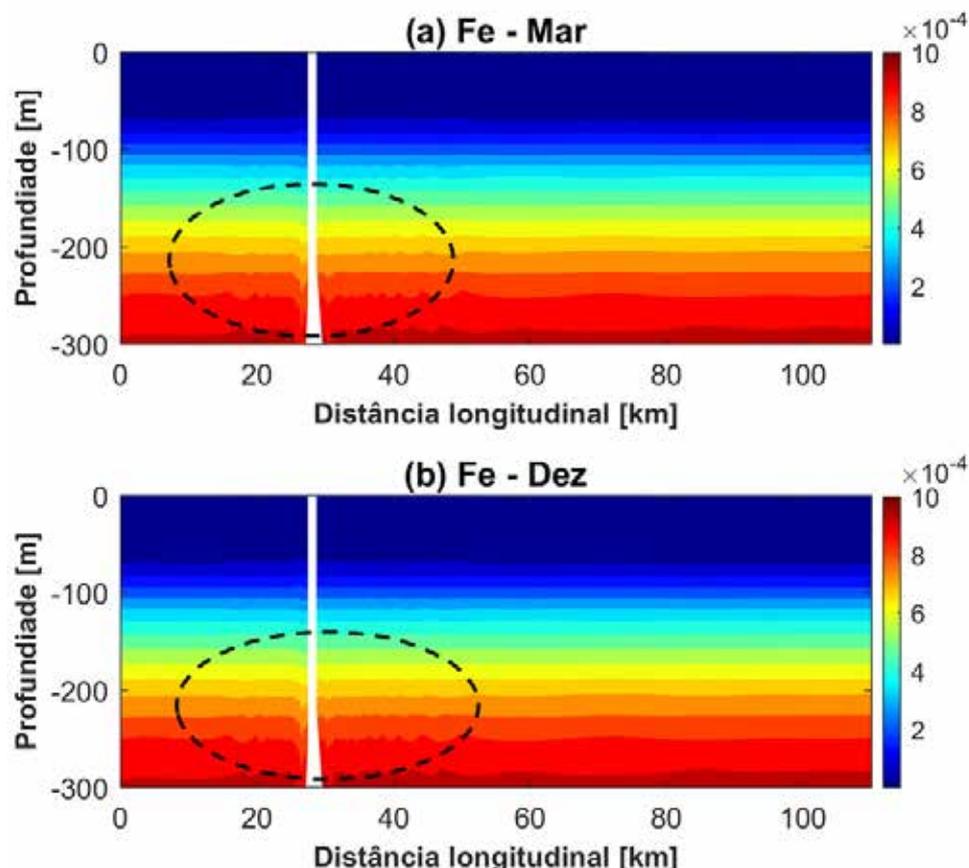


Figura 9. Seção vertical de concentração de Ferro [$\mu\text{mol.L}^{-1}$] no transecto zonal (painel superior da Figura 1) em: (a) Março (período de fortalecimento da Subcorrente Equatorial); e (b) Dezembro (período de enfraquecimento da Subcorrente Equatorial). As elipses tracejadas indicam as regiões subsuperficiais onde se verificam oscilações verticais de concentração de Ferro induzidas pela presença do SPSPA.

Figura 9. Vertical profile of the Iron concentration [$\mu\text{mol.L}^{-1}$] along the zonal section (upper panel in Figura 1) during: (a) March (stronger Equatorial Undercurrent); e (b) December (weaker Equatorial Undercurrent). Dashed ellipses indicate subsurface regions of vertical oscillations in Iron concentration induced by the presence of SPSPA.

à superfície. Entretanto verifica-se, tanto para o Nitrato quanto para o Ferro, e existência de oscilações verticais de concentração próximo da ilha entre as profundidades de 100 e 300 m (elipses tracejadas nas figuras).

A pressão parcial de CO₂ na superfície do mar (pCO₂) foi calculada a partir dos resultados das simulações ROMS-PISCES. Sua evolução temporal climatológica é apresentada na figura 10. Fica evidente a existência de um ciclo sazonal na área simulada do ASPSP, com valores mais importantes no primeiro semestre e média no período de cerca de 430 μatm . Estes resultados confirmam claramente a preponderância da influência termodinâmica (sobretudo temperatura) sobre as concentrações de CO₂ na região do ASPSP (ver climatologia de TSM, Figura 4).

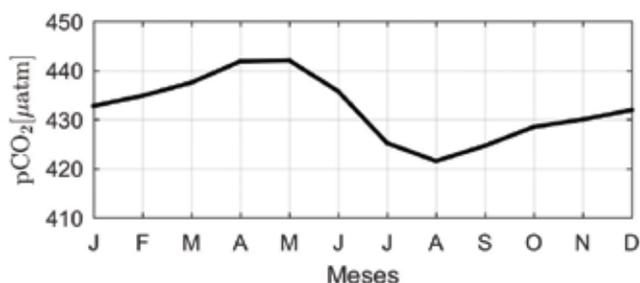


Figura 10. Evolução sazonal de pCO₂ [μatm] médio na área simulada ao redor do ASPSP.

Figura 10. Seasonal evolution of averaged pCO₂ [μatm] in the simulation domain around SPSPA.

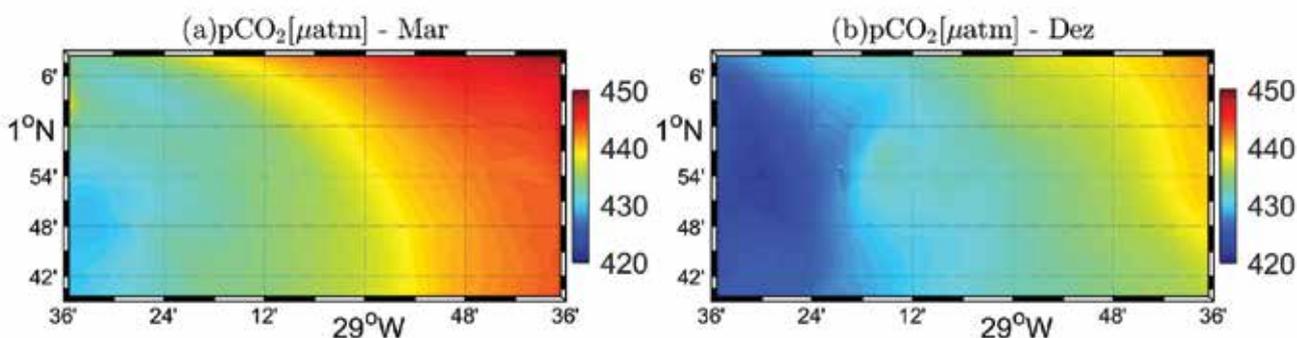


Figura 11. Distribuição horizontal de pCO₂ [μatm] na região do ASPSP em: (a) Março; e (b) Dezembro.

Figura 11. Horizontal distribution of pCO₂ [μatm] in the region around SPSPA during: (a) March; and (b) December.

Por fim, as distribuições horizontais de pCO₂ na região do ASPSP, obtidas a partir das simulações, reforçam a influência termodinâmica sobre as trocas de dióxido de carbono na região do ASPSP. Os resultados da figura 11 mostram distribuições de gradientes de pCO₂ que são compatíveis com as distribuições de TSM obtidas numericamente e observadas a partir de medições *in situ* e sensoriamento remoto.

Conclusões

As análises aqui realizadas, baseadas em observação (*in situ* e sensoriamento remoto) e simulação numérica, indicam que a presença do ASPSP não induz o desenvolvimento de mecanismos importantes de ressurgência orográfica capazes de interferir de forma significativa no ciclo de nutrientes e nos parâmetros do sistema carbonato. Os resultados confirmam ainda que a variabilidade sazonal das propriedades físico-biogeoquímicas e da troca ar-mar de CO₂ na região do ASPSP são preponderantemente resultantes da variação natural da forçante radiativa e da circulação de macroescala (Corrente Sul Equatorial e Subcorrente Equatorial) verificadas na porção oeste do Atlântico equatorial. Localmente, os resultados das simulações indicam a existência de oscilações verticais de concentração de nutrientes

nas regiões subsuperficiais (100-300m) adjacentes ao ASPSP, resultado muito provavelmente do desenvolvimento e propagação de ondas internas geradas pela interação da circulação com a topografia.

Agradecimentos

Os autores agradecem especialmente ao Programa Proarquipélago do CNPq (401326/2012-8) e à Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil, em particular às tripulações do navio de Pesquisa NOc. Antares (H-40), pela presteza e dedicação durante os cruzeiros oceanográficos. C.T. agradece à Fundação de Apoio à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), IBPG-0973-1.08/12. Este trabalho é também uma contribuição do Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia em Ambientes Marinhos Tropicais – INCT AmbTropic, CNPq-FAPESB (565054/2010-4 e 8936/2011) e do Projeto Pólo de Interação para o Desenvolvimento de Estudos Conjuntos em Oceanografia do Atlântico Tropical (PILOTE), CNPq-IRD 490289/2013-4.

Referências Bibliográficas

ARAÚJO, M., and CINTRA, M.M. **Modelagem matemática da circulação oceânica na região equatorial.** In: VIANA, D.L. *et al.* **O Arquipélago de São Pedro e São Paulo: 10 Anos de Estação Científica.** Rio de Janeiro: SECIRM. v. 1, p. 106-113. 2009.

ARAÚJO, M.; LIMONGI, C.; GEBER, F.O.; and SILVA, M.A. **Dinâmica da região dos bancos oceânicos do Nordeste Brasileiro.** In: HAZIN F.V.H. (Org.). **Programa REVIZEE - Score Nordeste.** 1 ed. Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro Ltda., p. 70-84. 2009a.

ARAÚJO, M.; LIMONGI, C.; FERREIRA, F.F.; and SILVA, M.A. **Dissipação turbulenta e modelagem matemática no Atlântico tropical.** In: HAZIN F.V.H. (Org.). **Programa REVIZEE - Score Nordeste.** 1 ed. Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro Ltda., p. 87-101. 2009b.

AUMONT, O. and BOPP, L. **Globalizing results from ocean *in situ* iron fertilization studies,** *Global Biogeochemical Cycles*, 20, GB2017, 2006. doi: 10.1029/2005GB002591.

BAKKER, D.C.E. *et al.* **A multi-decade record of high-quality fCO₂ data in version 3 of the Surface Ocean CO₂ Atlas (SOCAT).** *Earth System Science Data*, 8(2): 383-413. 2016. doi:10.5194/essd-8-383-2016.

BECKER, H.; MACEDO, S.; and MOZZETO, J. **Hidrologia da região de bancos e ilhas oceânicas do nordeste brasileiro.** In: HAZIN, F.V.H. (Org.). **Meteorologia e sensoriamento remoto, oceanografia física, oceanografia química e oceanografia geológica.** Fortaleza: Editora Martins & Cordeiro, p. 248. 2009.

BRANDT, P.; SCHOTT, F.; PROVOST, C.; KARTAVTSEFF, A.; HORMANN, V.; BOURLÈS, B.; and FISCHER, J. **Circulation in the central equatorial Atlantic: Mean and intraseasonal to seasonal variability.** *Geophysical Research Letters*, 33. 2006.

CINTRA, M.M. Modelagem matemática da circulação, transporte e dispersão de nutrientes e plâncton no Arquipélago de São Pedro e São Paulo. 2010. 118f. Trabalho de Conclusão de curso (Dissertação de Mestrado) – Programa de Pós-graduação em Oceanografia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, Pernambuco, 2010.

CINTRA, M.; LENTINI, C.A.D.; SERVAIN, J.; ARAÚJO, M.; and MARONE, E. **Physical processes that drive the seasonal evolution of the Southwestern Tropical Atlantic Warm Pool.** *Dynamics of Atmospheres and Oceans*, 7: 1-11. 2015.

DA SILVA, A.M.; YOUNG, C.C.; and LEVITUS, S. **World Ocean Atlas 2013.** NOAA Atlas NESDIS. p. 74. 1994.

EKAU, W. and KNOPPERS, B. **An introduction to the pelagic system of the northeast and east brazilian shelf.** *Arch. fish. mar. res.*, 47(2-3): 113-132. 1999.

FONSECA, G.A.B. da; MITTERMEIER, R.A.; and MITTERMEIER, C.G. **Conservation of island biodiversity – importance, challenges and opportunities.** Center for Applied Biodiversity Sciences, Conservation International, p. 16, Washington, DC, USA. 2006.

GOYET, C.; COATANOAN, C.; EISCHEID, G.; AMAOKA, T.; OKUDA, K.; HEALY, R.; and TSUNOGAI, S. **Spatial variation of total CO₂ and total alkalinity in the northern Indian Ocean: A novel approach for the quantification of anthropogenic CO₂ in seawater,** *Journal of Marine Research*, 57: 135-163. 1999.

HAIDVOGEL, D.B.; ARANGO, H.G.; HEDSTRÖM, K.; BECKMANN, A.; MALANOTTE-RIZZOLI, P.; and SHCHEPETKIN, A.F. **Model evaluation experiments in the North Atlantic basin: simulations in nonlinear terrain-following coordinates**, *Dynamics Atmosphere and Oceans*, 32: 239-281. 2000.

HAZIN, F.H.V. Fisheries-oceanographical study on tunas, billfishes and sharks in the southwestern equatorial Atlantic Ocean. 1993. 2806f. Trabalho de Conclusão de curso (Tese de Doutorado) – Tokyo University of Fisheries, Tokyo, 1993.

HOUNSOU-GBO, G.A.; ARAUJO, M.; BOURLES, B.; VELEDA, D.; and SERVAIN J. **Tropical Atlantic Contributions to Strong Rainfall Variability along the Northeast Brazilian Coast**, *Advances in Meteorology*. 2015 <http://dx.doi.org/10.1155/2015/902084>.

LUMPKIN, R. and JONNISON, G.C. **Global ocean surface velocities from drifters: Mean variance, El Niño–Southern Oscillation response, and seasonal cycle**, *Journal of Geophysical Research*, 118: 1–15. 2013.

LUTJEHARMS, J.R.E.; PENVEN, P.; and ROY, C. **Modelling the shear edge eddies of the southern Agulhas Current**, *Continental Shelf Research*, 23: 1099-1115. 2003.

MACEDO, S.J.; MONTES, M.J.F.; LINS, I.C.; and COSTA, K.M.P. REVIZEE – Programa da avaliação do Potencial Sustentável dos Recursos Vivos da Zona Econômica Exclusiva. SCORE/NE. Relatório da Oceanografia Química. UFPE, Recife. 37P. 1998.

MAFALDA JR.P.; SINQUE, C.; MUELBERT J.H.; and SOUZA, C.S. **Distribuição e abundância do ictioplâncton na costa norte da Bahia, Brasil**, *Tropical Oceanography*, 32(1): 69-88. 2004.

MALANOTTE-RIZZOLI, P.; HEDSTRÖM, K.; ARANGO, H.G.; and HAIDVOGEL, D.B. **Water mass pathways between the subtropical and tropical ocean in a climatological simulation of the North Atlantic**, *Dynamics of Atmosphere and Oceans*, 32: 331-371. 2000.

PENVEN, P.; LUTJEHARMS, J.R.E.; MARCHESIELLO, P.; ROY, C.; and WEEKS, S.J. **Generation of cyclonic eddies by the Agulhas Current in the lee of the Agulhas Bank**, *Geophysical Research Letters*, 27: 1055-1058. 2001.

PENVEN, P.; MARCHESIELLO P.; DEBREU L.; and LEFEVRE J. **Software tools for pre- and post-processing of oceanic regional simulations**, *Environmental Modelling and Software*, 23(5): 660-662. 2008.

RISIEN, C.M. AND CHELTON, D.B. **A Global Climatology of Surface Wind and Wind Stress Fields from Eight Years of QuikSCAT Scatterometer Data**, *Journal of Physical Oceanography*, 38: 2379-2413. 2008.

SHCHEPETKIN, A.F. and MCWILLIAMS, J.C. **The regional oceanic modeling system (ROMS): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model**, *Ocean Modelling*, 9: 347-404. 2005.

SILVA, M.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PENVEN, P.; and LENTINI, C. A.D. **High-resolution regional ocean dynamics simulation in the southwestern tropical Atlantic**, *Ocean Modelling*, 30: 25 – 26. 2009a.

SILVA, M. A.; ARAUJO, M.; SERVAIN, J.; PEVEN, P., **Circulation and heat budget in a regional climatological simulation of the Southwestern tropical Atlantic**, *Tropical Oceanography*, 37: 41-57, 2009b.

SONG, Y.T. and HAIDVOGEL, D. B. **A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system**, *Journal of Computational Physics*, 115: 228-244. 1994.

STRAMMA, L. and SCHOTT, F. **The mean flow field of the tropical Atlantic Ocean**. *Deep Sea Research II*, 46B: 279-303. 1999.

TCHAMABI, C.; ARAUJO, M.; SILVA, M.; and BOURLÈS, B. **A study of the Brazilian Fernando de Noronha Island and Rocas Atoll wakes in the tropical Atlantic**, *Ocean Modelling*, 111, doi: 10.1016/j.ocemod.2016.12.009, 2017a.

TCHAMABI, C.; ARAUJO, M.; SILVA, M.; BOURLÈS, B.; and TRAVASSOS, P. **Ichthyoplankton transport around the Brazilian Fernando de Noronha archipelago and Rocas Atoll: Are there any connectivity patterns?**, *Indian Journal of Geo-Marine Science* (no prelo), 2017b.

TRAVASSOS, P.E.P.F.; HAZIN, F.H.V.; ZAGAGLIA, J.R.; ROCHA, R.A.; and SCHOBER, J. **Thermohaline structure around seamounts and islands off Northeast Brazilian coast**, *Arch. Fish. Mar. Res.*, 47(2/3): 211-222. 1999.

VON BRÖCKEL, K. and MEYERHÖFER, M. **Impact of the Rocks of São Pedro and São Paulo upon the quantity and quality of suspended particulate organic matter**, *Archive of Fishery Marine Research*, 47(2/3) : 223-238. 1999.

WALISER, D. E. and GAUTIER, C. **A satellite-derived climatology of the ITCZ**, *Journal of Climate*, 6: 2162 - 2174. 1993.

Posfácio

Grande foi o aprendizado ao longo desses vinte anos. Muitos foram os trabalhos desenvolvidos. Centenas de profissionais, ligados às mais variadas áreas, produziram estudos de alto nível. Alunos de graduação e pós-graduação consolidaram seus respectivos processos de formação. Professores de excelência superaram desafios complexos e avançaram no processo de geração do conhecimento.

De toda essa experiência, uma certeza se faz impressa: muito há, ainda, que ser desvendado. Quanto mais se estuda sobre o Arquipélago de São Pedro e São Paulo, mais latente fica que muito pouco se sabe. O potencial científico associado àquela ímpar e remota região, que tantos benefícios traz para o País, é simplesmente inesgotável. Que esse legado conserve as futuras gerações sempre motivadas e atentas. Que a chama do PROARQUIPELAGO se mantenha sempre acesa!



Agência Brasileira do ISBN
ISBN 978-85-93906-01-5



9 788593 906015