

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA
LABORATÓRIO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA MARINHA (LAGEMAR)

JOÃO REGIS DOS SANTOS FILHO

**GEOMORFOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DA PLATAFORMA
CONTINENTAL BRASILEIRA COM BASE NA ESTRUTURAÇÃO DE UM
BANCO DE DADOS COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO DE AMBIENTES
CARBONÁTICOS MESOFÓTICOS E DA EVOLUÇÃO SEDIMENTAR**

Niterói

2022

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

JOÃO REGIS DOS SANTOS FILHO

**GEOMORFOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DA PLATAFORMA CONTINENTAL
BRASILEIRA COM BASE NA ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS COMO
SUBSÍDIO AO ESTUDO DE AMBIENTES CARBONÁTICOS MESOFÓTICOS E DA
EVOLUÇÃO SEDIMENTAR**

Tese apresentada ao programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor em Ciências, na área de concentração em Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Gilberto Tavares de Macedo Dias

Niterói

2022

Ficha catalográfica automática - SDC/BIG
Gerada com informações fornecidas pelo autor

S237g Santos filho, João Regis dos
Geomorfologia e sedimentologia da plataforma continental
brasileira com base na estruturação de um banco de dados
como subsídio ao estudo de ambientes carbonáticos
mesofóticos e da evolução sedimentar / João Regis dos
Santos filho ; Gilberto Tavares de Macedo Dias, orientador.
Niterói, 2022.
145 f. : il.

Tese (doutorado)-Universidade Federal Fluminense, Niterói,
2022.

DOI: <http://dx.doi.org/10.22409/PPGDOT.2022.d.05755359709>

1. Plataforma Continental. 2. Banco de Dados. 3. Fácies
Carbonáticas. 4. Vales Incisos. 5. Produção intelectual. I.
Dias, Gilberto Tavares de Macedo, orientador. II. Universidade
Federal Fluminense. Instituto de Geociências. III. Título.

CDD -

JOÃO REGIS DOS SANTOS FILHO

GEOMORFOLOGIA E SEDIMENTOLOGIA DA PLATAFORMA CONTINENTAL BRASILEIRA COM BASE NA ESTRUTURAÇÃO DE UM BANCO DE DADOS COMO SUBSÍDIO AO ESTUDO DE AMBIENTES CARBONÁTICOS MESOFÓTICOS E DA EVOLUÇÃO SEDIMENTAR

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do grau de Doutor.

Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha

Aprovada em 09 de agosto de 2022.

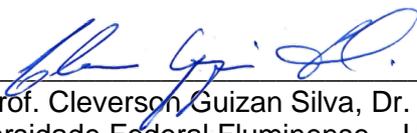
BANCA EXAMINADORA



Prof. Gilberto Tavares de Macedo Dias, Dr. (Orientador)
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Alberto Garcia Figueiredo Jr., Dr.
Universidade Federal Fluminense - UFF



Prof. Cleverson Guizan Silva, Dr.
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Juliane Castro Carneiro, Dr.
Universidade Federal Fluminense – UFF



Prof. Marcelo Sperle Dias, Dr.
Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ

Sumário

RESUMO	1
ABSTRACT	2
1. INTRODUÇÃO GERAL	3
1.1. Justificativa	5
1.2. Hipóteses e objetivos	5
1.2.1. Hipóteses de trabalho	5
1.2.2. Objetivos	6
2. ESTRUTURA DA TESE	7
3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	7
3.1. A plataforma continental e a sua morfologia e sedimentos	7
3.2. A composição biogênica nos sedimentos da plataforma	12
3.3. Os recifes e sua contribuição bioclástica	12
3.3.1. Recifes rasos ou altifóticos (profundidades menores que 30m)	14
3.3.2. Recifes mesofóticos (profundidades entre 30 e mais de 150m)	17
3.4. Recifes mesofóticos e sedimentos bioclásticos na Plataforma Continental Brasileira ...	18
3.5. As variações do nível do mar durante o Período Quaternário e a sua influência na geomorfologia da plataforma continental	23
4. METODOLOGIA	30
4.1. Dados Batimétricos	31
4.2. Dados Sedimentológicos	33
4.3. Estruturação do Banco de Dados de Geologia Marinha (BDGM)	35
4.4. Dados de Campanhas Oceanográficas na Bacia de Santos	42
5. RESULTADOS	45
5.1. <i>Resizing the extension of the mesophotic “reefs” in the Brazilian Equatorial Margin using bioclastic facies and seabed morphology.</i> Submetido para a revista <i>GeoMarine Letters</i> (ISSN: 1432-1157, Nível CAPES B1 - Geociências)	48
5.2. <i>Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil.</i> Submetido para a revista <i>Sedimentary Geology</i> (ISSN: 0037-0738, Nível CAPES A2 - Geociências). 66	
5.3. <i>Continental shelf incised valleys as a key to understand sea-level oscillation during Quaternary in Santos Basin, Brazil.</i> Submetido para a revista <i>Marine Geology</i> (ISSN: 0025-3227, Nível CAPES A2 - Geociências).	85
5.4. <i>Mesophotic carbonate and reef areas on the Brazilian continental shelf.</i> Submetido para a revista <i>Limnology and Oceanography</i> (ISSN: 1939-5590, Nível CAPES A1 - Geociências)	105
6. CONCLUSÕES GERAIS	134
7. MATERIAL SUPLEMENTAR	135
7.1. Lista da produção científica extra-escopo	135
8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

Lista de Figuras

- Figura 1. Desenho esquemático da plataforma continental e suas subdivisões. Fonte: do autor.7
- Figura 2. Zonação da luminosidade na borda de um recife, subdividido em altifótico (região de luz plena), mesofótico (região de diminuição de luminosidade) e rarifótico (região de pouquíssima luminosidade), indicando a diminuição de riqueza biológica nos recifes em razão da profundidade. NM- Nível do Mar. Fonte: do autor.14
- Figura 3. Exemplo da grande riqueza de diversidade biológica dos diferentes tipos de “recifes” altifóticos, sendo: A- costão rochoso em Ilha Grande (Angra dos Reis-RJ), B- costão rochoso em Arraial do Cabo (RJ), C e D- recife de briozoários com a presença de algas calcárias e corais em Abrolhos (BA), E e F- recife de coral na região de Barú, no Caribe Colombiano, G- recife formado sobre os resquícios soçobrados dos navios Germânia e Bretagne (recife artificial), próximos ao Farol da Barra em Salvador (BA) e H- recife formado sobre o soçobrado do navio Santa Catharina, em Abrolhos (BA). Os indicadores numéricos são: 1- pólipos de coral da ordem Scleratinia (*Monastraea* sp.), 2- ouriços-do-mar, 3- hidrozoários do gênero *Millepora*, 4- macroalgas, 5- esponjas, 6- pináculo carbonático (originados de briozoários, segundo Bastos et al., 2018) do tipo “chapeirão” de Abrolhos, 7- algas calcárias verdes do gênero *Halimeda*, 8- coral da ordem Scleractinia (*Mussismilia* sp.), 9- pólipos de coral da ordem Scleratinia, 10- exemplares de corais ramificantes, 11- esqueletos de corais mortos agindo como substrato para os corais vivos, 12- exemplar de coral-cérebro, 13- espécie de coral ramificante, 14- cavernames incrustados dos naufrágios do Germânia e Bretagne, 15- mastro do naufrágio Santa Catharina, em Abrolhos, com incrustações de corais, 16- parte do casario soçobrado do navio Santa Catharina. Fonte: o autor.16
- Figura 4. Exemplo da baixa riqueza de diversidade biológica dos principais tipos de “recifes” mesofóticos, sendo: A- recife de algas calcárias a 81m de profundidade no Golfo do México (Schmahl et al., 2008), B- recife de algas calcárias a 103m de profundidade no estado do Espírito Santo (Holz et al., 2020), C- *Mesophotic Coral Ecosystem* (MCE) a 76m de profundidade em Porto Rico, no Mar do Caribe (Sherman et al., 2010), D- MCE a 110m de profundidade na República de Palau, na Micronésia, E- *Beachrock* submerso a 45m de profundidade na costa da Sardenha, Mar Mediterrâneo (Deiana et al., 2021) e F- afloramento de arenito parcialmente incrustado por algas calcárias a 120m na plataforma continental externa da Margem Equatorial Brasileira (Vale et al., 2022a).18
- Figura 5. Alguns exemplos de biodetritos da Plataforma Continental Brasileira, sendo: A- formados por conchas de moluscos, ou “concheiros”, no Rio Grande do Sul, B- agregados carbonáticos de recifes altifóticos em Abrolhos (BA), C- fundo totalmente recoberto por talos de *Halimeda* próximos ao Parcel de Manoel Luís (MA), D- Bioclastos resultantes da fragmentação das algas calcárias na Bacia de Santos, E- cascalhos carbonáticos da plataforma continental cearense, F- foraminíferos bentônicos e G- fragmentos de briozoários que compõem os bioclastos da plataforma da Bacia de Sergipe-Alagoas...19
- Figura 6. A- Recife altifótico de Abrolhos (BA) e B- Recife altifótico de Manuel Luís (MA).20
- Figura 7. Exemplos de estruturas rígidas no fundo mesofótico da plataforma continental brasileira. Do norte para o sul: A- afloramento de arenito na plataforma externa (120m de profundidade) da Margem Equatorial Brasileira, B- estrutura coalescente de rodolitos (*box-work*) capeadas por algas calcárias a 40m de profundidade na Bacia de Sergipe,-Alagoas, C- recife de alga calcária com a ocorrência de corais esparsos a 37m de profundidade na plataforma mesofótica do Ceará, D- chapeirões a 35m de profundidade em Abrolhos (BA), E- estrutura tridimensional formada pela aglomeração de rodolitos pelo peixe *Malacanthus plumieri* a 58m de profundidade no litoral do Espírito Santo, F- - estrutura coalescente de rodolitos (*box-work*) a 63m de profundidade no Espírito Santo, G-Beachrock incrustado

a 57m de profundidade na Bacia de Campos (RJ) e H- estrutura coalescente de rodolitos (<i>box-work</i>) entremeados por sedimentos inconsolidados a 148m de profundidade na Bacia de Santos (RJ).....	21
Figura 8. Fundo com algas calcárias de forma livre (rodolitos). De norte para sul: A- rodolitos localizados sobre afloramento de arenito na Margem Equatorial Brasileira, B- rodolitos localizados na zona mesofótica da Bacia de Sergipe-Alagoas, C- rodolitos próximos aos recifes de Abrolhos (BA) e D- rodolitos na zona mesofótica do estado do Espírito Santo.....	22
Figura 9. Ciclos de Milankovitch (1941), sendo a- Excentricidade, b- Obliquidade e c- Precessão. Os ritmos calculados coincidem com as evidências geológicas globais sobre o avanço e o recuo da glaciação, sendo <i>pacemakers</i> das eras glaciais. Fonte: (Maslin, 2016).....	23
Figura 10. Variações do nível do mar nos últimos 2.500ka (a), 450ka (b) e 21ka (c) baseado em curvas e dados de 2000 a 2014, compilados por Gelder et al. (2020). Todos os dados apresentam uma mesma tendência geral, com uma rápida transgressão marinha entre 6 e 20ka antes do presente. Fonte: (Gelder et al., 2020).....	24
Figura 11. Variações do nível do mar nos últimos 600 ka, durante o Holoceno e o Pleistoceno (Rabineau et al., 2006, 2007) baseado em curvas e dados de 1984 a 2003. Fonte: (Rabineau et al., 2006, 2007)..	25
Figura 12. Variações do nível do mar nos últimos 7ka, em envelope, segundo Angulo et al. (2006). O pico máximo ocorreu a mais de 4m em relação ao nível médio atual, entre 5 e 6ka antes do presente. Fonte: (Angulo et al., 2006).	25
Figura 13. Processo de formação dos terraços marinhos (i), a cronologia (ii) dos tempos (T) em relação ao nível do mar (linha azul), e a formação e presença de <i>beachrocks</i> na plataforma continental (iii). Fonte: do autor.	27
Figura 14. Relação entre a intensidade da regressão forçada e o tipo de vale inciso formado na plataforma continental. A- Regressão mais rápida, formam canais mais profundos e retificados. B- Regressão mais lenta e de menor amplitude formam canais meandantes e mais rasos (<i>by-pass</i>). Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier (2001).	28
Figura 15. Relação entre a largura da plataforma continental e o tipo de vale inciso formado na plataforma continental durante uma regressão forçada de mesma intensidade. A- Plataformas mais largas formam vales incisos mais rasos cujo os canais meandram em seu interior. B- Plataformas mais curtas foram vales incisos mais profundos e retificados. Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier and Morris (2000).	29
Figura 16. Preenchimento dos vales incisos na plataforma continental em três períodos: nível de mar baixo e exposição subaérea (A), afogamento transgressivo e preenchimento parcial do vale (B) e plenamente preenchido e afogado em período de mar alto (C). Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier (2001).	30
Figura 17. Recobrimento dos dados batimétricos históricos na margem continental Brasileira. Fonte: do autor.....	32
Figura 18. Recobrimento dos dados de sedimentos pretéritos na margem Brasileira. Fonte: do autor..	34
Figura 19. Localização das faixas referentes as águas jurisdicionais brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM.....	36
Figura 20. Localização das faixas referentes as bacias sedimentares marítimas brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM. 1- Bacia da Foz do Amazonas, 2- Bacia Pará-Maranhão, 3- Bacia de Barreirinhas, 4- Bacia do Ceará, 5- Bacia Potiguar, 6- Bacia Pernambuco-Paraíba, 7- Bacia Sergipe-Alagoas, 8- Bacia de Jacuípe, 9- Bacia do Recôncavo, 10- Bacia de Camamu-Almada, 11- Bacia de Jequitinhonha, 12- Bacia de Cumuruxatiba, 13- Bacia de Mucuri, 14- Bacia do Espírito Santo, 15- Bacia de Campos, 16- Bacia de Santos e 17- Bacia de Pelotas.....	37

Figura 21. Localização dos polígonos referentes as principais feições fisiográficas brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM, com destaque para a plataforma continental (1), em verde. 1- Plataforma Continental, 2- Cone do Rio Grande, 3 Terraço do Ceará, 4- Cone do Amazonas, 5- Platô de Demerara, 6- Talude Continental, 7- Platô de São Paulo, 8- Elevação Continental, 9- Elevação do Ceará, 10- Planície Abissal de Pernambuco, 11- Planície Abissal da Argentina, 12- Bacia Oceânica do Brasil, 13- Elevação de Serra Leoa, 14- Cordilheira Mesoatlântica, 15- Elevação do Rio Grande, 16- Cadeia de Montes Submarinos Vitória-Trindade, 17- Banco Submarino Hotspur, 18- Monte Submarino Stocks, 19- Montes Submarinos da Bahia, 20- Montes Submarinos de Pernambuco, 21- Montes Submarinos da Paraíba, 22- Cadeia Fernando de Noronha, 23- Cadeia Norte-Brasileira, 24- Guyot do Ceará, 25- Monte Submarino do Rio Grande do Norte e 26- Águas Interiores.38

Figura 22. Design do Geodatabase que compõe o BDGM.41

Figura 23. Fluxograma de trabalho no ambiente SIG para o estabelecimento do Banco De Dados de Geologia Marinha (BSGM). A- dados históricos agrupados, B- controle de qualidade (verificação espacial), C- união dos dados em dois grupos, batimetria e sedimentos, D- rasterização e atribuição dos critérios de filtragem para cada conjunto de dados, E- criação de um Geodatabase de acordo com o *design* do banco, F- filtragem dos dados para os usos específicos. Fonte: do autor.42

Figura 24. A- Navio RV Ocean Stalwart utilizado nas campanhas oceanográficas, indicando 1- guindaste, 2-guincho com cabo de kevlar, 3- deck de meia-nau e entrada para o laboratório e 4- berço e amostrador. B- Esquema de aquisição das amostras e SBP, indicando todos os processos, desde a conferência da profundidade (SBP) e posição (DGPS), até os processamentos que foram realizados em cada subamostra. Neste trabalho foram utilizados os dados de SBP e de granulometria e carbonatos das amostras de 2cm. Fonte: do autor.....43

Figura 25. Localização das estações amostradas durante as campanhas oceanográficas na Bacia de Santos (PCMSB), bem como a localização das linhas de SBP que cruzam a área de estudo. Fonte: do autor.....44

Figura 26. Análise exploratória dos dados que compõem o BDGM, variando em relação aos critérios de filtragem: A- bacias sedimentares, B- feição fisiográfica, C- águas jurisdicionais e D- cronologia dos levantamentos.....46

Lista de Tabelas

Tabela 1. Descrição das classes e tipos de formas de fundo (<i>bedforms</i>) para feições na plataforma continental em ambientes com sedimentos não coesivos.....	8
Tabela 2. Lista do tipo de informação atribuída a cada ponto batimétrico da Tabela de Atributos.	35
Tabela 3. Lista do tipo de informação atribuída a cada ponto de amostra sedimentológica da Tabela de Atributos.....	39
Tabela 4. Lista dos códigos utilizados para a nomenclatura dos arquivos, de modo a organizar o design do Geodatabase.	40

AGRADECIMENTOS

Este autor agradece imensamente ao Professor Gilberto Tavares de Macedo Dias pela enorme contribuição durante a orientação deste trabalho, bem como pela oportunidade de participação em um emocionante trabalho de campo num dos pontos marítimos mais remotos e desafiadores do país (Parcel de Manoel Luís -MA), ao constante estímulo ao aprendizado de novas técnicas e conceitos e pela parceria que certamente transcende muito a relação professor e aluno.

Igualmente, agradeço aos professores Alberto Garcia de Figueiredo Jr., Cleverson Guizan Silva, José Antônio Baptista Neto e Arthur Ayres Neto da UFF, Allan Kardec Duailibe da UFMA, Marcelo Sperle Dias da UERJ e Marcelo Renato Lamour da UFPR pela credibilidade e pela orientação e parceria em diversos projetos e publicações de extrema relevância para o reconhecimento da Margem Continental Brasileira.

À colega Juliane Castro Carneiro, pelo respeito, parceria e amizade de muitos anos e pelas mais diversas e importantes orientações, conselhos, críticas, conversas e dicas ao longo da elaboração desta tese.

Um enorme agradecimento aos membros da banca examinadora, tanto da qualificação quanto da defesa desta tese. A contribuição e as críticas construtivas tornaram essa publicação possível.

Agradeço também a PETROBRAS/CENPES, em especial ao Daniel Leite Moreira (Coordenador) e a Cizia Mara Hercos (Coordenadora da Geologia-CENPES), pela oportunidade na participação deste autor no Projeto Santos – Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS).

À Fundação da Universidade de São Paulo (FUSP) e ao Instituto Oceanográfico da Universidade de São Paulo (IO-USP), em especial a Prof. Silvia Helena Mello e Sousa (Coordenadora Científica do PCR-BS) e a Thaisa Marques Vicente (Administrativo do PCR-BS), pelo incentivo financeiro, acadêmico, logístico e burocrático.

À Fundação Euclides da Cunha (FEC), bem como as empresas Premier, Enauta, Prooceano e ao instituto *Office of Naval Research Global* da Marinha dos Estados Unidos da América, pelo financiamento dos projetos na Margem Equatorial em que estive vinculado ao longo da realização deste trabalho.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pelo apoio financeiro na etapa inicial deste trabalho.

Ao Programa de Pós Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (DOT-UFF), em especial as secretárias Larêssa Martins e Maristela Santos Moreira, por toda receptividade, empatia, apoio e suporte.

Ao Instituto de Geociências da Universidade Federal Fluminense, pela estrutura e pela logística.

A Marinha do Brasil, em especial aos profissionais do Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), pelo fornecimento dos dados históricos de batimetria e sedimentos.

À Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) pelo fornecimento de dados de sísmica de reflexão 2D na Margem Equatorial e pelo importante apoio na realização desta pesquisa.

À empresa TGS, em especial aos esforços do João Correa, pelo fornecimento de dados de sísmica de reflexão 2D na Margem Equatorial e pelo importante incentivo na realização desta pesquisa.

À empresa Prooceano, em especial a Paula Castellões, pelo fornecimento de relatórios referente ao Banco de Dados Ambiental (BDA) e ao apoio na realização desta pesquisa.

À empresa Oceanpact Serviços Marítimos SA por abrigar este autor por 42 dias de mar e fornecer uma plataforma de coleta (navio de pesquisa RV Ocean Stalwart) agradável e segura na Bacia de Santos durante a execução do PCR-BS. Também a todos os funcionários embarcados desta empresa, sempre muito receptivos, educados e prestativos.

Ao Fernando Tajra por nos abrigar no Veleiro Netuno, catamarã onde realizamos levantamentos de *dropcamera* e sonar de varredura lateral em segurança.

Ao colega João Victor Moraes da Costa Anjos, pela grande parceria em publicações e por todo apoio com o processamento de dados sísmicos 2D na Margem Equatorial.

Ao colega Rafael Cuellar de Oliveira e Silva, pela grande parceria em publicações e por todo apoio no trabalho de campo no nordeste.

Ao colega Fillipi Brandão Lagedo, pela grande parceria em publicações e por todo apoio no desenvolvimento de mapas batimétricos e digitalização de cartas náuticas.

Aos demais colegas bolsistas e colaboradores do Projeto PCR-BS/UFF: Gabriela de Jesus Rocha, Leonardo Junius Chapeta Santos, Fernanda Scofano Pinheiro, Thais Guterres Soares, Jonathan de Souza Silva de Araujo, Stephanie Tavares Venâncio dos Santos, Allan Soares Ramalho, Natalia de Jesus Lopes Chaves e Amanda Bourguignon Cecilio pela imensa contribuição nas análises laboratoriais, discussões de resultados e parcerias em publicações.

Aos colaboradores externos do Projeto PCR-BS/UFF: Allan Sandes de Oliveira e Edmundo Camillo Jr. pelas discussões, aprendizados e incentivos durante a realização deste trabalho.

À empresa Ellis-Geo, pela liberação do uso do software de processamento Paleoscan™ para a interpretação e processamento dos dados sísmicos 2D na Margem Equatorial.

Aos colegas da pós-graduação (“Sala 304”): Fabiane Bertoni dos Reis Soares, Fabricio Ferreira, Fernanda Silva Soares, Taisa Camila Silveira de Souza, Gustavo Vaz de Melo, Paula Ferreira Falheiro Abuchacra, Sílvio Oliveira Filho, Mariana Silva Figueiredo, Valquiria Maria de Carvalho Aguiar e aos professores Guilherme Borges Fernandez (UFF), Sérgio Cadena de Vasconcelos (PUC-RJ) e Rodrigo Coutinho Abuchacra (UERJ), por todo incentivo, parceria, amizade e sorrisos.

Aos demais servidores e prestadores da Universidade Federal Fluminense (UFF) que sempre proporcionaram um ambiente harmonioso e a estrutura necessária para a elaboração desta tese.

Aos meus familiares e amigos queridos, por todo o suporte, estímulo, ombro e incentivo, principalmente nos momentos mais desafiadores.

A Deus, pela sua bondade e por suas bênçãos e misericórdias concedidas.

E ao mar, que é a minha vida.

“Para termos uma vida plena e fazendo coisas grandes que nos dão orgulho e não ser lembradas por muito tempo, precisamos de muito menos do que a gente imagina.”

Adriano Plotzki (#SAL, Episódio #125)

RESUMO

A plataforma continental é uma reconhecida zona de transição entre processos continentais e oceânicos, bem como de intrincadas interações bioquímicas entre a biota e o sedimento em diversas escalas espaço-temporais. O reconhecimento das complexas feições morfológicas na plataforma e da sua relação com o vasto mosaico de fácies sedimentares é de extrema importância para o entendimento multidisciplinar deste ambiente e para o gerenciamento dos seus recursos naturais. Todavia, poucos esforços ocorrem na agregação e organização das bases de dados públicos de Geologia Marinha como um todo, visando a atualização de mapas geomorfológicos e sedimentológicos a nível nacional e a concentração do conhecimento adquirido ao longo das décadas. Desta forma, um banco de dados geoespacializado sedimentológico e batimétrico integrado e inédito foi compilado para toda a Margem Continental Brasileira, sendo este um dos principais legados deste trabalho. Este banco de dados apresenta inúmeras informações de batimetria e sedimentologia, compreendendo um grande acervo de dados de Geologia Marinha na costa brasileira (Banco de dados de Geologia Marinha-BDGM), integrados a partir de ferramentas SIG e com a padronização espacial e o estabelecimento de critérios de filtragem. Foram reunidos 682 Levantamentos Hidrográficos (LH) com o total de 2.953.198 pontos de profundidade e 30.633 pontos de sedimento. Ao todo, quatro artigos científicos são apresentados nos resultados de modo a testar a eficiência e a aplicabilidade do BDGM em três escalas espaciais distintas (escala da bacia, macro-região e na plataforma continental como um todo). O primeiro artigo apresentou mapeamento das fácies carbonáticas (bioclásticos) e da geomorfologia submarina zona mesofótica da Marquem Equatorial Brasileira (macro-região), tendo como base os dados do BDGM e de atributos sísmicos provenientes de sísmica de reflexão 2D. Este resultado indicou que as áreas previamente identificadas como Grande Sistema Recifes Amazônicos (*Great Amazon Reef System - GARS*) corresponderiam uma área menor, e seriam na verdade a fronteira norte de uma Grande Província de Bioconstruções Mesofóticas Brasileira (GPBMB). Já o segundo artigo avaliou a ocorrência de bioconstruções e a sua influência na morfologia e composição das fácies carbonáticas na plataforma externa da Bacia de Santos, a partir da integração dos dados do BDGM e de amostragens de fundo e *sub bottom profiler*. Este estudo expandiu o conhecimento da ocorrência de bioconstruções mais para sul, evidenciando uma variedade de formas de estruturas e da sua íntima relação com os sedimentos bioclásticos (areias e cascalhos) na bacia como um todo. O terceiro artigo, por sua vez, utilizou o mapeamento de vales incisos como ferramenta para entender as variações do nível do mar Quaternárias na plataforma continental Bacia de Santos, a partir do processamento dos dados batimétricos do BDGM com técnicas SIG, e da confirmação e dimensionamento desses vales incisos com o uso de dados de *sub bottom profiler*. Desta forma, foi possível mapear os vales incisos a nível de bacia, correlacionando-os as curvas globais de variação do nível do mar Quaternárias. Este estudo evidenciou a evolução costeira a partir dessas importantes evidências geomorfológicas impressas no relevo marinho. Finalmente, o quarto e último artigo explorou o mapeamento das fácies carbonáticas da região mesofótica da plataforma continental Brasileira como um todo, explorando os dados de sedimento do BDGM a partir de técnicas SIG e comparação com uma vasta descrição de bioconstruções na literatura. Foi possível identificar a ocorrência das fácies carbonáticas do Amapá ao Rio Grande do Sul, muitas delas associadas a bioconstruções calcárias de algas coralíneas incrustantes, (*rodolitos, maerl, Halimeda* e crostas recifais). Estas feições corresponderiam a Grande Província de Bioconstruções Mesofóticas Brasileira (GPBMB). Tendo como base os artigos científicos apresentados nesta tese, conclui-se que o BDGM é uma ferramenta com inúmeras possibilidades de desenvolvimento e aprimoramento, sendo confirmadamente útil e eficaz na avaliação multidisciplinar em multi-escala da margem continental, elevando a sua importância. Sugere-se a divulgação desta base e a sua incorporação a repositórios de divulgação de dados, como estruturas WebGIS, em próximas etapas.

Palavras-chave: plataforma continental, banco de dados, SIG, fácies carbonáticas, bioconstruções mesofóticas, vales incisos.

ABSTRACT

The continental shelf is a recognized transition zone between continental and oceanic processes and intricate biochemical interactions between biota and sediment at different spatial and temporal scales. The recognition of the complex morphological features on the shelf and its relationship with the vast mosaic of sedimentary facies is significant for the multidisciplinary understanding of this environment and the management of its natural resources. However, few efforts are made to assemble and organize public marine geology databases, aiming to update geomorphological and sedimentological maps at the national level and concentrate the knowledge acquired over the decades. An integrated and unprecedented geo-spatialized sedimentological and bathymetric database was compiled for the entire Brazilian Continental Margin. This database presents numerous information on bathymetry and sedimentology, comprising an extensive collection of Marine Geology data on the Brazilian coast (Marine Geology Database-MGD), integrated by GIS tools with the spatial standardization and the establishment of filtering criteria. A total of 682 Hydrographic Surveys (HS) were gathered, with 2,953,198 depth points and 30,633 sediment points. Altogether, four scientific articles are presented in the results to test the efficiency and applicability of the MGD at three distinct spatial scales (basin scale, macro-region and on the continental shelf as a whole). The first article presented mapping of carbonate facies (bioclastics) and subsea geomorphology of the Brazilian Equatorial Margin (macro-region) based on MGD data and seismic attributes from 2D reflection seismic. This result indicated that the areas previously identified as the Great Amazon Reef System (GARS) would correspond to a smaller area and be the northern border of a Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP). The second article evaluated the occurrence of bioconstructions and their influence on the morphology and composition of carbonate facies on the outer shelf of the Santos Basin, based on the integration of MGD data and in situ bottom and sub-bottom profiler sampling. This study expanded the knowledge of the occurrence of bioconstructions further south, highlighting a variety of structural forms and their close relationship with the bioclastic sediments (sands and gravels) in the basin. The third article used the mapping of incised valleys to understand the Quaternary sea-level variations on the Santos Basin continental shelf by processing the MGD bathymetric data with GIS techniques and the confirmation and dimensioning of these incised valleys with sub-bottom profiler data obtained in the fieldwork. It was possible to map the incised valleys at the basin level, correlating them with the global curves of Quaternary sea-level variation. This study evidenced the coastal evolution from this substantial geomorphological evidence imprinted in the shelf relief. Finally, the fourth and last article explored the mapping of carbonate facies of the mesophotic region of the Brazilian continental shelf, exploring the MGD sediment data by GIS techniques and comparing it with a vast description of bioconstructions in the literature. It was possible to identify the occurrence of carbonate facies from Amapá to the Rio Grande do Sul, many of them associated with bioconstructions of encrusting coralline algae. These features correspond to the Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP). Based on the scientific papers presented in this thesis, it is concluded that the MGD is a tool, with numerous possibilities for development and improvement, being confirmedly valuable and effective in the multidisciplinary and multi-scale assessment of the continental margin increasing its importance. We suggest the dissemination of this base and its incorporation into repositories of data dissemination, such as WebGIS structures, in the following steps.

Key-words: continental shelf, database, GIS, carbonate facies, mesophotic bioconstructions, incised valleys.

1. INTRODUÇÃO GERAL

A plataforma continental é uma reconhecida zona de transição entre processos continentais e oceânicos, bem como de intrincadas interações bioquímicas entre a biota e o sedimento (Ramesh et al., 2015). Neste ambiente complexo, as feições da plataforma sofrem a influência das forçantes hidrodinâmicas (como as ondas, correntes e marés), bem como das estabilizações ocorridas durante as variações do nível médio do mar ao longo da história geológica (Grant e Madsen, 1979; Swift e Thorne, 1991). A troca energética entre a coluna d'água e o fundo também influencia no selecionamento dos sedimentos (Wright, 1995), alinhando as diferentes fácies que compõem o substrato marinho.

Inseridos nesse contexto, organismos bentônicos atuam como a principal fonte de sedimentos carbonáticos e na bioconstrução de estruturas carbonáticas rígidas. O reconhecimento dessas complexas feições morfológicas e da sua relação com o mosaico de fácies sedimentares na plataforma continental pode ajudar a prever as áreas de maior probabilidade de ocorrência de determinadas comunidades bentônicas em regiões ainda não amostradas, identificando as características ambientais mais propícias a sua ocorrência (Degraer et al., 2008; Post, 2008; Baker and Harris, 2020).

Dessa forma, a geomorfologia submarina também atua como base para o dimensionamento das fácies carbonáticas e contribui para o entendimento da ecologia dessas comunidades bentônicas (Harris, 2020). No entanto, o alto custo, o elevado consumo de tempo e a cobertura restrita dos levantamentos geofísicos de alta resolução dificultam o mapeamento regional, tornando fundamental o reaproveitamento de dados pretéritos para essa tarefa (Clarke et al., 1996; Degraer et al., 2008; Boswarva et al., 2018).

A plataforma continental brasileira é uma feição fisiográfica de grandes dimensões e largura muito variável, margeando todos os 10.959 km de faixa costeira do país (Martins and Coutinho, 1981). Ela apresenta biótopos que agregam importantes ecossistemas marinhos, sendo alguns ainda pouco conhecidos, tais como bancos recifais de algas calcárias, rodolitos e corais. A pressão antrópica causada pela pesca demersal, instalação de equipamentos offshore como dutos, plataformas de petróleo e geradores eólicos, bem como a demanda por recursos minerais eleva ainda mais a necessidade de se melhor dimensionar as características morfo-sedimentares associadas a esses ambientes.

O ainda incipiente conhecimento sobre os recursos naturais presentes no substrato marinho, mostram que a abrangência e a distribuição do esforço amostral são muito desiguais nas diversas regiões brasileiras. Projetos de abrangência nacional como o pioneiro “Reconhecimento da Margem Continental Brasileira” (REMAC) de 1979 e mais recentemente o projeto “Potenciais Impactos Ambientais da Exploração, Produção e Transporte de Petróleo e Derivados na Região Oceânica Equatorial Brasileira” (PIATAM Oceano) de 2011, trataram diferentes aspectos geológicos e oceanográficos da plataforma continental. Outros esforços igualmente importantes como o “Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva” (REVIZEE), publicado em 2004, também se concentraram na aquisição regional de dados marinhos, com enfoque nas áreas mais profundas da quebra da plataforma e do talude continental.

Motivados pela necessidade de licenciamento de atividades exploratórias de petróleo, alguns projetos de caracterização ambiental na escala das bacias sedimentares também vêm sendo realizados na última década, como o “Projeto de Avaliação da Heterogeneidade Ambiental da Bacia de Campos” (HABITATS) e os “Projetos de Caracterização Regional” (PCR) das bacias de Sergipe-Alagoas (MARSEAL) e do Espírito Santo (PCR-ES). Tais trabalhos tem contribuído de forma substancial para a atualização e a melhoria dos mapeamentos regionais na plataforma continental, aplicando-se novas metodologias e amostragens.

Os resultados desses projetos ultrapassam o objetivo do simples reconhecimento da margem continental ou da emissão das licenças operacionais das atividades de produção e exploração minerais em si, reverberando na comunidade científica por anos e agregando valor ao conhecimento prévio sobre as regiões oceânicas brasileiras foco desses estudos. Todavia, poucos esforços ocorreram na agregação e organização das bases de dados públicos de Geologia Marinha como um todo, visando a atualização de mapas geomorfológicos e sedimentológicos a nível nacional e a concentração do conhecimento adquirido ao longo das décadas.

Esse mapeamento desatualizado ou descontinuado da geomorfologia e sedimentologia da plataforma continental Brasileira pode levar a importantes discrepâncias, subestimando ou superestimando feições e recursos, podendo condicionar medidas de exploração e/ou proteção ambiental equivocadas. Nesse contexto, torna-se fundamental a recuperação de bases de dados históricos, a sua padronização, agregação, armazenamento e uso a partir de ferramentas computacionais atualizadas, com emprego de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) ou a partir de técnicas estatísticas e de Inteligência Artificial (IA).

Um banco de dados geoespacializado, sedimentológico e batimétrico integrado e inédito foi compilado para toda a Margem Continental Brasileira, sendo este um dos principais legados deste trabalho. Este banco de dados apresenta diversas informações de batimetria e sedimentologia, compreendendo um grande acervo de dados da plataforma continental brasileira (Banco de dados de Geologia Marinha-BDGM), integrados a partir de ferramentas SIG, com padronização espacial e critérios de filtragem.

Como ponto de partida, três demandas da indústria do petróleo e uma demanda acadêmica foram usadas para a testagem da aplicabilidade e confiabilidade do BDGM. A primeira e a segunda demanda da indústria consistiram no reconhecimento das fácies carbonáticas na Bacia do Ceará e da macrorregião da Margem Equatorial Brasileira, de modo a se refinar o dimensionamento dos recifes mesofóticos (Jorge, 2020) e possivelmente auxiliar estratégias de mitigação de impactos nessas áreas. Já a terceira consistiu na caracterização dos meios físico e biótico da Bacia de Santos, de modo a atender uma condicionante da licença de operação para perfuração na Área Geográfica da Bacia de Santos (AGBS) (Petrobras, 2022). A demanda acadêmica consistiu em utilizar o conhecimento gerado no reconhecimento dos ambientes carbonáticos em toda a plataforma continental.

Quatro artigos científicos foram elaborados utilizando esse banco de dados, focando em três abordagens espaciais diferentes. A primeira trata da macrorregião da Margem Equatorial (bacias da Foz do Amazonas, Pará-Maranhão, Barreirinhas, Ceará e Potiguar), a segunda é a Bacia de Santos, e a terceira envolve toda a plataforma continental Brasileira, com enfoque nas áreas mais profundas (região mesofótica). De maneira geral, esses trabalhos resumem algumas das várias potencialidades do banco de dados, e levantam questionamentos sobre o estado da arte do conhecimento a respeito do fundo marinho nas áreas de interesse.

Esta tese é resultado de três principais projetos de pesquisa. Na Margem Equatorial foram o “Mapeamento do Assolho Marinho com Base na Classificação da Amplitude do Sinal Sísmico” e o “Recifes Carbonáticos da Borda da Plataforma Continental do Amazonas”. Já na Bacia de Santos foi o “Projeto de Caracterização Regional da Bacia de Santos” (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS. Os projetos na Margem Equatorial tiveram o importante financiamento das empresas Premier Oil, Enauta e Proceano e o apoio da empresa de aquisição sísmica TGS e da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP), bem como do *Office of Naval Research - Global* (ONRG).

A atualização e geoprocessamento de dados proporcionado pelo BDGM, aliados de forma inédita a técnicas de processamento de linhas de sísmica de reflexão 2D, permitiu a recomposição de fácies carbonáticas na Margem Equatorial, evidenciando e atualizando as áreas de ocorrência de sedimentos bioclásticos (CaCO_3 >

70%). Esses sedimentos, associados a bioconstruções mesofóticas, fazem parte de uma área de ocorrência que se expande para toda a plataforma continental brasileira.

Nesta localidade em especial, o mapeamento geomorfológico e sedimentológico realizado com dados históricos foi correlacionado e validado com amostragens *in situ* (*ground truthing*), que além de agregar mais dados ao banco, garantiu o controle de qualidade das informações pré-existentes. A aquisição de dados sísmicos (*Sub Bottom Profiler*) também permitiu uma correlação entre fácies carbonáticas (dados pretéritos) com o mapeamento inédito de bioconstruções na plataforma externa da bacia, bem como a confirmação de vales incisos no relevo submarino. Esses vales incisos ampliam o conhecimento sobre a evolução da bacia durante o Quaternário.

Finalmente, o estabelecimento do BDGM também possibilitou a atualização do mapeamento dos ambientes Bioclásticos em todo o território marítimo brasileiro, levantando as áreas com maior possibilidade de ocorrência de bioconstruções mesofóticas na plataforma continental. Essas áreas seriam relevantes para futuros levantamentos, subsidiando trabalhos de detalhe em regiões de interesse específico, e possibilitando a correlação com dados ambientais de modo a refinar o dimensionamento dos mais diversos habitats bentônicos na plataforma.

1.1. Justificativa

A necessidade de atualização do mapeamento sedimentológico e geomorfológico da plataforma continental brasileira, a partir de uma base de dados SIG integrada, motivou a realização deste trabalho. O estudo visou a investigação morfo-sedimentar de modo a caracterizar o fundo marinho de forma regional (escalas das bacias sedimentares e da margem continental), identificando feições que possam evidenciar tanto a evolução Quaternária da plataforma, quanto a ocorrência de áreas com maior possibilidade de bioconstruções recifais mesofóticas.

Os resultados obtidos ampliam o conhecimento sobre a geomorfologia e sedimentologia na plataforma continental brasileira como um todo, a partir da reunião inédita de grande quantidade de dados, a coleta extensiva de informações em campo e do emprego de técnicas avançadas de geoprocessamento com o uso de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Espera-se que estes resultados possam se tornar importantes ferramentas para o gerenciamento costeiro e oceânico no Brasil, bem como subsidiar o dimensionamento, o planejamento e as tomadas de decisão nas mais diversas atividades industriais, acadêmicas, estratégicas e de proteção ambiental.

1.2. Hipóteses e objetivos

1.2.1. Hipóteses de trabalho

A principal hipótese testada neste trabalho foi a eficácia do Banco de Dados de Geologia Marinha na avaliação multi-temática da geomorfologia e sedimentologia da plataforma continental a partir de três principais escalas espaciais (escala da bacia sedimentar, escala de macro-região e escala da plataforma continental). As hipóteses específicas dos artigos científicos elaborados neste trabalho encontram-se listadas a seguir:

- **Artigo 1**

- i) As fácies carbonáticas (areias e cascalhos bioclásticos) atualizadas neste trabalho, obtidos a partir da agregação e processamento da base de dados sedimentológicos e geomorfológicos propostas, correspondem as mesmas áreas de ocorrência dos *Great Amazon Reef System* (GARS) (Francini-Filho et al., 2018).

- ii) O uso de atributos sísmicos contribuiu significativamente para o refinamento do mapeamento das fácies carbonáticas na plataforma continental.
- iii) A atualização da base de dados e o uso de técnicas de geoprocessamento mais avançadas permitem um dimensionamento mais realista de áreas de fundos carbonáticos, associados a ocorrência de recifes mesofóticos.

- **Artigo 2**

- i) As fácies carbonáticas (areias e cascalhos bioclásticos) e as áreas com relevo irregular de fundo na plataforma externa, obtidos a partir da atualização da base de dados sedimentológico e geomorfológico, correspondem as áreas de ocorrência de bioconstruções.
- ii) As bioconstruções carbonáticas ocorrem somente na porção norte da Bacia de Santos, até a altura da Ilha de São Sebastião.
- iii) As fácies carbonáticas da Bacia de Santos são compostas por uma mistura de conchas de moluscos e fragmentos de algas calcárias, resultado da erosão das bioconstruções carbonáticas.
- iv) As bioconstruções são importantes formas de relevo na plataforma continental, contribuindo para a heterogeneidade da geomorfologia da bacia.

- **Artigo 3**

- i) Os dados batimétricos e o uso de ferramentas SIG usualmente utilizadas para o mapeamento de bacias de drenagem continentais (*hidrology tool*) foram eficientes em permitir a visualização de vales incisos na plataforma continental da Bacia de Santos, confirmados a partir de informações de *subottom profiler* coletados *in situ*.
- ii) Os vales incisos identificados por essa metodologia correspondem a sistemas de drenagem formados no período de nível de mar baixo, expondo a plataforma a condições subaéreas e conectando as atuais desembocaduras de rios e estuários ao talude continental.
- iii) A profundidade dos talwegues dos vales incisos indica o nível de base de quando foram formados, sendo ferramentas úteis (evidências geomorfológicas) para a comprovação de curvas globais de variação do nível do mar.
- iv) O período de regressão forçada entre os estágios isotópicos marinhos (MIS) 4 e 2 correspondem ao período de estabelecimento desses vales incisos, sendo rapidamente afogados e preservados no relevo da plataforma a partir da rápida transgressão marinha no MIS2.

- **Artigo 4**

- i) A reunião de uma extensiva base de dados sedimentológicos pretéritos apresentados neste estudo evidencia a presença fácies carbonáticas (areias e cascalhos) ocupando vastas áreas da zona mesofótica brasileira.
- ii) Essas vastas áreas carbonáticas estão relacionadas a bioconstruções na plataforma média e externa.
- iii) Essa extensa área de bioconstruções, relativamente contínua, desde o Amapá até São Paulo, denominada neste artigo, a “Grande Província de Bioconstruções Mesofóticas Brasileira” (GPBMB).
- iv) Corais azooxantelados (associados a águas frias ou profundas) na zona mesofótica são indicativos de bioconstruções na plataforma continental mais a sul, atingindo até o estado do Rio Grande do Sul.
- v) As técnicas de geoprocessamento em SIG empregadas neste trabalho e a extensiva compilação de dados sedimentológicos contribuíram para o estabelecimento de áreas com maior probabilidade de ocorrência de bioconstruções carbonáticas na margem continental brasileira.

1.2.2. Objetivos

Os objetivos da tese foram:

- I. Realizar revisão bibliográfica a respeito da geomorfologia, sedimentologia e habitats bentônicos na plataforma continental (Fundamentação Teórica);
- II. Agregar, organizar e integrar os dados batimétricos e sedimentológicos em toda a margem continental brasileira, possibilitando o uso em plataformas SIG (BDGM).
- III. Realizar amostragem dos sedimentos superficiais e de sismica rasa na plataforma continental (apenas Bacia de Santos/PCR-BS);
- IV. Identificar e descrever quais são e como são as feições de fundo e fácies sedimentares na plataforma continental (tipo, morfologia e abrangência);
- V. Identificar qual a relação das feições identificadas com as variações do nível do mar ocorridas durante o Quaternário;
- VI. Estabelecer a relação entre parâmetros morfo-sedimentares, com a ocorrência de comunidades bentônicas bioconstrutoras na plataforma continental.
- VII. Gerar artigos científicos a partir do BDGM, testando as suas potencialidades a partir de três escalas espaciais (bacia, macrorregião e margem continental brasileira).

2. ESTRUTURA DA TESE

Esta tese foi organizada de forma sintetizar o conhecimento na forma de artigos científicos submetidos a revistas internacionais. Ressalta-se que toda a discussão com a bibliografia consultada está inserida no contexto dos artigos científicos, não havendo um capítulo específico para este tema. Ademais, os artigos propostos foram apresentados na língua inglesa, padrão usado para publicações em revistas internacionais.

3. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1. A plataforma continental e a sua morfologia e sedimentos

As plataformas continentais são importantes zonas de transição entre o continente e o oceano que se estendem da praia (*foreshore*) em direção ao mar até o início do talude (Figura 1), com declividades e feições geralmente muito suavizadas (Swift and Thorne, 1991; Wright, 1995; Harris et al., 2014; Harris, 2020). Processos hidrodinâmicos como correntes costeiras, correntes oceânicas, correntes de maré, descarga fluvial, incidência de ondas, a taxa de aporte de sedimentos e a variação do nível do mar durante o Pleistoceno e o Holoceno regulam o relevo e a sedimentação na plataforma (Harris, 2020). A plataforma também é um repositório de paleo-feições costeiras que seriam resultado da atuação ancestral de processos hidrodinâmicos e subaéreos, ocorridos em períodos de mar baixo (Emery, 1968; Grant and Madsen, 1979; Lo Iacono et al., 2010; Harris et al., 2013, 2014; Mellett et al., 2013).

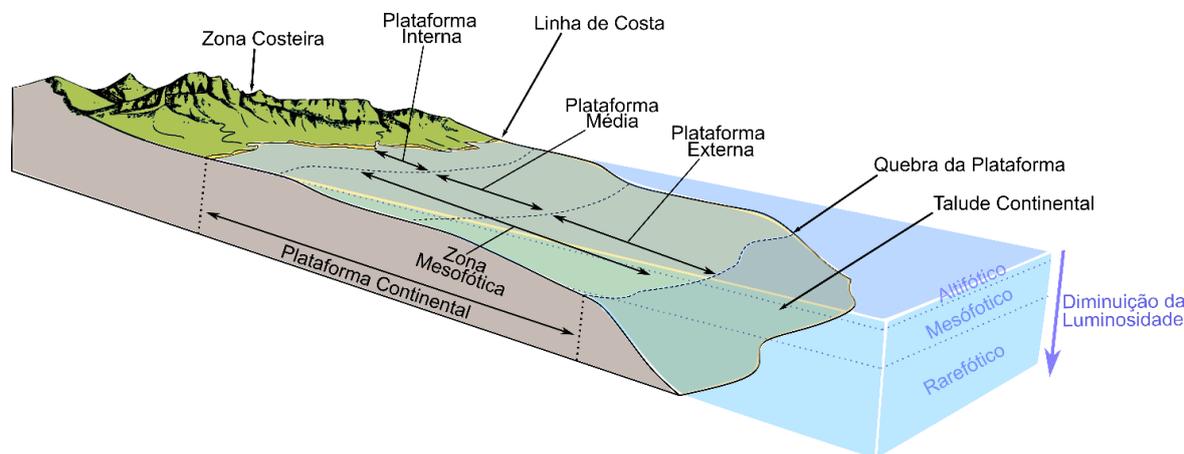


Figura 1. Desenho esquemático da plataforma continental e suas subdivisões. Fonte: do autor.

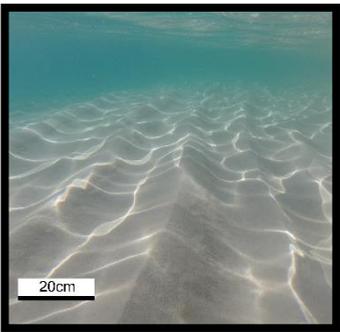
O transporte de sedimentos na plataforma continental é regido por uma troca energética a partir de um estresse turbulento entre o meio aquoso e o tipo de fundo subjacente (Grant and Madsen, 1979; Wright, 1995; Sarkar et al., 2021). Eventos de tempestade acabam sendo proporcionalmente mais efetivos no transporte de sedimentos na plataforma continental, devido ao consequente aumento coeficiente energético na coluna d'água. Na desembocadura de rios e estuários, os mecanismos de transporte agem de forma distinta nos sedimentos, a depender do seu grau de coesão (Mehta et al., 1989; Wright, 1995).

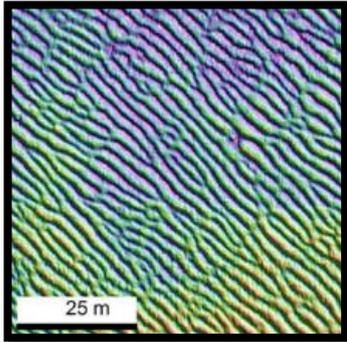
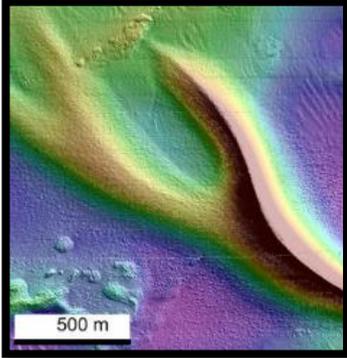
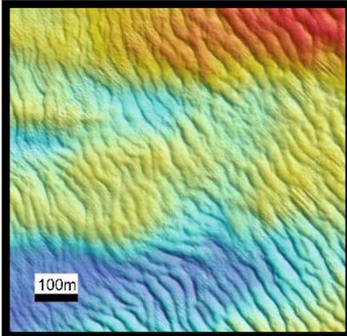
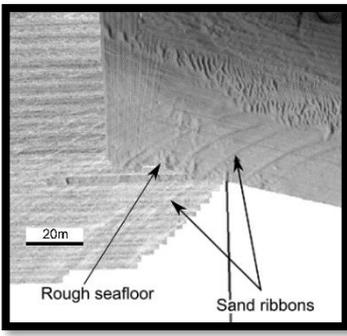
No caso de sedimentos coesivos (mais finos), fluxos lineares como correntes induzidas por ondas, ventos e marés geram uma tensão de cisalhamento que ressuspendem e transportam as partículas mais finas (Mehta et al., 1989). Quando em suspensão, essas partículas finas não são depositadas devido a advecção das correntes na coluna d'água (Scarlatos e Kim, 2002). Eventualmente, longos períodos de calmaria propiciam a deposição desses sedimentos finos na plataforma (Niedoroda, 2019). Além dos fluxos laminares, as variações de pressão causadas pelo movimento orbital das ondas de superfície liquefazem os sedimentos finos depositados no fundo, tornando-os mais fáceis de serem erodidos e transportados na forma suspensa (Teisson et al., 1993). Quanto maior o tempo em que o sedimento fino foi depositado, maior a sua coesão e mais difícil será a sua erosão e remobilização pelas forças hidrodinâmicas (Teisson et al., 1993; Wright, 1995).

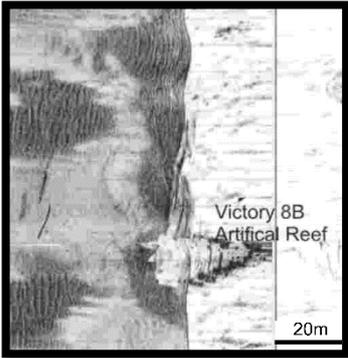
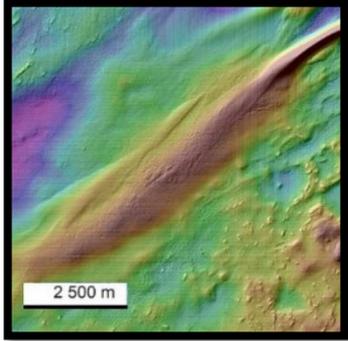
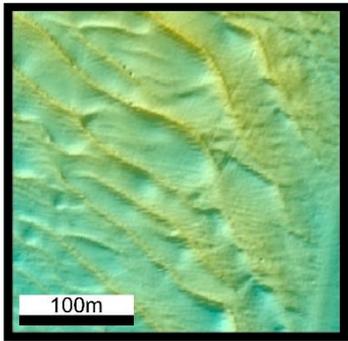
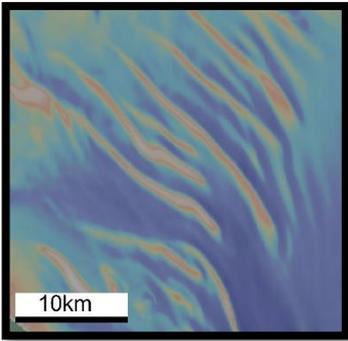
Nos sedimentos não coesivos (mais grossos), as formas de fundo presentes na plataforma continental são o resultado, em diversas escalas temporais, dessas tensões entre as forças hidrodinâmicas com os diferentes tipos de sedimentos, originando feições rítmicas dos mais diferentes tipos e dimensões (Figueiredo Jr., 1980; Swift and Field, 1981; Figueiredo Jr. et al., 1982; Swift and Thorne, 1991; Barnard et al., 2011; Goff et al., 2015; Mazières et al., 2015; Pendleton et al., 2017; Schwab et al., 2017; Sarkar et al., 2021).

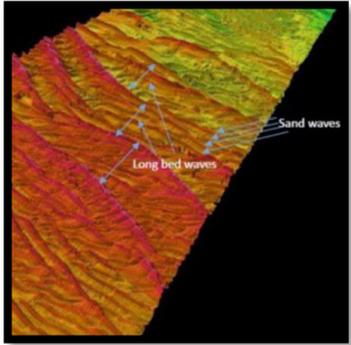
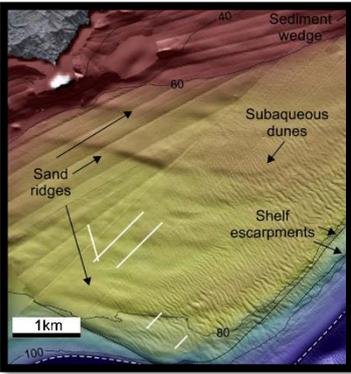
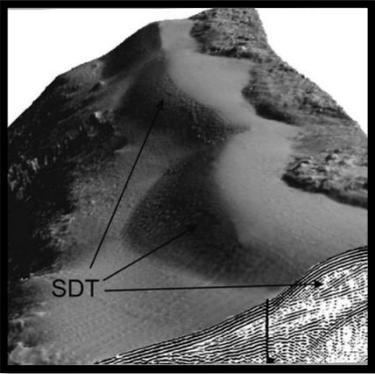
O tamanho da feição varia proporcionalmente com o tempo de atuação, a direção preferencial e a abrangência espacial de um determinado fluxo hidrodinâmico, podendo ser de pequena escala como *ripples* (centimétricas a métricas) até de larga escala como bancos arenosos (*sand ridges*) quilométricos (Tabela 1) (Belderson et al., 1982; Ashley, 1990; Calvete, 2017; van Dijk and Lindenbergh, 2017). Essas feições podem coexistir em uma mesma região de forma sobreposta (Ernstsen et al., 2006; van Dijk et al., 2008, 2021; Calvete, 2017; van Dijk and Lindenbergh, 2017) e podem ser classificadas a partir da sua altura (h), espaçamento entre as cristas ou comprimento de onda (λ), orientação ($^\circ$), declividades ($^\circ$) e formato (Madricardo and Rizzetto, 2018).

Tabela 1. Descrição das classes e tipos de formas de fundo (*bedforms*) para feições na plataforma continental em ambientes com sedimentos não coesivos.

Tipo*	Escala**	h (m)	λ (m)	Principais processos formadores	Principais referências	Exemplos
<i>Ripples</i>	Pequena	<2	<0,6	Fluxos laminares (correntes de maré ou costeiras) e oscilatórios (ondas)	(Belderson et al., 1982; Figueiredo Jr. et al., 1982; Ashley, 1990; Bellec et al., 2010; Guerrero and Guillén, 2020)	 <p>Fonte: do autor</p>

<i>Mega ripples</i>	Pequena	<2	<100	Fluxos laminares unidirecionais (correntes de maré)	(Figueiredo Jr. et al., 1982; Gallagher, 2003; Bellec et al., 2019)		Fonte:(Bellec et al., 2019)
<i>Sand waves</i>	Muito larga	>2	>100		(Figueiredo Jr. et al., 1982; Bastos et al., 2002; Bøe et al., 2009; Yincan et al, 2017; van Dijk et al., 2021)		Fonte: (Bellec et al., 2019)
<i>Sand dunes</i>	Média	>2	0,6 - 5		(Ashley, 1990; Ikehara and Kinoshita, 1994; van Dijk et al., 2021)		Fonte:(Durán et al., 2017)
<i>Sand ribbons</i>	Larga	<1	>200		(Belderson et al., 1982; Moscon and Bastos, 2010; Madricardo and Rizzetto, 2018)		Fonte:(Vött and Brückner, 2009)

<i>Sand patches</i>	Larga	<1	>200			 <p>Fonte:(Moscon and Bastos, 2010)</p>
<i>Sand banks</i>	Larga	2 - 3	-		(Belderson et al., 1982; Moscon and Bastos, 2010; Madricardo and Rizzetto, 2018) (Tonnon et al., 2007; Besio et al., 2008; Calvete, 2017)	 <p>Fonte: (Bellec et al., 2019)</p>
<i>Tidal sand waves</i>	Muito larga	>5	>200	Correntes de maré intensas		 <p>Fonte:(Greene et al., 2017)</p>
<i>Tidal sand banks</i>	Muito larga	>20	>80x10 ³	Circulação residual por conta da interação entre a corrente de maré e a feição	(Hulscher et al., 1993; Trentesaux et al., 1999; Calvete, 2017)	 <p>Fonte:(Swart and Yuan, 2019)</p>

<i>Long bed waves</i>	Muito larga	>20	>1,5 x10 ³	Circulação não-linear de correntes de maré influenciado pelo efeito de Coriolis	(Yuan et al., 2016; Calvete, 2017)	
<i>Sand ridges</i>	Muito larga	>5	>4x10 ³	Fluxo laminar unidirecional (induzidos por ondas, marés ou ventos) e grande aporte de sedimentos	(Figueiredo Jr. et al., 1981; Swift and Field, 1981; Li and King, 2007; Nnafie et al., 2015; Calvete, 2017; Yincan et al., 2017)	
<i>Terraces</i>	Muito larga	>5	-	Estabilização do nível do mar	(Casalbore et al., 2017)	

*Nomenclatura padronizada na língua inglesa.

** Classificação de primeira ordem segundo Ashley (1990).

A remobilização dos sedimentos nas áreas mais profundas da plataforma ocorre de forma menos intensa que na águas mais rasas, permitindo também uma maior deposição de finos em sua superfície (Niedoroda, 2019). Essa perda de capacidade de transporte dos processos hidrodinâmicos em razão da profundidade permite a deposição de lentes, bolsões ou cinturões de lama (Foster and Carter, 1997; Mahiques et al., 1999, 2004, 2016, 2021; Meadows et al., 2002; Friedrichs and Wright, 2004; Gao and Collins, 2014; Oberle et al., 2014; Figueiredo Jr. et al., 2016) e que podem ser eventualmente remobilizados pela ação de tempestades, correntes costeiras mais intensas ou por gravidade.

Em perfil, a sedimentação na plataforma continental ocorre de maneira aproximada ao formato de cliniformas, que consistem em pacotes sedimentares sigmoides que são depositados nas porções proximais ao perfil batimétrico (Rich, 1951; Helland-Hansen and Hampson, 2009; Patrino and Helland-Hansen, 2018). Elas representam um perfil batimétrico “congelado” ou preservado, quando em sub-superfície ou em áreas que não

sofrem processos erosivos intensos (Patrino and Helland-Hansen, 2018). Patrino and Helland-Hansen (2018) descrevem quatro tipos principais de ambientes de clinofomas na margem continental, são elas: costeiras, deltas, quebra de plataforma e de margem continental.

De acordo com esses autores, as clinofomas costeiras correspondem a feições formadas em regiões onde o aporte de sedimentos (drenagem continental) supera a capacidade de erosão, sendo depositados ou mobilizados por correntes, ondas, marés e por gravidade. Podem ser observadas em ilhas barreira e na antepraia (*shoreface*), por exemplo (Helland-Hansen and Hampson, 2009). Os ambientes de delta representam feições de 10 a 30m formadas em curta escala de tempo, podendo estar associadas as clinofomas costeiras. Essas clinofomas de delta se formam a partir da acumulação de sedimentos no ambiente de transição entre um fluxo de alta energia para um de baixa energia. Na plataforma média podem ocorrer também clinofomas de delta subaquosas, que correspondem a sedimentação geralmente lamosa associadas a diminuição da energia em direção ao mar em áreas de desembocadura, logo após a sedimentação da clinofoma deltaica (Helland-Hansen and Hampson, 2009; Patrino and Helland-Hansen, 2018).

Clinofomas de quebra de plataforma são feições que podem se formar na região marginal de bacias marinhas ou lacustres, em áreas com profundidades de algumas centenas de metros (Helland-Hansen and Hampson, 2009; Patrino and Helland-Hansen, 2018). Estas clinofomas representam a própria mudança fisiográfica entre a plataforma continental em si e o talude, bem como dos processos deposicionais e de fácies sedimentares entre esses dois ambientes. Todas essas feições são fortemente influenciadas pelas variações no nível do mar, e quanto maior a escala, maior a distância da fonte de sedimento e, por sua vez, menor é a taxa de progradação e menor a possibilidade de formação de terraços batimétricos (Patrino and Helland-Hansen, 2018).

3.2. A composição biogênica nos sedimentos da plataforma

Os organismos bentônicos e pelágicos também atuam como fonte de sedimentos a partir das suas carapaças e esqueletos (Bathurst, 1972; Ginsburg and James, 1974; Berger and Wefer, 2009), bem como na construção direta e indireta de estruturas rígidas no fundo marinho (como recifes, bancos biogênicos e *beachrocks*) (Berger and Wefer, 2009). Além disso, o próprio ambiente geológico e oceanográfico oferece condições distintas para a ocorrência dos mais variados tipos de organismos, atuando no selecionamento da colonização do substrato por diferentes espécies bentônicas (Heap and Harris, 2011).

Pode-se atribuir a contribuição biogênica (ou bioclástica) aos sedimentos da plataforma como sendo majoritariamente de partículas carbonáticas, provenientes de carapaças de moluscos, ooides, peloides, agregações sólidas e estruturas de algas calcárias, esponjas e recifes de coral, bem como vasas de carapaças de foraminíferos planctônicos nas áreas mais profundas (Ginsburg and James, 1974; Holt et al., 1998; Whitney et al., 2005; Berger and Wefer, 2009).

Esses bioclastos também sofrem a influência das mesmas variáveis hidrodinâmicas (transporte e retrabalhamento) e processos biogeoquímicos que os sedimentos siliciclásticos (Bathurst, 1972; Ginsburg and James, 1974; Berger and Wefer, 2009), sendo transportados por longas distâncias (finos) ou depositados próximos a sua fonte (detritos maiores de recifes coralíneos e bancos de algas) (Bathurst, 1972). A presença de cascalhos bioclásticos (mais difíceis de serem transportados) é um forte indicativo da existência de organismos vivos associados (Bathurst, 1972).

3.3. Os recifes e sua contribuição bioclástica

O termo “recife” pode ser usado para construções biogênicas rígidas como, por exemplo, composto por algas coralinas, corais, gorgônias, briozoários e vermetídeos, e também para afloramentos rochosos ou até estruturas artificiais como pneus, naufrágios ou blocos de concreto (Collette and Rutzler, 1977). Os recifes podem ser

então definidos como feições rígidas que surgem do fundo do mar com características morfológicas distintas do seu entorno (Holt et al., 1998). Todos os tipos de “recifes”, naturais ou artificiais, podem representar o mesmo papel ecológico a partir de um padrão tridimensional estável, atuando como substrato para o desenvolvimento de espécies bentônicas (Braithwaite, 1973) ou abrigo para espécies de peixes e invertebrados recifais (Collette and Rutzler, 1977).

Os organismos que constroem os recifes biogênicos na plataforma continental geralmente dependem diretamente da intensidade de luz, uma vez que muitas espécies bioconstrutoras realizam a fotossíntese, como no caso das algas calcárias, ou estão em simbiose com organismos fotossintetizantes, como os corais. A zona de ocorrência desses recifes pode ser dividida em três (Figura 2): i) a Zona Altifótica, com a maior intensidade de luz (entre 0 e ~40m de profundidade), ii) a Zona Mesofótica, com a diminuição drástica na intensidade de luz (entre 30 e ~150m de profundidade) e rarifótica, que correspondem a faixa de maior carência de luz abaixo da zona mesofótica (profundidades entre 150m e 300m) (Baldwin et al., 2018).

Os ambientes recifais altifóticos e mesofóticos da plataforma continental são ecologicamente distintos, apresentando uma maior riqueza nas águas rasas, mas abundância equivalente ou maior na região mais profunda (Rocha et al., 2018; Veras et al., 2020). Alterações morfológicas nos organismos bioconstrutores altifóticos podem ocorrer nas águas mais profundas como estratégia adaptativa as condições de baixa luminosidade e temperatura (Nir et al., 2011; Kahng et al., 2019).

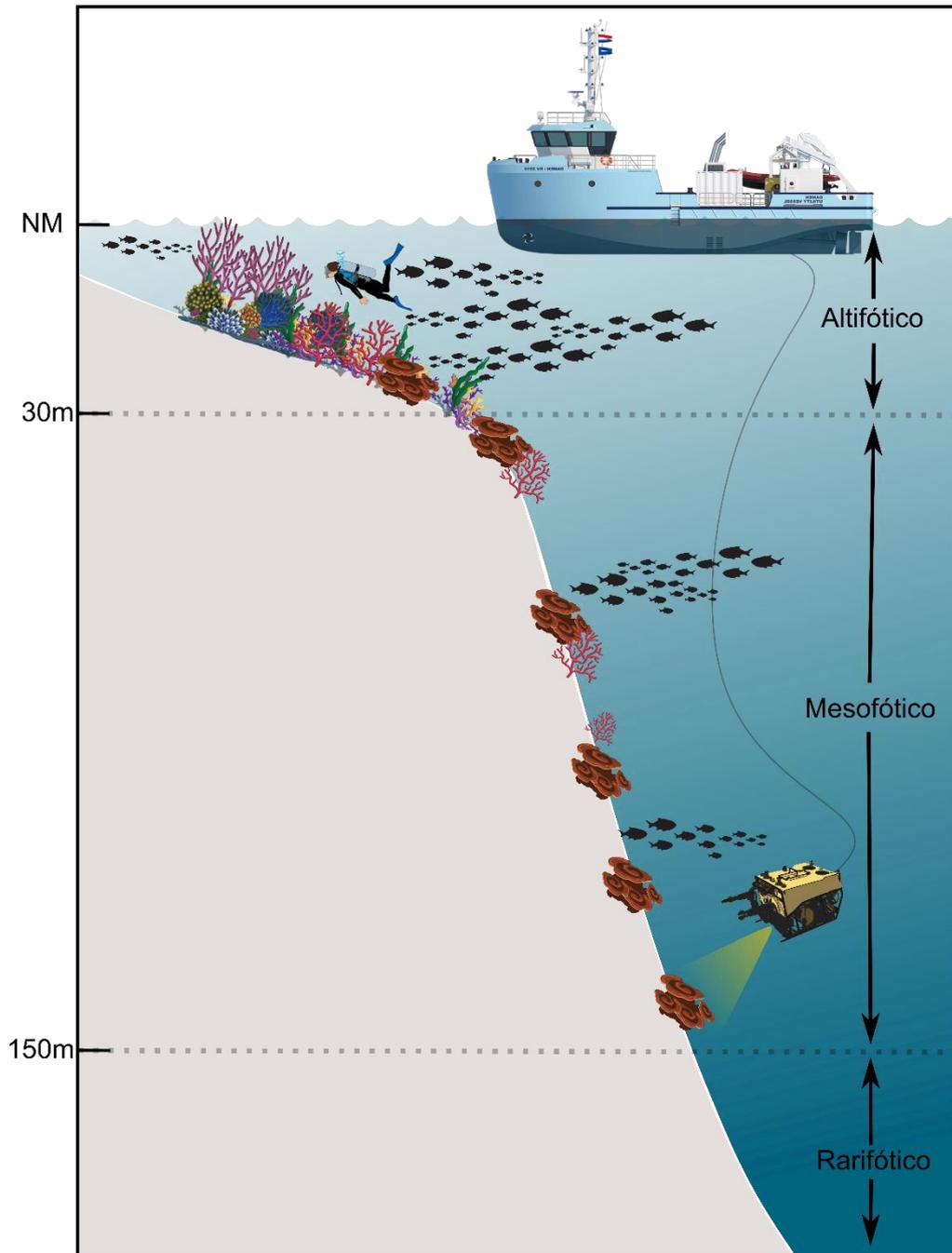


Figura 2. Zonização da luminosidade na borda de um recife, subdividido em altifótico (região de luz plena), mesofótico (região de diminuição de luminosidade) e rarifótico (região de pouquíssima luminosidade), indicando a diminuição de riqueza biológica nos recifes em razão da profundidade. NM-Nível do Mar. Fonte: do autor.

3.3.1. Recifes rasos ou altifóticos (profundidades menores que 30m)

Dentre os ambientes recifais litorâneos rasos, destacam-se os costões rochosos (Figura 3A e B), os recifes biogênicos como de briozoários (Figura 3C e D) e de corais (Figura 3E e F), lajes submersas e os recifes artificiais (Figura 3G e H). Organismos sésseis como esponjas, corais, algas calcárias (coralináceas incrustantes), hidrozoários (gênero *Millepora*), antozoários, moluscos e ouriços-do-mar colonizam esses substratos duros juntamente com macroalgas e peixes recifais (Coutinho and Zalmon, 2009; Yamanaka et al., 2012).

A bioerosão e a quebra dos esqueletos carbonáticos desses organismos por processos físicos (impacto de ondas, por exemplo) contribuem para a fragmentação do recife, dando origem a sedimentos bioclásticos que são selecionados e dispersados nas águas rasas pelas ondas e correntes (Perry et al., 2015; Janen et al., 2017). A relação entre o tamanho dos bioclastos e a sua distribuição no fundo marinho depende do tipo de organismo de origem, o tamanho do grão e a capacidade de transporte das forças hidrodinâmicas (Bathurst, 1972).

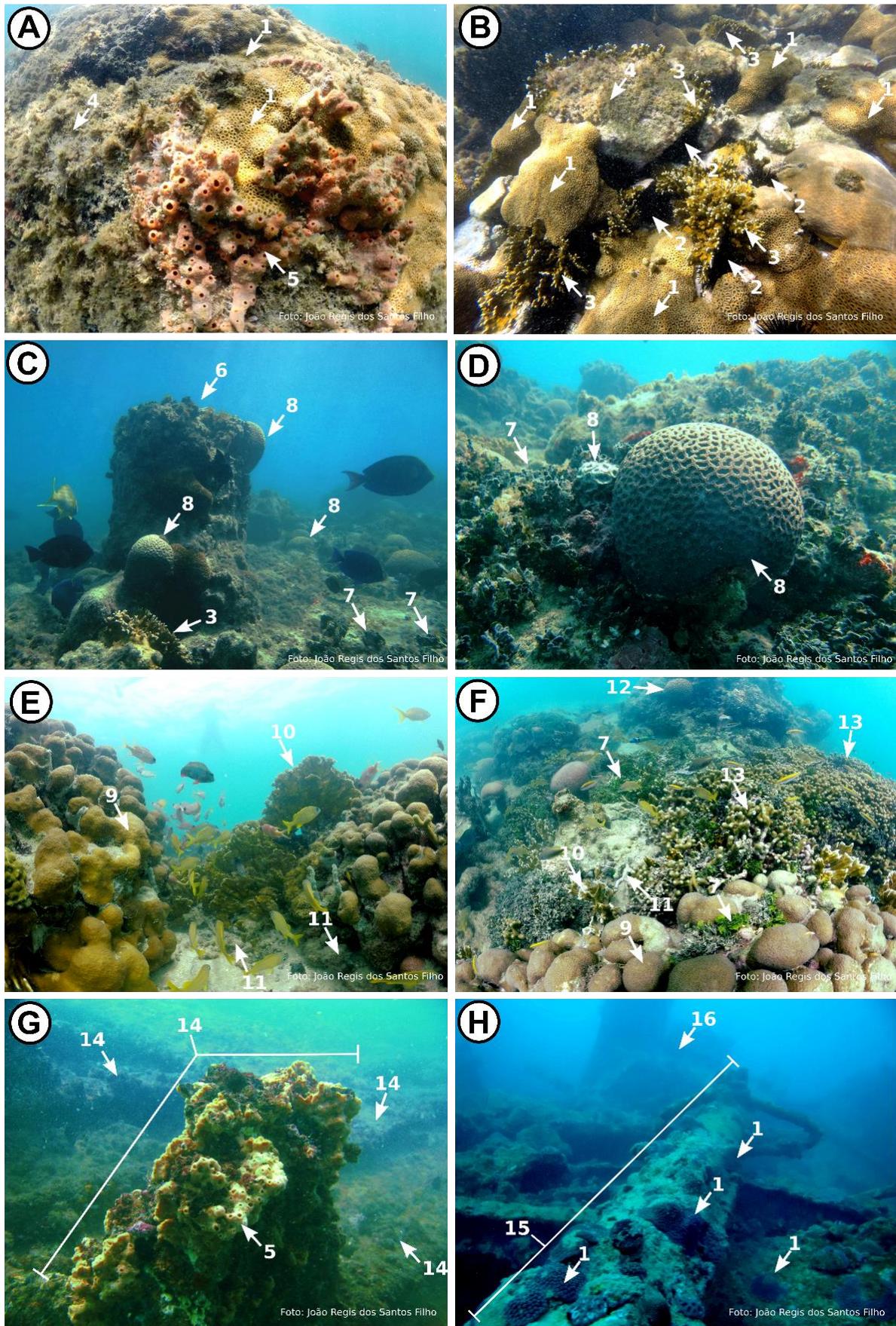


Figura 3. Exemplo da grande riqueza de diversidade biológica dos diferentes tipos de “recifes” alifóticos, sendo: A- costão rochoso em Ilha Grande (Angra dos Reis-RJ), B- costão rochoso em Arraial do Cabo (RJ), C e D- recife de briozoários com a presença de algas

calcárias e corais em Abrolhos (BA), E e F- recife de coral na região de Barú, no Caribe Colombiano, G- recife formado sobre os resquícios soçobrados dos navios Germânia e Bretagne (recife artificial), próximos ao Farol da Barra em Salvador (BA) e H- recife formado sobre o soçobrado do navio Santa Catharina, em Abrolhos (BA). Os indicadores numéricos são: 1- pólipos de coral da ordem Scleratinia (*Monastrea sp.*), 2- ouriços-do-mar, 3- hidrozoários do gênero *Millepora*, 4- macroalgas, 5- esponjas, 6- pináculo carbonático (originados de briozoários, segundo Bastos et al., 2018) do tipo “chapeirão” de Abrolhos, 7- algas calcáreas verdes do gênero *Halimeda*, 8- coral da ordem Scleractinia (*Mussismilia sp.*), 9- pólipos de coral da ordem Scleratinia, 10- exemplares de corais ramificantes, 11- esqueletos de corais mortos agindo como substrato para os corais vivos, 12- exemplar de coral-cérebro, 13- espécie de coral ramificante, 14- cavernames incrustados dos naufrágios do Germânia e Bretagne, 15- mastro do naufrágio Santa Catharina, em Abrolhos, com incrustações de corais, 16- parte do casario soçobrado do navio Santa Catharina. Fonte: o autor.

3.3.2. Recifes mesofóticos (profundidades entre 30 e mais de 150m)

Já nos ambientes mesofóticos, os tipos de recifes mais relevantes são as bioconstruções de algas calcárias (Figura 4A e B), os *Mesophotic Coral Ecosystems* (MCEs) (Figura 4C e D) e as incrustações capeando *beachrocks* (Figura 4E) ou arenitos (Figura 4F) (Collette and Rutzler, 1977; Holt et al., 1998; Villaça, 2009; Yamanaka et al., 2012). Embora tenham uma menor riqueza que os recifes altifóticos, uma considerável variedade de algas calcárias, esponjas, briozoários e algumas espécies de corais são observadas colonizando os substratos rígidos nessa zona, cuja sua formação está geralmente associada a recifes relictos formados em períodos de nível de mar baixo e afogados durante a transgressão marinha quaternária.

A fragmentação do recife mesofótico ocorre principalmente a partir da bioerosão e seus depósitos resultantes sendo dispersos no fundo do mar por forçantes hidrodinâmicas como as correntes (Weinstein et al., 2014, 2015, 2021). As correntes de fundo geralmente não são capazes de transportar os grãos de cascalho provenientes da bioerosão ou da fragmentação mecânica dos talos e protuberâncias das algas calcárias. Animais como peixes (a exemplo do peixe-papagaio ou budião) representam um papel importante na dispersão dos sedimentos carbonáticos nos recifes eufóticos e mesofótico (Bellwood, 1996; Weinstein et al., 2014; Perry et al., 2015; Morgan and Kench, 2016).

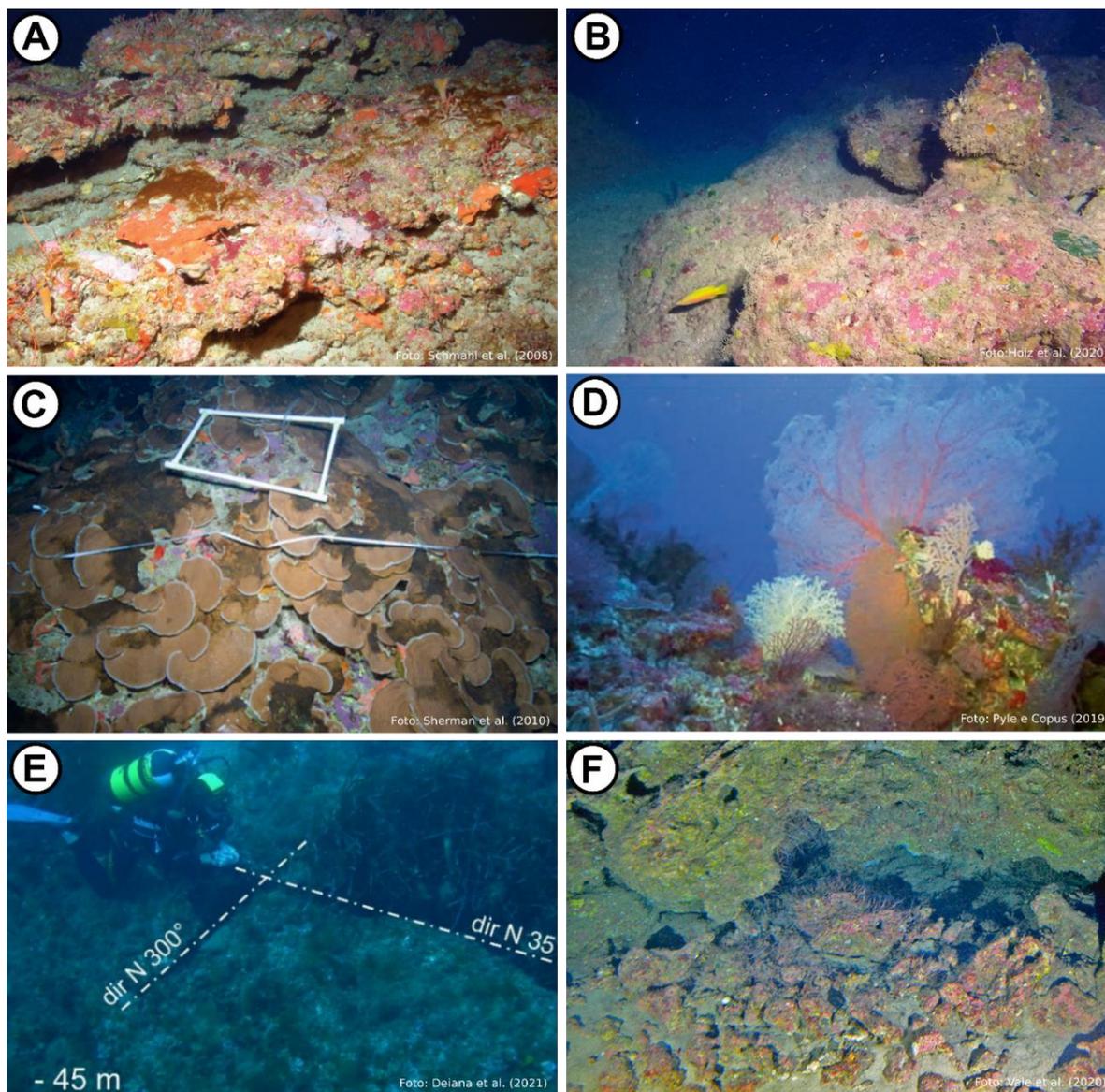
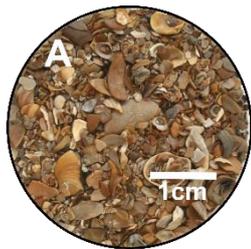


Figura 4. Exemplo da baixa riqueza de diversidade biológica dos principais tipos de “recifes” mesofóticos, sendo: A- recife de algas calcárias a 81m de profundidade no Golfo do México (Schmahl et al., 2008), B- recife de algas calcárias a 103m de profundidade no estado do Espírito Santo (Holz et al., 2020), C- *Mesophotic Coral Ecosystem* (MCE) a 76m de profundidade em Porto Rico, no Mar do Caribe (Sherman et al., 2010), D- MCE a 110m de profundidade na República de Palau, na Micronésia, E- *Beachrock* submerso a 45m de profundidade na costa da Sardenha, Mar Mediterrâneo (Deiana et al., 2021) e F- afloramento de arenito parcialmente incrustado por algas calcárias a 120m na plataforma continental externa da Margem Equatorial Brasileira (Vale et al., 2022a).

3.4. Recifes mesofóticos e sedimentos bioclásticos na Plataforma Continental Brasileira

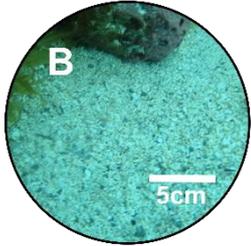
No Brasil, os sedimentos carbonáticos são formados por biodetritos (agregados ou granulados) provenientes de moluscos, briozoários, foraminíferos bentônicos e algas calcárias (Figura 5) que ocorrem na forma aderente, foliácea e livres (Martins and Coutinho, 1981; Steneck, 1986; Dias, 2000; Dias et al., 2021). No caso das algas calcárias, elas ocupam uma vasta diversidade de habitats na plataforma continental, ocorrendo em profundidades de até 200m, e são importantes atores na construção de recifes biológicos (Bosence, 1983; Dias, 2000; Bôas et al., 2005). Essas areias e cascalhos biodetríticos estão mais localizados nas regiões de plataforma externa e média, podendo atingir a plataforma interna em algumas localidades (Martins and Coutinho, 1981; Dias, 2000).



A Bioclásticos da plataforma continental

Local: Rio Grande do Sul

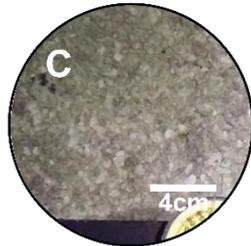
Foto: Corrêa et al. (2019)



B Agregados bioclásticos associados a recife raso

Local: Abrolhos (BA)

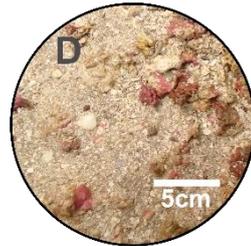
Foto: do autor



C Talos de *Halimeda sp.* associado a recife raso

Local: Parcel de Manoel Luis (MA)

Foto: Dias et al. (2021)



D Bioclóstos de algas calcárias em ambiente mesofótico

Local: Bacia de Santos

Foto: PCR-BS



E Cascalhos bioclásticos da plataforma continental

Local: Ceará

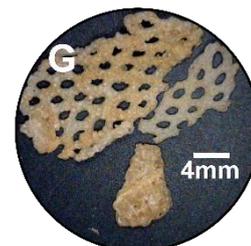
Foto: Ximenes Neto et al. (2018)



F Foraminíferos bentônicos da plataforma continental

Local: Bacia de Sergipe - Alagoas

Foto: Fontes et al. (2017)



G Bioclásticos de briozoários da plataforma continental

Local: Bacia de Sergipe - Alagoas

Foto: Fontes et al. (2017)

Figura 5. Alguns exemplos de biodetritos da Plataforma Continental Brasileira, sendo: A- formados por conchas de moluscos, ou “concheiros”, no Rio Grande do Sul, B- agregados carbonáticos de recifes altifóticos em Abrolhos (BA), C- fundo totalmente recoberto

por talos de *Halimeda* próximos ao Parcel de Manoel Luís (MA), D- Bioclastos resultantes da fragmentação das algas calcárias na Bacia de Santos, E- cascalhos carbonáticos da plataforma continental cearense, F- foraminíferos bentônicos e G- fragmentos de briozoários que compõem os bioclastos da plataforma da Bacia de Sergipe-Alagoas.

A presença de corais no Brasil não está associada necessariamente a ocorrência de “recifes de coral” tanto na zona alifótica quanto na mesofótica, mas mais comumente ocorrem de forma esporádica sobre substratos duros pré-existentes (Castro and Pires, 2001). De acordo com esses autores, a ocorrência de recifes de corais verdadeiros na margem brasileira é restrita, tanto devido a plataforma continental muito estreita em algumas localidades quanto pela baixa diversidade de espécies formadoras de recifes na margem Brasileira, quando comparada com outras regiões do mundo. Os principais organismos bioconstrutores que compõe a estrutura dos recifes biogênicos brasileiros são de fato as algas calcárias e os briozoários, com pouca contribuição de corais (majoritariamente da ordem Scleratinia) e hidrocorais (gênero *Millepora*) (Leão et al., 2016; Bastos et al., 2018).

Como exemplo, temos duas importantes áreas recifais alifóticas na plataforma continental Brasileira: os recifes de Abrolhos (BA) (Figura 6A) e de Manuel Luís (MA) (Figura 6B). Esses recifes rasos foram formados durante a última transgressão marinha e não são constituídos exclusivamente de corais, mas sim compostos principalmente por algas calcárias com colônias esparsas de corais, sendo os pináculos fixados sobre estruturas de briozoários no caso de Abrolhos, ou por sobreposição dessas algas coralíneas possivelmente sobre um afloramento rochoso no caso de Manoel Luís (Castro and Pires, 2001; Moura et al., 2016; Bastos et al., 2018; Dias et al., 2021).



Figura 6. A- Recife alifótico de Abrolhos (BA) e B- Recife alifótico de Manuel Luís (MA).

Além das algas coralíneas vermelhas, os recifes de Manuel Luís são ricos em algas calcárias verdes do gênero *Halimeda* que recobrem grande parte do fundo e dos sedimentos do recife (Dias et al., 2021). Ao longo de toda a margem equatorial e leste, existe uma grande contribuição da alga calcária verde da espécie *Halimeda incrassata* na composição dos sedimentos carbonáticos marinhos, formando agregados cascalhosos a partir dos talos retrabalhados pela hidrodinâmica (Dias, 2000; Carneiro and Morais, 2016; Dias et al., 2021).

Já na zona mesofótica, estruturas biogênicas rígidas e de menor riqueza biológica podem ser observadas das regiões norte até o sudeste do Brasil, bordejando a plataforma média e externa até a quebra da plataforma continental. Essas estruturas (exemplos apresentados na Figura 7) correspondem a afloramentos de arenitos (Vale et al., 2022a), *beachrocks* incrustados ou massivos bancos de algas calcárias ou fundos de aglomerados de rodolitos em diversos estágios de coalescência. Essas estruturas podem estar vivas ou mortas, capeadas por filmes vivos de algas calcárias, macroalgas, esponjas e pólipos de corais.

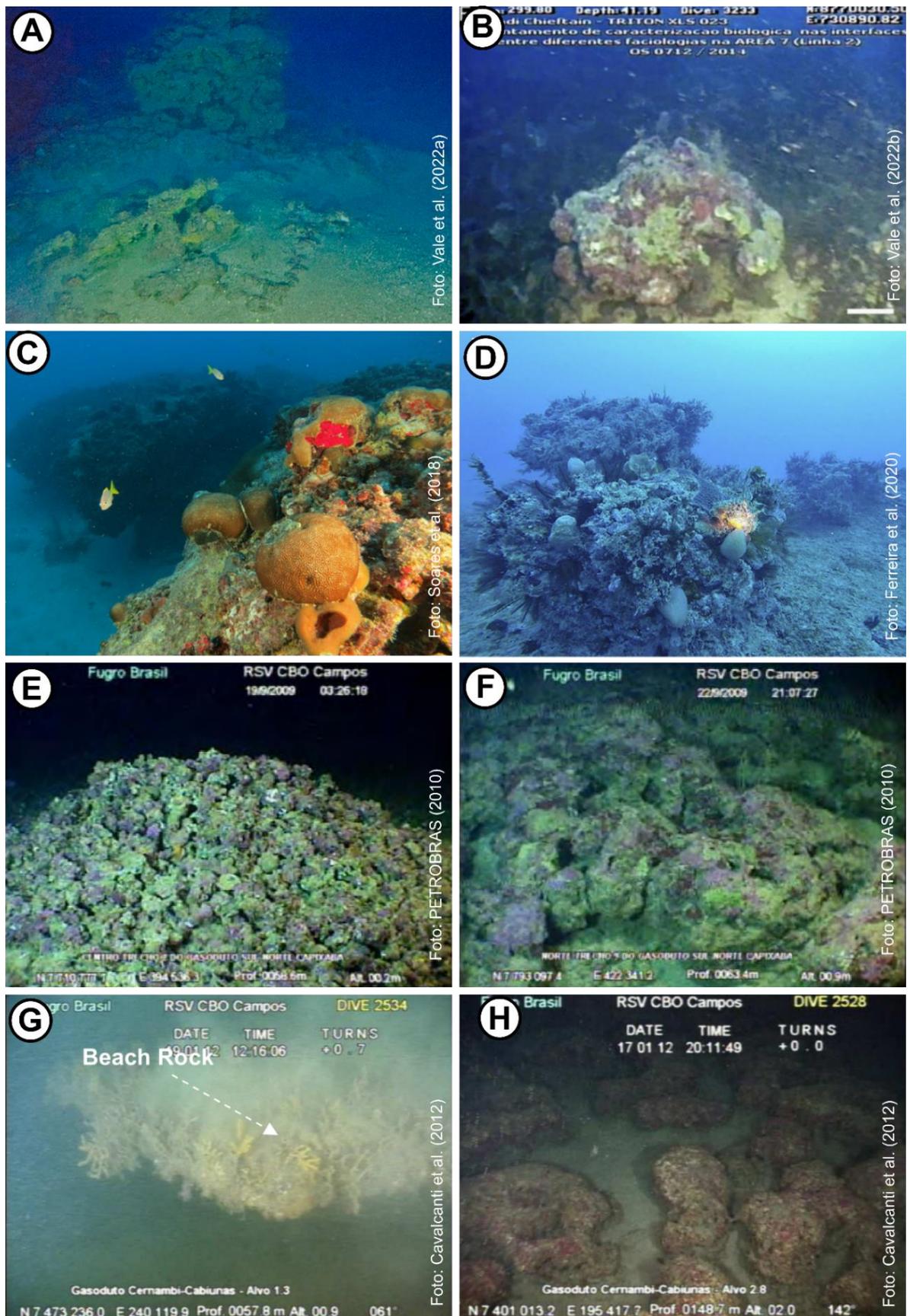


Figura 7. Exemplos de estruturas rígidas no fundo mesofótico da plataforma continental brasileira. Do norte para o sul: A- afloramento de arenito na plataforma externa (120m de profundidade) da Margem Equatorial Brasileira, B- estrutura coalescente de rodolitos (*box-work*) capeadas por algas calcárias a 40m de profundidade na Bacia de Sergipe,-Alagoas, C- recife de alga calcária com a ocorrência

de corais esparsos a 37m de profundidade na plataforma mesofótica do Ceará, D- chapeirões a 35m de profundidade em Abrolhos (BA), E- estrutura tridimensional formada pela aglomeração de rodolitos pelo peixe *Malacanthus plumieri* a 58m de profundidade no litoral do Espírito Santo, F- estrutura coalescente de rodolitos (*box-work*) a 63m de profundidade no Espírito Santo, G-Beachrock incrustado a 57m de profundidade na Bacia de Campos (RJ) e H- estrutura coalescente de rodolitos (*box-work*) entremeados por sedimentos inconsolidados a 148m de profundidade na Bacia de Santos (RJ).

As algas calcárias na sua forma livre, conhecidas como rodolitos, são um tipo de alga calcária vermelha que ocorrem na plataforma continental brasileira desde a região nordeste até a região sudeste, representando uma das maiores concentrações desses organismos no mundo (Tâmega et al., 2014; Horta et al., 2016). Os ambientes de concentração de rodolitos são importantes áreas de concentração biológica na plataforma continental, também atuando como ilhas tridimensionais de biodiversidade quando comparados com áreas monótonas no entorno (Nelson, 2009; Amado-Filho and Pereira-Filho, 2012).

Os rodolitos são importantes fornecedores granulados bioclásticos, que são depositados e transportados sobre e ao longo da plataforma (Dias, 2000; Amado-Filho et al., 2012). Importantes aglomerações de rodolitos ocorrem no Brasil (alguns exemplos apresentados na Figura 8), sendo reportados na Bacia de Campos (Tâmega et al., 2014), no banco de Abrolhos (Amado-Filho et al., 2012; Mazzei et al., 2017; Bastos et al., 2018; Ferreira et al., 2020), nas bacias da Foz do Amazonas e Pará-Maranhão (Francini-Filho et al., 2018; Vale et al., 2018; Mahiques et al., 2019; Calegario et al., 2021), no Rio Grande do Norte (Queiroz et al., 2016), na Bacia de Sergipe-Alagoas (Vale et al., 2022b), ao largo da Baía de Todos os Santos (Bahia et al., 2010) e seu registro mais a sul, na Ilha do Arvoredo (Gherardi, 2004; Pascelli et al., 2013).

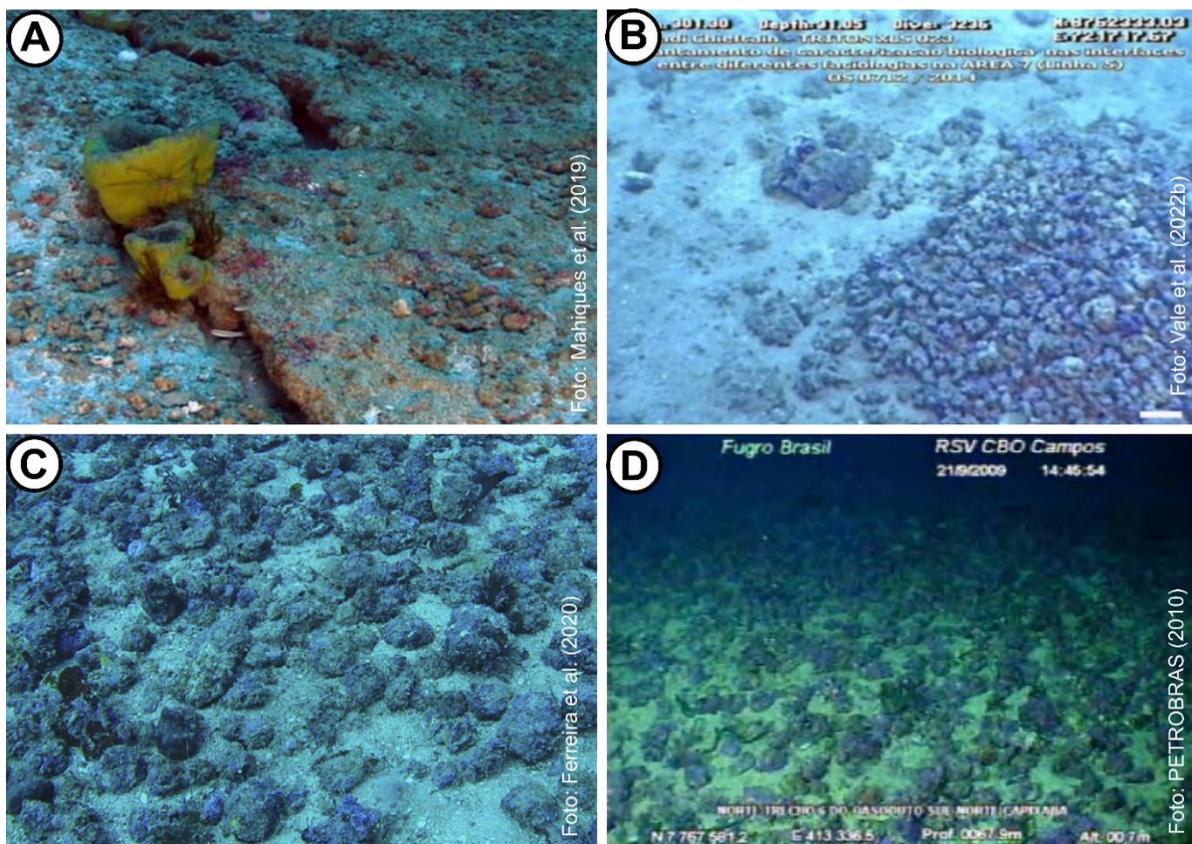


Figura 8. Fundo com algas calcárias de forma livre (rodolitos). De norte para sul: A- rodolitos localizados sobre afloramento de arenito na Margem Equatorial Brasileira, B- rodolitos localizados na zona mesofótica da Bacia de Sergipe-Alagoas, C- rodolitos próximos aos recifes de Abrolhos (BA) e D- rodolitos na zona mesofótica do estado do Espírito Santo.

3.5. As variações do nível do mar durante o Período Quaternário e a sua influência na geomorfologia da plataforma continental

O Período Quaternário foi marcado pela alternância entre glaciações e inter-glaciações resultando em importantes mudanças ambientais principalmente no que diz respeito as variações no nível médio do mar (Lewis, 1974; Schnack and Pirazzoli, 1990; Rabineau et al., 2006, 2007; Gao and Collins, 2014; Lambeck et al., 2014; Mörner, 2018; Gelder et al., 2020). Essas mudanças paleo-climáticas fizeram com que os processos responsáveis pela dinâmica costeira como: ondas, correntes litorâneas, marés, ressacas e ventos, tivessem atuado em profundidades distintas sobre a plataforma continental atual e sobre a planície costeira adjacente (Swift and Thorne, 1991).

De forma mais abrangente, as fases glaciais e interglaciais estão associadas aos efeitos astronômicos descritos pela teoria astronômica das eras glaciais (Williams, 2017). Três efeitos astronômicos principais foram previamente calculados por Milankovitch (1941) e posteriormente confirmados por Hays et al. (1976) e Berger e Loutre (1991), são eles: a excentricidade da órbita terrestre (período médio de 92ka) (Figura 9-a); a obliquidade do eixo de rotação da Terra (período médio de 41ka) (Figura 9-b) e a precessão do equinócio (período médio de 20ka) (Figura 9-c).

Esses eventos astronômicos regulam a incidência solar sobre o planeta, favorecendo o seu resfriamento e aquecimento cíclicos e, por consequência, regulando temporalmente a distribuição e a intensidade de energia solar na superfície do globo terrestre (Williams, 2017; Ehlers et al., 2018). Os ritmos orbitais calculados coincidem com as evidências geológicas globais sobre o avanço e o recuo da glaciação, sendo esses ciclos considerados como marcadores (*pacemakers*) das eras glaciais pela literatura científica (Hays et al., 1976; Williams, 2017).

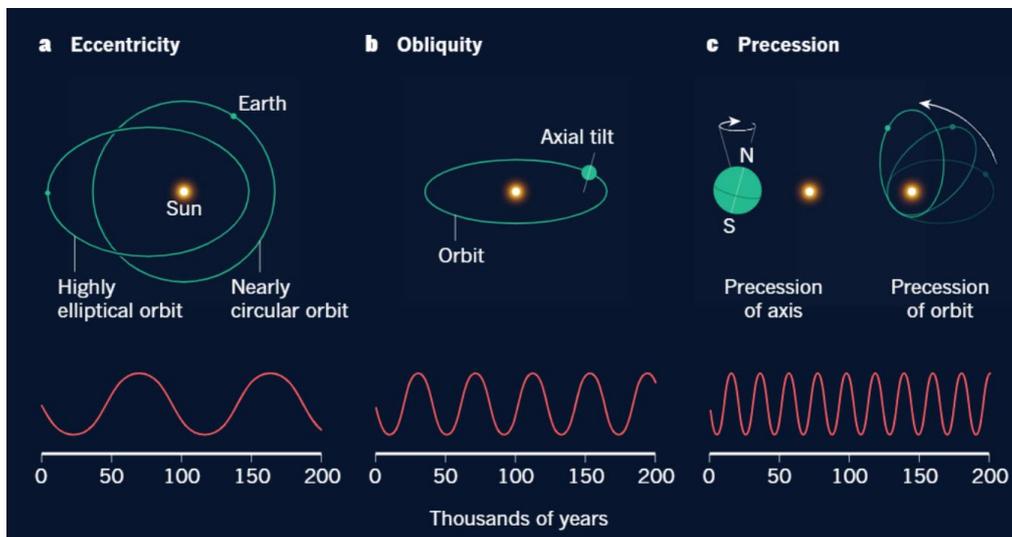


Figura 9. Ciclos de Milankovitch (1941), sendo a- Excentricidade, b- Obliquidade e c- Precessão. Os ritmos calculados coincidem com as evidências geológicas globais sobre o avanço e o recuo da glaciação, sendo *pacemakers* das eras glaciais. Fonte: (Maslin, 2016).

Para melhor compreender e mapear as mudanças climáticas do Quaternário considera-se os Estágios Isotópicos Marinhos (*Marine Isotope Stages - MIS* ou *Oxygen Isotope Stages - OIS*) (Pirazzoli, 1993; Williams, 2017). O MIS consiste na quantificação de isótopos de oxigênio aderidos nas carapaças de organismos marinhos planctônicos, como foraminíferos, sedimentados ao longo da coluna estratigráfica no oceano profundo (Williams, 2017). De acordo com este autor, essas carapaças carbonáticas indicam as características paleo-climáticas a partir da razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$, com o aumento da razão em períodos glaciais e diminuição em intervalos interglaciais. Isso se dá devido a sensibilidade desta razão $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$ as variações de temperatura da água do mar,

e também pelo enriquecimento de $H_2^{18}O$ no mar durante eventos de glaciação por conta do maior sequestro de $H_2^{16}O$ pelas geleiras (Williams, 2017).

A cronologia MIS deve ser então calibrada com outras evidências geológicas, como inversão geomagnética, bioestratigrafia e o posicionamento em eventos de pico já reconhecidos na curva isotópica (Pirazzoli, 1993). As curvas MIS do Quaternário podem ser subdivididos em flutuações *interstadials*, mais quentes, e *stadials*, mais frias (Williams, 2017), com estágios definidos e subestágios (Railsback et al., 2015) (Figura 10 e Figura 11). Assim sendo, a partir da geocronologia MIS e das evidências geológicas de variação do nível do mar, é possível refinar a curva global, regional e local, correlacionando-a com feições de relevo, por exemplo.

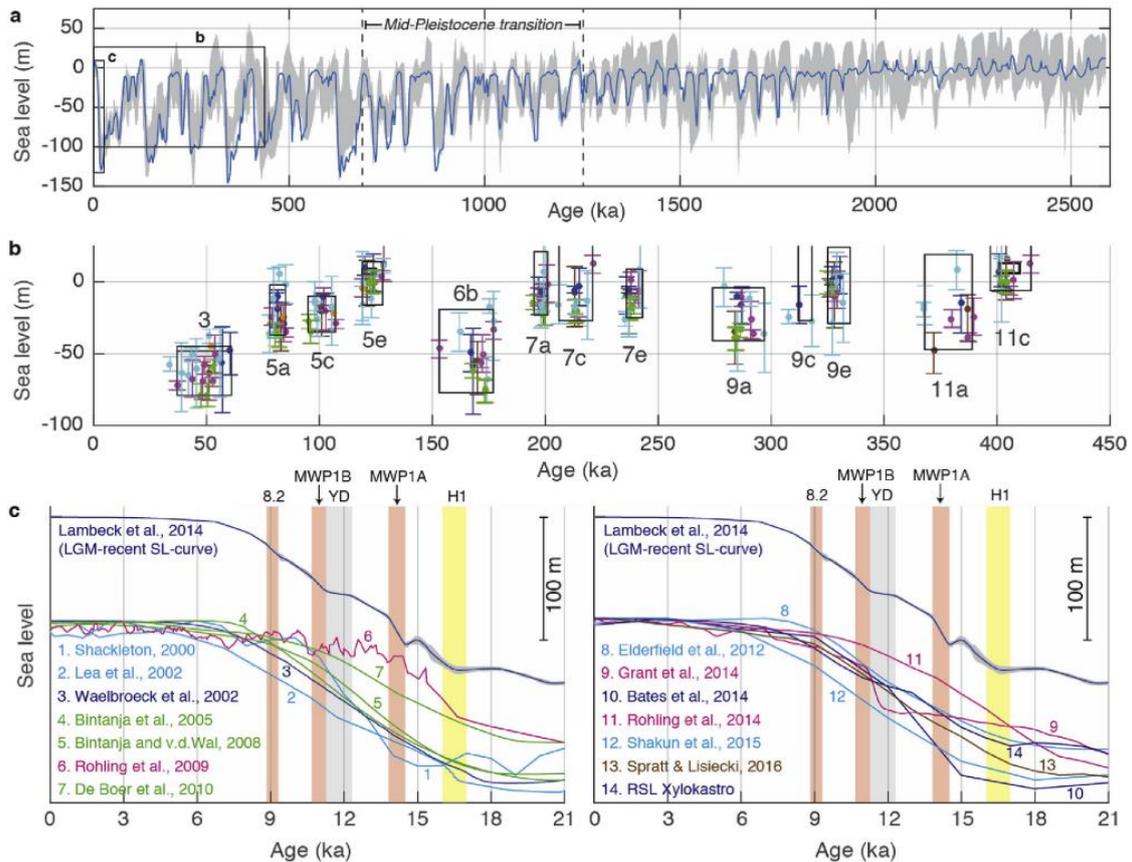


Figura 10. Variações do nível do mar nos últimos 2.500ka (a), 450ka (b) e 21ka (c) baseado em curvas e dados de 2000 a 2014, compilados por Gelder et al. (2020). Todos os dados apresentam uma mesma tendência geral, com uma rápida transgressão marinha entre 6 e 20ka antes do presente. Fonte: (Gelder et al., 2020).

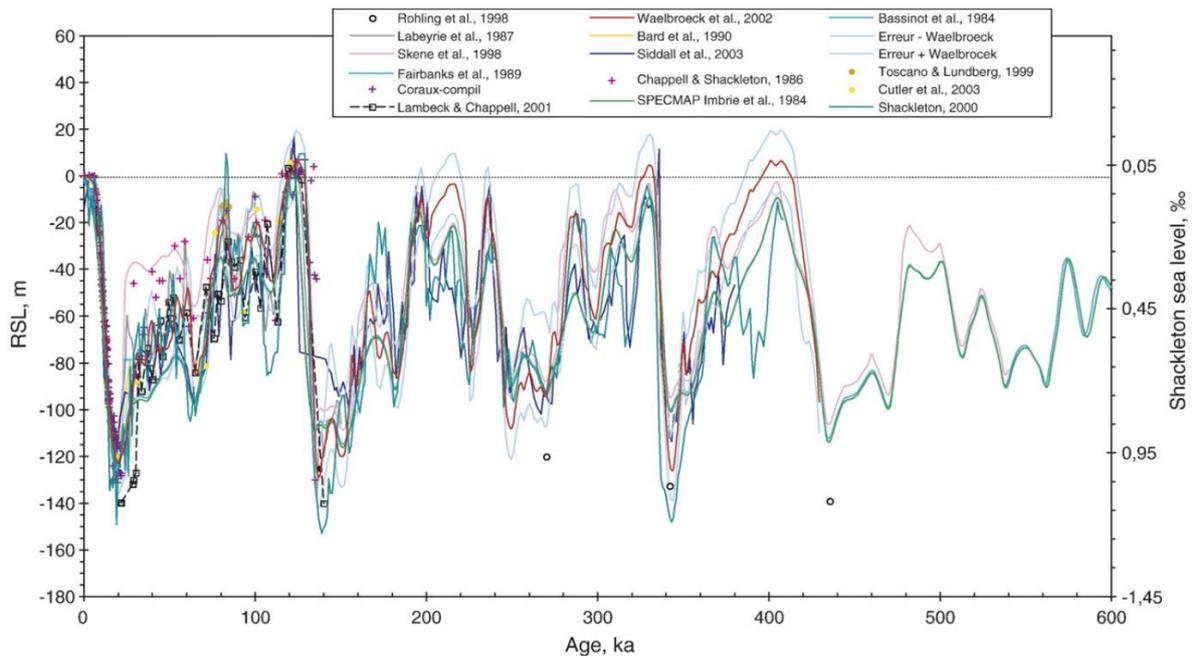


Figura 11. Variações do nível do mar nos últimos 600 ka, durante o Holoceno e o Pleistoceno (Rabineau et al., 2006, 2007) baseado em curvas e dados de 1984 a 2003. Fonte: (Rabineau et al., 2006, 2007).

No Brasil, as estimativas de variação do nível do mar regionais e locais durante o Holoceno são elaboradas a partir de evidências geológicas e estratigráficas nas regiões costeiras, como por exemplo pela datação de radiocarbono: (i) de bioconstruções de vermitídeos (Angulo and Suguio, 1995; Angulo and Lessa, 1997; Bezerra et al., 2003; Angulo et al., 2006, 2008, 2013; Spotorno-Oliveira et al., 2016; Toniolo et al., 2020), (ii) arenitos de plataforma (*beach rocks*), (Castro et al., 2014; Silva et al., 2014; Simioni et al., 2018), (iii) evidências estratigráficas (Caldas et al., 2006; Alves and Mahiques, 2019), (iv) evidências geoquímicas (Lazzari et al., 2019), (v) evolução e crescimento de habitats bentônicos (Dechnik et al., 2019) e (vi) evidências arqueológicas (Ybert et al., 2003). De maneira geral para a costa leste brasileira, o nível do mar durante o Holoceno teve o seu máximo relativo próximo de +4m , entre 5 e 6 ka, antes do presente, com tendência gradual de diminuição até o nível atual (Angulo and Lessa, 1997; Angulo et al., 2006) (Figura 12).

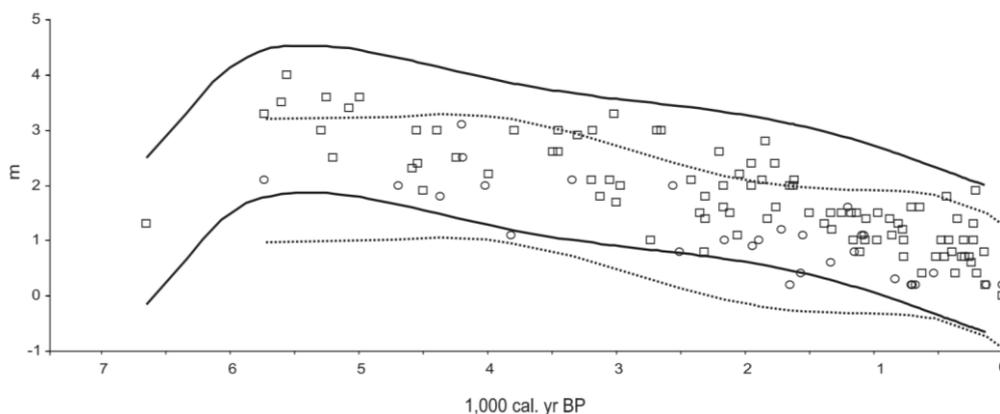


Figura 12. Variações do nível do mar nos últimos 7ka, em envelope, segundo Angulo et al. (2006). O pico máximo ocorreu a mais de 4m em relação ao nível médio atual, entre 5 e 6ka antes do presente. Fonte: (Angulo et al., 2006).

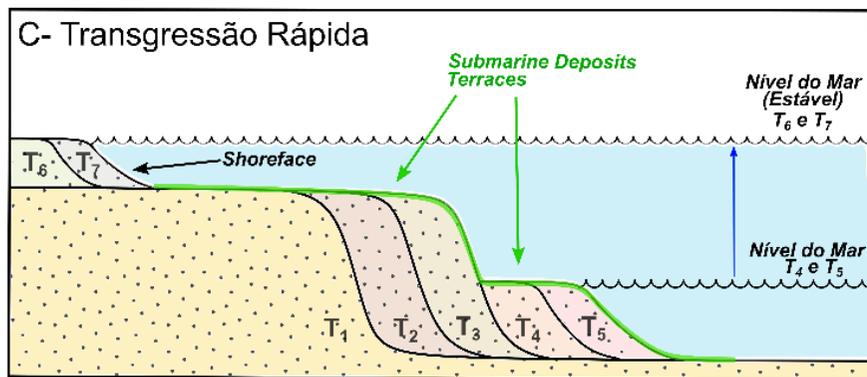
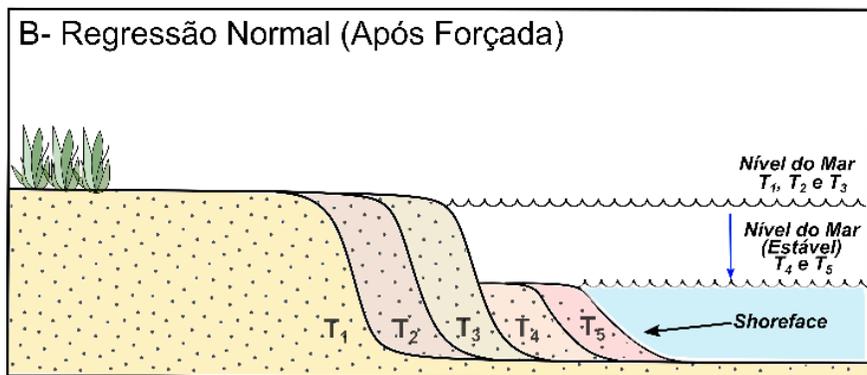
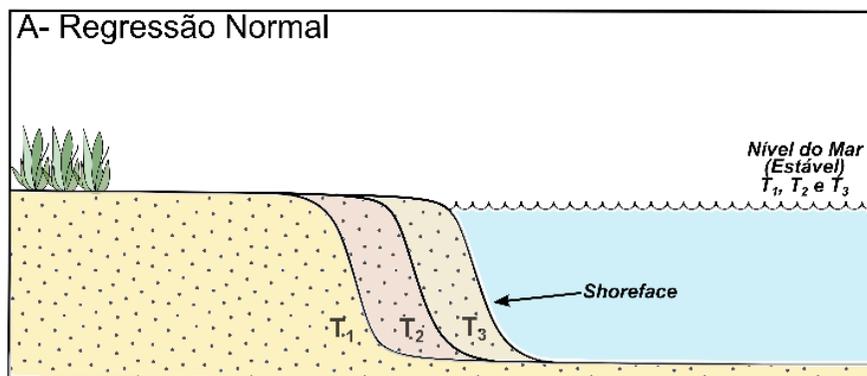
Algumas feições morfológicas preservadas na plataforma continental são resultado da exposição da sua superfície em condições subaéreas (dos eventos regressivos) e das estabilizações do nível de base (tanto em eventos regressivos quanto transgressivos). Dentre as principais feições relíquias, destacam-se os terraços

marinhos, os arenitos de praia (*beachrocks*) e os vales incisos. Evidências geomorfológicas e estratigráficas de terraços marinhos e de ocorrência de antigas antepraias (*shorefaces*) na plataforma continental foram identificados em superfície e subsuperfície em diversos trabalhos ao redor do mundo (Rabineau et al., 2006, 2007; Schattner et al., 2010; Galparsoro et al., 2010; Harris et al., 2013; Reis et al., 2013; Casalbore et al., 2016, 2017, 2018b, 2018a; O’Leary et al., 2020).

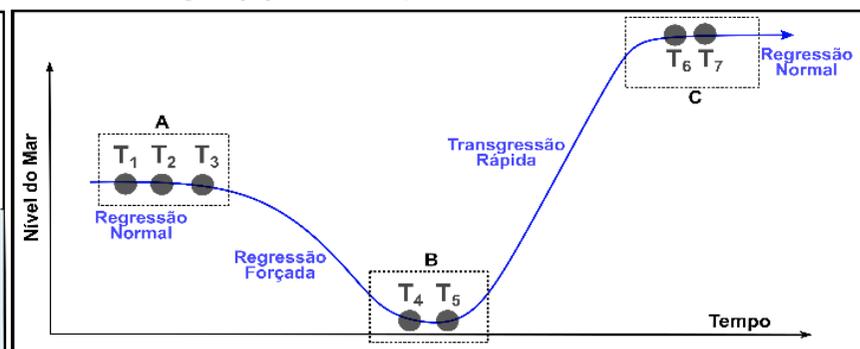
Os terraços marinhos (*Submarine Deposit Terraces*) são feições presentes no perfil batimétrico, caracterizados por degraus em determinadas faixas de profundidade ao longo da plataforma (Figura 13-i). Elas correspondem ao prisma costeiro abandonado quando o nível do mar diminui, sendo reconstruídos em uma nova estabilização em um nível mais abaixo (Posamentier and Vail, 1988; Posamentier et al., 1988; Wagoner et al., 1988; Catuneanu et al., 2009). Essas feições seriam então afogadas durante um evento de transgressão marinha rápida, permanecendo parcialmente preservadas em profundidades coincidentes com os eventos de estabilização do nível do mar.

Já os arenitos de praia (*beachrocks*) são formados pela cimentação de areias quartzosas e fragmentos de conchas por micrita ou aragonita formados na escala de meses ou anos (Malta and Castro, 2018), normalmente na região de entre marés e supra litoral (*spray zone*) de regiões tropicais (Figura 13-iii). Por isso, essas feições são usadas como importantes evidências geomorfológicas relacionados a paleo-níveis do mar.

i - Formação dos terraços marinhos



ii - Cronologia (T) em relação ao Nível do Mar



iii - Beachrocks na plataforma continental

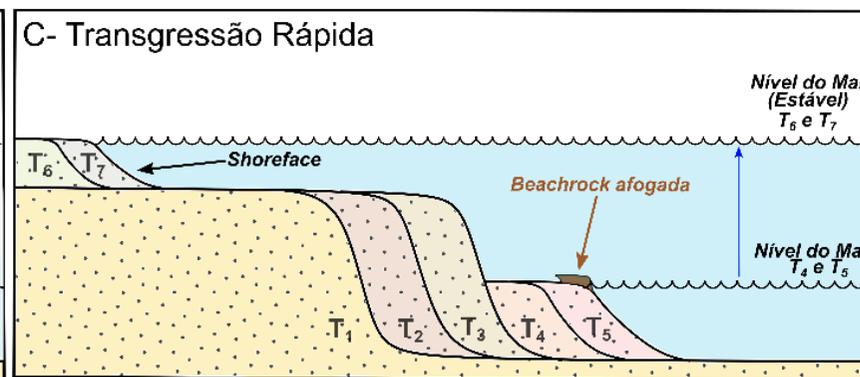
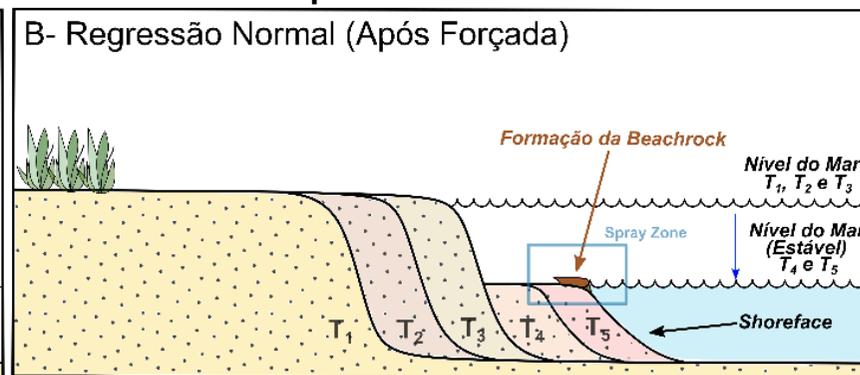


Figura 13. Processo de formação dos terraços marinhos (i), a cronologia (ii) dos tempos (T) em relação ao nível do mar (linha azul), e a formação e presença de *beachrocks* na plataforma continental (iii). Fonte: do autor.

Os vales incisos, por sua vez, são resultado da drenagem continental que escavou a superfície exposta da plataforma em períodos de mar baixo (Posamentier and Morris, 2000; Posamentier, 2001; Wang et al., 2019). Esses vales foram escavados até profundidades que se aproximam ao novo nível de base. Tais feições são comuns nas plataformas continentais, podendo estar enterradas ou ainda evidentes no relevo submarino e a sua morfologia está diretamente relacionada com a velocidade da regressão marinha forçada (regressão mais rápida, canais mais profundos e retificados) (Figura 14) e com a largura da superfície da plataforma exposta (plataforma mais curta, canais mais profundos e retificados) (Figura 15) (Posamentier and Morris, 2000; Posamentier, 2001).

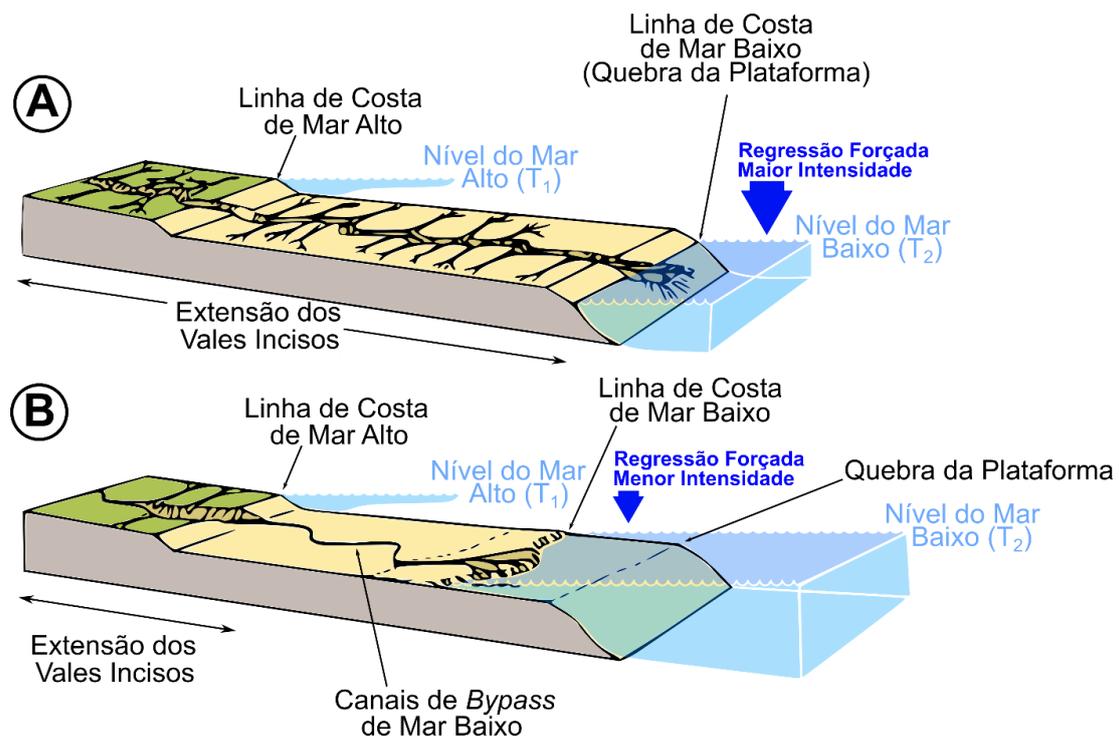


Figura 14. Relação entre a intensidade da regressão forçada e o tipo de vale inciso formado na plataforma continental. A- Regressão mais rápida, formam canais mais profundos e retificados. B- Regressão mais lenta e de menor amplitude formam canais meandrosos e mais rasos (by-pass). Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier (2001).

Plataformas mais extensas, com baixa declividade e que sofreram uma regressão forçada mais lenta tendem a ter vales incisos mais rasos, meandrosos ou muito mais extensos (Posamentier and Morris, 2000; Posamentier, 2001). Neste caso, os canais de drenagem (*bypass*) migram lateralmente dentro do vale inciso (Figura 14), alternando sua calha, distributários e desembocadura ao longo do tempo. A largura dos vales incisos está relacionada justamente a essa migração lateral dos canais, podendo variar significativamente de tamanho dependendo da capacidade dos processos erosivos dentro do vale (Wang et al., 2019).

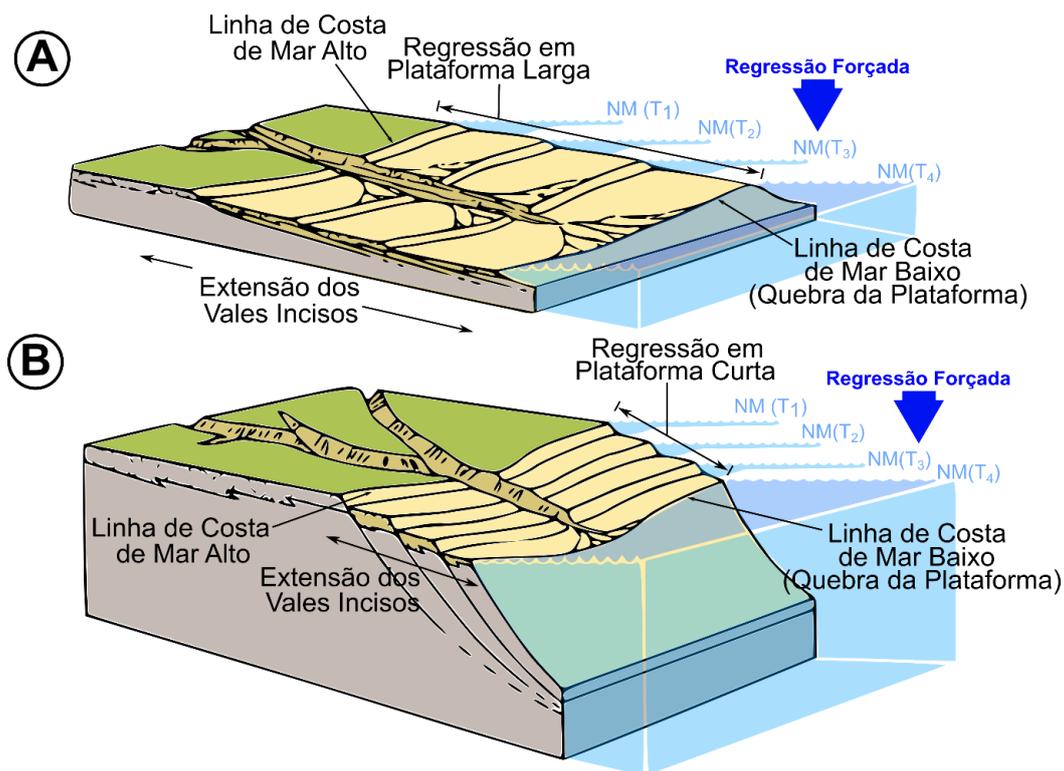


Figura 15. Relação entre a largura da plataforma continental e o tipo de vale inciso formado na plataforma continental durante uma regressão forçada de mesma intensidade. A- Plataformas mais largas formam vales incisos mais rasos cujo os canais meandram em seu interior. B- Plataformas mais curtas foram vales incisos mais profundos e retificados. Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier and Morris (2000).

O preenchimento dos vales incisos durante a transgressão marinha pode ocorrer pela ação das correntes de plataforma (correntes costeiras ou induzidas por ondas), pela deposição de sedimentos em suspensão (em águas mais profundas) e pela ação da gravidade (em áreas de maior declividade), que pode desencadear pequenos fluxos de sedimentos nas paredes do vale (Posamentier, 2001) (Figura 16). Com a estabilização, os vales são totalmente preenchidos e apresentam feições muito suavizadas na superfície batimétrica. Os sedimentos que preenchem os vales incisos representam uma resposta aos processos evolutivos desses ambientes, desde depósitos fluviais, transgressivos até hemipelágico (Posamentier, 2001).

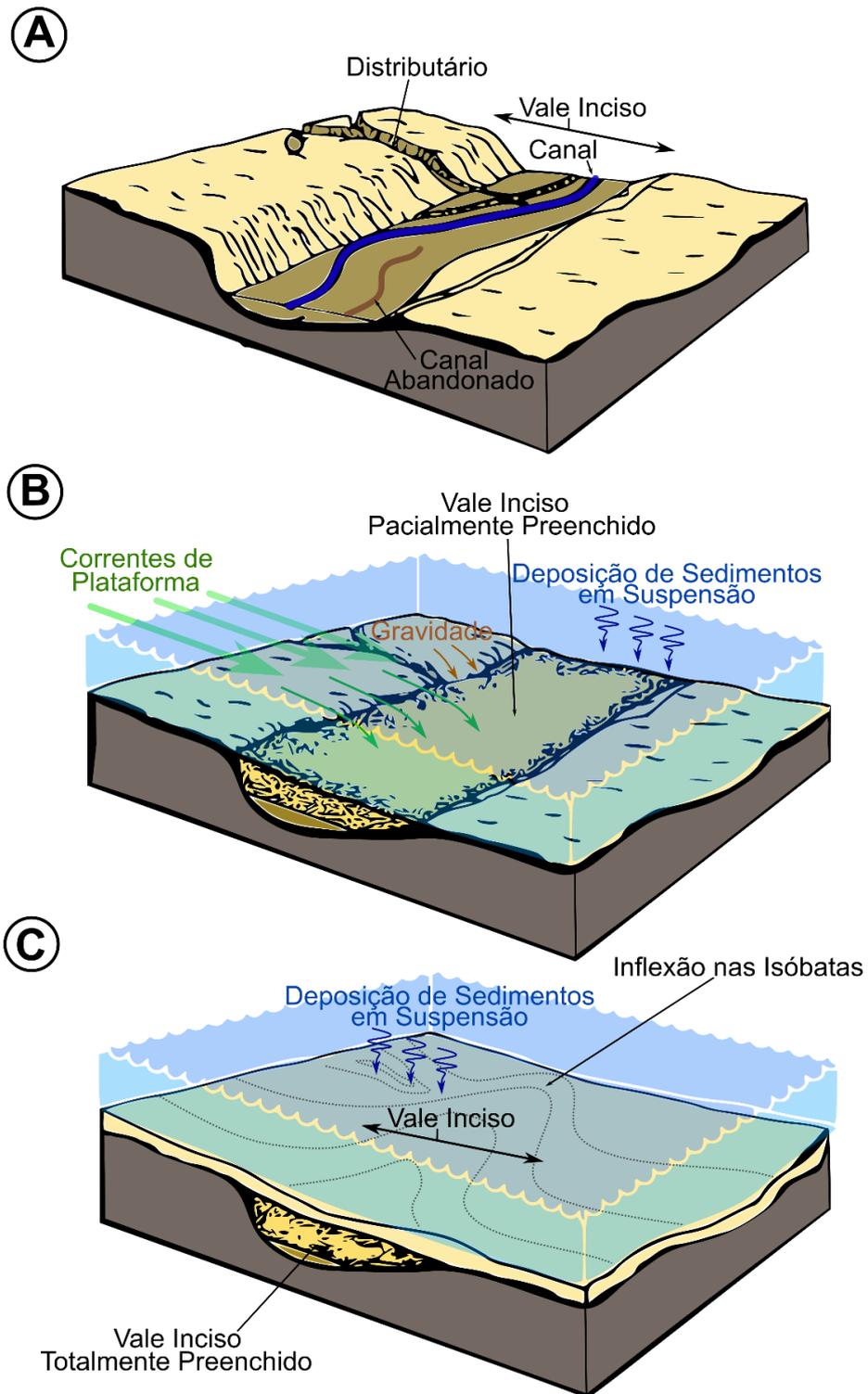


Figura 16. Preenchimento dos vales incisos na plataforma continental em três períodos: nível de mar baixo e exposição subaérea (A), afogamento transgressivo e preenchimento parcial do vale (B) e plenamente preenchido e afogado em período de mar alto (C). Fonte: adaptado pelo autor de Posamentier (2001).

4. METODOLOGIA

Neste capítulo serão apresentadas as características gerais do Banco de Dados de Geologia Marinha (BDGM) e as ferramentas de geoprocessamento utilizadas com essa finalidade. Além disso, também é apresentado um contexto geral das campanhas de campo realizadas na Bacia de Santos. As metodologias específicas de cada

publicação encontram-se explicitadas em maior detalhe no capítulo de resultados, em seus respectivos manuscritos.

4.1. Dados Batimétricos

Os dados batimétricos utilizados neste trabalho fazem parte, em sua maioria, do acervo de Folhas de Bordo (FB) cadastrados no Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO), e também de informações digitalizadas manualmente a partir de Cartas Náuticas (CN), bem como da superfície batimétrica do Plano de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (Projeto LEPLAC). Os dados de FB consistem na reunião aquisições de batimetria monofeixe, provenientes de 682 Levantamentos Hidrográficos (LH) em toda a costa brasileira. Para permitir a integração dos dados, o total de 2.953.198 pontos de profundidade (Figura 17) foram padronizados para o mesmo sistema de coordenadas (WGS-1984) e unidos a um único Shapefile, contendo o nome, a data de aquisição, e o código de identificação da sua carta náutica (série) correspondente.

Um controle de qualidade foi utilizado para verificar a existência de erros horizontais ou de vizinhança (dados sobrepostos ou fora da área de interesse) que pudessem influenciar a superfície batimétrica, produzindo anomalias na superfície final e, conseqüentemente, gerando erros na interpretação geomorfológica. A ferramenta *Find Identical* do *Data Management Tool* performou essa avaliação. Após essa conferência, os pontos batimétricos provenientes de FB foram filtrados nas diferentes áreas de interesse (Margem Equatorial, Bacia de Santos) e unidos a cotas de Cartas Náuticas e cotas do LEPLAC extraídos a partir do centroide das células que compõem essa superfície.

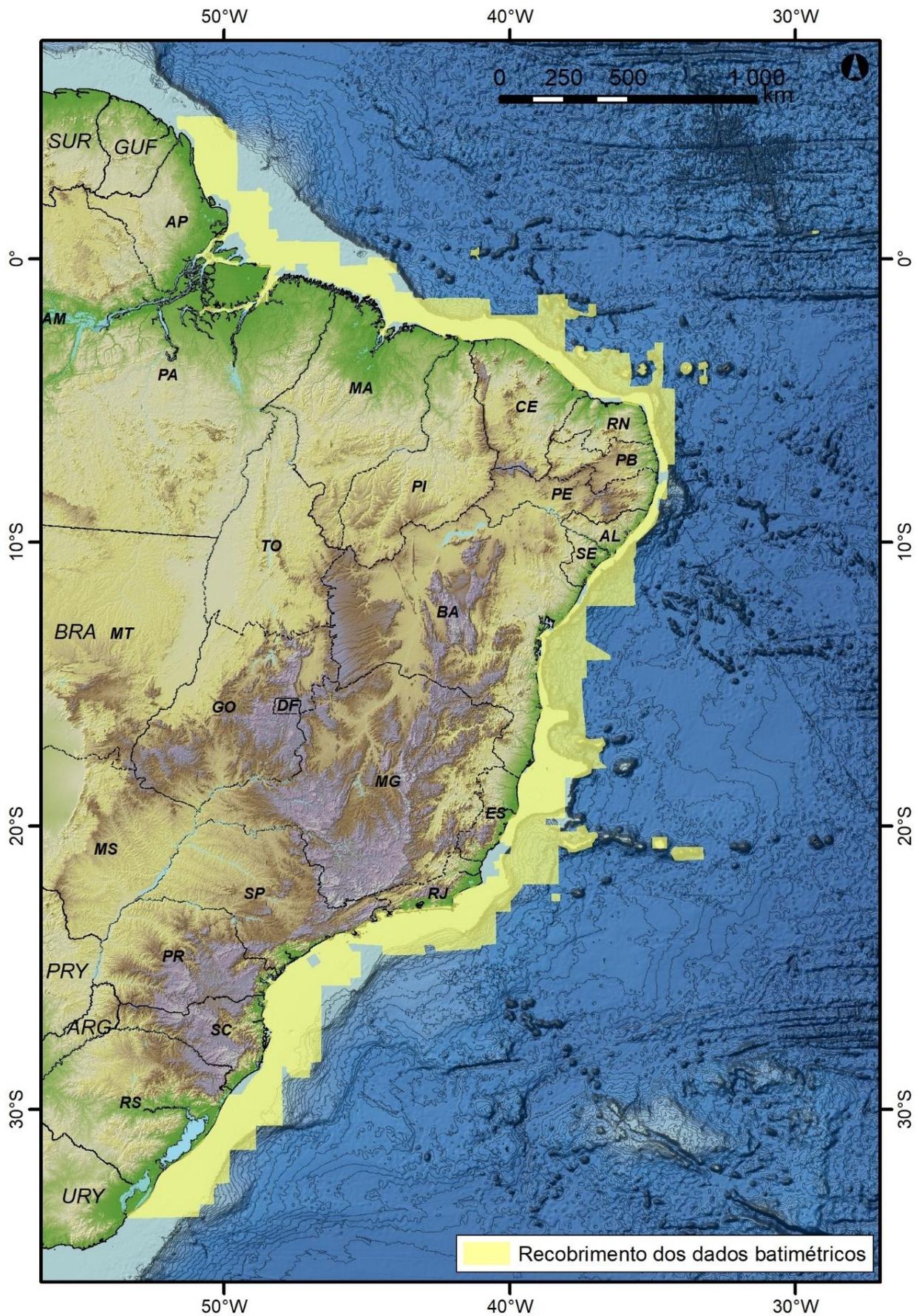


Figura 17. Recobrimento dos dados batimétricos históricos na margem continental Brasileira. Fonte: do autor.

4.2. Dados Sedimentológicos

Os dados de sedimentos superficiais são o resultado da integração de várias fontes, pertencentes ao conjunto de dados do Banco Nacional de Dados para a Indústria do Petróleo (BAMPETRO) e do Banco de Dados de Caracterização Ambiental (BDA). Essas bases de dados possuem um acervo de amostras de sedimentos superficiais do BNDO, diversos trabalhos acadêmicos e projetos de monitoramento ambiental. O período de aquisição de dados do BAMPETRO foi de 1956 a 2004 (48 anos), totalizando 30.633 pontos de sedimento amostrados na margem brasileira (Figura 18). Esses dados podem ser classificados em dois tipos: descrição visual do sedimento (tença) e resultados de análises laboratoriais.

Ressalta-se que as tenças são obtidas a partir da descrição visual das amostras de fundo no momento da coleta, de modo a classificar a natureza do leito marinho para fins de segurança da navegação, e estão de acordo com as recomendações do Manual de Hidrografia da Organização Hidrográfica Internacional (OHI) (International Hydrographic Organization, 2005). Devido à variedade de fontes dessas informações, à pluralidade metodológica e analítica e ao grande intervalo de tempo entre os levantamentos, nem todas as variáveis que compõe a avaliação sedimentológica estão disponíveis para todas as amostras registradas. Já os dados do BDCA correspondem apenas a amostras analisadas em laboratório, referentes às atividades de monitoramento ambiental de diversos empreendimentos de exploração e produção de petróleo.

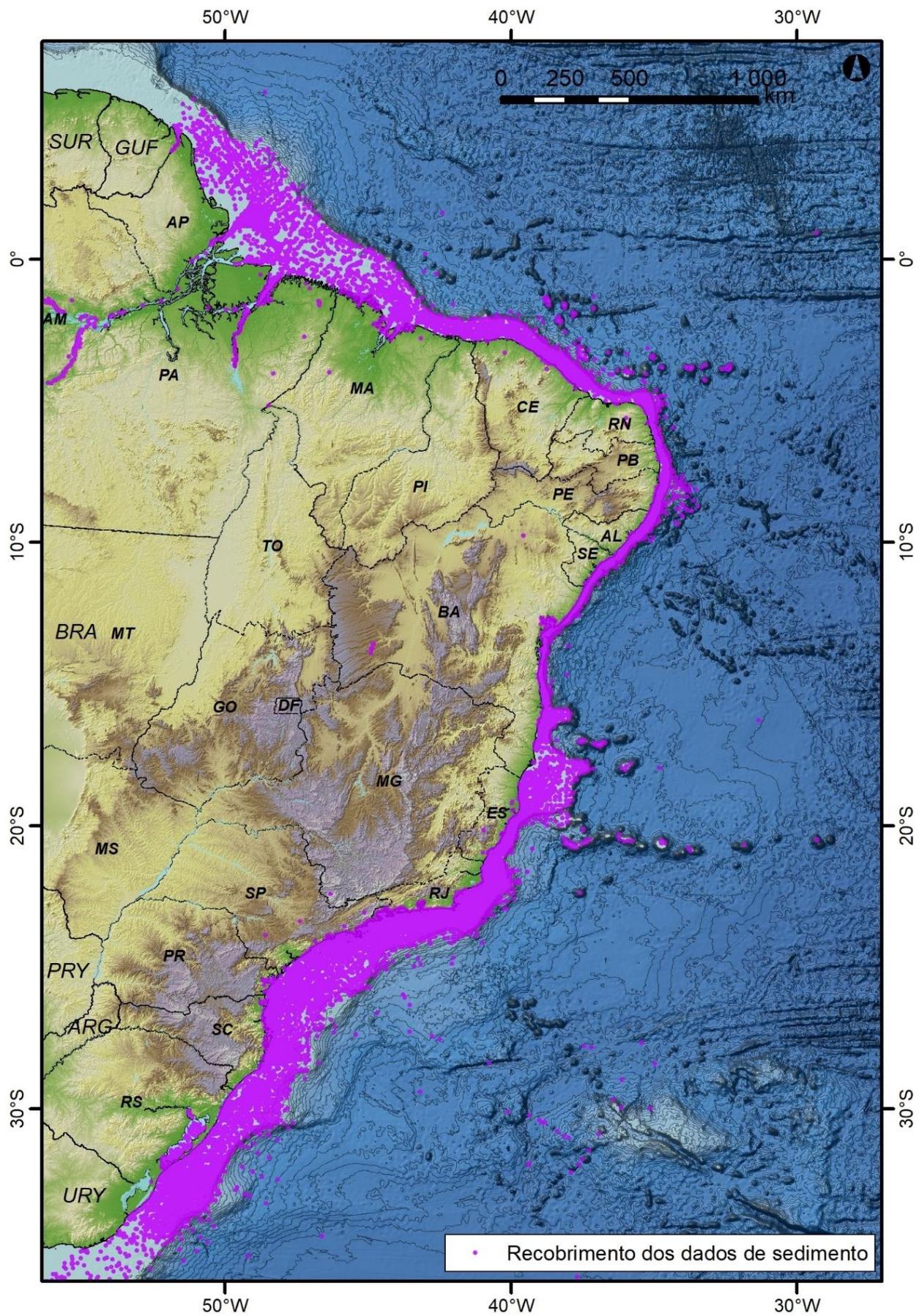


Figura 18. Recobrimento dos dados de sedimentos pretéritos na margem Brasileira. Fonte: do autor.

4.3. Estruturação do Banco de Dados de Geologia Marinha (BDGM)

A integração dos dados públicos e de campo foi necessária para a composição dos mapas e interpretações geomorfológicas e sedimentológicas. A transformação da base de dados tabelados em topologias Shapefile (SHP) permitiu a reunião de todas as informações em um único sistema integrado de armazenamento geoespacializado (*Geodatabase*), que permite a correlação espacial e geoestatística dos resultados no ambiente SIG (Zeiler, 1999; Svob et al., 2014).

A primeira etapa de estruturação do BDGM foi a escolha de critérios para a filtragem das informações batimétricas e sedimentológicas. Para tanto, foi utilizado três limites diferentes: fronteiras das águas jurisdicionais (Figura 19), bacias sedimentares (Figura 20) e limites fisiográficos (Figura 21) estabelecidos segundo os trabalhos do Projeto de Reconhecimento da Margem Continental Brasileira (REMAC). Os polígonos referentes a cada tipo de fronteira foram transformados para uma superfície Raster usando a ferramenta de conversão “*Polygon to Raster*”. Cada ponto batimétrico e sedimentológico tiveram atribuídos em sua tabela de atributos valores referentes a esses três critérios de filtragem a partir da ferramenta “*Extract Multi-values to Points*” do SIG.

Com os filtros atribuídos, foi possível a padronização das informações constantes nas tabelas de atributos. Para os dados batimétricos históricos, foram adotadas oito colunas principais, conforme a Tabela 2.

Tabela 2. Lista do tipo de informação atribuída a cada ponto batimétrico da Tabela de Atributos.

Tipo de Informação	Cabeçalho da coluna na Tabela de Atributos	Descrição
Latitude	Y	Latitude do ponto em graus decimais.
Longitude	X	Longitude do ponto em graus decimais.
Profundidade	Z	Profundidade do ponto em metros.
Folha de Bordo	FB	Folha de Bordo do levantamento hidrográfico que deu origem aquela informação.
Série	SERIE	Série da Carta Náutica de origem.
Feição Fisiográfica	FEICAO	Limites fisiográficos estabelecidos pelo REMAC.
Bacia Sedimentar	NOME_BACIA	Bacia marginal brasileira.
Fronteira Jurisdicional	JURIS	Fronteira jurídica marinha de acordo com o que foi estabelecido na Convenção das Nações Unidas sobre o Direito no Mar.

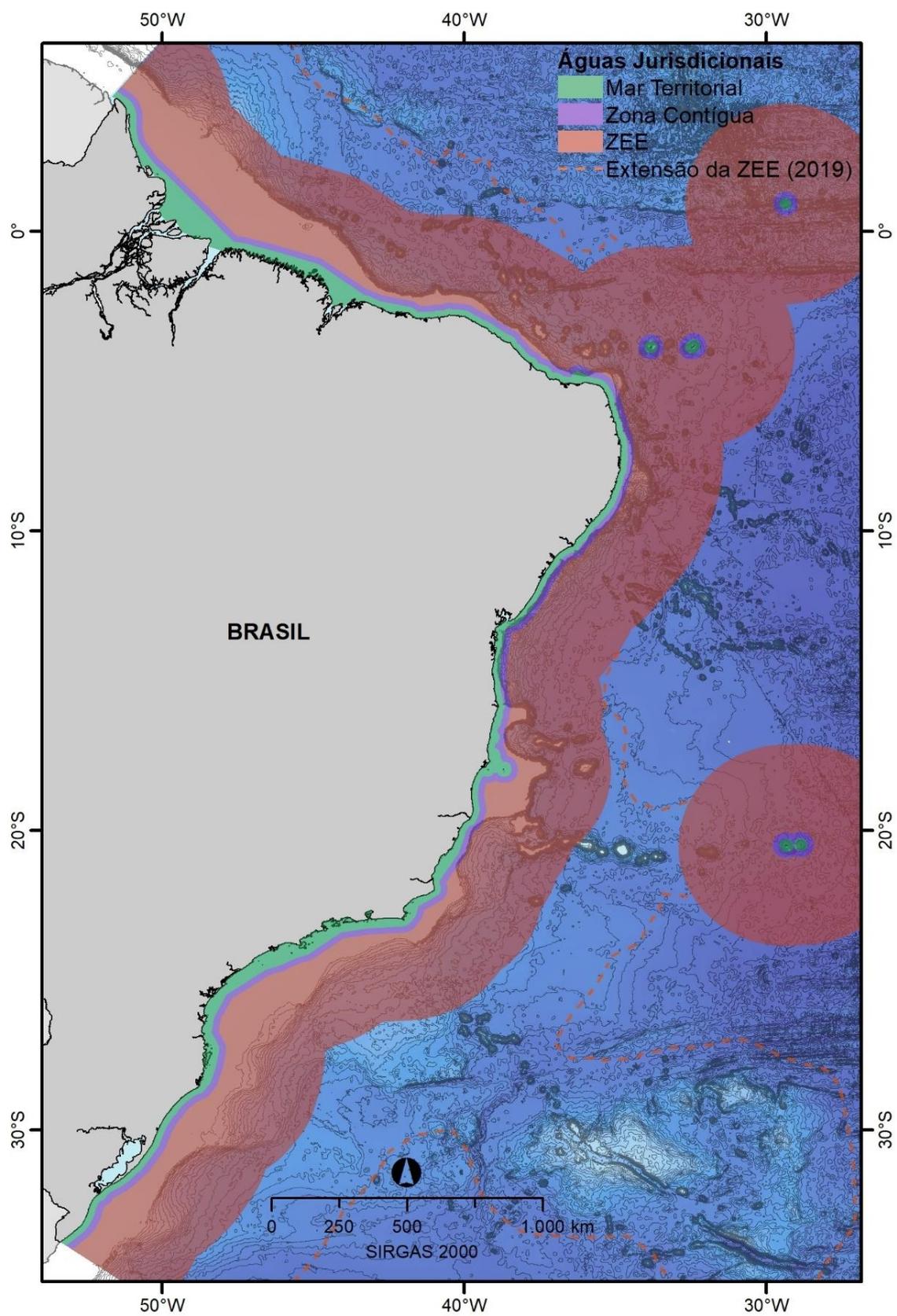


Figura 19. Localização das faixas referentes as águas jurisdicionais brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM.

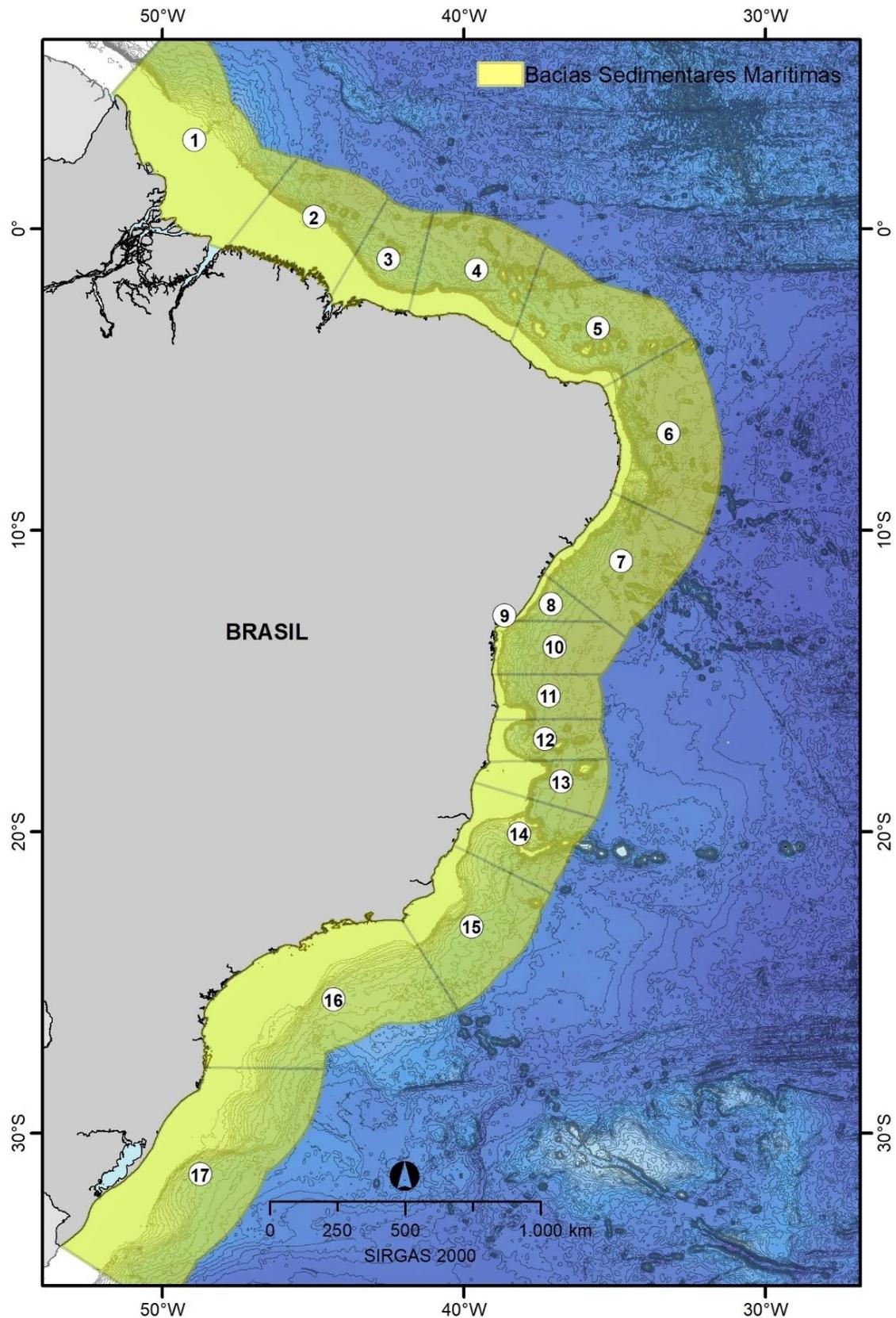


Figura 20. Localização das faixas referentes as bacias sedimentares marítimas brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM. 1- Bacia da Foz do Amazonas, 2- Bacia Pará-Maranhão, 3- Bacia de Barreirinhas, 4- Bacia do Ceará, 5- Bacia Potiguar, 6- Bacia Pernambuco-Paraíba, 7- Bacia Sergipe-Alagoas, 8- Bacia de Jacuípe, 9- Bacia do Recôncavo, 10- Bacia de Camamu-Almada, 11- Bacia de Jequitinhonha, 12- Bacia de Cumuruxatiba, 13- Bacia de Mucuri, 14- Bacia do Espírito Santo, 15- Bacia de Campos, 16- Bacia de Santos e 17- Bacia de Pelotas.

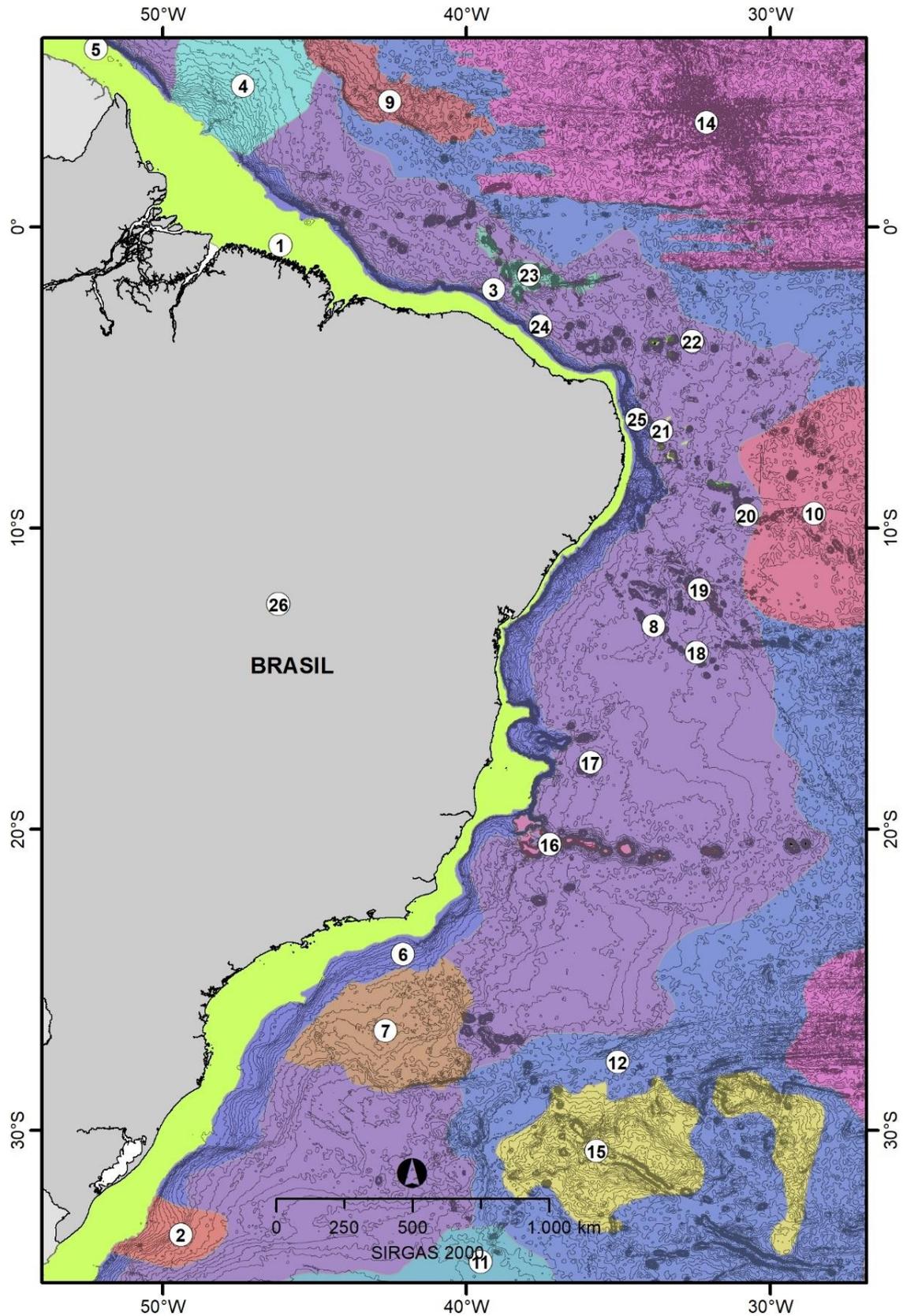


Figura 21. Localização dos polígonos referentes as principais feições fisiográficas brasileiras utilizadas como critério de filtragem dos dados do BDGM, com destaque para a plataforma continental (1), em verde. 1- Plataforma Continental, 2- Cone do Rio Grande, 3 Terraço do Ceará, 4- Cone do Amazonas, 5- Platô de Demerara, 6- Talude Continental, 7- Platô de São Paulo, 8- Elevação Continental, 9- Elevação do Ceará, 10- Planície Abissal de Pernambuco, 11- Planície Abissal da Argentina, 12- Bacia Oceânica do Brasil, 13- Elevação de Serra Leoa, 14- Cordilheira Mesoatlântica, 15- Elevação do Rio Grande, 16- Cadeia de Montes Submarinos Vitória-Trindade, 17- Banco Submarino Hotspur, 18- Monte Submarino Stocks, 19- Montes Submarinos da Bahia, 20- Montes Submarinos de

Pernambuco, 21- Montes Submarinos da Paraíba, 22- Cadeia Fernando de Noronha, 23- Cadeia Norte-Brasileira, 24- Guyot do Ceará, 25- Monte Submarino do Rio Grande do Norte e 26- Águas Interiores.

Já os dados históricos de sedimento apresentaram uma grande variedade de informações, o que dificulta a sua padronização. A padronização dos dados se deu a partir do tipo de informação disponível nas diferentes fontes. As variáveis sedimentológicas que estão presentes tanto nos dados históricos do BAMPETRO (BND0) quanto no BDA foram mantidas e unificadas em um único arquivo, que consistiu em uma planilha com as seguintes colunas: nome da estação, fonte do dado, coordenadas geográficas, teores das frações granulométricas (argila, silte, areia e cascalho), diâmetro médio, mediana, grau de seleção, assimetria, curtose e teor de carbonatos.

Uma normalização das unidades da escala granulométrica também foi necessária, com a transformação dos valores de diâmetro médio e mediana de ϕ para milímetros:

$$\Phi = \frac{\log_2 d}{-1} \text{ ou } d = 2^{(\Phi \times -1)}$$

onde Φ é o valor do parâmetro do grão em ϕ e d é o valor do parâmetro do grão em milímetros.

Outro parâmetro importante é o estabelecimento de critérios de filtragem (*Query*) no dado Shapefile integrado, facilitando o uso. Para tanto, foi estabelecido o nome da base de dados (BAMPETRO, BDA ou PCRBS), a presença ou ausência de dados de carbonatos, a presença ou ausência dos dados laboratoriais e se são dados públicos ou restritos

No caso das informações sedimentológicas coletadas durante as campanhas oceanográficas, os dados foram exportados no formato SHP em ambiente SIG, a partir da Base de Dados de Sedimentos (na forma de tabela) e unificados aos dados públicos de sedimento (*merge*), formando um único Shapefile integrado. Neste processo é importante que os SHP públicos e de campo possuam a mesma nomenclatura no cabeçalho de cada coluna, permitindo a sua unificação sem conflitos. Uma vez unidos, os resultados foram classificados de acordo com a versão simplificada de Shepard (1954) (Lama, Areia e Cascalho) e Larsonneur (1977) adaptada por Dias (1996) (Bioclástico, Biolitoclástico, Litobioclástico e Litoclástico).

Tabela 3. Lista do tipo de informação atribuída a cada ponto de amostra sedimentológica da Tabela de Atributos.

Tipo de Informação	Cabeçalho da coluna na Tabela de Atributos	Descrição
Base de Origem	BD_ORIGIN	Critério de filtragem para a base de dados originária da informação sedimentológica (BAMPETRO, BDCA ou PCRBS)
Fonte dos Dados	BD_FONT	
Dados de Carbonatos	CARB_DATA	Critério de filtragem para a presença de análises de carbonatos (Sim ou Não).
Dados Laboratoriais	LAB_DATA	Critério de filtragem para a presença de análises laboratoriais (Sim ou Não). Em caso negativo, a informação das classes de Larsonneur e Shepard é referente a inspeção visual do fundo (tença).
Parâmetros estatísticos de Folk e Ward (1957)	FW_DATA	Sim e Não para a presença de dados com valores dos parâmetros estatísticos de Folk e Ward (1957).
Dados de % de Areia, Lama e Cascalho	PER_FRAC	Sim e Não para a presença de dados com % das frações Areia, Lama e Cascalho.
Tipo de Informação	INFO_DATA	Critério de filtragem para dados de uso público ou restrito.
Estação	STAT_ID	Nome da estação de coleta.
Data	DATE	Data da coleta.
Réplica	REPL_ID	Nome da réplica
Latitude	Y	Coordenada da latitude em graus decimais
Longitude	X	Coordenada da longitude em graus decimais.
Teor de Carbonatos	PER_CARB	Teor de carbonatos em porcentagem.
Média em ϕ	FWP_MEAN	Média do tamanho do grão em ϕ .
Mediana em ϕ	D50P	Mediana do tamanho do grão em ϕ .
Seleção em ϕ	FWP_SORT	Grau de seleção do tamanho do grão em ϕ .
Assimetria em ϕ	FWP_SKEW	Assimetria do tamanho do grão em ϕ .
Curtose em ϕ	FWP_KURT	Curtose do tamanho do grão em ϕ .
Média em mm	FWM_MEAN	Média do tamanho do grão em mm.

Mediana em mm	D50M	Mediana do tamanho do grão em mm.
Seleção em mm	FWM_SORT	Grau de seleção do tamanho do grão em mm.
Assimetria em mm	FWM_SKEW	Assimetria do tamanho do grão em mm.
Curtose em mm	FWM_KURT	Curtose do tamanho do grão em mm.
Teor de Lama	PER_MUD	Proporção da fração Lama na amostra.
Teor de Areia	PER_SAN	Proporção da fração Areia na amostra.
Teor de Cascalho	PER_GRA	Proporção da fração Cascalho na amostra.
Classificação de Larsonneur da BAMPETRO	NM_LARSONN	Classificação nominal dos carbonatos conforme a base de dados da BAMPETRO, incluindo tenças. Informações apenas disponíveis para os dados BAMPETRO.
Classificação de Shepard a partir da Tença	NM_TENCA_A	Classificação nominal do tamanho de grão conforme a base de dados da BAMPETRO, incluindo tenças. Informações apenas disponíveis para os dados BAMPETRO.
Classificação de Larsonneur (Unificado)	LARS_PRINC	Classificação nominal da amostra em razão do teor de carbonatos recalculados em todos os dados.
Classificação de Shepard (Unificado)	SHEPA_PRINC	Classificação nominal da amostra em razão da proporção Lama, Areia e Cascalho recalculados em todos os dados.

Uma das partes fundamentais para a criação do Geodatabase é o seu design, que estabelece os códigos de nomenclatura dos arquivos Shapefile, bem como o arranjo da estrutura da organização dos arquivos dentro do banco de dados (Gustavsson et al., 2008). Para tanto, foi criado um sistema de codificação dos nomes dos arquivos conforme a Tabela 4, a seguir:

Tabela 4. Lista dos códigos utilizados para a nomenclatura dos arquivos, de modo a organizar o design do Geodatabase.

Tipo de Arquivo	Código	Extensão	Descrição
Ponto	PT	SHP	Estações de Coleta, Pontos de Interesse, Capitais, Municípios, etc.
Linha	LN	SHP	Curvas de Nível, Perfis, Estradas, Linha de Costa, Rios, etc.
Polígono	PL	SHP	Continente, Áreas de Interesse, Ilhas, etc.
Raster	RS	TIF	Modelos Digitais de Elevação, Imagens de Satélite, etc.
Tabela	TB	XML/TXT	Bases de dados, Tabelas em geral.
Tema	Código		Descrição
Batimetria	BATI		Dados batimétricos.
Sedimentos (Públicos)	SEDP		Dados sedimentológicos públicos.
Sedimentos (Campo)	SEDC		Dados sedimentológicos de campo, obtidos durante as campanhas oceanográficas.
Sedimentos (Integrados)	SEDI		Dados de sedimentos públicos e adquiridos em campo integrados em um único arquivo.
SBP	SBPL		Linhas de SBP.
Relevo Sombreado	RESO		Superfície de relevo sombreado (<i>shaded relief</i> ou <i>edgemap</i>).
Declividade	SLPE		Superfície de declividade (<i>slope</i>).
Aspecto	ASPC		Superfície de aspecto do relevo.
Curva de Nível	CUNI		Linhas das curvas de nível igualmente espaçadas.
Classes de Relevo (BTM)	CBTM		Superfície das classes de relevo obtidas pelo BTM.
Instituição	Código		Descrição
Universidade Federal Fluminense	UFF		Instituição fonte da informação.
Petrobras	BR		
Banco Nacional de Dados para a Indústria do Petróleo	BAMPETRO		
Banco de Dados de Caracterização Ambiental	BDA		

Banco Nacional de Dados Oceanográficos	BNDO	
Condição	Código	Descrição
Público	PUBL	Dados provenientes de bases de dados públicas.
Campanha Oceanográfica	CAMP	Dados adquiridos em campo*
Integrados	ITGR	Dados públicos e adquiridos em campo integrados em um único arquivo. Também correspondem a produtos finais, como superfícies, análises geomorfológicas, classificações, etc.

* Os dados de campo não serão integrados na versão final do BDGM que integram esta tese por questões de direito de propriedade.

O banco de dados final corresponde a um arquivo no formato Geodatabase, integrando todo os dados de Geologia Marinha agregados a partir de informações tabeladas e vetoriais. Todas as informações (exceto tabelas) estarão geoespacializadas de forma a serem compatíveis com Sistemas de Informação Geográfica (SIG), incluindo o preenchimento dos metadados.

A estruturação do Geodatabase (*design*) básico do BDGM segue a seguinte divisão (Figura 22):

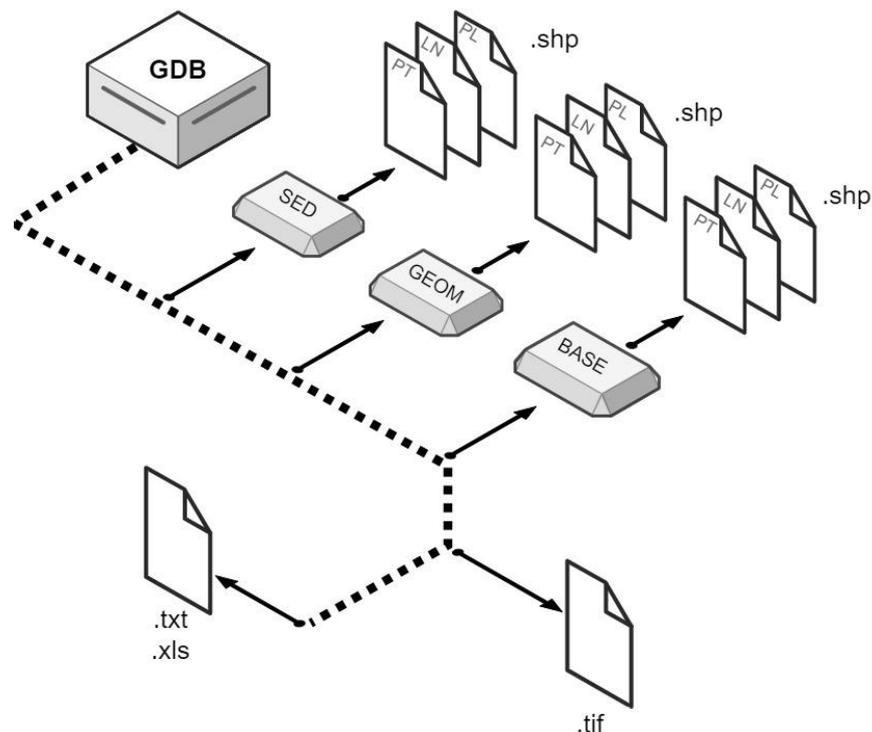


Figura 22. Design do Geodatabase que compõe o BDGM.

Onde:

GDB- raiz do Geodatabase, onde ficam armazenadas todas as informações geoespacializadas no Sistema de Coordenadas SIRGAS 2000.

SED- pasta dentro da raiz que armazena os arquivos de dados vetoriais de ponto (PT), linha (LN) e polígono (PL), referentes aos levantamentos sedimentológicos.

GEOM- pasta dentro da raiz que armazena os arquivos de dados vetoriais de ponto (PT), linha (LN) e polígono (PL), referentes aos levantamentos batimétricos/geomorfológicos.

BASE- pasta dentro da raiz que armazena os arquivos de dados vetoriais de ponto (PT), linha (LN) e polígono (PL), referentes as bases utilizadas para compor os critérios de filtragem.

.shp- extensão do arquivo vetorial geoespacializado com metadados utilizados nas plataformas SIG.

.tif- extensão do arquivo vetorial geoespacializado com metadados utilizados nas plataformas SIG.

.txt/.xls- extensão de dados tabelados, sem georreferenciamento.

O fluxo de trabalho resumido realizado no ambiente SIG é apresentado na Figura 23, abaixo. Como principais dados gerados ao longo deste trabalho temos informações tabeladas, dados Shapefile e dados Raster e que posteriormente foram interpretados no contexto dos artigos científicos.

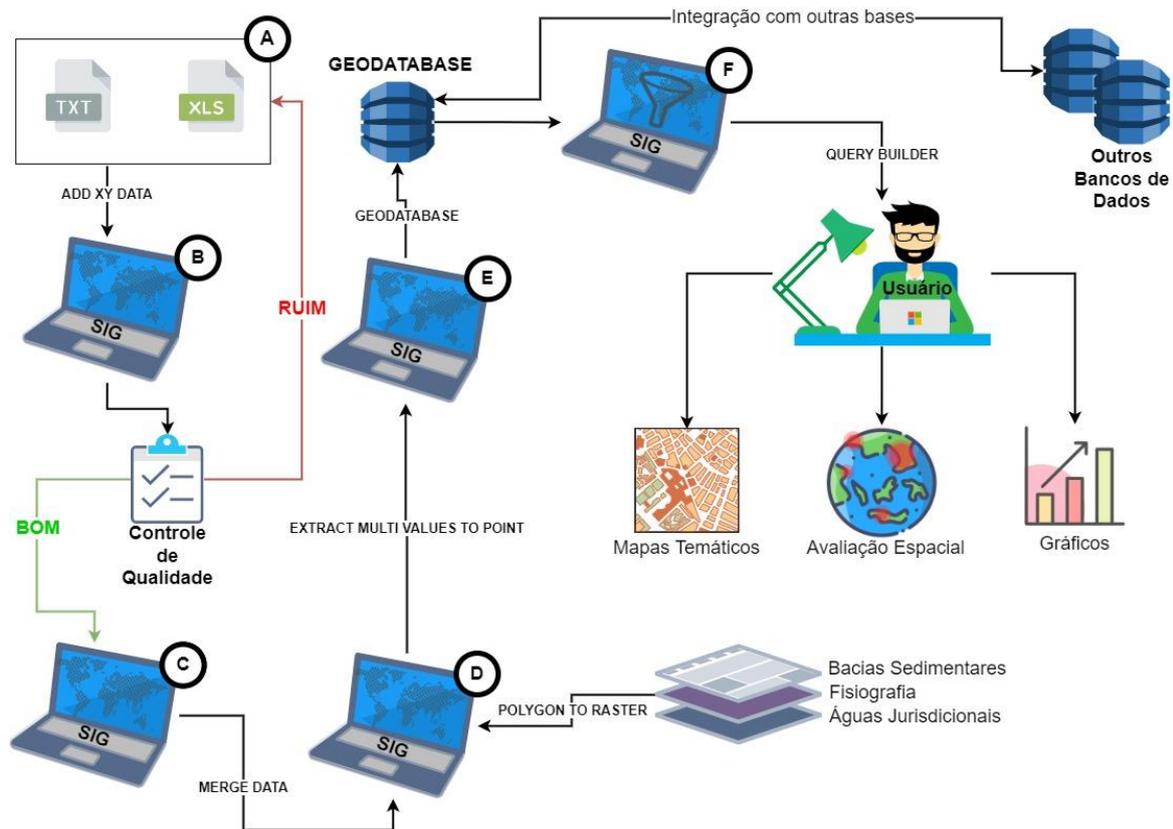


Figura 23. Fluxograma de trabalho no ambiente SIG para o estabelecimento do Banco De Dados de Geologia Marinha (BSGM). A- dados históricos agrupados, B- controle de qualidade (verificação espacial), C- união dos dados em dois grupos, batimetria e sedimentos, D- rasterização e atribuição dos critérios de filtragem para cada conjunto de dados, E- criação de um Geodatabase de acordo com o *design* do banco, F- filtragem dos dados para os usos específicos. Fonte: do autor.

4.4. Dados de Campanhas Oceanográficas na Bacia de Santos

O projeto Caracterização Química, Biológica e Geológica do Sistema Bentônico da Bacia de Santos (PCR-BS) tem como objetivo geral caracterizar o ambiente bentônico da bacia em escala regional, considerando as diferentes feições de fundo, características físico-químicas do sedimento e habitats, de forma a auxiliar o entendimento da sua dinâmica ecossistêmica e viabilizando o planejamento e gestão ambiental desta importante área marítima brasileira.

As campanhas oceanográficas com coleta de sedimentos foram realizadas em duas etapas, sendo a primeira entre 10 de junho e 3 de agosto e a segunda entre 28 de outubro e 25 de novembro de 2019, totalizando 82 dias (incluindo mobilização, trajeto e desmobilização) para a coleta de amostras de sedimento. Para os dados de

Sub-bottom Profiler (SBP), a aquisição totalizou 168 dias de coleta praticamente ininterruptos. As amostras foram coletadas em triplicata em estações posicionadas nas isóbatas de 25, 50, 75, 150, 400, 700, 1000, 1300, 1900 e 2400m na plataforma continental, talude e Platô de São Paulo, na Bacia de Santos, ao longo de 8 transectos (A a H, de sul para norte) transversais à linha de costa (Moreira et al., 2022). O navio utilizado foi o *Research Vessel Ocean Stalwart* (Figura 24 - A) da empresa Oceanpact Serviços Marítimos S.A. Ao todo, 293 amostras foram coletadas na Bacia de Santos, sendo 119 na plataforma continental (Figura 25).

Dois tipos de amostradores foram utilizados, sendo um Box Corer de 50x50x50cm utilizado em sedimentos majoritariamente lamosos e um Mega VanVeen em áreas de sedimentos mais grossos. Um sistema de posicionamento dinâmico (*Dinamic Positioning System* – DGPS) da fabricante Veripos foi utilizado na localização espacial da embarcação e um sistema acústico (*beacon*) modelo c-NODED Mini17 da fabricante Kongsberg (preso ao cabo logo acima do amostrador) garantiu a acurácia do posicionamento da coleta em um raio de 150m no entorno da estação planejada (apenas talude). As profundidades foram constantemente monitoradas a partir do SBP Knudsen Chirp 3260, bem como a assinatura acústica do fundo e sub-fundo em 3,5 e 12kHz, uma vez que SBP saía e retornava ao porto em funcionamento.

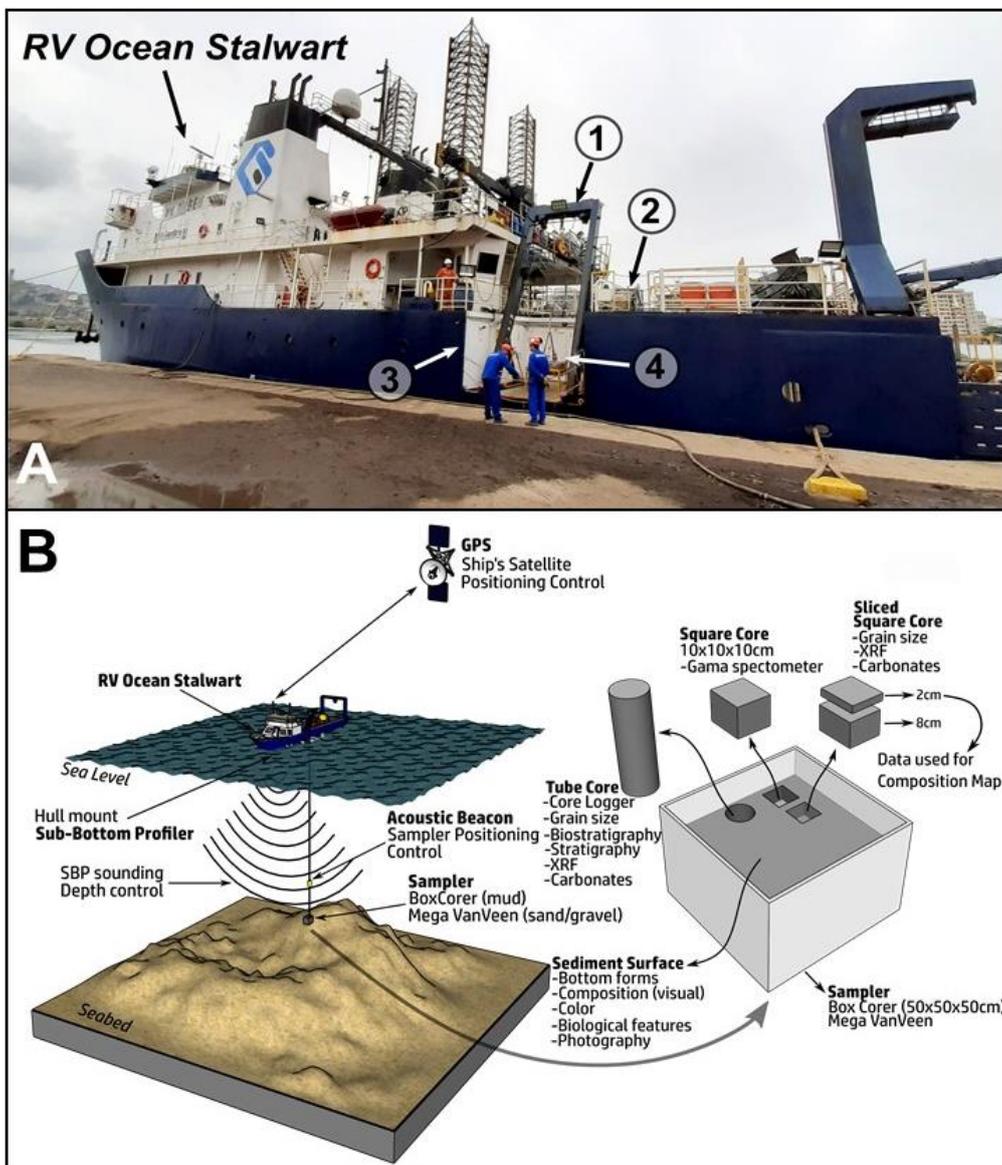


Figura 24. A- Navio RV Ocean Stalwart utilizado nas campanhas oceanográficas, indicando 1- guindaste, 2-guincho com cabo de kevlar, 3- deck de meia-nau e entrada para o laboratório e 4- berço e amostrador. B- Esquema de aquisição das amostras e SBP, indicando

todos os processos, desde a conferência da profundidade (SBP) e posição (DGPS), até os processamentos que foram realizados em cada subamostra. Neste trabalho foram utilizados os dados de SBP e de granulometria e carbonatos das amostras de 2cm. Fonte: do autor.

Ao chegarem ao convés, as amostras passaram inicialmente por um criterioso controle de qualidade, garantindo que não houvessem interferências externas que pudessem alterar a preservação das características e estruturas do sedimento. Uma vez aprovadas, a água sobrenadante era sifonada e após os registros fotográficos, da medição da espessura do pacote de sedimento amostrado e da medição de parâmetros físico-químicos (temperatura, oxigênio dissolvido, pH e potencial redox), a amostra era descrita (cor, formas de fundo, textura do sedimento).

Subamostras, ou *corers* quadrados de 10x10x10cm, foram retirados para granulometria e carbonatos e um testemunho geológico (tubo de 75mm de diâmetro) com penetração de igual espessura do pacote de sedimento no amostrador. Para a granulometria, três estratos foram coletados, um de 10cm, um de 0 a 2cm (camada superficial) e outro de 2 a 10cm (camada subsuperficial) (Figura 24 - B). As amostras foram identificadas e armazenadas congeladas para posterior análise, com exceção do testemunho geológico que foi armazenado sob refrigeração. Ao final de cada campanha, os dados de SBP foram exportados no formato SEG-Y, copiados e armazenados para o seguinte processamento e análise.

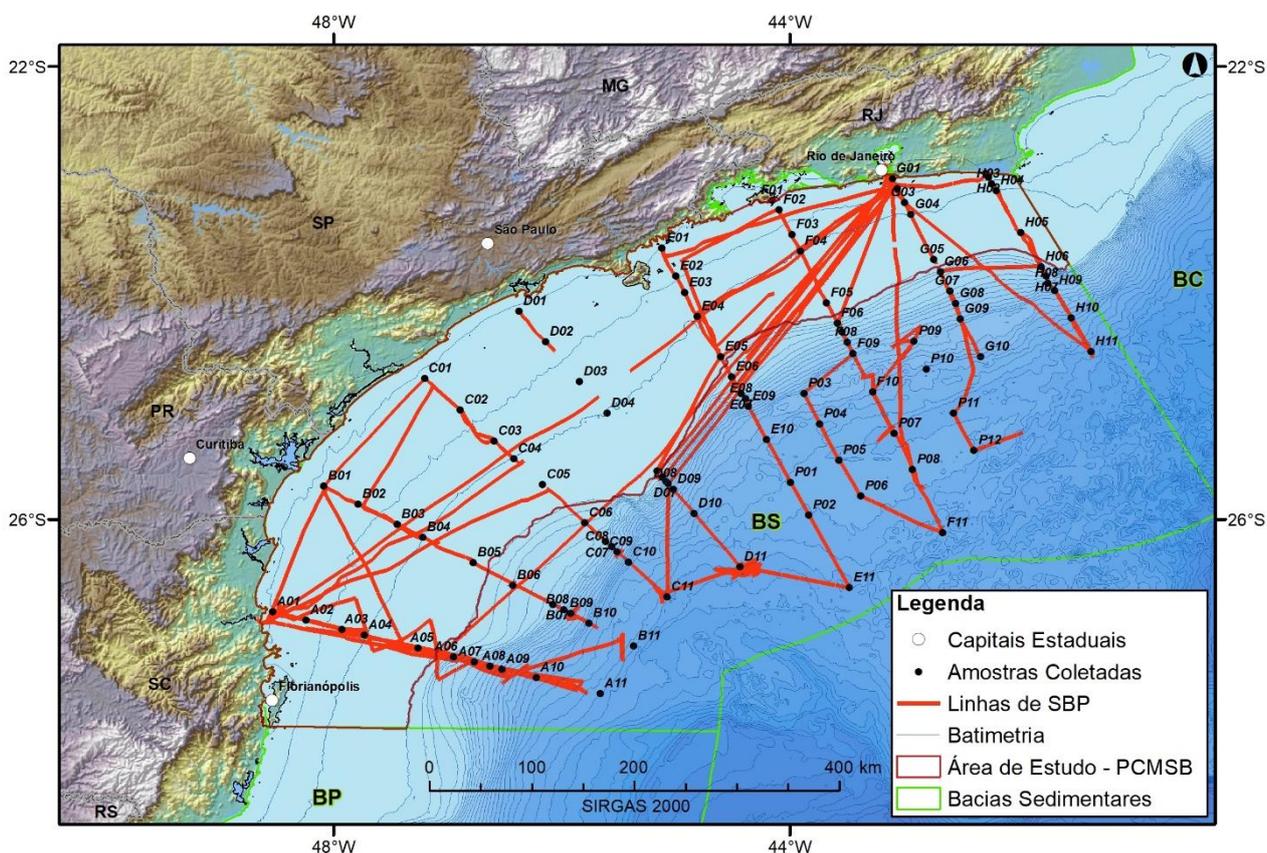


Figura 25. Localização das estações amostradas durante as campanhas oceanográficas na Bacia de Santos (PCMSB), bem como a localização das linhas de SBP que cruzam a área de estudo. Fonte: do autor.

Ressalta-se que os resultados mostrados nos manuscritos dos artigos apenas utilizaram as amostragens realizadas na plataforma continental, com sedimentos até a profundidade de 150m e SBP até a profundidade de 200m.

5. RESULTADOS

A análise exploratória dos dados presentes até então no BDGM (Figura 26) evidenciaram variações no quantitativo de dados batimétricos e de sedimentologia em relação aos critérios de filtragem (bacias, feições fisiográficas e águas jurisdicionais). A Bacia de Santos foi a que mais contemplou os esforços amostrais desde o final da década de 50 (Figura 26-A), tanto para a batimetria quanto para os sedimentos. Já a plataforma continental foi alvo da maior quantidade de levantamentos em relação as demais feições fisiográficas (Figura 26-B).

O mar territorial (até 12 milhas náuticas) e a zona contígua (de 12 até 25 milhas náuticas) somadas abrangem mais da metade dos levantamentos (Figura 26-C). Águas internacionais (além da Zona Econômica Exclusiva) possuem muito pouca representatividade no conjunto de informações disponíveis. Quanto ao histórico dos levantamentos (Figura 26-D), os levantamentos apresentaram um aumento expressivo no início da década de 1970, com um novo aumento no início dos anos 90.

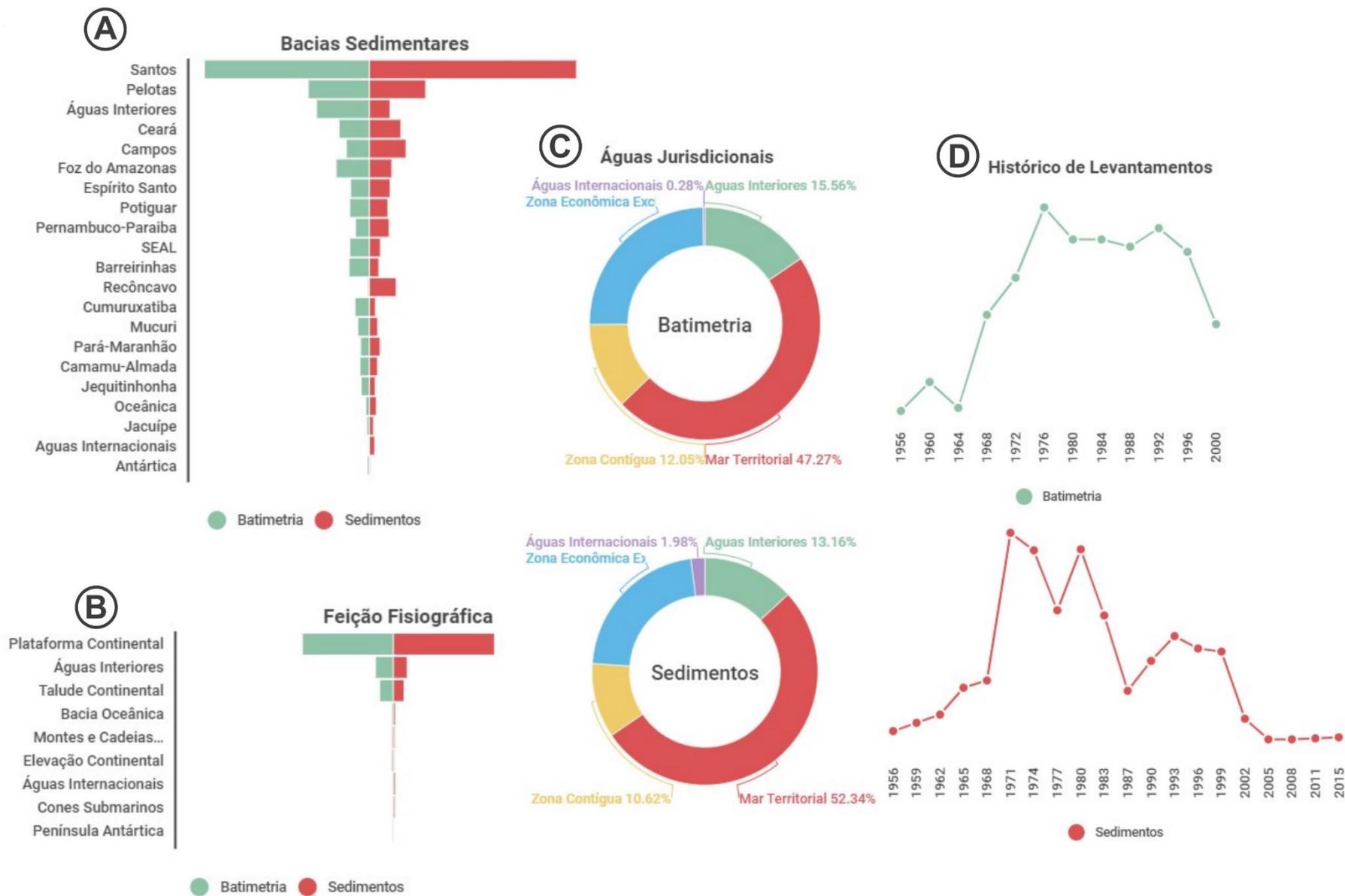


Figura 26. Análise exploratória dos dados que compõem o BDGM, variando em relação aos critérios de filtragem: A- bacias sedimentares, B- feição fisiográfica, C- águas jurisdicionais e D- cronologia dos levantamentos.

Os resultados estão apresentados na forma de quatro manuscritos de artigos científicos completos (subcapítulos), que testaram as potencialidades do BDGM. A lista dos artigos é apresentada a seguir:

- **Artigo 1. 5.1. *Resizing the extension of the mesophotic “reefs” in the Brazilian Equatorial Margin using bioclastic facies and seabed morphology.* (Subcapítulo 5.1)**

Autores: João Regis dos Santos Filho; João Victor Moraes da Costa Anjos; Cleverson Guizan Silva; Allan Kardec Duailibe; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Amanda Bourguignon Cecilio.

Projeto vinculado: Projeto Mapeamento do assoalho marinho com base na classificação da amplitude do sinal sísmico, financiado em três fases pelas empresas Premier Oil, Enauta e Prooceano, com apoio da TGS, ANP e Karoon. (Prof. Responsável: Cleverson Guizan Silva)

- **Artigo 2. *Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil.* (Subcapítulo 5.2)**

Autores: João Regis dos Santos Filho; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Juliane Castro Carneiro; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Allan Soares Ramalho.

Projeto vinculado: Projeto Santos – Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS/CENPES (Prof. Responsável: Alberto Garcia de Figueiredo Jr.)

- **Artigo 3. *Continental shelf incised valleys as a key to understand sea-level oscillation during Quaternary in Santos Basin, Brazil.* (Subcapítulo 5.3)**

Autores: João Regis dos Santos Filho; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Juliane Castro Carneiro; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Allan Soares Ramalho.

Projeto vinculado: Projeto Santos – Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS/CENPES (Prof. Responsável: Alberto Garcia de Figueiredo Jr.)

- **Artigo 4. *Mesophotic carbonate and reef areas on the Brazilian continental shelf.* (Subcapítulo 5.4)**

Autores: João Regis dos Santos Filho; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Cleverson Guizan Silva.

Projeto vinculado: Projeto Santos – Caracterização Ambiental da Bacia de Santos (PCR-BS), coordenado pela PETROBRAS/CENPES (Prof. Responsável: Alberto Garcia de Figueiredo Jr.)

Adicionalmente, outras publicações foram realizadas em paralelo a elaboração desta tese. A lista completa de publicações (publicadas ou em fases distintas de elaboração) encontra-se disponível no Capítulo 7-Material Suplementar.

5.1. *Resizing the extension of the mesophotic “reefs” in the Brazilian Equatorial Margin using bioclastic facies and seabed morphology.* Submetido para a revista *GeoMarine Letters* (ISSN: 1432-1157, Nível CAPES B1 - Geociências).

Resizing the extension of the mesophotic “reefs” in the Brazilian Equatorial Margin using bioclastic facies and seabed morphology.

João Regis dos Santos Filho; João Victor Moraes da Costa Anjos; Cleverson Guizan Silva; Allan Kardec Duailibe; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Amanda Bourguignon Cecilio

1. INTRODUCTION

Mesophotic carbonate structures compose an essential ecological role in the marine environment, acting as a genetic repository and a fisheries refuge area (Baker et al. 2016), and its bioerosion strongly contributes to the composition of marine sediments (Weinstein et al. 2015). Nevertheless, the knowledge of the mesophotic reefs is scarce compared to the altophotic ones due to traditional scuba diving depth limits (Hinderstein et al. 2010) and the high cost of geological and geophysical surveys deep ward.

The mesophotic reef ecosystems in Brazil became a recent discussion stage agenda since uncovering an extensive Amazon Reef System (Moura et al. 2016), also named by some authors the “Great Amazon Reef System” (GARS) (Francini-Filho et al. 2018). In parallel, the discoveries of potential expressive oil and gas reservoirs in this region's offshore deep waters (Barros Filho et al. 2021) took non-governmental environmental protection organizations (NGOs) to pressure public agencies to safeguard these areas, generally called "Amazon Coral Reefs". As a result of this NGOs publicity overall, the leased exploration blocks at the Brazilian Equatorial Margin were temporally paralyzed (Araujo et al. 2021).

The semantic differences in the meaning of what would be a “reef” seem to influence this conflict strongly. Mesophotic reefs are almost instantly associated with coral reef environments known as Mesophotic Coral Ecosystems (MCE) (Hinderstein et al. 2010), as observed in Australia (Harris et al. 2013; Eyal et al. 2021), the Polynesian (Pyle and Copus 2019), the Middle East (Weinstein et al. 2021) and the Caribbean (Locker et al. 2010; Sherman et al. 2010). However, true MCEs are the minority of the rigid benthic ecosystems on deeper shelves (Pyle and Copus 2019).

A “reef” can be any natural or artificial rigid structure that rises and differs from the surroundings at the seabed, acting as shelter, feeding and reproduction spots for multiple marine species (Collette and Rutzler 1977). Pioneer papers by Barreto et al. (1975), Milliman et al. (1975), and Milliman (1977) had regionally described reefs on the Amazon shelf at the REMAC project (Global Recognition of the Brazilian Continental Margin), being composed of red calcareous algae, Halimeda, bryozoans, sponges, and spotted coral. Field surveys (sampling and video records) confirmed this mixed pattern at the mesophotic Amazon reefs (Moura et al. 2016; Francini-Filho et al. 2018; Vale et al. 2022).

Despite recent advances in mapping the Amazon mesophotic reefs, one crucial question is still without an appropriate answer: what is its accurate sizing? This area's most recent mapping efforts usually do not consider a regional approach to sediment facies update (Moura et al. 2016; Francini-Filho et al. 2018; Mahiques et al. 2019; Calegario et al. 2021; Vale et al. 2022). Instead, they consider a minimal number of samples, punctual video recordings and spatially restricted geophysical surveys to generically predict and extrapolate the reef area of occurrence, mainly based on old mapped sedimentary facies.

With a vast area of 323,392km², it is not hard to understand the significant challenges of regional high-resolution survey updates on the Brazilian Equatorial continental shelf. It highlights the importance of the endless Marine Geology historical data assemblage and reworks using the most current processing techniques

available. This paper intends to supply the scientific community with more accurate and realistic mapping of the bioclastic facies, correlating them with the previously mapped mesophotic reefs as ground truths.

To reach that goal, an unprecedented Marine Geology data assemblage was made in a multidisciplinary approach using GIS techniques and statistical correlation with five seabed seismic attributes (amplitude, frequency, phase, coherency and intensity) derived from regional seismic reflection historical data, including the REMAC project ones. This contribution aims to subside the marine management policy, promoting its ideal space usage and helping conserve critical benthic environments more appropriately.

2. STUDY AREA

The Brazilian Equatorial Margin continental shelf includes five distinct marginal sedimentary basins: Foz do Amazonas (FZA), Pará-Maranhão (PAMA), Barreirinhas (BAR), Ceará (CE) and Potiguar (POT) (Fig. 1). The striking presence of the Amazon River mouth adds higher importance to the continental shelf due to its high impact on the sediments, nutrients, organic matter and turbidity plumes transferred from the continent to the open sea (Molleri et al. 2010; Varona et al. 2019; Santana et al. 2020).

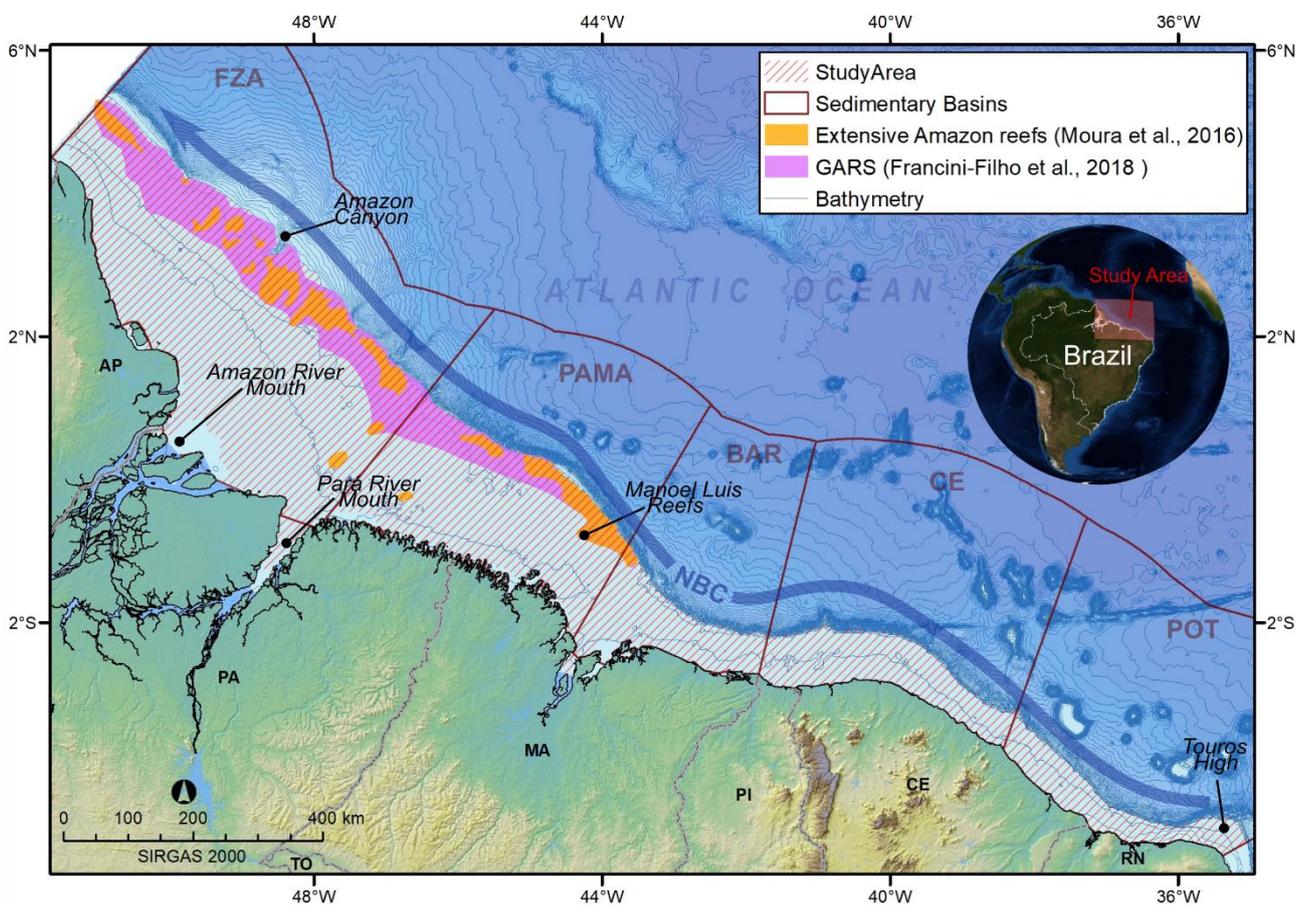


Fig. 1. Study area location at the Brazilian equatorial margin continental shelf (depths < 200m). The marginal sedimentary basins are: Foz do Amazonas (FZA), Pará-Maranhão (PAMA), Barreirinhas (BAR), Ceará (CE) and Potiguar (PE). The North Brazilian Current (NBC) flows northwestward (Assad et al. 2020), and the extensive Amazon reefs or "GARS" occurs at the outer shelf in between FZA and PAMA (Moura et al. 2016; Francini-Filho et al. 2018).

The Northern Brazilian Current (NBC) flows northwestward parallel to the outer shelf (Fig. 1). The seasonal migration of the inter-tropical Convergence Zone (ITCZ) regulates wind variability (Assad et al. 2020). Tides and internal tides also play a vital role in the hydrodynamic patterns of this region (Nittrouer and DeMaster

1996; Molinas et al. 2020). The highest tidal amplitudes (>8m height during spring tides) along the Brazilian coast occur in the region, and they can generate currents up to 200cm.s^{-1} (Nittrouer and DeMaster 1996)

The shelf has a very diverse morphology due to its large extent and many depositional environments. The presence of several geomorphological features such as the Amazon submarine delta, incised valleys, tidal banks, massive sandbanks and beach rocks lineaments is notable. Gentle slopes ($<0.15^\circ$), the considerable differences in the shelf width between the basins, and the shelf break depths varying from 50 to 120m are easily visible seabed characteristics.

Sediments show a vast predominance of Lithoclastic sands on the entire continental shelf and sporadic bioclastic gravels on the outer shelf. Terrigenous muds are sparsely associated with the river's mouth (Vital et al., 2005). Associated carbonates with limestone algae of the *Halimeda* genus occur on the outer shelf (Kowsmann and Costa, 1979; Ximenes Neto et al., 2018). *Halimeda incrassate*, rhodolites and red coralline algae are essential in the area's carbonate contribution (Carneiro and Morais, 2016).

3. METHODS

We considered three types of public datasets: bathymetric, surface sediments and 2D seismic reflection. The bathymetric data comprises a mosaic of several single-beam (SBE) sounding sheets from the Brazilian Navy, nautical charts and depth data from the Brazilian Continental Shelf Survey Plan (BCSSP) surface (Fig. 2a). The depth dataset assembled 962.3385 depth points, and most data comprises depths between 0 and 150m.

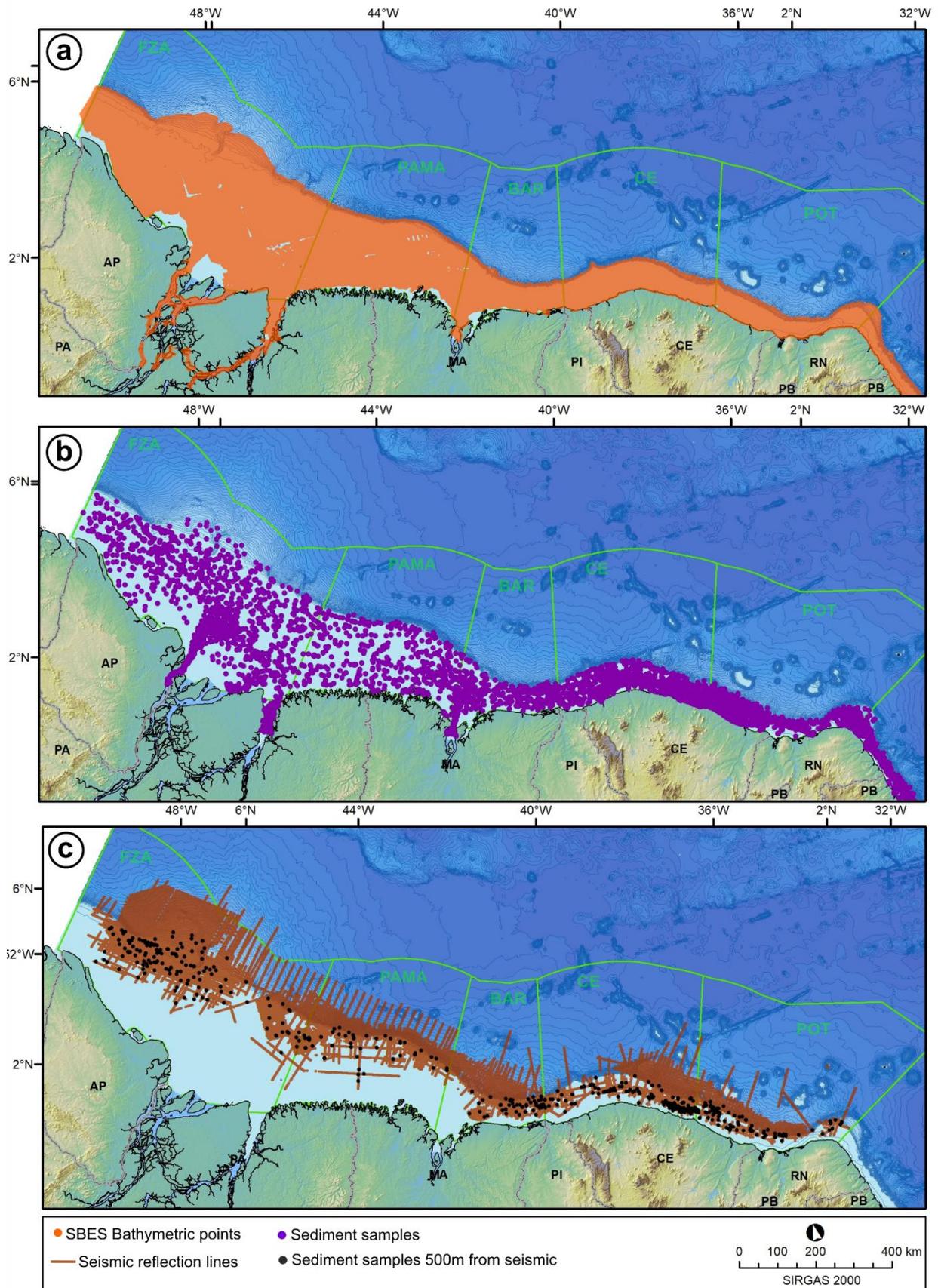


Fig. 2. Used dataset recovery for 962.3385 SBES, nautical chart and BCSSP bathymetry points (a), 5,515 sediment sample stations (b) and 384 seismic reflection lines (c) from 7 datasets and sediment samples closer than 500m to seismic used for statistical analysis.

For sediments, 5,515 stations from the National Petroleum Environmental Databank (NPED) (Fig. 2b) are located between 0 and 160m. The seismic attributes consisted of public multichannel 2D seismic lines (Fig. 2c) processed with Paleoscan™ software. We used 384 seismic lines, with shot points primarily taking between 20 and 100m depths.

The Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation method performed the gridded bathymetric surface using a 500m cell size resolution. Outlier depths were visually observed and manually removed from the data before generating the final Digital Terrain Model (DTM). Spatial Analyst tools (contour, slope and shaded relief) guided the primary seabed relief forms interpretation (Reuter et al., 2009; Rigol-Sanchez et al., 2015), and the results were manually cross-related to morphological publications over the study area. Positive or rough relief bottom-form frontiers were highlighted and used for the facies *versus* morphological evaluation along the study area.

The first 500 milliseconds of each 2D seismic reflection line got its sea bottom manually interpreted for the seismic attribute's extraction: amplitude, reflection intensity, phase, frequency and coherency. The results were gridded at Paleoscan™, and the resulting surface values were extracted to the sediment stations attribute table at the GIS using the “Extract Multi Values to Point” tool. The Principal Component Analysis (PCA) tested the correlation using size parameters (mud, sand and gravels in %) and the carbonate content (%) as entry data at the Past 4.03 software. The PCA also tested the correlation between the attribute and sediments by three buffers (sediment stations inside a linear distance of 100m, 500m and 1000m around the seismic line).

We chose the 500m buffer distance as the optimum balance of data quantity and accuracy for statistical comparison. Using the Min-Max method proposed by Ali and Faraj (2014), data normalization standardized the grain size (mud, sand and gravel), the carbonate contents and the five seismic attributes values. The Python open-source Scikit-Learn library posteriorly calculated their correlation with the PCA method. The seismic attributes were statistically correlated to bioclastic and gravelly sediments to expand the bioclastic facies. This conservative approach, respecting the primary sampled facies, maintains the results' integrity, reasonably expanding the coverage of that carbonate facies.

The coherency expanded the morphology (high grounds and rugged bottom) due to seabed rugosity (Taner et al. 1994; Bahorich and Farmer 1995; Berton et al. 2021), as rough or positive surfaces present lower coherence levels than smoothed regions (Waage et al. 2020). After extensive testing and visual analysis of the morphology and the attribute values, we considered the values < 70% as the primary areas for morphology expansion, respecting the previously mapped features. The GIS “Intersect” tool was used to identify the matching areas between bioclastics, grain size and positive and rough bottom forms. This intersection consists mainly of the most probable mesophotic reef areas.

4. RESULTS

4.1. Brazilian equatorial margin geomorphology and sedimentology

The shelf depths ranged from 0 to 198m, and the average depth was 35.72m. The bottom features observed are always of great magnitude, with extensions ranging from hundreds to thousands of meters and generally smooth transitions. The main features are high bottoms, sandbanks, active channels, incised valleys, deltas and rough or irregular bottoms (Fig. 3a).

Slopes vary from 0 to 2° (Fig. 3b), with an average of 0.06°. The most significant gradients (>0.15°) are usually associated with incised valleys, sandbanks and more pronounced high grounds in the continental shelf relief,

such as the Manoel Luis reefs, the deeper border of the Amazon Submarine Delta and the channels of the Maranhense gulf (Cururupú banks).

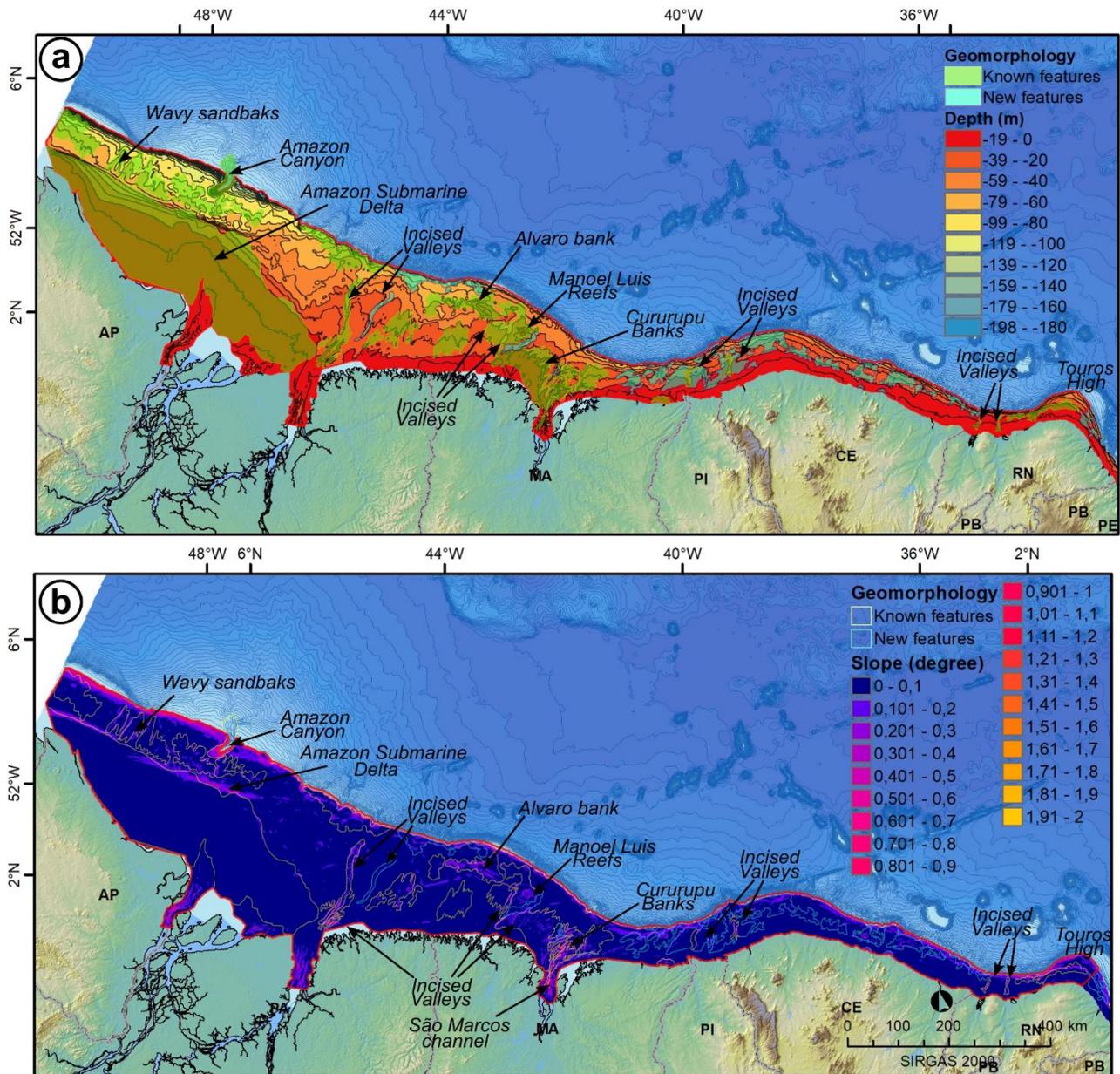


Fig. 3. Bathymetric surface (a) identifies the main morphological features. Hugh's bottom is usually associated with banks and incised valleys, with the Amazon Submarine Delta being the most significant and smoothest feature in the study area. The slope over BEMCS is very smooth (b), with the highest values related spatially to morphology positive high bottom flanks (banks, reef, delta) or negative relief incised valleys.

The sedimentary facies are composed mainly of sands, with an extensive muddy portion in the Amazon and Pará river mouths and the Amazon canyon vicinity (Fig. 4a). The muddy fraction practically disappears in the other basins, occurring sporadically on the middle and outer shelf and at some smaller river's mouths. The gravel fraction occurs in isolated patches usually close to the FZA shelf break, in a more significant proportion of PAMA middle and outer shelf, practically absent in the BAR, quite abundantly in the medium to the outer shelf of CE and concentrated on the outer shelf of POT.

Bioclastic facies occur at the outer shelf on the FZA and PAMA basins (Fig. 4b), decreasing in BAR (restricted to a small spot on the outer shelf to the southeast), dominating practically the entire CE basin and occurring on the outer shelf in the POT basin. Lithobioclastic sediments occur pretty isolatedly on the borders of Bioclastic deposits, mainly in the CE basin. Furthermore, most of the shelf sands correspond to Lithoclastics.

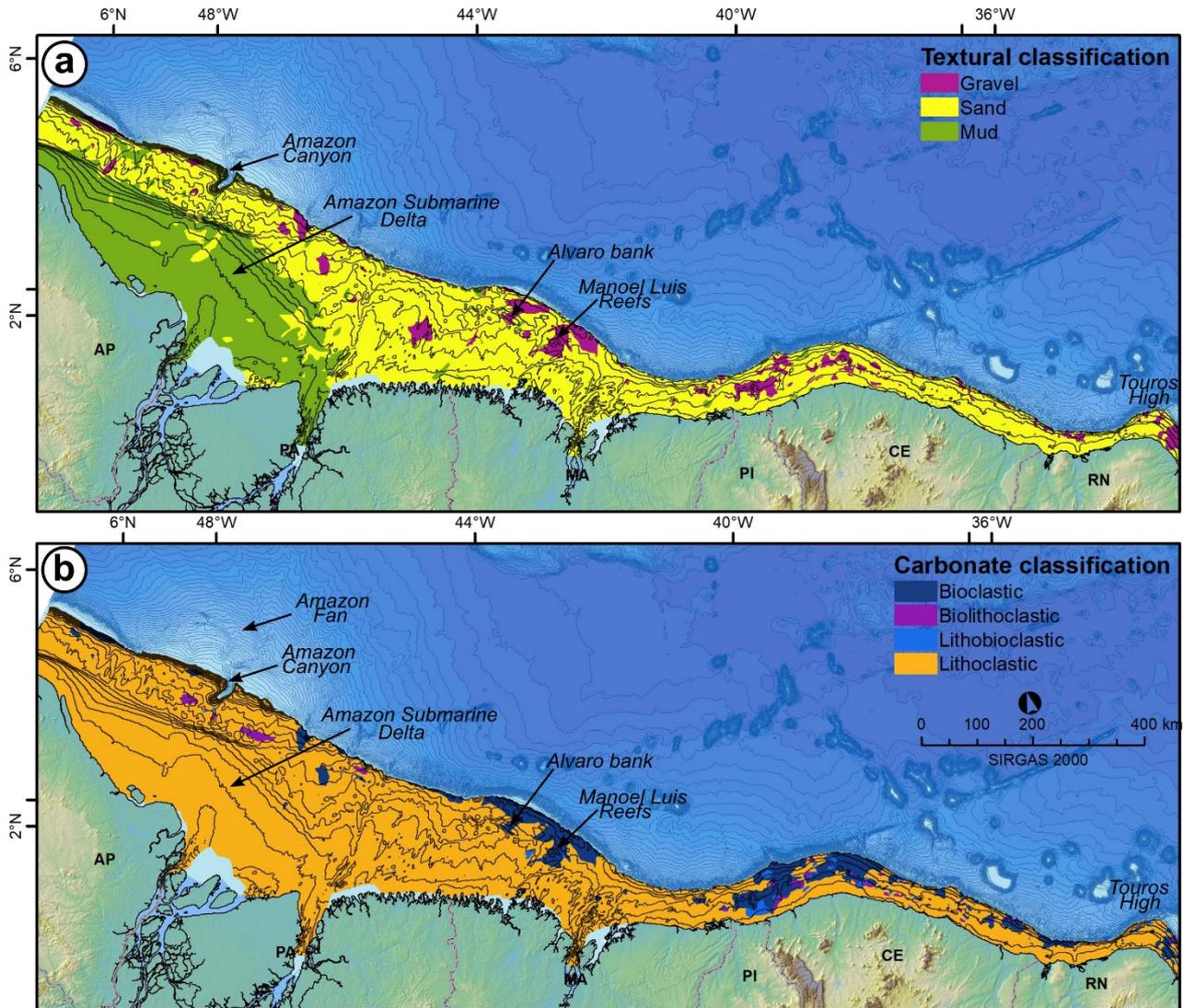


Fig. 4. Grain size (a) and carbonate (b) classification considering the 5.515 surface samples and the morphological features. The shelf is mainly composed of sands with a high contribution of mud at the Amazon submarine delta. Gravels are located at isolated spots on the outer shelf and are strongly associated with Bioclastics.

4.2. Statistical correlation

The first PCA (Fig. 5a) indicates a strong correlation between Bioclastics sediments ($\text{CaCO}_3 > 70\%$) and gravels (components 1 and 2 variances of 89%). Furthermore, muds usually occur inversely to sands. Components 1 and 2 identified a direct relation between carbonate (Bioclastics) and gravel contents.

The results of the second PCA tested sediments (grain size and carbonate contents) and the five seismic attributes correlation (Fig. 5b) with a total of 75% variance. It shows two main groups: amplitude, frequency, and intensity attributes which correlate with the bioclastics, and coherency and phase coupled with lithoclastic

sands. These results guided the conservative expansion of the gravelly bioclastic domain, using high-intensity attribute results as the reshaping reference.

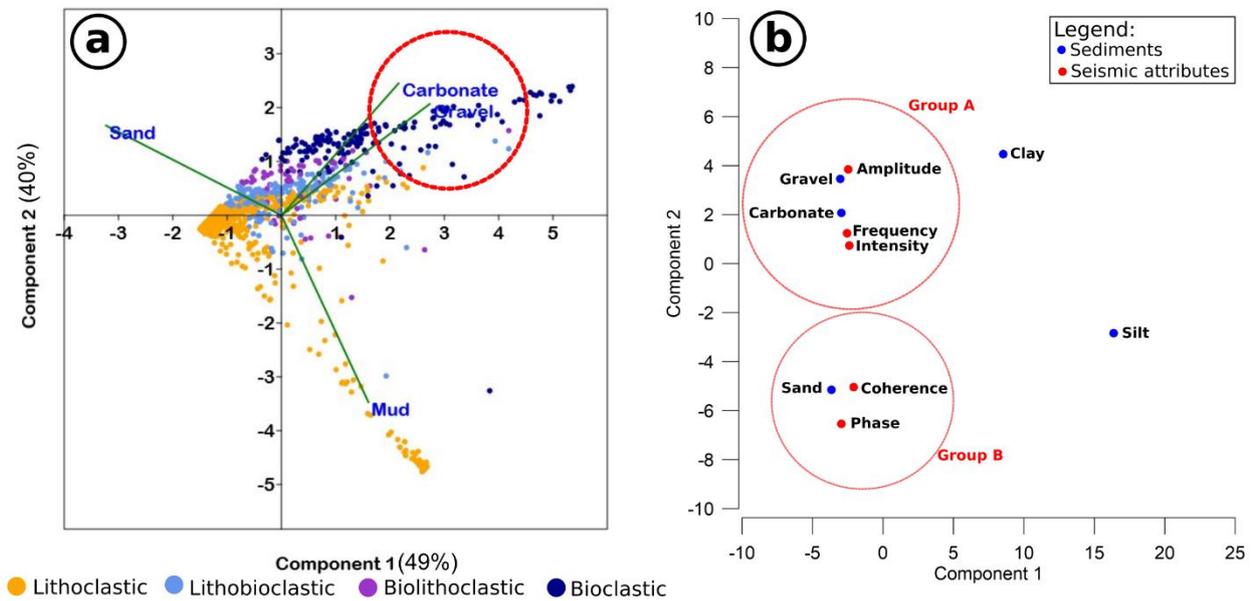


Fig. 5. PCA correlation between sediment characteristics (a). The highlighted values in red correspond to the higher relations at components 1 and 2. PCA correlation between sediment characteristics and the main extracted seismic attribute results (b). Group A directly correlates carbonates, gravels, amplitude, frequency and intensity and Group B shows a relation between sand fraction and coherence and phase.

For morphology, the coherence attribute highlighted more than 164 features (Fig. 6a). Forty-six new rough features could not be related to the already-mapped interpretations and were classified as "new features from seismic attributes". Reflection Intensity expansions were significantly high at the shelf break around the previously mapped carbonate gravels (Fig. 6b), highlighting lineaments off FZA and some spotted areas at PAMA, BAR and CE. These areas are consistent with well-known reef-bottom locations such as the Manoel Luis reef and Alvaro bank.

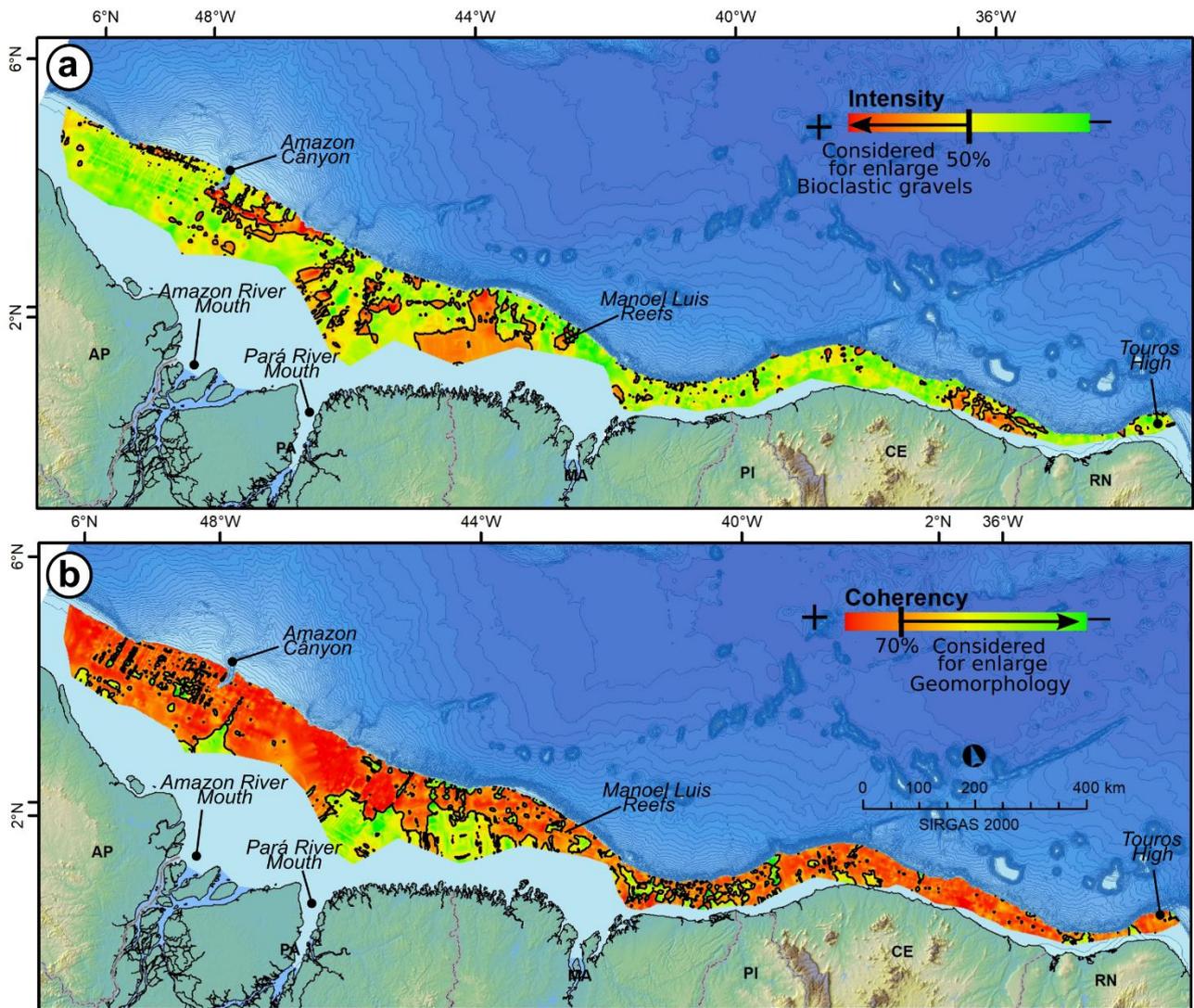


Fig. 6. Intensity and coherency attribute surfaces. 50% high-intensity values guided the Bioclastic gravels area expansion (a) and morphology considered 70% of the coherency lower values (b). These values agreed spatially with the overlapping previously mapped sediment and morphological features.

4.3. Targeting the mesophotic “reef” areas

The intersection result represents the new bioclastic and morphological areas that could better correspond to the mesophotic reefs patches (Fig. 7). It has 13,478km² and is more abundant at the CE and less abundant at BAR and POT. The most prominent spot is in the Manoel Luiz reefs and Alvaro bank surroundings at the PAMA basin. Six of the bibliography's 16 visited reef sites (excluding sponges and rhodoliths) coincided with the presented bioclastic areas (37% of accuracy). In total, 12 bioclastic patches matched some visited reef or rigid-bottom indicative (rhodolith and sponges), with the same linearity pattern to the outer shelf.

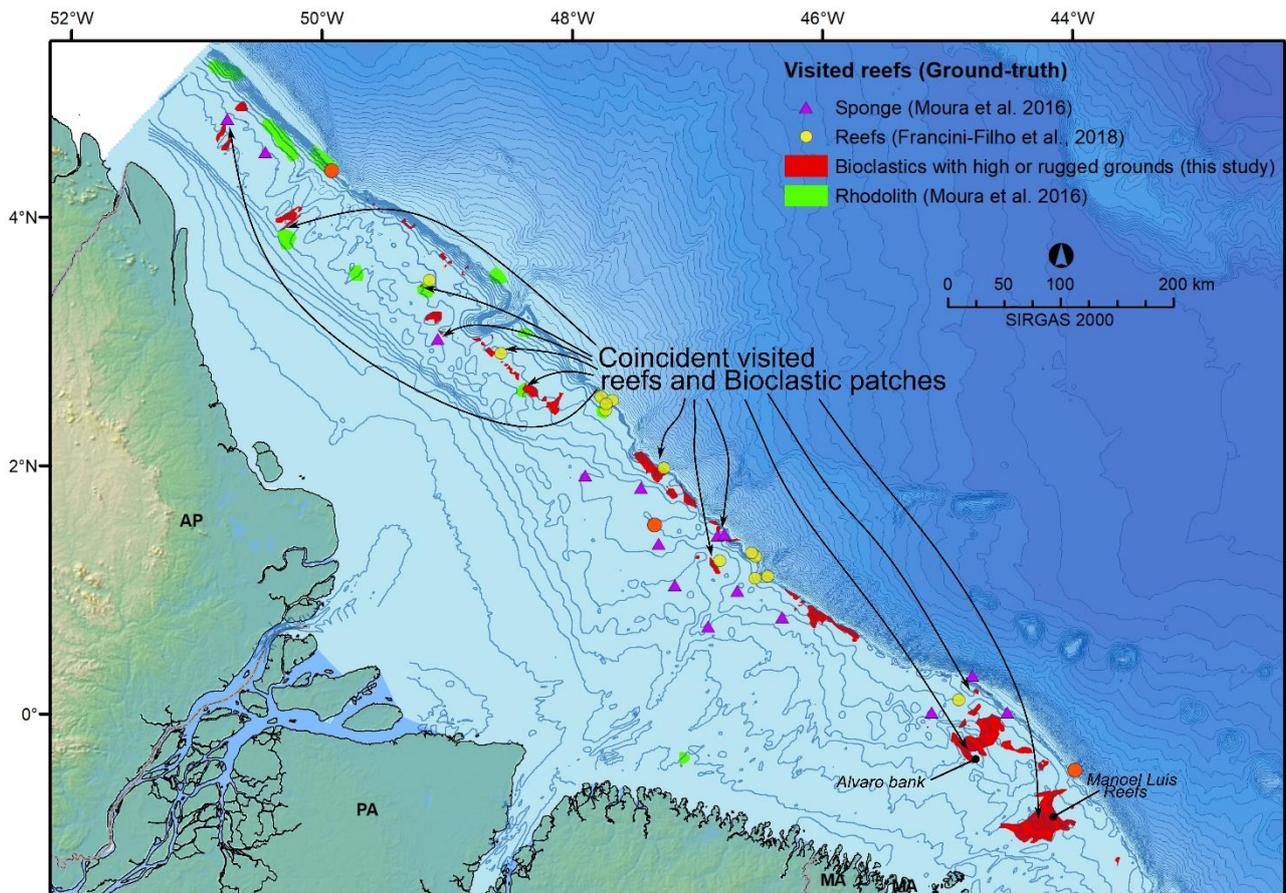


Fig. 7. Visited reefs or rigid-bottom indicators coincident to the Bioclastics intersection to rugged and high grounds.

5. DISCUSSION

The bioclastic facies presented in this study have good spatial linearity with the Amazon reefs previously sampled and recorded by Moura et al. (2016), Francini-Filho et al. (2018) and Vale et al. (2022) (Fig. 8a). They occur at the outer shelf and shelf break in the FZA and PAMA basins and over the inner and middle shelf of the CE basin (Fig. 8b). However, this paper's results show an evident coverage divergence, highlighting the importance of considering data quantity and bottom morphology during subsea mapping.

With 13,478km², the carbonate facies that best represent possible areas of mesophotic reefs (bioclastic gravels) here presented occupy only 4.2% of the evaluated continental shelf surface. The area of the entire equatorial Margin (five basins) also represents only 3,978km² bigger than the first Amazon reefs sizing estimation of Moura et al. (2016) and 42,522km² less than the GARS proposed by Francini-Filho et al. (2018) (Fig. 8a).

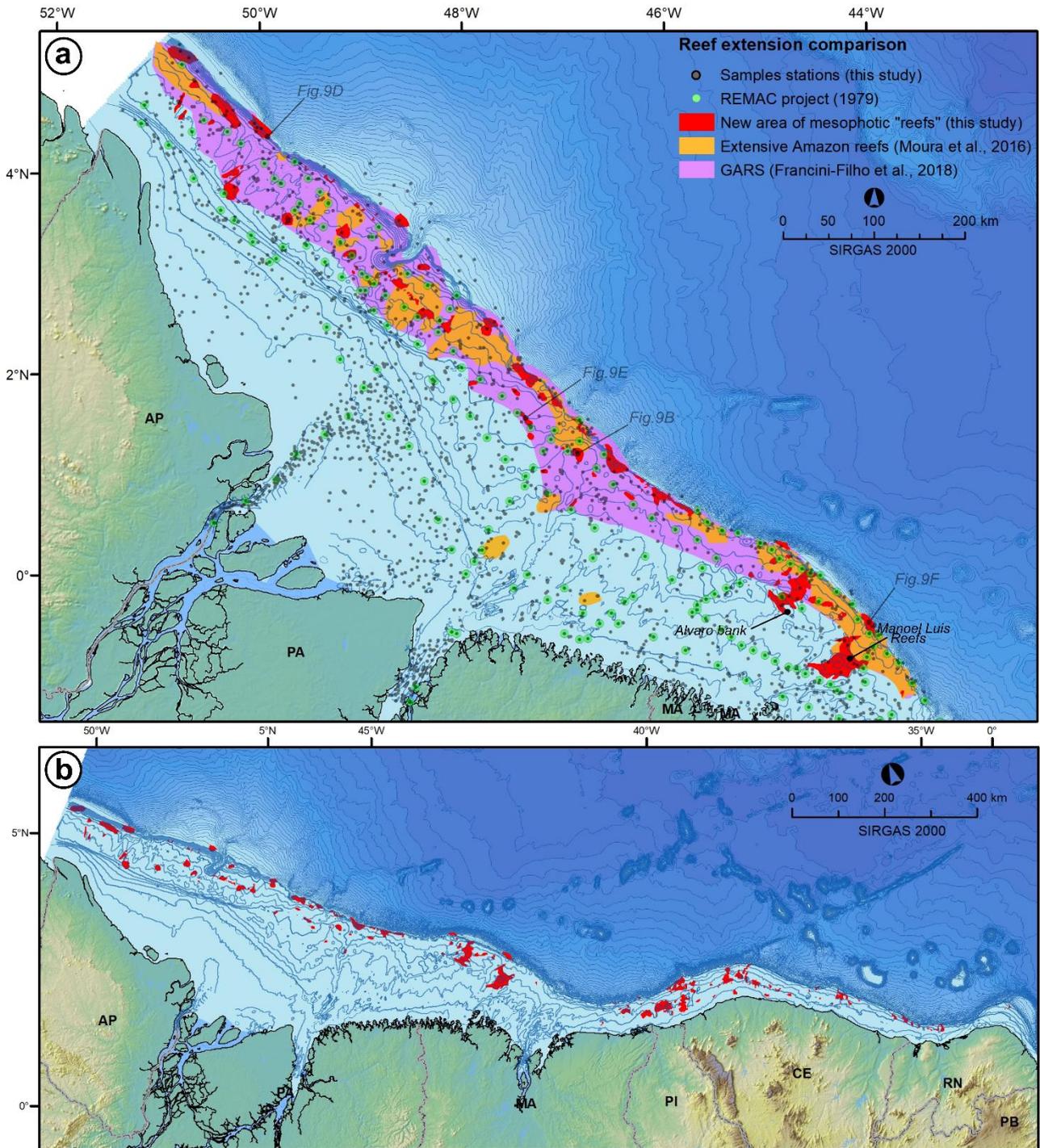


Fig. 8. A- Amazon shelf with reef areas highlighted by this study (bioclastic gravels and morphology intersection) compared with the previously extensive Amazon reefs areas (Moura et al. 2016) and GARS proposed area (Francini-Filho et al. 2018). The considerable increase in samples used in this study compared with REMAC project (1979) guaranteed a much better resolution of the Bioclastics. B- More realistic overview of the highlighted mesophotic "reefs" over the entire Brazilian Equatorial Margin.

It means that the Amazon Mesophotic Reefs are not as extensive as suggested so far, even with the geophysical data's conservative approach that expanded the carbonate facies and geomorphological features coverage. The considerably larger dataset used in this work (Fig. 8a), based on the concept that better resolution increases the capacity to predict biotopes (Robinson et al. 2011), indicates a significant extrapolation of the previously proposed Amazon reef areas until now.

Moura et al. (2016) also used the CaCO₃ fraction to delimitate the spatial reef coverage. However, even with a Barreto et al. (1975) citation, the exact source of the used dataset for the structures polygon drawing is unclear. The REMAC project, whose data were used by Barreto et al. (1975) and Milliman (1977), only considered 362 surface sediment samples for the entire Brazilian Equatorial Margin, showing very sparse sampling stations compared to the new dataset presented.

The total reefs coverage proposed is not "great" compared to the ones found at the Abrolhos bank area (46,000km²) in South Atlantic (Amado-Filho et al. 2017) or the Australian Great Barrier Reef (25,600km²) in the Pacific (Harris et al. 2013). In reality, these mesophotic reefs seem to be the northern frontier of a wider carbonate-rich environment that linearly follows almost the entire Brazilian outer shelf, except the south region of Brazil (Milliman 1977).

However, only considering the spotted mesophotic reefs visited and confirmed by Moura et al. (2016), Francini-Filho et al. (2018) and Vale et al. (2022) with ground-truthing dives (Fig. 9), our results show excellent linearity (Fig. 8). The lack of carbonate facies at the BAR basin is still uncertain, and it may be related to the NBC's coastal orientation and the erosive action (Gualberto and El-Robrini 2005).

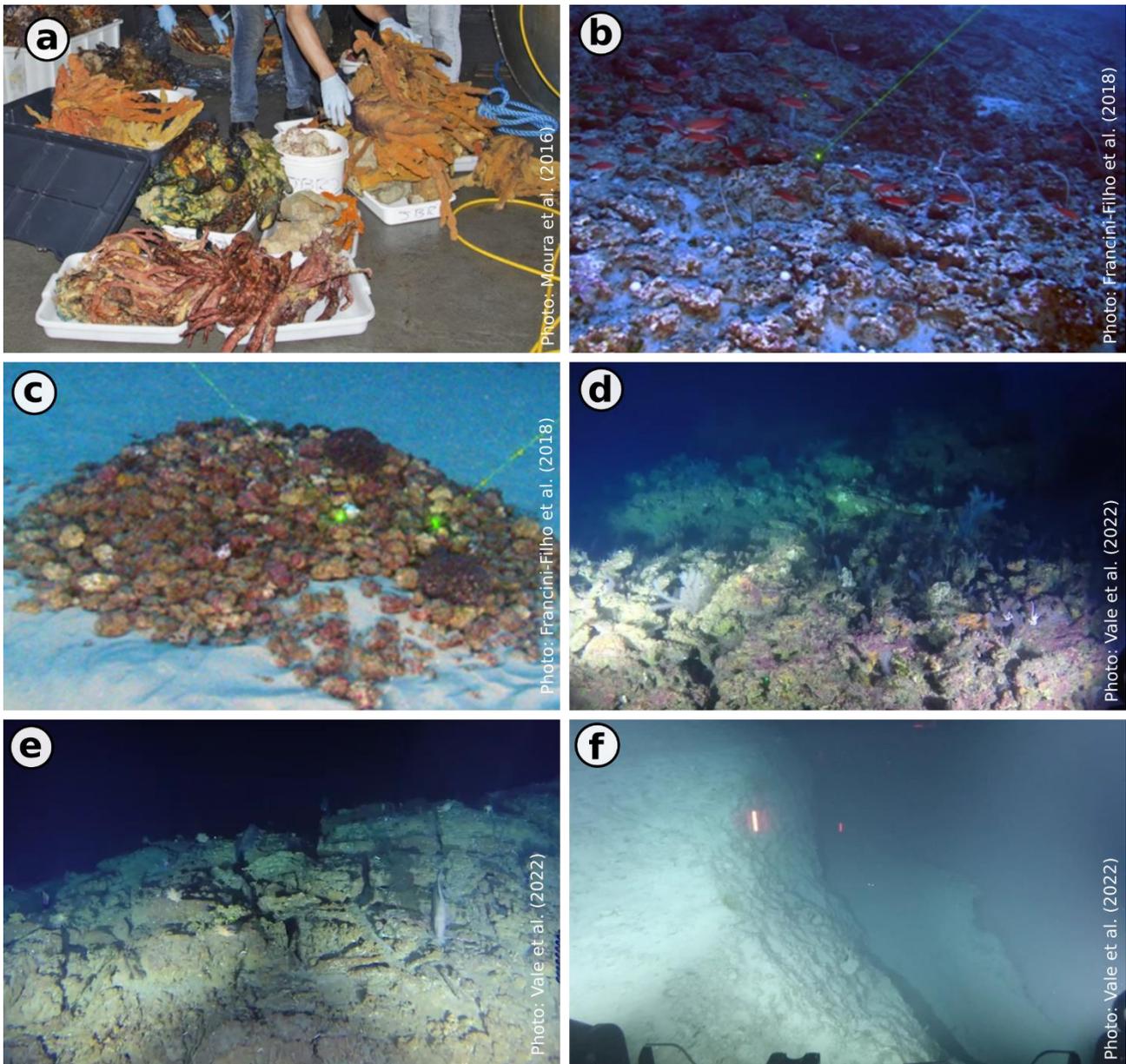


Fig. 9. Photos of the Amazon Mesophotic “reef” published by Moura et al. (2016), Francini-Filho et al. (2018) and Vale et al. (2022). Some location of the surveyed areas is in Fig. 8. Images “a” and “c” did not have their exact location explicated by the authors. Some of the benthic diversity found at the central sector (a); Coalescent rhodolith beds also at the central sector (b); Free-living rhodolith pile (c); Coalescent calcareous algae over sandstones in the north (d), central (e) and southern (f) sectors.

Araujo et al. (2021) proposed a reef mega habitat delimitation criterion for environmental protection guidance, but we suggest that stakeholders also consider the grain size, carbonate content greater than 70% (Bioclastics), and geomorphology. This newly proposed mapping can best estimate this important mesophotic habitat area and provide more accurate decision-making and resource management information.

In terms of mapping methods, one advantage of the seismic data as a complement is its extensive coverage because of the several oil and gas industry exploration projects along the Brazilian coast. New usages of this information are already going beyond oil exploration, contributing to a better understanding of the water column physics and seafloor geomorphology (Souza et al. 2016; Barão et al. 2018). The statistical response of the seismic data to the surface sediments agreed with the signal reflection strength (intensity) concept, which is usually applied by the industry for subsurface facies and reservoir porosity establishment (Hsiung et al.

2014; Słonka and Krzywiec 2020), and coherency signal for highlight paleogeomorphology and faults mapping (Posamentier 2005).

6. CONCLUSION

The intersection of gravelly Bioclastic areas with rugged bottom morphology offers red-flag targets for mesophotic reefs in the vast Brazilian Equatorial Margin shelf region. The resizing of the Amazon Reefs highlighted by Moura et al. (2016) occurs due to the much higher data density and the GIS analysis techniques applied, enabling better tracking of the sedimentary facies. The bioclastics indicate that the mesophotic reefs seem to happen in isolated spots over the outer FZA shelf, considerably more abundant at PAMA and CE basins.

The spots of mesophotic reefs visited by ground-truth dives match the bioclastic areas presented in this study. Based on that, there is no reason to believe that these highlighted regions have a different benthic composition than other parts of the Brazilian Margin. The misconception that these environments constitute an MCE can give a different analysis by the general public from its real state and can disqualify its true environmental importance (biological diversity, abundance and ecological relevance).

The capital and personnel effort for historical data recovery are relatively cheap and not comparable to the necessary financial resources to carry out an entire seabed high-resolution scanning survey in this massive area. New good-quality data is still needed, but data reuse could be a fundamental way to focus the high-cost survey investments in more precise spots, as the bioclastic facies that are evidenced here.

The Amazon Mesophotic Reefs, actually a much smaller area than previously predicted by Moura et al. (2016) and Francini-Filho et al. (2018), would correspond to a small portion of a Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP). The ideal management of mesophotic areas should always consider the constantly evolving new geophysical survey technologies, public data sets, improvements in geoprocessing techniques and more efficient computational resources (i.e. machine learning).

7. REFERENCE LIST

- Amado-Filho GM, Bahia RG, Pereira-Filho GH, Longo LL (2017) South Atlantic rhodolith beds: Latitudinal distribution, species composition, structure and ecosystem functions, threats and conservation status. *Coast Res Libr* 15:299–317. https://doi.org/10.1007/978-3-319-29315-8_12
- Araujo LS, Magdalena UR, Louzada TS, et al (2021) Growing industrialization and poor conservation planning challenge natural resources' management in the Amazon Shelf off Brazil. *Mar Policy* 128:104465. <https://doi.org/10.1016/j.marpol.2021.104465>
- Assad LP de F, Toste R, Böck CS, et al (2020) Ocean climatology at Brazilian Equatorial Margin: A numerical approach. *J Comput Sci* 44:. <https://doi.org/10.1016/j.jocs.2020.101159>
- Bahorich MS, Farmer SL (1995) 3-D seismic discontinuity for faults and stratigraphic features: The coherence cube. 1995 SEG Annu Meet 93–96. <https://doi.org/10.1190/1.1887523>
- Baker EK, Puglise KA, Harris PT (2016) Mesophotic coral ecosystems. A lifeboat for coral reefs?
- Barão MVC, Ristow JP, Bousfield MM, et al (2018) Using seismic data from the Oil and Gas Industry for Oceanographic structures detection. *Brazilian J Geophys* 36:5–17

- Barreto LA, Milliman JD, Amarai CAB, Francisconi O (1975) Northern Brazil. In: Milliman JD, Summerhayes CP (eds) Upper continental margin off Brazil. *Contributions to Sedimentary Geology*, pp 11–43
- Barros Filho AKD, Carmona RG, Zalán PV (2021) Um novo “pré-sal” no arco norte do território brasileiro?
- Berton F, Vesely FF, Guedes CFC, et al (2021) Subsurface geomorphology of wave-dominated nearshore deposits: Contrasting styles of reservoir heterogeneity in response to shoreline trajectory. *Mar Pet Geol* 124:104821. <https://doi.org/10.1016/j.marpetgeo.2020.104821>
- Calegario G, Freitas L, Appolinario LR, et al (2021) Conserved rhodolith microbiomes across environmental gradients of the Great Amazon Reef. *Sci Total Environ* 760:143411. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143411>
- Collette BB, Rutzler K (1977) Reef fishes over sponge bottoms off the mouth of the Amazon River. *Proceedings, Third Int Coral Reef Symp* 305–310
- Eyal G, Laverick JH, Bongaerts P, et al (2021) Mesophotic Coral Ecosystems of the Great Barrier Reef Are Understudied and Underexplored. *Front Mar Sci* 8:1–5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.622856>
- Francini-Filho RB, Asp NE, Siegle E, et al (2018) Perspectives on the Great Amazon Reef: Extension, Biodiversity, and Threats. 5:1–5. <https://doi.org/10.3389/fmars.2018.00142>
- Gualberto LPS, El-Robrini M (2005) Faciologia da cobertura sedimentar superficial da plataforma continental do Maranhão. *Estud Geológicos* 15:234–243
- Harris PT, Bridge TCL, Beaman RJ, et al (2013) Submerged banks in the Great Barrier Reef, Australia, greatly increase available coral reef habitat. *ICES J Mar Sci* 70:284–293. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fss165>
- Hinderstein LM, Marr JCA, Martinez FA, et al (2010) Theme section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management.” *Coral Reefs* 29:247–251. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0614-5>
- Hsiung KH, Yu HS, Chiang CS (2014) Seismic characteristics, morphology and formation of the ponded Fangliao Fan off southwestern Taiwan, northern South China Sea. *Geo-Marine Lett* 34:59–74. <https://doi.org/10.1007/s00367-013-0351-1>
- Locker SD, Armstrong RA, Battista TA, et al (2010) Geomorphology of mesophotic coral ecosystems: Current perspectives on morphology, distribution, and mapping strategies. *Coral Reefs* 29:329–345. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0613-6>
- Mahiques MM, Siegle E, Francini-Filho RB, et al (2019) Insights on the evolution of the living Great Amazon Reef System, equatorial West Atlantic. *Sci Rep* 9:1–8. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50245-6>
- Milliman JD (1977) Role of Calcareous Algae in Atlantic Continental Margin Sedimentation. *Foss Algae* 232–247. https://doi.org/10.1007/978-3-642-66516-5_26
- Milliman JD, Summerhayes CP, Barreto HT (1975) Quaternary sedimentation on the Amazon Continental shelf. *Geol Soc Am Bull* 86:610–614
- Molinas E, Carneiro JC, Vinzon S (2020) Internal tides as a major process in Amazon continental shelf fine sediment transport. *Mar Geol* 124658. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.margeo.2020.1063600>

- Mollerer GSF, Novo EML d. M, Kampel M (2010) Space-time variability of the Amazon River plume based on satellite ocean color. *Cont Shelf Res* 30:342–352. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2009.11.015>
- Moura RL, Amado-Filho GM, Moraes FC, et al (2016) An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Sci Adv* 2:. <https://doi.org/10.1126/sciadv.1501252>
- Nittrouer CA, DeMaster DJ (1996) The Amazon shelf setting: Tropical, energetic, and influenced by a large river. *Cont Shelf Res* 16:553–573. [https://doi.org/10.1016/0278-4343\(95\)00069-0](https://doi.org/10.1016/0278-4343(95)00069-0)
- Posamentier HW (2005) Application of 3D seismic visualization techniques for seismic stratigraphy, seismic geomorphology and depositional systems analysis: examples from fluvial to deep-marine depositional environments. In: Dore AG, Vining BA (eds) *Petroleum Geology: North-West Europe and Global Perspectives - Proceedings of the 6th Petroleum Geology Conference*. Petroleum Geology Conferences Ltd., London, pp 1565–1576
- Pyle RL, Copus JM (2019) Mesophotic Coral Ecosystems: Introduction and Overview. 3–27. https://doi.org/10.1007/978-3-319-92735-0_1
- Robinson KA, Ramsay K, Lindenbaum C, et al (2011) Predicting the distribution of seabed biotopes in the southern Irish Sea. *Cont Shelf Res* 31:120–131. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2010.01.010>
- Santana CS, Lira SM de A, Varona HL, et al (2020) Amazon river plume influence on planktonic decapods in the tropical Atlantic. *J Mar Syst* 212:103428. <https://doi.org/10.1016/j.jmarsys.2020.103428>
- Sherman C, Nemeth M, Ruíz H, et al (2010) Geomorphology and benthic cover of mesophotic coral ecosystems of the upper insular slope of southwest Puerto Rico. *Coral Reefs* 29:347–360. <https://doi.org/10.1007/s00338-010-0607-4>
- Słonka Ł, Krzywiec P (2020) Seismic characteristics and development of the upper jurassic carbonate buildups from the miechów trough (Southern Poland). *Geosci* 10:1–33. <https://doi.org/10.3390/geosciences10060239>
- Souza MBFM, Migliorelli JPR, Figueiredo Jr. AG, et al (2016) Bathymetric Map of the Campos Basin. *Geol Geomorphol* 67–70. <https://doi.org/10.1016/b978-85-352-8444-7.50011-1>
- Taner MT, Schuelke JS, O’Doherty R, Baysal E (1994) Seismic attributes revisited. *SEG Tech Progr Expand Abstr* 1104–1106. <https://doi.org/10.1190/1.1822709>
- Vale NF, Braga JC, de Moura RL, et al (2022) Distribution, morphology and composition of mesophotic ‘reefs’ on the Amazon Continental Margin. *Mar Geol* 447:106779. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2022.106779>
- Varona HL, Veleda D, Silva M, et al (2019) Amazon River plume influence on Western Tropical Atlantic dynamic variability. *Dyn Atmos Ocean* 85:1–15. <https://doi.org/10.1016/j.dynatmoce.2018.10.002>
- Waage M, Serov P, Andreassen K, et al (2020) Geological controls of giant crater development on the Arctic seafloor. *Sci Rep* 10:1–12. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-65018-9>
- Weinstein DK, Klaus JS, Smith TB (2015) Habitat heterogeneity reflected in mesophotic reef sediments. *Sediment Geol* 329:177–187. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2015.07.003>
- Weinstein DK, Tamir R, Kramer N, et al (2021) Mesophotic reef geomorphology categorization, habitat identification, and relationships with surface cover and terrace formation in the Gulf of Aqaba.

5.2. Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil. Submetido para a revista *Sedimentary Geology* (ISSN: 0037-0738, Nível CAPES A2 - Geociências).

Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil.

João Regis dos Santos Filho; Alberto Garcia Figueiredo Jr.; Juliane Castro Carneiro; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Allan Soares Ramalho

ABSTRACT

The Santos Basin mesophotic zone comprises one area of 104,915 km², occupying 78% of the entire basin. Santos Basin is one of the most under stress and sensitive marine regions in the Brazilian territory due to several major ports, Oil & Gas industry, and coastal marine environmental management areas. Scientific literature recognizes that rhodolith beds and biogenic rigid-bottom patches occur on the shelf, but because lack of high-resolution seismic data, these seabed features are not yet wholly mapped at Santos Basin. However, an unprecedented gathering of historical depth sounding points and surface sediment data collection, in conjunction with an extensive field campaign of seabed sampling and sub-bottom shallow seismic records, points out new evidence of biogenic sediment distribution reefal structures in the Santos Basin. The patches of calcareous algae crusts, terraces mounds, pinnacles, and free-living rhodolith beds compose the carbonatic facies on the outer shelf. Rugged bottom relief and pinnacles up to 10m in height correlate with carbonatic gravels and sandy areas. Bioconstructions are more common northward and gradually decrease southward. Geomorphological features such as rugged bottom relief might indicate the occurrence of mesophotic bioconstructions off Paraná, and Santa Catarina State coast. The mesophotic bioconstructions have evolved through four stages: 1- LGM fully exposed shelf, 2- sea-level transgression and bioconstructions pioneers, 3- influence of the La Plata plume at the southern sector, and 4- establishment of mud patches in the northern sector due to local input.

KEY-WORDS

Bioconstructions, bioclastics, Santos Basin, mesophotic reef, carbonatic facies, calcareous algae, shelf morphology

1. INTRODUCTION

The mesophotic zone is located between 30 and up to 150m depths and consist in a light dependent environment wich holds important benthic habitats (Hinderstein et al., 2010; Pyle and Copus, 2019). Solar irradiance downwelling, temperature stability and protection against wave action (Lesser et al., 2009) makes this deeper portion of the continental shelf an ideal place for incrusting organisms colonization, as coralline algae, corals, sponges and bryozoans.

Mesophotic CaCO₃ bioconstructions are considered an important genetic and biomass repository for the shelf shallower areas (Hinderstein et al., 2010; Groot et al., 2012; Baker et al., 2016; Pyle and Copus, 2019). The greater depths beyond the SCUBA limits turn this environment much more unknown than compared to other euphotic benthic communities (Hinderstein et al., 2010; Pyle and Copus, 2019). It hides the same structural complexities as the shallower reefs (Urbina-Barreto et al., 2021), acting as a tridimensional habitat and shelter for several species in the deep (Cavalcanti et al., 2012).

With a vast mesophotic area of 104,915 km², the Santos Basin harbors a critical and diverse benthic habitat. Rhodoliths beds, calcareous algae aggregates (boxwork), and mollusk shells constitute an area of 13,278 km². However, even with the economic, social, and environmental relevance, one of the most relevant coastal areas

at the Brazilian margin due to offshore oil reserves, fisheries, and ports, just a few research focus on mesophotic habitats mapping.

Previous papers recognize that rhodolith beds (Milliman, 1977; Figueiredo Jr. and Tessler, 2004; Dias and Medeiros, 2005; Cavalcanti et al., 2012; Dias et al., 2019) and rigid-bottom reef patches (Reis et al., 2013; Habtec-Mott MacDonald and Petrobras, 2014) occur on the outer shelf in this basin. Nevertheless, due to the lack of geological surveys in deeper waters compared to the shallow (Baker et al., 2016), high-resolution data did not accurately fully cover these basin seabed structures so far.

The Santos Basin bioconstructions originated in the Quaternary highstand periods, accordingly to Maia et al., (2010) and Reis et al. (2013a), and their rugged bottom relief can reach heights up to 10m. These carbonate buildups are mainly composed of calcareous algae (rhodolith beds and algal reefs) and bioclastic sand and gravels (Milliman, 1977; Figueiredo Jr. and Tessler, 2004). Large superposed coralline algae crusts occur at the outer shelf (Dias et al., 2019), which can form this complex habitat by being fixed or resting over rigid structures at the seabed (Cavalcanti et al., 2012).

This research aims to classify, describe sediment composition, and update its spatial distribution of the mesophotic zone at the Santos Basin. For this purpose, we gathered an unprecedented 694,431 public historical bathymetric depth data points and 12,542 sediment composition datasets. These data were, combined with results from an extensive field campaign that involved triplicate sampling at 96 stations and 12,268 km of Sub-Bottom Profiler (SBP) records derived from PETROBRAS/CENPES Santos Basin Environmental Characterization Project (PCR-BS).

This research allowed refining the carbonate facies mapping and establishing new frontiers for these critical marine regions. In addition, we provided new frontiers of bioconstructions occurrence at the basin. The growing demand for renewable and unrenewable marine resources enlarges the pressure over benthic habitats, even more at the still mostly unmapped deepest shelf regions, making this type of research increasingly necessary. Additionally, our goal is to contribute to Brazilian marine governance and stakeholders' ideal management of the benthic habitats.

2. STUDY AREA

The Santos Basin shelf is limited northward by Cabo Frio Hight and southward by the Florianópolis Hight (Figure 10). The shelf width is 230km in the south and 70km in the north. The main landmarks over its 2,730km of coastline are the Guanabara Bay, Ilha Grande and Sepetiba Bay, São Sebastião Island, Santos Estuary, Cananéia Bay, Paranaguá Estuarine Complex, Guaratuba Bay, Babitonga Bay, Itajaí River mouth and Florianópolis Island. The total area of the Santos Basin continental shelf is 134,449 km².

The study area (Figure 10) comprehends the Santos Basin shelf mesophotic zone (30 to 200m depths). The Brazilian Coastal Current (BCC) influences this region at the inner and middle shelf (Souza and Robinson, 2004) and the Brazil Current (BC) (Stramma and Ikeda, 1990; Silveira et al., 2000) at the outer shelf. The average wave direction of the SE quadrant occurs for the majority of the year, with storm waves coming from the South during cold fronts (Cecilio and Dillenburg, 2019).

The study area consists of two main sectors (Figure 10). The northern sector between Cabo Frio Height and São Sebastião Island comprises the main carbonate facies area (Reis et al., 2013; Dias et al., 2019) and includes the Cabo Frio upwelling system (Castelao and Barth, 2006; Carrière et al., 2009). The southern sector, from São Sebastião Island to Florianópolis Island comprises the broader and smoothest shelf. One of its

characteristics is the muddy sediment patches derived from La Plata River (Martins and Coutinho, 1981; Nagai et al., 2014; Mahiques et al., 2004a) at the middle shelf.

The Quaternary sea-level oscillations highly influenced the shelf geomorphology. Relict relief forms dominate the mesophotic zone as step-like terraces, lobate features and escarpments (Reis et al., 2013), incised valleys (Furtado and Conti, 2006; Artusi and Figueiredo Jr., 2007; Conti and Furtado, 2009; Riva, 2015), spodic B horizon soils outcrops (Silva and Dias, 2020) and paleo-shorelines seen as beach rocks alignments (Figueiredo Jr. and Tessler, 2004). In addition to rhodoliths, coralline algae bioconstructions and mollusk shells, the spotted occurrence of cold-water corals on the outer shelf also contributes to characterizing the carbonate facies (Kitahara et al., 2008; Barbosa et al., 2020; Cordeiro et al., 2020).

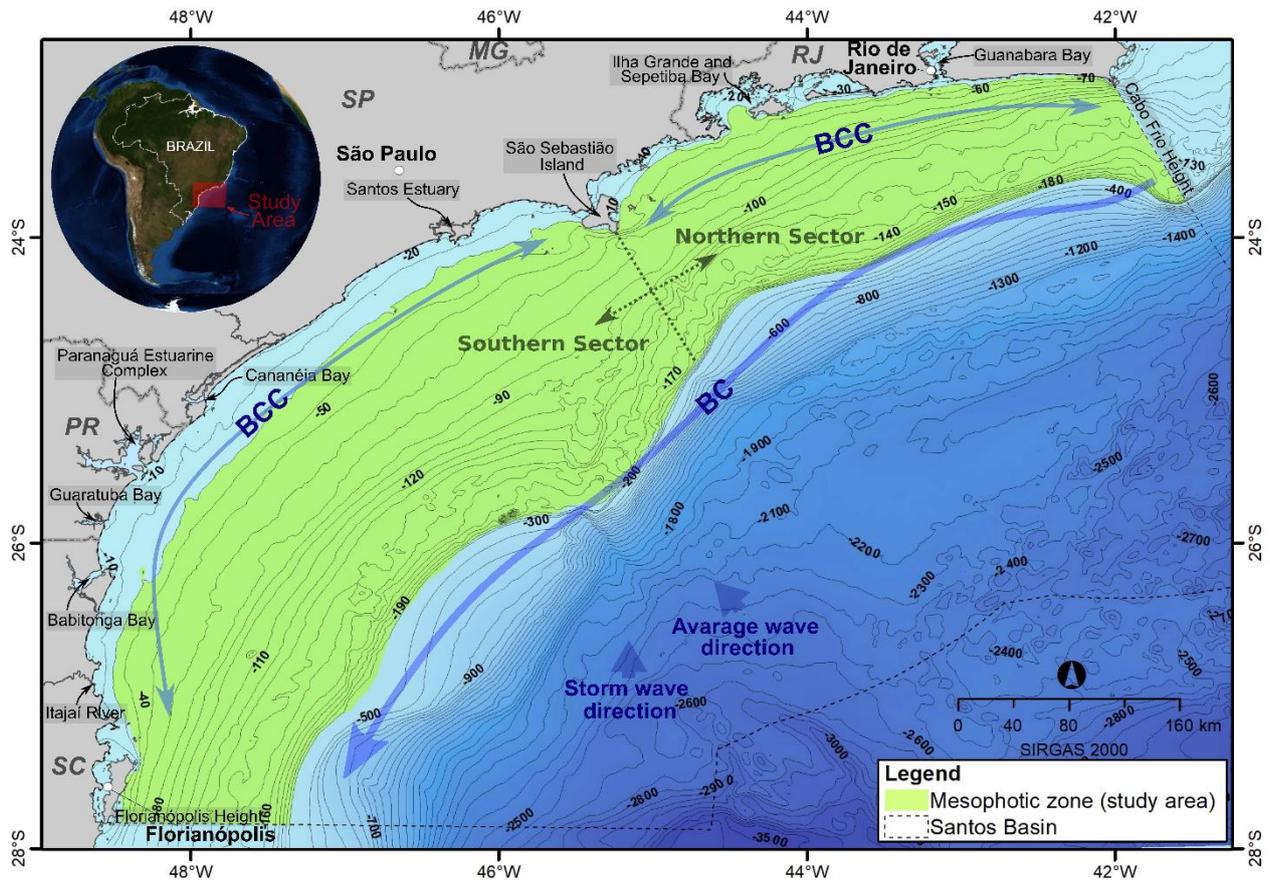


Figure 10. Study area representing the Brazilian Coastal Current (BCC) (Souza and Robinson, 2004), the Brazilian Current (BC) (Stramma and Ikeda, 1990; Silveira et al., 2000), the fair-weather average wave directions, storm wave direction (Cecilio and Dillenburg, 2019), and mesophotic zone between 30 and 200m in light green color.

3. METHODS

The multi-sourced nature of the datasets and the massive amount of information used in this work (Figure 11) demanded a complex and integrative data processing effort. The Geographic Information System (GIS) ArcMap 10.8.1 (ESRI, 2021) geo-processed the bathymetric and sediment data. We also used Python to process the sub-bottom profiler (SBP) records (SEG-Y raw data). Details of data and processing methods will be described below.

3.1. Historical data reunion

The continental shelf relief with depths less than 200m was composed based on 694,431 depth points. The data is from sounding sheets and nautical charts from the Brazilian Navy National Oceanographic Databank

(BNDO) and the Brazilian Navy LEPLAC Program. Sedimentological data came from 9,761 historical data points, and 144 are from this research (Figure 2). 6,135 (63%) samples were laboratory analyzed from this data set, while 3,626 had only field descriptions. Carbonate content analysis includes 2,552 samples (26%).

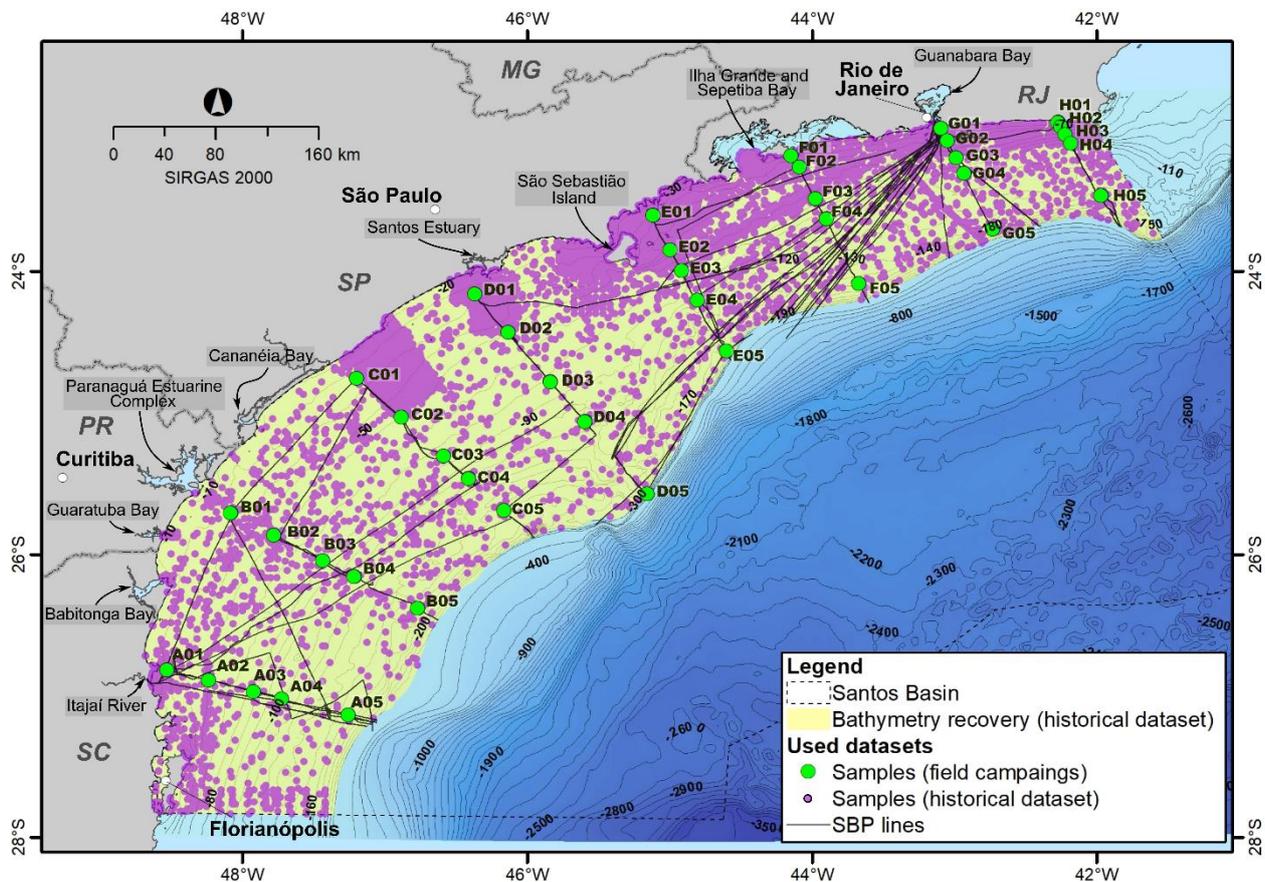


Figure 11. Historical and this research datasets. Shelf bathymetry resulted from 694,431 depth points processing, 12,542 historical seabed stations, 114 box-corer or van Veen samples, and 12,269 km record of sub-bottom profiler.

3.2. Field campaign and laboratory analysis

3.2.1. Field and laboratory efforts

During 2019 and 2020, several oceanographic cruises were organized by the Santos Basin Regional Characterization Project (SBRCP). The twelve cruise legs resulted in 114 box-corer or van Veen samples and 12,269 km of sub-bottom profiler records on the continental shelf (Figure 11). Sampling stations were aligned in eight transects (A to H) transversely to the isobath and at specific depths (25, 50, 75, and 150m). A fraction of 10cm³ was used for grain size and carbonate content analyses. Only stations inside or very close to the mesophotic zone (30 to 200m) were considered in this work.

The top first 2cm of sediment was dehydrated, sieved in 2 and 1mm sieve, weighted, and computed in grain-size calculation. Carbonates were not excluded from the grain-size analysis. In this research, we used the Malvern Mastersizer 2000 particle size analyzer to analyze particles < 1mm. Grain-size data were processed at Gradistat (Blott and Pye, 2001) with sediment statistical analysis according to Friedman and Sanders (1978). The CaCO₃ content resulted from the weight difference before and after 10% diluted Chloric Acid digestion.

3.2.2. Subbottom profiler data processing

The Knudsen Chirp 3260 sub-bottom profiler was coupled to the ship hull and acquired 3.5 and 12 kHz frequency data along the ship track. The Time-Variant Gain-TVG was used, and negative amplitudes were

corrected as proposed by Chu and Hufhagle (2006) and Taner et al. (1994), respectively. The lines have an approximate length of 10km each. We visually interpreted the SBP profiles using the line position in the GIS as a spatial reference.

3.3. Data integration and geoprocessing

The considered depth range of mesophotic region by Pyle and Copus (2019) is from 30m down to 150m. As a novelty, this paper extended the mesophotic depth to the shelf edge, which varies between 185m and the 200m isobath, as the deepest reference point. We used grain-size to define the percentual of gravel, sand, and mud accordingly to Shepard (1954) and carbonate content percentual accordingly to Larssonneur (1977) and Dias (1996).

The Inverse Distance Weight (IDW) interpolation operated the Digital Terrain Model (MDT) creation, with a 50m (bathymetry) and a 500m (sediment facies) cell sizing due to data density differences between these datasets. The GIS default values were other interpolation configurations (search radius and power). Also, GIS spatial analyst tools performed the geomorphometric analysis of bathymetric contours, slope and depth in bathymetric profiles of the MDT (Rigol-Sanchez et al., 2015).

The raster calculator tool from the GIS spatial analyst extracted the sediment facies polygons of gravel, sand and mud contents (values $\geq 50\%$ of each class), and bioclastic (CaCO_3 content $\geq 70\%$), bioliticlastic ($70\% > \text{CaCO}_3$ content $\geq 50\%$), litobioclastic ($50\% > \text{CaCO}_3$ content $\geq 30\%$) and litoclastic (CaCO_3 content $< 30\%$). The GIS select by location tool filtered the most relevant SBP lines by carbonate content (bioclastics) polygons locations.

4. RESULTS

The Santos Basin shelf mesophotic zone comprises mainly an entirely smoothed surface with a low slope angle and locally almost imperceptible height variations in some areas. The mesophotic shelf width is generally narrower in the north sector (79km), increasing in the middle (200km) and reducing toward the south (100km).

Sediments predominance changes between the sectors while the northern comprises mixed carbonatic (bioclastics) gravels and sands that gradually reduce carbonate content southward (Figure 12i). Sediment sorting indicates moderately well sorting to poorly sorting at shallow waters and very poorly sorted sediments at the deep mesophotic zone. A tongue of lithoclastic sediments crosses the shelf and interrupts the outer shelf carbonates toward the slope (Figure 3ii).

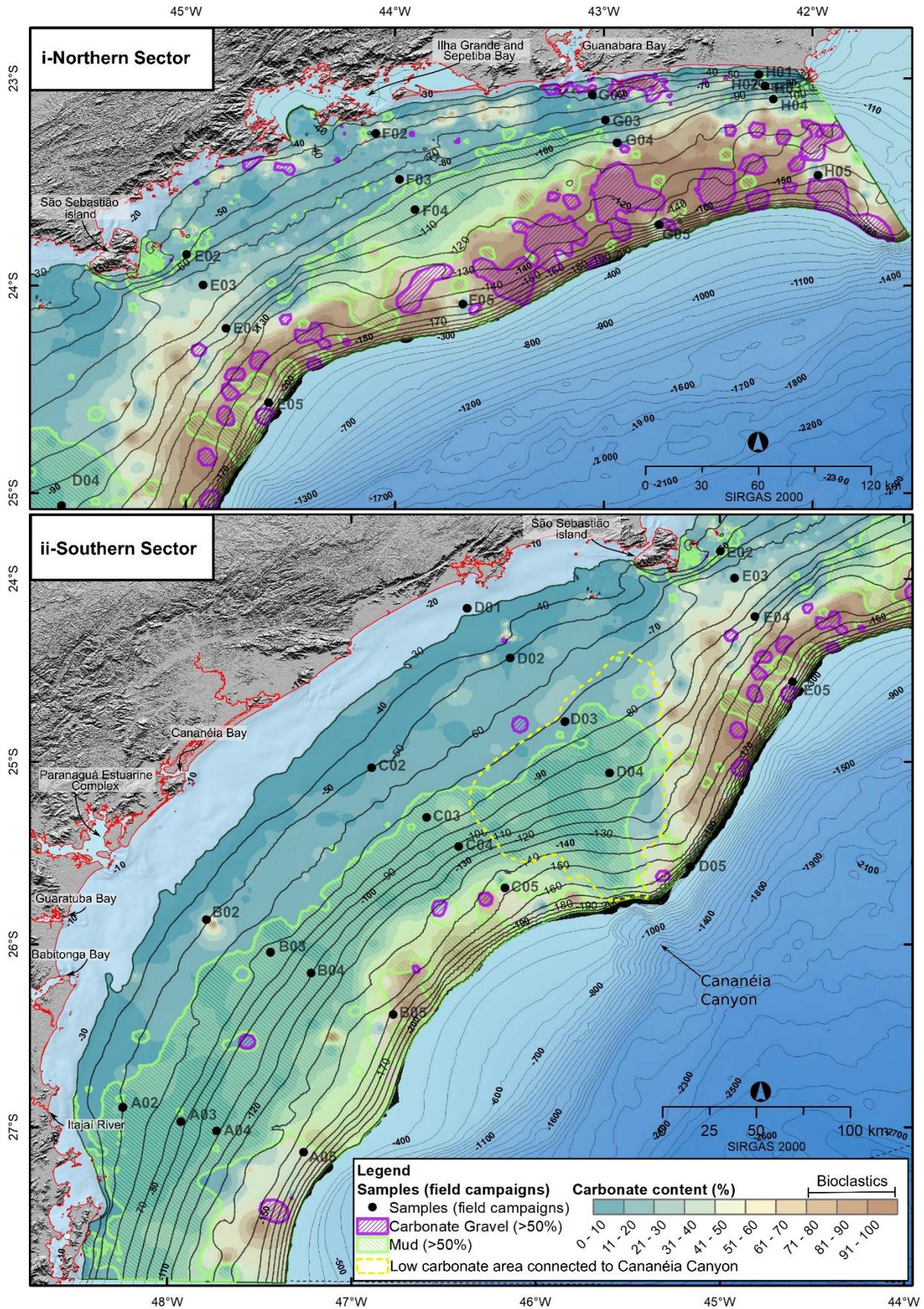


Figure 12. Carbonate distribution with gravelly areas at the continental shelf (i-northern sector and ii- southern sector). The bioclastic sediments ($\text{CaCO}_3 > 70\%$) are very poorly sorted, almost at the entire continental shelf.

Field campaigns revealed the occurrence of rhodoliths beds and coralline algal buildups structures at the outer shelf in the northern and central areas (Figure 4). These structures comprehended spaced free-living individuals, small or massive boxworks agglomerates (Figure 13, G05 and H05). Close to them, sediments are generally complied by bioclastic gravels and sands. Southern siliciclastic sediments had the presence of bioturbation and shells (Figure 13, stations A05, B05, and C05).

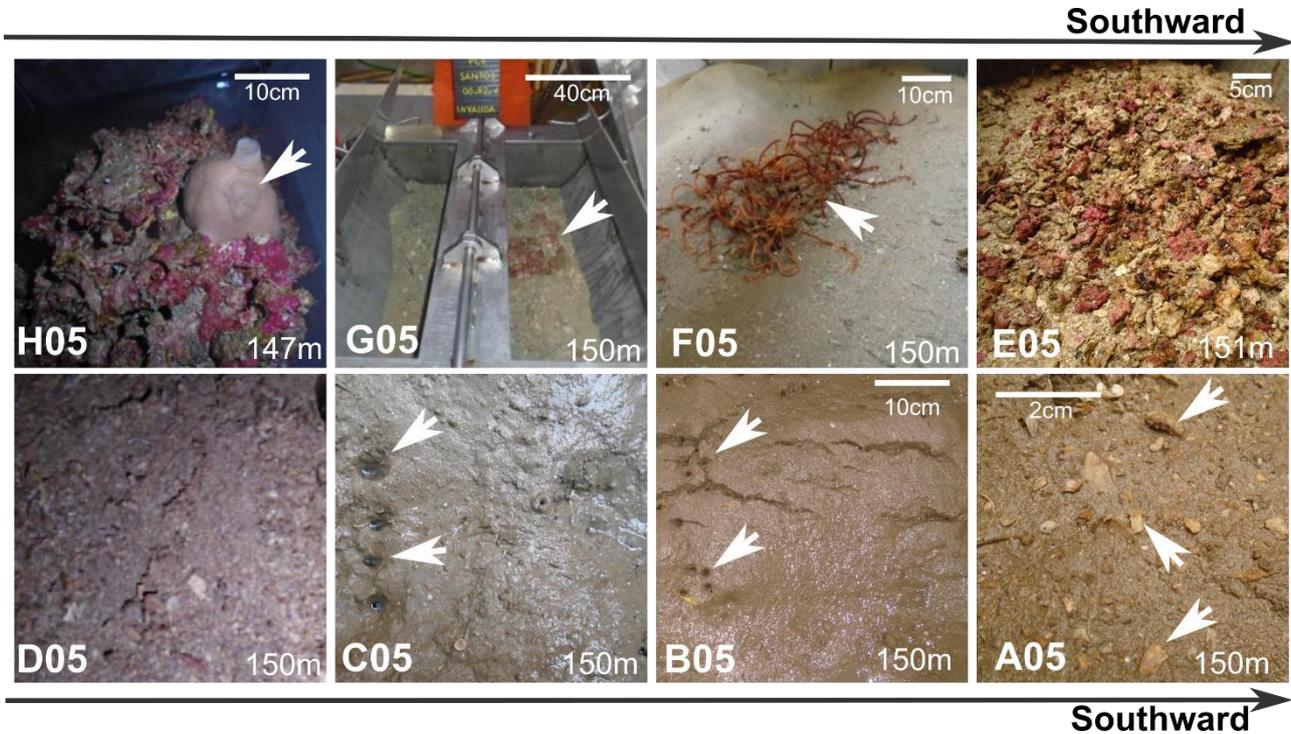


Figure 13. Latitudinal variation from North to South of surface sediment along the outer shelf at the 150m isobath. White arrows indicate shells (A05), polychaete tubes (B05 and C05), crinoids surrounded by bioclastics (F05), and calcareous algae boxworks buildup (G05) and sponge associated to a coralline algae boxwork (H05).

Seismic records of the 3.5 and 12 kHz SBP provided an overview of the mesophotic carbonatic structures. The morphology of the mesophotic bioconstruction is variable. It can be composed predominately by a reefal platform or shaped patches with isolated pinnacles, small elevations, mounds, and depressions (Figure 14). The acoustic signal does not penetrate the carbonate as it does in muddy or sandy sediments in transitional areas between bioclastic zones.

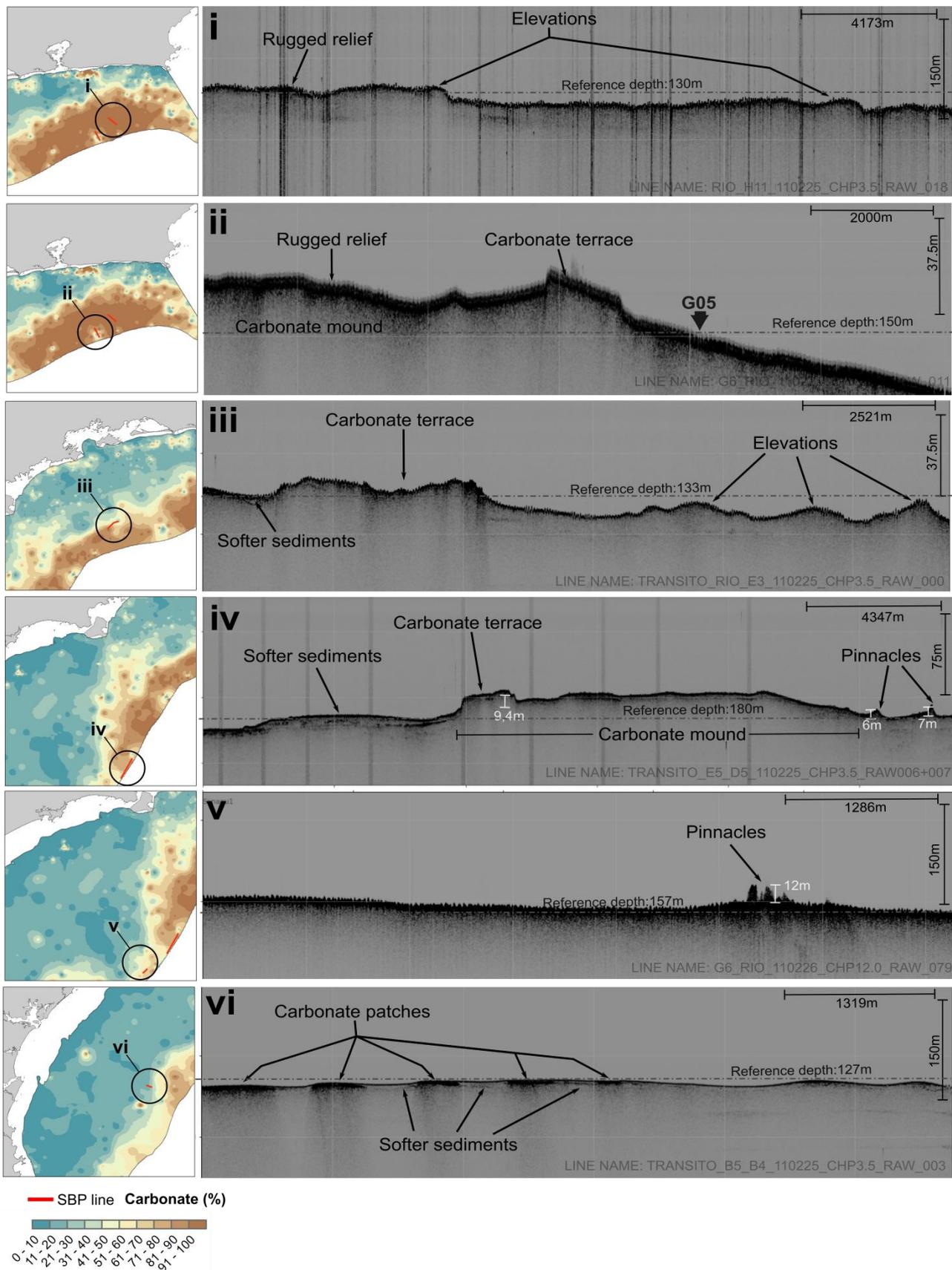


Figure 14. Variety of carbonate seabed morphologies from the SBP dataset. i- rugged carbonate surface with elevations, ii- carbonate platform with rugged surface and mounds (approximate #G05 station indication), iii- carbonate terraces associated with elevations, iv- carbonate terraces associated with a mound and bioclastics deposits, v- isolated pinnacles, and vi- isolated carbonate patches at facies transition areas.

5. DISCUSSION

The coralline algae are one of the major producers of bioclastics sediments on the Brazilian shelf (Dias, 2000). This pattern became quite evident in this research since the areas of bioclastic sediments have an excellent spatial relationship with the identified mesophotic bioconstructions. The carbonatic facies, mainly gravels, and sands, accumulate surrounding these bioconstructions. The exposed surfaces of rhodolite pebbles are the only portion covered by a living coating of algae, while on the underlying side, there are no living algae. (Figure 15i) (Basso, 1998).

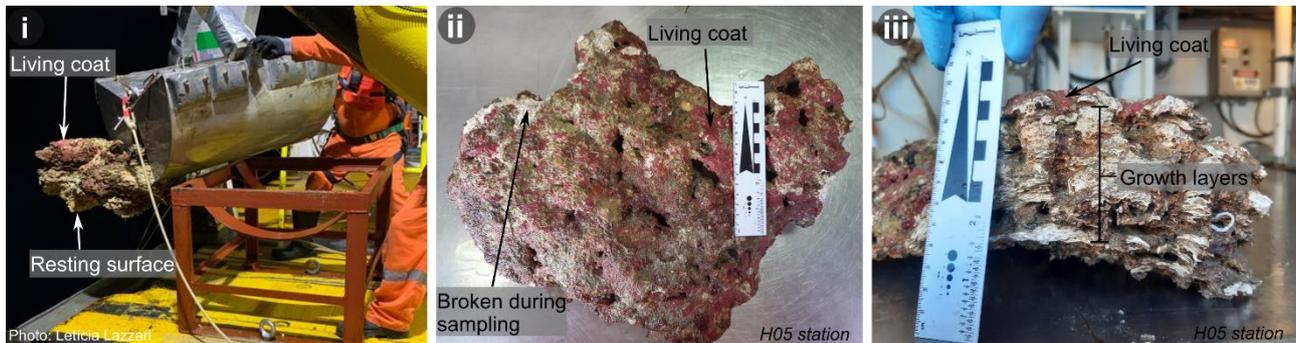


Figure 15. Examples of coralline algae buildups from the fieldwork efforts. i- massive boxwork showing its living coat and the dead resting surface, ii- overview of a boxwork from the H05 station, and iii- side cut of the same sample (H05) showing the growth layers and the surface living coat. Photo i was a courtesy from Leticia Lazzari, ii and iii from the author.

It was known that these kinds of bioconstructions would occupy only a shelf area between the Cabo Frio Island and the São Sebastião Island (Milliman, 1977; Dias et al., 2019). However, carbonate pinnacles and mounds in the SBP records, and coralline algae gravels at station F05, confirm the extension of bioconstructions further southward.

Based on rough bottom morphology, prominent carbonatic mounds, and massive calcareous algae boxworks, the northern sector is considered the primary region of these mesophotic reefal bioconstructions. These same characteristics of mesophotic reefs were also notice toward north in Campos Basin (Dias and Medeiros, 2005; Marangoni et al., 2013; Figueiredo Jr. et al., 2016; Curbelo-Fernandez et al., 2017) and Espirito Santo Basin (Bastos et al., 2015; Dias et al., 2019; Vieira et al., 2019; Oliveira et al., 2020).

The pinnacles, mounds, and rugged relief are frequent in the SBP records all over the northern sector outer shelf (Figure 16). Indeed, evidence of bioconstructions and coldwater corals reported by Cavalcanti et al. (2012), Reis et al. (2013b), and Barbosa et al. (2020) confirmed the veracity of the field observations. The use of morphological characteristics, sediment composition and bioconstruction, enable to better understand the lateral continuity and distribution of this habitat over the shelf.

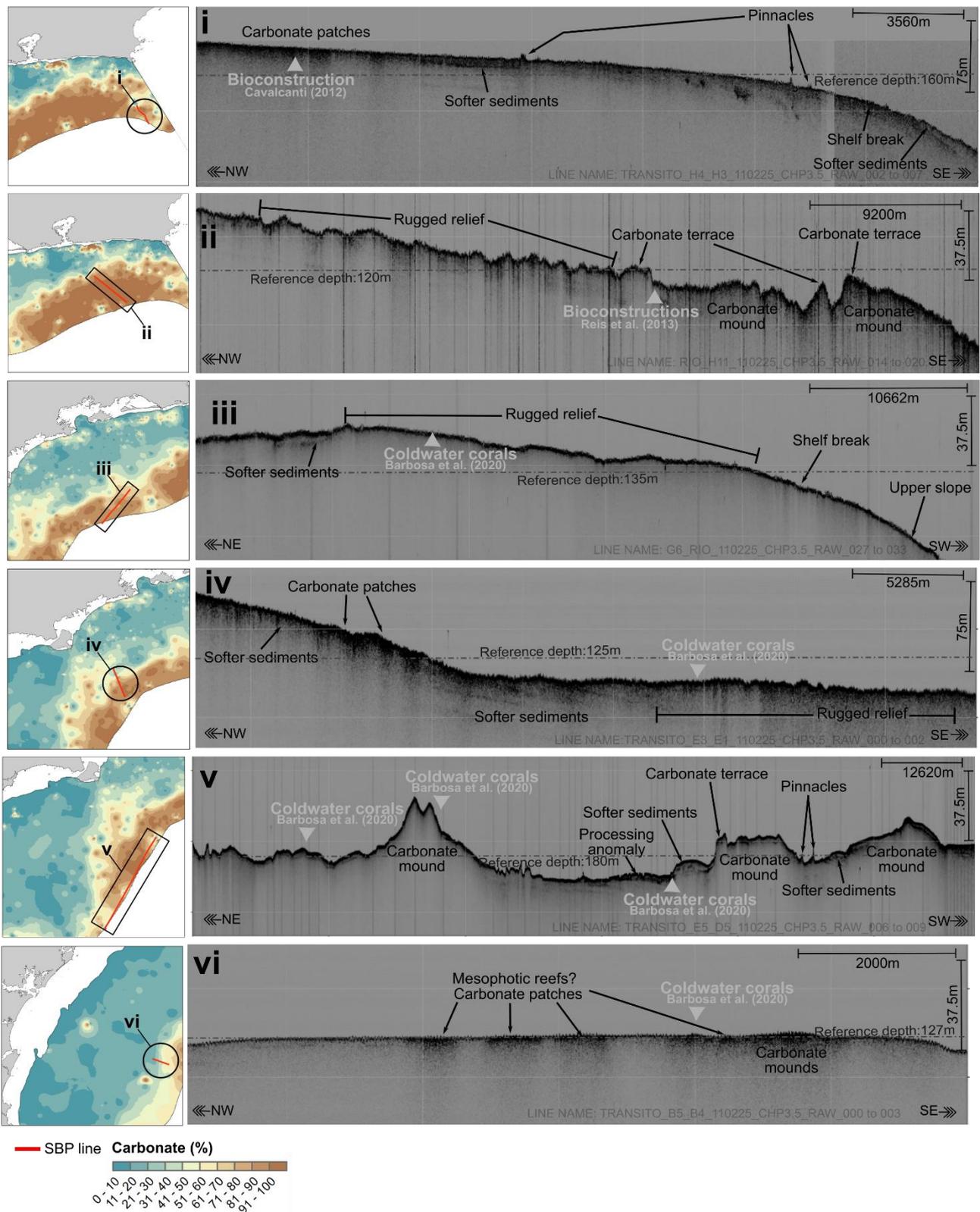


Figure 16. Regional SBP lines show the main configuration of the mesophotic bioconstructions over the Santos Basin. i and ii- Dip line across the carbonatic bioconstructions previously mapped at the northern sector. iii- Cross-line over the previously mapped carbonate facies (Dias et al., 2019) at the northern sector. iv- Dip line over the new confirmed mesophotic reefs identified. V- Strike line over the new area of mesophotic reefs. vi- Possible mesophotic reefs off Paraná and Santa Catarina states southern Cananéia Canyon head.

The northern sector presents a wide variety of types of carbonate bioconstructions, confirmed by geophysical and geological data and also with seabed images. Massive outer shelf bioconstructions at 184m and scattered

coralline algae boxworks at 148m compose examples of the reefs in this area (Figure 17i and ii). They consisted of a mixed and complex consolidated and unconsolidated sediment, with living encrusting coralline algae covering the rigid structures (Cavalcanti et al., 2012).

On the southern shelf carbonatic structures occurrence area are not yet well defined. However, based on a few historical data reported cold-water corals (Cavalcanti et al., 2019) and evidence from the SBP records, it was possible to delimit a possible new area of mesophotic reefs off the Paranaguá Estuarine Complex and Florianópolis, flanked by the outer shelf muds (Figure 17). However is important to highlight that ground-thuth investigations are still needed for confirmation.

The mud in the southern sector and the mesophotic bioconstructions seem to be temporally and spatially related. The mesophotic reefs over the Brazilian margin started to develop during the Holocene Marine Transgression at last 7 kyr BP (Brasileiro et al., 2018). During this period, the La Plata River plume reached the Santos Basin (green arrow in Figure 17) at 4.7kyr BP (Mahiques et al., 2004, 2010, 2020; Mathias et al., 2014). Reefs in this sector were buried by mud accumulation at an extraordinary rate of 134 mm kyr⁻¹ (Mahiques et al., 2004; Brasileiro et al., 2018).

Spatially, muddy facies occurs where bioclastics gravels and sands are not present. The smallest muddy patch in the northern sector is restricted to the middle shelf and doesn't cross over the bioclastic and bioconstruction zone. The origin of this muddy facies is related to the coastal input, resulted from an increase in climate humidity since 4.5kyr BP (Lazzari et al., 2019). Accordingly to Gyllencreutz et al. (2010) and Lazzari et al. (2019), this mud resulted from the outflow of coastal bays such as Guanabara and Sepetiba and Ilha Grande bays and rivers, as indicated by red arrows (Figure 8). The Cananéia Canyon seems to have an important role in separating the muddy and carbonate northern facies from the southern muddy and carbonate facies.

The southern muddy facies is clearly connected to the Cananeia Canyon head and slope feature, as indicated by the yellow arrow (Figure 17). Indeed, this canyon acted as a primary link between coastal drainage and the upper slope during the LGM (Zembruski, 1979) and a way for gravity flows and sediment transport from shallow to deep waters during Late Quaternary (Borisov et al., 2020) and even during the sea-level transgression period.

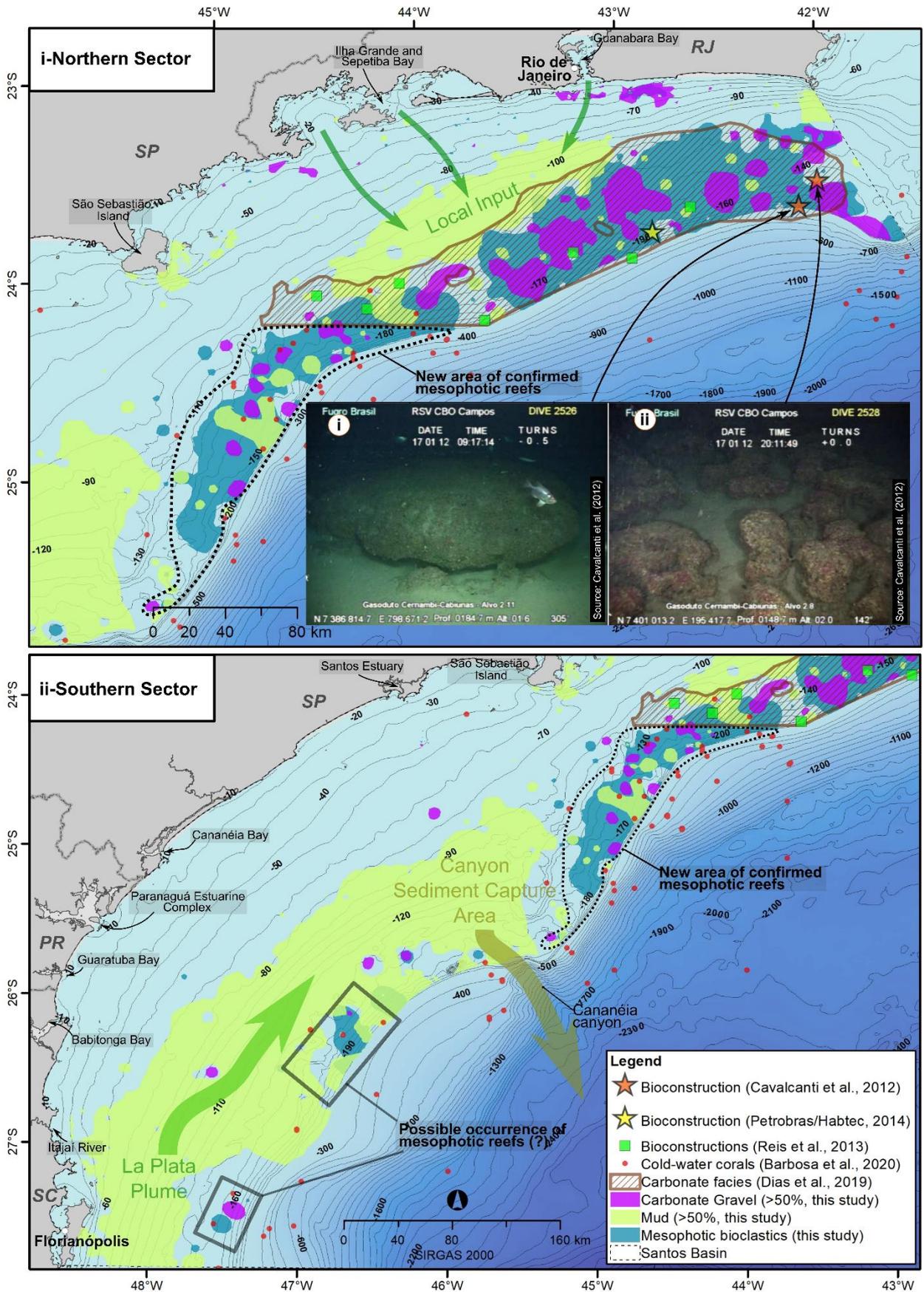


Figure 17. Integration map of primary carbonate facies occurrence, cold-water corals, and bioconstructions. In the northern (i), the green arrows indicate a possible local mud source for the mud area offshore Sepetiba Bay. Photo (i), a massive outer shelf

bioconstruction at 184m. Photo (ii) scattered coralline algae boxwork at 148m. Photo source: Cavalcanti et al. (2012). In the southern (ii) sector the green arrow indicates the La Plata mud input flow. The dark yellow arrow indicates the lithoclastic sediments capture area by the Cananéia Canyon head.

Based on these evidence and discussions, it was possible to establish a four-stage model for the evolution of mesophotic bioconstructions (Figure 18). The first stage corresponds to the fully exposed shelf at the LGM (20kyr BP). In the second stage, the partially drowned shelf was colonized by the first bioconstructions at the northern and southern sectors at 7kyr BP. As the sea level raised, the dead bioconstructions were colonized by layers of new encrusting organisms.

In the third stage, 4,7 kyr BP, the mesophotic reefs continued over the outer shelf. The La Plata plume started to feed the shelf with muddy sediments, gradually burying the southern mesophotic reefs. The northern reefs were spared from the muddy flux due to the Cananéia Canyon head capture of sediment toward the slope. Finally, the northern mesophotic reefs were fully established at the fourth evolutionary stage. Mud accumulation also started at 4.5 kyr BP in the inner and middle shelf from direct coastal terrigenous input. This mud did not reach the mesophotic reefs on the outer shelf. In the southern sector, small patches of mesophotic reefs occur surrounded between the extensive mud field and the upper slope.

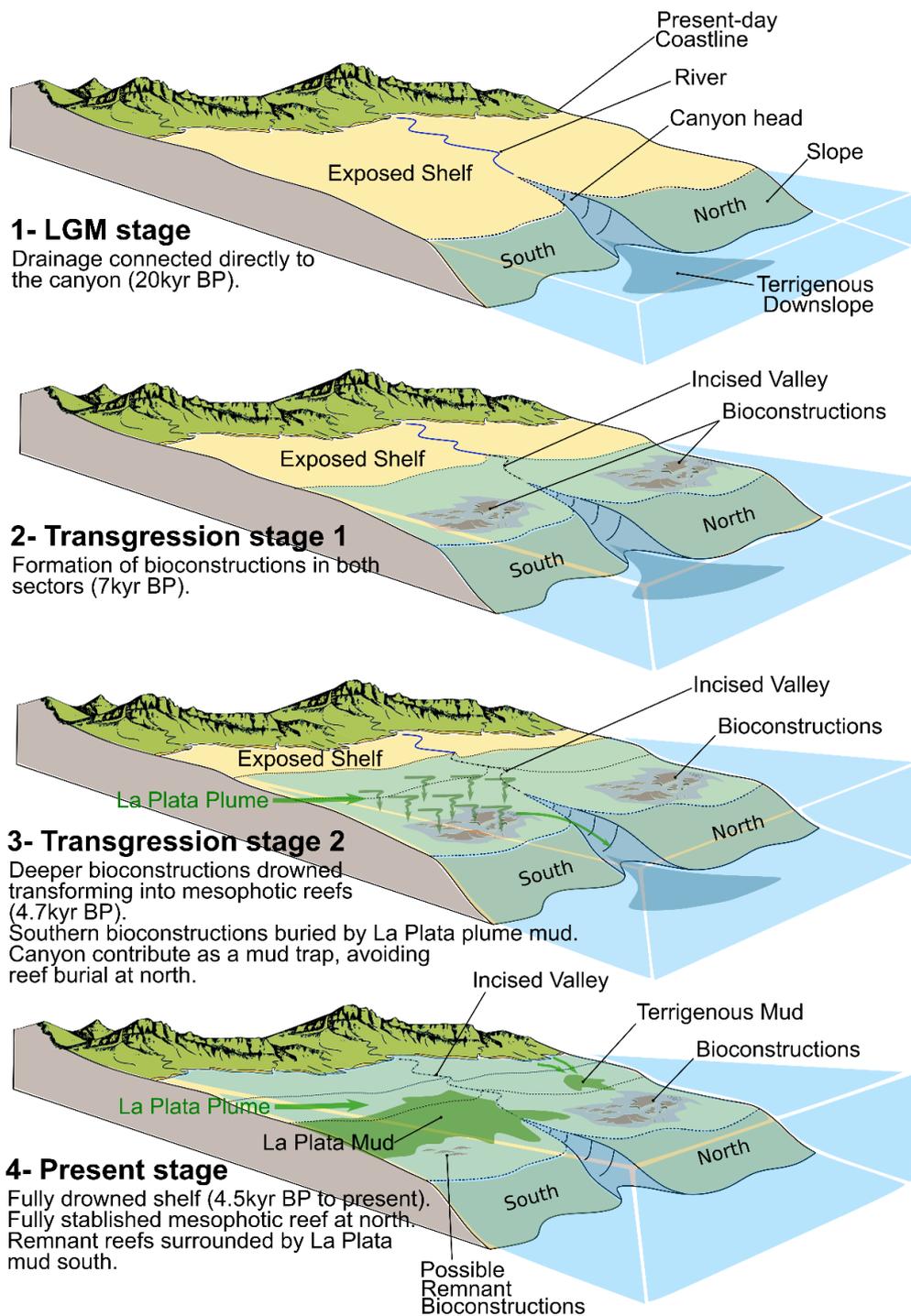


Figure 18. Four stage model for the mesophotic bioconstructions origin and evolution at the Santos Basin. 1- Stage that corresponds to the LGM fully exposed continental shelf. 2- Stage of the transgressive period, with the beginning of bioconstructions. 3- Second part of the transgressive evolution, with the beginning of La Plata River influencing the shelf. Southern reefs are buried due to mud accumulation. 4- Fully drowned shelf with the mesophotic reef established at the northern sector and the possible presence of remnant bioconstructions in the south.

6. CONCLUSIONS

This study presents the first integrated overview of mesophotic bioclastics areas in the Santos Basin continental shelf. These facies are mainly made of bioclastics derived from calcareous algae with CaCO_3 content over 70% and a minor contribution from mollusk shells. The fieldwork evidenced bioconstructions extended along the

outer shelf from Cabo Frio with an interruption close to the Cananéia Canyon head. Further South, the possible bioconstructions are less evident and are bordered by muddy facies on the middle and outer shelf.

These bioconstructions present a remarkable morphological diversity, including kilometric marine terraces to rough relief of just a few meters in height. Mounds, terraces, box-works, and uncovered pinnacles are the most common geomorphological features, surrounded by bioclastic gravels and sands. Rough relief in the bathymetric map and strong reflective seismic signal suggests that bioconstructions can occur further South than presented here, and does indicate that more research is needed.

The evolution of the mesophotic bioclastics and bioconstructions in the Santos Basin shelf can be divided into four stages directly related to sea-level transgression, the sediment derived from the La Plata plume, and the Cananéia Canyon acting as a capture zone, and the paleoclimatic conditions over the Late Quaternary. These transgressive reefs started to colonize during the gradually drowned of the shelf, and being transformed into a mesophotic environment with the sea-level rise. The present-day Bioclastic gravels and sands are excellent indicators of reefs occurrence over the outer shelf.

We hope that this study can subsidize Geohabitats cross-reference works with benthic and nektonic fauna datasets (e.g., commercial demersal fish species or cetaceans feeding areas) to understand the influence of the mesophotic bioconstructions on these organisms and improve marine resources management. Video and photo surveys by Remotely Operated Vehicles (ROV) or drop camera techniques can also provide non-destructive taxonomic and ecological approaches in this relevant mesophotic ecosystem.

7. ACKNOWLEDGEMENT

The authors are grateful to PETROBRAS Santos Project - Santos Basin Environmental Characterization (PCR-BS) for support field sampling, laboratory analysis, and financial through resources from RD&I investments of Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). We also thank the Brazilian Navy, who provided the historical bathymetric and sediment dataset. A special thank to the trainee undergraduate students Gabriela de Jesus Rocha, Leonardo Junius Chapeta Santos, Fernanda Scofano Pinheiro, Thais Guterres Soares, Jonathan de Souza Silva de Araujo, Stephanie Tavares Venâncio dos Santos and the master-degree students Natalia de Jesus Lopes Chaves and Amanda Bourguignon Cecilio for performing the grain-size analysis. A special thank to Dr. Letícia Lazzari (PUC-RJ) for the underwater pictures. We are grateful to the Marine Geology and Geophysics Laboratory (LAGEMAR-UFF) and the Ocean and Earth Dynamics Graduate Program (DOT-UFF) for providing laboratories time for data analysis.

8. BIBLIOGRAPHY

- Artusi, L., and Figueiredo Jr., A. G. (2007). Sismoestratigrafia rasa da plataforma continental de cabo frio – araruama – rj. *Rev. Bras. Geofísica* 25, 7–16. doi:10.1590/S0102-261X2007000500002.
- Baker, E. K., Puglise, K. A., and Harris, P. T. (2016). *Mesophotic coral ecosystems. A lifeboat for coral reefs?*.
- Barbosa, R. V., Davies, A. J., and Sumida, P. Y. G. (2020). Habitat suitability and environmental niche comparison of cold-water coral species along the Brazilian continental margin. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 155, 103147. doi:10.1016/j.dsr.2019.103147.
- Basso, D. (1998). Deep rhodolith distribution in the Pontian Islands Italy: a model for the paleoecology of a temperate sea. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 137, 173–187. Available at: file:///d:/climate change-Converted.Data/climate change-Converted.Data/PDFbasso_1998-2753696513/basso_1998.pdf.
- Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Marangoni, M. B., D’Agostini, D. P., Bourguignon, S. N., Cetto, P. H., et al. (2015). Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic-

- carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *J. South Am. Earth Sci.* 63, 125–136. doi:10.1016/j.jsames.2015.07.003.
- Blott, S. J., and Pye, K. (2001). Gradistat: A grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. *Earth Surf. Process. Landforms* 26, 1237–1248. doi:10.1002/esp.261.
- Borisov, D., Frey, D., and Levchenko, O. (2020). Sediment waves on the Santa Catarina Plateau (western South Atlantic). *J. South Am. Earth Sci.* 102, 102698. doi:10.1016/j.jsames.2020.102698.
- Brasileiro, P. S., Braga, J. C., Amado-Filho, G. M., Leal, R. N., Bassi, D., Franco, T., et al. (2018). Burial rate determines holocene rhodolith development on the Brazilian shelf. *Palaios* 33, 464–477. doi:10.2110/palo.2017.109.
- Carrière, O., Hermand, J. P., Calado, L., De Paula, A. C., and Da Silveira, I. C. A. (2009). Feature-oriented acoustic tomography: Upwelling at Cabo Frio (Brazil). *MTS/IEEE Biloxi - Mar. Technol. Our Futur. Glob. Local Challenges, Ocean. 2009*. doi:10.23919/oceans.2009.5422337.
- Castelao, R. M., and Barth, J. A. (2006). Upwelling around Cabo Frio, Brazil: The importance of wind stress curl. *Geophys. Res. Lett.* 33, 2–5. doi:10.1029/2005GL025182.
- Cavalcanti, G. H., Carolina, R., Arantes, M., and Loiola, L. L. (2012). Caracterização ambiental das formações carbonáticas na rota do gasoduto Cernambi-Cabiúnas. Rio de Janeiro Available at: [http://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao - Bacia de Santos - Gasoduto Rota 2 \(Rota Cabiunas\) - Petrorbas/](http://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao - Bacia de Santos - Gasoduto Rota 2 (Rota Cabiunas) - Petrorbas/).
- Cecilio, R. O., and Dillenburg, S. R. (2019). An ocean wind-wave climatology for the Southern Brazilian Shelf. Part II: Variability in space and time. *Dyn. Atmos. Ocean.* 88, 101103. doi:10.1016/j.dynatmoce.2019.101103.
- Chu, D., and Hufhagle, L. C. (2006). Time varying gain (TVG) measurements of a multibeam echo sounder for applications to quantitative acoustics. *Ocean. 2006*. doi:10.1109/OCEANS.2006.306818.
- Conti, L. A., and Furtado, V. V. (2009). Topographic registers of paleo-valleys on the southeastern Brazilian continental shelf. *Brazilian J. Oceanogr.* 57, 113–121. doi:10.1590/s1679-87592009000200004.
- Cordeiro, R. T., Neves, B. M., Kitahara, M. V., Arantes, R. C., and Perez, C. D. (2020). First assessment on Southwestern Atlantic equatorial deep-sea coral communities. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.*, 103344. doi:10.1016/j.dsr.2020.103344.
- Curbelo-Fernandez, M. P., Della Giustina, I. D., Loiola, L. de L., Arantes, R. C. M., de Moura, R. B., Barboza, C. A. de M., et al. (2017). *Biota de fundos carbonáticos da plataforma continental da Bacia de Campos: algas calcárias e fauna associada*. 1st ed. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-85-352-7295-6.50002-6.
- Dias, G. T. M. (1996). Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas. in *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia Vol. 3*.
- Dias, G. T. M. (2000). Granulados bioclásticos-algas calcárias. *Rev. Bras. Geofis.* 18, 307–318. doi:10.1590/s0102-261x2000000300008.
- Dias, G. T. M., and Medeiros, M. F. (2005). Proposta de metodologia para a elaboração de cartas sedimentológicas. in *Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*.
- Dias, M. P., Bastos, A. C., and Vital, H. (2019). Plataforma Continental Brasileira. *Programa Geol. e Geofísica Mar.*, 185.
- ESRI (2021). ArcMap 10.8.1 mapping and analysis platform. Available at: <https://www.esri.com/pt-br/arcgis/about-arcgis/overview>.
- Figueiredo Jr., A. G., Pacheco, C. E. P., de Vasconcelos, S. C., and da Silva, F. T. (2016). *Continental Shelf Geomorphology and Sedimentology*. 1st ed. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-85-352-8444-7.50009-3.

- Figueiredo Jr., A. G., and Tessler, M. (2004). *Topografia e composição do substrato marinho da região Sudeste-Sul do Brasil - Série documentos Revizee: Score Sul*.
- Friedman, G. M., and Sanders, J. E. (1978). *Principles of Sedimentology*. 4th ed. Wiley.
- Furtado, L. A., and Conti, V. V. (2006). Geomorfologia da Plataforma Continental do Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Geociências* 36, 8.
- Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., et al. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst. Serv.* 1, 50–61. doi:10.1016/j.ecoser.2012.07.005.
- Habtec-Mott MacDonald, and Petrobras (2014). Estudo de Impacto Ambiental - Gasoduto ROTA 3. Rio de Janeiro.
- Hinderstein, L. M., Marr, J. C. A., Martinez, F. A., Dowgiallo, M. J., Puglise, K. A., Pyle, R. L., et al. (2010). Theme section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management.” *Coral Reefs* 29, 247–251. doi:10.1007/s00338-010-0614-5.
- Kitahara, M. V., Horn Filho, N. O., and De Abreu, J. G. N. (2008). Utilização de registros de corais de profundidade (Cnidaria, Scleractinia) para prever a localização e mapear tipos de substratos na plataforma e talude continental do sul do Brasil. *Pap. Avulsos Zool.* 48, 11–18. doi:10.1590/S0031-10492008000200001.
- Larsonneur, C. (1977). La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. *J. Rech. Ocean.* 2, 34–39.
- Lazzari, L., Wagener, A. L. R., Carreira, R. S., Godoy, J. M. O., Carrasco, G., Lott, C. T., et al. (2019). Climate variability and sea level change during the Holocene: Insights from an inorganic multi-proxy approach in the SE Brazilian continental shelf. *Quat. Int.* 508, 125–141. doi:10.1016/j.quaint.2018.11.011.
- Lesser, M. P., Slattery, M., and Leichter, J. J. (2009). Ecology of mesophotic coral reefs. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 375, 1–8. doi:10.1016/j.jembe.2009.05.009.
- Mahiques, M. M., de Mello e Sousa, S. H., Furtado, V. V., Tessler, M. G., de Lima Toledo, F. A., Burone, L., et al. (2010). The Southern Brazilian shelf: General characteristics, quaternary evolution and sediment distribution. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 25–34. doi:10.1590/s1679-87592010000600004.
- Mahiques, M. M., Figueira, R. C. L., Sousa, S. H. de M., Santos, R. F. dos, Ferreira, P. A. de L., Kim, B. S. M., et al. (2020). Sedimentation on the southern Brazilian shelf mud depocenters: Insights on potential source areas. *J. South Am. Earth Sci.* 100, 102577. doi:10.1016/j.jsames.2020.102577.
- Mahiques, M. M., Tessler, M. G., Maria Ciotti, A., Da Silveira, I. C. A., E Sousa, S. H. D. M., Figueira, R. C. L., et al. (2004). Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil. *Cont. Shelf Res.* 24, 1685–1697. doi:10.1016/j.csr.2004.05.013.
- Maia, R. M. da C., Reis, A. T. dos, Alves, E. da C., Silva, C. G., Guerra, J. V., Gorini, C., et al. (2010). Architecture and Stratigraphic Framework of Shelf Sedimentary systems off Rio de Janeiro state, northern Santos Basin-Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 15–29.
- Marangoni, M. B., Dos Reis, A. T., Silva, C. G., Da Costa Maia, R. M., Rabineau, M., Guerra, J. V., et al. (2013). Arcabouço estratigráfico e ciclicidade deposicional dos sistemas sedimentares do Pleistoceno Médio-Holoceno da plataforma sul da Bacia de Campos, Brasil. *Brazilian J. Geol.* 43, 285–300. doi:10.5327/Z2317-48892013000200007.
- Martins, L. R., and Coutinho, P. N. (1981). The Brazilian continental margin. *Earth Sci. Rev.* 17, 87–107. doi:10.1016/0012-8252(81)90007-6.
- Mathias, G. L., Nagai, R. H., Trindade, R. I. F., and Mahiques, M. M. (2014). Magnetic fingerprint of the late Holocene inception of the Río de la Plata plume onto the southeast Brazilian shelf. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 415, 183–196. doi:10.1016/j.palaeo.2014.03.034.

- Milliman, J. D. (1977). Role of Calcareous Algae in Atlantic Continental Margin Sedimentation. *Foss. Algae*, 232–247. doi:10.1007/978-3-642-66516-5_26.
- Nagai, R. H., Ferreira, P. A. L., Mulkherjee, S., Martins, M. V., Figueira, R. C. L., Sousa, S. H. M., et al. (2014). Hydrodynamic controls on the distribution of surface sediments from the southeast South American continental shelf between 23°S and 38°S. *Cont. Shelf Res.* 89, 51–60. doi:10.1016/j.csr.2013.09.016.
- Oliveira, N., Bastos, A. C., Silva Quaresma, V., and Vieira, F. V. (2020). The use of Benthic Terrain Modeler (BTM) in the characterization of continental shelf habitats. *Geo-Marine Lett.* 40, 1087–1097. doi:10.1007/s00367-020-00642-y.
- Pyle, R. L., and Copus, J. M. (2019). Mesophotic Coral Ecosystems: Introduction and Overview. 3–27. doi:10.1007/978-3-319-92735-0_1.
- Reis, A. T., Maia, R. M. C., Silva, C. G., Rabineau, M., Guerra, J. V., Gorini, C., et al. (2013). Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. *Geomorphology* 203, 25–45. doi:10.1016/j.geomorph.2013.04.037.
- Rigol-Sanchez, J. P., Stuart, N., and Pulido-Bosch, A. (2015). ArcGeomorphometry: A toolbox for geomorphometric characterisation of DEMs in the ArcGIS environment. *Comput. Geosci.* 85, 155–163. doi:10.1016/j.cageo.2015.09.020.
- Riva, V. C. D. (2015). Paleodrainage mapping of the São Paulo southern continental shelf on the Santos basin. in *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held* (Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica), 420–423. doi:10.1190/sbgf2015-083.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature Based on Sand-silt-clay Ratios. *SEPM J. Sediment. Res.* doi:10.1306/d4269774-2b26-11d7-8648000102c1865d.
- Silva, R. C. de O. e, and Dias, G. T. de M. (2020). Submerged Pleistocene spodic horizon remnant exposed on the inner continental shelf off Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Geo-Marine Lett.* 40, 925–933. doi:10.1007/s00367-019-00622-x.
- Silveira, I. C. A. da, Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. de, and Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian J. Oceanogr.* 48, 171–183. doi:10.1590/S1679-87592000000200008.
- Souza, R. B., and Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Cont. Shelf Res.* 24, 241–262. doi:10.1016/j.csr.2003.10.001.
- Stramma, L., and Ikeda, Y. (1990). Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20 ° S. 37, 1875–1886.
- Taner, M. T., Schuelke, J. S., O’Doherty, R., and Baysal, E. (1994). Seismic attributes revisited. *SEG Tech. Progr. Expand. Abstr.*, 1104–1106. doi:10.1190/1.1822709.
- Urbina-Barreto, I., Chiroleu, F., Pinel, R., Fréchon, L., Mahamadaly, V., Elise, S., et al. (2021). Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscales. *Ecol. Indic.* 121. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107151.
- Vieira, F. V., Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Leite, M. D., Costa, A., Oliveira, K. S. S., et al. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Cont. Shelf Res.* 187, 103964. doi:10.1016/j.csr.2019.103964.
- Zembruski, S. G. (1979). Geomorfologia da Margem Continental Sul Brasileira e das Bacias Oceânicas Adjacentes. *Ser. Proj. REMAC*, 1–46.

5.3. *Continental shelf incised valleys as a key to understand sea-level oscillation during Quaternary in Santos Basin, Brazil.* Submetido para a revista *Marine Geology* (ISSN: 0025-3227, Nível CAPES A2 - Geociências).

Continental shelf incised valleys as a key to understand sea-level oscillation during Quaternary in Santos Basin, Brazil.

João Regis dos Santos Filho; Alberto Garcia de Figueiredo Jr.; Juliane Castro Carneiro; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Allan Soares Ramalho; Cizia Mara Hercos

ABSTRACT

The incised valleys can be essential for understanding shelf evolution. Various incised valleys resisted the transgression erosion and are observed directly at the bathymetric data of the Santos Basin. Extensive high-resolution sub bottom profiler (SBP) surveys and a massive historical bathymetric data assemblage provided new pieces of evidence of paleo-drainage systems over the Santos Basin continental shelf. A semi-automatic drainage extraction from the bathymetric surface using Geographic Information System (GIS) tools guided the prominent incised valleys identification, confirmed by geophysics. In total, 91 incised valleys cross the Santos Basin shelf, ranging from 250m to 148km, with decametric scale depths, a few kilometers in width and three primary stream order classes. The results suggest that the paleo drainage extends from some existing estuarine and riverine systems to continental slope canyons. Three phases explain the incised valley evolution at the last 130kyrs. The first (phase A) represents the construction and destruction of incised valleys by high frequency sea-level oscillations at MIS 5; the second (phase B, subphases B₁ and B₂) consists in the construction of the mapped incised valleys during a forced regression at MIS 4 and MIS 3. The last (phase C) corresponds to the fully established valleys and the link to upper slope canyons. The fast marine transgression at MIS 2 did not homogeneously or entirely erode the incised valleys. Additionally, this work highlights important implications for the present-day depositional and geomorphological shelf setting and contributes to better understand the marine landscape evolution facing the sea level oscillations worldwide.

KEY-WORDS

Incised valley, Santos Basin, sea level oscillations, Quaternary, incised valley morphology

1. INTRODUCTION

The continental shelf incised valleys can be essential for understanding coastal evolution. However, these features can be difficult to map because of their erosion and flooding during sea-level high stand conditions (Burger et al., 2001). The Quaternary sea-level oscillations, the drainage basin size, the climate changes and shelf-break depths were essential for determination of shelf incised valleys geometry (Wang et al., 2019). Indeed, the incised valley is formed at the inclined exposed shelf, digging and channelizing the surface until the newly established lower base level (Posamentier and Vail, 1988; Allen and Posamentier, 1993).

The marine scientists usually estimate the chronology of global paleoclimate events and sea-level curves by the Marine Isotope Stages (MIS), using the oxygen isotopes in planktonic organism's carbonate carapaces, in order to appraise glacio-eustatic variations by interstadial (warmer) and stadial (colder) stages (Williams, 2017). These calibrated curves allow the correlation between sea-level stages and the morphological features (as the case of the incised valleys) over the continental shelves worldwide (Rabineau et al., 2006, 2007; Harris et al., 2013; Gelder et al., 2020).

Various incised valleys are directly printed over the bathymetric mapping (Swift et al., 1980; Ngueutchoua and Giresse, 2010; Harris et al., 2013, 2014; Schwab et al., 2017; Eamer et al., 2021). These features are relatively usual in Brazil (Abreu and Calliari, 2005; Artusi and Figueiredo Jr., 2007; Conti and Furtado, 2009;

Weschenfelder et al., 2010; Dominguez et al., 2013; Figueiredo Jr. et al., 2016; Santos-Fischer et al., 2016; Silva et al., 2016; Oliveira et al., 2020) and described on the entire margin but poorly explored in shelf evolutionary models.

Furthermore, not many publications calibrated the MIS stages for the Santos Basin margin (Almeida et al., 2015; Toledo et al., 2016; Camillo et al., 2020; Ferreira et al., 2021), or correlates its shelf relict morphology to global Quaternary sea-level oscillation stages (Reis et al., 2013; Silva and Dias, 2020). Even the publications that found shelf incised valleys at the basin does not directly correlates them the sea-level curves (Furtado et al., 1996; Furtado and Conti, 2006; Artusi and Figueiredo Jr., 2007; Conti and Furtado, 2009; Friederichs et al., 2013; Reis et al., 2013; Riva, 2015). Also, until now, there is no publication that include the entire Santos Basin continental shelf because of its enormous size and the lack of good quality regional data.

Based on an unprecedented historical data gathering and an extensive field campaign, it was possible collect data in order to map the shelf incised valley and relate them to Quaternary sea-level oscillations, to present-day drainage basins and connect to geomorphological features at the continental slope. The dataset is part of the Santos Project - Santos Basin Environmental Characterization (PCR-BS), coordinated by PETROBRAS.

This work aims to use this geophysical and geomorphological approach to regionally cover the entire shelf of one of the most important sedimentary basins at the Brazilian Margin, contributing to better understand the marine landscape evolution. Additionally, we suggest a new approach for incised valley evaluation, transforming them into geomorphological evidence for comparison with the global Quaternary Sea level curves.

2. STUDY AREA

The continental shelf of Santos Basin is limited at north by Cabo Frio Hight and toward south by the Florianópolis Hight and eastward by the 200m isobath (Figure 19). Maximum shelf width is 230km in the southern and minimum width is 70km in the northern areas. The coastline is 2,730km long and has nine major rivers, bays, estuaries connected to eleven drainage basins. The total area of Santos Basin continental shelf comprises 134,449 km². Coastal currents (CC) (Souza and Robinson, 2004) and wind-driven waves highly influence the basin's inner shelf. The geostrophic Brazil Current (BC) dominates the outer shelf (Stramma and Ikeda, 1990; Silveira et al., 2000), and also storm-driven waves (S-SE) (Cecilio and Dillenburg, 2019).

Sandy sediments predominates at the inner shelf, while muds in the southern outer shelf and carbonate in the northern outer shelf (Kowsmann and Costa, 1979; Figueiredo Jr. and Tessler, 2004; Dias et al., 2019). The inner shelf morphology comprises wave-influenced features such as shelf prism, sand ridges, shoals and deltas at the estuarine and river mouths (Zembruski, 1979; Artusi and Figueiredo Jr., 2007; Lamour et al., 2007; Maia et al., 2010; Reis et al., 2013; Sielski et al., 2017; Ambrosio et al., 2020).

Quaternary sea-level variations strongly influenced the Santos Basin shelf morphology (Reis et al., 2013; Cooper et al., 2017; Silva and Dias, 2020). The middle and the outer shelves are dominated mainly by relict features (Correa et al., 1980; Muehe and Carvalho, 1993; Figueiredo Jr. and Tessler, 2004; Reis et al., 2013) and biogenic structures as rigid-bottom patches of coralline algae and rhodoliths (Dias et al., 2019). In general, the shelf morphology is smooth with very low declivities (0,04°) southern of the São Sebastião Island (SSI) and slightly higher northward off Sepetiba Bay (0,07°) (Reis et al., 2013; Dias et al., 2019).

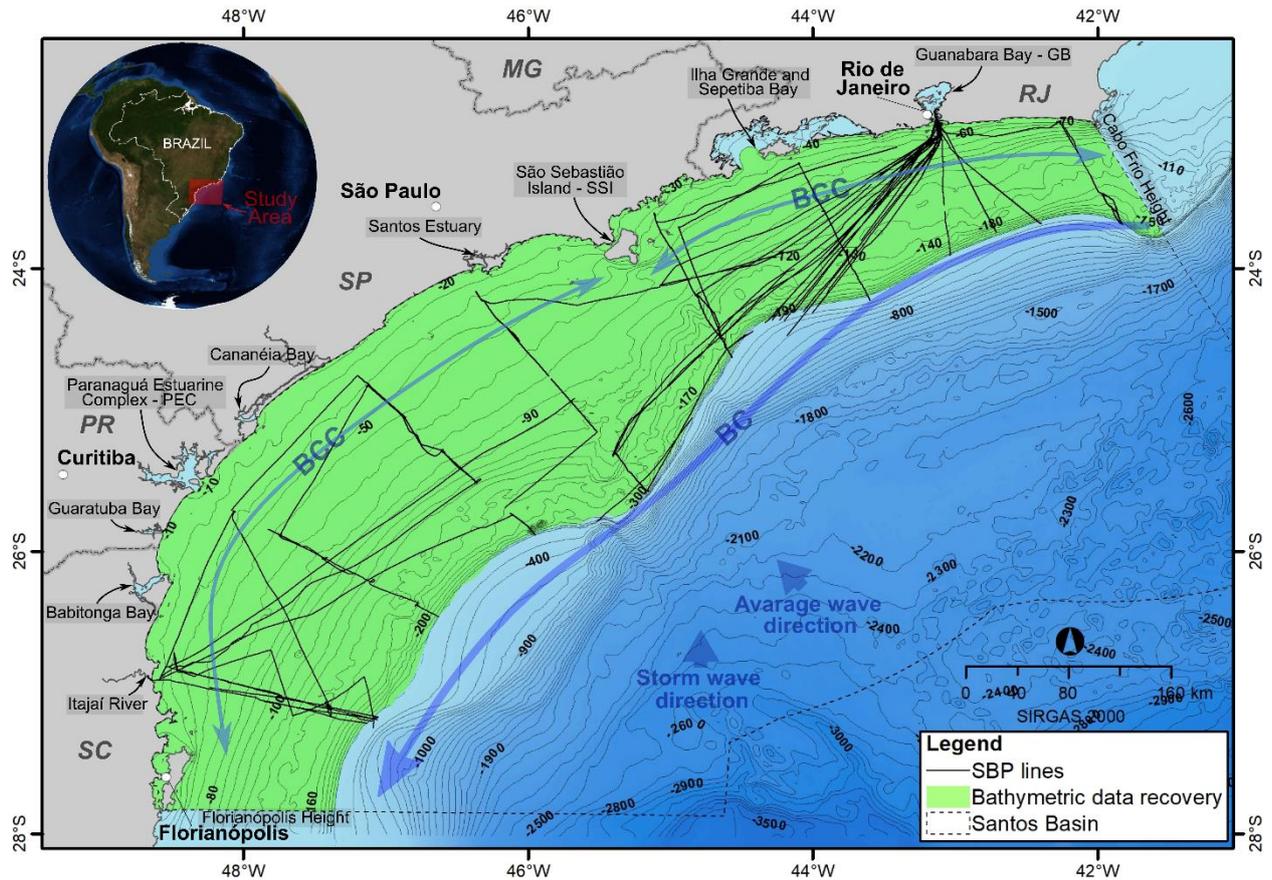


Figure 19. Study area with indication of main oceanographic processes and geophysical datasets. BC-Brazil Current and BCC-Brazil Coastal Current.

3. METHODS

The bathymetric data is derived from single beam sounding sheets mosaic of the Brazilian Navy, nautical charts and depth data from the Brazilian Continental Shelf Survey Plan (BCSSP) (Figure 19). In total, the bathymetric dataset assembled 962.3385 depths points. The Inverse Distance Weighted (IDW) method was used to grid the bathymetric surface using a 50m cell size. Outliers were manually removed before generating the final Digital Terrain Model (DTM).

The sub bottom profiler (SBP) used was a Knudsen Chirp 3260 (3.5kHz frequency) coupled to the ship's hull. A total of 12,269km was acquired in the continental shelf and is used in this paper (Fig. 1). Navigation coordinates was extract at each shot point and the sequential SBP line was assembled into shapefiles, making the spatialization possible. The raw data got their Time-Variant Gain-TVG and negative amplitudes corrected accordingly to Taner et al. (1994) and Chu and Hufhagle (2006).

The Hydrology tool from the GIS Spatial Analyst was used in semi-automated condition to map the drainage system based on DTM (Figure 20). The flow of water in a hypothetical subaerial condition was used at the terrain surface (Esri, 2019) according to the D8 algorithm (O'Callaghan and Mark, 1989; Ramesh et al., 2015). In total, six steps and tools of processing was used (Esri, 2019):

- i) Fill tool – creates a new bathymetric surface with sinks filled, avoiding surface imperfections.
- ii) Flow Direction tool - identifies the downslope directions based on the neighborhood surface cells.
- iii) Flow Accumulation tool - creates a surface of accumulation weight based on nearest cells flow direction.

- iv) Conditional tool and the "Con" expression - a syntax to determine the value range of the raster cells to be considered on final drainage delimitation.
- v) Stream Order tool - order of the drainage segments according to (Strahler, 1957; Tarboton et al., 1991), and.
- vi) Stream to Feature tool - convert the raster drainage network to a line vector shapefile.

The scientific bibliography has no shared values about the conditional values (stream threshold) at step iv for the continental shelf environment. GIS users generally consider flow accumulation surface values greater than 1% of the maximum value (Ozulu and Gökgöz, 2018) or test several values to fit the relief best (Ramesh et al., 2015; Ozulu and Gökgöz, 2018).

As the continental shelf usually has a smoothed relief forms that could affect the stream threshold efficiency, only true incised valleys identified in the geophysical data or in previous works was considered (Furtado and Conti, 2006; Conti and Furtado, 2009; Riva, 2015). The best-fit stream threshold value considered was >45,000 (1.5% of the flow accumulation surface) based on extensive testing and comparison.

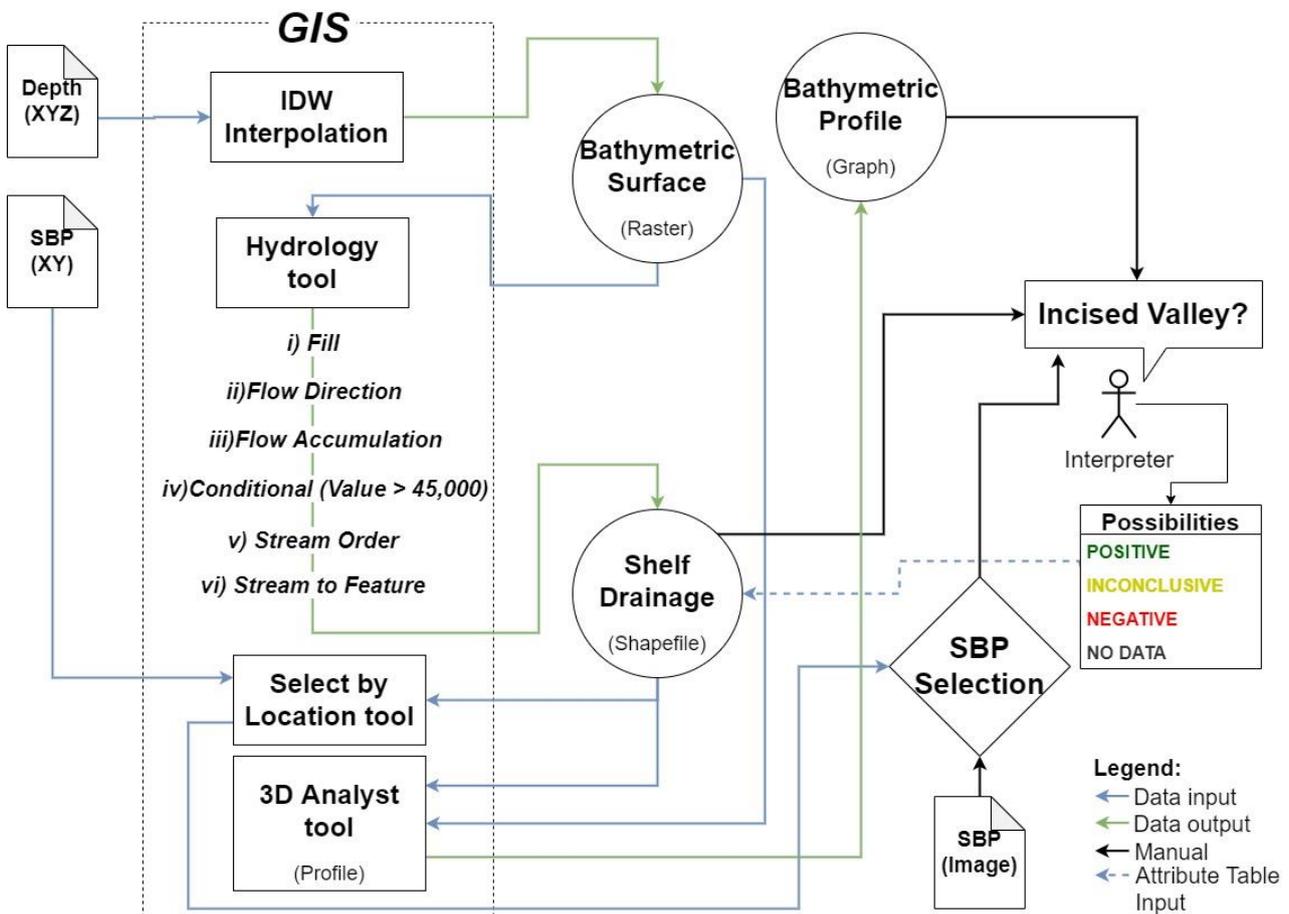


Figure 20. Methodology flowchart indicating the main processing steps. GIS comprehended the primary tool for incised valley evaluation.

The GIS Select by Location tool identified 442 SBP lines crossing the mapped incised valleys (with a search tolerance distance of 10m), resulting in 399 perpendicular lines. Then, visually interpretation of the incised valleys thalwegs (location and metrics) at the SBP cross-section images was classified in four classes: positive, negative, inconclusive and no data. The 3D analyst tool provided the bathymetric profile and surfaced thalweg metrics crossing the valleys at the seabed surface.

The incised valleys classified as positive are of three main types: unattached, attached to the seabed and buried below layers of sediments (units) (Figure 21A, B and C). The features without horizon terminations and lateral continuity, the bad-quality data, or lines without a good horizon definition were classified as inconclusive (Figure 21F). The negative class consists of others geomorphological seabed features (Figure 21G, H and I). Also acquisition failures, noisy signal and blanked records as no data was considered.

Talveg depth calculations were visually extracted using the SBP records. The depths were added to the thickness of the incised valley (Figure 21M), also considering the presence of layers above (Figure 21N). We considered a general value of sound speed $1,500\text{ms}^{-1}$ to convert double time depth (TWT) to meters.

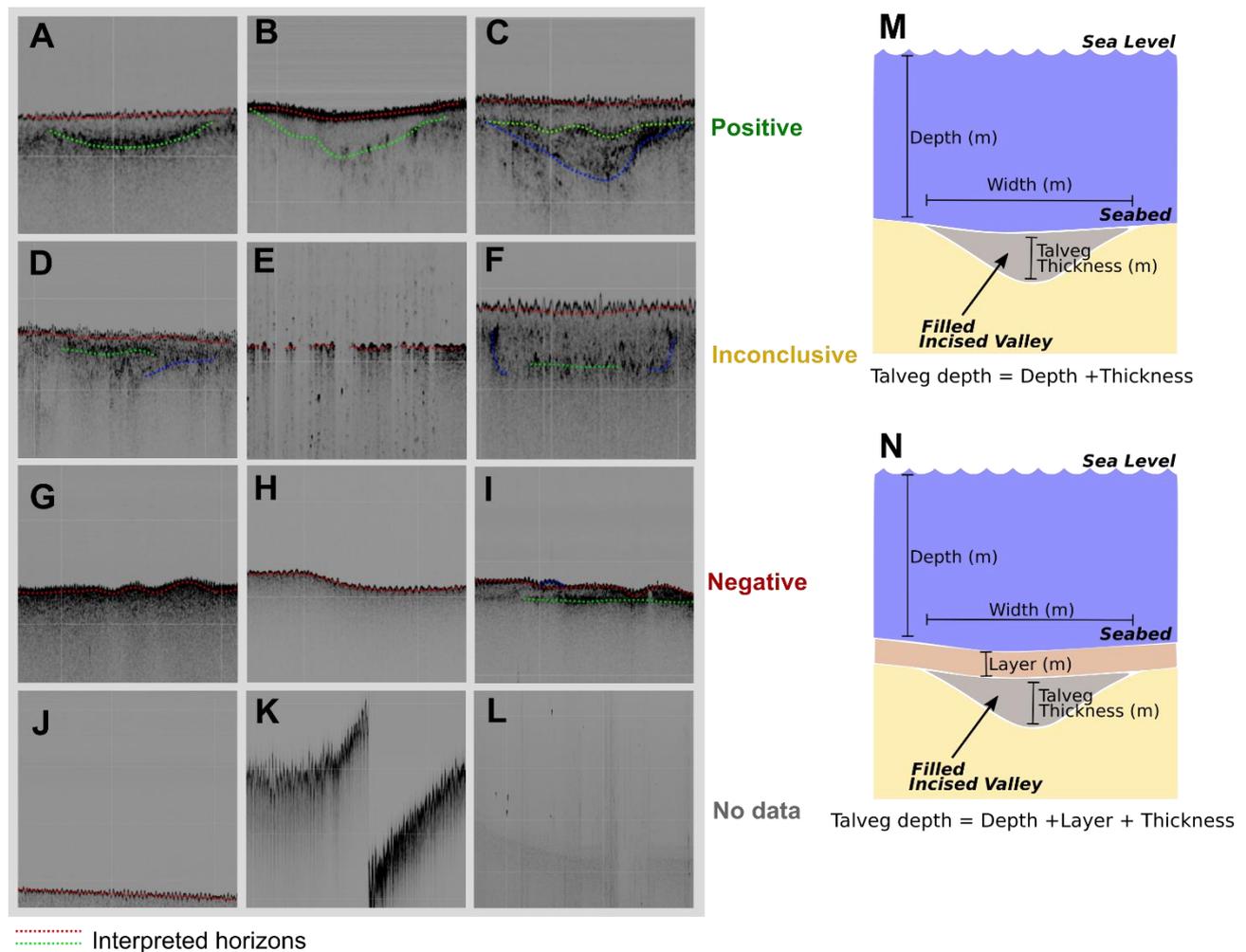


Figure 21. Examples of Positive, Inconclusive, Negative and No data interpretation based on the SBP lines. A- incised valley disconnected to the seafloor (two horizons). B- incised valley connected to the seafloor (two horizons). C- fully buried incised valley (three horizons). D inconclusive truncated horizons. E- Noisy data. F- inconclusive horizons. G to I- seafloor relief without incised valleys. J- incomplete seafloor view. K- Data error. L- No data. M and N- Talveg depth calculation scheme.

The present-day location of 188 estuarine and river mouth points from the Brazilian Institute of Geography and Statistics (BIGS) that flow directly onto the continental shelf was used (Figure 19). The GIS Select by Location tool provided the closest incised valleys to these points, considering a search distance of 30km. The Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) shaded relief image (1" resolution) (Valeriano and Rossetti, 2012) composes the detailed maps close to the shore. The estuarine and river mouth points were also connected to its drainage basins onshore.

4. RESULTS

The GIS hydrology tool identified a total of 699 incised valleys sections in the bathymetric surface, from 50m to 148km in length (mean of 21km). Four stream orders compose these incised valleys, with 57.5% of first-order lines, 31% second-order, 11.16% third-order and 0.34% fourth-order, according to Strahler (1954) method (Strahler, 1957) (Figure 22). The crossing SBP lines (399 lines) interpretation recognized 23% of Positive (91) for incised valleys at the seabed, most of them at water depths shallower than 100m.

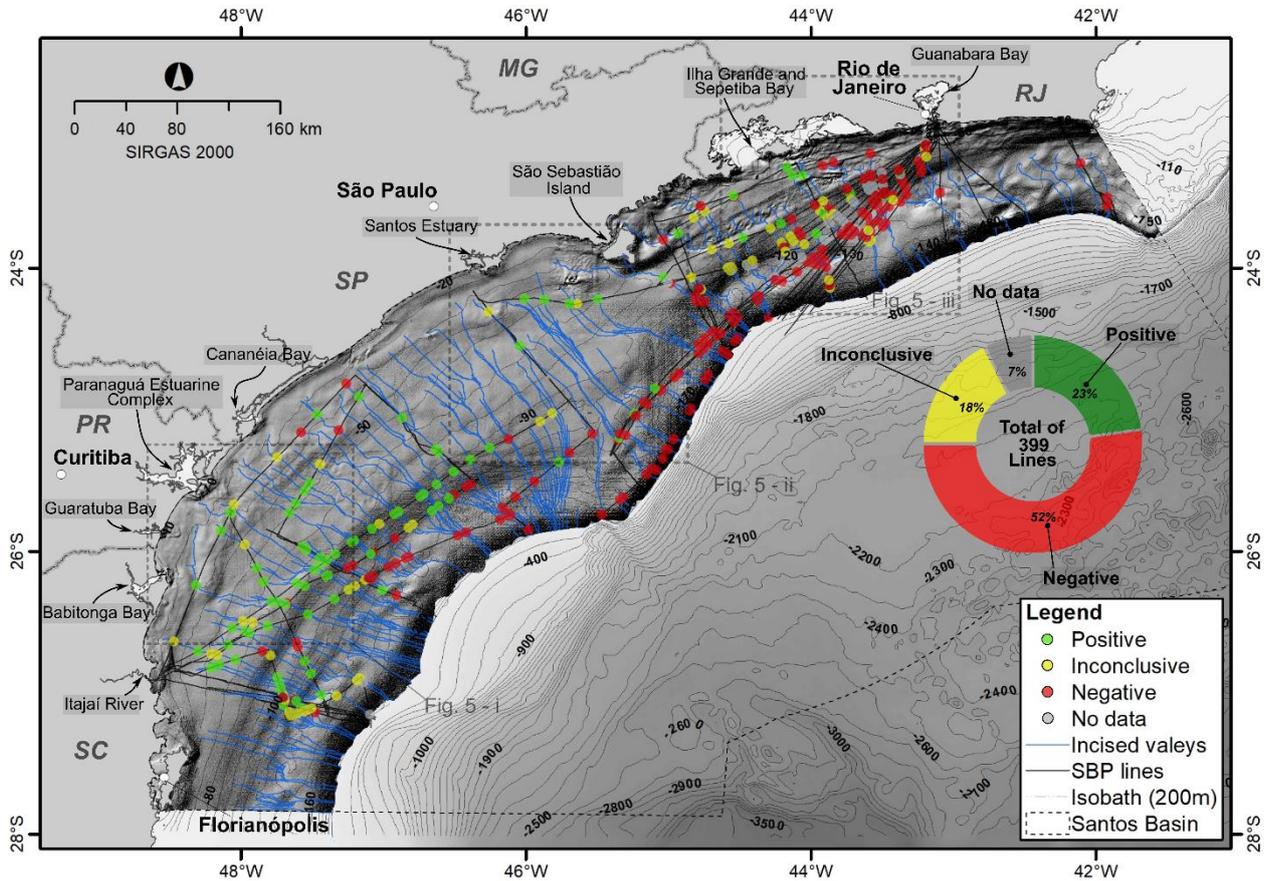


Figure 22. Occurrence of incised valleys at the SBP crossing points with incised valleys deduced from hydrology tool. The graph presents positive, negative, inconclusive, and no data proportion (%).

The incised valleys usually have their flanks attached to the seabed with a very low angle edges (Figure 23A to E). They occur singly or in groups, sometimes associated with evident surficial depressions at the seabed. The SBP also showed gas curtains close to the incised valley areas (Figure 23E). Talweg horizon shows a more substantial reflectance than the layers above (Figure 23A, C and D). The incised valleys dimensions estimates are of the decametric order concerning thickness (2.25 to 26m) and a few kilometers in width (76.5m to 4.5km).

The southern sector (Figure 23i) presented the most evident and most extended incised valleys field. The central sector (Figure 23ii) shows a significant stream reduction northern off São Sebastião Island. The northern sector has the smallest number of incised valleys up to Sepetiba Bay and Ilha Grande Bay (Figure 23iii).

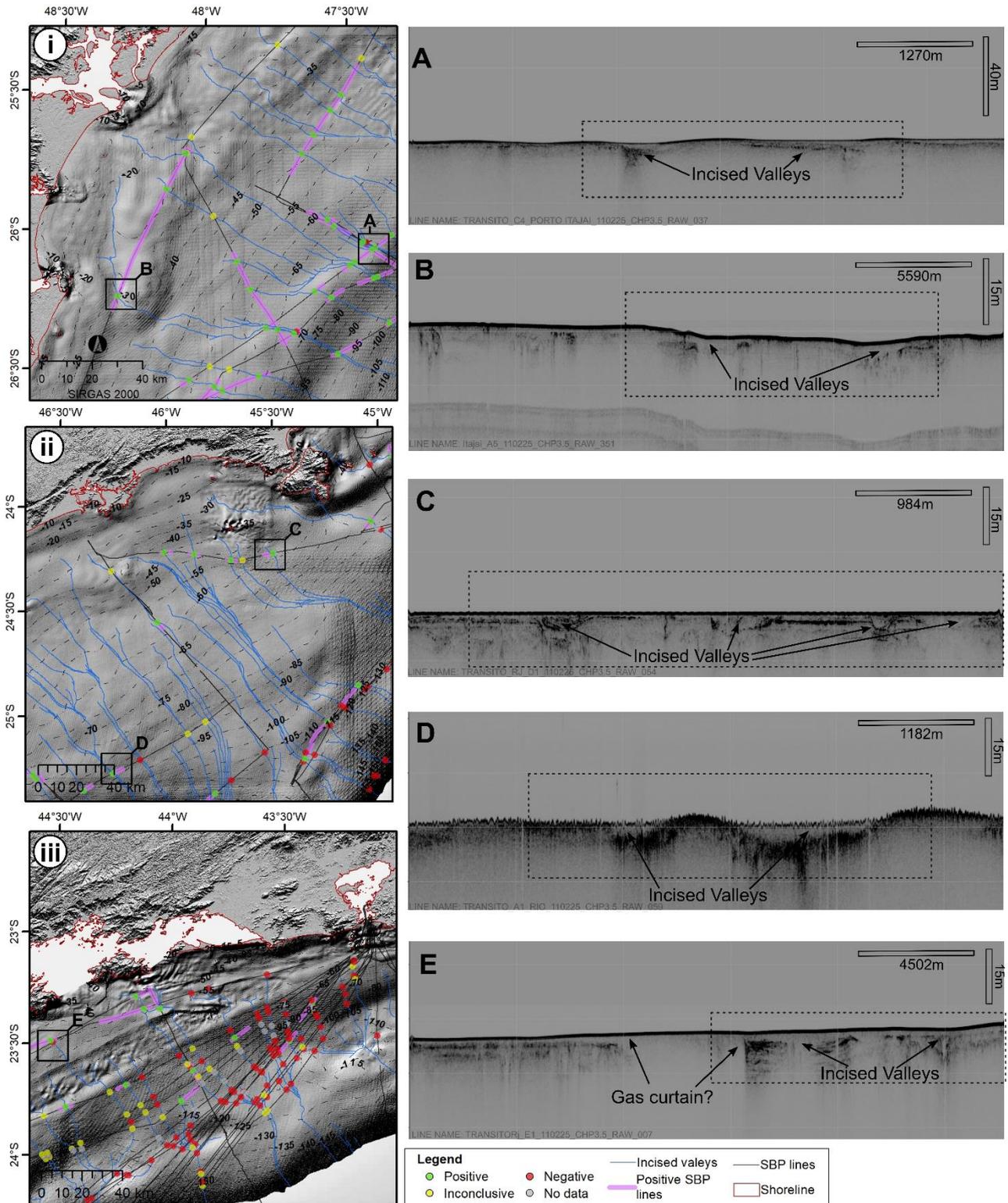


Figure 23. Detailed maps with examples of incised valleys mapped at the southern (i), middle (ii) and northern (iii) sectors of Santos Basin shelf.

The geophysics data confirmed a total of 80 incised valleys with length ranging from 250m to 148km and stream orders from one to three. The most extensive range in lengths are in the second-order drainages (Figure 24-A), and in the third-order are the valleys with most homogeneous length. The first-order streams occurred in more significant numbers (56%), followed by the second-order valleys (36%) (Figure 24-B).

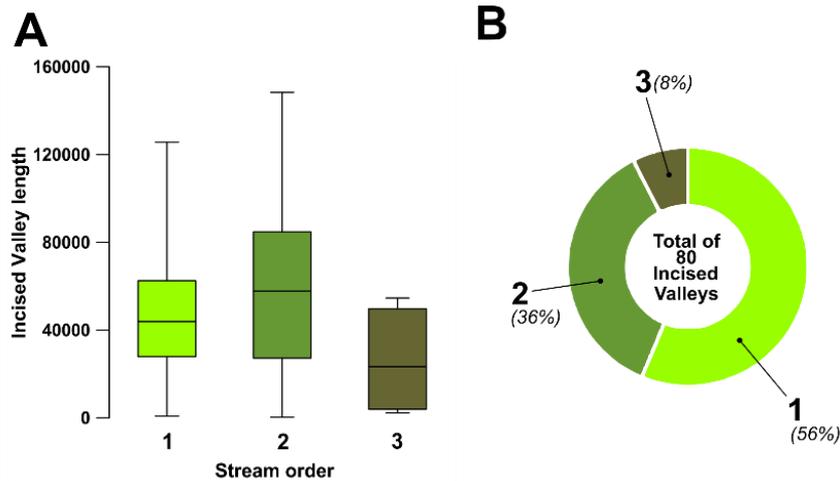


Figure 24. Proper relations between length and stream order (A) and their percentage of occurrence (B).

From the 188 actual river and estuarine mouth systems, 58 (30,8%) are less than 30km from the confirmed shelf incised valleys (Figure 25). There is a clustering of these riverine and estuarine systems as seen in the Sepetiba and Ilha Grande Bays, Bertioga, Santos, Iguape, Cananéia, Paranaguá Estuarine Complex, Babitonga bays and the Itajaí River.

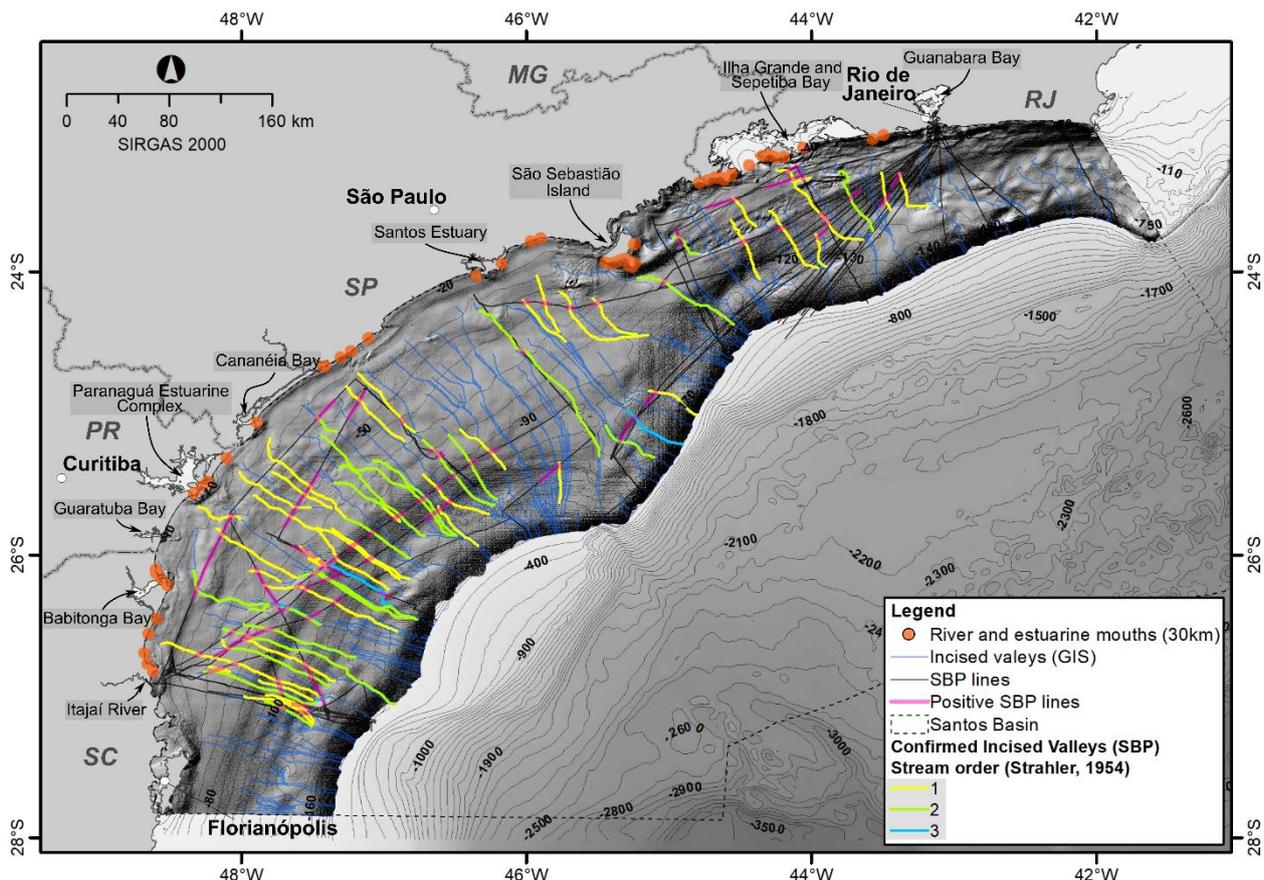


Figure 25. Confirmed incised valleys of the shelf of Santos Basin, its stream order and their proximity (30km radius) to actual riverine and estuarine river mouths.

The 91 confirmed thalwegs of Positive valleys type had their depth changing from 32 to 157m below sea level. The Figure 26 indicates the main profile, including all thalweg depths. It shows three steeper profiles from 30

to 55m, 100 to 115m and depths greater than 125m. Smoothed and gradual variation occurred between them, at 55 to 100m and 115 to 125m depths.

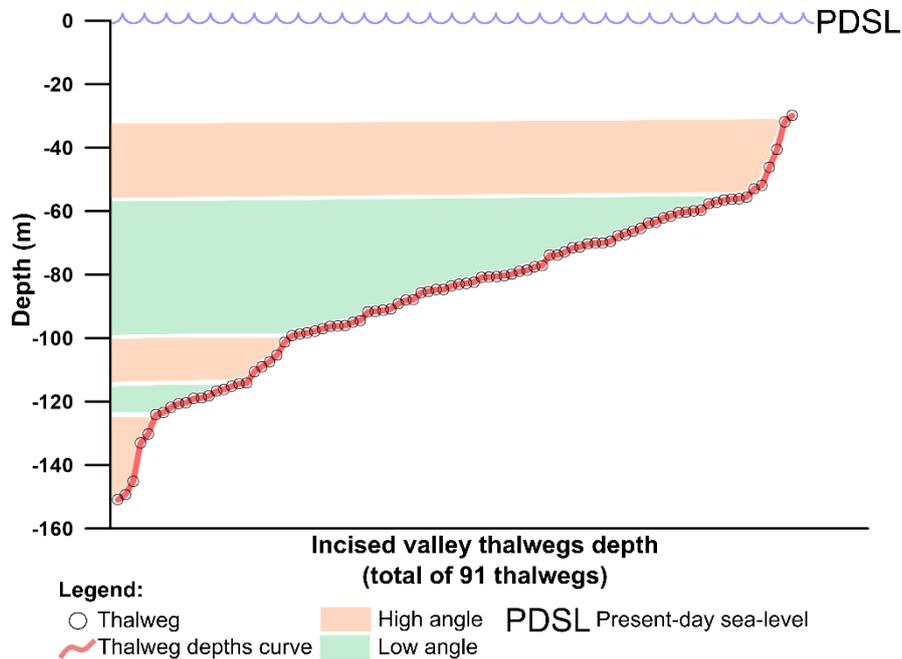


Figure 26. incised valley thalweg depths related to the present-day sea level. It is notable the presence of three main steep declinations at the curve separated by gentle slope sequences.

5. DISCUSSIONS

In the southern Brazilian continental margin, the newer drainage systems was established over the exposed shelf during the Last Glacial Maxima (LGM) and dug in the sediments creating several streams and some of them can still be correlated to actual river and estuarine mouth (Furtado and Conti, 2006; Conti and Furtado, 2009; Weschenfelder et al., 2010; Friederichs et al., 2013; Reis et al., 2013; Riva, 2015; Santos-Fischer et al., 2016). Other geomorphological processes, such as consolidated coastal barriers could act as a guidance for channels in the back barrier (Artusi and Figueiredo Jr., 2007; Friederichs et al., 2013).

In the Santos Basin, the SSI is recognized as a divider between a narrower and steeper shelf toward north and a wider and smoothed shelf to the south, and certainly influenced the incised valley morphological configuration (Conti and Furtado, 2009). This latitudinal difference is clearly seen here, which agrees with the concept that the broader shelves usually have a more developed drainage system than narrower ones (Wang et al., 2019). This study corroborates that broader shelf south of SSI has much more incised valleys than the northern shelf.

The new incised valley mapping provided by this paper shows a much better overview about the paleo-drainage systems as compared to the other publications at the basin so far due to its vast study area, unprecedented dataset reunion and extensive field campaign. The confirmation of imprinted valleys at the present-day seafloor by the SBP also showed that the valleys were mostly filled by sediments. Differences in the valleys infill thickness over the shelf could also be related to variances in sedimentation rates at space and time (Mahiques et al., 2002).

The Santos Basin outer shelf was submitted to sedimentation rates ranging from 5 to 660 mm kyr⁻¹ post LGM (Mahiques et al., 2002, 2004). Considering the thickness range found at the incised valleys (2.25 to 26m), the

sedimentation rates values are at the same scale (layers of 13,2m considering 660 mm kyr^{-1} over 20kyr after LGM). Other processes that could happened at the marine transgression, as longshore transport, storm wave remobilization and strong coastal currents could contribute to values over 14m at some locations.

Despite the 29 incised valleys mapped by Artusi and Figueiredo Jr. (2007), only two channels are attached to the seabed. The absence of a most relevant present-day drainage system east of Guanabara Bay relates the origin of these buried incised valleys to recurrent openings of tidal inlets in coastal barriers during the Pleistocene (Artusi and Figueiredo Jr., 2007). That is why these buried and small incised valleys are not so evident at the seabed surface. However, toward south and west of Guanabara Bay, the incised valleys become more evident.

In Rio de Janeiro middle and outer shelves, the lack of large drainage basin and incipient incised valleys east of Guanabara Bay can also be related to an extensive carbonatic facies of coralline algae and mollusc shells (Figure 27) (Dias et al., 2019). In this region, the SBP Chirp signals has high amplitudes denoting a lithified seabed (Souza, 2011; Demarco et al., 2017).

The rough relief caused by biogenic reef patches can also puzzle the GIS stream mapping once it is made exclusively for non-carbonate surface. The irregular terrain matches these bioclastic facies of Dias et al. (2019), making it hard to see the relation between incised valleys, seabed features and slope channels or canyons.

Southward, between GB and SSI, fluvial and tide channels occur at the Ilha Grande and Sepetiba bays mouths, formed at the exposed shelf MIS 3 isotopic stage (Friederichs et al., 2013; Reis et al., 2013). Seismic evidence shows that the rivers that compose the present-day drainage were responsible for these incised valleys at the inner shelf (Friederichs et al., 2013). Indeed, an exhumated remnant horizon (Horizon B), also dated from the MIS 3 stage, outcrops at the shelf adjacent to GB mouth (22m depth), indicating that this paleo-exposed region suffered fluvial and fresh-water flooding processes (Silva and Dias, 2020).

The large amplitude base-level dropping formed incised valleys by headward erosion, but these valleys are not necessarily connected to the continental drainage basins (Koss et al., 1994). However, some of the valley systems can act as a bypass zone of coarser sediments from the shelf to the slope. According to these authors, the rapid sea level rise (as the following MIS 2 event) flooded the shelf surface preserving its main morphological arrangement.

Indeed, the Santos Basin incised valley's size and shape are related to this fast sea-level rise with some correlation to the present-day drainage systems, as Ribeira de Iguape and Itanhaém rivers (Conti and Furtado, 2009). In fact, Riva (2015) identified 53 incised valleys between Santos and Cananéia with a higher concentration of these features between Peruíbe and Cananéia, close to the region presented in this paper with a high occurrence of confirmed incised valleys (between Iguape and Itajaí) (Figure 27).

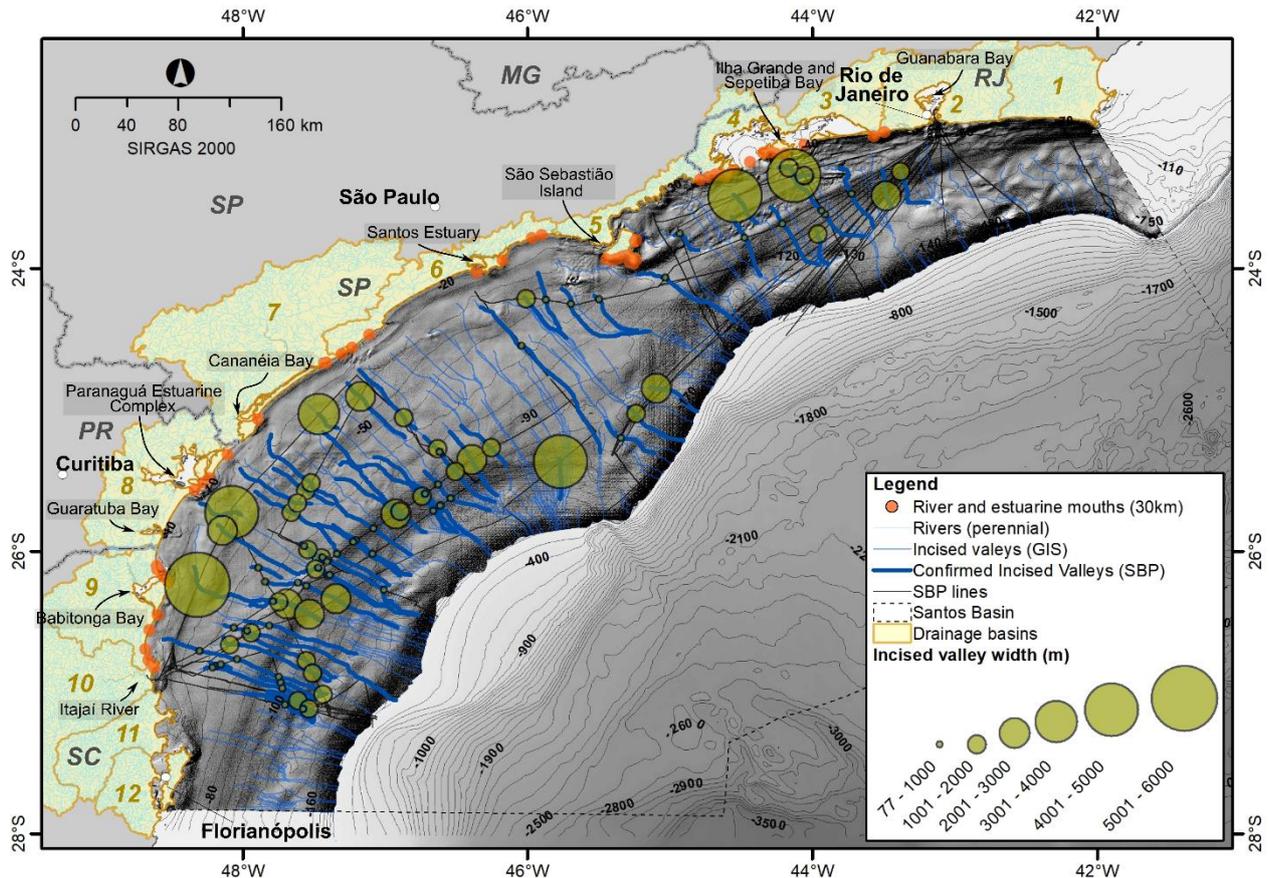


Figure 27. Incised valleys width. In total, 12 drainage basins drain directly into the Santos Basin shelf: 1- Lagos and São João, 2- Guanabara Bay, 3- Guandú, 4- Ilha Grande Bay, 5- São Paulo north coast, 6- Baixada Santista, 7- Baixo Ribeira de Iguape, 8- Paraná coast, 9- Itapocu and Cubatão, 10- Itajaí, 11- Tijucas and 12- Cubatão do Sul. Circles are not in scale.

The Itajaí (10) and Baixo Ribeira de Iguape (7) are the most extensive drainage basins and present the significant perennial drainage sections flowing directly to the Santos Basin inner shelf (Figure 27). In parallel, their spatial correlation with the adjacent incised valley field at the continental shelf is remarkable, as highlighted by Riva (2015). Entirely buried valleys are also associated with these areas, mainly on the inner shelf, representing a modern seabed reworking due to lower transgressions rates at the last 7,000 years.

The incised valleys are wider in inner to middle shelf and generally decreases with depth (Figure 27). The river width is not related to a direct relationship between its length and flow capacity but to the bankfull discharge, slope, friction and entrainment stress (Dunne and Jerolmack, 2020), and its width generally increases at the fluvial-marine transition zone (Gugliotta and Saito, 2019). The presence of these more significant incised valleys widths at depths ranging from 30 to 50m corroborates the range of MIS 3 sea-level stages closer to that depth (Reis et al., 2013; Silva and Dias, 2020).

Regarding to the sea level oscillations, the present-day morphology of Santos Basin continental shelf begun at the early MIS 5 stage (MIS 5e substage, Figure 28 - phase A) (Maia et al., 2010), when several high-frequency base level regressions and transgressions continuously constructed and eroded seabed features at the shelf in depths less than 60m. Forced regression and a gradually exposure of the shelf to subaerial conditions started at MIS 4 (Maia et al., 2010; Reis et al., 2013), reaching a maximum transgression amplitude at 30kyr, in MIS 3 (Figure 28 - phase B).

In order to compare the obtained results with Artusi and Figueiredo Jr. (2007) (Figure 28), we fitted both curves to the beginning of the forced regression (MIS 4) and to the LGM (MIS 2), assuming that this is the proper period for the formation and establishment of incised valleys at the exposed shelf (Maia et al., 2010; Reis et al., 2013). It's notable some depth differences between the two curves, but with a general descent pattern following the sea-level regression since (MIS 4).

This depth differences can be explained by the amount of data and the massive difference between dimensions of the studied areas. Artusi and Figueiredo Jr. (2007) only had 210km of SBP data recovering an area of 3,000km², significantly less than the dataset (12,269km) and the coverage (134,449 km²) considered in this study. However, despite the differences both curves indicate the regression acceleration between 30 and 20kyr, and a smoother regression step between 40 and 30kyr.

The deeper incised valley (150m depth) is almost 20m below the geomorphic indicator of LGM previously identified for the northern sector of the Santos Basin (Reis et al., 2013). Indeed, the deepest confirmed incised valleys happens by the south of SSI, outside any previously inspected areas so far and it could take the role of the deepest LGM geomorphic indicator at the basin.

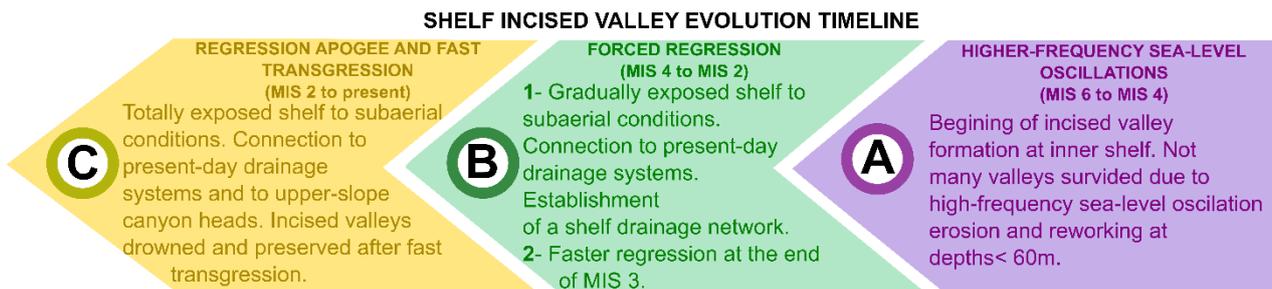
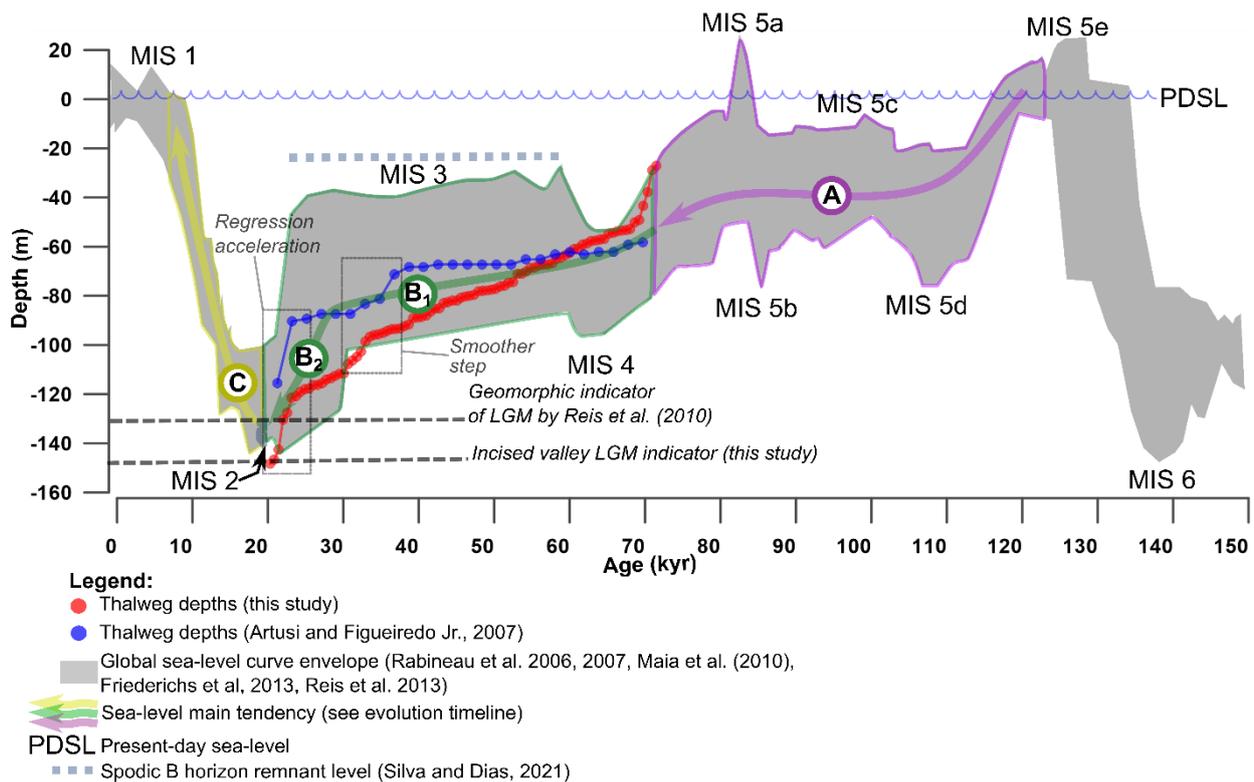


Figure 28. Sea-level curve envelope for the past 150kyr with the MIS 3 dating for the southeastern Brazil, the thalweg depths comparison between this study and Artusi and Figueiredo Jr. (2007), the geomorphic indicators presented by Reis et al. (2013) and the deepest ones proposed by this study, and sea level tendency linked to the three phases (A, B and C) of the incised valley evolution timeline.

At this last phase (Figure 28 - phase C), large incised valleys reached the shelf break (124m depth), indicating that the drainage flowed directly into the slope at the LGM (MIS 2). These incised valleys link with the Cananéia and São Sebastião submarine canyons and the Rio de Janeiro valley (Figure 29), according to the mapping of Zemruscki (1979). These slope depressions are responsible for sediments gravity flows through the slope until the São Paulo plateau (Zemruscki, 1979; Duarte and Viana, 2007; Borisov et al., 2020). Toward South the linkage between incised valleys to canyons is not so evident.

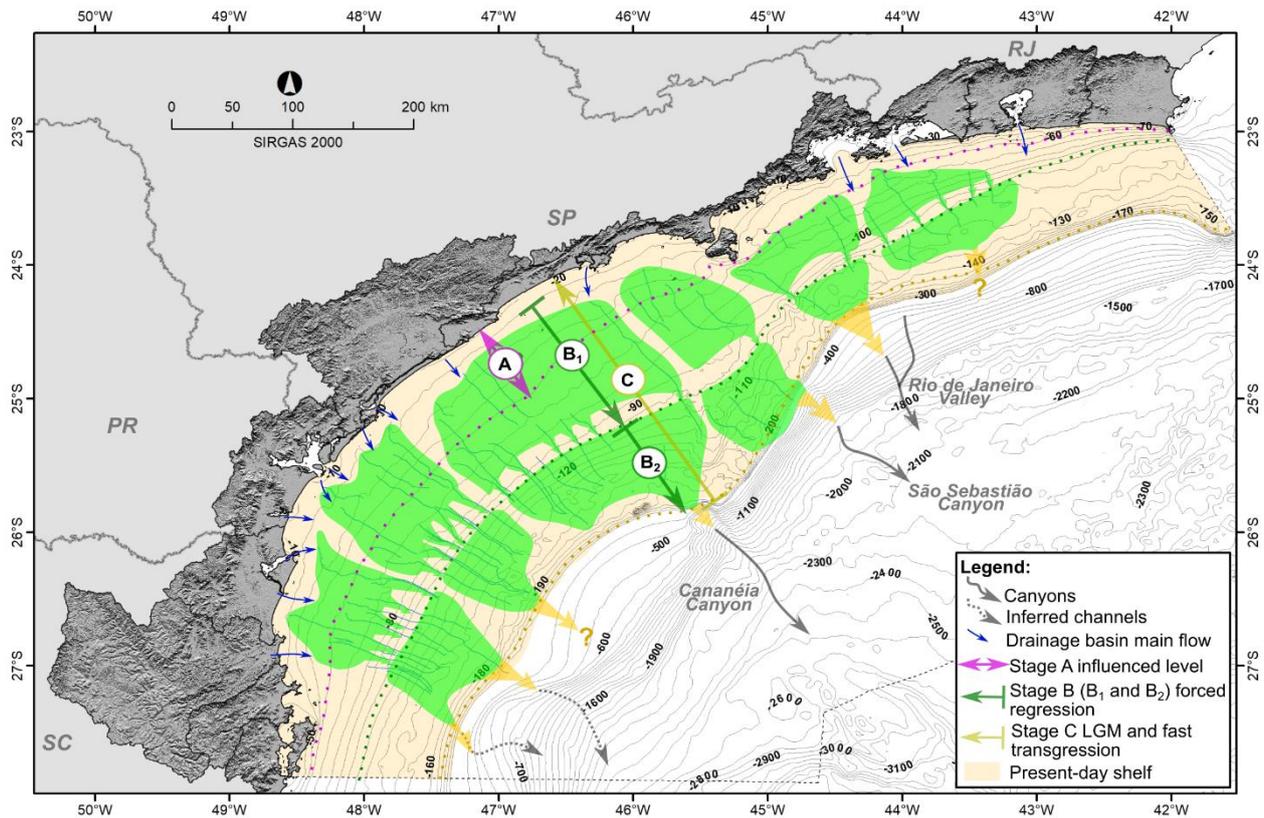


Figure 29. Incised valley evolution over the Santos Basin, indicating the three phases of incised valley evolution. See text for detailed information.

6. CONCLUSIONS

In Santos Basin continental shelf, it was possible to correlate the Marine Isotopic Stages (MIS) to the depth of incised valleys. In total, three sea-level phases explain the incised valley evolution over the shelf (Figure 28 and Figure 29). The first phase (A) consisted of high-frequency sea-level oscillations after the MIS 5e high stand isotopic substage. These oscillations provided favorable conditions for the construction and destruction of the incised valleys and were restricted to the shallower portions of the shelf (depths < 60m).

The second phase (B) comprised a forced regression that gradually exposed the entire shelf at MIS 4 and MIS 3. However, this phase includes two subphases related to the sea-level regression velocity: subphase B₁ responds to a slower regression and the subphase B₂ to a faster regression until the LGM. The preserved incised valleys' construction started at B₁ and developed over the B₂ phases, both linked to the main continental drainage systems. However, it is possible that some channels were not directly related to drainage basins or were abandoned throughout the shelf's evolutionary history.

The third phase (C) corresponded to the LGM itself, with all the shelf exposed to subaerial variables. This phase culminated with the full drainage development in the shelf, which carved valleys reaching depths of more than 150m. The deepest valleys' position shows proximity to previously mapped upper slope canyons and valleys, in special the Cananéia and São Sebastião canyons, supporting a direct link between present-day drainage basins and the upper slope. The fast MIS 2 transgression ended up drowning the incised valleys, preserving them from total erosion.

As the channels tend to be excavated until reach depths close to the transient baselevel, its thalweg depths represent a photography of the sea level in geological history. General trends of thalweg depth curves can be easily fitted to the global sea-level curves, contributing to expand its extreme limits as geomorphic evidence. Although dating is still essential and more accurate, geophysical and geomorphological data as bathymetry and SBP methods cover vast areas, helping to understand how sea-level changes affected the coastal zone on its regional context.

As complementary conclusion, we suggest high-resolution bathymetric and SBP surveys at the outer shelf and upper slope to better identify the link between the incised valleys and the continental slope canyons. Chronostratigraphy and geologic cores descriptions at the incised valleys could also help to refine the proposed basin's Quaternary paleo-drainage evolution.

7. ACKNOWLEDGEMENT

The authors grateful to PETROBRAS Santos Project - Santos Basin Environmental Characterization (PCR-BS) the support of field sampling, laboratory analysis and financial, through resources from RD&I investments clauses of Brazilian National Agency of Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). We also thank to the Brazilian Navy who provided the historical bathymetric dataset. We are also grateful for the Marine Geology and Geophysics Laboratory (LAGEMAR-UFF) and to the Ocean and Earth Dynamics Graduate Program (DOT-UFF) for providing laboratories time for data analysis.

8. BIBLIOGRAPHY

- Abreu, J. G. N., and Calliari, L. J. (2005). Paleocanais na plataforma continental interna do rio grande do sul: Evidências de uma drenagem fluvial pretérita. *Rev. Bras. Geofis.* 23, 123–132. doi:10.1590/s0102-261x2005000200002.
- Allen, G. P., and Posamentier, H. W. (1993). Sequence stratigraphy and facies model of an incised valley fill: the Gironde Estuary, France. *J. Sediment. Petrol.* 63, 378–391. doi:10.1306/D4267B09-2B26-11D7-8648000102C1865D.
- Almeida, F. K., Mello, R. M., Costa, K. B., and Toledo, F. A. L. (2015). The response of deep-water benthic foraminiferal assemblages to changes in paleoproductivity during the Pleistocene (last 769.2kyr), western South Atlantic Ocean. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 440, 201–212. doi:10.1016/j.palaeo.2015.09.005.
- Ambrosio, B. G., Sousa, P. H. G. O., Gagliardi, M. H., and Siegle, E. (2020). Wave energy distribution at inlet channel margins as a function of ebb tidal delta morphology: Cananéia Inlet, São Paulo, Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 92, 1–13. doi:10.1590/0001-3765202020180677.
- Artusi, L., and Figueiredo Jr., A. G. (2007). Sismoestratigrafia rasa da plataforma continental de cabo frio – araruama – rj. *Rev. Bras. Geofísica* 25, 7–16. doi:10.1590/S0102-261X2007000500002.
- Borisov, D., Frey, D., and Levchenko, O. (2020). Sediment waves on the Santa Catarina Plateau (western South Atlantic). *J. South Am. Earth Sci.* 102, 102698. doi:10.1016/j.jsames.2020.102698.
- Burger, R. L., Fulthorpe, C. S., and Austin, J. A. (2001). Late Pleistocene channel incisions in the southern Eel River Basin, northern California: Implications for tectonic vs. eustatic influences on shelf sedimentation patterns. *Mar. Geol.* 177, 317–330. doi:10.1016/S0025-3227(01)00166-9.
- Camillo, E., Quadros, J. P., Santarosa, A. C. A., Costa, K. B., and Toledo, F. A. L. (2020). An abrupt cooling event recorded around 73 kyr in western South Atlantic. *Quat. Int.* 542, 80–87. doi:10.1016/j.quaint.2020.03.005.
- Cecilio, R. O., and Dillenburg, S. R. (2019). An ocean wind-wave climatology for the Southern Brazilian

- Shelf. Part II: Variability in space and time. *Dyn. Atmos. Ocean.* 88, 101103. doi:10.1016/j.dynatmoce.2019.101103.
- Chu, D., and Hufhagle, L. C. (2006). Time varying gain (TVG) measurements of a multibeam echo sounder for applications to quantitative acoustics. *Ocean. 2006.* doi:10.1109/OCEANS.2006.306818.
- Conti, L. A., and Furtado, V. V. (2009). Topographic registers of paleo-valleys on the southeastern Brazilian continental shelf. *Brazilian J. Oceanogr.* 57, 113–121. doi:10.1590/s1679-87592009000200004.
- Cooper, J. A. G., Meireles, R. P., Green, A. N., Klein, A. H. F., and Toldo, E. E. (2017). Late Quaternary stratigraphic evolution of the inner continental shelf in response to sea-level change, Santa Catarina, Brazil. *Mar. Geol.* 397, 1–14. doi:10.1016/j.margeo.2017.11.011.
- Correa, I. C. S., Ponzi, V. R. A., and Trindade, L. A. F. (1980). Níveis marinhos quaternários da plataforma continental do Rio de Janeiro. *An. do XXXI Congr. Bras. Geol.*
- Demarco, L. F. W., Klein, A. H. da F., and Souza, J. A. G. de (2017). Marine substrate response from the analysis of seismic attributes in CHIRP sub-bottom profiles. *Brazilian J. Oceanogr.* 65, 332–345. doi:https://doi.org/10.1590/S1679-87592017124306503.
- Dias, M. P., Bastos, A. C., and Vital, H. (2019). Plataforma Continental Brasileira. *Programa Geol. e Geofísica Mar.*, 185.
- Dominguez, J. M. L., Da Silva, R. P., Nunes, A. S., and Freire, A. F. M. (2013). The narrow, shallow, low-accommodation shelf of central Brazil: Sedimentology, evolution, and human uses. *Geomorphology* 203, 46–59. doi:10.1016/j.geomorph.2013.07.004.
- Duarte, C. S. L., and Viana, A. R. (2007). Santos Drift System: Stratigraphic organization and implications for late Cenozoic palaeocirculation in the Santos Basin, SW Atlantic Ocean. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 276, 171–198. doi:10.1144/GSL.SP.2007.276.01.09.
- Dunne, K. B. J., and Jerolmack, D. J. (2020). What sets river width? *Sci. Adv.* 6, 1–9. doi:10.1126/sciadv.abc1505.
- Eamer, J. B. R., Shaw, J., King, E. L., and MacKillop, K. (2021). The inner shelf geology of Atlantic Canada compared with the North Sea and Atlantic United States: Insights for Atlantic Canadian offshore wind energy. *Cont. Shelf Res.* 213, 104297. doi:10.1016/j.csr.2020.104297.
- Esri (2019). ArcGIS Desktop: An overview of the hydrology toolset, ArcMap 10.6. *ArcMap Man.* Available at: <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.6/tools/spatial-analyst-toolbox/an-overview-of-the-hydrology-tools.htm> [Accessed April 11, 2021].
- Ferreira, F., Silva, C. G., Oliveira, A. S., Chiessi, C. M., Kern, A. K., Baker, P. A., et al. (2021). Biochronostratigraphy of the western equatorial Atlantic for the last 1.93 Ma. *Quat. Int.* 598, 24–37. doi:10.1016/j.quaint.2021.04.042.
- Figueiredo Jr., A. G., Pacheco, C. E. P., de Vasconcelos, S. C., and da Silva, F. T. (2016). Continental Shelf Geomorphology and Sedimentology. *Geol. Geomorphol.*, 13–31. doi:10.1016/b978-85-352-8444-7.50009-3.
- Figueiredo Jr., A. G., and Tessler, M. (2004). *Topografia e composição do substrato marinho da região Sudeste-Sul do Brasil - Série documentos Revizee: Score Sul.*
- Friederichs, Y. L., Dos Reis, A. T., Silva, C. G., Toulemonde, B., Da Costa Maia, R. M., and Guerra, J. V. (2013). Arquitetura sísmica do sistema fluvio-estuarino da Baía de Sepetiba preservado na estratigrafia rasa da plataforma adjacente, Rio de Janeiro, Brasil. *Brazilian J. Geol.* 43, 124–138. doi:10.5327/Z2317-48892013000100011.
- Furtado, L. A., and Conti, V. V. (2006). Geomorfologia da Plataforma Continental do Estado de São Paulo. *Rev. Bras. Geociências* 36, 8.

- Furtado, V. V., Bonetti Filho, J., and Conti, L. A. (1996). Paleo river valley morphology and sea level changes at southeastern Brazilian continental shelf. *An. Acad. Bras. Cienc.* 68, 167–169.
- Gelder, G., Jara-Muñoz, J., Melnick, D., Fernández-Blanco, D., Rouby, H., Pedoja, K., et al. (2020). How do sea-level curves influence modeled marine terrace sequences? *Quat. Sci. Rev.* 229. doi:10.1016/j.quascirev.2019.106132.
- Gugliotta, M., and Saito, Y. (2019). Matching trends in channel width, sinuosity, and depth along the fluvial to marine transition zone of tide-dominated river deltas: The need for a revision of depositional and hydraulic models. *Earth-Science Rev.* 191, 93–113. doi:10.1016/j.earscirev.2019.02.002.
- Harris, M. S., Sautter, L. R., Johnson, K. L., Luciano, K. E., Sedberry, G. R., Wright, E. E., et al. (2013). Continental shelf landscapes of the southeastern United States since the last interglacial. *Geomorphology* 203, 6–24. doi:10.1016/j.geomorph.2013.02.014.
- Harris, P. T., Macmillan-lawler, M., Rupp, J., and Baker, E. K. (2014). Geomorphology of the oceans. 352, 4–24.
- Koss, J. E., Ethridge, F. G., and Schumm, S. A. (1994). An experimental study of the effects of base-level change on fluvial, coastal plain and shelf systems. *J. Sediment. Res. B Stratigr. Glob. Stud.*, 90–98.
- Kowsmann, R. O., and Costa, M. P. de A. (1979). “Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes.” in *Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira*, ed. PETROBRAS/CENPES (Rio de Janeiro), 55.
- Lamour, M. R., Angulo, R. J., and Soares, C. R. (2007). Bathymetrical Evolution of Critical Shoaling Sectors on Galheta Channel, Navigable Access to Paranaguá Bay, Brazil. *J. Coast. Res.* 231, 49–58. doi:10.2112/03-0063.1.
- Mahiques, M. M., Da Silveira, I. C. A., De Mello e Sousa, S. H., and Rodrigues, M. (2002). Post-LGM sedimentation on the outer shelf-upper slope of the northernmost part of the São Paulo Bight, southeastern Brazil. *Mar. Geol.* 181, 387–400. doi:10.1016/S0025-3227(01)00225-0.
- Mahiques, M. M., Tessler, M. G., Maria Ciotti, A., Da Silveira, I. C. A., E Sousa, S. H. D. M., Figueira, R. C. L., et al. (2004). Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil. *Cont. Shelf Res.* 24, 1685–1697. doi:10.1016/j.csr.2004.05.013.
- Maia, R. M. da C., Reis, A. T. dos, Alves, E. da C., Silva, C. G., Guerra, J. V., Gorini, C., et al. (2010). Architecture and Stratigraphic Framework of Shelf Sedimentary systems off Rio de Janeiro state, northern Santos Basin-Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 15–29.
- Muehe, D., and Carvalho, V. G. de (1993). Geomorfologia, cobertura sedimentar e transporte de sedimentos na plataforma continental interna entre a Ponta de Saquarema e o Cabo Frio (RJ). *Bol. do Inst. Ocean.* 41, 01–12. doi:10.1590/s0373-55241993000100001.
- Ngueutchoua, G., and Giresse, P. (2010). Sand bodies and incised valleys within the Late Quaternary Sanaga-Nyong delta complex on the middle continental shelf of Cameroon. *Mar. Pet. Geol.* 27, 2173–2188. doi:10.1016/j.marpetgeo.2010.06.011.
- O’Callaghan, J. F., and Mark, D. M. (1989). The extraction of ordered vector drainage networks from elevation data. *Comput. Vision, Graph. Image Process.* 47, 45–58. doi:10.1016/0734-189X(89)90053-4.
- Oliveira, N., Bastos, A. C., Silva Quaresma, V., and Vieira, F. V. (2020). The use of Benthic Terrain Modeler (BTM) in the characterization of continental shelf habitats. *Geo-Marine Lett.* 40, 1087–1097. doi:10.1007/s00367-020-00642-y.
- Ozulu, I. M., and Gökgöz, T. (2018). Examining the stream threshold approaches used in hydrologic analysis. *ISPRS Int. J. Geo-Information* 7, 1–12. doi:10.3390/ijgi7060201.
- Posamentier, H. W., and Vail, P. R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition II: sequence and systems tract models. *Sea-level Chang. an Integr. approach*, 125–154. doi:10.2110/pec.88.01.0125.

- Rabineau, M., Berné, S., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Guillocheau, F., and Joseph, P. (2007). Corrigendum to: Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 years) [Earth Planet. Sci. Lett. 252 (2006), 119--137]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 254, 446–447. doi:10.1016/j.epsl.2006.11.050.
- Rabineau, M., Berné, S., Olivet, J. L., Aslanian, D., Guillocheau, F., and Joseph, P. (2006). Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 yr). *Earth Planet. Sci. Lett.* 252, 119–137. doi:10.1016/j.epsl.2006.09.033.
- Ramesh, P., Pandey, D. K., and Mishra, R. (2015). Approximation of Flow Patterns for Submarine Channel Systems in the Arabian Sea using a GIS Approach. *Int. J. Adv. Remote Sens. GIS* 4, 1142–1160. doi:10.23953/cloud.ijarsg.103.
- Reis, A. T., Maia, R. M. C., Silva, C. G., Rabineau, M., Guerra, J. V., Gorini, C., et al. (2013). Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. *Geomorphology* 203, 25–45. doi:10.1016/j.geomorph.2013.04.037.
- Riva, V. C. D. (2015). Paleodrainage mapping of the São Paulo southern continental shelf on the Santos basin. in *14th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held* (Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geofísica), 420–423. doi:10.1190/sbgf2015-083.
- Santos-Fischer, C. B. dos, Corrêa, I. C. S., Weschenfelder, J., Torgan, L. C., and Stone, J. R. (2016). Paleoenvironmental insights into the Quaternary evolution of the southern Brazilian coast based on fossil and modern diatom assemblages. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 446, 108–124. doi:10.1016/j.palaeo.2016.01.018.
- Schwab, W. C., Baldwin, W. E., Warner, J. C., List, J. H., Denny, J. F., Liste, M., et al. (2017). Change in morphology and modern sediment thickness on the inner continental shelf offshore of Fire Island, New York between 2011 and 2014: Analysis of hurricane impact. *Mar. Geol.* 391, 48–64. doi:10.1016/j.margeo.2017.07.010.
- Sielski, L. H., Angulo, R. J., Souza, M. C., and Veiga, F. A. (2017). Surficial sediments of the paraná inner continental shelf, southern Brazil. *Quat. Environ. Geosci.* 8, 22–35. doi:10.5380/abequa.v8i2.52334.
- Silva, A. G. A., Statterger, K., Schwarzer, K., and Vital, H. (2016). Seismic stratigraphy as indicator of late Pleistocene and Holocene sea level changes on the NE Brazilian continental shelf. *J. South Am. Earth Sci.* 70, 188–197. doi:10.1016/j.jsames.2016.05.001.
- Silva, R. C. de O. e, and Dias, G. T. de M. (2020). Submerged Pleistocene spodic horizon remnant exposed on the inner continental shelf off Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Geo-Marine Lett.* 40, 925–933. doi:10.1007/s00367-019-00622-x.
- Silveira, I. C. A. da, Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. de, and Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian J. Oceanogr.* 48, 171–183. doi:10.1590/S1679-87592000000200008.
- Souza, L. A. P. de (2011). SBP 3.5, 7,10kHz, Chirp (0.5-2.0kHz), Chirp (2-12kHz), Chirp (10-18 kHz), Boomer (0.5-2 kHz) e Sparker (0.1-1.0kHz): quando decidir por uma ou por outra fonte acústica? 1869–1874. doi:10.1190/sbgf2011-386.
- Souza, R. B., and Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Cont. Shelf Res.* 24, 241–262. doi:10.1016/j.csr.2003.10.001.
- Strahler, A. (1957). Quantitative Analysis of Watershed Geomorphology, Transactions of the American Geophysical Union. *Trans. Am. Geophys. Union* 38, 913–920.
- Stramma, L., and Ikeda, Y. (1990). Geostrophic transport in the Brazil Current region north of 20 ° S. 37, 1875–1886.
- Swift, D. J. P., Moir, R., and Freeland, G. L. (1980). Quaternary rivers on the New Jersey shelf: relation of

seafloor to buried valleys. *Geology* 8, 276–280. doi:10.1130/0091-7613(1980)8<276:QROTJ>2.0.CO;2.

- Taner, M. T., Schuelke, J. S., O'Doherty, R., and Baysal, E. (1994). Seismic attributes revisited. *SEG Tech. Progr. Expand. Abstr.*, 1104–1106. doi:10.1190/1.1822709.
- Tarboton, D. G., Bras, R. L., and Rodriguez-Iturbe, I. (1991). On the extraction of channel networks from digital elevation data. *Hydrol. Process.* 5, 81–100. doi:10.1002/hyp.3360050107.
- Toledo, F. A. L., Quadros, J. P., Camillo, E., Santarosa, A. C. A., Flores, J. A., and Costa, K. B. (2016). Plankton biochronology for the last 772,000 years from the western South Atlantic Ocean. *Mar. Micropaleontol.* 127, 50–62. doi:10.1016/j.marmicro.2016.07.002.
- Valeriano, M. de M., and Rossetti, D. de F. (2012). Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. *Appl. Geogr.* 32, 300–309. doi:10.1016/j.apgeog.2011.05.004.
- Wang, R., Colombera, L., and Mountney, N. P. (2019). Geological controls on the geometry of incised-valley fills: Insights from a global dataset of late-Quaternary examples. *Sedimentology* 66, 2134–2168. doi:10.1111/sed.12596.
- Weschenfelder, J., Corrêa, I. C. S., Aliotta, S., and Baitelli, R. (2010). Paleochannels related to late quaternary sea-level changes in southern Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 35–44. doi:10.1590/s1679-87592010000600005.
- Williams, P. W. (2017). *Glaciations and Climate Change*. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-812493-2.00007-4.
- Zembruski, S. G. (1979). Geomorfologia da Margem Continental Sul Brasileira e das Bacias Oceânicas Adjacentes. *Ser. Proj. REMAC*, 1–46.

5.4. *Mesophotic carbonate and reef areas on the Brazilian continental shelf.*

Submetido para a revista *Limnology and Oceanography* (ISSN: 1939-5590, Nível CAPES A1 - Geociências).

Mesophotic carbonate and reef areas on the Brazilian continental shelf.

João Regis dos Santos Filho; Gilberto Tavares de Macedo Dias; Alberto Garcia Figueiredo Jr.; Cleverton Guizan Silva; Juliane Castro Carneiro

ABSTRACT

Mesophotic zones are light-dependent, productive benthic marine ecosystems, but they are still regionally unknown compared to the euphotic zones (depths < 30m). In Brazil, the biogenic reefs are composed of coralline algae, sponges, bryozoans, and a few corals. They can occur as a free form of rhodolith, Halimeda sands, calcareous sediments, reefal patches, ridges and terraces, usually follow the shelf edge, and represents the most concentrated carbonate sediments in the shelf. An unprecedented data collection, including 12,314 sampled stations, covered the entire Brazilian continental shelf to identify the locations of mesophotic benthic habitats. With the Geographic Information System (GIS), we used regional depth data, bioclastic content (>70% CaCO₃), gravel sites, and bibliographic references to map mesophotic reef structures. The Bioclastic gravel areas were ground-truth by several scientific literature data and seabed inspection surveys at the Santos Basin. Results indicate an extensive Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP) on the outer shelf along the entire Brazilian Margin, from the equatorial zone in Amapá State to São Paulo state in the south. Possible mesophotic reefs southern of São Paulo still need confirmation. The Brazilian mesophotic zone has 508,552 km², and 17% is covered with these unique mixed biogenic reefs that cannot be classified as Mesophotic Coral Ecosystems (MCE) but have equal importance for sheltering, feeding grounds, and reproduction habitats for multiple marine species.

KEYWORDS

Bioconstruction, mesophotic reef, Brazil, GIS, carbonate facies

1. INTRODUCTION

Mesophotic reefs are critical environments that respond to almost 80% of the total reef habitats worldwide (Hinderstein et al., 2010; Pyle and Copus, 2019). Their importance goes beyond the ecology of the bioconstructors organisms. Still, it acts as a complex tridimensional habitat and shelter in the deep for a vast diversity of fauna and flora (Urbina-Barreto et al., 2021). They are also fundamental for food, e.g. fisheries, aquaculture, agriculture and genetic material repository (Groot et al., 2012; Pyle and Copus, 2019).

However, mesophotic regions are difficult to survey (Baker et al., 2016). Deeper areas involve more extensive and expensive marine research resources than shallow zones. Larger vessels, more qualified personnel, high-technological equipment such as sensors, remotely or autonomously operated vehicles, and high-definition sonars are needed (Menandro and Bastos, 2020). These challenging conditions are more evident in poor or developing countries because of the lack of financial investments in marine science (Sumaila et al., 2021).

Another restrictive issue for mapping the mesophotic region in Brazil is the considerable extension of the continental shelf. It has the most extensive coastline in South Atlantic, with 9,000 km (Figure 30) in length from Cape Orange (Amapá-AP) to the Chuí River mouth (Rio Grande do Sul-RS) (Silva, 2017). The area of the mesophotic zone in this coastal territory reaches the expressive amount of 508,552 km². Up to now, comprehensive and integrated studies about this environment over the Brazilian seabed are scarce.

Pioneer wide-scale seabed exploration along the Brazilian Margin goes back to the 70th, mainly motivated by recognizing its potential mineral reserves (Chaves, 1979; Martins and Coutinho, 1981). Milliman (1977)

mapped several benthic mesophotic habitats as calcareous algae reefs and assemblages of bryozoans and coralline algae at the equatorial and east sectors and agglomerates shells (mollusc, foraminifera and barnacles) toward the south. Since then, only regional-scale works have focused on specific shelf reefal environments, such as in the Manoel Luiz Reefs (Amaral et al., 2007; Dias et al., 2021) and Abrolhos bank (Castro and Pires, 2001; Amado-Filho et al., 2012a; Bastos et al., 2013; Francini-Filho et al., 2013; Bastos et al., 2015a; Mazzei et al., 2017; Dechnik et al., 2019; Menandro et al., 2020; Oliveira et al., 2020), rhodoliths beds (Dominguez et al., 2013; Moura et al., 2013; Bastos et al., 2015b; Carneiro and Morais, 2016; Amado-Filho et al., 2017; Vieira et al., 2019; Oliveira et al., 2020) or in local of possible structures with accurate sizing still unclear (Carneiro and Morais, 2016; Moura et al., 2016; Francini-Filho et al., 2018; Soares et al., 2018; Barbosa et al., 2020; Vale et al., 2022a).

The Western South Atlantic presents many mesophotic environment seascapes (Soares et al., 2019). Still, there is no proven occurrence of real Mesophotic Coral Ecosystems (Davies et al., 2004) (MCE) over the Brazilian Margin (Castro and Pires, 2001), as in eastern Australia (Great Barrier Reef), the United States (Hawaii and Gulf of Mexico) (Locker et al., 2010), the Caribbean (Bongaerts et al., 2010; Trembanis et al., 2017) and the Red Sea (Bongaerts et al., 2019).

In Brazil, carbonate reefs consist of a mix of encrusting coralline algae, sponges, and flourishing corals colonizing rocky outcrops (Castro and Pires, 2001; Bastos et al., 2015b; Dias et al., 2021) or beach rocks and dead bryozoan bioconstructions (Barreto et al., 1975; Milliman and Barretto, 1975; Milliman et al., 1975; Vital et al., 2005; Gomes and Vital, 2010; Bastos et al., 2018; Vale et al., 2022a).

The carbonate facies mapping in Brazil has been outdated for decades, and the most recent investigations focus on small regions and do not show a margin widescale facies occurrence. This extensive dataset aggregates essential information about carbonate and mesophotic reefs' most probable sizing and range. The main goal of this paper is to provide a more accurate map of the carbonate facies and relate them to already known mesophotic bioconstructions over the Brazilian Margin. We considered modern statistical and GIS techniques to reduce interpretation misconstructions.

For mapping the mesophotic carbonate and reef areas, we used three kinds of seabed information: i) visual descriptions from the Brazilian Navy, ii) academic research data, and iii) data from monitoring industrial development programs such as ports or Oil and Gas industry. However, the dataset collection is challenging because of multiple sources, analysis purposes, and the absence of a national databank that converges and standardizes all of this information.

The growing demand for natural resources (i.e. oil, food and minerals), the conflicts for marine space usage (i.e. fisheries or offshore wind farms) and their associated impacts on the environment further increase the need for mesophotic habitats protection in the Brazilian territory. Carbonate reefs in the mesophotic zone are still poorly known. It provides an exceptional ecological and biodiversity richness for benthic and pelagic interactions, sheltering feeding grounds, reproduction and habitats for multiple marine species, including those with vital economic interest.

We expect that this new map of carbonate facies and most probable mesophotic reef occurrence areas will provide good background information for governmental planning and decision-making about marine conservation units management improvements, environmental licensing, and seabed spatial and resources governance. Moreover, constantly actualized data, methods, and technologies can provide better tools to reach this objective.

2. STUDY AREA

2.1. Brazilian Continental Shelf Geological Settings

The Brazilian Margin extends from tropical to subtropical West South Atlantic (Figure 30), formed during the opening of the Atlantic Ocean at the Mesozoic. The continental shelf changes its width according to the basement morphostructural conditions and the sediment input to the marginal basins (Martins and Coutinho, 1981).

The shelf sediments are composed mainly of siliciclastic sands, with muds associated with massive riverine or estuarine systems, such as the Amazon, São Francisco, Doce, Paraíba do Sul rivers and La Plata River in Argentina. The shelf carbonates are mainly coralline algae, rhodoliths, bryozoans, maerl and crusts, mollusc and foraminifer's shells.

These carbonatic sediments can also be associated with the outer shelf beach rocks lineaments (Figueiredo Jr. and Tessler, 2004). More recently, also been associated with cold-water corals (Barbosa et al., 2020). These cold-water corals represent still unmapped rigid-bottom biogenic structures in the southern part of the Brazilian Margin (Kitahara et al., 2008).

2.2. Main oceanographic phenomena at the Brazilian shelf

The Brazilian Margin is highly affected by current, tide, and waves. The tide amplitudes change from more than 4 m in the northern sector to less than 2 m in the east and southern sectors. The main currents are the North Brazil Current (NBC), which flows northwestward and the Brazil Current (BC) southwestward (Figure 30), both resulting from the South Equatorial Current (SEC) split into Northeast states (Stramma and England, 1999; Silveira et al., 2000). The Abrolhos bank and the Vitória-Trindade chain create a vortex at the BC by the south, which could originate sporadic oceanic upwelling systems.

In the southern sector, seasonal coastal upwelling of the South Atlantic Central Water (SACW) occurs due to wind stress. Winds also influence the wave system, which is highly energetic on the coast. Storm waves gradually lose energy northwards and are generated mainly by the passage of cold front systems due to the trade winds and the Intertropical Convergence Zone (ITCZ) migration (Pianca et al., 2010). The Brazilian Coastal Current flow northward close to the shore (Souza and Robinson, 2004).

2.3. Brazilian Shelf Mesophotic Reefs

Rhodoliths and maerls are free-living types of crustose coralline algae that occur abundantly in the Brazilian mesophotic zone, encrusting over boundstones, oolites, rudstones fragments or sandstone clasts nuclei deposited at shallow water during lower sea levels (Steneck, 1986; Amado-Filho et al., 2012a; Vale et al., 2018). These rhodolith beds can be agglomerated and fused into larger carbonate masses (boxwork), originating important tridimensional rigid pavements, blocks and terraces (Bosence, 1983; Basso et al., 2012).

In the Equatorial Sector, the mesophotic reefs began to establish at the MIS2 (Marine Isotope Stage) (13,5 kyr BP to 12,1 kyr BP), migrating southward after the Young Dryas (7,1 kyr BP) (Vale et al., 2018; Mahiques et al., 2019). The East Sector presented much younger ages, from 789 to 1,851 Cal yr BP at the Sergipe (SE) and Alagoas (AL) states (Vale et al., 2022b), starting between 12 to 10 kyr BP at Abrolhos reefs (Bastos et al., 2013). In the southern Eastern Sector outer shelf, rhodoliths aged 4,734 Cal yr BP to the present have been recolonized by coralline algae and other benthic fauna (Tâmega et al., 2014). No dating results were available for the Southern Sector mesophotic reefs.

Indeed, Brazil has one of the largest rhodoliths coverage areas globally (Moura et al., 2013). They occur almost continuously from the Northern Sector to the Rio de Janeiro (RJ) shelf (Milliman, 1977; Dias and Medeiros, 2005; Amado-Filho and Pereira-Filho, 2012; Tâmega et al., 2014; Figueiredo Jr. et al., 2016; Moura et al.,

2016). In the Southern Sector, the rhodoliths reduce significantly, and the carbonate sediments occur due to foraminifers, mollusc and barnacles carapaces (Milliman, 1977; Dias and Medeiros, 2005; Dias et al., 2019).

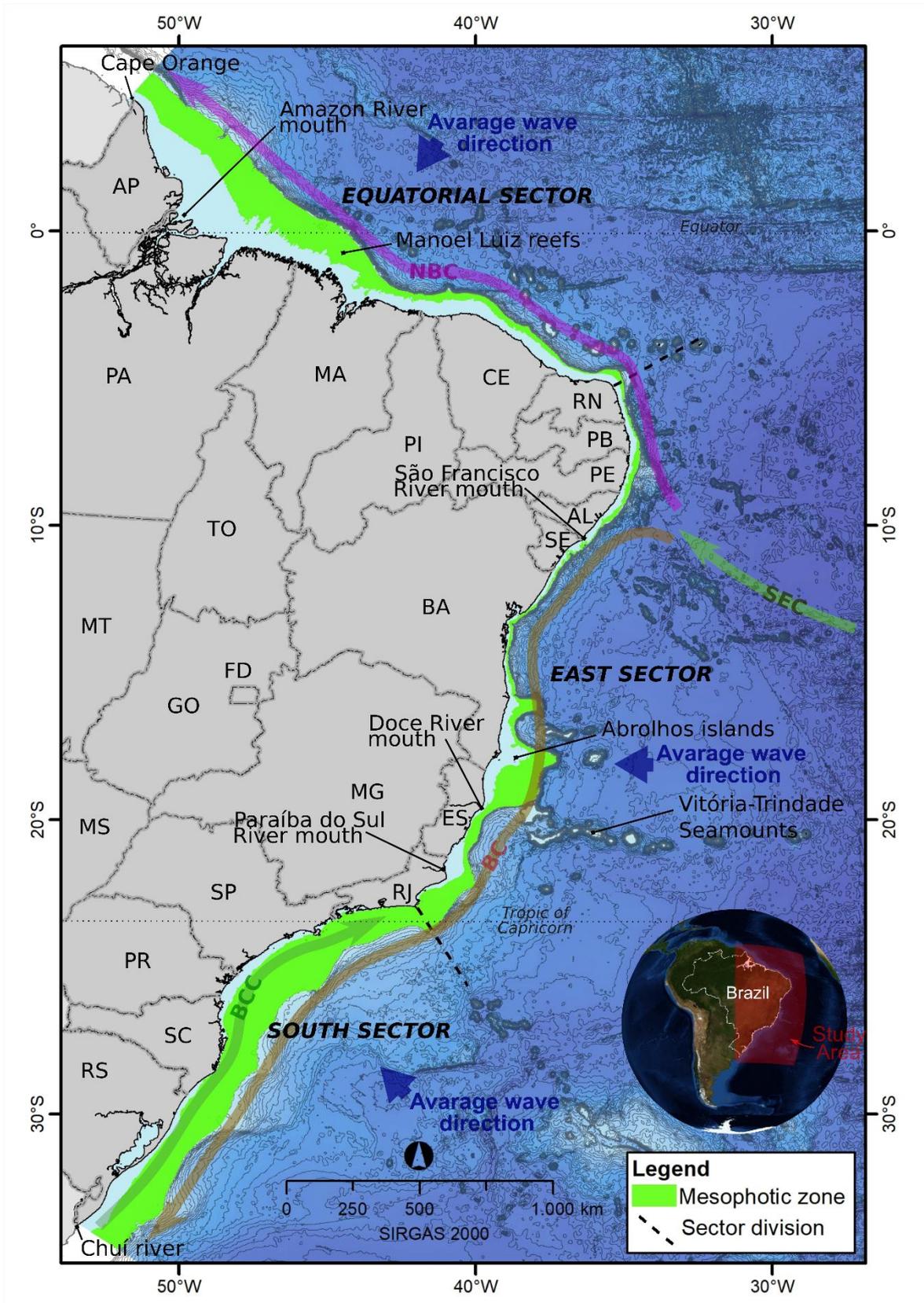


Figure 30. Mesophotic zone of the Brazilian Margin. The green area represents depths between 30 to 200m and covers an area of 508,552 km². This work divides the study area into three main sectors: Equatorial, East and South. SEC- South Equatorial Current,

NBC- North Brazil Current, BC- Brazil Current (Stramma and England, 1999; Silveira et al., 2000), BCC- Brazilian Coastal Current (Souza and Robinson, 2004), average wave directions from Pianca et al. (2010).

3. METHODS

The Brazilian Continental Shelf Research Program (LEPLAC in Portuguese) bathymetric surface (Alberoni et al., 2020) restricted the surveyed zone over the Brazilian Margin to depths between 30 and 200m. Inside this area, we found 12,314 sampled stations in the Brazilian Environmental Database for the Oil Industry (BAMPETRO) (Silva et al., 2003) (Figure 31A) using the GIS “Select by Location” tool. Still, only 3,061 stations (24.5%) came with laboratory-analyzed carbonate content results (Figure 31B). The other 9,253 stations (74.1%) consisted of visual qualitative description data from the Brazilian Navy’s National Oceanographic Database (BNDO) acquired for hydrographic purposes.

This visual description follows the “nature of the seafloor” general classification proposed by the International Hydrographic Organization (IHO)(International Hydrographic Organization, 2005) and replicated by the Brazilian Navy during its hydrographic survey operations (Dias et al., 2006; Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN), 2017). Over several years of hydrographic surveys (since 1955), many sediment class types were created due to numerous professionals with different levels of training who performed the analysis (Dias et al., 2006).

The frequency histogram of sampling stations by depth (Figure 31C) indicates that they occur mainly between 40 to 90m and slowly decrease from 90 to 200m. This higher frequency area provided a better mapping resolution for interpolation than the deepest regions.

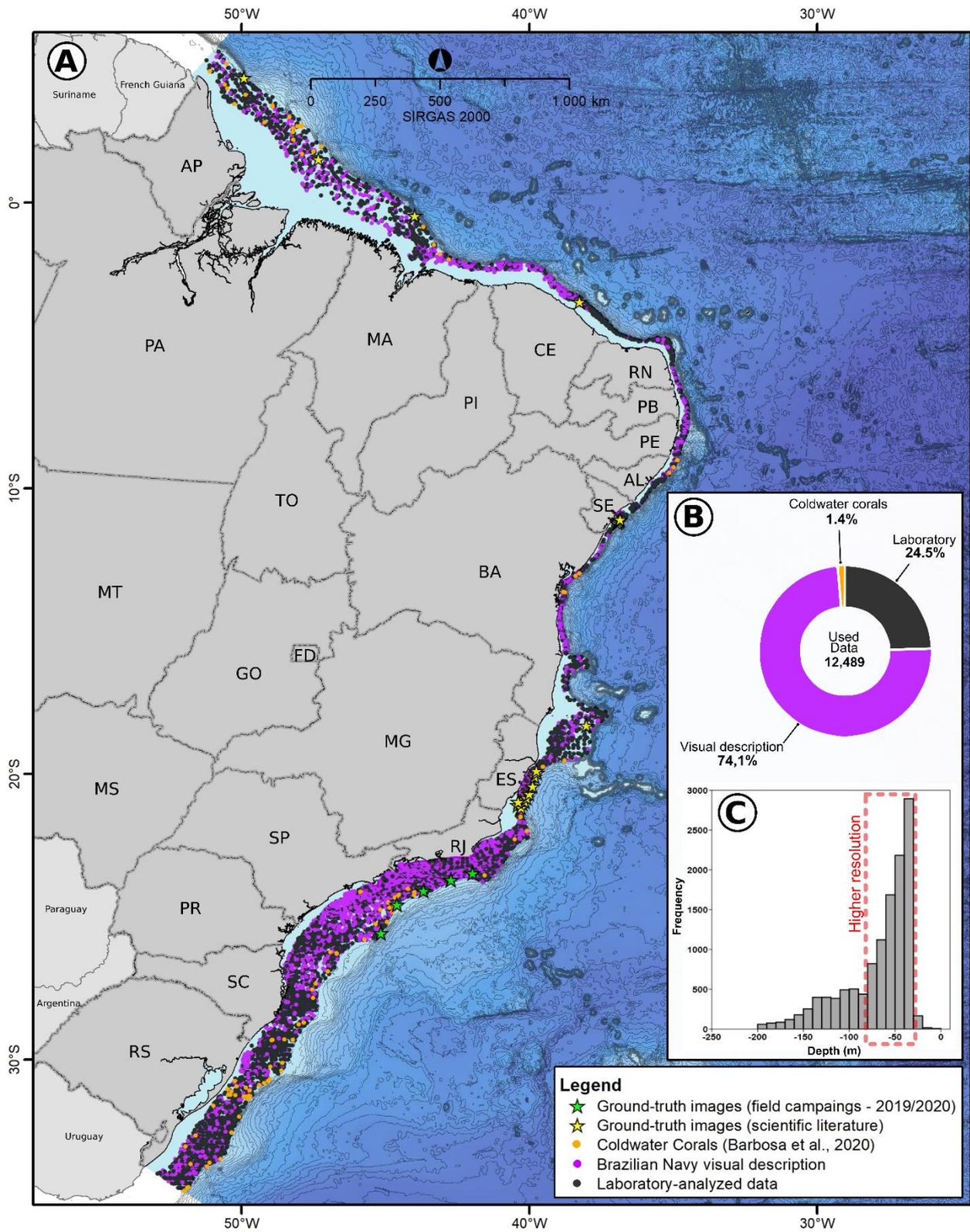


Figure 31. Sediment samples description. A- Location of all considered samples over the Brazilian Margin, including ground-truth stations from field campaigns and scientific literature. B- Percentage of dataset correspondence to laboratory-analyzed data (24,5%), Brazilian Navy visual description (74,1%) and cold water corals spots from Barbosa et al. (2020). C- Frequency histogram of sample stations by depth. The higher frequency of stations is located between 40 to 90m deep.

The Brazilian Navy visual descriptions were reclassified by Dias and Medeiros (2005) into 48 types, and later, Dias et al. (2006) reduced the classification into ten main classes. This work reduced into two main categories:

abiotic (grain size) and biotic (CaCO₃ content). The visual analysis sediment descriptions do not allow the precise grain size and carbonate content classification, so a numerical approximation was needed for interpolation.

Figueiredo Jr. et al. (2016) worked with the same dataset at the Campos Basin. They reduced the ten categories of Shepard (1954) grain size triangle classification into only three types (mud, sand and gravel) because of the diversity of data sources and different quality of information. The Larsonneur (1977) modified by Dias (1996) classification was also used to group the carbonate content results in four main classes: bioclastic ($\geq 70\%$), biolithoclastic ($\geq 50\%$; $< 70\%$), lithobioclastic ($\geq 30\%$; $< 50\%$) and lithoclastic ($< 30\%$) (Figueiredo Jr. et al., 2016). The same grain size and carbonate classification concept were adopted.

The biotic elements, such as corals, sponges, shells and algae, were directly related to gravel and Bioclastic, and abiotic components such as stones, pebble, rocks, slime, silt, and clay to Mud, Sand or Gravel (Figure 32). The dataset also accretes 175 cold water corals points at the mesophotic zone, highlighted by Barbosa et al. (2020), composed of 100% bioclastic gravels. These new content values recalibrated the laboratory-analyzed data and made the interpolation possible with the most robust data possible at the Brazilian Margin.

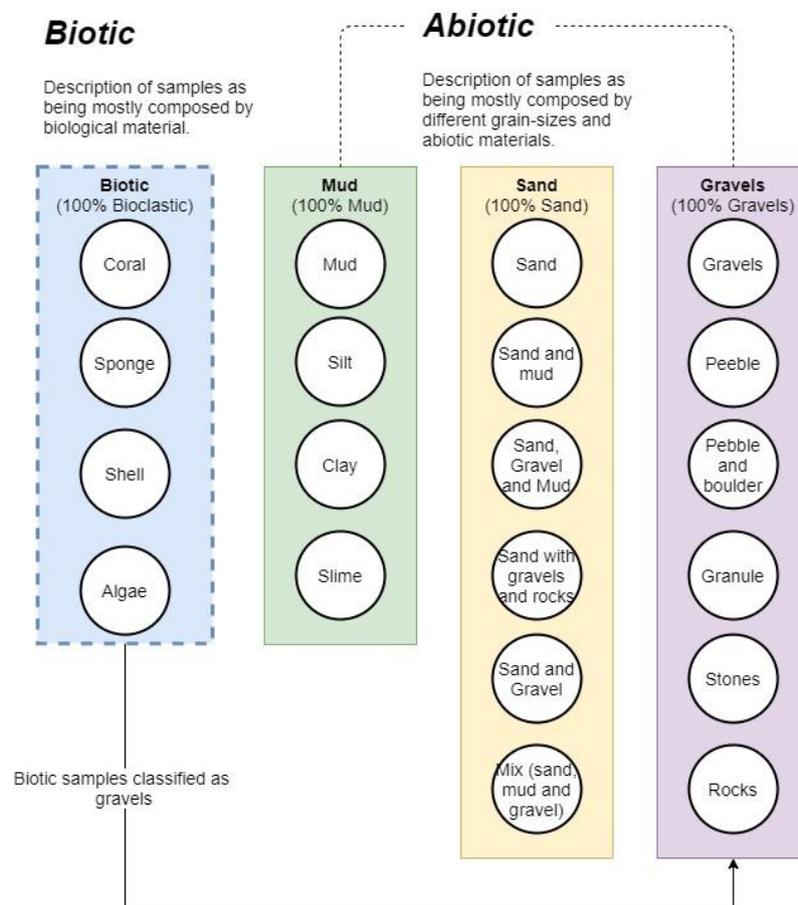


Figure 32. Qualitative sediment characteristics conversion to grain-size ternary classification (Shepard, 1954) and carbonate content ranking by Larsonneur (1977) adapted by Dias (1996).

A Principal Component Analysis (PCA) ran at Past 4.03 software identified what grain size best fits the carbonate content. The analysis considered the values of gravels, sand, mud and carbonate content in percentage as primary variables. The analysis computation used a correlation matrix method, and no data normalization was needed as the variables are in the same order of magnitude (%). A scatter plot confirmed the best PCA correlation results tendencies.

The interpolation method used to identify carbonate and grain size areas was the Inverse Distance Weight (IDW). The cell size was 0,03 decimal degrees (3,7km resolution), and the search radius and power were the GIS default (12 and 2, respectively). The mapping considered only samples with CaCO_3 and gravel contents greater than zero.

The mesophotic area polygon (depths between 0 and 200m) delimited the interpolation coverage. The “Raster Calculator” tool bounded the areas of the bioclastic ($\text{CaCO}_3 \geq 70\%$) and gravel (gravel content $\geq 50\%$). Raster files were converted into shapefiles by the “Raster to Polygon” conversion tool. The bioclastic and gravels boundaries were smoothed using the “Smooth Polygon” generalization tool (10km tolerance). Finally, the GIS “Intersect” tool identified the areas of gravels and bioclastic superimposed occurrence.

Several published scientific works provided ground-truth stations for the intersection, some with in situ visual inspections by Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) or submersible. Two oceanographic surveys realized in 2019 and 2021 at the southern sector (Santos Basin) provided visual ground-truth information for the Bioclastic Gravel areas (Figure 31). Five sampling stations at 150m were chosen to investigate the nature of the seafloor and the kind of carbonate facies that occur in that area. The oceanographic survey is part of the Santos Project - Santos Basin Environmental Characterization (PCR-BS), coordinated by PETROBRAS.

4. RESULTS

The results show the integration of carbonate content and grain size data. The PCA statistical response between grain size and carbonates was later superimposed and compared with background sampling carried out in field campaigns and obtained in the scientific literature.

4.1. PCA analysis

The PCA analysis results (88% of variance) (Figure 33A) directly correlated carbonate (mainly bioclastic) and gravel (Figure 33B) and showed an opposite relation between sand and mud. Sands are composed of Lithoclastic, Lithobioclastic and Biolithoclastic. Muds comprehended Lithoclastic and Lithobioclastic, and the Bioclastic with gravel content more significant than 50% defined the limit of carbonate facies mapping over the continental shelf.

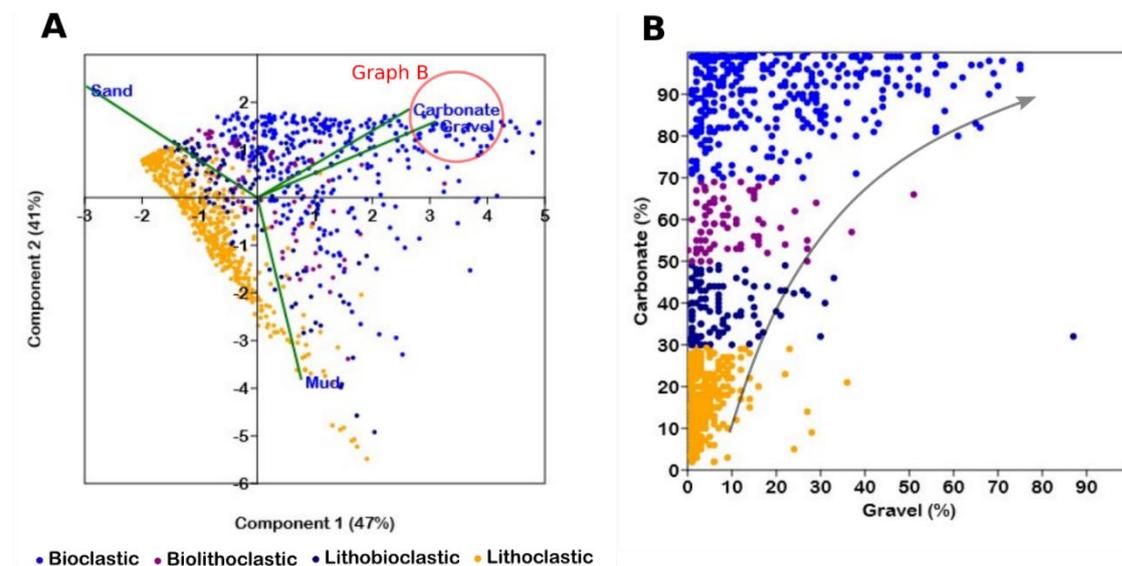


Figure 33. A- PCA analysis correlating grain size to carbonate content. Components 1 and 2 (88% of variance) are directly related to Gravel and Carbonate content (Bioclastic). B-scatter plot indicating this direct correlation (arrow) observed on PCA analysis. The areas of gravel content higher than 50% and $\text{CaCO}_3 > 70\%$ were mapped.

4.2. The mesophotic bioclastic and gravel facies map

Gravels occur mainly at the entire Brazilian margin outer shelf (Figure 34, left), and bioclastic (Figure 34, right) follow the same general pattern. However, differences happen more locally. In some areas, the carbonates seem to be more related to the sandy and muddy fractions, as the case off Ceará (CE) coast and between São Paulo (SP) and Santa Catarina (SC) states. In contrast, other high gravelly areas are related to lesser carbonate content, mainly off RS.

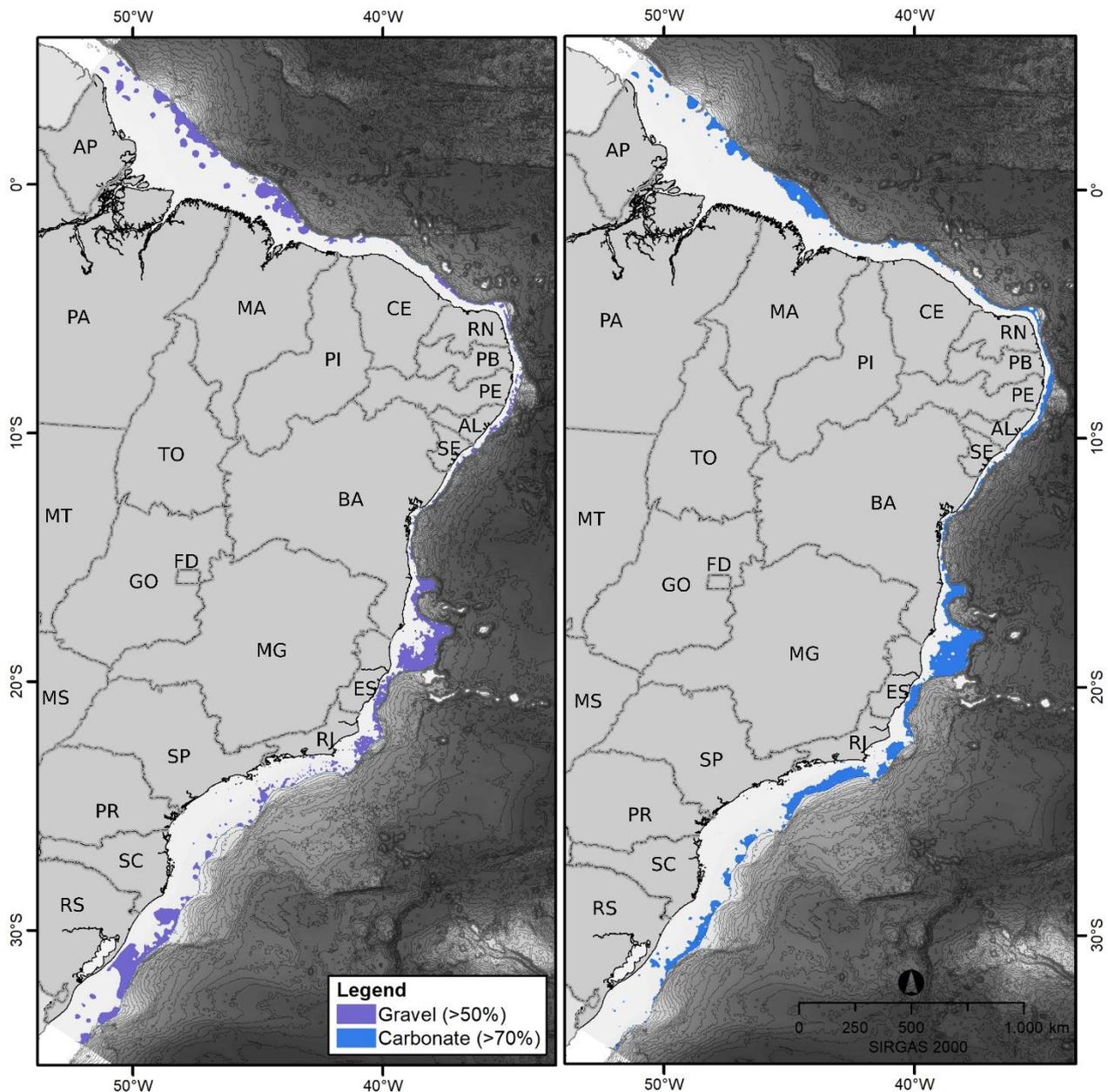


Figure 34. Gravelly areas ($\geq 50\%$) of the Brazilian mesophotic zone on the left. Bioclastic ($\text{CaCO}_3 \geq 70\%$) occurs over the Brazilian middle and outer shelf on the right.

The occurrence of bioclastic gravels spread out and is very punctual at almost all equatorial outer shelves, except off the Maranhão (MA) and the Rio Grande do Norte (RN) states (Figure 35). Practically all eastern Margin is composed of bioclastic gravels from RN to Alagoas (AL) and from southern Bahia (BA) to northern Rio de Janeiro (RJ). Sergipe (SE) and northern BA presented some stippled areas. The southern Margin showed

representative patches at RJ and north of Paulo São (SP), with very sparse dots at the southern states of SC and RS.

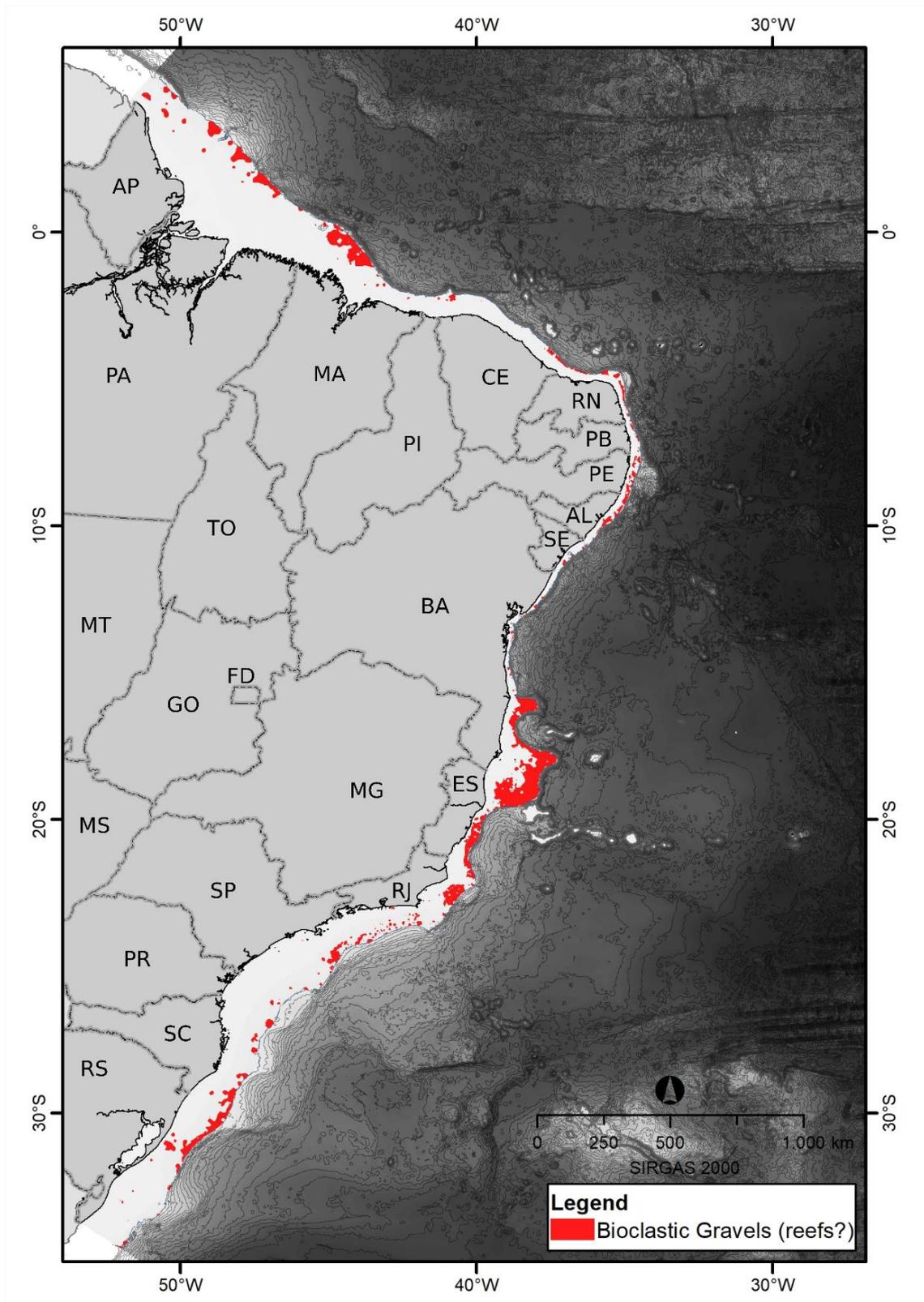


Figure 35. The intersection between Gravel and Bioclastic areas at the mesophotic zone. These areas indicate the most probable occurrence of structured benthic communities' associations as reefs and rhodoliths bottom.

4.3. Ground-truth comparison between the Bioclastic facies areas, the field campaign and the scientific literature

The Equatorial Sector presented a good spatial match between the previously uncovered mesophotic reefs (Moura et al., 2016; Vale et al., 2022a) and rhodolith beds (Moura et al., 2016; Amado-Filho et al., 2017) with the areas of Bioclastic sediments (Figure 36). The mesophotic reefs visited by Vale et al. (2022a) spatially agreed with the highlighted Bioclastic facies modelled by the GIS (Figure 37A, B and C).

Also, the mesophotic Bioclastics surround the shallow reefs of Manoel Luis, strongly indicating the extension of this feature to deeper waters, as also pointed out by Vale et al. (2022). However, the GIS model could not identify smaller reef patches, as the isolated reef of 2km² off the Ceará coast (Figure 8D) was visited by Soares et al. (2018).

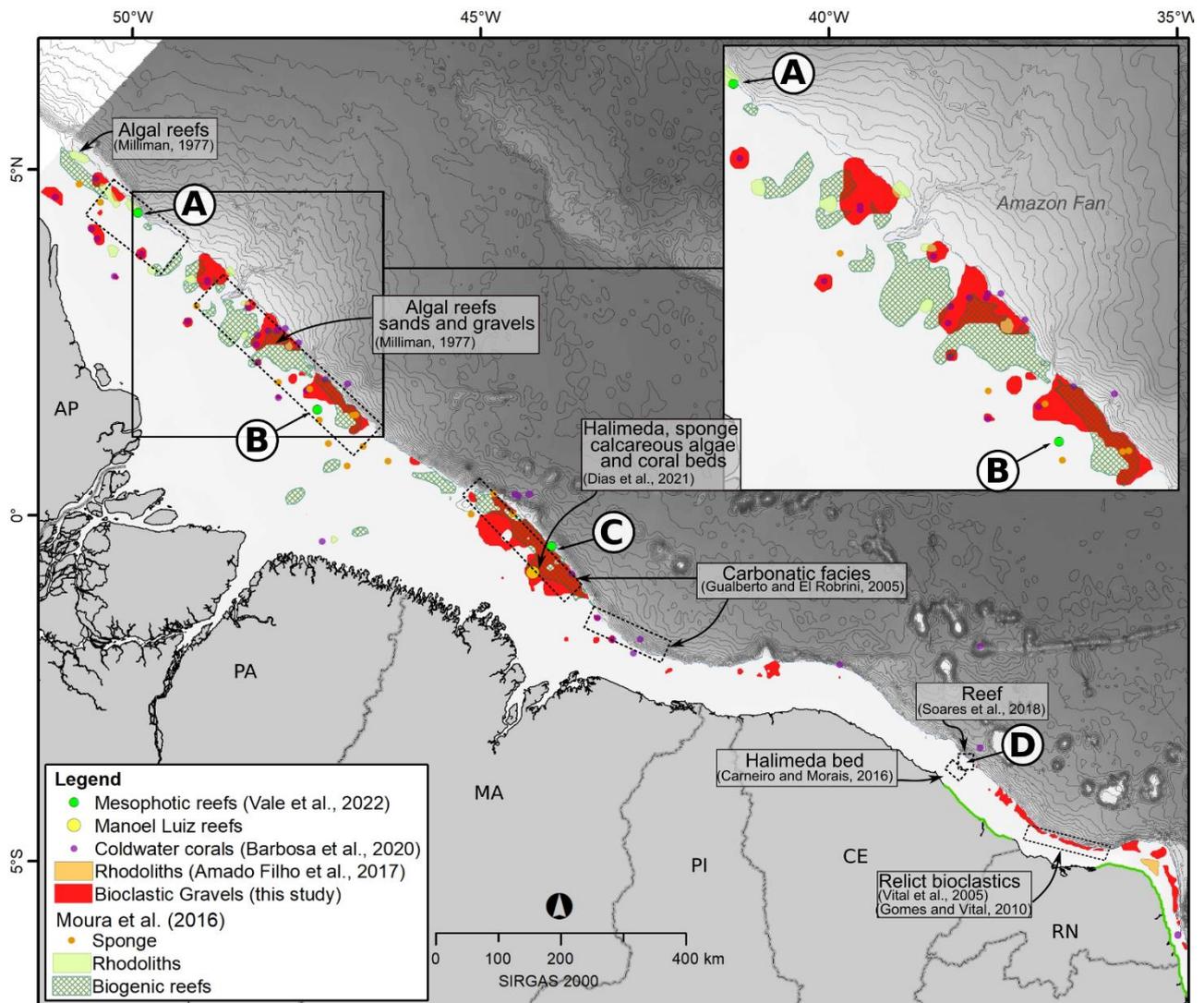


Figure 36. Comparison between the mesophotic structures mapped in this study and scientific literature in the Equatorial sector. Dashed squares are the location of the indicated facies. Mesophotic reefs indications show in Figure 37.

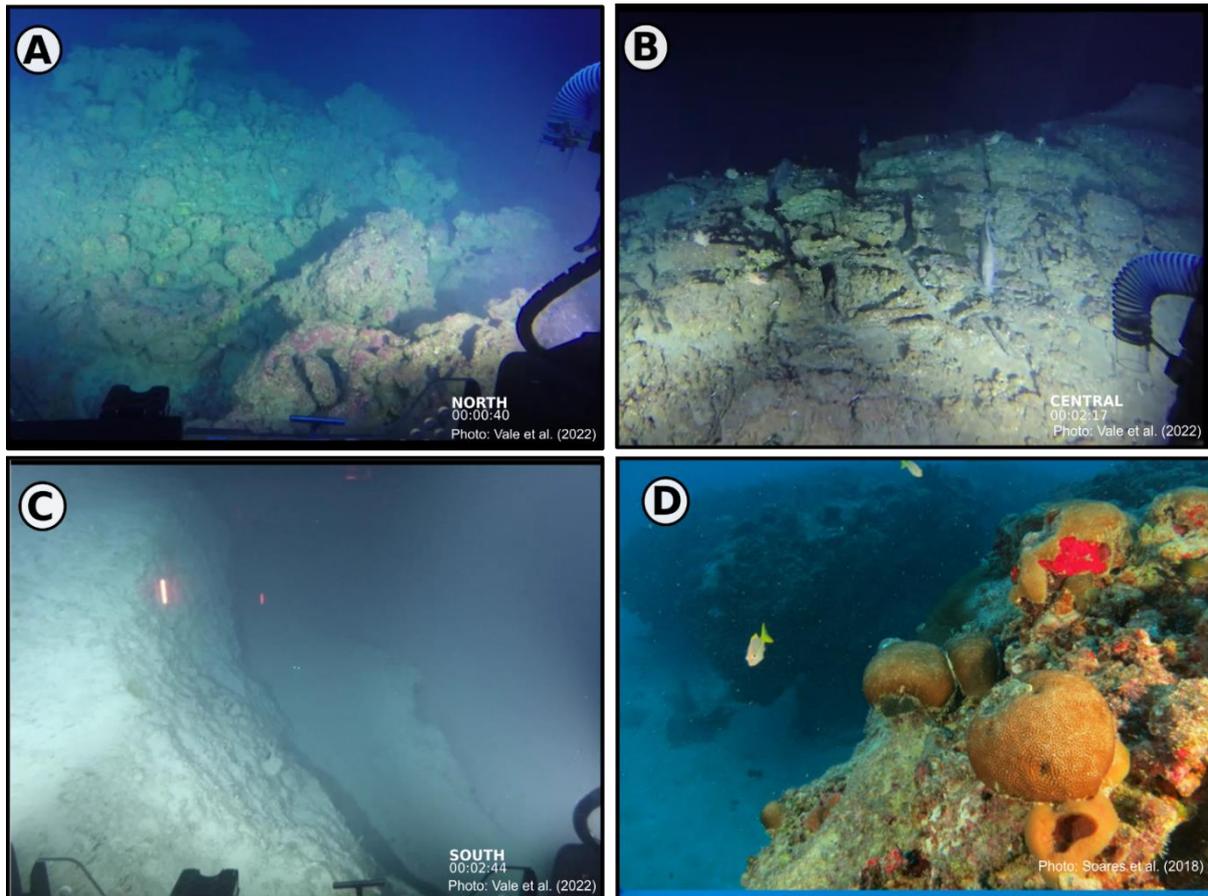


Figure 37. A, B and C- mesophotic reefs at Amazon shelf. D- mesophotic reef at Ceará coast. Photos A, B and C were extracted from the supplementary data provided by Vale et al. (2022), and photo D was extracted from Soares et al. (2018). Photo locations at Figure 36.

The same good spatial match pattern in the East Sector is observed between the Bioclastic gravel intersection and the already mapped structures by the scientific literature. Off the BA coast, there is a significant difference between the mapped Bioclastic facies and the rhodoliths areas highlighted by Amado-Filho et al. (2017) (Figure 38). The areas with higher coralline algae content (>76%) corresponded to the bioclásticos and gravel sediments observed by Dominguez et al. (2013), and we used them as mapping references for this paper.

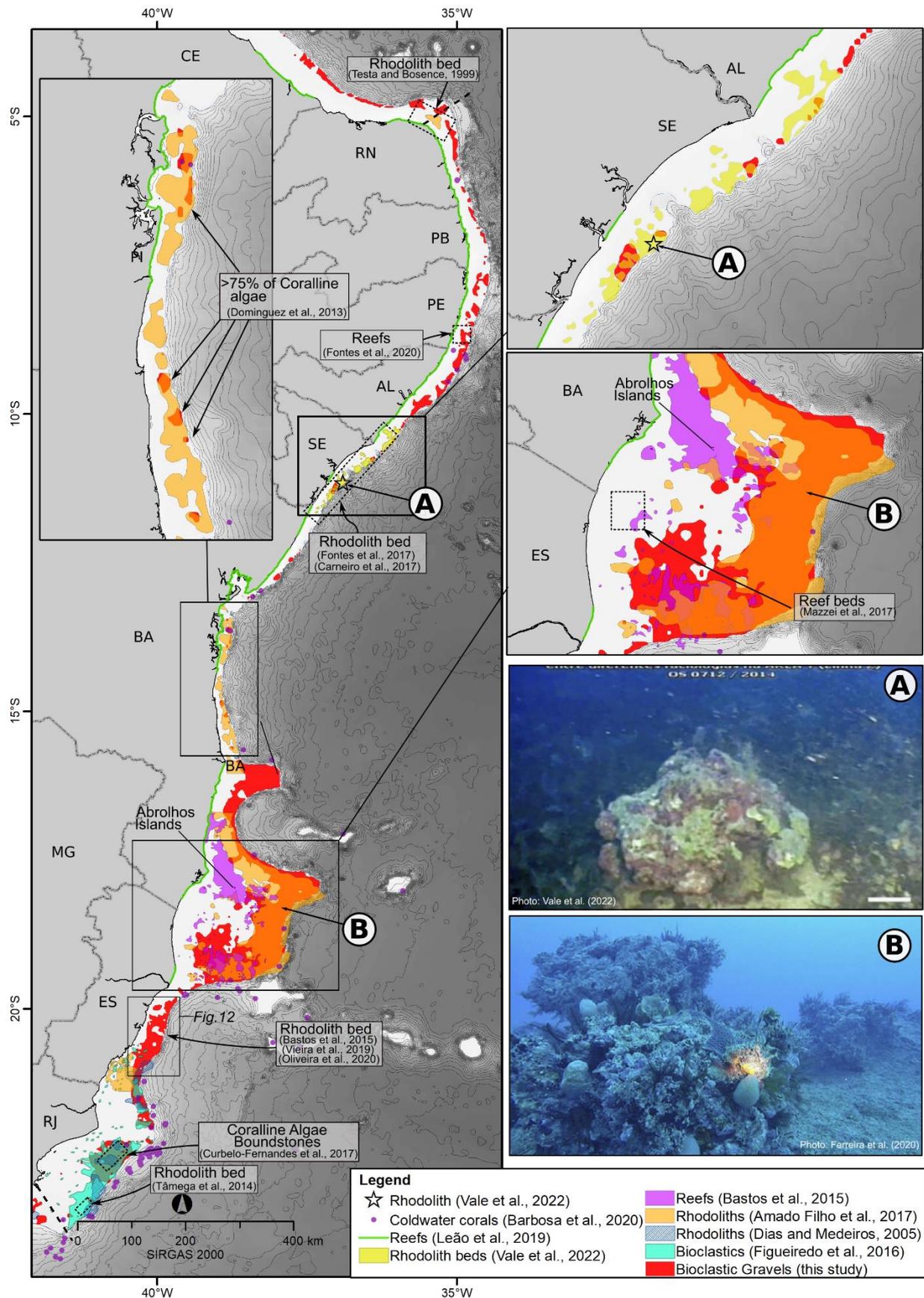


Figure 38. Comparison between the mesophotic structures mapped in this study and scientific literature in the East sector. Extensive rhodolith beds and reef patches at Abrolhos bank are present in the new dataset. Smaller areas occur due to the restricted gravel areas

compared to bioclastic sands. Dashed squares are the location of the indicated facies. Photos A was extracted from Vale et al. (2022b) and B from Ferreira et al. (2020).

Still, in the East Sector, a vast diversity of mesophotic structures occurs along the outer shelf (PETROBRAS, 2010) ES with an excellent correspondence with the GIS modelled Bioclastic areas. Free-living rhodoliths (Figure 39A), rhodoliths aggregates (Figure 39B), rhodolite mounds (Figure 39C, E and G) and other massive algae buildups (Figure 39D, I, K and L) bioconstructions compose the seascape on that sector.

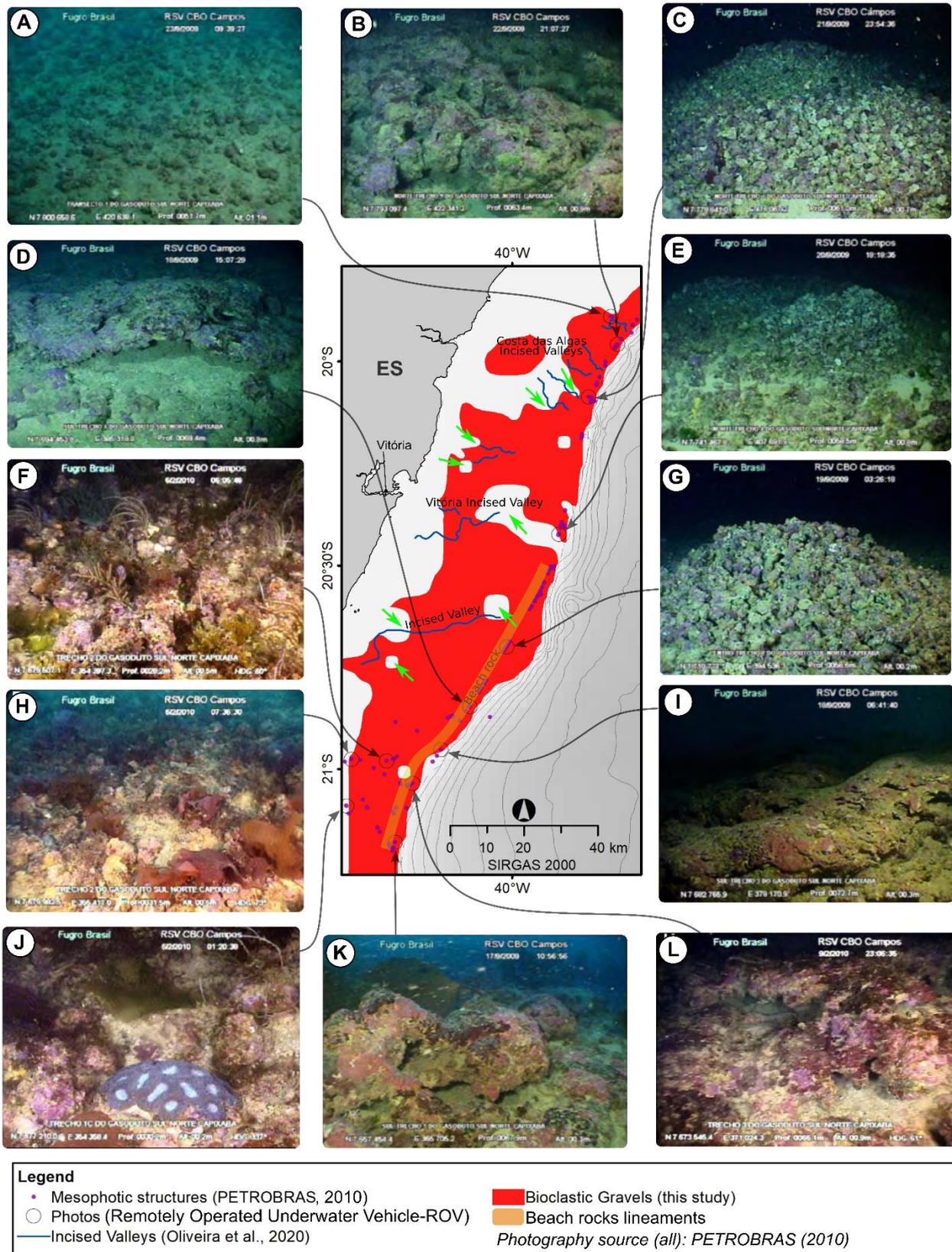


Figure 39. Several types of mesophotic systems off ES shelf: A- Free-living rhodoliths; B- rhodolith aggregates; C, E and G- rhodolith mounds; D, I, K and L- major calcareous algae concretions (buildups); F, H and J- mesophotic structure biological diversity (association with macroalgae and coral species). The comparison between the mesophotic structures mapped in this study and calcareous algae spots images from Remotely Operated Underwater Vehicle (ROV) shows a satisfactory spatial correlation. All photos were obtained by PETROBRAS (2010) surveys and published during the environmental licensing process (Environmental Impact Assessment – EIA technical report) of the Norte Capixaba Gas pipeline project.

In the South Sector, ROV inspection visually shows that these bioconstructions can be similar to those found close to the East Sector border, mainly composed of calcareous algae box works and buildups (Figure 40A and B) and rhodolith bottoms (Cavalcanti et al., 2012). The field surveys in the same area (Santos Basin) identified several mesophotic bioconstructions with different evolutionary stages (Figure 41). They visually ground-truth the Bioclastic Gravel areas highlighted in this study, with the presence of massive calcareous algae box-works, rhodolith bottom and crinoids field that size and quantity gradually decreasing southward.

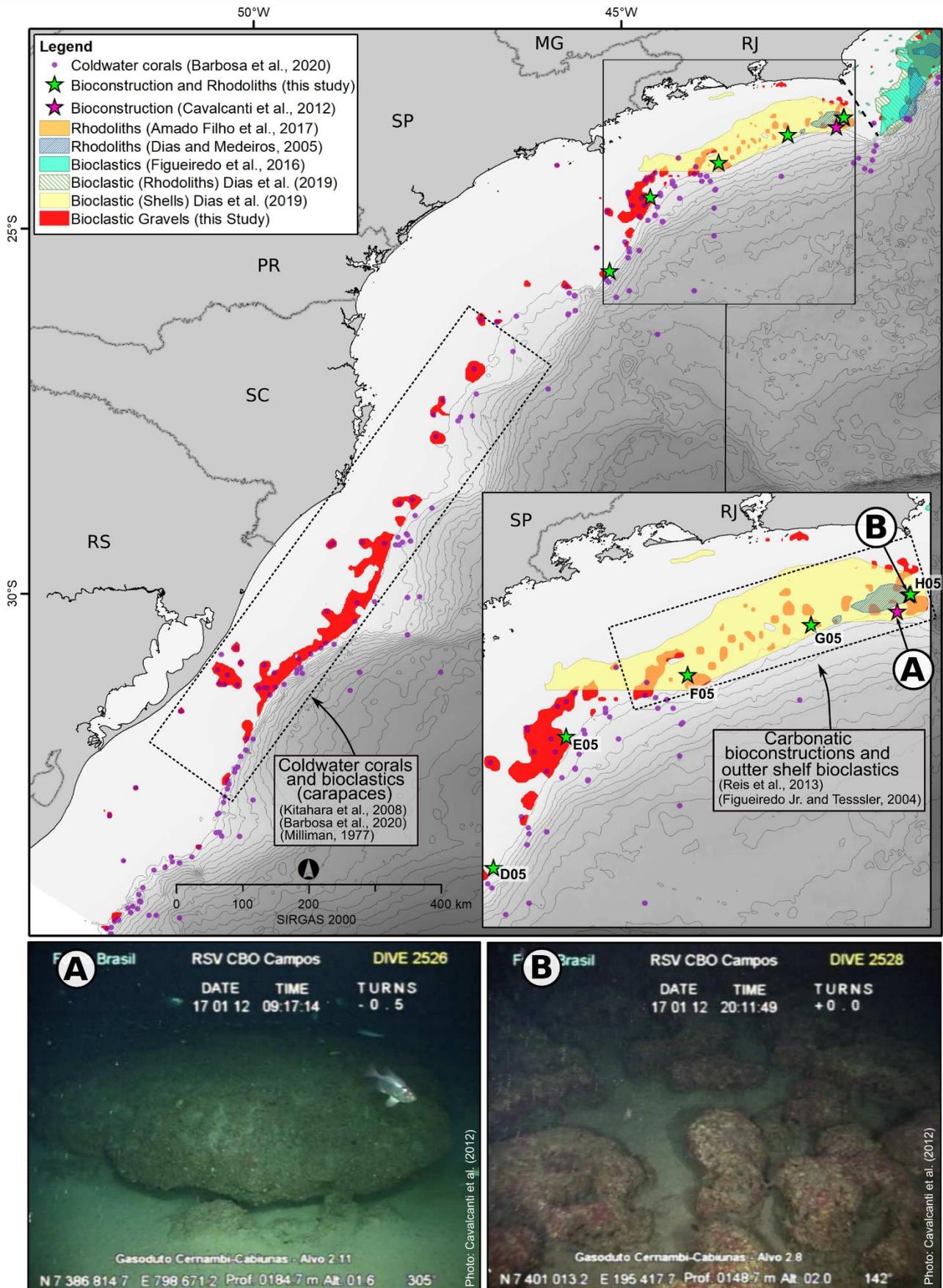


Figure 40. Comparison between the mesophotic structures mapped in this study and scientific literature in the South sector. Rhodolith bed clusters and bioconstructions occur off RJ and SP states. The main carbonate areas are biodetritus and cold-water coral spots in the

south. Dashed squares are the location of the indicated facies. All photos were obtained by Cavalcanti et al. (2012) surveys and published during the environmental licensing process (Environmental Impact Assessment – EIA technical report) of the Cernambi-Cabiunas Gas pipeline project.



Figure 41. Ground-truth samples over the southern sector (Santos Basin) in 2019 and 2021 show examples of the carbonate facies variety close to the shelf break. The location of the stations is in Figure 11. Arrows indicate H05- sponge-associated with coralline

algae buildup, G05- living coralline algae box-works, F05- crinoids, E05- the presence of rhodoliths with coralline algae debris, and D05 - reddish gravels with a living film of coralline algae and fragments.

5. DISCUSSIONS

This study presents the first regional mapping of carbonate facies areas over the entire Brazilian continental Margin based on massive data collection, modern GIS techniques and extensive comparison with scientific literature as ground-truth input. Local differences between the facies map presented in this work and the one carried out by the pioneer map of Milliman (1977) are mainly due to the large amount of data input used here, significantly improving the details due to the better spatial resolution achieved.

5.1. Equatorial Sector

The Equatorial Sector houses some of the Bioclastic Gravels' vast patches and lineaments at the outer shelf. Milliman (1977) mapped calcareous algal structures and their associated sands and gravels, related to relict structures due to shallow water fossils and ooids dated from 14,400 to 38,000 years ago (Milliman and Barretto, 1975; Milliman et al., 1975). These mesophotic sandstone reefs (Figure 36) sustain living benthic organisms like sponges, incrusting coralline algae, rhodoliths and corals species (Figure 37A, B and C) (Moura et al., 2016; Vale et al., 2022a).

To the southeast, the reefs of Manoel Luiz are Holocene shallow reefs that, similarly to Brazilian Abrolhos reefs, followed the sea level rise during the last marine transgression. Corals do not construct the ML reefs; the existing sparse colonies of corals are fixed on structures formed by crusts of calcareous coralline algae (Moura et al. 2016; Dias et al., 2021). The *Halimeda incrassata* field off the CE coast (Carneiro and Morais, 2016) is at the euphotic zone, and there is no extension to depths greater than 30m, except for an isolated mesophotic reef patch of 2km² (Figure 37D) (Soares et al., 2018). Bioclastic gravels at RN state outer shelf are related to relict sediments close to extensive beach rock lineaments (Vital et al., 2005; Gomes and Vital, 2010).

The mapping resolution and lesser data recovery explain the absence of Bioclastic areas at CE, close to the reef patch highlighted by Soares et al. (2018). This specific reef patch covers an area lesser than the cell size used and could represent an underestimate by the interpolation setting used. Nevertheless, the mesophotic reefs off Ceará state seem more isolated and smaller than their northern equivalents. The significant narrowing of the CE mesophotic zone also explains this sector's considerable decrease in bioclastic gravels.

5.2. East Sector

Northeastern Brazil is rich in rhodolith bottoms, increasing occurrence in waters deeper than 40m. Complex rhodolith fused structures, maerl and Bioclastics occur abundantly in Sergipe-Alagoas Basin (Vale et al., 2022b) and off the coast of Bahia (Dominguez et al., 2013), being more evident in the region of the Abrolhos bank (Horta et al., 2016; Mazzei et al., 2017). This region, in particular, is the largest area of mesophotic reefs at the Brazilian Margin, with terraces, pinnacles and rhodolith bottom already reasonably uncovered (Leão and Dominguez, 2000; Moura et al., 2013; Bastos et al., 2015b, 2018; Vieira et al., 2019; Ferreira et al., 2020).

These extensive coralline algae formations occur at the mesophotic zone of the east Margin (Testa and Bosence, 1999; Dias and Medeiros, 2005; Tâmega et al., 2014; Bastos et al., 2015b; Figueiredo Jr. et al., 2016; Amado-Filho et al., 2017; Carneiro et al., 2017; Vieira et al., 2019; Fontes et al., 2020; Oliveira et al., 2020) and are intimately related to this study's bioclastic gravels areas. Indeed, this environment is a critical continental shelf bio-factory of CaCO₃ on a maximum estimated rate of ~1m 10³yr (Amado-Filho et al., 2012a).

At ES and RJ states shelves, free-form rhodoliths beds and coralline algae concretions (genus *Mesophyllum*, *Phymatolithon* and *Sporolithon*) as pinnacles and boundstones crests dominate the outer shelf (Dias and Medeiros, 2005; Marangoni et al., 2013; Tâmega et al., 2014; Figueiredo Jr. et al., 2016; Curbelo-Fernandez et al., 2017; Vieira et al., 2019). Some of these bioconstructions (algal bottom, bars, and lineaments) follow ancient shorelines (beach rocks) that survived the last Quaternary sea-level rise (Figueiredo Jr. et al., 2016; Curbelo-Fernandez et al., 2017). This area presents a satisfactory spatial relation to the proposed mesophotic bioclastic areas (Figure 39).

The rhodolith mounds (Figure 39C, E and G) are formed by the fish *Malacanthus plumieri*, transporting and aggregating the rhodoliths (Amado-Filho et al., 2012b). Mainly calcareous algae associated with other spatially scattered bioconstructors benthic organisms as hermatypic corals (e.g. *Mussismilia hispida* found in Figure 39J) happens in the same pattern observed in other Brazilian (Amaral et al., 2007; Amado-Filho et al., 2017; Dechnik et al., 2019; Dias et al., 2021) and worldwide carbonatic areas (Pyle and Copus, 2019).

Even with the 0,03 decimal degrees resolution, it was also possible to identify the influence of some incised valleys at the Bioclastic facies. These incised valleys are associated with the rhodolith beds by the valley flanks and bottom (Oliveira et al., 2020). However, there is a tendency for sediment sorting from carbonate gravel to sand in some valley sections (green arrows in Figure 39).

5.3. South Sector

The presence of these bioconstructions and the outer shelf bioclastics significantly expand southwestward the area of rhodolith beds shown by Dias and Medeiros (2005) until the SP coast (Figure 40). Also, these thick biogenic layers over the outer shelf can represent spotted mesophotic reefs or calcareous algae mounds related to beach rocks lineaments (Figueiredo Jr. and Tessler, 2004) as found at the northern RJ state shelf (Figueiredo Jr. et al., 2016).

Off RJ state, some works indicate patches of algal reef sands and gravels mixed with mollusc and benthonic foraminifera and rhodoliths beds (Dias and Medeiros, 2005). However, Reis et al. (2013) used sub-bottom profiler data to indicate some areas with the vast presence of bioconstructions with 10m thickness. Still, they did not show which type and its lateral continuity.

Still, mapped cold-water corals from depths greater than 30m (Kitahara et al., 2008, 2009; Pires, 2016; Barbosa et al., 2020) possibly highlight structures in the south region between SC and RS. These cold-water corals can happen associated with bioclastic sediments (carapaces) or hard-bottom substrates (Kitahara et al., 2008). Pires (2016) affirms that this spotted occurrence of cold-water corals can highly indicate unknown and unmapped rigid carbonate structures. Furthermore, the presence of these organisms is closely linked to the carbonate sediments occurrence and can predict and map seabed facies and features (Kitahara et al., 2008).

5.4. Recognition of the Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP)

The Brazilian mesophotic reefs are mainly composed of massive living coralline algae crusts over many rigid-bottom substrates such as beach rocks, sandstones, rocky outcrops, or older dead bioconstructions of cemented and fused rhodolith bottom, Halimeda or bryozoans, not related to Scleractinian stony corals. The Brazilian mesophotic reefs cannot be classified as Mesophotic Coral Ecosystems (MCE), as recently proposed by Soares et al. (2018, 2020) and Francini-Filho et al. (2019). This “coral reef” misclassification can be explained by the essence of the “reef” concept, and this discussion is not exclusive to the Brazilian coast (Tomascik et al., 2021, 2022).

The pioneering work of Collette and Rutzler (1977) considers as “reef” the benthic and demersal assemblages, including rhodoliths and sponges at the outer shelf bottom. The same term for rigid

biogenic constructions (e.g. coralline algae, gorgonians, bryozoans and vermetids), rock outcrops and even artificial structures (e.g. tires or concrete blocks). Holt et al. (1998) complemented this definition, describing reefs as accumulations rising from the seabed with distinct, recognizable characteristics from the surroundings. All kinds of “reefs” can represent the same ecological role of the stable tridimensional pattern, acting as a substrate for benthic species development (Braithwaite, 1973) or shelter for reef fishes and invertebrates species (Collette and Rutzler, 1977).

On the other hand, typical “coral reefs” are built explicitly by overlapping aggregates of Scleractinian stony corals, forming a great variety of geomorphic features (Lesser et al., 2009; Kench, 2013; Burkepile and Hay, 2018) and are the main responsible for the surrounding carbonate sediments (Weinstein et al., 2014). In true “coral reef” areas worldwide, stony MCEs are associated with the adjacent shallow reef areas, representing a mixed environment of corals, coralline algae, sponge and macroalgae, with coral diversity highly influenced by light attenuation (Lesser et al., 2009; Hinderstein et al., 2010; Kahng et al., 2016).

Scleractinian coral species are abundant in some Brazilian shallow reefs, as an example of the endemic corals *Mussismilla hispida* and *Mussismilla braziliensis*, but it has already been proven that they are not protagonists in the bioengineering of the reefs themselves, mainly composed of bryozoans (44%), calcareous algae (28%) and corals (23%) (Bastos et al., 2018). In addition, they have an undermost contribution as a Bioclastic source to the continental shelf (Dias, 2000; Amado-Filho et al., 2012a; Dias et al., 2021; Randi et al., 2021).

Even the cold-water corals that occur at the continental shelf (stony or soft coral individuals) and their relation with the mesophotic reefs are questionable. They presented some spatial relation with the GBMBP, but indeed they are not the most efficient indicator of reefal areas; as Kitahara et al. (2008) proposed, once its gardens can also flourish unattached and placed directly over soft bottoms in hydrodynamically stable areas.

6. CONCLUSION

This paper presents a new and more realistic regional map of the carbonate facies over the Brazilian continental shelf. Bioclastic gravels are (statistically and spatially) the better indicators of seabed bioconstructions, corresponding positively to several already-mapped and visually ground-truthed mesophotic reefs over the entire shelf.

It is crucial to highlight that the GBMBP cannot be interpreted as being an MCE because of three main factors: 1) they are not dominated by living stony coral species, 2) they are not directly linked to shallow “coral reefs” environments and 3) they are not attached to ancient coral structures as found in the true MCEs worldwide. The Brazilian mesophotic reefs are dominated by coralline algae, whose origin is related to upper Quaternary transgression, and are strongly influenced by the sea-level rise and burial influx rate at the shelf.

Indeed, most of the algal reefs in the investigated mesophotic areas represent relict deposits of rhodoliths formed in shallow relict deposits during the regressive phase of sea level in the last glacial period. These deposits evolved into stable reef forms in the final stages of the Holocene transgression.

We were surprised when this unprecedented dataset made it possible to see the great extent of the Bioclastic facies corresponding to the Great Brazilian Mesophotic Bioconstruction Province (GBMBP). In total, 17% (85,555 km²) of the Brazilian mesophotic zone (508,552 km²) is covered by these mixed bioconstructions habitats. In particular, the South sector suffers from very few seabed uncovering publications and scarce imagery for ground-truthing and research investments are highly recommended for this region.

It is also imperative to understand that the GBMBP reefs can sustain environmental importance similar to MCEs, acting as shelter, reproduction and feeding areas for many marine species. The maritime space users

should consider protection efforts in the presence of the GBMBP inside, below or over their ventures, both in the licensing, management and monitoring phases.

7. ACKNOWLEDGEMENTS

The authors are grateful to the Brazilian Navy, which provided part of the historical sediment dataset. We are also grateful to the Marine Geology and Geophysics Laboratory (LAGEMAR-UFF) and the Ocean and Earth Dynamics Graduate Program (DOT-UFF) for providing laboratory time for data analysis. The authors grateful to PETROBRAS Santos Project - Santos Basin Environmental Characterization (PCR-BS) for the support of field sampling, laboratory analysis and financial resources from RD&I investments clauses of the Brazilian National Agency for Petroleum, Natural Gas and Biofuels (ANP). A special thanks to the colleague Maitê Freire de Medeiros, who first initiated this enormous dataset gathering and standardization.

8. BIBLIOGRAPHY

- Alberoni, A. A. L., Jeck, I. K., Silva, C. G., and Torres, L. C. (2020). The new Digital Terrain Model (DTM) of the Brazilian Continental Margin: detailed morphology and revised undersea feature names. *Geo-Marine Lett.* 40, 949–964. doi:10.1007/s00367-019-00606-x.
- Amado-Filho, G. M., Bahia, R. G., Pereira-Filho, G. H., and Longo, L. L. (2017). South Atlantic rhodolith beds: Latitudinal distribution, species composition, structure and ecosystem functions, threats and conservation status. *Coast. Res. Libr.* 15, 299–317. doi:10.1007/978-3-319-29315-8_12.
- Amado-Filho, G. M., Moura, R. L., Bastos, A. C., Salgado, L. T., Sumida, P. Y., Guth, A. Z., et al. (2012a). Rhodolith beds are major CaCO₃ BIO-factories in the tropical south West Atlantic. *PLoS One* 7, 5–10. doi:10.1371/journal.pone.0035171.
- Amado-Filho, G. M., and Pereira-Filho, G. H. (2012). Rhodolith beds in Brazil: A new potential habitat for marine bioprospection. *Rev. Bras. Farmacogn.* 22, 782–788. doi:10.1590/S0102-695X2012005000066.
- Amado-Filho, G. M., Pereira-Filho, G. H., Bahia, R. G., Abrantes, D. P., Veras, P. C., and Matheus, Z. (2012b). Occurrence and distribution of rhodolith beds on the Fernando de Noronha Archipelago of Brazil. *Aquat. Bot.* 101, 41–45. doi:10.1016/j.aquabot.2012.03.016.
- Amaral, F. D., Hudson, M. M., Steiner, A. Q., and Ramos, C. A. C. (2007). Corals and calcified hydroids of the Manuel Luiz Marine State Park (State of Maranhão, Northeast Brazil). *Biota Neotrop.* 7, 73–81. doi:10.1590/s1676-06032007000300008.
- Baker, E. K., Puglise, K. A., and Harris, P. T. (2016). *Mesophotic coral ecosystems. A lifeboat for coral reefs?*.
- Barbosa, R. V., Davies, A. J., and Sumida, P. Y. G. (2020). Habitat suitability and environmental niche comparison of cold-water coral species along the Brazilian continental margin. *Deep. Res. Part I Oceanogr. Res. Pap.* 155, 103147. doi:10.1016/j.dsr.2019.103147.
- Barreto, L. A., Milliman, J. D., Amarai, C. A. B., and Francisconi, O. (1975). “Northern Brazil,” in *Upper continental margin off Brazil*, eds. J. D. Milliman and C. P. Summerhayes (Contributions to Sedimentary Geology), 11–43.
- Basso, D., Dias, G. T. de M., and Henriques, M. C. (2012). The occurrence of coralligène de plateau in Brazilian coastal waters. in *IV International Rhodolith Workshop* (Granada).
- Bastos, A. C., Costa Moscon, D. M., Carmo, D., Neto, J. A. B., and da Silva Quaresma, V. (2015a). Modern sedimentation processes in a wave-dominated coastal embayment: Espírito Santo Bay, southeast Brazil. *Geo-Marine Lett.* 35, 23–36. doi:10.1007/s00367-014-0387-x.
- Bastos, A. C., Moura, R. L., Amado-Filho, G. M., D’Agostini, D. P., Secchin, N. A., Francini-Filho, R. B., et al. (2013). Buracas: Novel and unusual sinkhole-like features in the Abrolhos Bank. *Cont. Shelf Res.* 70, 118–125. doi:10.1016/j.csr.2013.04.035.

- Bastos, A. C., Moura, R. L., Moraes, F. C., Vieira, L. S., Braga, J. C., Ramalho, L. V., et al. (2018). Bryozoans are Major Modern Builders of South Atlantic Oddly Shaped Reefs. *Sci. Rep.* 8, 1–11. doi:10.1038/s41598-018-27961-6.
- Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Marangoni, M. B., D'Agostini, D. P., Bourguignon, S. N., Cetto, P. H., et al. (2015b). Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic-carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *J. South Am. Earth Sci.* 63, 125–136. doi:10.1016/j.jsames.2015.07.003.
- Bongaerts, P., Perez-Rosales, G., Radice, V. Z., Eyal, G., Gori, A., Gress, E., et al. (2019). Mesophotic.org: a repository for scientific information on mesophotic ecosystems. *Database (Oxford)*. 2019, 1–6. doi:10.1093/database/baz140.
- Bongaerts, P., Ridgway, T., Sampayo, E. M., and Hoegh-Guldberg, O. (2010). Assessing the “deep reef refugia” hypothesis: Focus on Caribbean reefs. *Coral Reefs* 29, 309–327. doi:10.1007/s00338-009-0581-x.
- Bosence, D. W. J. (1983). Coralline algal reef frameworks. *J. - Geol. Soc. London* 140, 365–376. doi:10.1144/gsjgs.140.3.0365.
- Braithwaite, C. J. R. (1973). Reefs: Just a Problem of Semantics? *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 57, 1100–1116. doi:10.1306/83d90e62-16c7-11d7-8645000102c1865d.
- Burkepile, D. E., and Hay, M. E. (2018). Coral reefs. *Encycl. Ecol.* 2, 426–438. doi:10.1016/B978-0-444-63768-0.00323-1.
- Carneiro, M. E. R., Fontes, L. C. da S., Kowsmann, R. O., and Puga-Bernabéu, A. (2017). *Geologia e Geomorfologia da Bacia de Sergipe-Alagoas*.
- Carneiro, P. B. de M., and Morais, J. O. de (2016). Carbonate sediment production in the equatorial continental shelf of South America: Quantifying *Halimeda incrassata* (Chlorophyta) contributions. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 1–6. doi:10.1016/j.jsames.2016.07.011.
- Castro, C. B., and Pires, D. O. (2001). Brazilian coral reefs: What we already know and what is still missing. *Bull. Mar. Sci.* 69, 357–371.
- Cavalcanti, G. H., Carolina, R., Arantes, M., and Loiola, L. L. (2012). Caracterização ambiental das formações carbonáticas na rota do gasoduto Cernambi-Cabiúnas. Rio de Janeiro Available at: [http://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao - Bacia de Santos - Gasoduto Rota 2 \(Rota Cabiunas\) - Petrорbas/](http://licenciamento.ibama.gov.br/Petroleo/Producao/Producao - Bacia de Santos - Gasoduto Rota 2 (Rota Cabiunas) - Petrорbas/).
- Chaves, H. A. F. (1979). “Introdução Geral,” in *Processos e Métodos (Relatório Final) - Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira (Projeto REMAC)*, ed. H. A. F. Chaves (Rio de Janeiro: PETROBRAS/CENPES), 113.
- Collette, B. B., and Rutzler, K. (1977). Reef fishes over sponge bottoms off the mouth of the Amazon River. *Proceedings, Third Int. Coral Reef Symp.*, 305–310.
- Curbelo-Fernandez, M. P., Della Giustina, I. D., Loiola, L. de L., Arantes, R. C. M., de Moura, R. B., Barboza, C. A. de M., et al. (2017). *Biota de fundos carbonáticos da plataforma continental da Bacia de Campos: algas calcárias e fauna associada*. 1st ed. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-85-352-7295-6.50002-6.
- Davies, P. J., Braga, J. C., Lund, M., and Webster, J. M. (2004). Holocene deep water algal buildups on the eastern Australian shelf. *Palaios* 19, 598–609. doi:10.1669/0883-1351(2004)019<0598:HDWABO>2.0.CO;2.
- Dechnik, B., Bastos, A. C., Vieira, L. S., Webster, J. M., Fallon, S., Yokoyama, Y., et al. (2019). Holocene reef growth in the tropical southwestern Atlantic: Evidence for sea level and climate instability. *Quat. Sci. Rev.* 218, 365–377. doi:10.1016/j.quascirev.2019.06.039.
- Dias, G. T. de M., El Robini, M., Freire, G. S. S., and Figueiredo Jr., A. G. (2006). “Oceanografia Geológica

(Áreas Sul, Central, Nordeste e Norte) - Cartas de Sedimentos de Fundo,,” in *Programa de avaliação do potencial sustentável dos recursos vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVIZEE)*, ed. S. Jablonski (Brasília: Ministério do Meio Ambiente (MMA).

- Dias, G. T. M. (1996). Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas. in *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia Vol. 3*.
- Dias, G. T. M. (2000). Granulados bioclásticos-algas calcárias. *Rev. Bras. Geofis.* 18, 307–318. doi:10.1590/s0102-261x2000000300008.
- Dias, G. T. M., and Medeiros, M. F. (2005). Proposta de metodologia para a elaboração de cartas sedimentológicas. in *Associação Brasileira de Estudos do Quaternário*.
- Dias, G. T. M., Silva, R. C. de O. e, and Santos Filho, J. R. (2021). Manoel Luiz Reefs morphology unveiled by high resolution images of WorldView-3 satellite (North Brazilian Continental Shelf). *Quat. Environmental Geosci.* 12, 46–59. doi:http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v12i1.76577.
- Dias, M. P., Bastos, A. C., and Vital, H. (2019). Plataforma Continental Brasileira. *Programa Geol. e Geofísica Mar.*, 185.
- Diretoria de Hidrografia e Navegação (DHN) (2017). Normas da autoridade marítima para Levantamentos Hidrográficos. Niterói Available at: <https://www.marinha.mil.br/dhn/sites/www.marinha.mil.br/dhn/files/normam/NORMAN-25-REV2-MOD1.pdf>.
- Dominguez, J. M. L., Da Silva, R. P., Nunes, A. S., and Freire, A. F. M. (2013). The narrow, shallow, low-accommodation shelf of central Brazil: Sedimentology, evolution, and human uses. *Geomorphology* 203, 46–59. doi:10.1016/j.geomorph.2013.07.004.
- Ferreira, L. C., Bastos, A. C., Amado Filho, G. M., Leite, M. D. A., C. Boni, G., C. Moraes, F., et al. (2020). Submerged reefs in the Abrolhos Shelf: morphology and habitat distribution. *Seafloor Geomorphol. as Benthic Habitat*, 519–532. doi:10.1016/b978-0-12-814960-7.00030-0.
- Figueiredo Jr., A. G., Pacheco, C. E. P., Vasconcelos, S. C., and Silva, F. T. (2016). *Continental Shelf Geomorphology and Sedimentology*. 1st ed. Elsevier Ltd. doi:10.1016/b978-85-352-8444-7.50009-3.
- Figueiredo Jr., A. G., and Tessler, M. (2004). *Topografia e composição do substrato marinho da região Sudeste-Sul do Brasil - Série documentos Revizee: Score Sul*.
- Fontes, V. C., Gomes, M. P., Vital, H., Ferreira, B. P., and Maida, M. (2020). *Reefs distribution and inter reef sedimentation on Tamandaré continental shelf, Northeast Brazil*. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-814960-7.00033-6.
- Francini-Filho, R. B., Asp, N. E., Siegle, E., Hocevar, J., Lowyck, K., Avila, N. D., et al. (2018). Perspectives on the Great Amazon Reef: Extension , Biodiversity , and Threats. 5, 1–5. doi:10.3389/fmars.2018.00142.
- Francini-Filho, R. B., Coni, E. O. C., Meirelles, P. M., Amado-Filho, G. M., Thompson, F. L., Pereira-Filho, G. H., et al. (2013). Dynamics of Coral Reef Benthic Assemblages of the Abrolhos Bank, Eastern Brazil: Inferences on Natural and Anthropogenic Drivers. *PLoS One* 8, 1–12. doi:10.1371/journal.pone.0054260.
- Francini-Filho, R. B., Velásquez, V. M., da Silva, M. B., Rosa, M. R., Sumida, P. Y. G., Pinheiro, H. T., et al. (2019). “Brazil,” in *Mesophotic Coral Ecosystems. Coral Reefs of the World*, 163–198. doi:10.1007/978-3-319-92735-0_10.
- Gomes, M. P., and Vital, H. (2010). Revisão da compartimentação geomorfológica da Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte, Brasil. *Rev. Bras. Geociências* 40, 321–329. doi:10.25249/0375-7536.2010403321329.
- Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., et al. (2012). Global estimates

of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosyst. Serv.* 1, 50–61. doi:10.1016/j.ecoser.2012.07.005.

- Gualberto, L. P. S., and El-Robrini, M. (2005). Faciologia da cobertura sedimentar superficial da plataforma continental do Maranhão. *Estud. Geológicos* 15, 234–243.
- Hinderstein, L. M., Marr, J. C. A., Martinez, F. A., Dowgiallo, M. J., Puglise, K. A., Pyle, R. L., et al. (2010). Theme section on “Mesophotic Coral Ecosystems: Characterization, Ecology, and Management.” *Coral Reefs* 29, 247–251. doi:10.1007/s00338-010-0614-5.
- Holt, T. J. ., Rees, E. I., Hawkins, S. J., and Seed, R. (1998). *Biogenic Reefs (volume IX). An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs.* , ed. A.M.W. Wilson Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project).
- Horta, P. A., Riul, P., Amado Filho, G. M., Gurgel, C. F. D., Berchez, F., Nunes, J. M. de C., et al. (2016). Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change. *Brazilian J. Oceanogr.* 64, 117–136. doi:10.1590/S1679-875920160870064sp2.
- International Hydrographic Organization (2005). *Manual on Hydrography*. 1st Editio. Monaco: International Hydrographic Bureau Available at: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/english/C-13_Chapter_4.pdf.
- Kahng, S., Copus, J. M., and Wagner, D. (2016). “Mesophotic Coral Ecosystems,” in *Marine Animal Forests* (Cham: Springer International Publishing), 1–22. doi:10.1007/978-3-319-17001-5_4-1.
- Kench, P. S. (2013). *Coral Systems*. Elsevier Ltd. doi:10.1016/B978-0-12-374739-6.00288-8.
- Kitahara, M. V., Horn Filho, N. O., and De Abreu, J. G. N. (2008). Utilização de registros de corais de profundidade (Cnidaria, Scleractinia) para prever a localização e mapear tipos de substratos na plataforma e talude continental do sul do Brasil. *Pap. Avulsos Zool.* 48, 11–18. doi:10.1590/S0031-10492008000200001.
- Kitahara, M. V., Capítoli, R. R., and Horn Filho, N. O. (2009). Distribuição das espécies de corais azooxantelados na plataforma e talude continental superior do sul do Brasil. *Iheringia - Ser. Zool.* 99, 223–236. doi:10.1590/s0073-47212009000300001.
- Larsonneur, C. (1977). La cartographie des dépôt meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. *J. Rech. Ocean.* 2, 34–39.
- Leão, Z. M. A. N., and Dominguez, J. M. L. (2000). Tropical coast of Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 41, 112–122. doi:10.1016/S0025-326X(00)00105-3.
- Lesser, M. P., Slattery, M., and Leichter, J. J. (2009). Ecology of mesophotic coral reefs. *J. Exp. Mar. Bio. Ecol.* 375, 1–8. doi:10.1016/j.jembe.2009.05.009.
- Locker, S. D., Armstrong, R. A., Battista, T. A., Rooney, J. J., Sherman, C., and Zawada, D. G. (2010). Geomorphology of mesophotic coral ecosystems: Current perspectives on morphology, distribution, and mapping strategies. *Coral Reefs* 29, 329–345. doi:10.1007/s00338-010-0613-6.
- Mahiques, M. M., Siegle, E., Francini-Filho, R. B., Thompson, F. L., de Rezende, C. E., Gomes, J. D., et al. (2019). Insights on the evolution of the living Great Amazon Reef System, equatorial West Atlantic. *Sci. Rep.* 9, 1–8. doi:10.1038/s41598-019-50245-6.
- Marangoni, M. B., Reis, A. T., Silva, C. G., Maia, R. M. da C., Rabineau, M., Guerra, J. V., et al. (2013). Arcabouço stratigráfico e ciclicidade deposicional dos sistemas sedimentares do Pleistoceno Médio-Holoceno da plataforma sul da Bacia de Campos, Brasil. *Brazilian J. Geol.* 43, 285–300. doi:10.5327/Z2317-48892013000200007.
- Martins, L. R., and Coutinho, P. N. (1981). The Brazilian continental margin. *Earth Sci. Rev.* 17, 87–107. doi:10.1016/0012-8252(81)90007-6.

- Mazzei, E. F., Bertoncini, A. A., Pinheiro, H. T., Machado, L. F., Vilar, C. C., Guabiroba, H. C., et al. (2017). Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 123–133. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.08.059.
- Menandro, P. S., and Bastos, A. C. (2020). Seabed Mapping : A Brief History from Meaningful Words.
- Menandro, P. S., Bastos, A. C., Boni, G., Ferreira, L. C., Vieira, F. V., Lavagnino, A. C., et al. (2020). Reef mapping using different seabed automatic classification tools. *Geosci.* 10. doi:10.3390/geosciences10020072.
- Milliman, J. D. (1977). Role of Calcareous Algae in Atlantic Continental Margin Sedimentation. *Foss. Algae*, 232–247. doi:10.1007/978-3-642-66516-5_26.
- Milliman, J. D., and Barretto, H. T. (1975). Relict magnesian calcite oolite and subsidence of the Amazon shelf. *Sedimentology* 22, 137–145. doi:10.1111/j.1365-3091.1975.tb00288.x.
- Milliman, J. D., Summerhayes, C. P., and Barreto, H. T. (1975). Quaternary sedimentation on the Amazon Continental shelf. *Geol. Soc. Am. Bull.* 86, 610–614.
- Moura, R. L., Amado-Filho, G. M., Moraes, F. C., Brasileiro, P. S., Salomon, P. S., Mahiques, M. M., et al. (2016). An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Sci. Adv.* 2. doi:10.1126/sciadv.1501252.
- Moura, R. L., Secchin, N. A., Amado-Filho, G. M., Francini-Filho, R. B., Freitas, M. O., Minte-Vera, C. V., et al. (2013). Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. *Cont. Shelf Res.* 70, 109–117. doi:10.1016/j.csr.2013.04.036.
- Oliveira, N., Bastos, A. C., Silva Quaresma, V., and Vieira, F. V. (2020). The use of Benthic Terrain Modeler (BTM) in the characterization of continental shelf habitats. *Geo-Marine Lett.* 40, 1087–1097. doi:10.1007/s00367-020-00642-y.
- PETROBRAS (2010). EIA - Estudo de impacto ambiental para o gasoduto sul norte Capixaba. Relatório Técnico CPM RT 086/10.
- Pianca, C., Mazzini, P. L. F., and Siegle, E. (2010). Brazilian offshore wave climate based on NWW3 reanalysis. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 53–70. doi:10.1590/s1679-87592010000100006.
- Pires, D. D. O. (2016). Recifes de Coral de Profundidade: Corais Construtores e sua Distribuição no Brasil. *Brazilian J. Aquat. Sci. Technol.* 19. doi:10.14210/bjast.v19n3.4704.
- Pyle, R. L., and Copus, J. M. (2019). Mesophotic Coral Ecosystems: Introduction and Overview. 3–27. doi:10.1007/978-3-319-92735-0_1.
- Randi, C. B., Becker, A. C., Willems, M. J., Perry, C. T., Salgado, L. T., Tomazetto de Carvalho, R., et al. (2021). Calcium carbonate production in the southernmost subtropical Atlantic coral reef. *Mar. Environ. Res.* 172. doi:10.1016/j.marenvres.2021.105490.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature Based on Sand-silt-clay Ratios. *SEPM J. Sediment. Res.* doi:10.1306/d4269774-2b26-11d7-8648000102c1865d.
- Silva, A. P. (2017). Brazil's recent agenda on the sea and the South Atlantic contemporary scenario. *Mar. Policy* 85, 25–32. doi:10.1016/j.marpol.2017.08.010.
- Silva, C. G., Esteves, M. G. P., Fontes, S. L., and Filho, J. C. F. G. (2003). BAMPETRO – Banco de Dados Ambientais para a Indústria de Petróleo. in *8th International Congress of the Brazilian Geophysical Society* (European Association of Geoscientists & Engineers). doi:10.3997/2214-4609-pdb.168.arq_874.
- Silveira, I. C. A. da, Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., Godoi, S. S. de, and Ikeda, Y. (2000). A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira. *Brazilian J. Oceanogr.* 48, 171–183. doi:10.1590/S1679-87592000000200008.
- Soares, M. de O., Araújo, J. T. de, Ferreira, S. M. C., Santos, B. A., Boavida, J. R. H., Costantini, F., et al.

- (2020). Why do mesophotic coral ecosystems have to be protected? *Sci. Total Environ.* 726, 138456. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.138456.
- Soares, M. de O., Tavares, T. C. L., and Carneiro, P. B. de M. (2019). Mesophotic ecosystems: Distribution, impacts and conservation in the South Atlantic. *Divers. Distrib.* 25, 255–268. doi:10.1111/ddi.12846.
- Soares, M. O., Davis, M., Paiva, C. C., and Carneiro, P. B. M. (2018). Mesophotic ecosystems: coral and fish assemblages in a tropical marginal reef (northeastern Brazil). *Mar. Biodivers.* 48, 1631–1636. doi:10.1007/s12526-016-0615-x.
- Souza, R. B., and Robinson, I. S. (2004). Lagrangian and satellite observations of the Brazilian Coastal Current. *Cont. Shelf Res.* 24, 241–262. doi:10.1016/j.csr.2003.10.001.
- Steneck, R. S. (1986). The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptative strategies. *Annul Rev. Ecol. Syst. Vol. 17*, 273–303. doi:10.1146/annurev.ecolsys.17.1.273.
- Stramma, L., and England, M. (1999). On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean. *J. Geophys. Res. Ocean.* 104, 20863–20883. doi:10.1029/1999JC900139.
- Sumaila, U. R., Walsh, M., Hoareau, K., Cox, A., Teh, L., Abdallah, P., et al. (2021). Financing a sustainable ocean economy. *Nat. Commun.* 12. doi:10.1038/S41467-021-23168-Y.
- Tâmega, F. T. de S., Bassi, D., Figueiredo, M. A. de O., and Cherkinski, A. (2014). Deep-water rhodolith bed from central Brazilian continental shelf, Campos Basin: coralline algal and faunal taxonomic composition. *Galaxea, J. Coral Reef Stud.* 16, 21–31. doi:10.3755/galaxea.16.21.
- Testa, V., and Bosence, D. W. J. (1999). Physical and biological controls on the formation of carbonate and siliciclastic bedforms on the north-east Brazilian shelf. *Sedimentology* 46, 279–301. doi:10.1046/j.1365-3091.1999.00213.x.
- Tomascik, T., Chowdhury, M. S. N., and Bell, T. (2021). Comment on Gazi et al. (2020): Detecting Coral Reef Degradation on St. Martin’s Island, Bangladesh? *Ocean Sci. J.* 56, 326–329. doi:10.1007/s12601-021-00030-2.
- Tomascik, T., Shah, M., Chowdhury, N., and Nobil, M. N. (2022). Mischaracterization of sedimentary rocky reef as a coral reef in the economic valuation of St. Martin’s Island, Bangladesh: A comment on Rani et al. (2020). 224.
- Trembanis, A. C., Forrest, A. L., Keller, B. M., and Patterson, M. R. (2017). Mesophotic coral ecosystems: A geoacoustically derived proxy for habitat and relative diversity for the leeward shelf of Bonaire, Dutch Caribbean. *Front. Mar. Sci.* 4, 1–14. doi:10.3389/fmars.2017.00051.
- Urbina-Barreto, I., Chiroleu, F., Pinel, R., Fréchet, L., Mahamadaly, V., Elise, S., et al. (2021). Quantifying the shelter capacity of coral reefs using photogrammetric 3D modeling: From colonies to reefscapes. *Ecol. Indic.* 121. doi:10.1016/j.ecolind.2020.107151.
- Vale, N. F., Amado-Filho, G. M., Braga, J. C., Brasileiro, P. S., Karez, C. S., Moraes, F. C., et al. (2018). Structure and composition of rhodoliths from the Amazon River mouth, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 84, 149–159. doi:10.1016/j.jsames.2018.03.014.
- Vale, N. F., Braga, J. C., de Moura, R. L., Salgado, L. T., de Moraes, F. C., Karez, C. S., et al. (2022a). Distribution, morphology and composition of mesophotic ‘reefs’ on the Amazon Continental Margin. *Mar. Geol.* 447, 106779. doi:10.1016/j.margeo.2022.106779.
- Vale, N. F. L., Braga, J. C., Bastos, A. C., Moraes, F. C., Karez, C. S., Bahia, R. G., et al. (2022b). Structure and Composition of Rhodolith Beds from the Sergipe-Alagoas Basin (NE Brazil, Southwestern Atlantic). *Diversity* 14, 282. doi:10.3390/d14040282.
- Vieira, F. V., Bastos, A. C., Quaresma, V. S., Leite, M. D., Costa, A., Oliveira, K. S. S., et al. (2019). Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Cont. Shelf Res.* 187, 103964. doi:10.1016/j.csr.2019.103964.

- Vital, H., Da Silveira, I. M., and Amaro, V. E. (2005). Carta sedimentológica da plataforma continental brasileira- área guamaré a macau (Ne Brasil), utilizando integração de dados geológicos e sensoriamento remoto. *Rev. Bras. Geofis.* 23, 233–241. doi:10.1590/s0102-261x2005000300003.
- Weinstein, D. K., Smith, T. B., and Klaus, J. S. (2014). Mesophotic bioerosion: Variability and structural impact on U.S. Virgin Island deep reefs. *Geomorphology* 222, 14–24. doi:10.1016/j.geomorph.2014.03.005.

6. CONCLUSÕES GERAIS

O estabelecimento do Banco de Dados de Geologia Marinha (BDGM) evidentemente contribuiu para a atualização de bases e conceitos sobre a geomorfologia e a sedimentologia nas diferentes abordagens espaciais (escala da bacia, da macrorregião e da plataforma como um todo) testadas nos artigos apresentados. Esta ferramenta se mostrou bastante eficaz em ampliar o conhecimento das características morfo-sedimentares na plataforma, com o emprego de técnicas avançadas de geoprocessamento e o cruzamento com outras bases públicas de dados, bem como com informações coletadas em campo.

Está claro que o aumento considerável na quantidade de informações também torna o mapeamento mais crível, acurado e próximo da realidade, evitando extrapolações e aumentando a sua resolução espacial. Além disso, esse grande incremento de informações facilita o uso de métodos de interpolação e geoestatística, calibrando melhor os Modelos Digitais de Terreno resultantes. Como consequência, é possível a sua aplicabilidade em diversas escalas espaciais, sem perda significativa de detalhamento.

Outra característica é a possibilidade de expansão deste banco, com a adição de novas camadas. Por exemplo a localização das linhas de SBP e batimetria multifeixe de diversos projetos, linhas de sísmica de reflexão 2D e 3D, locação de testemunhos geológicos e poços, estações de monitoramento geoquímico ou a localização de estruturas feitas pelo homem (como dutovias, cabos submarinos, naufrágios e fundeios). Além disso, com os dados organizados e geoespacializados também é possível facilmente criar inúmeros critérios de filtragem, de modo a integralizar ainda mais o cruzamento das informações.

A crescente ênfase na proteção ambiental, com o estabelecimento de políticas públicas condicionando as atividades exploratórias no mar, também amplia a utilização desta ferramenta. Dados geoespacializados multidisciplinares também podem ser absorvidos ao banco de dados, possibilitando a correlação espacial e estatística entre os mais diversos tipos de parâmetros biológicos, oceanográficos e socioambientais. Nesse sentido, os resultados dos artigos apresentados nesta tese podem ser subsídios muito úteis para o estabelecimento de mapas de Geohabitats, modelagem hidrodinâmica ou determinação de áreas de exclusão de atividades exploratórias, por exemplo.

Outra importante característica atestada foi o grande potencial dos mapeamentos no reconhecimento de feições relíquia na plataforma, como os vales incisos. A utilização das técnicas de geoprocessamento pouco usuais em dados batimétricos ressaltou diversas linhas de paleodrenagem sobre a plataforma, confirmadas a partir dos dados geofísicos em subsuperfície adquiridos *in situ*. Da mesma forma, as análises geomorfométricas e sedimentares realizadas de forma integrada ressaltaram a ocorrência das fácies carbonáticas, reconhecendo as áreas de fácies carbonáticas e de maior probabilidade de bioconstruções, também confirmadas por métodos geofísicos e pela inspeção do fundo por amostragens ou filmagens.

Além disso, o BDGM também se mostrou eficiente nas três escalas espaciais testadas, suprimindo com sucesso as necessidades práticas da indústria na macrorregião da Margem Equatorial e na Bacia de Santos. Espera-se que o uso dessas informações seja difundido para demais bacias marginais e macrorregiões do litoral brasileiro (leste e sul). Ademais, espera-se também que o BDGM seja constantemente alimentado, principalmente nas áreas identificadas como sendo as mais carentes de informação, a exemplo das bacias do norte/nordeste, e das áreas mais profundas da Zona Econômica Exclusiva e do Talude Continental.

Respondendo especificamente a hipótese principal deste trabalho, conclui-se que, pela observação dos aspectos analisados, o BDGM é uma ferramenta mutável, com inúmeras possibilidades de desenvolvimento e aprimoramento, sendo confirmadamente útil e eficaz na avaliação multidisciplinar e multi-escala da margem continental. Dessa forma, a confirmação da hipótese eleva a importância desta ferramenta. Sugere-se a divulgação desta base e a sua incorporação a repositórios de divulgação de dados, como estruturas WebGIS, em próximas etapas.

7. MATERIAL SUPLEMENTAR

7.1. Lista da produção científica extra-escopo

Durante a execução deste trabalho, foram produzidos diferentes tipos de documentos científicos direta ou indiretamente relacionados a pesquisa realizada. Também houve colaborações sem autoria no geoprocessamento realizado nos trabalhos desenvolvidos por Lazzari et al. (2019), Kjerfve et al. (2021) e Silva e Dias (2020).

A lista completa (ordem cronológica) de trabalhos científicos com participação na autoria é apresentada a seguir:

- I. Baptista Neto, J. A., de Carvalho, D. G., Medeiros, K., Drabinski, T. L., de Melo, G. V., Silva, R. C. O., Silva, C. D. P.; Batista, L. S., Dias, G. T. M., Fonseca, E. M., Santos Filho, J. R. (2019). The impact of sediment dumping sites on the concentrations of microplastic in the inner continental shelf of Rio de Janeiro/Brazil. *Mar. Pollut. Bull.* 149, 110558. DOI:10.1016/j.marpolbul.2019.110558. (artigo científico publicado)
- II. Anjos, J.V., Silva, C. G., Santos Filho, J. R., Correa, J. (2019). Seismic amplitude signal classification applied to seafloor morphological and textural characterization. Conference Proceedings, First EAGE Workshop on Advanced Seismic Solutions and New Exploration Concepts to Unlock the Potential of the Caribbean Shelf, Oct 2019, Volume 2019, p.1 – 5. DOI: <https://doi.org/10.3997/2214-4609.201980007> (resumo expandido de congresso publicado)
- III. Dias, G. T. M., Silva, R. C. O., Santos Filho, J. R. (2019). “Recifes de Manuel Luís (MA) revelados por imagens de alta resolução do satélite Worldview-3”, palestra apresentada no II Simpósio Brasileiro de Geologia e Geofísica Marinha (2019), Porto Alegre.
- IV. Silva, C. G.; Anjos, J. V. M. C.; Santos Filho, J. R. (2020). “Caracterização do Fundo Marinho com Base em Atributos Sísmicos: uma abordagem prática para o reconhecimento de habitats submarinos.” Webinar apresentado em evento para a ANP, IBAMA e para diversas empresas do setor de Óleo e Gás, Rio de Janeiro.
- V. Silva, C. G.; Anjos, J. V. M. C.; Santos Filho, J. R.; Cecilio, A. B. (2020). Caracterização do tipo de fundo marinho com base em atributos sísmicos na bacia da Foz do Amazonas. Pôster apresentado no Workshop do PGGM, Edição Amazônica. (pôster de congresso publicado)
- VI. Dias, G. T. M., Silva, R. C. de O., Santos Filho, J. R. (2021). Manoel Luiz Reefs morphology unveiled by high resolution images of WorldView-3 satellite (North Brazilian Continental Shelf). *Quat. Environmental Geosci.* (2021) 12(1):46-59 DOI: <http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v12i1.76577> (artigo científico publicado)
- VII. Dias, G. T. M., Silva, R. C. de O.; Santos Filho, J. R. (2021). “Evolução geomorfológica da Baía de Guanabara e plataforma continental rasa adjacente nos últimos 40.000 anos,” in *Baía de Guanabara, um ambiente em transformação*. ed. Estefan Monteiro da Fonseca José Antônio Baptista Neto Fabiana Cunha Leão Pompermayer. Rio de Janeiro: Ape’Ku, 2021. 544 p. ISBN 978-65-86657-55-5 (capítulo de livro publicado)
- VIII. Baptista Neto, J. A, Vilela A. G, Fonseca E. M., Santos Filho J. R., Freitas A. S. (2021). “Sedimentologia da Baía de Guanabara” in *Baía de Guanabara, um ambiente em transformação*. ed.

Estefan Monteiro da Fonseca José Antônio Baptista Neto Fabiana Cunha Leão Pompermayer. Rio de Janeiro: Ape'Ku, 2021. 544 p. ISBN 978-65-86657-55-5 (capítulo de livro publicado)

- IX. Lagedo, F. B., Santos Filho, J. R., Fonseca, E. M., Baptista Neto, J. A., Dias, G. T. M., and Silva, C. G. (2021). Sediment transport analysis through a bedform translation approach in the south mouth of Paranaguá Estuarine Complex, PR, Brazil. (artigo científico em submissão)
- X. Lagedo, F. B., Santos Filho, J. R., Fonseca, E. M., Baptista Neto, J. A., Dias, G. T. M., and Silva, C. G. (2021). The use of image classification techniques on side-scan sonar results in an estuarine environment. (artigo científico em submissão)
- XI. Figueiredo Jr., A. F., Carneiro, J. C., Santos Filho, J. R., Jardim, K. A., Chaves, N. J. L., Soares, T. G. (2022) Metodologia para o processamento e interpretação de testemunhos inconsolidados. (capítulo de livro em submissão)
- XII. Figueiredo Jr., A.G. Carneiro, J.C., Santos Filho, J.R., Rocha, G.J., Ramalho, A.S., Chaves, N. J. L., Pinheiro, F. S, Araújo, J. S. S., Soares, T. G., Cecilio, A. B. 2022. Morphology and sediment distribution in Santos Basin, Brazil. Ocean Coast. Res. (artigo científico em submissão)
- XIII. Moreira, D.L., Dalto, A.G., Jr., A.G.F., Valerio, A.M., Detoni, A.M.S., Bonecker, A.C.T., Signori, C.N., Namiki, C., Sasaki, D.K., Pupo, D. V., Silva, D.A., Kutner, D.S., Duque-Castaño, D.C., Marcon, E.H., Gallotta, F.D.C., Paula, F.S., Gallucci, F., Roque, G.C.F., Campos, G.S., Fonseca, G., Mattos, G., Lavrado, H.P., Silveira, I.C.A. da Costa, J.O., Santos Filho, J.R., Carneiro, J.C., Moreira, J.C.F., Roza, L., Araujo, L.F.M., Lazzari, L., Silva, L.O. da, Michelazzo, L.S., Fernandes, L.F., Dottori, M., Jr., M.A.G. de A., Chuqui, M.G., Ceccopieri, M., Borges-Silva, M., Kampel, M., Bergo, N.M., Silva, P.V.M., Tura, P.M., Moura, R.B. de, Romano, R.G., Martins, R.P., Carreira, R.S., Toledo, R.G.A., Bonecker, S.L.C., Disaró, S.T., Rodrigues, S. V., Corbisier, T.N., Vicente, T.M., Paiva, V.G. de, Pellizari, V.H., Belo, W.C., Brandini, F.P., Souza, S.H.M., 2022. Multidisciplinary Scientific Cruises for Environmental Characterization in Santos Basin. Ocean Coast. Res. (artigo científico em submissão)

8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, D. P. V., and Mahiques, M. M. (2019). Deposition and sea-level evolution models for Upper Pleistocene/ Holocene in the São Sebastião Channel (SE Brazilian coast) inferred from 5th order seismic stratigraphy. *J. South Am. Earth Sci.* 93, 382–393. doi:10.1016/j.jsames.2019.05.012.
- Amado-Filho, G. M., Moura, R. L., Bastos, A. C., Salgado, L. T., Sumida, P. Y., Guth, A. Z., et al. (2012). Rhodolith beds are major CaCO₃ BIO-factories in the tropical south West Atlantic. *PLoS One* 7, 5–10. doi:10.1371/journal.pone.0035171.
- Amado-Filho, G. M., and Pereira-Filho, G. H. (2012). Rhodolith beds in Brazil: A new potential habitat for marine bioprospection. *Rev. Bras. Farmacogn.* 22, 782–788. doi:10.1590/S0102-695X2012005000066.
- Angulo, R. J., de Souza, M. C., Assine, M. L., Pessenda, L. C. R., and Disaró, S. T. (2008). Chronostratigraphy and radiocarbon age inversion in the Holocene regressive barrier of Paraná, southern Brazil. *Mar. Geol.* 252, 111–119. doi:10.1016/j.margeo.2008.03.006.
- Angulo, R. J., de Souza, M. C., Fernandes, L. A., and Disaró, S. T. (2013). Quaternary sea-level changes and aeolianites in the Fernando de Noronha archipelago, northeastern Brazil. *Quat. Int.* 305, 15–30. doi:10.1016/j.quaint.2012.12.029.
- Angulo, R. J., and Lessa, G. C. (1997). The Brazilian sea-level curves: a critical review with emphasis on the curves from the Paranaguá and Cananéia regions. *Mar. Geol.* 140, 141–166. doi:10.1016/S0025-3227(97)00015-7.
- Angulo, R. J., Lessa, G. C., and Souza, M. C. De (2006). A critical review of mid- to late-Holocene sea-level fluctuations on the eastern Brazilian coastline. *Quat. Sci. Rev.* 25, 486–506. doi:10.1016/j.quascirev.2005.03.008.
- Angulo, R. J., and Suguio, K. (1995). Re-evaluation of the Holocene sea-level maxima for the State of Paraná, Brazil. *Palaeogeography, Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 113, 385–393. doi:10.1016/0031-0182(95)00055-Q.
- Ashley, G. M. (1990). Classification of large-scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem; SEPM bedforms and bedding structures. *J. Sediment. Petrol.* 60, 160–172. doi:10.1306/212f9138-2b24-11d7-8648000102c1865d.
- Bahia, R. G., Abrantes, D. P., Brasileiro, P. S., Pereira Filho, G. H., and Amado Filho, G. M. (2010). Rhodolith bed structure along a depth gradient on the northern coast of Bahia state, Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 323–337. doi:10.1590/s1679-87592010000400007.
- Baker, E. K., and Harris, P. T. (2020). *Habitat mapping and marine management*. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-814960-7.00002-6.
- Baldwin, C. C., Tornabene, L., and Robertson, D. R. (2018). Below the Mesophotic. *Sci. Rep.* 8, 1–13. doi:10.1038/s41598-018-23067-1.
- Barnard, P. L., Erikson, L. H., and Kvitek, R. G. (2011). Small-scale sediment transport patterns and bedform morphodynamics: New insights from high-resolution multibeam bathymetry. *Geo-Marine Lett.* 31, 227–236. doi:10.1007/s00367-011-0227-1.
- Bastos, A. C., Kenyon, N. H., and Collins, M. (2002). Sedimentary processes, bedforms and facies, associated with a coastal headland: Portland Bill, Southern UK. *Mar. Geol.* 187, 235–258. doi:10.1016/S0025-3227(02)00380-8.
- Bastos, A. C., Moura, R. L., Moraes, F. C., Vieira, L. S., Braga, J. C., Ramalho, L. V., et al. (2018). Bryozoans are Major Modern Builders of South Atlantic Oddly Shaped Reefs. *Sci. Rep.* 8, 1–11. doi:10.1038/s41598-018-27961-6.
- Bathurst, R. G. C. (1972). Recent carbonate environments 1: General introduction and the great bahama bank. *Dev. Sedimentol.* 12, 93–145. doi:10.1016/S0070-4571(08)70897-5.
- Belderson, R. H., Johnson, M. A., and Kenyon, N. H. (1982). “Bedforms,” in *Offshore tidal sands: processes and deposits*, ed. A. H. Stride (London: Chapman and Hall).
- Bellec, V. K., Bøe, R., Bjarnadóttir, L. R., Albretsen, J., Dolan, M., Chand, S., et al. (2019). Sandbanks, sandwaves and megaripples on Spitsbergenbanken, Barents Sea. *Mar. Geol.* 416, 105998. doi:10.1016/j.margeo.2019.105998.
- Bellec, V. K., Bøe, R., Rise, L., Slagstad, D., Longva, O., and Dolan, M. F. J. (2010). Rippled scour depressions on continental shelf bank slopes off Nordland and Troms, Northern Norway. *Cont. Shelf Res.* 30, 1056–1069. doi:10.1016/j.csr.2010.02.006.
- Bellwood, D. R. (1996). Production and reworking of sediment by parrotfishes (family Scaridae) on the Great

- Barrier Reef, Australia. *Mar. Biol.* 125, 795–800. doi:10.1007/BF00349262.
- Berger, A., and Loutre, M. F. (1991). Insolation values for the climate of the last 10 million years. *Quat. Sci. Rev.* 10, 297–317. doi:10.1016/0277-3791(91)90033-Q.
- Berger, W. H., and Wefer, G. (2009). “Marine Biogenic Sediments,” in *Encyclopedia of Earth Sciences Series*, ed. V. Gornitz (Dordrecht: Springer Nature Switzerland AG), 75–82. doi:10.1007/978-1-4020-4411-3_143.
- Besio, G., Blondeaux, P., Brocchini, M., Hulscher, S. J. M. H., Idier, D., Knaapen, M. A. F., et al. (2008). The morphodynamics of tidal sand waves: A model overview. *Coast. Eng.* 55, 657–670. doi:10.1016/j.coastaleng.2007.11.004.
- Bezerra, F. H. R., Barreto, A. M. F., and Suguio, K. (2003). Holocene sea-level history on the Rio Grande do Norte State coast, Brazil. *Mar. Geol.* 196, 73–89. doi:10.1016/S0025-3227(03)00044-6.
- Bôas, A. B. V., Figueiredo, M. A. O., and Villaca, R. C. (2005). Colonization and growth of crustose coralline algae. *Brazilian J. Oceanogr.* 53, 147–156.
- Bøe, R., Bellec, V. K., Dolan, M. F. J., Buhl-Mortensen, P., Buhl-Mortensen, L., Slagstad, D., et al. (2009). Giant sandwaves in the Hola glacial trough off Vesterålen, North Norway. *Mar. Geol.* 267, 36–54. doi:10.1016/j.margeo.2009.09.008.
- Bosence, D. W. J. (1983). Coralline algal reef frameworks. *J. - Geol. Soc. London* 140, 365–376. doi:10.1144/gsjgs.140.3.0365.
- Boswarva, K., Butters, A., Fox, C. J., Howe, J. A., and Narayanaswamy, B. (2018). Improving marine habitat mapping using high-resolution acoustic data; a predictive habitat map for the Firth of Lorn, Scotland. *Cont. Shelf Res.* 168, 39–47. doi:10.1016/j.csr.2018.09.005.
- Braithwaite, C. J. R. (1973). Reefs: Just a Problem of Semantics? *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 57, 1100–1116. doi:10.1306/83d90e62-16c7-11d7-8645000102c1865d.
- Caldas, L. H. de O., Statterger, K., and Vital, H. (2006). Holocene sea-level history: Evidence from coastal sediments of the northern Rio Grande do Norte coast, NE Brazil. *Mar. Geol.* 228, 39–53. doi:10.1016/j.margeo.2005.12.008.
- Calegario, G., Freitas, L., Appolinario, L. R., Venas, T., Arruda, T., Otsuki, K., et al. (2021). Conserved rhodolith microbiomes across environmental gradients of the Great Amazon Reef. *Sci. Total Environ.* 760, 143411. doi:10.1016/j.scitotenv.2020.143411.
- Calvete, D. (2017). “Modelling Bedforms on the Continental Shelf,” in *Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean*, eds. J. Guillén, J. Acosta, F. L. Chiocci, and A. Palanques (Switzerland: Springer International Publishing Switzerland), 307.
- Carneiro, P. B. de M., and Morais, J. O. de (2016). Carbonate sediment production in the equatorial continental shelf of South America: Quantifying *Halimeda incrassata* (Chlorophyta) contributions. *J. South Am. Earth Sci.* 72, 1–6. doi:10.1016/j.jsames.2016.07.011.
- Casalbore, D., Bosman, A., Romagnoli, C., and Chiocci, F. L. (2016). Morphology of Salina offshore (Southern Tyrrhenian Sea). *J. Maps* 12, 725–730. doi:10.1080/17445647.2015.1070300.
- Casalbore, D., Falese, F., Martorelli, E., Romagnoli, C., and Chiocci, F. L. (2017). Submarine depositional terraces in the Tyrrhenian Sea as a proxy for paleo-sea level reconstruction: Problems and perspective. *Quat. Int.* 439, 169–180. doi:10.1016/j.quaint.2016.02.027.
- Casalbore, D., Romagnoli, C., Adami, C., Bosman, A., Falese, F., Ricchi, A., et al. (2018a). Submarine depositional terraces at salina island (Southern tyrrhenian sea) and implications on the late-quaternary evolution of the insular shelf. *Geosci.* 8, 1–13. doi:10.3390/geosciences8010020.
- Casalbore, D., Romagnoli, C., Bosman, A., Anzidei, M., and Chiocci, F. L. (2018b). Coastal hazard due to submarine canyons in active insular volcanoes: examples from Lipari Island (southern Tyrrhenian Sea). *J. Coast. Conserv.* 22, 989–999. doi:10.1007/s11852-017-0549-x.
- Castro, C. B., and Pires, D. O. (2001). Brazilian coral reefs: What we already know and what is still missing. *Bull. Mar. Sci.* 69, 357–371.
- Castro, J. W. A., Suguio, K., Seoane, J. C. S., Da Cunha, A. M., and Dias, F. F. (2014). Sea-level fluctuations and coastal evolution in the state of Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *An. Acad. Bras. Cienc.* 86, 671–683. doi:10.1590/0001-3765201420140007.
- Catuneanu, O., Abreu, V., Bhattacharya, J. P., Blum, M. D., Dalrymple, R. W., Eriksson, P. G., et al. (2009). Towards the standardization of sequence stratigraphy. *Earth-Science Rev.* 92, 1–33. doi:10.1016/j.earscirev.2008.10.003.
- Clarke, J. E. H., Mayer, L. A., and Wells, D. E. (1996). Shallow-water imaging multibeam sonars: A new tool

- for investigating seafloor processes in the coastal zone and on the continental shelf. *Mar. Geophys. Res.* 18, 607–629. doi:10.1007/BF00313877.
- Collette, B. B., and Rutzler, K. (1977). Reef fishes over sponge bottoms off the mouth of the Amazon River. *Proceedings, Third Int. Coral Reef Symp.*, 305–310.
- Coutinho, R., and Zalmon, I. R. (2009). *O bentos de costões rochosos*.
- Dechnik, B., Bastos, A. C., Vieira, L. S., Webster, J. M., Fallon, S., Yokoyama, Y., et al. (2019). Holocene reef growth in the tropical southwestern Atlantic: Evidence for sea level and climate instability. *Quat. Sci. Rev.* 218, 365–377. doi:10.1016/j.quascirev.2019.06.039.
- Degraer, S., Verfaillie, E., Willems, W., Adriaens, E., Vincx, M., and Van Lancker, V. (2008). Habitat suitability modelling as a mapping tool for macrobenthic communities: An example from the Belgian part of the North Sea. *Cont. Shelf Res.* 28, 369–379. doi:10.1016/j.csr.2007.09.001.
- Deiana, G., Lecca, L., Melis, R. T., Soldati, M., Demurtas, V., and Orrù, P. E. (2021). Submarine geomorphology of the southwestern sardinian continental shelf (Mediterranean sea): Insights into the last glacial maximum sea-level changes and related environments. *Water (Switzerland)* 13. doi:10.3390/w13020155.
- Dias, G. T. M. (1996). Classificação de sedimentos marinhos proposta de representação em cartas sedimentológicas. in *Anais do XXXIX Congresso Brasileiro de Geologia Vol. 3*.
- Dias, G. T. M. (2000). Granulados bioclásticos-algas calcárias. *Rev. Bras. Geofis.* 18, 307–318. doi:10.1590/s0102-261x2000000300008.
- Dias, G. T. M., Silva, R. C. de O. e, and Santos Filho, J. R. (2021). Manoel Luiz Reefs morphology unveiled by high resolution images of WorldView-3 satellite (North Brazilian Continental Shelf). *Quat. Environmental Geosci.* 12, 46–59. doi:http://dx.doi.org/10.5380/abequa.v12i1.76577.
- Durán, R., Guillén, J., Rivera, J., Muñoz, A., Lobo, F. J., Fernández-Salas, L. M., et al. (2017). Subaqueous Dunes Over Sand Ridges on the Murcia Outer Shelf. *Atlas Bedforms West. Mediterr.*, 187–192. doi:10.1007/978-3-319-33940-5.
- Ehlers, J., Gibbard, P. L., and Hughes, P. D. (2018). *Quaternary Glaciations and Chronology*. Elsevier Ltd doi:10.1016/B978-0-08-100524-8.00003-8.
- Emery, K. O. (1968). Relict Sediments on Continental Shelves of World. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 52, 445–464. doi:10.1306/5d25c2e7-16c1-11d7-8645000102c1865d.
- Ernstsen, V. B., Noormets, R., Winter, C., Hebbeln, D., Bartholomä, A., Flemming, B. W., et al. (2006). Quantification of dune dynamics during a tidal cycle in an inlet channel of the Danish Wadden Sea. *Geo-Marine Lett.* 26, 151–163. doi:10.1007/s00367-006-0026-2.
- Ferreira, L. C., Bastos, A. C., Amado Filho, G. M., Leite, M. D. A., C. Boni, G., C. Moraes, F., et al. (2020). Submerged reefs in the Abrolhos Shelf: morphology and habitat distribution. *Seafloor Geomorphol. as Benthic Habitat*, 519–532. doi:10.1016/b978-0-12-814960-7.00030-0.
- Figueiredo Jr., A. G. (1980). Response of water column to strong wind forcing, southern Brazilian inner shelf: Implications for sand ridge formation. *Mar. Geol.* 35, 367–376. doi:10.1016/0025-3227(80)90126-7.
- Figueiredo Jr., A. G., Pacheco, C. E. P., de Vasconcelos, S. C., and da Silva, F. T. (2016). Continental Shelf Geomorphology and Sedimentology. *Geol. Geomorphol.*, 13–31. doi:10.1016/b978-85-352-8444-7.50009-3.
- Figueiredo Jr., A. G., Sanders, J. E., and Swift, D. J. P. (1982). Storm-graded layers on inner continental shelves: Examples from southern Brazil and the Atlantic coast of the Central United States. *Sediment. Geol.* 31, 171–190. doi:10.1016/0037-0738(82)90057-4.
- Figueiredo Jr., A. G., Swift, D. J. P., Stubblefield, and Clarke, T. L. (1981). Sand ridges on the inner Atlantic shelf of North America: Morphometric comparisons with Huthnance stability model. *Geo-Marine Lett.* 1, 187–191. doi:10.1007/BF02462432.
- Folk, R. L., and Ward, W. C. (1957). Brazos river bar: a study in the significance of grain size parameters. *J. Sediment. Petrol.* 27, 3–26.
- Foster, G., and Carter, L. (1997). Mud sedimentation on the continental shelf at an accretionary margin—Poverty Bay, New Zealand. *New Zeal. J. Geol. Geophys.* 40, 157–173. doi:10.1080/00288306.1997.9514750.
- Francini-Filho, R. B., Asp, N. E., Siegle, E., Hocevar, J., Lowyck, K., Avila, N. D., et al. (2018). Perspectives on the Great Amazon Reef: Extension , Biodiversity , and Threats. 5, 1–5. doi:10.3389/fmars.2018.00142.
- Friedrichs, C. T., and Wright, L. D. (2004). Gravity-driven sediment transport on the continental shelf:

- Implications for equilibrium profiles near river mouths. *Coast. Eng.* 51, 795–811. doi:10.1016/j.coastaleng.2004.07.010.
- Gallagher, E. L. (2003). A note on megaripples in the surf zone: Evidence for their relation to steady flow dunes. *Mar. Geol.* 193, 171–176. doi:10.1016/S0025-3227(02)00662-X.
- Galparsoro, I., Borja, Á., Legorburu, I., Hernández, C., Chust, G., Liria, P., et al. (2010). Morphological characteristics of the Basque continental shelf (Bay of Biscay, northern Spain); their implications for Integrated Coastal Zone Management. *Geomorphology* 118, 314–329. doi:10.1016/j.geomorph.2010.01.012.
- Gao, S., and Collins, M. B. (2014). Holocene sedimentary systems on continental shelves. *Mar. Geol.* 352, 268–294. doi:10.1016/j.margeo.2014.03.021.
- Gelder, G., Jara-Muñoz, J., Melnick, D., Fernández-Blanco, D., Rouby, H., Pedoja, K., et al. (2020). How do sea-level curves influence modeled marine terrace sequences? *Quat. Sci. Rev.* 229. doi:10.1016/j.quascirev.2019.106132.
- Gherardi, D. F. M. (2004). Community structure and carbonate production of a temperate rhodolith bank from Arvoredo Island, southern Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 52, 207–224. doi:10.1590/s1679-87592004000300004.
- Ginsburg, R. N., and James, N. P. (1974). Holocene Carbonate Sediments of Continental Shelves. *Geol. Cont. Margins*, 137–155. doi:10.1007/978-3-662-01141-6_11.
- Goff, J. A., Flood, R. D., Austin, J. A., Schwab, W. C., Christensen, B., Browne, C. M., et al. (2015). The impact of hurricane sandy on the shoreface and inner shelf of Fire Island, New York: Large bedform migration but limited erosion. *Cont. Shelf Res.* 98, 13–25. doi:10.1016/j.csr.2015.03.001.
- Grant, W. D., and Madsen, O. S. (1979). Combined wave and current interaction with a rough bottom. *J. Geophys. Res.* 84, 1797. doi:10.1029/JC084iC04p01797.
- Greene, H. G., Cacchione, D. A., and Hampton, M. A. (2017). Characteristics and dynamics of a large subtidal sand wave field—habitat for pacific sand lance (*Ammodytes personatus*), salish sea, Washington, USA. *Geosci.* 7. doi:10.3390/geosciences7040107.
- Guerrero, Q., and Guillén, J. (2020). Dynamics of ripples superimposed on a sand ridge on a tideless shoreface. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 242. doi:10.1016/j.ecss.2020.106826.
- Harris, M. S., Sautter, L. R., Johnson, K. L., Luciano, K. E., Sedberry, G. R., Wright, E. E., et al. (2013). Continental shelf landscapes of the southeastern United States since the last interglacial. *Geomorphology* 203, 6–24. doi:10.1016/j.geomorph.2013.02.014.
- Harris, P. T. (2020). *Seafloor geomorphology—coast, shelf, and abyss*. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-814960-7.00006-3.
- Harris, P. T., Macmillan-lawler, M., Rupp, J., and Baker, E. K. (2014). Geomorphology of the oceans. 352, 4–24.
- Hays, J. D., Imbrie, J., and Shackleton, N. J. (1976). Variations in the earth's orbit: Pacemaker of the ice ages. *Science (80-)*. 194, 1121–1132. doi:10.1126/science.194.4270.1121.
- Heap, A. D., and Harris, P. T. (2011). Geological and biological mapping and characterisation of benthic marine environments-Introduction to the special issue. *Cont. Shelf Res.* 31, 2010–2012. doi:10.1016/j.csr.2010.09.015.
- Helland-Hansen, W., and Hampson, G. J. (2009). Trajectory analysis: Concepts and applications. *Basin Res.* 21, 454–483. doi:10.1111/j.1365-2117.2009.00425.x.
- Holt, T. J. ., Rees, E. I., Hawkins, S. J., and Seed, R. (1998). *Biogenic Reefs (volume IX). An overview of dynamic and sensitivity characteristics for conservation management of marine SACs.* , ed. A.M.W. Wilson Scottish Association for Marine Science (UK Marine SACs Project).
- Holz, V. L., Bahia, R. G., Karez, C. S., Vieira, F. V., Moraes, F. C., Vale, N. F., et al. (2020). Structure of rhodolith beds and surrounding habitats at the doce river shelf (Brazil). *Diversity* 12, 1–19. doi:10.3390/d12020075.
- Horta, P. A., Riul, P., Amado Filho, G. M., Gurgel, C. F. D., Berchez, F., Nunes, J. M. de C., et al. (2016). Rhodoliths in Brazil: Current knowledge and potential impacts of climate change. *Brazilian J. Oceanogr.* 64, 117–136. doi:10.1590/S1679-875920160870064sp2.
- Hulscher, S. J. M. H., de Swart, H. E., and de Vriend, H. J. (1993). The generation of offshore tidal sand banks and sand waves. *Cont. Shelf Res.* 13, 1183–1204. doi:10.1016/0278-4343(93)90048-3.
- Ikehara, K., and Kinoshita, Y. (1994). Distribution and origin of subaqueous dunes on the shelf of Japan. *Mar. Geol.* 120, 75–87. doi:10.1016/0025-3227(94)90078-7.

- International Hydrographic Organization (2005). *Manual on Hydrography*. 1st Editio. Monaco: International Hydrographic Bureau Available at: https://iho.int/uploads/user/pubs/cb/c-13/english/C-13_Chapter_4.pdf.
- Janen, A., Wizemann, A., Klicpera, A., Satari, D. Y., Westphal, H., and Mann, T. (2017). Sediment composition and facies of coral reef islands in the Spermonde archipelago, Indonesia. *Front. Mar. Sci.* 4, 1–13. doi:10.3389/fmars.2017.00144.
- Jorge, C. (2020). Projeto de Caracterização de Fundo Oceânico - Projeto Bacia do Ceará. *Bol. dos Dados Técnicos*, 5. Available at: <https://www.gov.br/anp/pt-br/centrais-de-contenido/publicacoes/boletins-anp/boletins/arquivos-boletim-dos-dados-tecnicos/2020/boletim-dados-tecnicos-15-mar-abr-2020.pdf>.
- Kahng, S. E., Akkaynak, D., Shlesinger, T., Hochberg, E. J., Wiedenmann, J., Tamir, R., et al. (2019). Light, Temperature, Photosynthesis, Heterotrophy, and the Lower Depth Limits of Mesophotic Coral Ecosystems. 801–828. doi:10.1007/978-3-319-92735-0_42.
- Kjerfve, B., Dias, G. T. M., Filippo, A., and Geraldes, M. C. (2021). Oceanographic and environmental characteristics of a coupled coastal bay system: Baía de Ilha Grande–Baía de Sepetiba, Rio de Janeiro, Brazil. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 41, 101594. doi:10.1016/j.risma.2020.101594.
- Lambeck, K., Rouby, H., Purcell, A., Sun, Y., and Sambridge, M. (2014). Sea level and global ice volumes from the Last Glacial Maximum to the Holocene. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 111, 15296–15303. doi:10.1073/pnas.1411762111.
- Larsonneur, C. (1977). La cartographie des dépôts meubles sur le plateau continental français: méthode mise au point et utilisée en Manche. *J. Rech. Ocean.* 2, 34–39.
- Lazzari, L., Wagener, A. L. R., Carreira, R. S., Godoy, J. M. O., Carrasco, G., Lott, C. T., et al. (2019). Climate variability and sea level change during the Holocene: Insights from an inorganic multi-proxy approach in the SE Brazilian continental shelf. *Quat. Int.* 508, 125–141. doi:10.1016/j.quaint.2018.11.011.
- Leão, Z. M. A. N., Kikuchi, R. K. P., Ferreira, B. P., Neves, E. G., Sovierzoski, H. H., Oliveira, M. D. M., et al. (2016). Brazilian coral reefs in a period of global change: A synthesis. *Brazilian J. Oceanogr.* 64, 97–116. doi:10.1590/S1679-875920160916064sp2.
- Lewis, K. B. (1974). The continental terrace. *Earth Sci. Rev.* 10, 37–71. doi:10.1016/0012-8252(74)90025-7.
- Li, M. Z., and King, E. L. (2007). Multibeam bathymetric investigations of the morphology of sand ridges and associated bedforms and their relation to storm processes, Sable Island Bank, Scotian Shelf. *Mar. Geol.* 243, 200–228. doi:10.1016/j.margeo.2007.05.004.
- Lo Iacono, C., Guillén, J., Puig, P., Ribó, M., Ballesteros, M., Palanques, A., et al. (2010). Large-scale bedforms along a tideless outer shelf setting in the western Mediterranean. *Cont. Shelf Res.* 30, 1802–1813. doi:10.1016/j.csr.2010.08.005.
- Madricardo, F., and Rizzetto, F. (2018). Shallow Coastal Landforms. *Springer Geol.*, 161–183. doi:10.1007/978-3-319-57852-1_10.
- Mahiques, M. M., Hanebuth, T. J. J., Martins, C. C., Montoya-Montes, I., Alcántara-Carrió, J., Figueira, R. C. L., et al. (2016). Mud depocentres on the continental shelf: a neglected sink for anthropogenic contaminants from the coastal zone. *Environ. Earth Sci.* 75, 1–12. doi:10.1007/s12665-015-4782-z.
- Mahiques, M. M., Mishima, Y., and Rodrigues, M. (1999). Characteristics of the sedimentary organic matter on the inner and middle continental shelf between Guanabara Bay and Sao Francisco do Sul, southeastern Brazilian margin. *Cont. Shelf Res.* 19, 775–798. doi:10.1016/S0278-4343(98)00105-8.
- Mahiques, M. M., Siegle, E., Francini-Filho, R. B., Thompson, F. L., de Rezende, C. E., Gomes, J. D., et al. (2019). Insights on the evolution of the living Great Amazon Reef System, equatorial West Atlantic. *Sci. Rep.* 9, 1–8. doi:10.1038/s41598-019-50245-6.
- Mahiques, M. M., Tessler, M. G., Maria Ciotti, A., Da Silveira, I. C. A., E Sousa, S. H. D. M., Figueira, R. C. L., et al. (2004). Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil. *Cont. Shelf Res.* 24, 1685–1697. doi:10.1016/j.csr.2004.05.013.
- Mahiques, M. M., y Goya, S. C., Matos, M. C. da S. N. de, Oliveira, R. A. U. de, Kim, B. S. M., Ferreira, P. A. de L., et al. (2021). Grain-size end-members and environmentally sensitive grain-size components: A comparative study in the mud shelf depocenters off southern Brazil. *Int. J. Sediment Res.* 36, 317–327. doi:10.1016/j.ijsrc.2020.07.004.
- Malta, J. V., and Castro, J. W. A. (2018). Petrografia, Isótopos Estáveis e Geocronologia das Rochas de Praia Beachrocks do Litoral do Estado do Rio de Janeiro, Sudeste Brasileiro. *Anuário do Inst. Geociências* 41, 232–244.
- Martins, L. R., and Coutinho, P. N. (1981). The Brazilian continental margin. *Earth Sci. Rev.* 17, 87–107.

doi:10.1016/0012-8252(81)90007-6.

- Maslin, M. (2016). Forty Years of Linking Orbits to Ice Ages. *Nature* 540, 208–210.
- Mazières, A., Gillet, H., Idier, D., Mulder, T., Garlan, T., Mallet, C., et al. (2015). Dynamics of inner-shelf, multi-scale bedforms off the south Aquitaine coast over three decades (Southeast Bay of Biscay, France). *Cont. Shelf Res.* 92, 23–36. doi:10.1016/j.csr.2014.11.002.
- Mazzei, E. F., Bertoncini, A. A., Pinheiro, H. T., Machado, L. F., Vilar, C. C., Guabiroba, H. C., et al. (2017). Newly discovered reefs in the southern Abrolhos Bank, Brazil: Anthropogenic impacts and urgent conservation needs. *Mar. Pollut. Bull.* 114, 123–133. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.08.059.
- Meadows, M. E., Rogers, J., Rogers, J., Lee-Thorp, J. A., Lee-Thorp, J. A., Bateman, M. D., et al. (2002). Holocene geochronology of a continental-shelf mudbelt off southwestern Africa. *Holocene* 12, 59–67. doi:10.1191/0959683602hl521rp.
- Mehta, A. J., Hayter, E. J., Parker, W. R., Krone, R. B., and Teeter, A. M. (1989). Cohesive sediment transport. I: process description. *J. Chem. Inf. Model.* 115, 1076–1093. Available at: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9429\(1989\)115:8\(1076\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9429(1989)115:8(1076)).
- Mellet, C. L., Hodgson, D. M., Plater, A. J., Mauz, B., Selby, I., and Lang, A. (2013). Denudation of the continental shelf between Britain and France at the glacial-interglacial timescale. *Geomorphology* 203, 79–96. doi:10.1016/j.geomorph.2013.03.030.
- Milankovitch, M. (1941). *Canon of insolation and the ice-age problem (Kanon der Erdbestrahlung und seine Anwendung auf das Eiszeitenproblem)*. Belgrade.
- Moreira, D. L., Dalto, A. G., Jr., A. G. F., Valerio, A. M., Detoni, A. M. S., Bonecker, A. C. T., et al. (2022). Multidisciplinary Scientific Cruises for Environmental Characterization in Santos Basin. *Ocean Coast. Res.*
- Morgan, K. M., and Kench, P. S. (2016). Parrotfish erosion underpins reef growth, sand talus development and island building in the Maldives. *Sediment. Geol.* 341, 50–57. doi:10.1016/j.sedgeo.2016.05.011.
- Mörner, N. A. (2018). *Development of Ideas and New Trends in Modern Sea Level Research: The Pre-Quaternary, Quaternary, Present, and Future*. doi:10.1016/B978-0-12-814350-6.00002-1.
- Moscon, D. M. C., and Bastos, A. C. (2010). Occurrence of storm-generated bedforms along the inner continental shelf - southeastern Brazil. *Brazilian J. Oceanogr.* 58, 45–56. doi:10.1590/s1679-87592010000600006.
- Moura, R. L., Amado-Filho, G. M., Moraes, F. C., Brasileiro, P. S., Salomon, P. S., Mahiques, M. M., et al. (2016). An extensive reef system at the Amazon River mouth. *Sci. Adv.* 2. doi:10.1126/sciadv.1501252.
- Nelson, W. A. (2009). Calcified macroalgae critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: A review. *Mar. Freshw. Res.* 60, 787–801. doi:10.1071/MF08335.
- Niedoroda, A. W. (2019). “Continental Shelves,” in *Encyclopedia of Coastal Science*, eds. C. W. Fink and C. Makowski (Springer Nature Switzerland AG), 642–644.
- Nir, O., Gruber, D. F., Einbinder, S., Kark, S., and Tchernov, D. (2011). Changes in scleractinian coral *Seriatopora hystrix* morphology and its endocellular Symbiodinium characteristics along a bathymetric gradient from shallow to mesophotic reef. *Coral Reefs* 30, 1089–1100. doi:10.1007/s00338-011-0801-z.
- Nnafie, A., Swart, H. E. d., Calvete, D., and Garnier, R. (2015). Dynamics of shoreface-connected and inactive sand ridges on a shelf, Part 2: The role of sea level rise and associated changes in shelf geometry. *Cont. Shelf Res.* 104, 63–75. doi:10.1016/j.csr.2015.05.009.
- O’Leary, M. J., Paumard, V., and Ward, I. (2020). Exploring Sea Country through high-resolution 3D seismic imaging of Australia’s NW shelf: Resolving early coastal landscapes and preservation of underwater cultural heritage. *Quat. Sci. Rev.* 239, 106353. doi:10.1016/j.quascirev.2020.106353.
- Oberle, F. K. J., Storlazzi, C. D., and Hanebuth, T. J. J. (2014). Wave-driven sediment mobilization on a storm-controlled continental shelf (Northwest Iberia). *J. Mar. Syst.* 139, 362–372. doi:10.1016/j.jmarsys.2014.07.018.
- Pascelli, C., Riul, P., Riosmena-Rodríguez, R., Scherner, F., Nunes, M., Hall-Spencer, J. M., et al. (2013). Seasonal and depth-driven changes in rhodolith bed structure and associated macroalgae off Arvoredo island (southeastern Brazil). *Aquat. Bot.* 111, 62–65. doi:10.1016/j.aquabot.2013.05.009.
- Patruno, S., and Helland-Hansen, W. (2018). Clinofolds and clinofold systems: Review and dynamic classification scheme for shorelines, subaqueous deltas, shelf edges and continental margins. *Earth-Science Rev.* 185, 202–233. doi:10.1016/j.earscirev.2018.05.016.
- Pendleton, E. A., Brothers, L. L., Thieler, E. R., and Sweeney, E. M. (2017). Sand ridge morphology and bedform migration patterns derived from bathymetry and backscatter on the inner-continental shelf

- offshore of Assateague Island, USA. *Cont. Shelf Res.* 144, 80–97. doi:10.1016/j.csr.2017.06.021.
- Perry, C. T., Kench, P. S., O’Leary, M. J., Morgan, K. M., and Januchowski-Hartley, F. (2015). Linking reef ecology to island building: Parrotfish identified as major producers of island-building sediment in the Maldives. *Geology* 43, 503–506. doi:10.1130/G36623.1.
- Petrobras (2022). Comunicação Bacia de Santos: Projeto de Caracterização Regional da Bacia de Santos. 1. Available at: <https://comunicabaciadesantos.petrobras.com.br/programa-ambiental/projeto-de-caracterizacao-regional-da-bacia-de-santos-pcr-bs.html> [Accessed August 29, 2022].
- Pirazzoli, P. A. (1993). Global sea-level changes and their measurement. *Glob. Planet. Change* 8, 135–148. doi:10.1016/0921-8181(93)90021-F.
- Posamentier, H. W. (2001). Lowstand alluvial bypass systems: Incised vs. unincised Henry W. Posamentier. *Am. Assoc. Pet. Geol. Bull.* 85, 1771–1793.
- Posamentier, H. W., Jervy, M. T., and Vail, P. R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition I: conceptual framework. *Sea-level Chang. an Integr. approach*, 109–124. doi:10.2110/pec.88.01.0109.
- Posamentier, H. W., and Morris, W. R. (2000). Aspects of the stratal architecture of forced regressive deposits. *Geol. Soc. Spec. Publ.* 172, 19–46. doi:10.1144/GSL.SP.2000.172.01.02.
- Posamentier, H. W., and Vail, P. R. (1988). Eustatic controls on clastic deposition II: sequence and systems tract models. *Sea-level Chang. an Integr. approach*, 125–154. doi:10.2110/pec.88.01.0125.
- Post, A. L. (2008). The application of physical surrogates to predict the distribution of marine benthic organisms. *Ocean Coast. Manag.* 51, 161–179. doi:10.1016/j.ocecoaman.2007.04.008.
- Queiroz, E. V. de, Araújo, P. V. do N., Hammill, E., and Amaral, R. F. do (2016). Morphological characteristics of rhodolith and correlations with associated sediment in a sandstone reef: Northeast Brazil. *Reg. Stud. Mar. Sci.* 8, 133–140. doi:10.1016/j.rsma.2016.10.005.
- Rabineau, M., Berné, S., Olivet, J.-L., Aslanian, D., Guillocheau, F., and Joseph, P. (2007). Corrigendum to: Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 years) [Earth Planet. Sci. Lett. 252 (2006), 119–137]. *Earth Planet. Sci. Lett.* 254, 446–447. doi:10.1016/j.epsl.2006.11.050.
- Rabineau, M., Berné, S., Olivet, J. L., Aslanian, D., Guillocheau, F., and Joseph, P. (2006). Paleo sea levels reconsidered from direct observation of paleoshoreline position during Glacial Maxima (for the last 500,000 yr). *Earth Planet. Sci. Lett.* 252, 119–137. doi:10.1016/j.epsl.2006.09.033.
- Railsback, L. B., Gibbard, P. L., Head, M. J., Voarintsoa, N. R. G., and Toucanne, S. (2015). An optimized scheme of lettered marine isotope substages for the last 1.0 million years, and the climatostratigraphic nature of isotope stages and substages. *Quat. Sci. Rev.* 111, 94–106. doi:10.1016/j.quascirev.2015.01.012.
- Ramesh, R., Chen, Z., Cummins, V., Day, J., D’Elia, C., Dennison, B., et al. (2015). Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone: Past, present & future. *Anthropocene* 12, 85–98. doi:10.1016/j.ancene.2016.01.005.
- Reis, A. T., Maia, R. M. C., Silva, C. G., Rabineau, M., Guerra, J. V., Gorini, C., et al. (2013). Origin of step-like and lobate seafloor features along the continental shelf off Rio de Janeiro State, Santos basin-Brazil. *Geomorphology* 203, 25–45. doi:10.1016/j.geomorph.2013.04.037.
- Rich, J. L. (1951). Three critical environments of deposition and criteria for recognition of rocks deposited in each of them. *Bull. Geol. Soc. Am.* 62, 1–20. doi:10.1130/0016-7606(1951)62.
- Rocha, L. A., Pinheiro, H. T., Shepherd, B., Papastamatiou, Y. P., Luiz, O. J., Pyle, R. L., et al. (2018). Mesophotic coral ecosystems are threatened and ecologically distinct from shallow water reefs. *Science* (80-.). 361, 281–284. doi:10.1126/science.aaq1614.
- Sarkar, S., Das, V. K., Barman, K., and Debnath, K. (2021). Effect of the Wave on Sediment Suspension and the Morphological Pattern of Ripple Formation. *Ocean Sci. J.* doi:10.1007/s12601-021-00012-4.
- Scarlato, P. D., and Kim, H. S. (2002). On the geometry of cohesive settling flocs. *Proc. Mar. Sci.* 5, 265–276. doi:10.1016/S1568-2692(02)80021-3.
- Schattner, U., Lazar, M., Tibor, G., Ben-Avraham, Z., and Makovsky, Y. (2010). Filling up the shelf - A sedimentary response to the last post-glacial sea rise. *Mar. Geol.* 278, 165–176. doi:10.1016/j.margeo.2010.10.006.
- Schmahl, G. P., Hickerson, E. L., and Precht, W. F. (2008). Biology and Ecology of Coral Reefs and Coral Communities in the Flower Garden Banks Region, Northwestern Gulf of Mexico. *Coral Reefs USA*, 221–261. doi:10.1007/978-1-4020-6847-8_6.
- Schnack, E., and Pirazzoli, P. (1990). Quaternary sea-level changes. *Palaeogeography, Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 82, 65–68. doi:10.1016/S0031-0182(12)80019-8.

- Schwab, W. C., Baldwin, W. E., Warner, J. C., List, J. H., Denny, J. F., Liste, M., et al. (2017). Change in morphology and modern sediment thickness on the inner continental shelf offshore of Fire Island, New York between 2011 and 2014: Analysis of hurricane impact. *Mar. Geol.* 391, 48–64. doi:10.1016/j.margeo.2017.07.010.
- Shepard, F. P. (1954). Nomenclature Based on Sand-silt-clay Ratios. *SEPM J. Sediment. Res.* doi:10.1306/d4269774-2b26-11d7-8648000102c1865d.
- Sherman, C., Nemeth, M., Ruíz, H., Bejarano, I., Appeldoorn, R., Pagán, F., et al. (2010). Geomorphology and benthic cover of mesophotic coral ecosystems of the upper insular slope of southwest Puerto Rico. *Coral Reefs* 29, 347–360. doi:10.1007/s00338-010-0607-4.
- Silva, A. L. C., Silva, M. A. M., Souza, R. S., and Pinto, M. L. V. (2014). The role of beachrocks on the evolution of the Holocene barrier systems in Rio de Janeiro, southeastern Brazil. *J. Coast. Res.* 70, 170–175. doi:10.2112/SI70-029.1.
- Silva, R. C. de O. e, and Dias, G. T. de M. (2020). Submerged Pleistocene spodic horizon remnant exposed on the inner continental shelf off Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil). *Geo-Marine Lett.* 40, 925–933. doi:10.1007/s00367-019-00622-x.
- Simioni, B. I., Angulo, R. J., Veiga, F. A., Sielski, L. H., and Souza, M. C. de (2018). Genesis of submerged sandstones in Paraná State continental shelf, Southern Brazil, based on cementation patterns, ages and stable isotopes. *Brazilian J. Oceanogr.* 66, 267–282. doi:http://orcid.org/0000-0001-7296-8107.
- Song, G. (2019). An underwater topographic survey for Taiwan offshore wind farms is detailed here by Gwo-shyh Song, Associate Professor at the National Taiwan University. Available at: <https://www.openaccessgovernment.org/taiwan-offshore-wind-farms/68264/> [Accessed March 27, 2022].
- Spotorno-Oliveira, P., Tâmega, F. T. de S., Oliveira, C. A. de, Castro, J. W. A., Coutinho, R., Iryu, Y., et al. (2016). Effects of Holocene sea level changes on subtidal palaeoecosystems, southeastern Brazil. *Mar. Geol.* 381, 17–28. doi:10.1016/j.margeo.2016.08.007.
- Steneck, R. S. (1986). The ecology of coralline algal crusts: convergent patterns and adaptative strategies. *Annul Rev. Ecol. Syst. Vol. 17*, 273–303. doi:10.1146/annurev.ecolsys.17.1.273.
- Svob, S., Arroyo-Mora, J. P., and Kalacska, M. (2014). The development of a forestry geodatabase for natural forest management plans in Costa Rica. *For. Ecol. Manage.* 327, 240–250. doi:10.1016/j.foreco.2014.05.024.
- Swart, H. E., and Yuan, B. (2019). Dynamics of offshore tidal sand ridges, a review. *Environ. Fluid Mech.* 19, 1047–1071. doi:10.1007/s10652-018-9630-8.
- Swift, D. J. P., and Field, M. E. (1981). Evolution of a classic sand ridge field: Maryland sector, North American inner shelf. *Sedimentology* 28, 461–482. doi:10.1111/j.1365-3091.1981.tb01695.x.
- Swift, D. J. P., and Thorne, J. A. (1991). “Sedimentation on Continental Margins, I: A General Model for Shelf Sedimentation,” in *Shelf Sand and Sandstone Bodies*, eds. D. J. P. Swift, G. F. Oertel, R. W. Tillman, and J. A. Thorne (Oxford: Blackwell Scientific Publications). doi:10.1002/9781444303933.ch1.
- Tâmega, F. T. de S., Bassi, D., Figueiredo, M. A. de O., and Cherkinski, A. (2014). Deep-water rhodolith bed from central Brazilian continental shelf, Campos Basin: coralline algal and faunal taxonomic composition. *Galaxea, J. Coral Reef Stud.* 16, 21–31. doi:10.3755/galaxea.16.21.
- Teisson, C., Ockenden, M., Le Hir, P., Kranenburg, C., and Hamm, L. (1993). Cohesive sediment transport processes. *Coast. Eng.* 21, 129–162. doi:10.1016/0378-3839(93)90048-D.
- Toniolo, T. de F., Giannini, P. C. F., Angulo, R. J., de Souza, M. C., Pessenda, L. C. R., and Spotorno-Oliveira, P. (2020). Sea-level fall and coastal water cooling during the Late Holocene in Southeastern Brazil based on vermetid bioconstructions. *Mar. Geol.* 428, 106281. doi:10.1016/j.margeo.2020.106281.
- Tonnon, P. K., van Rijn, L. C., and Walstra, D. J. R. (2007). The morphodynamic modelling of tidal sand waves on the shoreface. *Coast. Eng.* 54, 279–296. doi:10.1016/j.coastaleng.2006.08.005.
- Trentesaux, A., Stolk, A., and Berné, S. (1999). Sedimentology and stratigraphy of a tidal sand bank in the southern North Sea. *Mar. Geol.* 159, 253–272. doi:10.1016/S0025-3227(99)00007-9.
- Vale, N. F., Amado-Filho, G. M., Braga, J. C., Brasileiro, P. S., Karez, C. S., Moraes, F. C., et al. (2018). Structure and composition of rhodoliths from the Amazon River mouth, Brazil. *J. South Am. Earth Sci.* 84, 149–159. doi:10.1016/j.jsames.2018.03.014.
- Vale, N. F., Braga, J. C., de Moura, R. L., Salgado, L. T., de Moraes, F. C., Karez, C. S., et al. (2022a). Distribution, morphology and composition of mesophotic ‘reefs’ on the Amazon Continental Margin. *Mar. Geol.* 447, 106779. doi:10.1016/j.margeo.2022.106779.

- Vale, N. F. L., Braga, J. C., Bastos, A. C., Moraes, F. C., Karez, C. S., Bahia, R. G., et al. (2022b). Structure and Composition of Rhodolith Beds from the Sergipe-Alagoas Basin (NE Brazil, Southwestern Atlantic). *Diversity* 14, 282. doi:10.3390/d14040282.
- van Dijk, T. A. G. P., Best, J., and Baas, A. C. W. (2021). *Subaqueous and Subaerial Depositional Bedforms*. 2nd ed. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-08-102908-4.00187-9.
- van Dijk, T. A. G. P., and Lindenbergh, R. C. (2017). “Methods for Analysing Bedform Geometry and Dynamics,” in *Atlas of Bedforms in the Western Mediterranean*, eds. J. Guillén, J. Acosta, F. L. Chiocci, and A. Palanques (Switzerland: Springer International Publishing Switzerland), 307.
- van Dijk, T. A. G. P., Lindenbergh, R. C., and Egberts, P. J. P. (2008). Separating bathymetric data representing multiscale rhythmic bed forms: A geostatistical and spectral method compared. *J. Geophys. Res. Earth Surf.* 113, 1–16. doi:10.1029/2007JF000950.
- Veras, P. de C., Pierozzi-Jr., I., Lino, J. B., Amado-Filho, G. M., Senna, A. R. de, Santos, C. S. G., et al. (2020). Drivers of biodiversity associated with rhodolith beds from euphotic and mesophotic zones: Insights for management and conservation. *Perspect. Ecol. Conserv.* 18, 37–43. doi:10.1016/j.pecon.2019.12.003.
- Villaça, R. C. (2009). “Recifes Biológicos,” in *Biologia Marinha*, eds. R. C. Pereira and A. Soares-Gomes, 382. doi:10.13140/2.1.1786.1923.
- Vött, A., and Brückner, H. (2009). Ergebnisse aktueller Küstenforschung. *Geogr. der Meere und Küsten* 26.
- Wagoner, J. c., Posamentier, H. W., Mitchum, R. M., Vail, P. R., Sarg, J. F., Loutiti, T. S., et al. (1988). An overview of the fundamentals of Sequence Stratigraphy and key definitions. *Sea-Level Chang.*, 39–45. doi:10.2110/pec.88.01.0039.
- Wang, R., Colombera, L., and Mountney, N. P. (2019). Geological controls on the geometry of incised-valley fills: Insights from a global dataset of late-Quaternary examples. *Sedimentology* 66, 2134–2168. doi:10.1111/sed.12596.
- Weinstein, D. K., Klaus, J. S., and Smith, T. B. (2015). Habitat heterogeneity reflected in mesophotic reef sediments. *Sediment. Geol.* 329, 177–187. doi:10.1016/j.sedgeo.2015.07.003.
- Weinstein, D. K., Smith, T. B., and Klaus, J. S. (2014). Mesophotic bioerosion: Variability and structural impact on U.S. Virgin Island deep reefs. *Geomorphology* 222, 14–24. doi:10.1016/j.geomorph.2014.03.005.
- Weinstein, D. K., Tamir, R., Kramer, N., Eyal, G., Berenshtein, I., Shaked, Y., et al. (2021). Mesophotic reef geomorphology categorization, habitat identification, and relationships with surface cover and terrace formation in the Gulf of Aqaba. *Geomorphology* 379, 107548. doi:10.1016/j.geomorph.2020.107548.
- Whitney, F., Conway, K., Thomson, R., Barrie, V., Krautter, M., and Mungov, G. (2005). Oceanographic habitat of sponge reefs on the Western Canadian Continental Shelf. *Cont. Shelf Res.* 25, 211–226. doi:10.1016/j.csr.2004.09.003.
- Williams, P. W. (2017). *Glaciations and Climate Change*. Elsevier Inc. doi:10.1016/b978-0-12-812493-2.00007-4.
- Wright, L. D. (1995). *Morphodynamics of inner continental shelves*. 1st Editio. Boca Raton, Florida: CRC Press.
- Yamanaka, K. L., Picard, K., Conway, K. W., and Flemming, R. (2012). Rock Reefs of British Columbia, Canada: Inshore Rockfish Habitats. *Seafloor Geomorphol. as Benthic Habitat*, 509–522. doi:10.1016/B978-0-12-385140-6.00036-0.
- Ybert, J. P., Bissa, W. M., Catharino, E. L. M., and Kutner, M. (2003). Environmental and sea-level variations on the southeastern Brazilian coast during the Late Holocene with comments on prehistoric human occupation. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 189, 11–24. doi:10.1016/S0031-0182(02)00590-4.
- Yincan et al, Y. (2017). *Submarine Sand Waves and Sand Ridges*. doi:10.1016/b978-0-12-812726-1.00012-7.
- Yuan, B., de Swart, H. E., and Panadès, C. (2016). Sensitivity of growth characteristics of tidal sand ridges and long bed waves to formulations of bed shear stress, sand transport and tidal forcing: A numerical model study. *Cont. Shelf Res.* 127, 28–42. doi:10.1016/j.csr.2016.08.002.
- Zeiler, M. (1999). *Modeling Our World: The ESRI Guide to Geodatabase Design*. 2nd ed. Redlands: ESRI Press.