



UNIVERSIDADE FEDERAL DA BAHIA
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA
ÁREA DE CONCENTRAÇÃO:
GEOLOGIA MARINHA, COSTEIRA E SEDIMENTAR

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

**UTILIZAÇÃO DE SONAR INTERFEROMÉTRICO DE ALTA
RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO
DE FASES CONSTRUTORAS E NÃO CONSTRUTORAS DE
RECIFES NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

ANITA GOMES OLIVEIRA

SALVADOR

2023

**UTILIZAÇÃO DE SONAR INTERFEROMÉTRICO DE ALTA
RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO
DE FASES CONSTRUTORAS E NÃO CONSTRUTORAS DE
RECIFES NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

Anita Gomes Oliveira

Orientador: Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi

Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia do Instituto de Geociências da Universidade Federal da Bahia como requisito parcial à obtenção do Título de Mestre em Geologia, Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar.

SALVADOR

2023

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca
Universitária de Ciências e Tecnologias Prof. Omar
Catunda, SIBI - UFBA.**

O48 Oliveira, Anita Gomes

Utilização de sonar interferométrico de alta resolução para identificação e diferenciação de fases construtoras e não construtoras de recifes na baía de todos os santos – Salvador, 2024.

76 f.

Orientador: Prof. Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal da Bahia.
Instituto de Geociências, 2024.

1. Geologia Marinha. 2. Mapeamento - Recifes. 3. Ecossistemas. I. Kikuchi, Ruy Kenji Papa de. II. Universidade Federal da Bahia. III. Título.

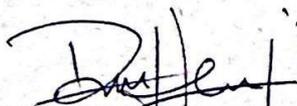
CDU 551.46

ANITA GOMES OLIVEIRA

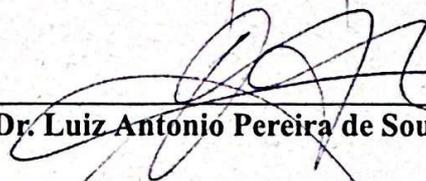
**UTILIZAÇÃO DE SONAR INTERFEROMÉTRICO DE ALTA
RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO
DE FASES CONSTRUTORAS E NÃO CONSTRUTORAS DE
RECIFES NA BAÍA DE TODOS OS SANTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia, como requisito para a obtenção do Grau de Mestre em Geologia na área de concentração Área de Concentração: Geologia Marinha, Costeira e Sedimentar em 11/12/2023.

DISSERTAÇÃO APROVADA PELA BANCA EXAMINADORA:



Dr. Ruy Kenji Papa de Kikuchi (Orientador) - UFBA



Dr. Luiz Antonio Pereira de Souza - LAPS Consult



Dr. Arthur Antonio Machado - UFBA

Salvador – BA
2023

“A persistência é o caminho do êxito.”
- Charles Chaplin

AGRADECIMENTOS

Agradeço a minha família por ser o grande pilar de sustentação das minhas conquistas;

A minha filha por ser capaz de revelar sempre o que existe de melhor em mim;

A meu esposo pelo companheirismo inabalável em todas as áreas da minha vida, inclusive na execução deste trabalho;

Ao meu orientador Ruy, pela confiança e suporte e aos colegas do Recor, em especial André, Danilo e Gabriel, fundamentais nas etapas de campo;

As minhas amigas que estão sempre presentes em todos os momentos e torcem pelo meu sucesso;

Agradeço ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da UFBA e ao Instituto de Geociências da UFBA pelo apoio.

À Fundação de Apoio à Pesquisa e à Extensão (FAPEX) por meio de bolsa de estudos e o apoio da CAPES - Código de financiamento 001.

RESUMO

Os recifes de corais são ecossistemas de grande relevância devido a sua atuação desde ciclos biogeoquímicos até proteção da linha de costa e seu valor turístico. Uma das ameaças mais impactantes para a capacidade construtora de um recife é a mudança de fase, fenômeno no qual corais hermatípicos são amplamente substituídos por organismos não calcificadores principalmente macroalgas e corais moles. O mapeamento geofísico foi realizado em 3 áreas recifais da Baía de Todos os Santos, sendo elas Pedra Alva, Poste IV e Mangueira. Foram gerados mapas batimétricos, sonográficos e de nível de retroespalhamento acústico. Os afloramentos recifais variam desde 3m de profundidade no recife mais raso (Poste IV) até 10m no topo do recife mais profundo (Pedra Alva), onde as profundidades no entorno sedimentar chegam até 34m. O perfil de elevação do recife Poste IV foi o que apresentou menor irregularidade topográfica e também onde foi calculada a maior cobertura de organismos não construtores como algas e corais moles. Através do imageamento sonográfico foi possível delimitar as formações recifais e detectar as alterações texturais nas áreas sedimentares devido a diferença de refletividade no mosaico. A partir do mosaico do *Backscatter* foi possível segmentar as áreas em diferentes classes acústicas, a partir das quais foram executados os pontos de validação, sendo eles fotos subaquáticas, vídeo transectos e coleta de sedimentos. Com esse *ground truthing* foi possível calcular o percentual de cobertura dos organismos construtores e não construtores, bem como determinar as classes granulométricas predominantes nas áreas sedimentares. Apesar de todos os recifes terem apresentado grandes percentuais de cobertura de organismos não construtores (acima de 70%), o recife Pedra Alva ainda apresenta expressiva cobertura de corais hermatípicos, podendo ser indicativo de uma fase construtiva. Os níveis de energia do retroespalhamento acústico das áreas recifais não mostraram maior intensidade do que alguns pontos sedimentares em seus entornos, muito provavelmente devido à grande cobertura de organismos não construtores, o que afeta diretamente a rugosidade e a dureza do fundo.

Palavras-chave: sonar de varredura lateral interferométrico; retroespalhamento acústico; batimetria; recifes; mudança de fase.

ABSTRACT

Coral reefs are highly relevant ecosystems due to their role from biogeochemical cycles to the protection of the coastline and their tourist value. One of the most impactful threats to the building capacity of a reef is phase shift, a phenomenon in which hermatypic corals are largely replaced by non-calcifying organisms, mainly macroalgae and soft corals. Geophysical mapping was carried out in 3 reef areas of Todos os Santos Bay, namely Pedra Alva, Poste IV and Mangueira. Bathymetric, sonographic and acoustic backscatter level maps were generated. The reef outcrops vary from 3m deep in the shallowest reef (Poste IV) to 10m at the top of the deepest reef (Pedra Alva), where depths in the sedimentary surroundings reach up to 34m. The elevation profile of the Poste IV reef was the one with the least topographic irregularity and also where the greatest coverage of non-building organisms such as algae and soft corals was calculated. Through sonographic imaging it was possible to delimit the reef formations and detect textural changes in the sedimentary areas due to the difference in reflectivity in the mosaic. From the Backscatter mosaic it was possible to segment the areas into different acoustic classes, from which validation points were carried out, including underwater photos, video transects and sediment collection. With this ground truthing it was possible to calculate the percentage of coverage of building and non-building organisms, as well as determining the predominant grain size classes in the sedimentary areas. Despite all reefs having high percentages of coverage of non-building organisms (above 70%), the Pedra Alva reef still has a significant coverage of hermatypic corals, which may be indicative of a construction phase. The levels of acoustic backscatter in the reef areas did not show greater intensity than some sedimentary points in their surroundings, most likely due to the large coverage of non-building organisms, which directly affects the roughness and hardness of the bottom.

Keywords: multiphase echo sounder; backscatter; bathymetry; reefs; phase shift.

LISTA DE FIGURAS

Fig 1 Fácies sedimentares e recifais da BTS (modificado de Dominguez e Bittencourt, 2009) e áreas recifais imageadas neste estudo com o sonar de varredura lateral interferométrico.....	26
Fig 2 Localização e mapas batimétricos das áreas de estudo. Linhas pretas mostram as áreas recifais onde foram realizados video transectos e os círculos pretos mostram onde foram realizadas coletas de sedimento nas proximidades dos recifes	32
Fig 3 Localização e mapas batimétricos das áreas de estudo. Mapa de retroespalhamento acústico dos 3 recifes mapeados. Os tons mais escuros indicam baixos valores de backscatter, e os tons mais claros altos valores. Os pontos onde foram realizados mergulhos para validação estão indicados em vermelho. O mapa a) refere-se ao Recife Pedra da Mangueira. O mapa b) refere-se ao Recife Pedra Alva. E o mapa c) refere-se ao Recife Poste IV.	32
Fig 4 a) Mapa batimétrico do Recife Poste IV e suas proximidades. b) e b1) Detalhes da geomorfologia de um alto recifal componente deste complexo, onde observam-se suas profundidades e feições. Visualização em 3D e 2D, respectivamente	34
Fig 5 a) Mapa batimétrico do Recife da Mangueira e suas proximidades. b) e b1) Detalhes da geomorfologia e principal afloramento recifal deste complexo, onde observam-se suas profundidades e morfologia, visualização em 3D e 2D, respectivamente.....	36
Fig 6 a) Mapa batimétrico do Recife Pedra Alva e suas proximidades. b) Localização da seção transversal e b1) Seção transversal de um alto recifal componente deste complexo, onde observam-se suas profundidades e características morfológicas.	37
Fig 7 Mosaicos sonográficos das áreas recifais imageadas. a) Poste IV. b) Recife da Mangueira. c) Pedra Alva	38
Fig 8 Perfis de elevação dos 3 recifes imageados.....	39

SUMÁRIO

CAPÍTULO 1	16
INTRODUÇÃO GERAL	16
CAPÍTULO 2	21
UTILIZAÇÃO DE SONAR INTERFEROMÉTRICO DE ALTA RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO DE FASES CONSTRUTORAS E NÃO CONSTRUTORAS DE RECIFES NA BAIJA DE TODOS OS SANTOS	21
1. INTRODUÇÃO	22
2. ÁREA DE ESTUDO	25
3. MATERIAIS E MÉTODOS	27
3.1. COLETA DOS DADOS GEOFÍSICOS	27
3.2. COLETA DOS DADOS DE VALIDAÇÃO DE CAMPO	28
3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS E PRODUÇÃO DOS MAPAS	29
4. RESULTADOS	31
4.1. SONOGRAFIA E GEOMORFOLOGIA DO FUNDO MARINHO.....	31
4.2. INTENSIDADE DO RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO BASEADO NA IMAGEM.....	41
4.3. VERDADE DE CAMPO (GROUND TRUTHING)	42
5. DISCUSSÃO	48
5.1. ANÁLISE INTEGRADA DAS CARACTERÍSTICAS DO FUNDO	48
5.2. RELAÇÃO ENTRE FASE RECIFAL, RETROESPALHAMENTO ACUSTICO E RUGOSIDADE (TRI).....	50
6. CONCLUSÃO	53
7. AGRADECIMENTOS	54
8. REFERENCIAS.....	55
CONCLUSÕES	57
ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA	59
ANEXO B - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO	60
ANEXO C – RELATÓRIO DETALHADO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS	61

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO GERAL

Devido às mais diversas pressões que as atividades humanas vêm causando no ambiente marinho, os ecossistemas bentônicos e sua biodiversidade têm sido cada vez mais impactados (BROWN *et al*, 2011). Atividades como pesca predatória, turismo, dragagens, poluição, entre outros, contribuem para o aumento da vulnerabilidade desses ambientes, aumentando ainda mais a necessidade de monitoramento e proteção (SMITH *et al*, 2015).

Por estarem presentes em regiões de grande densidade populacional e intensas atividades antrópicas, os ecossistemas bentônicos de águas rasas, em inúmeras localidades, se encontram em situação de extrema exposição (BROWN *et al*, 2011; HARRIS; BAKER, 2020). Atividades portuárias como construções de estruturas submersas, dragagens frequentes e acidentes na movimentação de óleo e derivados de petróleo comprometem tanto a integridade dos ambientes bentônicos como a qualidade da coluna d'água circundante (BARROS *et al*, 2012). Mudanças climáticas e a erosão costeira também atuam nesse processo cada vez mais evidente de alteração e perda de biodiversidade desses ambientes (BROWN; BLONDEL, 2009; CRUZ, 2008).

A investigação de substratos marinhos utilizando métodos acústicos de sondagem tem ganhado cada vez mais espaço na pesquisa científica das últimas décadas. Entretanto, o ambiente marinho é pobremente conhecido e ainda existe uma grande defasagem nas taxas de mapeamento em alta resolução quando comparados aos estudos em terra (BROWN *et al*, 2011).

Apesar do mapeamento do fundo marinho, através de métodos indiretos de sondagem utilizando ferramentas acústicas, fornecer preferencialmente informações abióticas do meio, principalmente quando se pretende mapear grandes áreas, não se pode minimizar a contribuição desses métodos também no processo de investigação do meio biótico (EASTWOOD *et al*, 2006).

Os substratos recifais, sejam eles biogênicos ou rochosos, normalmente apresentam assinaturas acústicas bem distintas e são considerados uma exceção no processo de sensoriamento remoto acústico, visto que os próprios dados geofísicos, normalmente representando a porção abiótica do mapeamento, podem ser utilizados diretamente no processo de medição da distribuição espacial das comunidades bentônicas ou do que seria o seu nicho ideal (BROWN *et al*, 2011).

Apesar dessa identidade acústica facilitar o mapeamento em grande escala, os métodos para se investigar as complexidades dentro de um mesmo recife, e, portanto, acessar informações biológicas, ainda são escassos (ZIEGER *et al*, 2009). Entretanto, características biológicas importantes sobre a composição da cobertura biótica (corais, algas, briozoários etc) de um recife podem ser refletidas nas informações relacionadas a alguns parâmetros do terreno como rugosidade, dureza e aspecto.

A análise de parâmetros desta natureza, tem grande potencial, portanto, de contribuir de maneira expressiva a resolução de questões relacionadas à mudança de fase, um impacto atual que vem fragilizando recifes ao redor de todo o mundo, e se caracteriza pela ampla substituição de corais hermatípicos por organismos não calcificadores principalmente macroalgas e corais moles (CRUZ *et al*, 2015).

Tais características do leito marinho são, em parte, refletidas nos valores de *backscattering*, os quais fornecem uma quantificação e qualificação dos níveis de retroespalhamento das ondas acústicas na interface fundo marinho e coluna d'água e podem ser medidos tanto pelo sonar de varredura lateral quanto pelo ecobatímetro multifeixe (LURTON; LAMARCHE, 2015).

A mais nova geração de sonar de varredura lateral para águas rasas, os sonares interferométricos, vem sendo aperfeiçoada e popularizada desde o início da década de 2000 até os dias atuais, apesar da tecnologia para sua modulação ter sido desenvolvida desde a década de 1950 e 1960 (MENANDRO; BASTOS, 2020). Esses sonares apresentam dois transdutores de emissão e

registram as séries temporais de fases e amplitudes em vários receptores, o que lhes fornece algumas vantagens importantes quando comparados aos sistemas multifeixe convencionais, e por isso ganharam espaço nas áreas comerciais e na pesquisa acadêmica (HILLER; HOGARTH, 2005). As melhorias mais relevantes oferecidas pelos ecobatímetros multifásicos nos levantamentos de águas rasas é que, além de coletarem simultaneamente dados batimétricos e sonográficos e apresentarem maior e mais constante resolução *acros-track*, eles têm a capacidade de manter a abertura dos feixes, e conseqüentemente sua área de ensonificação, mesmo com a mudança de profundidades, garantindo a cobertura de faixas de até 12 vezes a profundidade da lâmina d'água em equipamentos mais recentes (BRISSON; HILLER, 2015).

A análise do *backscattering* baseada na imagem tem como principal produto um mosaico de retorno acústico com valores normalizados, ou seja, sem levar em consideração as peculiaridades do retroespalhamento em diferentes ângulos de incidência. Através dela pode-se inferir variações da natureza do substrato como dureza e rugosidade, permitindo uma análise qualitativa da área e, portanto, associações diretas entre os níveis de retroespalhamento acústico do substrato medidos em decibéis e suas propriedades geotécnicas (BROWN; BLONDEL, 2009).

Todos os dados geofísicos adquiridos neste trabalho (batimetria, sonografia e retroespalhamento acústico) são usados, de alguma maneira, no processo de caracterização do fundo marinho, fazendo uma ligação, através de diferentes abordagens, entre os dados abióticos e os dados bióticos (LECOURS *et al*, 2016). Essa relação é fundamentada principalmente na ideia de nicho ecológico predominante para os mais variados tipos de comunidades que vivem direta ou indiretamente ligadas ao substrato marinho (HARRIS; BAKER, 2020), seja ele sedimentar, rochoso ou recifal.

Esses organismos apresentam, pelo menos em algum grau, uma preferência de desenvolvimento ótimo associado a condições ambientais específicas relacionadas a características

da coluna d'água (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido etc) e/ou características morfológicas e geológicas do fundo marinho (BROWN *et al*, 2011). Esse tipo de associação permite inferências e extrapolações a respeito da presença ou ausência de determinados grupos de organismos e suas associações com dados indiretos coletados pela sondagem geofísica.

As contribuições apresentadas neste trabalho deu-se como um passo inicial para que, através dos dados coletados pelo sonar interferométrico de alta resolução (batimetria, sonografia e retroespalhamento acústico), seja possível identificar e diferenciar as fases construtoras e não construtoras dos recifes através da caracterização das diferentes assinaturas acústicas desses ambientes. Ele deu origem a um artigo apresentado em sua estrutura original no capítulo 2 desta dissertação e que será submetido a revista *Coral Reef Geology & Paleoceanography*.

REFERÊNCIAS

- Barros F, Costa PC, Cruz I, Mariano DLS, Miranda RJ (2012) Habitats bentônicos na Baía de Todos os Santos. *Rev. Virtual Quim.* 4, 551–565. <https://doi:10.5935/1984-6835.20120043>
- Brisson L, Hiller T (2015) Multiphase Echosounder to improve shallow water surveys. *Sea Technology magazine*
- Brown CJ, Blondel P (2009) Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. *Appl Acoust* 70:1242–1247. doi:10.1016/j.apacoust.2008.08.004
- Brown C J, Smith S J, Lawton P, Anderson J T (2011). Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(3), 502–520. <https://doi:10.1016/j.ecss.2011.02.007>
- Cruz ICS (2008) Recifes de Corais da Baía de Todos os Santos, Caracterização, Avaliação e Identificação de Áreas Prioritárias para Conservação. Dissertation, Universidade Federal da Bahia.
- Cruz ICS, de Kikuchi RKP, Longo LL, Creed JC (2015) Evidence of a phase shift to *Epizoanthus gabrieli* Carlgreen, 1951 (Order Zoanthidea) and loss of coral cover on reefs in the Southwest Atlantic. *Mar. Ecol.* 36, 318–325. <https://doi:10.1111/maec.12141>
- Dominguez JML, Bittencourt AC da SP (2009) Baía de todos os santos: Aspectos Oceanográficos. In: Edufba (ed). Salvador, pp 29-66
- Dondurur D (2018) Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811490-2.00001-3>
- Dutra LXC, Kikuchi RKP, Leão ZMAN (2006) Todos os Santos Bay coral reefs, Eastern Brazil, revisited after 40 years. In: *Proc. 10th International Coral Reef Symposium*. pp. 1090–1095.
- Eastwood PD, Souissi S, Rogers SI, Coggan RA, Brown CJ (2006) Mapping seabed assemblages

- using comparative top-down and bottom-up classification approaches. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63, 1536–1548. <https://doi.org/10.1139/F06-058>
- Elmhirst T, Connolly SR, Hughes TP (2009) Connectivity, regime shifts and the resilience of coral reefs. *Coral Reefs* 28, 949–957. DOI 10.1007/s00338-009-0530-8
- Gutierrez F, Manley-Cooke P, Tamset D (2015) Calibrated side scan images from a phase measuring bathymetric sonar. Paper presented at the shallow survey 2015, Plymouth, UK
- Harris PT, Baker EK (2020) Why map benthic habitats? In: Elsevier Inc (ed) *Seafloor geomorphology as benthic habitat*, 1st edn. Amsterdam, Netherlands, pp 3-15
- Hatje V, De Andrade JB (2009) Baía de todos os santos: Aspectos Oceanográficos. In: Edufba (ed). Salvador, pp 19-23
- Hiller, T., & Hogarth, P. (2005). The use of phase measuring (interferometric) sonars: Choosing appropriate data processing methodologies. *International Hydrographic Review*, 6(1), 20–31.
- Kikuchi RKP, Leão ZMAN, Oliveira MDM (2010) Conservation status and spatial patterns of AGRRA vitality indices in Southwestern Atlantic reefs. *Revista de Biologia Tropical*, 58 Supp 1, 1–31.
- Kikuchi RKP et al (2023) Reefs of the Western Tropical South Atlantic Ocean: Distribution, Environmental Impacts and Trends on Environmental Suitability Due to Climate Changes. In Springer Nature Switzerland (ed) *Tropical Marine Environments of Brazil*, 1st edn. pp 111-140
- Leão ZMAN, Kikuchi RKP, Testa V (2003) - Corals and Coral Reefs of Brazil. In: Cortés, J. (eds.), *Latin American Coral Reefs*. Elsevier B.V. (ISBN-13: 978-0444513885).
- Leão ZMAN, Kikuchi RKP, Oliveira MDM, Vasconcellos V (2010) Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5, 224–235.
- Lecours V, Dolan MFJ, Micallef A, Lucieer VL (2016). A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3207–3244. doi:10.5194/hess-20-3207-2016
- Lessa G. Dias K (2009) Distribuição espacial das litofácies de fundo da Baía de Todos os Santos. *Quaternary and Environmental Geosciences* 01(2), p.84-97.
- Lurton X, Lamarche G (eds) (2015) Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and recommendations vol Geohab Report. <http://geohab.org/publications/>
- McManus JW, Polsenberg JF (2004) Coral-algal phase shifts on coral reefs: Ecological and environmental aspects. *Prog. Oceanogr.* 60, 263–279. doi:10.1016/j.pcean.2004.02.014
- Menandro, P. S., & Bastos, A. C. (2020). Seabed mapping: A brief history from meaningful words. *Geosciences (Switzerland)*, 10(7), 1–17
- Misiuk B, Lacharité M, Brown CJ (2021) Assessing the use of harmonized multisource backscatter data for thematic benthic habitat mapping. *Science of Remote Sensing*, 3100015.
- Smith J, O'Brien PE, Stark JS, Johnstone GJ, Riddle MJ (2015) Integrating multibeam sonar and underwater video data to map benthic habitats in an East Antarctic nearshore environment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 164, 520–536. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.07.036>
- Suguo K (1973) *Introdução a sedimentologia*. São Paulo.
- Wilson MFJ et al (2007). Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy*, 30:1-2, 3-35. DOI: 10.1080/01490410701295962
- Zieger S, Stieglitz T, Kininmonth S (2009). Mapping reef features from multibeam sonar data using multiscale morphometric analysis. *Marine Geology*, 264(3–4), 209–217. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2009.06.002>

CAPÍTULO 2

UTILIZAÇÃO DE SONAR INTERFEROMÉTRICO DE ALTA RESOLUÇÃO PARA IDENTIFICAÇÃO E DIFERENCIAÇÃO DE FASES CONSTRUTORAS E NÃO CONSTRUTORAS DE RECIFES NA BAIJA DE TODOS OS SANTOS

Utilização de sonar interferométrico de alta resolução para identificação e diferenciação de fases construtoras e não construtoras de recifes na Baía de Todos os Santos

Anita Gomes OLIVEIRA¹; Ruy Kenji Papa DE KIKUCHI¹.

(anita.g.ocean@gmail.com; kikuchi@ufba.br)

(1) Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal da Bahia. R. Barão de Jeremoabo, s/n, CEP 40.170-115, Salvador, Brasil.

Coral reefs are highly relevant ecosystems due to their role from biogeochemical cycles to the protection of the coastline and their tourist value. One of the most impactful threats to the building capacity of a reef is phase shift, a phenomenon in which hermatypic corals are largely replaced by non-calcifying organisms, mainly macroalgae and soft corals. Geophysical mapping was carried out in 3 reef areas of Todos os Santos Bay, namely Pedra Alva, Poste IV and Mangueira. Bathymetric, sonographic and acoustic backscatter level maps were generated. The reef outcrops vary from 3m deep in the shallowest reef (Poste IV) to 10m at the top of the deepest reef (Pedra Alva), where depths in the sedimentary surroundings reach up to 34m. The elevation profile of the Poste IV reef was the one with the least topographic irregularity and also where the greatest coverage of non-building organisms such as algae and soft corals was calculated. Through sonographic imaging it was possible to delimit the reef formations and detect textural changes in the sedimentary areas due to the difference in reflectivity in the mosaic. From the Backscatter mosaic it was possible to segment the areas into different acoustic classes, from which validation points were carried out, including underwater photos, video transects and sediment collection. With this ground truthing it was possible to calculate the percentage of coverage of building and non-building organisms, as well as determining the predominant grain size classes in the sedimentary areas. Despite all reefs having high percentages of coverage of non-building organisms (above 70%), the Pedra Alva reef still has a significant coverage of hermatypic corals, which may be indicative of a construction phase. The levels of acoustic backscatter in the reef areas did not show greater intensity than some sedimentary points

in their surroundings, most likely due to the large coverage of non-building organisms, which directly affects the roughness and hardness of the bottom.

Keywords: multiphase echo sounder; backscatter; bathymetry reefs; phase shift.

1. INTRODUÇÃO

Devido às múltiplas pressões exercidas pelas atividades humanas no ambiente marinho, os ecossistemas bentônicos e sua biodiversidade têm enfrentado crescentes impactos (Brown et al., 2011). Atividades como pesca predatória, turismo, dragagens e poluição, entre outras, contribuem para a ampliação da vulnerabilidade desses ambientes, aumentando a necessidade de monitoramento e proteção (Smith et al., 2015). Da mesma forma, os ecossistemas recifais também estão sujeitos a esses impactos. Especificamente, os recifes da Baía de Todos os Santos têm apresentado baixa diversidade de corais e alto grau de endemismo, atribuídos ao elevado nível de turbidez das águas resultante das intensas atividades urbanas em suas proximidades (De Kikuchi et al., 2023; Dutra et al., 2006).

Considerados como ambientes costeiros bentônicos de alta produtividade e importância ecológica, os recifes de corais da Baía de Todos os Santos, juntamente com a expressiva cobertura de manguezais presentes nessa região, desempenham funções importantes tanto do ponto de vista ecológico quanto socioeconômico (Barros et al, 2012).

A investigação de substratos marinhos utilizando métodos acústicos de sondagem tem ganhado cada vez mais espaço na pesquisa científica das últimas décadas. Entretanto, o ambiente marinho é pobremente conhecido e ainda existe uma grande defasagem na taxa de mapeamento com alta resolução quando comparado aos estudos em terra (Brown et al, 2011).

Apesar do mapeamento do fundo marinho, através de métodos indiretos de sondagem utilizando ferramentas acústicas, fornecerem preferencialmente informações abióticas do meio,

principalmente quando se pretende mapear grandes áreas, esses métodos também podem contribuir no processo de investigação do meio biótico (Eastwood et al, 2006).

Os substratos recifais normalmente apresentam assinaturas acústicas bem distintas e são considerados uma exceção no processo de sensoriamento remoto acústico, visto que os próprios dados geofísicos, normalmente representando a porção abiótica do mapeamento, podem ser utilizados diretamente no processo de medição da distribuição espacial das comunidades bentônicas ou do que seria o seu nicho ideal (Brown et al, 2011).

Apesar dessa identidade acústica facilitar o mapeamento em grande escala, é preciso aprofundar-se nos métodos para se investigar as complexidades dentro de um mesmo recife, ou seja, descrever informações biológicas, com a utilização dessas características acústicas (Zieger et al, 2009). Exemplo disso é que, características biológicas importantes sobre a composição da cobertura biótica (corais, algas, briozoários etc) de um recife podem ser refletidas nas informações relacionadas a alguns parâmetros do terreno como rugosidade, dureza e aspecto.

A análise de parâmetros dessa natureza, tem grande potencial de ajudar de maneira expressiva a resolução de questões relacionadas à mudança de fase, um impacto atual que vem fragilizando recifes ao redor de todo o mundo, e se caracteriza pela ampla substituição de corais hermatípicos por organismos não calcificadores principalmente macroalgas e corais moles (Cruz et al, 2015).

Tais características do leito marinho são, em parte, refletidas nos valores de *backscattering*, os quais fornecem uma quantificação e qualificação dos níveis de retroespalhamento das ondas acústicas na interface fundo marinho e coluna d'água e podem ser medidos tanto pelo sonar de varredura lateral quanto pelo ecobatímetro multifeixe (Lurton & Lamarche, 2015).

A análise do backscattering baseada na imagem tem como principal produto um mosaico de retorno acústico com valores normalizados, ou seja, sem levar em consideração as peculiaridades do

retroespalhamento em diferentes ângulos de incidência. Através dela pode-se inferir variações da natureza do substrato como dureza e rugosidade, permitindo uma análise qualitativa da área e, portanto, associações diretas entre os níveis de retroespalhamento acústico do substrato medidos em decibéis e suas propriedades geotécnicas (Brown & Blondel, 2009).

Todos os dados geofísicos adquiridos neste trabalho (batimetria, sonografia e retroespalhamento acústico) são usados no processo de caracterização do fundo marinho, fazendo uma ligação, através de diferentes abordagens, entre os dados abióticos e os dados bióticos (Lecours et al, 2016). Essa relação é fundamentada principalmente na ideia de nicho ecológico predominante para os mais variados tipos de comunidades que vivem direta ou indiretamente ligadas ao substrato marinho (Harris & Baker, 2020), seja ele sedimentar ou recifal.

Esses organismos apresentam, pelo menos em algum grau, uma preferência de desenvolvimento ótimo associado a condições ambientais específicas relacionadas a características da coluna d'água (temperatura, salinidade, oxigênio dissolvido, etc.) e/ou características morfológicas e geológicas do fundo marinho (Brown et al, 2011). Esse tipo de associação permite inferências e extrapolações a respeito da presença ou ausência de determinados grupos de organismos e suas associações com dados indiretos coletados pela sondagem geofísica.

No contexto abordado neste estudo, o principal objetivo é investigar se é possível identificar e distinguir as fases construtoras e não construtoras dos recifes por meio da caracterização das diferentes assinaturas acústicas desses ambientes, utilizando os dados coletados pelo sonar interferométrico de alta resolução (batimetria, sonografia e retroespalhamento acústico).

Em geral, espera-se que uma comunidade coralínea apresente baixa biomassa de macroalgas e alta abundância de herbívoros (Elmhirst et al., 2009), sendo que essas características tendem a variar em sistemas estáveis quando sujeitos a alguma forma de perturbação (McManus & Polsenberg, 2004). Assim, quando há a presença de grandes quantidades de macroalgas e corais moles, indicando uma

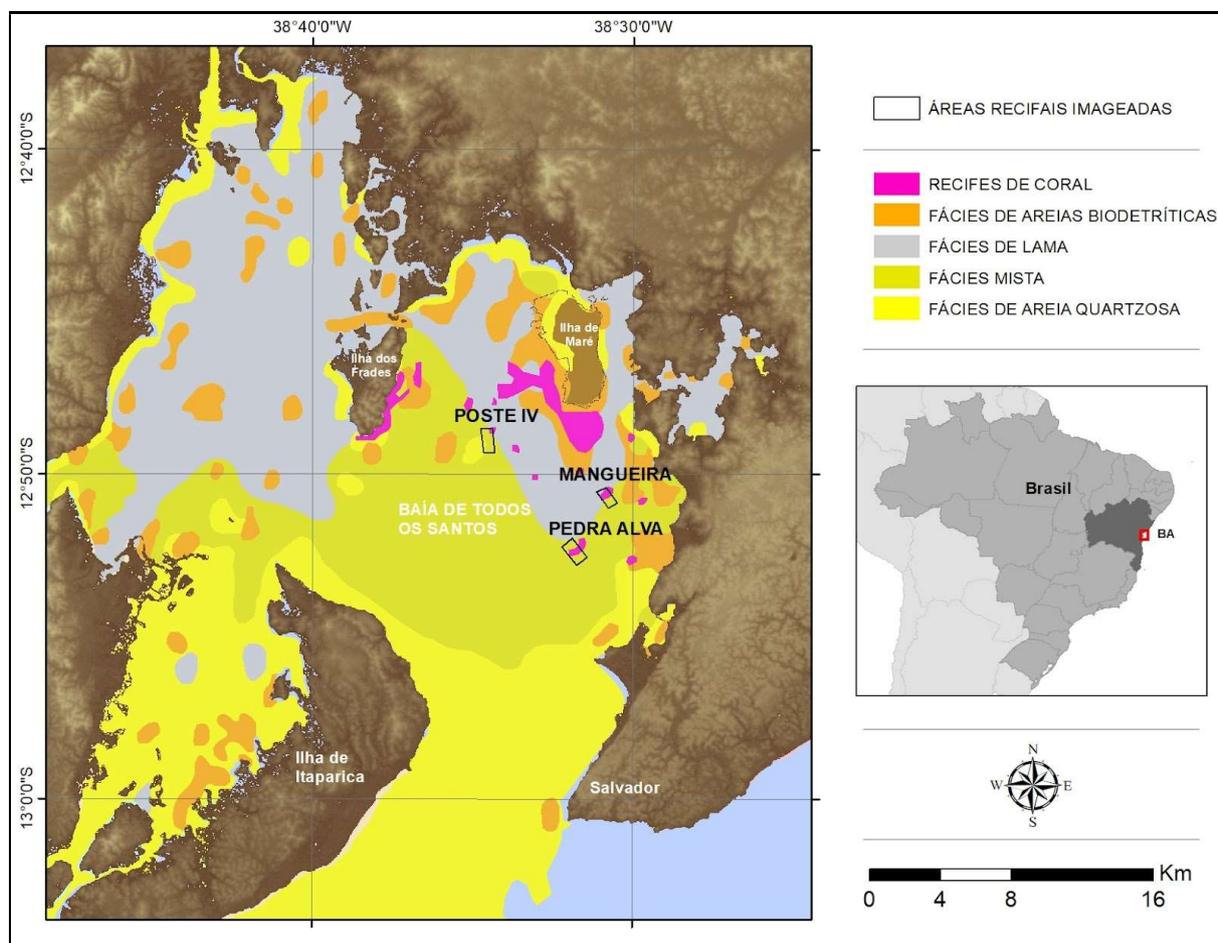
fase não construtora, é esperado que as propriedades geofísicas do leito sejam modificadas, tornando-o mais macio e, conseqüentemente, alterando características como dureza, rugosidade e aspecto.

Portanto, utilizamos como hipótese de trabalho a existência do retorno acústico diferenciado ao se mapear fundos com características geofísicas diferentes, a exemplo de fundos sedimentares, recifes em fase construtora e recifes em mudança de fase, situação onde a grande cobertura de organismos não construtores torna o fundo mais macio e menos rugoso e, conseqüentemente diminui os valores de TRI (Terrain Ruggedness Index). Este parâmetro será descrito detalhadamente na seção 3.3.

2. ÁREA DE ESTUDO

As áreas recifais imageadas nesse estudo estão localizadas dentro da Baía de Todos os Santos (BTS), estado da Bahia. A Baía de Todos os Santos é considerada a maior baía costeira do Brasil (Hatje & Andrade, 2009) e apresenta litofácies diversas, de arenosas a argilosas (Lessa & Dias, 2009) e de fundo rochoso, como recifes e afloramentos de rochas metamórficas e sedimentares mesozóicas (Dominguez & Bittencourt, 2009). As fácies recifais, com construções biogênicas oriundas da sedimentação carbonática de algas calcáreas e corais, normalmente estão fixadas sobre o fundo duro dos terraços de abrasão presentes nessa área (Dominguez & Bittencourt, 2009).

Fig 1 Fácies sedimentares e recifais da BTS (modificado de Dominguez e Bittencourt, 2009) e aproximadamente 2,8 km² de áreas recifais imageadas neste estudo com o sonar de varredura lateral interferométrico



Na figura 1 observam-se as fácies sedimentares e recifais da BTS previamente demonstradas por Dominguez e Bittencourt, 2009. Neste estudo, não somente o preenchimento sedimentar da Baía de Todos os Santos é descrito, mas também a história geológica da bacia sedimentar do Recôncavo. As áreas recifais que foram imageadas no presente estudo estão indicadas na mesma figura 1. Elas aparecem sobre recifes de coral e fácies mista composta por areia quartzosa, lama e biodetritos.

Os recifes mapeados foram Poste IV, Mangueira e Pedra Alva. Os recifes Poste IV e Pedra Alva não foram completamente imageados devido a limitações operacionais no período de isolamento social durante a pandemia, sendo possível observar indicação de áreas de recifes de coral além das áreas mapeadas. O recife Poste IV é previamente conhecido por estar em mudança de fase, sendo

dominado por zoantídeos (Cruz et al, 2015). Essa condição impacta negativamente na capacidade construtora do recife, além de diminuir a biodiversidade associada a ele. O recife da Mangueira e o recife Pedra Alva são conhecidos por estarem em fase construtiva, condição em que os corais esqueléticos recobrem um percentual significativo da superfície dos recifes e a biomassa de algas e corais moles não sobrepuja a de organismos calcificadores.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. COLETA DOS DADOS GEOFÍSICOS

O mapeamento geofísico de 3 áreas recifais na Baía de Todos os Santos foi realizado durante o período de 16 a 20/08/2021. A área total imageada foi de 2,78 km², sendo aproximadamente 1km² no recife Poste IV, 1,18 km² no recife Pedra Alva e 0,6 km² no recife da Mangueira. O sistema acústico utilizado durante o levantamento foi o sonar interferométrico Edgetech 6205 com o sensor inercial Applanix POS MV WaveMaster II para compensação dos movimentos da embarcação. Os dados coletados por esse sistema são batimetria e retroespalhamento acústico (*backscatter*), ambos a uma frequência de 550kHz, e o registro sonográfico em duas frequências simultâneas (230 e 550kHz). Todos os dados são adquiridos simultaneamente e sincronizadamente neste tipo de equipamento.

As linhas de sondagem foram executadas de modo a garantir o completo imageamento do fundo marinho e, assim, evitar a necessidade de interpolações. As linhas foram planejadas sempre paralelas às isóbatas. A abertura (range) utilizada foi de 60m, o que assegura até 120m de recobrimento aos dados sonográficos e varia de 6 a 7 vezes nos dados batimétricos para garantir a boa resolução. A velocidade da embarcação se manteve entre 4 e 5 nós, de modo a manter boa resolução na direção de deslocamento (alongtrack). Entretanto, as condições de tempo (vento e ondas)

oscilaram bastante, de modo que esse componente da resolução horizontal, em parte, sofreu pressões negativas.

A escolha do local para o planejamento das linhas de calibração (patch test) levou em consideração a existência de áreas planas, declive acentuado ou alvos/feições marcantes próximos, e que estivesse numa profundidade igual ou maior do que na área do levantamento. Como o sonar interferométrico é um sonar de emissão dupla (dual head), ele foi calibrado para os dois lados (boreste - Port - e estibordo - Starboard). Os valores encontrados para cabeceio (pitch) foram 4.5° e -4.5° , para balanço (roll) 3.5° e -2.84° , e para proa (yaw) 179° e -1° .

3.2. COLETA DOS DADOS DE VALIDAÇÃO DE CAMPO

Os dados para validação coletados neste trabalho foram vídeo-transectos nas áreas recifais e coleta de sedimentos e fotos subaquáticas nos substratos sedimentares. Os pontos foram escolhidos de acordo com as principais classes acústicas reconhecidas no mosaico de retroespalhamento acústico, mais alguns pontos extras onde foram percebidos afloramentos recifais expressivos. Sua localização é exibida na figura 3. Os mergulhos foram realizados durante o período de 13 a 17/12/2021.

Os vídeo-transectos foram realizados em profundidades que variaram de 2,8m a 12m, sendo percorridos por 16m em direções variadas. O número de amostragens em cada área recifal variou entre 3 e 4, a depender das dimensões laterais do recife. No recife da Mangueira foram feitos 4 vídeo-transectos em 2 afloramentos recifais, totalizando 8 aquisições. Nos recifes Pedra Alva e Poste IV foram feitos 3 vídeo-transectos em 3 afloramentos recifais de cada recife, totalizando mais 18 aquisições.

A câmera utilizada para filmagem dos vídeo-transectos foi a GoPro Hero 6 Black. Para todos os transectos realizados foi mantido um padrão de aquisição de 54cm de largura a uma distância de

30cm do substrato, onde o mergulhador mantinha uma velocidade aproximada de 3m/min. Dessa forma, a área coberta em cada transecto foi de 8,7m².

Nas proximidades de fundo sedimentar, foram feitas coletas de sedimentos e fotos subaquáticas. No recife da Mangueira houveram 3 pontos de coleta sedimentar e nos recifes Pedra Alva e Poste IV 2 pontos, totalizando 7 amostras de sedimento. A classificação granulométrica dessas amostras foi realizada de acordo com a metodologia descrita em Suguio (1973). Ao final do processo, foram pesadas as frações de cascalho, areia, silte e argila. Os biodetritos maiores que 4mm foram retirados dessa etapa para evitar torná-las tendenciosas, mas foi considerada na análise visual. Essa informação serviu, não apenas como caracterização sedimentológica do entorno dos recifes, mas também como parâmetro de análise comparativa com o resultado encontrado nos mosaicos de retroespalhamento acústico.

3.3. PROCESSAMENTO DOS DADOS GEOFÍSICOS E PRODUÇÃO DOS MAPAS

Todos os dados geofísicos adquiridos neste trabalho foram processados no Software SonarWiz versão 7. O processamento inicial consiste na preparação dos arquivos auxiliares de maré e perfis de velocidade do som (SVP) para aplicação nos dados batimétricos. O perfilador utilizado foi o AML Oceanographic. Os dados de maré utilizados para os recifes Pedra Alva e Mangueira foram da estação maregráfica do IBGE, localizado na Capitania dos Portos em Salvador, e para o recife Poste IV foi utilizada a maré prevista da estação maregráfica de Madre de Deus. Foi gerado e aplicado um perfil de velocidade do som para cada área imageada.

O processamento final dos dados batimétricos e de backscatter foram feitos pelo mesmo fluxograma automatizado do SonarWiz, onde são feitas as aplicações dos dados auxiliares (maré e SVP) aos dados brutos e, posteriormente, feitas as edições para retirada de dados espúrios e linhas inconsistentes.

O processamento dos dados sonográficos é feito separadamente. O fluxograma seguido foi: delimitação da coluna d'água (bottom track), seleção das melhores linhas evitando sobreposições excessivas, aplicação dos filtros EGN (Empirical Gain Normalization) e Nadir e geração do mosaico. Através do mosaico sonográfico foi possível identificar as fácies recifais e sedimentares, bem como analisar as diferentes texturas e níveis de reflectância acústica, o que reflete as propriedades da natureza do fundo marinho.

As grades batimétricas, sonográficas e de retroespalhamento acústico foram exportadas pelo algoritmo Mean com uma resolução de 1m. Posteriormente as grades foram utilizadas para a produção dos mapas no Software ArcGis. Uma grade topográfica também foi exportada com base no modelo batimétrico para fins de geração dos valores de TRI (terrain ruggedness index - índice de aspereza do terreno), que é definido como a diferença média entre o pixel central e as células circundantes da grade batimétrica (Wilson et al, 2007). Esse dado é uma propriedade topográfica assim como aspecto, rugosidade, declividade e TPI (topographic position index - índice de posição topográfica) e é computada a partir de uma ferramenta automatizada de geração de grids topográficos no Software SonarWiz versão 7. A resolução de 1m foi escolhida para minimizar a impressão de artefatos nas imagens que poderiam prejudicar as análises posteriores.

O arquivo X, Y, TRI foi inserido no software Hypack com o intuito de calcular a média desses valores dentro das áreas recifais onde foram realizados os vídeos transectos. Esse cálculo foi feito através da ferramenta Tin Model, a qual utiliza o método de triangulação irregular para estimar os valores mínimos, máximos e médios do dado fonte inserido.

Essa informação serviu como um parâmetro de terreno para análise comparativa de rugosidade em diferentes pontos amostrais dentro de um único sistema recifal, sendo relacionado com o resultado de cobertura bentônica dos vídeo-transectos, onde foram discriminadas as classes de

organismos construtores e não construtores presentes nos pontos amostrados. A hipótese é de que quanto maior o percentual de organismos não construtores, mais macio e menos rugoso torna-se o fundo e, conseqüentemente menores os valores de TRI.

4. RESULTADOS

4.1. SONOGRAFIA E GEOMORFOLOGIA DO FUNDO MARINHO

Os mapas batimétricos e sonográficos das áreas recifais e proximidades sedimentares imageadas podem ser verificadas nas figuras 4 a 7. Na figura 2 observam-se a localização dos modelos digitais de terreno dos afloramentos recifais imageados e suas proximidades, bem como a indicação de onde foram realizados os vídeos transectos e coletas de sedimentos.

Através dos modelos digitais de terreno (Figuras 4 a 6) foi possível investigar as profundidades locais, a morfologia do fundo e extrair informações secundárias a respeito da rugosidade do substrato através do parâmetro TRI.

Fig 2 Localização e mapas batimétricos das áreas de estudo. Linhas pretas mostram as áreas recifais onde foram realizados video transectos e os círculos pretos mostram onde foram realizadas coletas de sedimento nas proximidades dos recifes

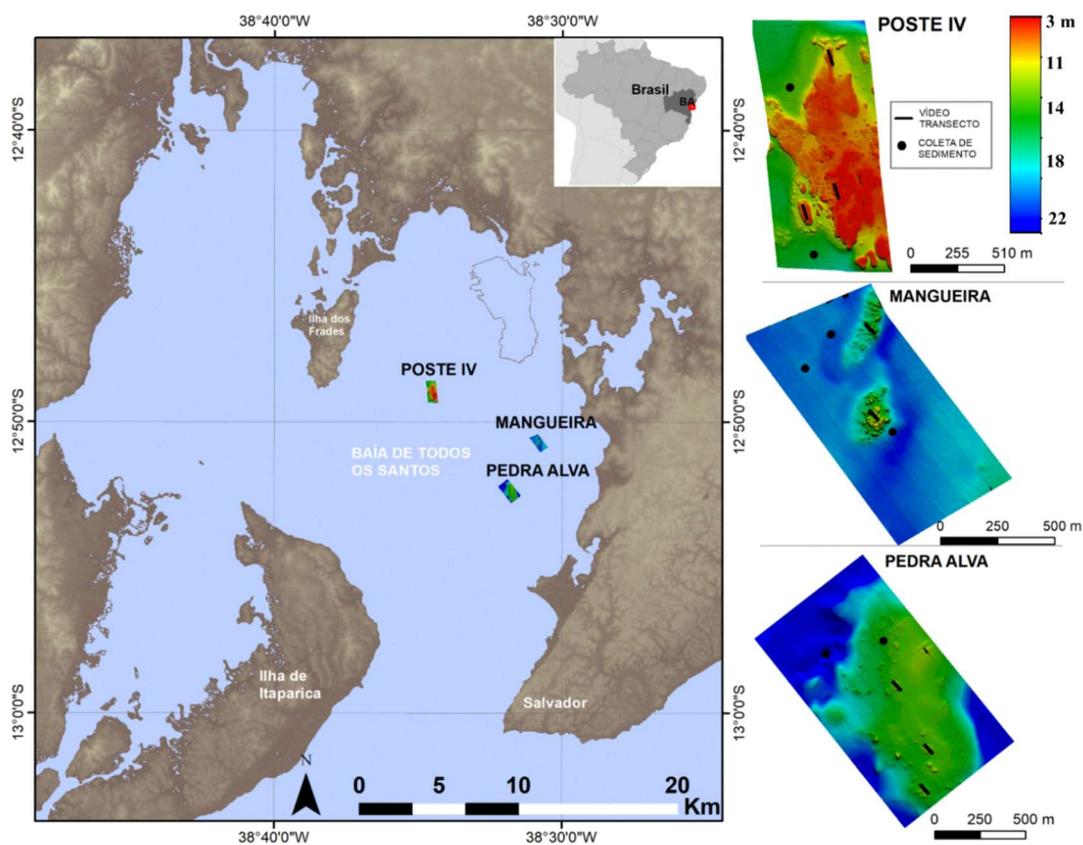


Fig 3 Localização e mapas batimétricos das áreas de estudo. Mapa de retroespalhamento acústico dos 3 recifes mapeados. Os tons mais escuros indicam baixos valores de backscatter, e os tons mais claros altos valores. Os pontos onde foram realizados mergulhos para validação estão indicados em

vermelho. O mapa a) refere-se ao Recife Pedra da Mangueira. O mapa b) refere-se ao Recife Pedra Alva. E o mapa c) refere-se ao Recife Poste IV.

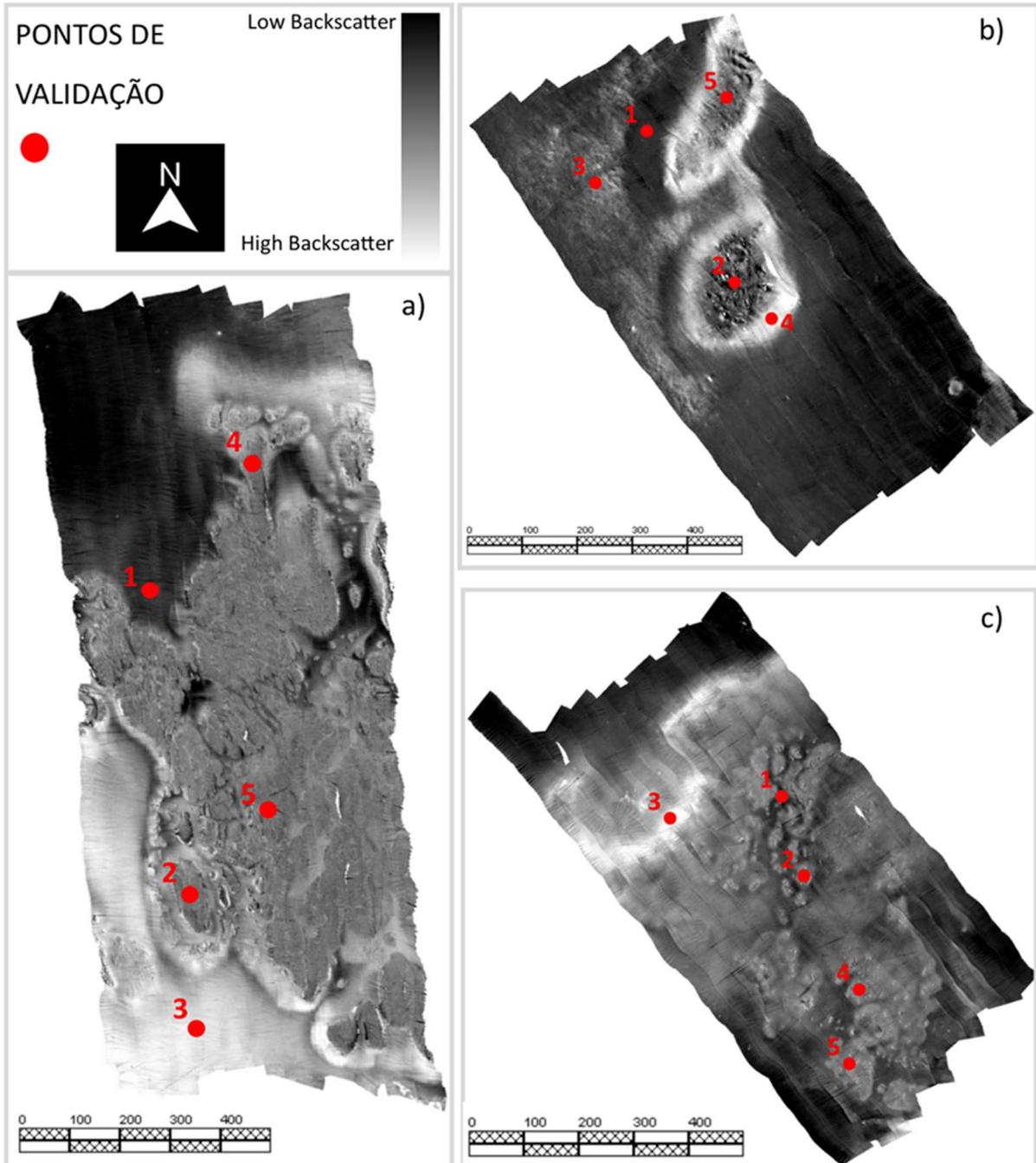
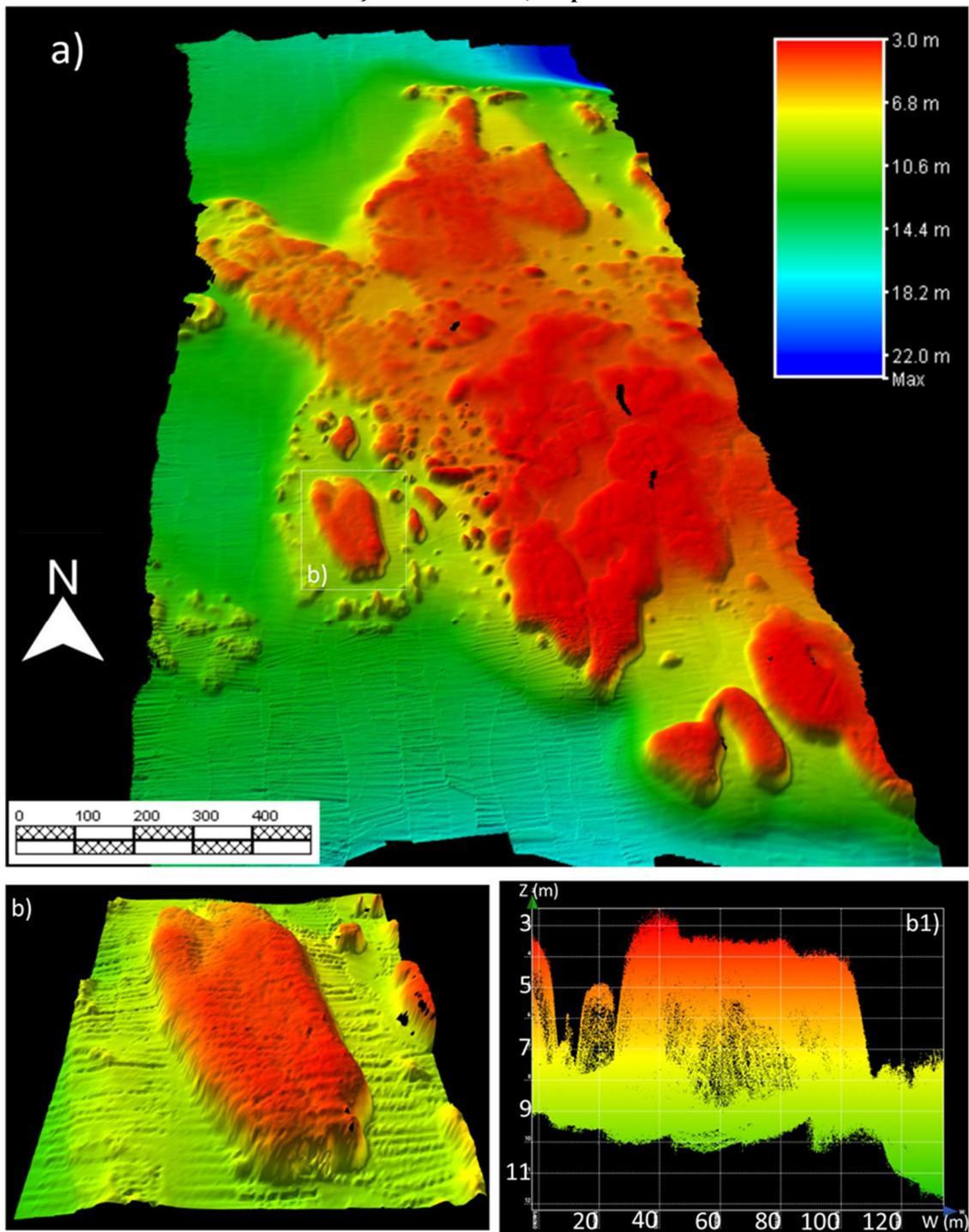


Fig 4 a) Mapa batimétrico do Recife Poste IV e suas proximidades. b) e b1) Detalhes da geomorfologia de um alto recifal componente deste complexo, onde observam-se suas profundidades e feições. Visualização em 3D e 2D, respectivamente



A área recifal do Poste IV é a mais extensa e a mais rasa dentre os recifes mapeados, com uma estimativa de 500m de largura sentido E-W e 1.200m de comprimento sentido N-S (Figura 4). Os corpos de recifes apresentam até 3m de altura, medidos do substrato duro até o topo recifal, podendo ser observadas grandes regiões de sombreamento nos registros sonográficos (Figura 7a). As profundidades variam de 2,91m nos pontos mais rasos dos recifes até aproximadamente 22m nas áreas mais profundas de fundo sedimentar. As distintas tonalidades no mosaico sonográfico refletem os diferentes níveis de retroespalhamento acústico, onde observam-se tons mais escuros na porção sedimentar a noroeste e tons mais brilhantes tanto na porção sedimentar a sudoeste do recife quanto nas bordas deles (Figura 7a).

O recife da Mangueira, diferentemente do Poste IV que tem seus alforamentos distribuídos de modo mais esparsos, está concentrado em duas partes, por isso grande porção do fundo imageado é sedimentar, como pode ser observado tanto no mapa batimétrico (Figura 5) como no registro sonográfico (Figura 7). O afloramento recifal principal tem formato elipsóide, com aproximadamente 180m de largura e 275m de extensão e o segundo com aproximadamente 110m de largura e 300m de extensão. As profundidades variam em torno de 6m nos altos recifais até quase 24m no canal circundante de fundo sedimentar. Os recifes têm até 10m de altura, sendo as maiores encontradas dentre os recifes imageados. Eles são classificados como recifes em franja, segundo Leão et al 2003.

Fig 5 a) Mapa batimétrico do Recife da Mangueira e suas proximidades. b) e b1) Detalhes da geomorfologia e principal afloramento recifal deste complexo, onde observam-se suas profundidades e morfologia, visualização em 3D e 2D, respectivamente

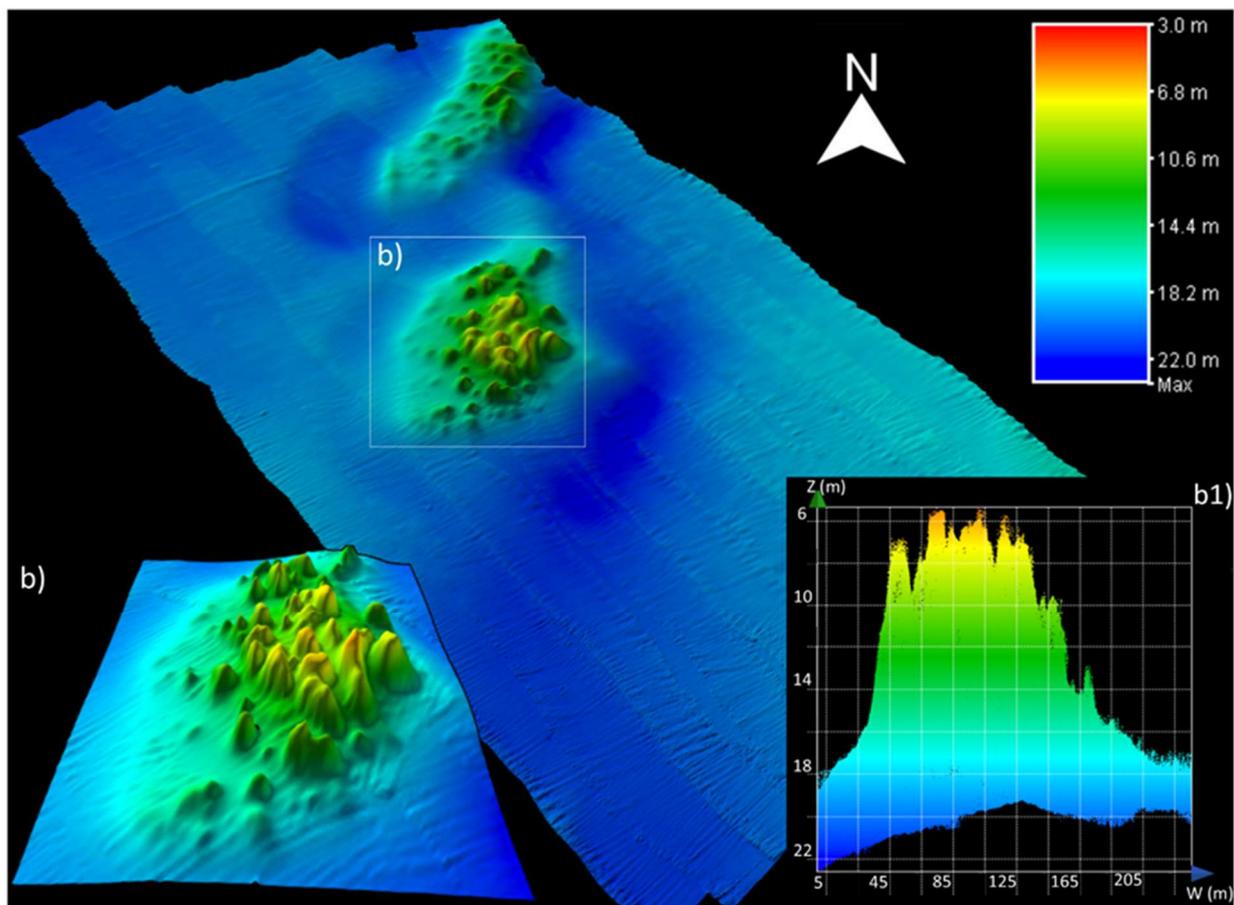
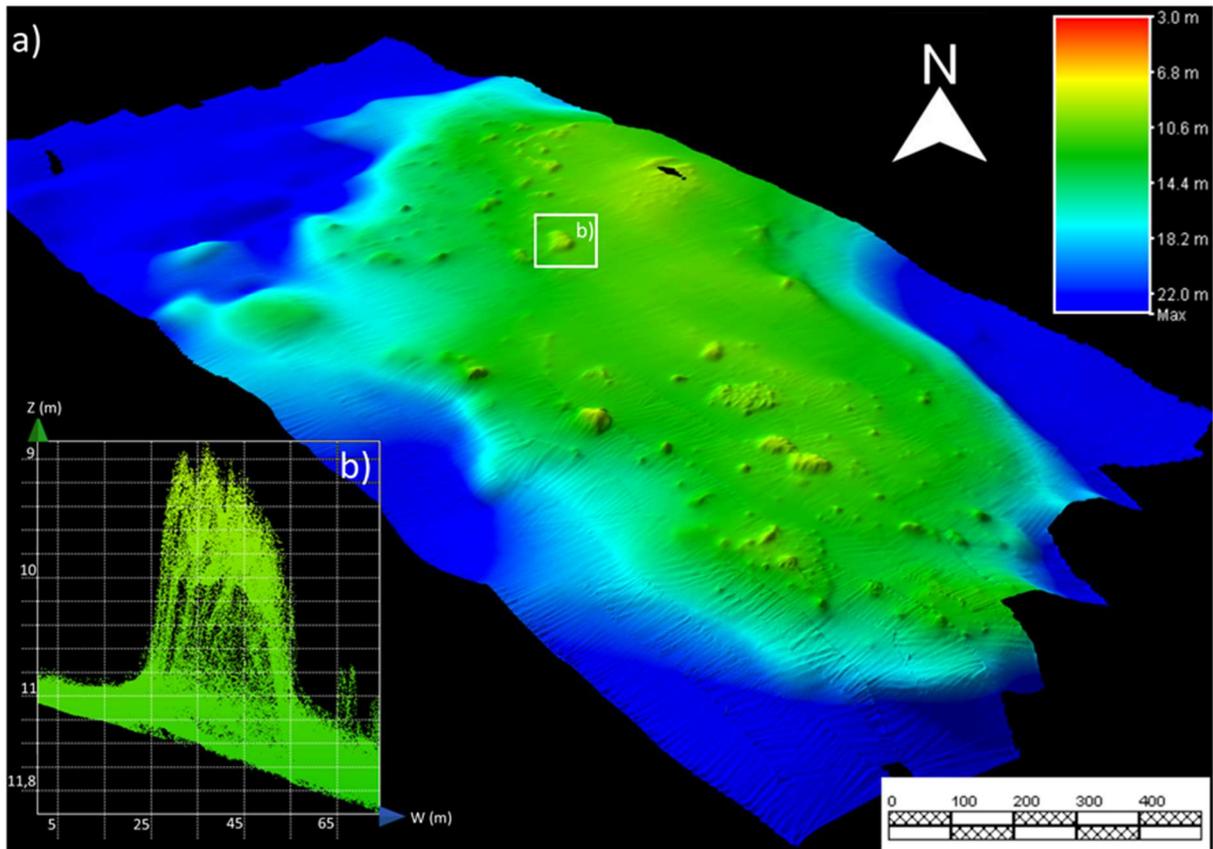
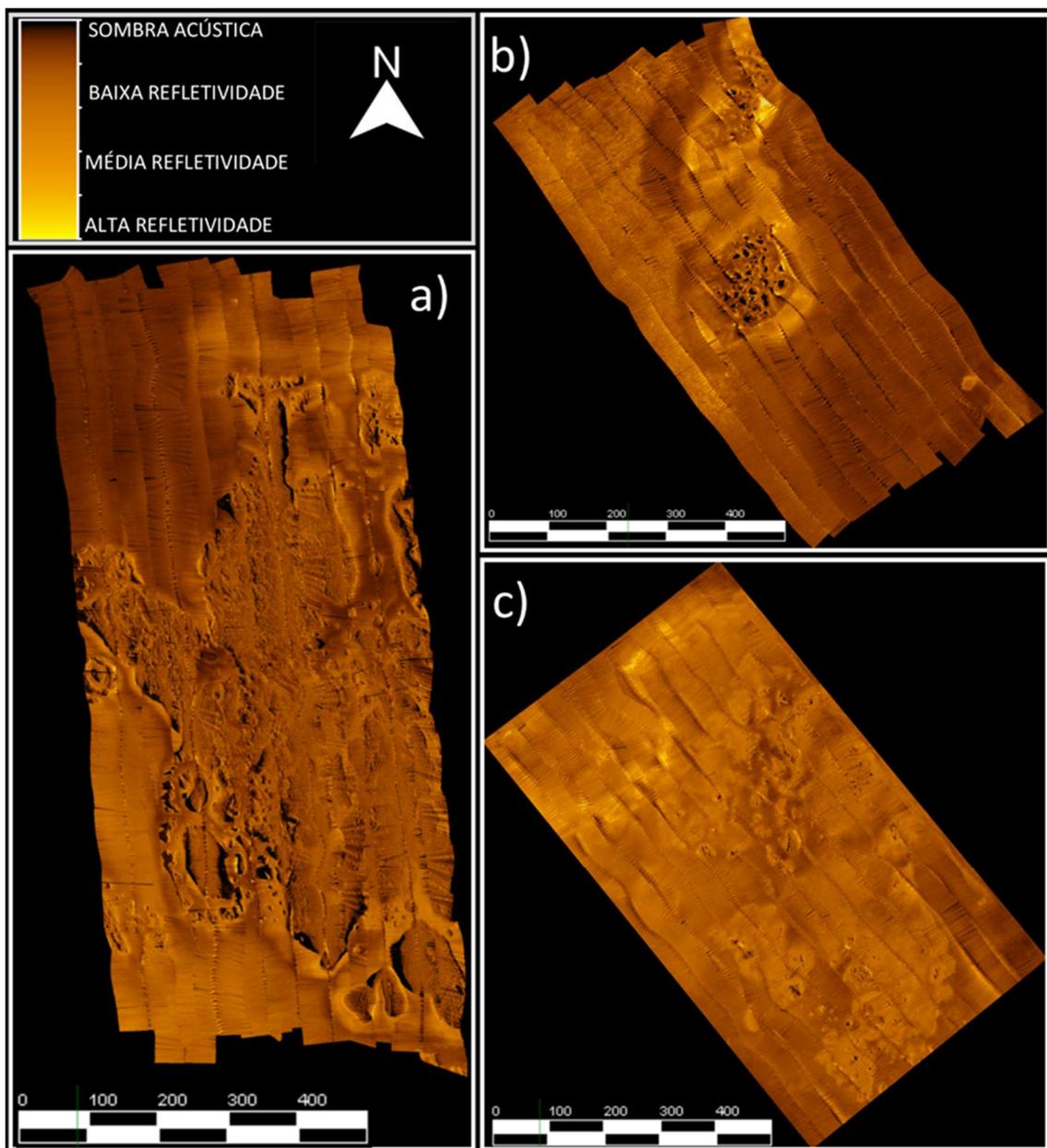


Fig 6 a) Mapa batimétrico do Recife Pedra Alva e suas proximidades. b) Localização da seção transversal e b1) Seção transversal de um alto recifal componente deste complexo, onde observam-se suas profundidades e características morfológicas.



Os afloramentos recifais do recife Pedra Alva são menores, bem pontuais e espalhados geograficamente. O principal alto coralíneo tem aproximadamente 2m de altura, com dimensões horizontais estimadas em 55m de extensão e 30m de largura (Figura 6b). As profundidades na área imageada variam de 10,35m nos afloramentos coralíneos até aproximadamente 34m nas proximidades de fundo sedimentar, sendo a região de estudo mais profunda. Como pode ser visto no mosaico sonográfico (Figura 7c), a grande maioria da área imageada tem textura de aspecto sedimentar com diferentes níveis de refletividade acústica, e alguns pontos isolados apresentam característica textural rochosa ou recifal.

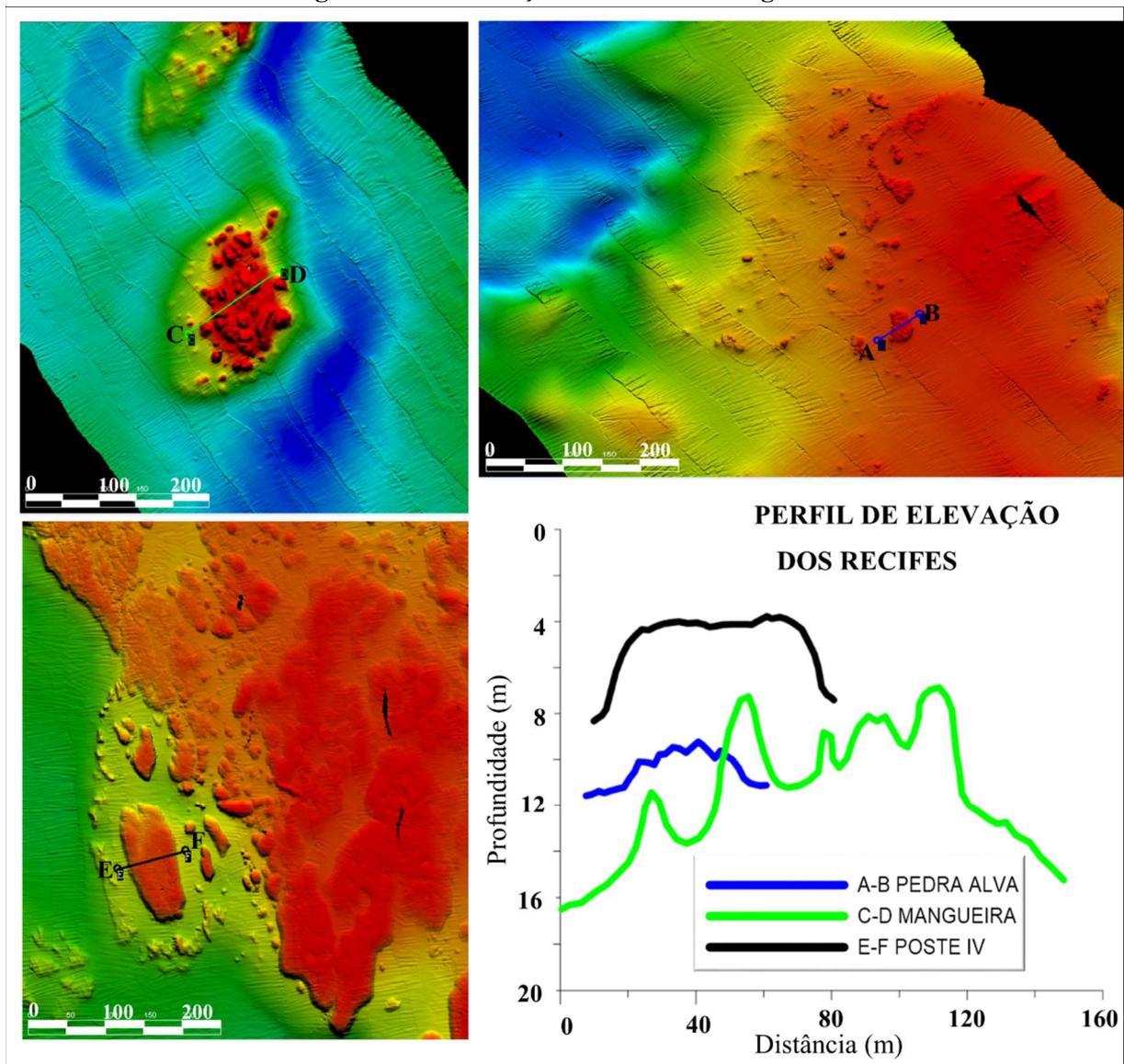
Fig 7 Mosaicos sonográficos das áreas recifais imageadas. a) Poste IV. b) Recife da Mangueira. c) Pedra Alva



Na figura 8 podem-se observar os perfis de elevação dos principais altos recifais dos três recifes imageados. Através deles, foi possível uma análise geomorfológica de rugosidade e declividade nas 3 seções transversais de um lado a outro de três feições recifais significativas.

Na seção A-B observa-se o perfil batimétrico de quase 50m de extensão do principal ponto recifal da Pedra Alva, com profundidades de pouco menos de 12m no substrato sedimentar até aproximadamente 9m no ponto mais raso do recife, onde existe uma batimetria de irregularidades bem marcadas, quando comparado à seção do recife Poste IV (representado pelo perfil E-F). Este apresenta uma extensão recifal maior, de aproximadamente 70m, e expressa um topo recifal de batimetria uniforme com ausência de irregularidades topográficas.

Fig 8 Perfis de elevação dos 3 recifes imageados



Já o perfil batimétrico C-D, que representa a principal construção do recife da Mangueira, é o mais extenso de todos (com aproximadamente 150m na direção nordeste - sudoeste), e demonstra irregularidades topográficas bastante evidentes com os altos topográficos sendo intercalados pelo substrato onde ocorre a fixação e desenvolvimento do recife. As profundidades vão de um pouco mais de 16m na base até pouco menos de 8m em um dos topos recifais, demonstrando acentuado declive.

Na tabela 2 observam-se os valores médios de TRI para os pontos que tiveram também a amostragem direta por videotransecto dos 3 recifes. O resultado da análise granulométrica das amostras sedimentares juntamente com a intensidade do retroespalhamento acústico observado nesses pontos pode ser verificado na tabela 3. O recife Poste IV foi o que apresentou o menor valor de TRI (Ponto 5 - 0,07) dentre todos os pontos recifais investigados, o que indicaria uma área de menor rugosidade. Já o recife Pedra da Mangueira foi o que apresentou o ponto com maior valor de TRI (Ponto 2 - 0,22), o que indicaria uma área de maior rugosidade. No recife Pedra Alva, os valores de TRI nos 3 pontos calculados foram os que tiveram resultados mais semelhantes dentro de um mesmo complexo recifal, com 2 pontos apresentando o mesmo valor (0,16) e o Ponto 2 apresentando valor um pouco menor (0,11).

O resultado da análise granulométrica será mostrada em detalhes no tópico 4.3.

4.2. INTENSIDADE DO RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO BASEADO NA IMAGEM

Na figura 3 observam-se os mapas de intensidade do retroespalhamento acústico nas 3 áreas recifais imageadas, bem como a localização dos pontos de ground truthing tanto nas áreas recifais quanto nos pontos de fundo sedimentar. Observa-se que os pontos de validação estão distribuídos de forma a contemplar as diferentes classes acústicas encontradas nesse mosaico. O mapa de retroespalhamento acústico está representado em escala de cinza, onde os tons mais escuros refletem as menores intensidades em decibéis (db) e os tons mais claros as maiores.

Em dois dos três mosaicos apresentados, os afloramentos recifais apresentaram níveis intermediários de intensidade de retorno acústico quando comparados aos trechos sedimentares adjacentes de cada localidade. Na figura 3a está representado o mosaico de retroespalhamento acústico do recife Poste IV e suas proximidades. Os valores encontrados, em decibéis, variaram de aproximadamente 64,5 db nas áreas sedimentares de menores intensidades de retorno acústico, na porção noroeste do mosaico e em alguns canais e depressões inter recifais, até quase 82 db no quadrante sedimentar sudoeste do mosaico e nas bordas dos afloramentos recifais. A amplitude numérica de intensidade de backscatter foi a maior dentre os recifes estudados (17,5 db).

A partir da análise baseada na imagem do mosaico de retroespalhamento acústico do recife Pedra Mangueira, percebe-se que essa foi a única localidade onde a principal região de afloramentos recifais demonstrou baixos níveis de backscatter, sendo representada por tons de cinza mais escuros, o que reflete os mais baixos níveis de intensidade em db e se assemelha, inclusive, a um grande trecho de área sedimentar a sudeste do recife principal e aos canais próximos do recife secundário a nordeste. Esse comportamento pode ser devido à própria morfologia dos afloramentos, que são edifícios individualizados bastante intercalados por sedimentos e pelo grande percentual de cobertura de algas e corais moles (mais de 85%) nessa região (Figura 5 e Tabela 1).

Nesse recife, as áreas com tons mais claros, ou seja, com maiores níveis de retorno acústico, foram as regiões sedimentares que bordejam os afloramentos recifais, e a amplitude em db entre os menores e maiores níveis foi a menor encontrada dentre os recifes imageados.

O mosaico do retroespalhamento acústico do recife Pedra Alva foi o que mais apresentou artefatos, tornando visível na análise da imagem a influência da perda de qualidade do sinal acústico nos feixes mais externos, devido principalmente ao balanço excessivo da embarcação e, conseqüente, impossibilidade de total correção pelo compensador de ondas. Mas, ainda assim, consegue-se definir um padrão acústico onde os afloramentos recifais apresentam níveis médios de backscattering, estando bastante espaçados e intercalados por extensas áreas sedimentares. Há um trecho de alta intensidade de retorno acústico coincidente com todo o talude percebido nos quadrantes norte e noroeste do mapa batimétrico.

4.3. VERDADE DE CAMPO (GROUND TRUTHING)

Os dados de validação coletados neste trabalho contemplaram vídeos transectos e imagens subaquáticas nas áreas recifais e coleta de sedimentos nas proximidades de fundo sedimentar. Na tabela 1 pode-se observar o resultado da cobertura bentônica constatada durante a análise dos vídeo-transectos nos diferentes pontos amostrais dos 3 recifes objetos deste estudo. O resultado está demonstrado de forma a agrupar as principais categorias de organismos construtores e não construtores em percentuais de cobertura.

As principais categorias de organismos construtores encontradas foram algas calcárias incrustantes, corais hermatípicos, sendo eles *Montastraea cavernosa*, *Mussismilia hispida*, *Porites* astreoides, *Scolymia wellsi*, *Siderastrea* sp e *Tubastraea* sp, e hidrocorais. E dentre as principais categorias de organismos não construtores destacam-se as algas, sendo elas algas filamentosas e cianobactérias, os corais moles, sendo eles *Neospongodes atlântica* e *Octocorais*, e as esponjas. O

percentual faltoso onde a somatória não atinge 100% refere-se a substratos sedimentares, situações em que não foi possível identificar durante a análise do vídeo ou outros tais como sombra luminosa e presença da trena usada como parâmetro de medição.

Tabela 1 - Cobertura bentônica nos pontos de amostragem recifais onde foram realizados vídeo transectos.

	Poste IV 2	Poste IV 4	Poste IV 5	Mangueira 2	Mangueira 5	Pedra Alva 2	Pedra Alva 4	Pedra Alva 5
PRINCIPAIS CATEGORIAS DE ORGANISMOS CONSTRUTORES (%)								
Algas calcárias in crustantes	1,98	0,25	3,68	1,28	x	0,62	0,35	0,85
Corais de fogo	2,09	0,34	0,75	x	x	x	x	x
Corais hermatípicos	0,37	1,81	0,3	7,59	0,18	23,92	21,27	24,76
TOTAL	4,44	2,4	4,73	8,87	0,18	24,54	21,62	25,61
PRINCIPAIS CATEGORIAS DE ORGANISMOS NÃO CONSTRUTORES (%)								
Algas	25,26	64,12	48,95	60,47	81,91	61,14	63,33	64,58
Corais moles	59,71	28,86	29,69	10,95	0,66	0,08	x	x
Espônjas	5,67	2,94	7,98	14,11	7,49	12,05	12,76	8,28
TOTAL	90,64	95,92	86,62	85,53	90,06	73,27	76,09	72,86

Todos os pontos recifais onde foram realizados os vídeo transectos tiveram sua cobertura bentônica contemplada nesta análise. O sistema recifal Poste IV foi caracterizado por apresentar, de uma maneira geral, os menores percentuais de organismos construtores, chegando a atingir sua menor contribuição no ponto amostral 4 com 2,4%. Consequentemente, exibe a maior taxa de organismos não construtores, quase 96% da sua cobertura bentônica, com expressiva presença tanto de algas

como corais moles em todos os pontos amostrados. Entretanto, o que chama mais atenção é a enorme diferença de cobertura de corais moles em todos os pontos deste recife, quando comparadas às demais áreas investigadas. No ponto 2, quase 60% da cobertura bentônica é de zoantídeos. Na tabela 2 podem-se observar as imagens subaquáticas dos pontos recifais, onde constata-se de fato grande presença de organismos não construtores em todos os pontos amostrados deste recife.

O recife da Mangueira apresentou uma característica diferente dos demais recifes devido ao fato de que os pontos amostrais tiveram as coberturas de organismos construtores bastante diferentes entre si. E isso fica claro nas imagens da tabela abaixo, onde verifica-se perceptível mudança na composição bentônica do ponto 2 para o ponto 5, com intensa cobertura de alga filamentosa neste ponto, sendo o mais alto percentual dentre todos os pontos dos recifes investigados (quase 82%). Já no ponto 2, com 8 vezes mais presença de organismos construtores, observa-se uma cobertura bentônica mais heterogênea, ainda que tenha uma grande contribuição de algas.

O recife Pedra Alva foi o que apresentou maiores percentuais de organismos construtores na sua composição, com até 25,61% no ponto 5, 6 vezes mais do que o recife Poste IV por exemplo. Dentre as categorias identificadas, os corais hermatípicos representam quase que a totalidade desse percentual, majoritariamente colônias de *Montastrea cavernosa* (imagens subaquáticas da tabela 2). Os menores percentuais de organismos não construtores também foram encontrados nos pontos amostrados deste recife. O ponto que apresentou menor valor foi o ponto 5 com uma contribuição de 72,86% dessa categoria, sendo que as algas filamentosas é a categoria mais representativa em todos os 3 pontos analisados.

Tabela 2 - Imagens subaquáticas dos pontos recifais que serviram de "ground truthing" e seus respectivos percentuais de cobertura bentônica e valores de TRI.

Ponto Recifal	Imagem subaquática	% de cobertura de organismos construtores x algas e corais moles	Parâmetro TRI (<i>Terrain Ruggedness Index</i>)
Poste IV 2		4,44% X 90,64%	0,15
Poste IV 4		2,4% X 95,92%	0,14
Poste IV 5		4,73% X 86,62%	0,07

Ponto Recifal	Imagem subaquática	% de cobertura de organismos construtores x algas e corais moles	Parâmetro TRI (<i>Terrain Ruggedness Index</i>)
Mangueira 2		8,87% X 85,53%	0,22
Mangueira 5		0,18% X 90,06%	0,13

Ponto Recifal	Imagem subaquática	% de cobertura de organismos construtores x algas e corais moles	Parâmetro TRI (<i>Terrain Ruggedness Index</i>)
Pedra Alva 2		24,54% X 73,27%	0,16

Pedra Alva 4		<p>21,62% X 76,09%</p>	0,11
Pedra Alva 5		<p>25,61% X 72,86%</p>	0,16

A partir da análise granulométrica das amostras coletadas em diferentes pontos de fundo sedimentar dos 3 recifes estudados, foi possível quantificar o percentual retido de sedimento das classes de argila, silte, areia e cascalho (Tabela 3). Os biodetritos maiores que 4mm foram retirados dessa análise mas serviram de importante parâmetro comparativo na associação com as classes de altas intensidades de retroespalhamento acústico identificadas na Figura 3.

Tabela 3 - Resultado da análise granulométrica dos pontos sedimentares amostrados nos arredores dos 3 recifes estudados.

	Poste IV 1	Poste IV 3	Mangueira 1	Mangueira 3	Mangueira 4	Pedra Alva 1	Pedra Alva 3
PERCENTUAL RETIDO DE SEDIMENTO EM CADA CLASSE GRANULOMÉTRICA							
Cascalho	0,04	0,35	0	2,04	1,14	0,26	4,49
Areia	49,63	48,78	21,77	4,5	37,79	52,14	47,16
Silte	1,71	0,28	5,3	1,11	0,83	0,16	0,43
Argila	48,62	50,6	72,52	92,35	60,25	47,44	47,92
TOTAL	100	100,01	99,59	100	100,01	100	100
PRESENÇA DE BIODETRITOS	Não	Sim	Não	Sim	Sim	Sim	Sim
INTENSIDADE DE RETROESPALHAMENTO ACÚSTICO	Baixo	Alto	Baixo	Médio	Alto	Baixo	Alto

5. DISCUSSÃO

5.1. ANÁLISE INTEGRADA DAS CARACTERÍSTICAS DO FUNDO

Através dos dados geofísicos adquiridos neste trabalho (batimetria, sonografia e retroespalhamento acústico) juntamente com os dados de validação coletados em pontos estratégicos, sejam eles coletas de sedimento e vídeo transectos, pôde-se realizar associações importantes quanto às condições atuais dos recifes e as respostas acústicas associadas a elas, tanto no quesito morfologia e seus aspectos do terreno, quanto nos níveis de retroespalhamento acústico de diferentes tipos de fundo sejam dos limites recifais, sejam de suas proximidades de caráter sedimentar.

Os recifes de coral são importantes não só para criar e manter a complexidade topográfica do fundo do mar, servindo como habitat para uma grande variedade de organismos marinhos (Zieger et al, 2009), mas também servem de proteção as ondas e a erosão costeira (Sieger et al, 2017). Como a composição das espécies de coral em um ecossistema de recife muda ao longo do tempo, a estrutura do recife também pode mudar, alterando a topografia do fundo do mar. Uma mudança na cobertura

de organismos que criam estruturas mais simples pode resultar em um fundo do mar menos acidentado e rugoso.

Como mostrado na seção 4.1, a topografia dos recifes é bastante variada, tanto em relação à distribuição e concentração dos afloramentos recifais quanto em relação aos seus perfis de elevação. De acordo com Kikuchi et al. (2010) e Leão et al. (2010), a maioria dos recifes do estado da Bahia localizados numa faixa de até 5km longe da costa estão em mudança de fase. Percebe-se que os recifes da Baía de Todos os Santos investigados neste trabalho (Mangueira, Pedra Alva e Poste IV) realmente se assemelham aos percentuais de cobertura bentônica característicos desse tipo de situação de desequilíbrio na capacidade construtora do recife, como também apontou Cruz et al (2015).

Segundos esses autores, uma cobertura de macroalgas de 43,2% +/- 18,4% e uma cobertura de coral de 3,6% +/- 2,4% já são características de um recife em mudança de fase. Os 3 recifes aqui estudados se encontram dentro desse espectro de grande cobertura de organismos não construtores (algas, corais moles e esponjas) (Tabelas 1 e 2). O único recife que apresentou maiores coberturas de corais hermatípicos do que aquelas indicativas de mudança de fase, foi o recife Pedra Alva, onde nos 3 pontos amostrados o percentual desses organismos ficou por volta de 23%, o que indicaria ainda uma capacidade construtora acima da média para os recifes dessa região, como indicado por Cruz et al (2015).

Apesar do ponto amostral Mangueira 2 apresentar alta cobertura de organismos não construtores, o perfil de elevação desse afloramento foi o que apresentou maiores irregularidades topográficas e maiores alturas de afloramentos recifais, como descrito na seção 4.1, o que provavelmente resultou no maior valor de TRI encontrado. Essa grande complexidade topográfica, curiosamente não se relaciona com grandes taxas de organismos construtores como esperado. Provavelmente essa batimetria irregular é herança de uma época em que existia uma fase recifal mais construtora naquela região, como foi documentado por Dutra et al, 2006, quando foram descritos

percentuais de cobertura de corais hermatípicos de até 18,2%, mais que o dobro do valor encontrado nesse trabalho. E também de uma herança geológica, responsável pela morfologia do substrato inicial onde o recife inicialmente se instalou e se desenvolveu.

Se esse tipo de abordagem e análise da batimetria de áreas recifais realizado nesse estudo for aplicado em levantamentos futuros, será possível identificar mudanças na composição e estrutura das comunidades de corais ao longo do tempo e como essas mudanças podem estar afetando a estrutura física do recife, ou seja, suas complexidades topográficas e conseqüentemente a diversidade na disponibilidade de diferentes tipos de habitats e nichos ecológicos.

5.2. RELAÇÃO ENTRE FASE RECIFAL, RETROESPALHAMENTO ACUSTICO E RUGOSIDADE (TRI)

A mudança de fase pode afetar a rugosidade do fundo do mar de várias maneiras, e isso pôde ser demonstrado através de alguns parâmetros analisados neste trabalho como diminuição de irregularidades no perfil topográfico e diminuição dos valores de TRI com a diminuição do percentual de organismos construtores. O parâmetro TRI é uma ferramenta valiosa para quantificar a complexidade topográfica e a rugosidade de um terreno seja ele terrestre ou submerso e pode fornecer informações importantes sobre os processos ecológicos e ambientais influenciados pela topografia (Misiuk et al, 2021). Ainda que a resolução utilizada neste trabalho se limite a não representar a rugosidade determinada por estruturas de colônias menores que 1m, devido à resolução utilizada no grid batimétrico, não se elimina a representatividade topográfica do complexo recifal de uma maneira geral.

De uma maneira geral esse parâmetro variou muito pouco (0,07 - 0,22), o que era esperado visto que em nenhum ponto recifal foram detectadas expressivas coberturas de organismos construtores de recife, o que aumentaria a complexidade topográfica. Mas ainda assim ele poderá

servir de ponto de partida para monitorar mudanças na estrutura física e na complexidade dos ecossistemas de recifes investigados e poderá ajudar a indicar a ocorrência de mudança de fase e outras mudanças na composição da comunidade de corais. Ao analisar as mudanças no TRI ao longo do tempo, pode-se também ajudar nos esforços de conservação e gerenciamento ambiental.

As 2 áreas recifais mapeadas do Recife da Mangueira tem características bastante distintas tanto na cobertura bentônica quanto nos valores médios de TRI encontrados. A quase ausência de organismos construtores no ponto 5 da Mangueira (apenas 0,18%), provavelmente é o motivo pelo qual a média do TRI caiu de 0,22 no ponto 2 para 0,13. A grande prevalência de cobertura de algas filamentosas nessa área recifal (81,91%) provavelmente é a responsável por essa diminuição considerável da rugosidade, a qual é refletida no valor médio de TRI, mas não parece ter influência nos níveis de retroespalhamento acústico, visto que as duas regiões recifais apresentaram baixas intensidades.

Esse comportamento pode estar associado a grande presença de sedimentos finos intercalando os afloramentos recifais. Neste trabalho não foi realizada a coleta de sedimentos nessa área, entretanto, Dutra et al. (2006) descreveram essa composição sedimentar intra recifal como lama arenosa, o que, estaria de acordo com a diferença de intensidade acústica demonstrada pelo sedimento circundante dos 2 afloramentos recifais, os quais apresentaram maiores quantidades da fração areia e grandes teores de fragmentos calcários.

No recife Pedra Alva, os valores de TRI encontrados variaram de acordo com o percentual total de organismos construtores. Nos dois pontos calculados com valores iguais de TRI (0,16), o percentual desses organismos variou aproximadamente 1%, enquanto que o Ponto 4 apresentou menor valor de TRI (0,11) e também menor percentual de organismos construtores. Essa relação indicaria a contribuição dos corais hermatípicos no aumento de complexidade topográfica dos recifes.

As áreas que bordejam imediatamente os afloramentos recifais e seus taludes bem marcados demonstraram altos valores de backscatter, como pode-se observar claramente nos entornos circulares dos recifes da Mangueira e no talude bem marcado a noroeste do recife Pedra Alva. No caso do ponto amostral Mangueira 4 os altos valores de refletividade foram provenientes de dois fatores, sejam eles, maior teor do grão areia do que os outros dois pontos amostrais e a grande quantidade de fragmentos calcários oriundos do afloramento recifal. Já no caso do ponto amostral Pedra Alva 3, mesmo apresentando teores de areia e argila compatíveis com o ponto Pedra Alva 1, a batimetria da área foi determinante para a faixa de altos valores BS, onde o talude acentuado favorece naturalmente o acúmulo de grandes quantidades de fragmentos calcários provenientes do complexo recifal, o que refletiu também no teor de cascalho aumentado nesse ponto.

De uma maneira geral, em todos os três recifes estudados os níveis de retroespalhamento acústico se mostraram intensificar principalmente em função do aumento da granulometria média e, principalmente da presença de fragmentos calcários, podendo-se destacar, portanto, que a grande cobertura de organismos não construtores como algas e corais moles em todos os recifes (sempre acima de 70% de recobrimento) pode ter sido decisivo para que as regiões de afloramentos recifais em si não apresentasse níveis altos de refletividade acústica, já que esses tipos de fundos são menos duros e rugosos.

A análise baseada na imagem tem como principal produto um mosaico de retorno acústico com valores normalizados, ou seja, sem levar em consideração as peculiaridades do retroespalhamento em diferentes ângulos de incidência. Através deste produto pode-se inferir variações da natureza do substrato como dureza e rugosidade, permitindo uma análise qualitativa da área e, portanto, associações diretas entre os níveis de retroespalhamento acústico do substrato medidos em decibéis e suas propriedades geotécnicas (Brown & Blondel, 2009).

Os dados de backscattering fornecem uma quantificação dos níveis de retroespalhamento das ondas acústicas na interface fundo marinho e coluna d'água (Lurton & Lamarche, 2015). De forma geral, a qualidade e eficiência dos dados acústicos, sejam eles de batimetria, sonografia ou de retroespalhamento acústico, dependem de vários parâmetros operacionais de aquisição tais como ganho, potência, comprimento do pulso, grau de abertura do feixe e frequência de emissão das ondas acústicas (Dondurur 2018).

As respostas de intensidade de retroespalhamento acústico nas áreas imageadas estão relacionadas não somente com as propriedades físicas do substrato ou do objeto em estudo e suas formas e dimensões, mas também com o espectro de frequência do sinal emitido e o ângulo de incidência dos feixes ao atingirem o leito marinho (Gutierrez et al. 2015). O fato dos dados terem sido coletados em uma única campanha, com o mesmo equipamento e as mesmas configurações de aquisição, diminui a necessidade de procedimentos de calibração para obtenção de dados potencialmente equivalentes e comparáveis (Misiuk et al, 2021).

Dessa forma, assim como já descrito por diversos autores tais como Lecours et al., (2016) e Brown & Blondel., (2009), os mosaicos de retroespalhamento acústico refletiram mais fielmente as propriedades geotécnicas do fundo de forma que o tipo de sedimento, a proximidade com os afloramentos recifais, e conseqüentemente a quantidade de biodetritos, e a morfologia do fundo foram decisivos na representatividade de níveis de refletividade mais altos ou mais baixos.

6. CONCLUSÃO

O sonar de varredura lateral interferométrico se mostrou uma boa ferramenta para mapeamento de áreas recifais rasas como uma primeira aproximação do tipo de cobertura dos recifes. Juntamente com os dados de validação de amostragem direta, os produtos geofísicos (batimetria e

backscatter) serviram para identificação de características de fases construtoras e não construtoras dos recifes. Os dados coletados neste trabalho permitiram estabelecer delimitações geográficas mais precisas visto que os trabalhos pretéritos sempre se limitaram a métodos diretos de amostragem do fundo, as quais requerem intensos esforços para amostrar grandes áreas.

O estudo iniciado neste trabalho, mesmo apresentando poucos pontos amostrais, serve como base para criação de um protocolo de mapeamento e monitoramento de recifes utilizando um método indireto de sondagem. Obedecendo boas práticas de aquisição de dados e monitoramento de parâmetros operacionais de aquisição, os estudos podem ser replicados e assim gerado uma base de dados confiáveis para servir no monitoramento a longo prazo.

Os valores de TRI também serviram de análise comparativa de alteração de rugosidade apenas dentro do mesmo grid, ou seja, dentro do mesmo complexo recifal. Uma análise comparativa entre diferentes sistemas recifais também poderá ser útil em estudos futuros mas requer calibrações de escala para que não haja esse tipo de interferência na análise.

A análise geomorfológica com as imagens de backscatter iniciada neste estudo permite iniciar um programa de monitoramento baseado nas alterações de rugosidade analisadas nos perfis de elevação juntamente com a análise de cobertura bentônica proveniente dos dados de validação. Para que seja possível uma abordagem comparativa das diferenças de intensidade de retroespalhamento acústico entre diferentes recifes e, principalmente entre campanhas e estudos diferentes ao longo dos anos, ou seja, um trabalho de monitoramento da capacidade construtora dos recifes da BTS, é recomendado a análise do Backscatter baseado no sinal.

7. AGRADECIMENTOS

Este estudo faz parte do projeto “Avaliação e pesquisa de coral-sol na Baía de Todos-os-Santos”, acordo de cooperação entre a UFBA e PETROBRAS (nº 5850.0107361.18.9)

regulamentada pelas cláusulas de investimento em P,D&I da Agência Brasileira do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (Resolução ANP 03/2015).

Também agradecemos ao Mestre Antônio, que conduziu o saveiro Marenostrom II durante todo período de aquisição de dados geofísicos.

8. REFERENCIAS

- Barros F, Costa PC, Cruz I, Mariano DLS, Miranda RJ (2012) Habitats bentônicos na Baía de Todos os Santos. *Rev. Virtual Quim.* 4, 551–565. <https://doi:10.5935/1984-6835.20120043>
- Brown CJ, Blondel P (2009) Developments in the application of multibeam sonar backscatter for seafloor habitat mapping. *Appl Acoust* 70:1242–1247. doi:10.1016/j.apacoust.2008.08.004
- Brown C J, Smith S J, Lawton P, Anderson J T (2011). Benthic habitat mapping: A review of progress towards improved understanding of the spatial ecology of the seafloor using acoustic techniques. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 92(3), 502–520. <https://doi:10.1016/j.ecss.2011.02.007>
- Cruz ICS, de Kikuchi RKP, Longo LL, Creed JC (2014) Evidence of a phase shift to *Epizoanthus gabrieli* Carlgreen, 1951 (Order Zoanthidea) and loss of coral cover on reefs in the Southwest Atlantic. *Mar. Ecol.* 36, 318–325. <https://doi:10.1111/maec.12141>
- Dominguez JML, Bittencourt AC da SP (2009) Baía de todos os santos: Aspectos Oceanográficos. In: Edufba (ed). Salvador, pp 29-66
- Dondurur D (2018) Acquisition and Processing of Marine Seismic Data. Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811490-2.00001-3>
- Dutra LXC, Kikuchi RKP, Leão ZMAN (2006) Todos os Santos Bay coral reefs, Eastern Brazil, revisited after 40 years. In: Proc. 10th International Coral Reef Symposium. pp. 1090–1095.
- Eastwood PD, Souissi S, Rogers SI, Coggan RA, Brown CJ (2006) Mapping seabed assemblages using comparative top-down and bottom-up classification approaches. *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* 63, 1536–1548. <https://doi:10.1139/F06-058>
- Elmhirst T, Connolly SR, Hughes TP (2009) Connectivity, regime shifts and the resilience of coral reefs. *Coral Reefs* 28, 949–957. DOI 10.1007/s00338-009-0530-8
- Gutierrez F, Manley-Cooke P, Tamset D (2015) Calibrated side scan images from a phase measuring bathymetric sonar. Paper presented at the shallow survey 2015, Plymouth, UK
- Harris PT, Baker EK (2020) Why map benthic habitats? In: Elsevier Inc (ed) Seafloor geomorphology as benthic habitat, 1st edn. Amsterdam, Netherlands, pp 3-15
- Hatje V, De Andrade JB (2009) Baía de todos os santos: Aspectos Oceanográficos. In: Edufba (ed). Salvador, pp 19-23
- Kikuchi RKP, Leão ZMAN, Oliveira MDM (2010) Conservation status and spatial patterns of AGRRA vitality indices in Southwestern Atlantic reefs. *Revista de Biologia Tropical*, 58 Supp 1, 1–31.
- Kikuchi RKP et al (2023) Reefs of the Western Tropical South Atlantic Ocean: Distribution, Environmental Impacts and Trends on Environmental Suitability Due to Climate Changes. In Springer Nature Switzerland (ed) Tropical Marine Environments of Brazil, 1st edn. pp 111-140
- Leão ZMAN, Kikuchi RKP, Testa V (2003) - Corals and Coral Reefs of Brazil. In: Cortés, J. (eds.),

- Latin American Coral Reefs. Elsevier B.V. (ISBN-13: 978-0444513885).
- Leão ZMAN, Kikuchi RKP, Oliveira MDM, Vasconcellos V (2010) Status of Eastern Brazilian coral reefs in time of climate changes. *Pan-American Journal of Aquatic Sciences*, 5, 224-235.
- Lecours V, Dolan MFJ, Micallef A, Lucieer VL (2016). A review of marine geomorphometry, the quantitative study of the seafloor. *Hydrology and Earth System Sciences*, 20(8), 3207–3244. doi:10.5194/hess-20-3207-2016
- Lessa G. Dias K (2009) Distribuição espacial das litofácies de fundo da Baía de Todos os Santos. *Quaternary and Environmental Geosciences* 01(2), p.84-97.
- Lurton X, Lamarche G (eds) (2015) Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and recommendations vol Geohab Report. <http://geohab.org/publications/>
- McManus JW, Polsenberg JF (2004) Coral-algal phase shifts on coral reefs: Ecological and environmental aspects. *Prog. Oceanogr.* 60, 263–279. doi:10.1016/j.pocean.2004.02.014
- Misiuk B, Lacharité M, Brown CJ (2021) Assessing the use of harmonized multisource backscatter data for thematic benthic habitat mapping. *Science of Remote Sensing*, 3100015.
- Siegle E, Costa MB (2017) Nearshore Wave Power Increase on Reef-Shaped Coasts Due to Sea-Level Rise. *AGU Earth's Future*, 5, 1054–1065, <https://doi.org/10.1002/2017EF000624>
- Smith J, O'Brien PE, Stark JS, Johnstone GJ, Riddle MJ (2015) Integrating multibeam sonar and underwater video data to map benthic habitats in an East Antarctic nearshore environment. *Estuar. Coast. Shelf Sci.* 164, 520–536. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecss.2015.07.036>
- Suguo K (1973) *Introdução a sedimentologia*. São Paulo.
- Wilson MFJ et al (2007). Multiscale Terrain Analysis of Multibeam Bathymetry Data for Habitat Mapping on the Continental Slope. *Marine Geodesy*, 30:1-2, 3-35. DOI: 10.1080/01490410701295962
- Zieger S, Stieglitz T, Kininmonth S (2009). Mapping reef features from multibeam sonar data using multiscale morphometric analysis. *Marine Geology*, 264(3–4), 209–217. <https://doi:10.1016/j.margeo.2009.06.002>

CAPÍTULO 3 CONCLUSÕES

O presente trabalho avaliou a utilização de sonar interferométrico de alta resolução para identificação e diferenciação de fases construtoras e não construtoras de recifes na Baía de Todos os Santos. Esta ferramenta se mostrou válida para mapeamento de áreas recifais rasas como uma primeira aproximação do tipo de cobertura dos recifes. Juntamente com os dados de validação de amostragem direta, os produtos geofísicos (batimetria e backscatter) serviram para identificação de características de fases construtoras e não construtoras dos recifes. Os dados coletados neste trabalho permitiram estabelecer delimitações geográficas mais precisas visto que os trabalhos pretéritos sempre se limitaram a métodos diretos de amostragem do fundo, as quais requerem intensos esforços para amostrar grandes áreas.

O estudo iniciado neste trabalho, mesmo apresentando poucos pontos amostrais, serve como base para criação de um protocolo de mapeamento e monitoramento de recifes utilizando um método indireto de sondagem. Obedecendo boas práticas de aquisição de dados e monitoramento de parâmetros operacionais de aquisição, os estudos podem ser replicados e assim gerado uma base de dados confiáveis para servir no monitoramento a longo prazo.

A análise geomorfológica com as imagens de backscatter iniciada neste estudo permite iniciar um programa de monitoramento baseado nas alterações de rugosidade analisadas nos perfis de elevação juntamente com a análise de cobertura bentônica proveniente dos dados de validação. Para que seja possível uma abordagem comparativa das diferenças de intensidade de retroespalhamento acústico entre diferentes recifes e, principalmente entre campanhas e estudos diferentes ao longo dos anos, ou seja, um trabalho de monitoramento da capacidade construtora dos recifes da BTS, é recomendado a análise do Backscatter baseado no sinal.

Diante disso este trabalho, além de fornecer informações sobre técnicas inovadoras de mapeamento de recifes utilizando métodos indiretos de sondagem, também colaborou com a produção científica do Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal da Bahia.

ANEXO A – REGRAS DE FORMATAÇÃO DA REVISTA

Text

Text Formatting

Manuscripts should be submitted in Word.

- Use a normal, plain font (e.g., 10-point Times Roman) for text.
- Use italics for emphasis.
- Use the automatic page numbering function to number the pages.
- Do not use field functions.
- Use tab stops or other commands for indents, not the space bar.
- Use the table function, not spreadsheets, to make tables.
- Use the equation editor or MathType for equations.
- Save your file in docx format (Word 2007 or higher) or doc format (older Word versions).

References

Citation

Cite references in the text by name and year in parentheses. Some examples:

- Negotiation research spans many disciplines (Thompson 1990).
- This result was later contradicted by Becker and Seligman (1996).
- This effect has been widely studied (Abbott 1991; Barakat et al. 1995a, b; Kelso and Smith 1998; Medvec et al. 1999, 2000).

Reference list

The list of references should only include works that are cited in the text and that have been published or accepted for publication. Personal communications and unpublished works should only be mentioned in the text.

Reference list entries should be alphabetized by the last names of the first author of each work. Please alphabetize according to the following rules: 1) For one author, by name of author, then chronologically; 2) For two authors, by name of author, then name of coauthor, then chronologically; 3) For more than two authors, by name of first author, then chronologically.

If available, please always include DOIs as full DOI links in your reference list (e.g. "https://doi.org/abc").

ANEXO B - COMPROVANTE DE SUBMISSÃO DO ARTIGO

CORE-D-24-00083 - Submission Confirmation



em.core.0.8ac225.9da68... 16 de abr.

Em nome de Coral Reefs

(CORE)

Anita Gomes Oliveira

Dear [M.Sc](#) Oliveira,

Thank you for submitting your manuscript, "Use of High Resolution Interferometric Sonar for Identification and Differentiation of Constructive and Non-Constructive Phases of Reefs in the Todos os Santos Bay, Northeast Brazil", to Coral Reefs

The submission id is: CORE-D-24-00083
Please refer to this number in any future correspondence.

ANEXO C – RELATÓRIO DETALHADO DE AQUISIÇÃO DOS DADOS GEOFÍSICOS

1. INTRODUÇÃO

O mapeamento geofísico de 3 áreas recifais na Baía de Todos os Santos foi realizado durante o período de 16 a 20/08/2021. A equipe foi composta por 4 estudantes (Anita Oliveira, Rafael Fonseca, Gabriel Mussi e Marcelo Amberger) e 2 tripulantes (Mestre Antonio e Bartolomeu).

O sistema acústico utilizado durante o levantamento foi o sonar interferométrico Edgetech 6205 com o sensor inercial Applanix para compensação dos movimentos da embarcação. Os dados coletados por esse sistema são: batimetria, imageamento acústico e backscatter (dados de retroespalhamento acústico). Eles são todos adquiridos simultaneamente. A batimetria e o backscatter a uma frequência de 550kHz e o registro sonográfico em duas frequências simultâneas (230 e 550kHz).

A embarcação utilizada foi o saveiro Marenostrom II, a mesma do treinamento realizado em Janeiro de 2020.



Figura 1- Embarcação utilizada no levantamento geofísico.

2. INSTALAÇÃO DOS EQUIPAMENTOS NA EMBARCAÇÃO

Para possibilitar a instalação dos equipamentos na embarcação foram utilizadas peças de aço inox robustas, bem niveladas e fixadas, visando tanto a melhoria da qualidade dos dados quanto a segurança dos sensores. A fixação da haste na lateral da embarcação se deu em 3 pontos, visando diminuir a vibração tanto da peça de aço como consequentemente do sonar. Na figura 2 podemos observar o sonar sendo instalado na lateral da embarcação.



Figura 2- Sonar fixado na haste na lateral da embarcação

A posição das antenas foi alterada para cima da cabine, pois ainda tivemos vibração na montagem inicial realizada durante o treinamento (Figura 3). Elas foram posicionadas de modo que a primária (responsável pela posição - GPS) ficou a boreste e a secundária (responsável pelo alinhamento - GYRO) a bombordo. Existe uma marcação no cabo para indicar o local correto a ser conectado no Sim Box do Applanix (posições A1 e A2).

O IMU Applanix foi instalado na proa, logo a frente da cabine. Para isso, uma peça inox foi utilizada como base, adicionalmente a um material emborrachado para diminuir a vibração no sensor (Figura 4).



Figura 3 - Antena GPS sendo instalada acima da cabine da embarcação



Figura 4 - Sensor de movimento Applanix instalado na proa, próximo à cabine.

3. MEDIÇÃO DOS OFFSETS / CONFIGURAÇÃO DO BARCO

Para iniciarmos a medição dos offsets, determinamos o CG (*center of gravity*), o qual foi o nosso ponto de referência para medição da posição de todos os outros sensores em X,Y. Para Z nossa referência foi sempre a linha d'água. O CG ou COG normalmente se localiza onde achamos que está o centro de gravidade da embarcação.

Então fizemos as seguintes medidas:

CG / LINHA D'ÁGUA → MRU
 CG / LINHA D'ÁGUA → HASTE / Peixe
 CG / LINHA D'ÁGUA → ANTENA PRIMÁRIA

Considerando a orientação determinada pelo software MV POSView:

- Eixo X - proa + popa -
- Eixo Y - port - starboard +
- Eixo Z - abaixo linha d'água + acima linha d'água -

Os valores encontrados foram:

- **MRU:** (+0,64; 0; -0,70)
- **GPS:** (-0,23; +1,10; -2,64)
- **SONAR:** (-0,62; +2,10; +0,67)

OBS: As medições de waterline (imersão do peixe) foram tiradas diariamente antes do início das atividades (Figura 5).

Após medição dos offsets inserimos os valores nos Softwares MV POSView (Offsets do IMU e do GPS) e SonarWiz (Offset do sonar no arquivo de embarcação). Os eixos X,Y são invertidos nesses dois softwares.

O offset da antena secundária é preenchida automaticamente após o *Gams Calibration* (próximo tópico – Calibração).

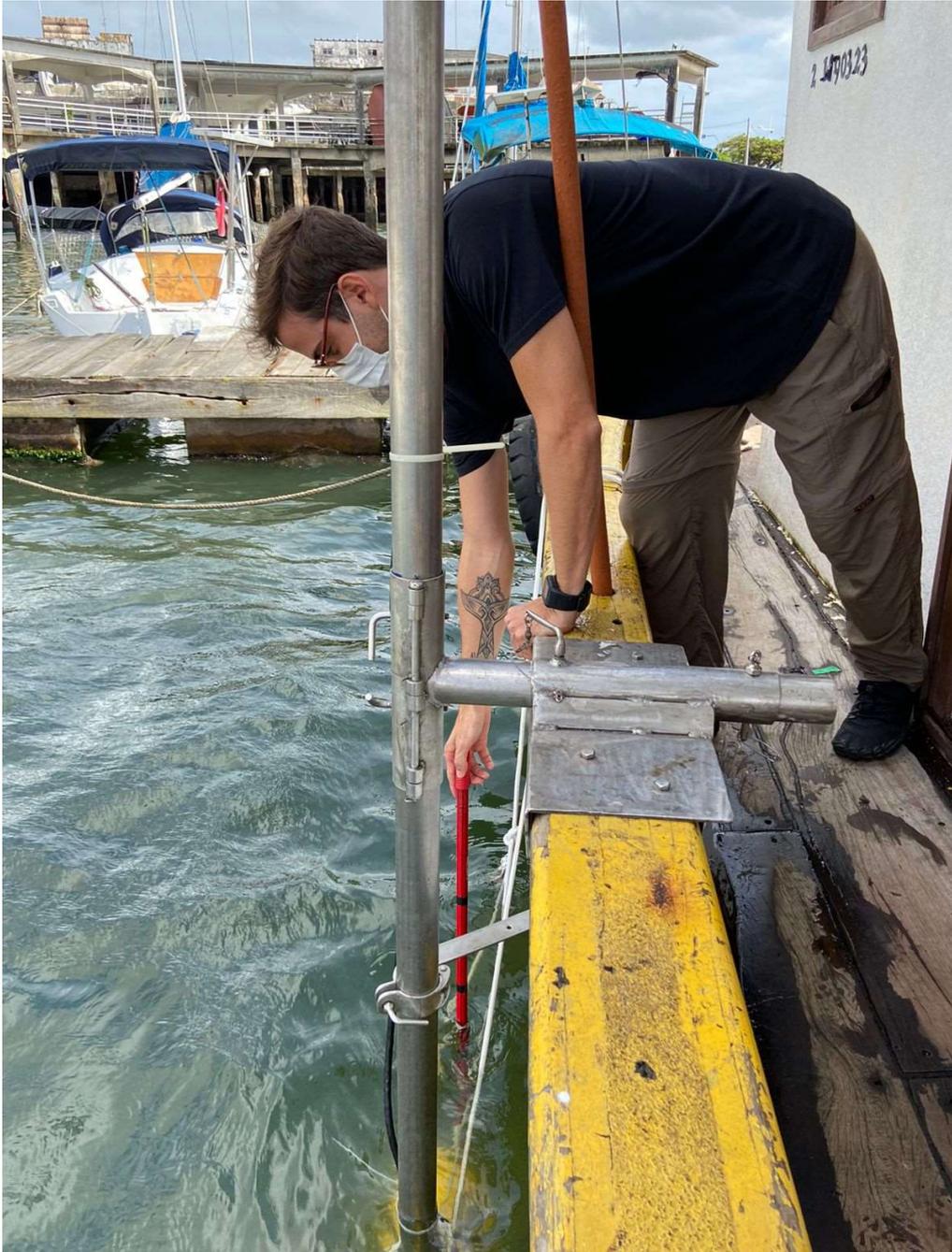


Figura 5- Medição diária de waterline

Gams Calibration / Patch test

A calibração do sistema inercial nos fornece uma acurácia robusta tanto de posicionamento quanto de orientação do nosso sistema. Antes de começar o processo, zeramos todos os parâmetros (Figura 6). Após isso, damos início de fato ao *Gams* (GNSS Azimuth Measurement System) *Calibration* realizando movimentos em forma de 8 com a embarcação. Podemos acompanhar o andamento do processo na aba *GAMS Solution*. Após finalização da calibração, a acurácia do IMU ficou bem próxima a zero nas medições de *Heading*, *Position* e *Velocity*.

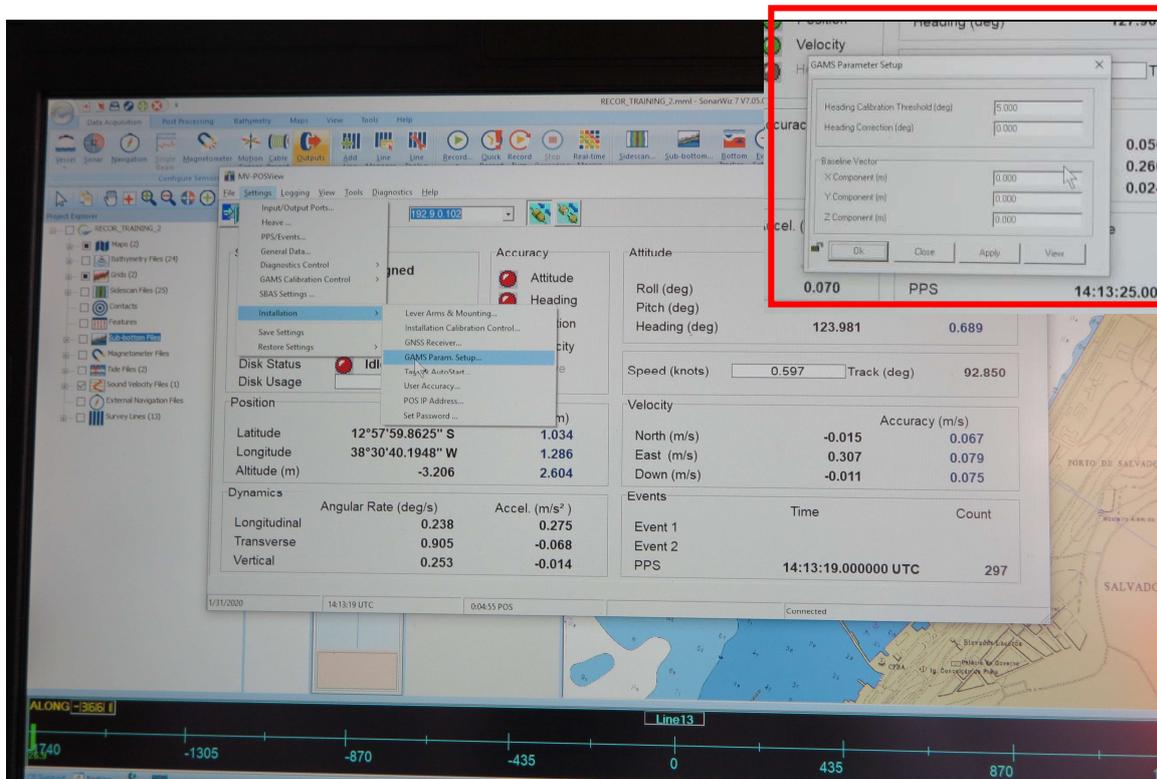


Figura 6 - Preparando para calibração do sistema inercial no MV POSView

Finalizado o GAMS *Calibration* demos início às linhas para cálculo dos valores de *Patch Test* (*Pitch error*, *Roll error* e *Yaw error*), que tem o objetivo de determinar o desnível angular existente entre o Sonar e o Sensor de movimento Applanix.

A escolha do local para o planejamento das linhas para patch test levou em consideração a existência de áreas planas, declive acentuado ou alvos/feições marcantes próximos, e que estivesse numa profundidade igual ou maior do que na área do Levantamento. Por isso foi escolhido o local demonstrado na Figura 7, região com a presença de um plano batimétrico logo ao lado de um canal, evidenciando rápida alteração de profundidade.

Como o sonar interferométrico é um *sonar dual head*, temos que calibrar ele para os dois lados (*Port* e *Starboard*). Por isso, fizemos 3 linhas duplicadas em direções opostas.

Os valores encontrados foram:

- **Pitch error: 4.5° , -4.5°**
- **Roll error: 3.5° , -2.84°**
- **Yaw error: 179° . -1°**

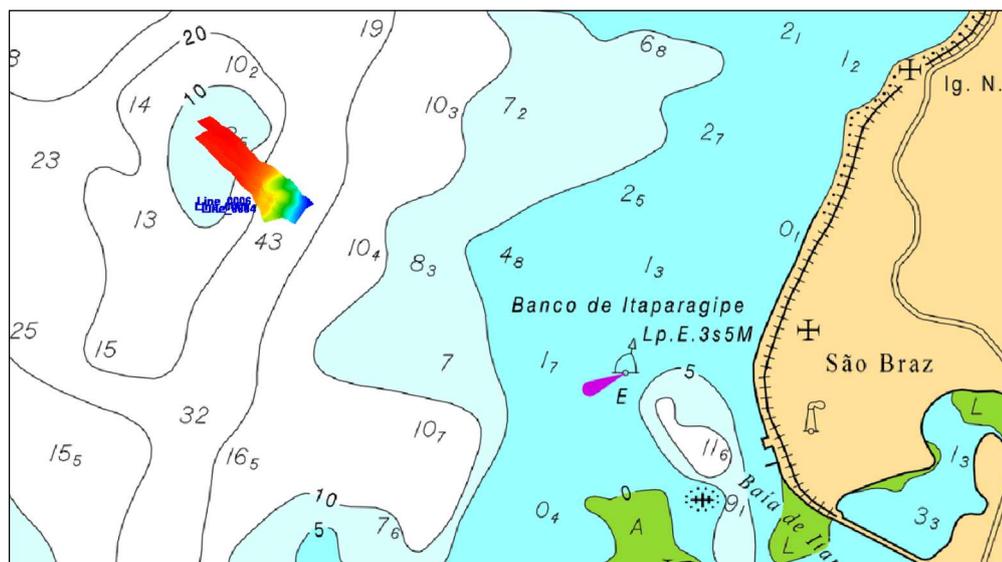


Figura 7- Área de patch test

4. ÁREAS MAPEADAS E ATIVIDADES DESENVOLVIDAS

DIA 1 (16/08)

Mobilização: retirada dos equipamentos do Igeo e início da montagem da embarcação, compra de materiais faltosos como combustível e óleo para o gerador e ajuste da embarcação para aquisição, como mesa para suporte do sistema interno (Figura 8) e toldo para cobertura da área da proa.

DIA 2 (17/08)

Finalização da montagem do sistema (Figura 8), medição dos offsets e realização do Patch Test inicial.



Figura 8 - Sistema interno sendo instalado.

DIA 3 (18/08)

Começamos de fato a mapear as áreas de interesse. Toda a sondagem foi realizada de modo a garantir 100% de recobrimento do fundo marinho e, assim, evitar a necessidade de interpolações. As linhas foram planejadas sempre paralelas às isóbatas. O range utilizado foi de 60m, o que assegura até 120m de recobrimento a cada linha executada. A velocidade da embarcação se manteve entre 4 e 5 nós.

Nesse dia mapeamos os recifes Pedra da Mangueira, o qual é caracterizado como um recife em fase construtiva com a presença de coral sol, e Pedra Alva, o qual é caracterizado como um recife em fase construtiva, mas sem a presença de coral sol (Figura 9). Após o término de cada área, foi

realizada uma linha de verificação. Esse procedimento nos permite checar a qualidade dos dados obtidos e a identificação de inconsistências na aquisição. Na figura 10 pode-se observar uma tela de aquisição sonográfica com feições recifais bastante evidentes.

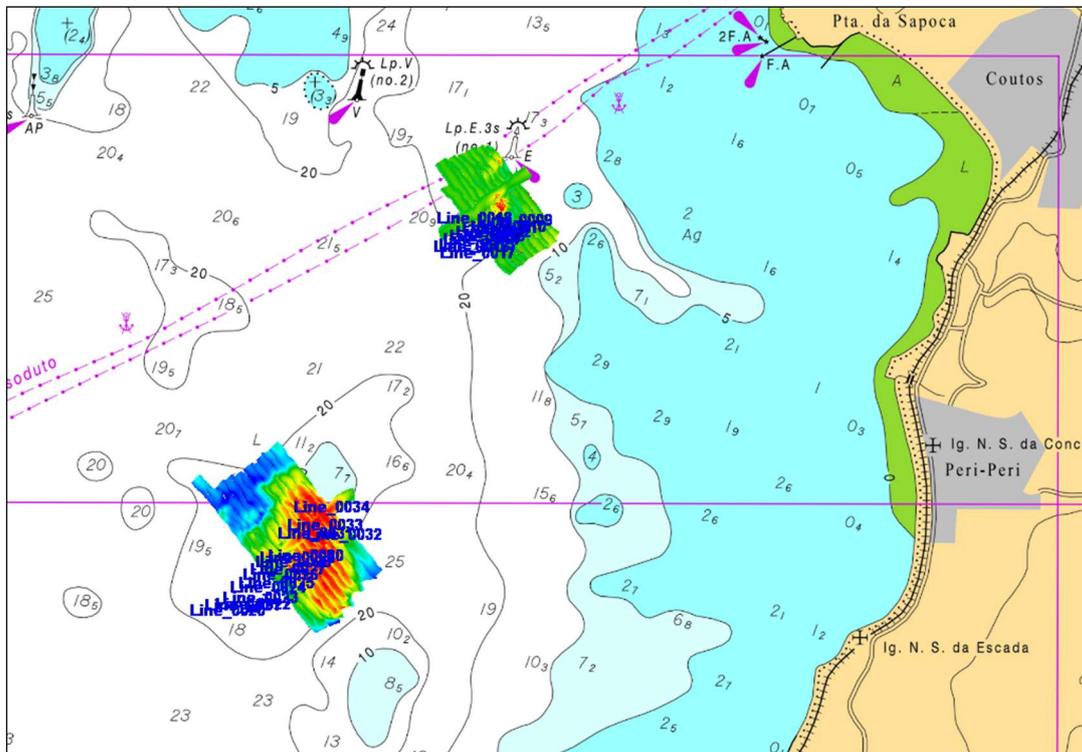


Figura 9 - Sondagem dos recifes Mangueira e Pedra Alva e linhas de verificação.



Figura 10 - Tela de registro sonográfico no recife Pedra da Mangueira.

DIA 4 (19/08)

No segundo dia de sondagem, mapeamos o recife Poste IV, o qual é caracterizado por ser um recife em mudança de fase (Figura 11). Nesse dia tivemos a influência de fortes ventos e, portanto, bastante movimento da embarcação. Por esse motivo, não finalizamos toda a extensão recifal, mas a área mapeada será suficiente para embasar as análises futuras. Ao início ou no final de todas as áreas mapeadas foi feita o lançamento do SVP (sound velocity profile) para medição da velocidade do som na coluna d'água (Figura 13).

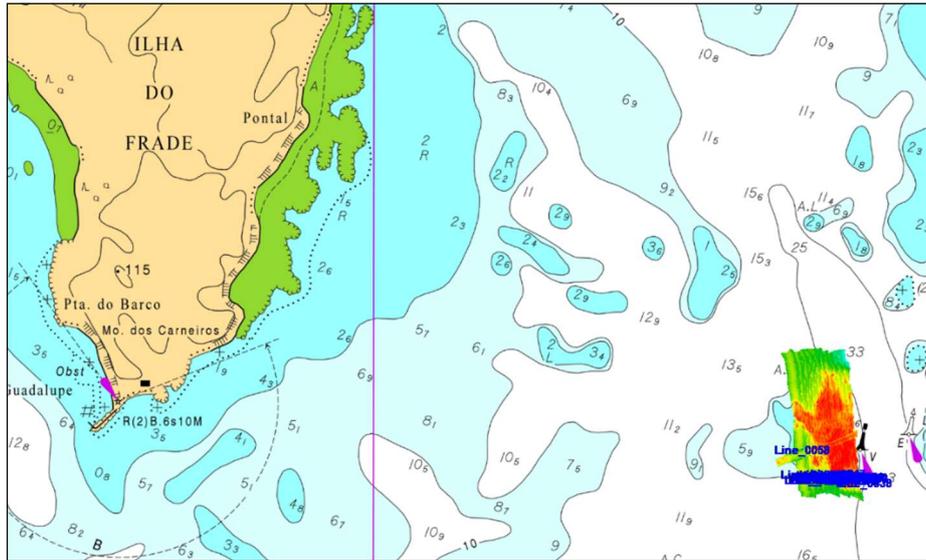


Figura 11 - Sondagem do recife Poste IV

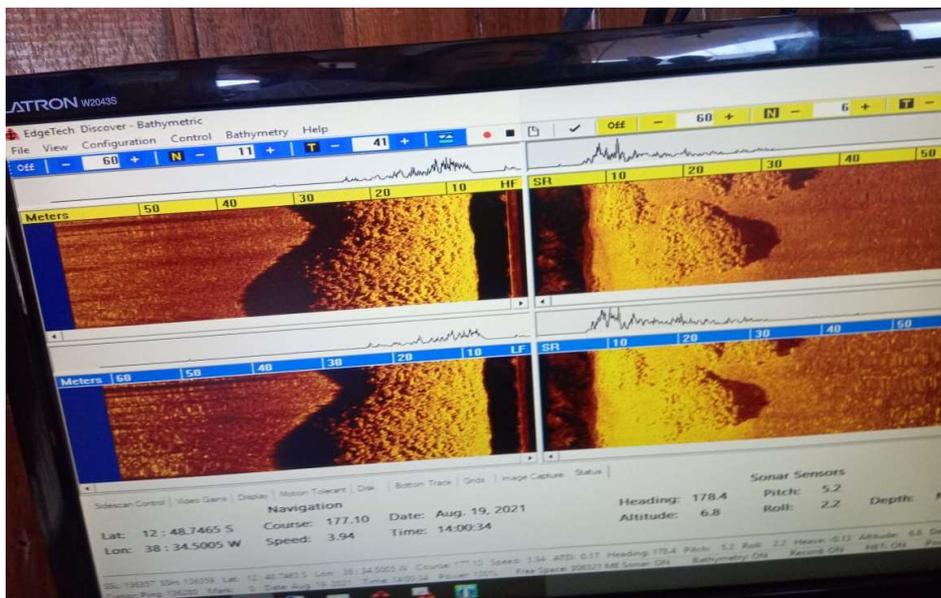


Figura 12 - Tela de registro sonográfico no recife Poste IV



Figura 13 - Lançamento do SVP para medição da velocidade do som na coluna d'água.

DIA 5 (20/08)

No último dia de sondagem, mapeamos as 2 embarcações naufragadas em novembro de 2020, o ferry boat Agenor Gordilho e o rebocador Veja, distantes aproximadamente 500m entre si. Eles estão situados em frente ao corredor da Vitória (Figura 14). Esses dados servirão de base para o projeto de TCC de Marcelo Amberger.

Logo após o término dessa área, realizamos o *Patch Test* final e demos início a desmontagem da embarcação e desmobilização dos equipamentos de volta ao Instituto de Geociências.

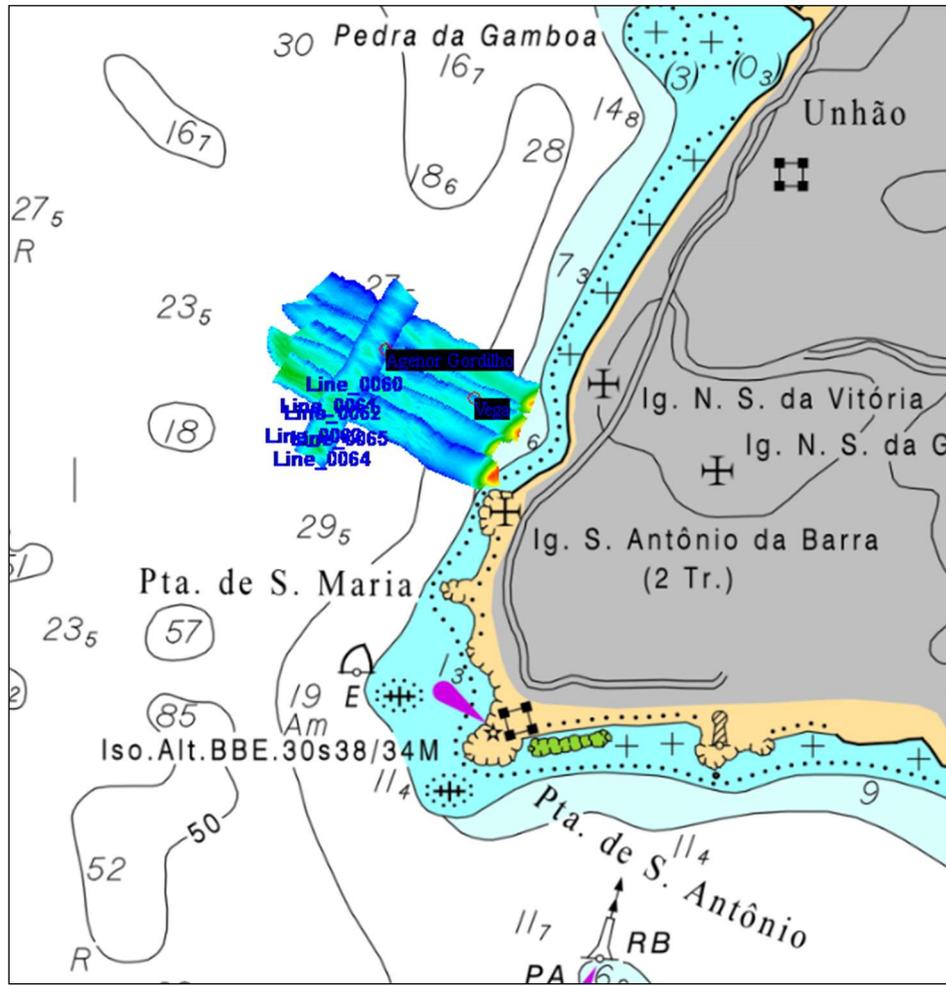


Figura 14 - Sondagem dos naufrágios situados em frente ao Corredor da Vitória