

Identificação de potenciais depósitos de fosforita no Terraço do Rio Grande através do uso de ecocaráteres

Identifying phosphate deposits in the Rio Grande Terrace through the use of echo characters

Maria Eulália Alberton¹ , Arthur Antonio Machado² , Antonio Henrique da Fontoura Klein¹  & Roberto Aguiar Alves³ 

¹Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC), Florianópolis, Brasil.
E-mail: mariaeulalia2002@gmail.com; antonio.klein@ufsc.br

²Universidade Federal da Bahia (UFBA), Laboratório de Oceanografia Operacional (LOOP), Salvador, Brasil.
E-mail: arthur.machado@ufba.br

³Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), Divisão de Geologia Marinha, Rio de Janeiro, Brasil.
E-mail: roberto.alves@sgb.gov.br

Resumo: Este trabalho apresenta categorias de ecocaráteres no Terraço do Rio Grande, Bacia de Pelotas, relacionando-as com a morfologia da área e associando-as com potenciais depósitos de fosforita. Foram utilizados registros sísmicos monocanal aquisitados com frequência entre 400 a 1200 Hz e potência entre 500 e 1200 J para o reconhecimento de ecocaráteres, considerando-se principalmente a forma, tamanho de feições e o padrão subsuperficial, em comparação com registros multicanal com o atributo Amplitude RMS. Medições de feições e hipérboles foram feitas em escalas vertical e horizontal para agrupar as classes. Foram identificadas cinco categorias principais de ecocaráteres. Além disso, uma superfície batimétrica foi interpolada pelo método da krigagem. A espacialização revelou padrões de distribuição. Os ecos hiperbólicos de pequena e média escala (categorias 3A e 3B), com refletor marcado em subsuperfície (3D) e também o eco 4, relacionado aos fundos rugosos, apresentam maior relação com os depósitos de fosforita, evidenciando tendências esperadas. Ademais, quanto maior a escala horizontal das hipérboles, maiores são as rugosidades na superfície batimétrica e sua tendência à concentração. Os fundos rugosos e os ecos hiperbólicos de menor escala correlacionam-se aos potenciais depósitos de fosforita.

Palavras-chave: Fosforita; Ecocaráteres; Depósitos fosfáticos; Sísmica; Modelo Batimétrico.

Abstract: This work presents categories of echo-facies in the Rio Grande Terrace, Pelotas Basin, relating them to the area's morphology and potential phosphorite deposits. Single-channel seismic records acquired with frequencies between 400 and 1200 Hz and power between 500 and 1200 J were used to identify echo-facies, focusing on their shape, size, and subsurface patterns, compared with multichannel records using the RMS Amplitude attribute. Measurements of features and hyperbolas were taken on vertical and horizontal scales to group echo classes. Five main echo-facies categories were defined. Moreover, a bathymetric surface was interpolated through kriging. The spatial analysis revealed distribution patterns. Small and medium-scale hyperbolic echoes (categories 3A and 3B) and rugged bottoms correlate strongly with phosphorite deposits. Moreover, larger horizontal scales of hyperbolas indicate increased roughness on the bathymetric surface and a tendency toward concentration. Rugged bottoms and small-scale hyperbolic echoes correlate with potential phosphorite deposits.

Keywords: Phosphorite; Echo-Facies; Phosphatic Deposits; Seismic; Bathymetric Model.

1. Introdução

As fosforitas são minerais autigênicos (formados *in-situ* durante a diagênese de rochas) ricos em fosfato (PO_4^{3-}) relacionados a elevados níveis de matéria orgânica nos sedimentos de fundo (Riggs & Sheldon, 1990), caracterizando-se como um dos principais recursos não metálicos encontrados no fundo submarino (Silva & Mello, 2004). Na região oceânica brasileira, estes foram previamente identificados e descritos nas décadas de 1970 e 1980 pelo Projeto de Reconhecimento Global da Margem Continental Brasileira (REMAC) e posteriormente por Klein *et al.* (1992) e Abreu *et al.* (2014).

Segundo estudos de Barron & Frakes (1990), em margens continentais oestes, três fatores podem favorecer os processos de fosfogênese; clima quente e úmido, que promove um aumento do intemperismo continental e consequente fornecimento de fósforo a partir dos continentes; elevação do nível do mar, que resultará em trapeamento de sedimentos em regiões estuarinas, reduzindo a sedimentação de plataforma nos sítios de deposição de fósforo e latitudes baixas em oceanos abertos, onde processos de ressurgência são favorecidos.

As fosforitas são encontradas em ambientes oceânicos modernos sobre as margens continentais, talude superior e em porções elevadas do fundo oceânico (Burnett, 1977), na forma de cascalhos, nódulos e crostas de espessura variada (Pinho *et al.*, 2011), que podem resultar em fundos rugosos identificáveis em registros sísmicos e consequentemente, através de ecocaráteres, os quais são o resultado da interação do sinal sísmico com os sedimentos e morfologia de fundo, refletindo os processos sedimentares de deposição/erosão ativos na região (Ayres Neto *et al.*, 2009).

Assim, o presente trabalho objetiva reconhecer potenciais depósitos de fosforita através da identificação de categorias de ecocaráteres em combinação com a batimetria do Terraço do Rio Grande, no talude continental ao largo dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul.

2. Área de Estudo

O Terraço do Rio Grande é uma feição fisiográfica com aproximadamente 5.000 km², plano-horizantalizada, interposta entre a quebra da plataforma e o talude inferior (Zembruski, 1979) desenvolvida sobre um alto de embasamento pré-Aptiano (Mahiques *et al.*, 2019), localizado ao largo dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na Bacia de Pelotas (Fig. 1). Segundo Zembruski (1979), nesta área o relevo é irregular, rugoso e sulcado por canais de vários calibres, abertos e preenchidos. Apresenta uma morfologia moderna complexa, resultante da ação erosiva da Corrente do Brasil, e seus sedimentos superficiais atuais mostram uma alta complexidade em termos de origem e tamanho dos grãos (Mahiques *et al.*, 2019).

Estudos a níveis mundiais de Riggs & Sheldon (1990) sugerem que o processo de fosfogênese do Terraço do Rio Grande esteja relacionado ao final do Episódio III ou início do Episódio II de fosfogênese, ocorrido possivelmente no Pleistoceno superior, Plioceno e Mioceno Superior e que o processo de deposição está relacionado à ressurgência, ligados a correntes de borda oeste, os quais não incluem somente processos clássicos, resultantes dos ventos, mas também a mecanismos associados às variações batimétricas características da região.

Datações de amostras adquiridas no Projeto Talude (Klein *et al.*, 1992), da Universidade Federal do Rio Grande (FURG) foram previamente realizadas em 1992 pelo professor Willian C. Burnett, do Departamento de Oceanografia da Florida State University, utilizando alfa-espectrometria. Uma das amostras (nº 222) apresentou teor de urânio em torno de 90 ppm, característico de depósitos de fosfato, cujo resultado revelou equilíbrio secular entre ²³⁰Th e ²³⁴U, indicando que a idade da amostra é superior ao limite de 250.000 anos para datação por esta técnica.

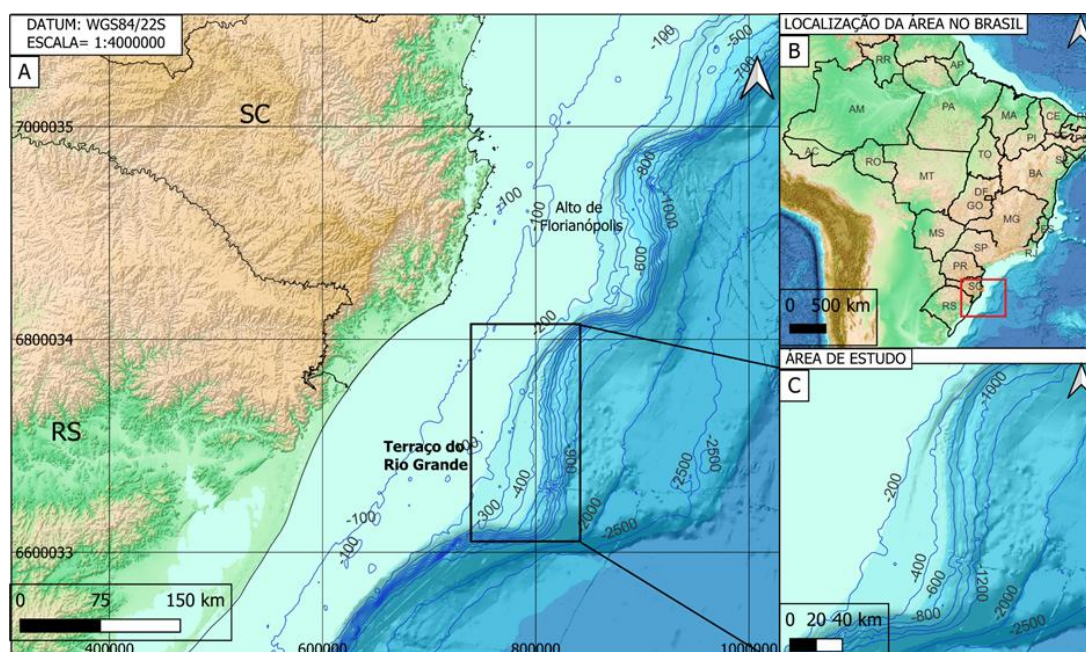


Figura 1. Localização da área de estudo ao largo dos estados de Santa Catarina (SC) e Rio Grande do Sul (RS) (A), localização da área e estudo no Brasil (B) e detalhe na área de estudo (C) (Base de Dados: GEBCO, SGB/CPRM).

Figure 1. Study area localization on the banks of Santa Catarina (SC) and Rio Grande do Sul (RS) states (A), localization of the area and study in Brazil (B), and detail on the study area (C) (Database: GEBCO, SGB/CPRM).

3. Materiais e Métodos

A Figura 2 apresenta o fluxograma da metodologia utilizada para o desenvolvimento do trabalho.

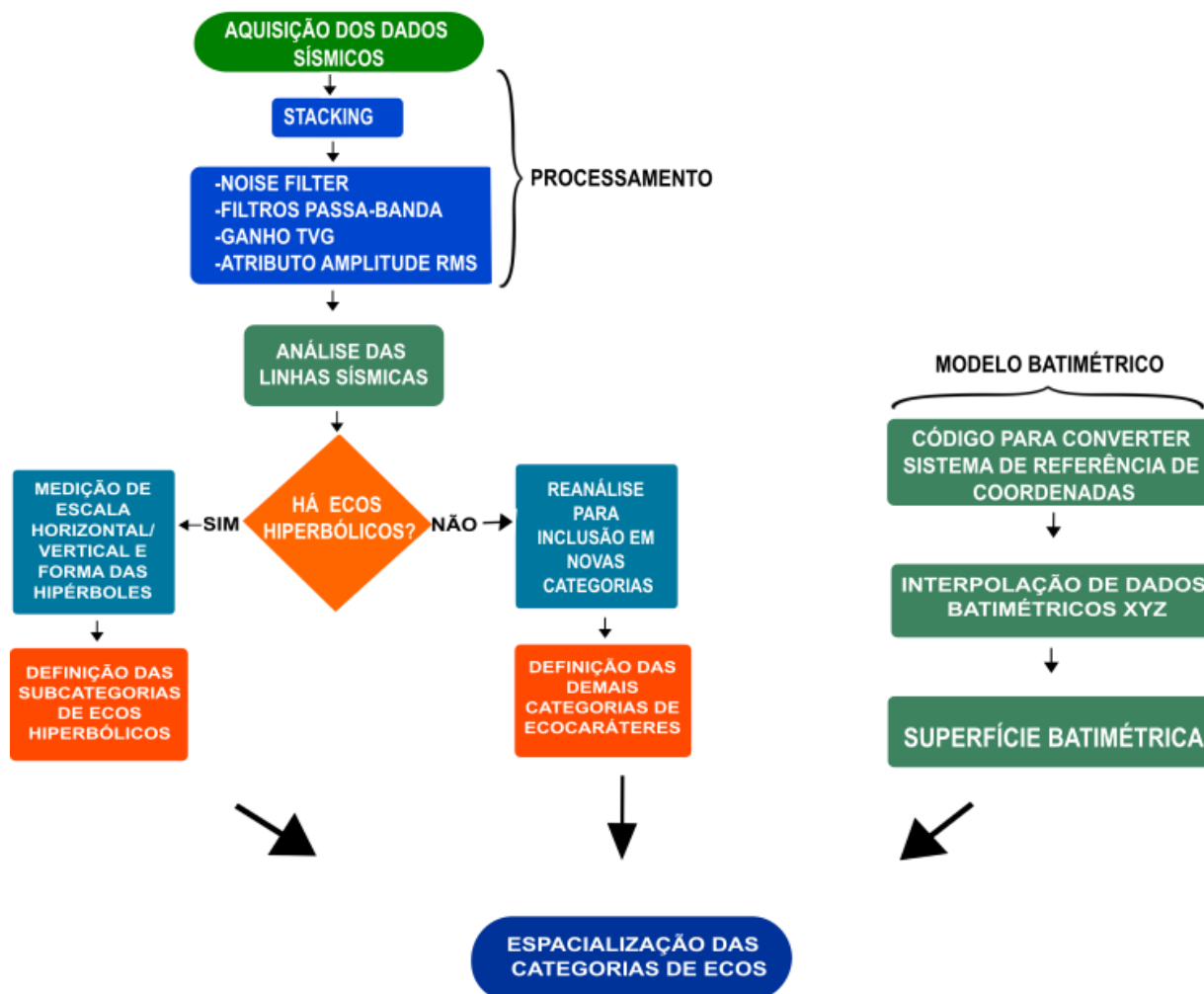


Figura 2. Fluxograma simplificado da metodologia utilizada.

Figure 2. Simplified flowchart of the methodology used.

3.1. Dados sísmicos

Os dados sísmicos monocal canal utilizados neste trabalho foram adquiridos pelo Projeto Fosforita do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), com o pool de Geofísica Marinha do Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC/UFSC), através do sistema acústico Sparker via software MDCS®, da Meridata Finland Ltd., com frequência de aquisição entre 400 a 1200 Hz e potência entre 500 e 1200 J via cabo (*streamer*) com 32 hidrofones para aumentar a relação sinal-ruído, com velocidade do som definida para 1.500 m/s. Os arquivos foram empilhados (*stacking*), envelopados e receberam filtros passa-banda de frequência, como o filtro passa-alta (*High Pass Frequency* (HPF)) e filtro passa-baixa (*Low Pass Frequency* (LPF)) para melhorar a sua visualização (Tab. 1). A Figura 3A apresenta a localização dos transectos, que totalizaram 27 linhas e 1.840 km de extensão.

Tabela 1. Parâmetros de processamento aplicados nos dados monocal. *Table 1. Processing parameters applied to single-channel data.*

Filtro	Parâmetros
Passa-Alta (HPF)	100 Hz
Passa-Baixa (LPF)	400 Hz
Ganho TVG	-27 dB

Foram analisados dados sísmicos multicanal fornecidos pela Agência Nacional de Petróleo e Gás Natural (ANP). As linhas 319, 322, 323, 324 e 325 (Fig. 3B) pertencentes ao levantamento 0228 realizado na Bacia de Pelotas receberam a aplicação do atributo Amplitude RMS (Meneses, 2010) via software OpendTect® 7.0 versão livre. A amplitude pode ser usada como um discriminador efetivo para contrastes de impedância, ou seja, para a refletividade de camadas e mudanças de litologia (Meneses, 2010).

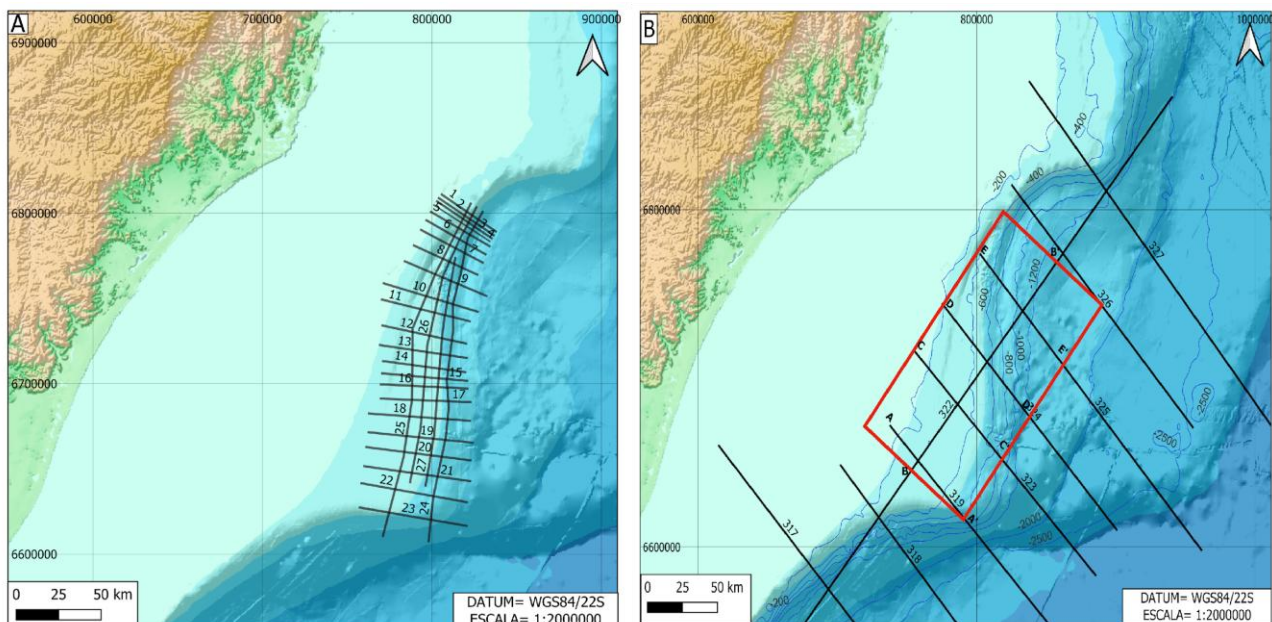


Figura 3. Localização dos transectos monocal (A) e da área das linhas multicanal considerada na análise de atributos (B).

Figure 3. Localization of the single-channel transects (A) and the area of the multichannel lines considered in the attribute analysis (B).

3.2. Ecocaracterização

O reconhecimento de ecocaráteres na região do estudo considerou a forma e tamanho de feições, refletividade de camadas e padrão de acamamento, de acordo com Damuth *et al.* (1975) e Ayres Neto *et al.* (2009). Após um reconhecimento inicial, foram realizadas medições das principais feições e hipérboles de difração encontradas nas seções sísmicas monocal, em escala vertical e horizontal, utilizando a ferramenta *measure* presente no MDPS® para o agrupamento das classes de ecos e especialmente, definição das subcategorias de ecos classificados como hiperbólicos. A classificação foi complementada pela comparação com os registros multicanal pós-processados.

3.3. Superfície Batimétrica

Dados de batimetria xyz do Terraço do Rio Grande, fornecidos pelo Projeto Fosforita do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), foram interpolados e utilizados para a geração de uma superfície batimétrica 3D no software Surfer® versão 11.0. Foram realizados testes de tamanho de célula de grade para interpolar os dados xyz e também de métodos de interpolação mais adequados. Considerou-se o grid (grade) de 100 x 100 m e o método da krigagem simples, uma técnica de regressão linear em que um valor não amostrado é estimado através de valores com localização próxima (Davis, 2002).

3.4. Espacialização

Após a ecocaracterização, cada categoria de ecocaráter foi exportada via software MDPS em formato *shapefile* e espacializada com cores diferentes no software QGIS. Além disso, um *shapefile* com ecocaráteres em geometria polígono foi criado sob as áreas de concentração de categorias de ecos e sobreposto à superfície batimétrica no Surfer® 11.0 para correlação entre ecocaráteres e morfologia de fundo.

3.5. Dados Secundários

Para validação da ecocaracterização, a localização dos ecocaráteres foi sobreposta ao Mapa de Classificação Supervisionada do Substrato Marinho no Terraço do Rio Grande (Lisniewski *et al.*, 2022), disponibilizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), processado na ferramenta RSOBIA, ou Análise de Imagem Orientada a Objeto por Sensoriamento Remoto (*Remote Sensing Object Based Image Analysis*) no software ArcGIS® 10. Além disso, a localização de fotografias de amostragens realizadas na campanha de aquisição foi relacionada com a espacialização dos ecocaráteres.

4. Resultados e Discussões

4.1. Ecocaracterização

Foram determinadas cinco diferentes categorias principais de classificação de ecocaráteres (Fig. 4), bem como quatro subcategorias para os ecos classificados como hiperbólicos, segundo resultados prévios modificados de Alberton *et al.* (2024). Os quadros 1, 2, 3, 4 e 5 ilustram as principais características de cada ecocaráter.

As regiões de onde foram retiradas as seções representativas para cada categoria se localizam na Figura 5 e cada seção sísmica nos quadros 1, 2, 3, 4 e 5 está indicada pelo número da linha correspondente e cor da categoria.

A Categoria 1 (Quadro 1) refere-se aos ecos sem rugosidades de fundo, principalmente relacionados a processos deposicionais de baixa energia, com acamamento plano-paralelo de sedimentos, que alternam entre sedimentos de granulometria maior (camadas escuras, de maior coeficiente de reflexão) e menor (camadas claras, de menor coeficiente de reflexão).

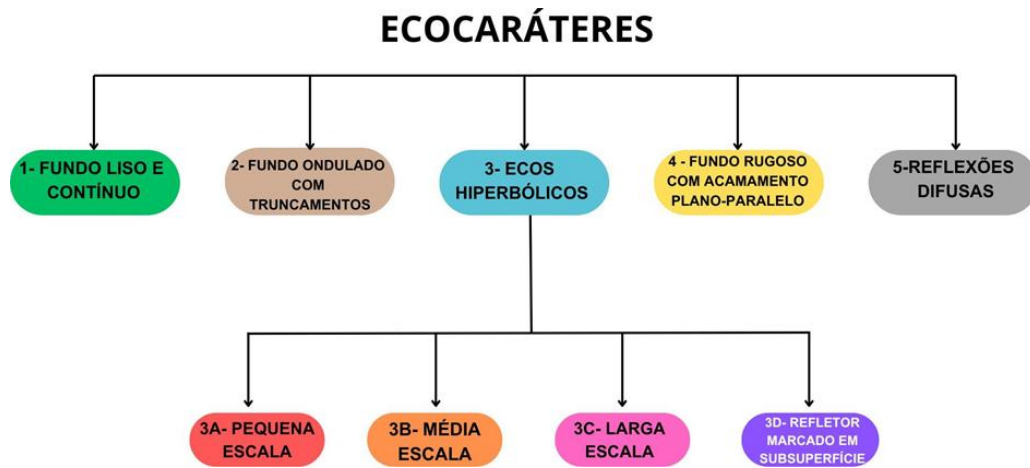


Figura 4. Categorias de ecocaráteres.

Figure 4. Echo character categories.

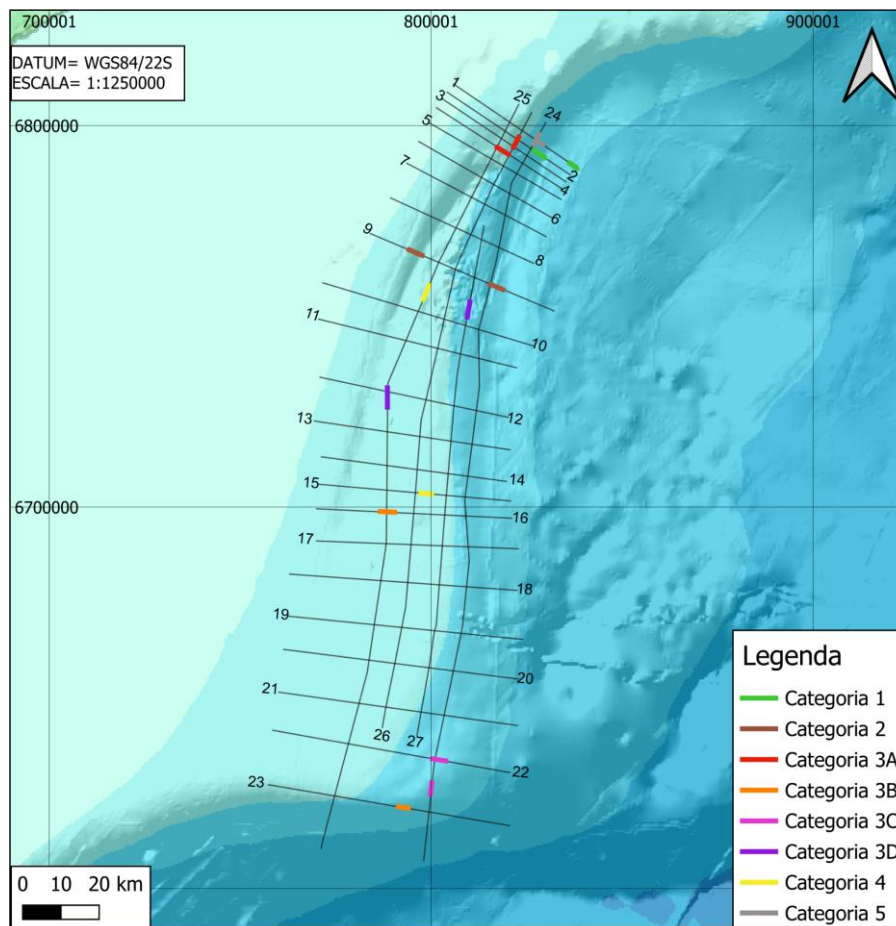
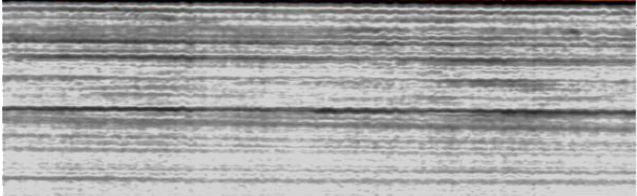
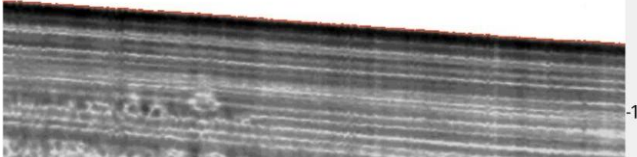


Figura 5. Regiões dos transectos onde foram retiradas as imagens representativas das categorias de ecos. (Categoria 1: Fundo liso e contínuo/Categoria 2: Fundo ondulado com truncamentos/Categoria 3A: Ecos hiperbólicos de pequena escala/Categoria 3B: Ecos hiperbólicos de média escala/Categoria 3C: Ecos hiperbólicos de larga escala/Categoria 3D: Ecos hiperbólicos com refletor marcado em subsuperfície/Categoria 4: Fundo rugoso com acamamento plano-paralelo/Categoria 5: Reflexões difusas).

Figure 5. Regions of the transects where images representing the echo categories were taken. (Category 1: Smooth and continuous bottom/Category 2: Wavy bottom with truncations/Category 3A: Small scale hyperbolic echoes/Category 3B: Medium scale hyperbolic echoes/Category 3C: Large scale hyperbolic echoes/Category 3D: Hyperbolic echoes with subsurface marked reflector/Category 4: Rough bottom with parallel bedding/Category 5: Fuzzy reflections).

Quadro 1. Categoria 1- Fundo liso e contínuo.

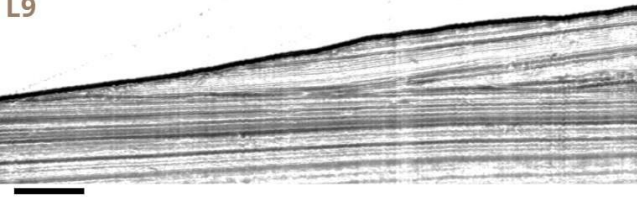
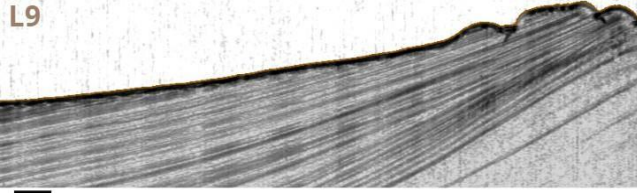
Frame 1. Category 1- Smooth and continuous bottom.

ECOCARÁTER	DESCRIÇÃO	SEÇÕES SÍSMICAS REPRESENTATIVAS
1. Fundo liso e contínuo	Seções sísmicas sem rugosidade de fundo e refletores plano-paralelos em subsuperfície.	L2  L1 

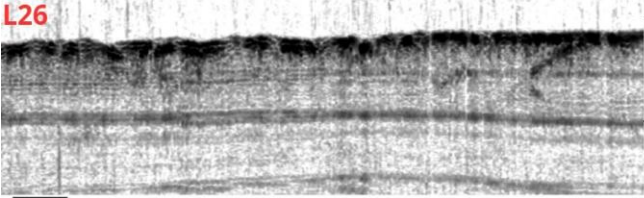
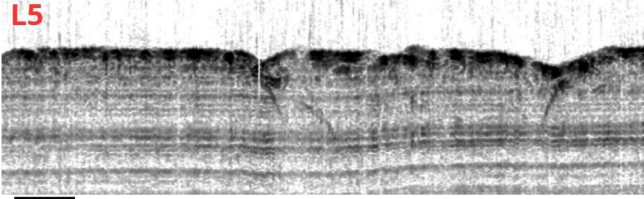
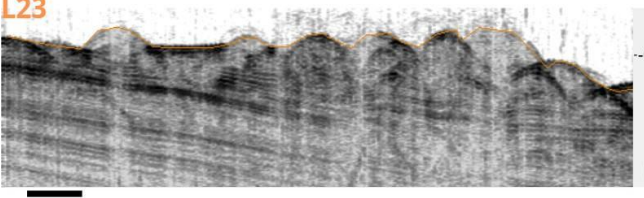
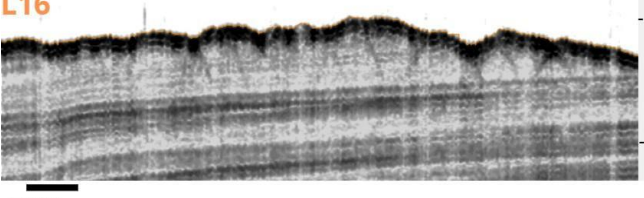
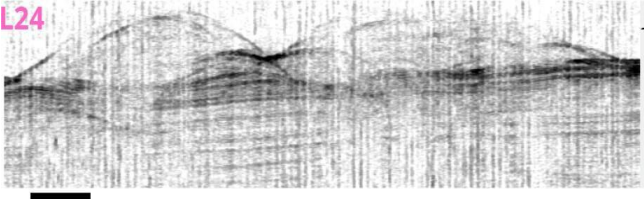
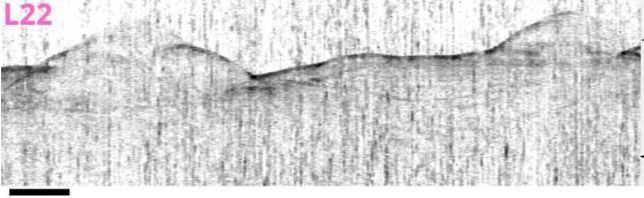
A Categoria 2 (Quadro 2) agrupa seções com terminações de refletores em truncamento erosivo e truncamento aparente (Posamentier & Vail, 1988).

Quadro 2. Categoria 2- Fundo ondulado com truncamentos.

Frame 2. Category 2- Wavy bottom with truncations.

ECOCARÁTER	DESCRIÇÃO	SEÇÕES SÍSMICAS REPRESENTATIVAS
2. Fundo ondulado com truncamentos	Seções sísmicas com morfologia de fundo ondulada a rugosa e com refletores truncados em subsuperfície.	L9  L9 

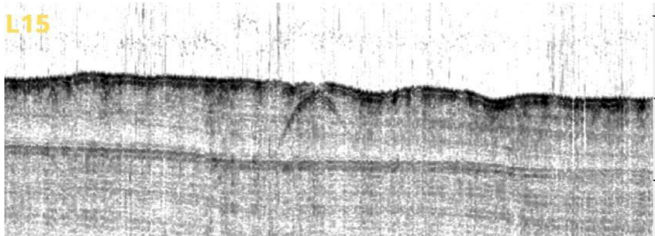
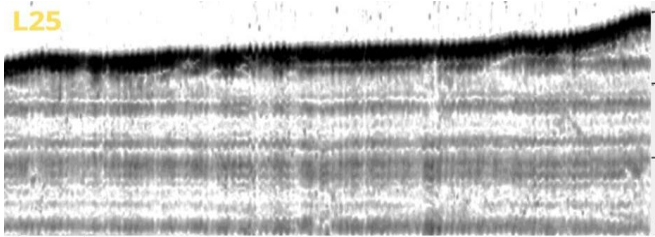
Quadro 3. Categoria 3- Ecos hiperbólicos.
Frame 3. Category 3- Hyperbolic echoes.

ECOCARÁTER	DESCRIÇÃO	SEÇÕES SÍSMICAS REPRESENTATIVAS
3A. Ecos hiperbólicos de pequena escala	Reúne as seções com hipérboles com escala horizontal inferior a 200 m comprimento.	L26  200 m L5  200 m
3B. Ecos Hiperbólicos de média escala	Reúne as seções com hipérboles com escala horizontal entre 200 e 400 m de comprimento.	L23  200 m L16  200 m
3C. Ecos hiperbólicos de larga escala	Refere-se às seções de hipérboles com escala horizontal igual ou superior a 400 m.	L24  200 m L22  200 m

Os ecos classificados como hiperbólicos (Quadro 3) reúnem as seções sísmicas com a presença de formas hiperbólicas causadas pela difração da onda sonora. A categoria subdivide-se em quatro subcategorias considerando principalmente medidas de escala horizontal das hipérboles. Encontraram-se hipérboles com escala horizontal variando entre 51 m de comprimento a 872 m e escala vertical variando entre 2 e 90 m. A altura das hipérboles não foi determinante para a classificação, porém tende a ser proporcional a escala horizontal.

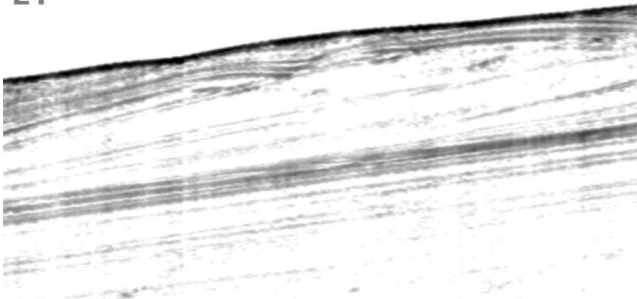
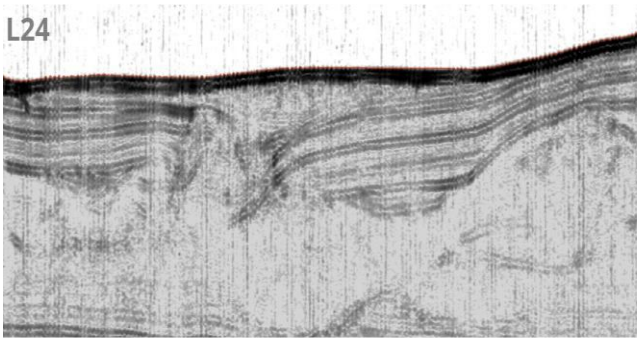
A Categoria 4 (Quadro 4) refere-se às seções com morfologia rugosa e acamamento plano-paralelo, indicando possível retrabalhamento da superfície após a deposição de sedimentos.

Quadro 4. Categoria 4- Fundo rugoso com acamamento plano-paralelo.
Frame 4. Category 4- Rough bottom with parallel bedding.

ECOCARÁTER	DESCRIÇÃO	SEÇÕES SÍSMICAS REPRESENTATIVAS
4. Fundo Rugoso com acamamento plano-paralelo	Seções sísmicas com ondulações e rugosidades na morfologia de fundo e acamamento plano-paralelo em subsuperfície.	L15  200 m L25  200 m

A Categoria 5 (Quadro 5) agrupa refletores classificados como difusos, que podem estar relacionados a depósitos de fluxo gravitacional, feições de escape de gases e canais.

Quadro 5. Categoria 5- Reflexões difusas.
Frame 5. Category 5- Fuzzy reflections.

ECOCARÁTER	DESCRIÇÃO	SEÇÕES SÍSMICAS REPRESENTATIVAS
5. Reflexões difusas	Refletores classificados como difusos, cujos ecocaráteres não puderam ser incluídos nas demais categorias.	L1  200 m L24  200 m

4.1.1. Ecos relacionados à fosforita

As categorias 4 (Fundo rugoso com acamamento plano-paralelo) e 3 (Ecos Hiperbólicos), especialmente os de pequena e média escala (3A e 3B) e com refletor marcado em subsuperfície (3D), tendem a se relacionar com os potenciais depósitos de fosforita, devido a sua forma e tamanho que correspondem às concreções fosfáticas e também à elevada refletividade no retroespalhamento acústico e consequentemente, elevado contraste de impedância acústica com a coluna d'água (coloração mais escura na interface água-sedimento), o que dificulta a penetração do sinal acústico para as interfaces inferiores (Cooke *et al.*, 2007). As profundidades médias para a concentração de fosforita variam entre 300 e 700 m.

4.2. Atributos sísmicos

A Figura 6 mostra as seções sísmicas multicanal, na extensão onde atravessam a área de estudo, antes e após a aplicação do atributo Amplitude RMS (para localização das linhas ver Fig. 3B). Percebe-se que principalmente nas seções 322, 323, 324 e 325 há valores de amplitude RMS elevados próximo à superfície, evidenciados pelo alto contraste no primeiro refletor (coloração escura), o que aliado à rugosidade do terreno e

às profundidades compatíveis com as encontradas na ecocaracterização (retângulos brancos) (item 4.1.1), pode estar relacionado às potenciais concreções fosfáticas. Os marcadores coloridos indicam pontos onde os registros multicanal se correlacionam com as seções monocal (quando texto em vermelho, especificamente às seções representativas dos quadros do item 4.1), confirmando a elevada Amplitude RMS relacionada às categorias 3A, 3B, 3D e 4, indicadas como associadas aos depósitos fosfáticos.

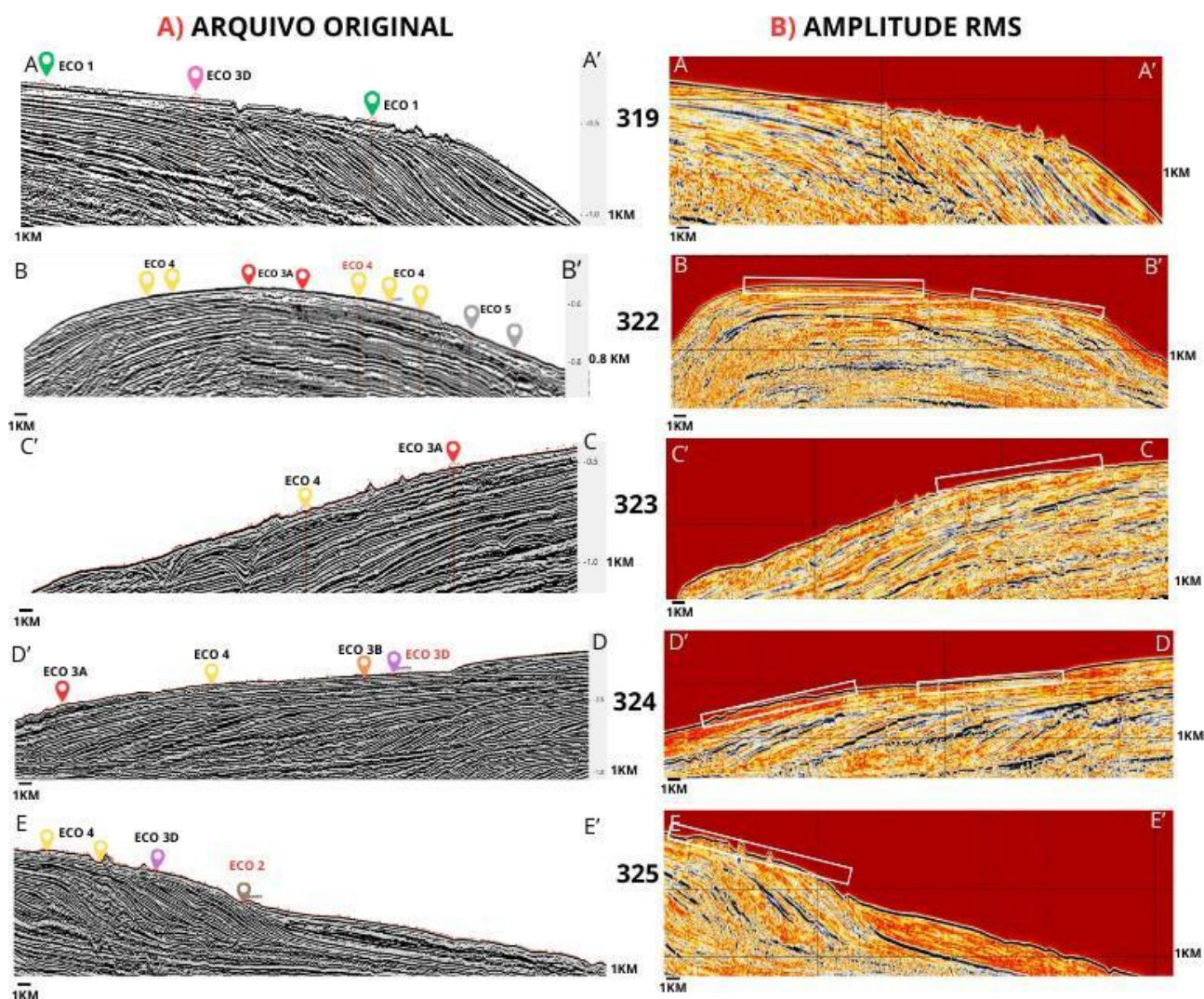


Figura 6. Seções 319, 322, 323, 324 e 325 antes (A) e após a aplicação do atributo (B) (Localização na Fig. 3B).

Figure 6. Sections 319, 322, 323, 324, and 325 before (A) and after applying the attribute (B) (Positions in Fig. 3B.).

4.3. Superfície Batimétrica

A Figura 7 ilustra o resultado da superfície batimétrica, rotacionada para possibilitar diferentes visualizações. Apesar da extrapolação dos dados na interpolação, percebe-se que as profundidades variam de 200 a 1.200 m e o relevo varia de plano a rugoso com canais sulcados conforme abordado no item 2.

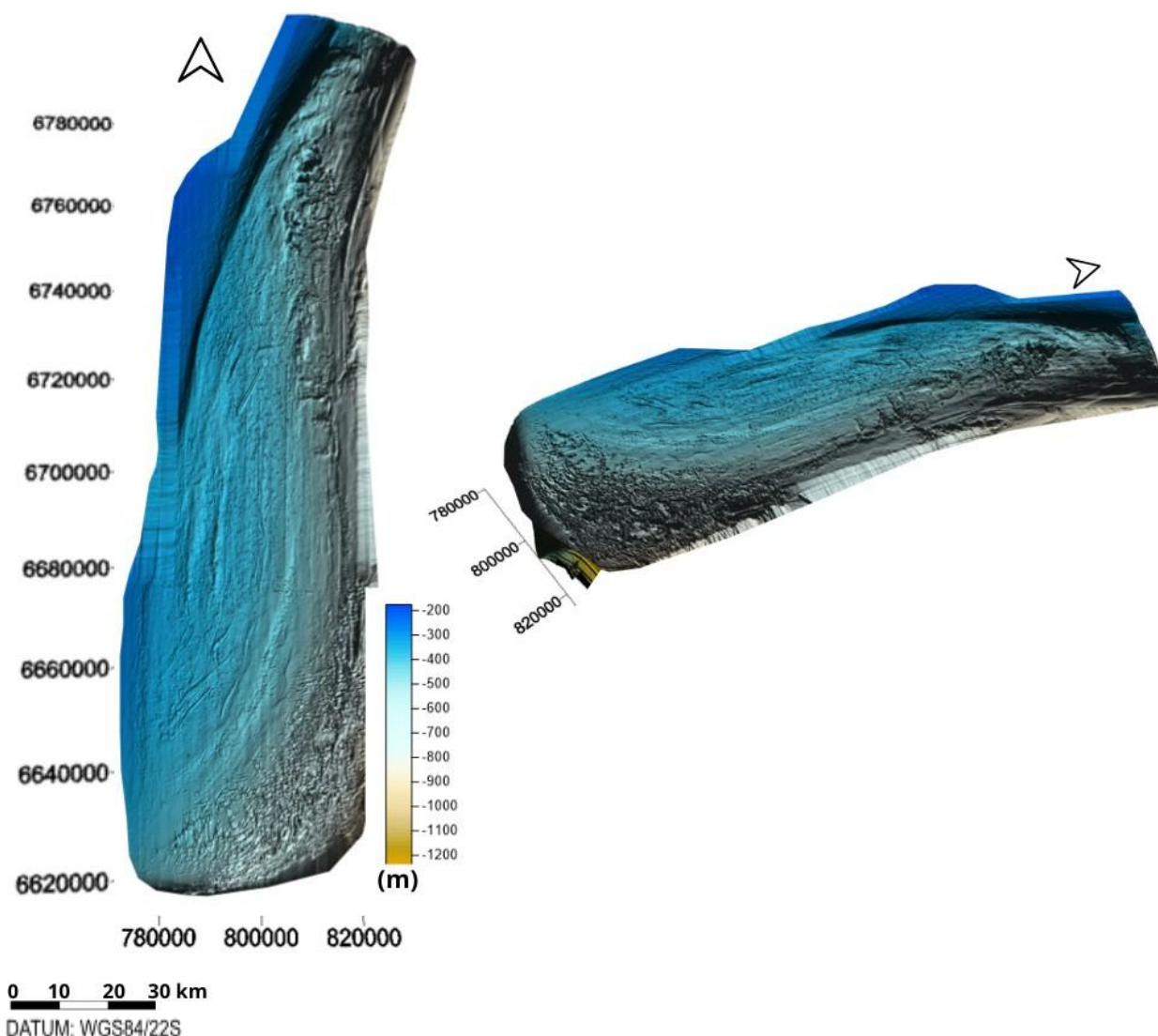


Figura 7. Superfície Batimétrica do Terraço do Rio Grande com célula de 100 x 100 m.

Figure 7. Bathymetric surface of the Rio Grande Terrace with a 100 x 100 m cell.

4.4. Espacialização

A Figura 8 demonstra o resultado da espacialização de ecocaráteres bem como a localização das áreas de onde foram retiradas as seções representativas das categorias e subcategorias de ecos do item 3.1 (áreas indicadas pelo número de cada categoria em quadrados brancos). Além disso, as regiões indicadas por A1, A2 e A3 são representativas de locais com amostragens realizadas pela SGB/CPRM, compatíveis com as regiões de maior probabilidade de encontrar as fosforitas, cujas fotografias estão presentes na Figura 9.

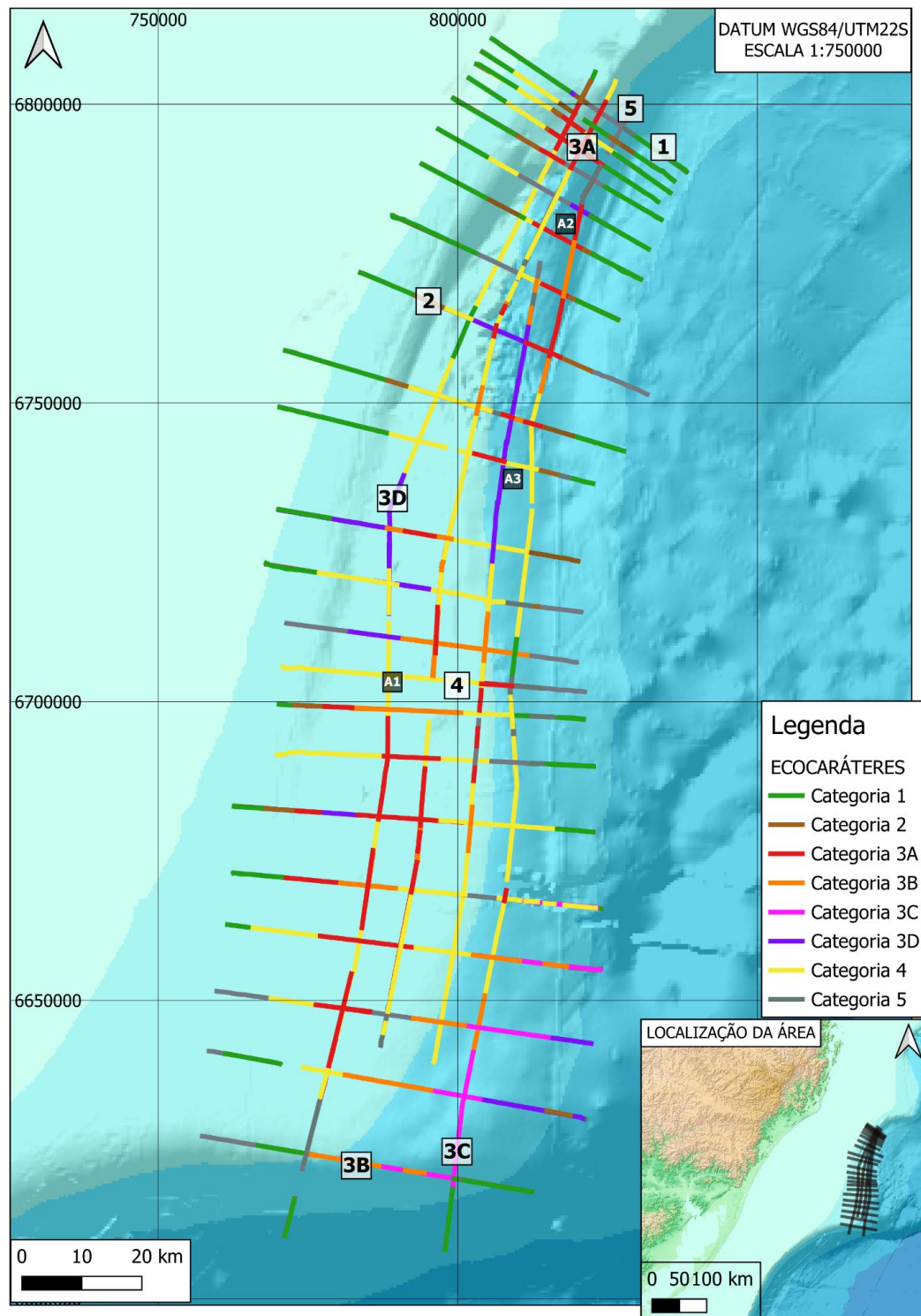


Figura 8. Mapa de espacialização de ecocaráteres (Categoria 1: Fundo liso e contínuo/ Categoria 2: Fundo ondulado com truncamentos/ Categoria 3A: Ecos hiperbólicos de pequena escala/ Categoria 3B: Ecos hiperbólicos de média escala/ Categoria 3C: Ecos hiperbólicos de larga escala/ Categoria 3D: Ecos hiperbólicos com refletor marcado em subsuperfície/ Categoria 4: Fundo rugoso com acamamentoparalelo/ Categoria 5: Reflexões difusas). (Base de dados: GEBCO, SGB/CPRM).

Figure 8. Ecocharacter spatialization map (Category 1: Smooth and continuous bottom/Category 2: Wavy bottom with truncations/Category 3A: Small scale hyperbolic echoes/Category 3B: Medium scale hyperbolic echoes/Category 3C: Large scale hyperbolic echoes/Category 3D: Hyperbolic echoes with subsurface marked reflector/Category 4: Rough bottom with parallel bedding/Category 5: Fuzzy reflections). (Database: GEBCO, SGB/CPRM).

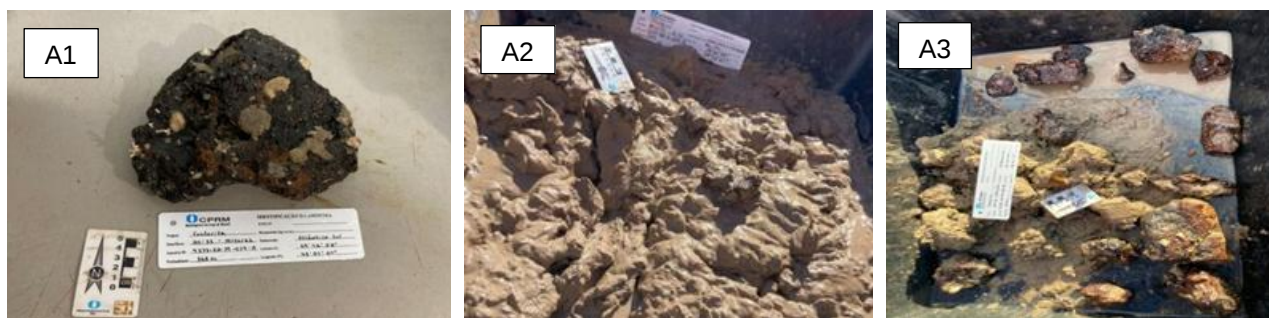


Figura 9. Amostras A1 (Concreção), A2 (Concreções cobertas por lama) e A3 (Concreções), respectivamente (Arthur Antonio Machado, 2022).

Figure 9. Samples A1(concretion), A2 (concretion covered by mud) and A3 (concrections), respectively (Arthur Antonio Machado, 2022).

Foi possível observar a concentração de certas categorias e subcategorias de ecocarateres em determinadas áreas através da espacialização. Por exemplo, os ecos classificados como fundo liso e contínuo (Categoria 1) tendem a se concentrar nas bordas da região de estudo, em profundidades que variam de 200 a 300 m, e também em profundidades de 700 a 900 m, direcionadas ao norte da área de estudo. Adicionalmente, os ecos hiperbólicos de larga escala (Categoria 3C) se agrupam na porção final ao sul da área de estudo, em profundidades que variam de 800 a 1.000 m correspondentes ao talude inferior, o que indica que podem estar relacionadas a depósitos de movimentos de massa e ao relevo acidentado da região. Também percebe-se que os fundos rugosos (Categoria 4) e ecos hiperbólicos de menor escala (Categorias 3A e 3B) se localizam na região central do Terraço do Rio Grande, em profundidades que variam de 300 a 700 m (item 4.1.1).

A sobreposição da ecocaracterização ao Mapa de Classificação Supervisionada do Substrato Marinho no Terraço do Rio Grande (Lisniewski *et al.*, 2022) revelou que as áreas onde foram encontradas concreções fosfáticas maiores correspondem justamente às categorias 4 (amarelo), 3A (vermelho), 3B (laranja) e 3D (roxo), apontadas anteriormente no item 4.1.1 como relacionadas às fosforitas (Fig. 10).

A Figura 11 evidencia os resultados da espacialização das categorias de ecos na superfície batimétrica. Percebe-se que a região classificada como fundo liso e contínuo não apresenta rugosidades na superfície batimétrica. Além disso, as regiões classificadas como truncamentos se localizam em locais onde há um declive maior no modelo de terreno, tanto no início quanto no final da quebra do talude. As hipérboles de larga escala correspondem à região onde há uma maior concentração de rugosidades e as de média em regiões de transição dessas áreas para outras onde as rugosidades não são tão evidentes. Adicionalmente, na região apontada como ecos hiperbólicos de pequena escala se pode observar pequenas rugosidades pouco evidentes na escala da área total do terraço. Todavia, nota-se que a morfologia do terreno em geral não possui relação direta com o tamanho das rugosidades na região em amarelo indicada pelo fundo rugoso com acamamento plano-paralelo, pois a ondulação varia.

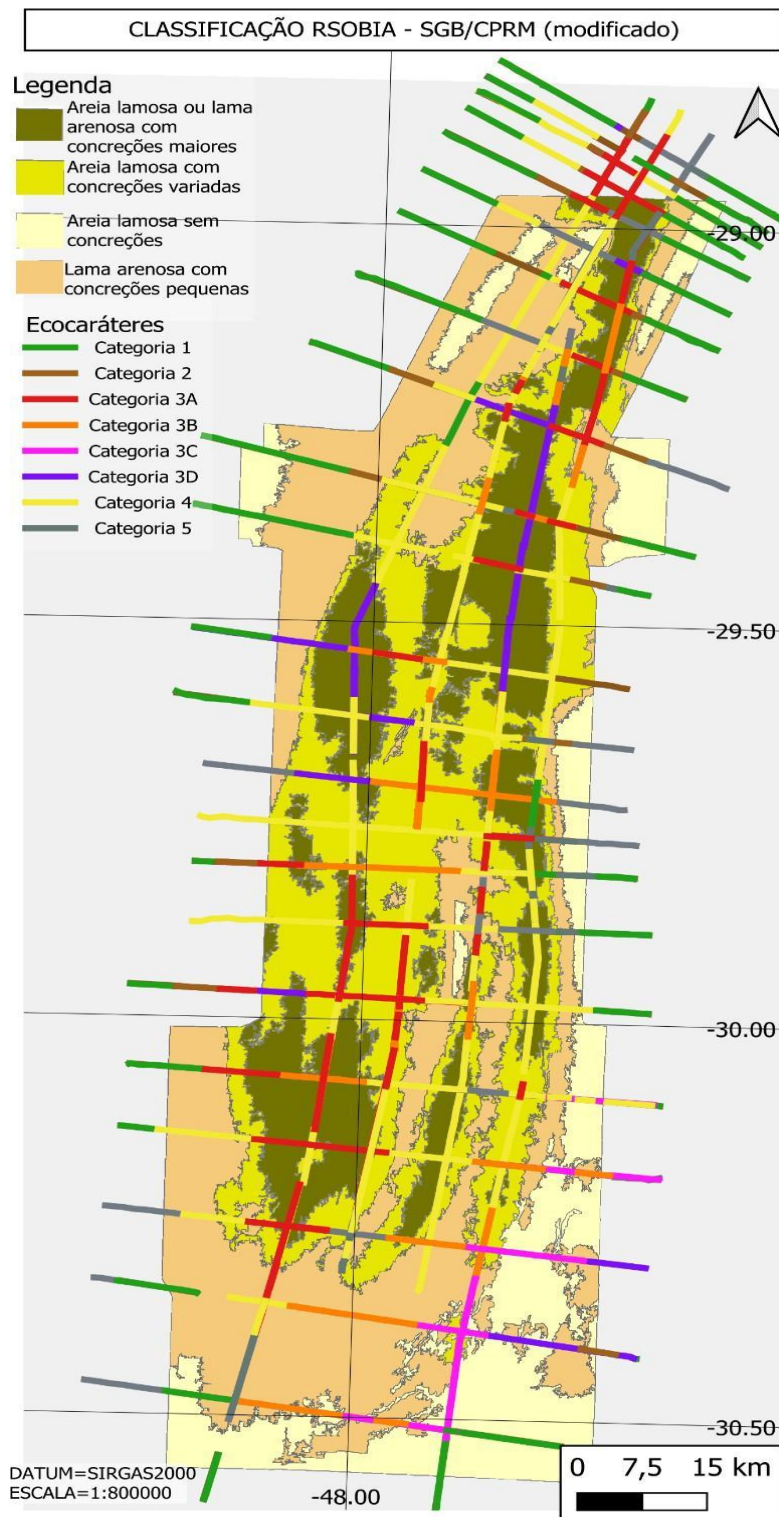


Figura 10. Mapa RSOBIA de classificação do substrato no Terraço do Rio Grande (Modificado de Lisniewski *et al.*, 2022). (Categoria 1: Fundo liso e contínuo/ Categoria 2: Fundo ondulado com truncamentos/ Categoria 3A: Ecos hiperbólicos de pequena escala/ Categoria 3B: Ecos hiperbólicos de média escala/ Categoria 3C: Ecos hiperbólicos de larga escala/ Categoria 3D: Ecos hiperbólicos com refletor marcado em subsuperfície/ Categoria 4: Fundo rugoso com acamamento plano-paralelo/ Categoria 5: Reflexões difusas).

*Figure 10. RSOBIA map of substrate classification in the Rio Grande Terrace (Modified from Lisniewski *et al.*, 2022). (Category 1: Smooth and continuous bottom/Category 2: Wavy bottom with truncations/Category 3A: Small scale hyperbolic echoes/Category 3B: Medium scale hyperbolic echoes/Category 3C: Large scale hyperbolic echoes/Category 3D: Hyperbolic echoes with subsurface marked reflector/Category 4: Rough bottom with parallel bedding/Category 5: Fuzzy reflections).*

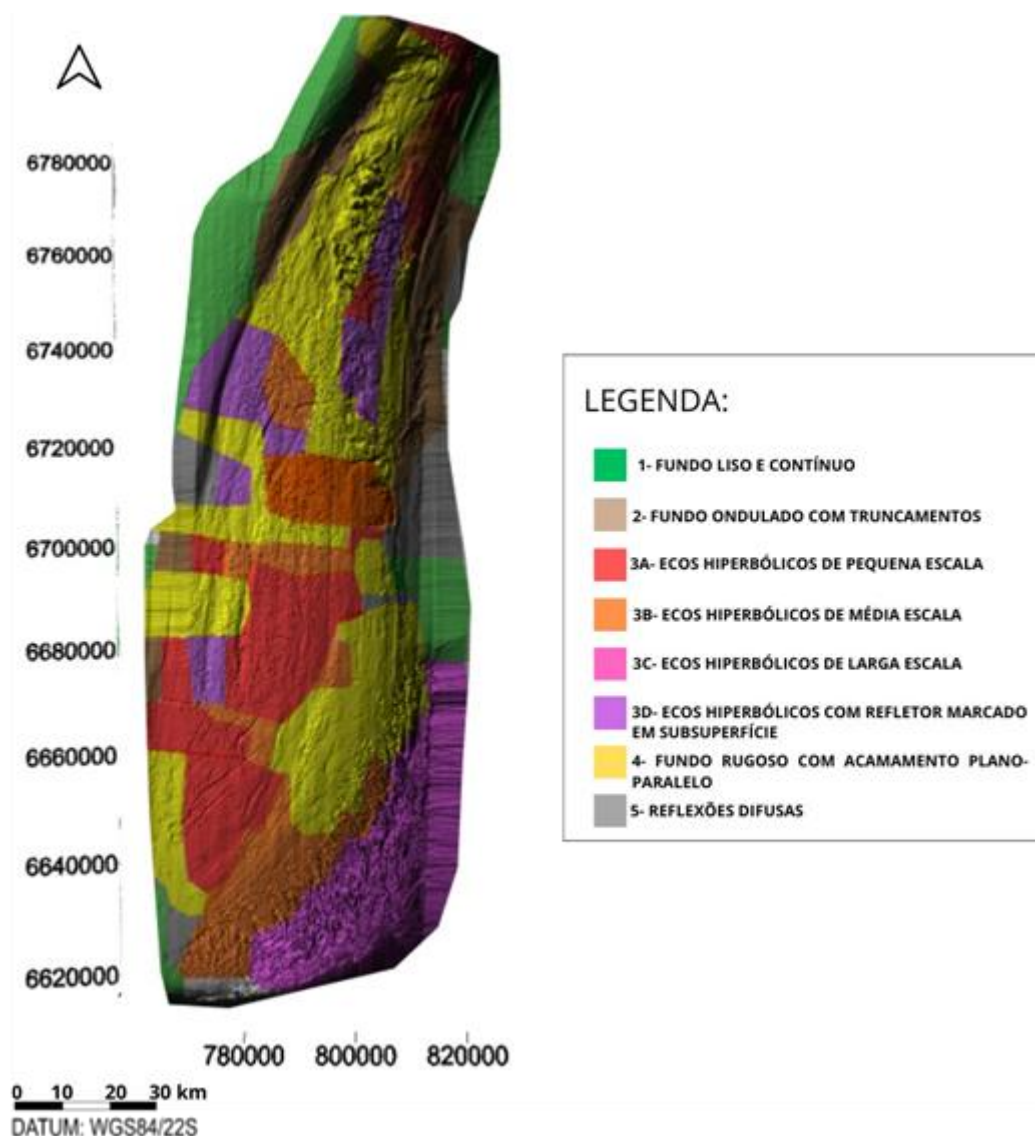


Figura 11. Superfície Batimétrica espacializada com ecos (Datum WGS84/UTM22).

Figure 11. Spatialized Bathymetric Surface with echoes (Datum WGS84/UTM22).

5. Conclusões

A partir das análises feitas (processamento, interpretação, análise de atributos em registros sísmicos mono e multicanal, medição de feições e espacialização) foram identificadas as principais categorias e subcategorias de ecocaráteres encontrados na região do Terraço do Rio Grande, bem como sua relação com a morfologia da área de estudo, em que quanto maior a escala horizontal das hipérboles, maiores as rugosidades e a tendência a se concentrarem espacialmente.

Além disso, há uma boa correlação entre a espacialização de ecocaráteres e a classificação prévia do substrato do terraço proposta anteriormente por Lisniewski *et al.* (2022), especialmente para os ecos hiperbólicos, os quais também, na análise de atributos, correspondem aos maiores valores de Amplitude RMS, principalmente para hipérboles de menor escala, configurando fatores determinantes para o reconhecimento da fosforita.

Em suma, percebe-se que os fundos rugosos e ecos hiperbólicos, especialmente os com hipérboles de menor escala e com refletor marcado em subsuperfície, são correlacionáveis aos depósitos de concreções fosfáticas, previamente descritos na

literatura. Esses resultados destacam a importância da correlação entre métodos geofísicos e batimétricos para a compreensão detalhada da morfologia do substrato marinho. A utilização do método sísmico, em particular, mostrou-se fundamental para a identificação de depósitos de fosforita, através da análise de ecocarateres. O estudo também reforça a pertinência da classificação de substrato proposta por Lisniewski *et al.* (2022), validando-a com novos dados e expandindo nosso entendimento sobre a distribuição e características dos depósitos de concreções fosfáticas.

Por fim, a integração de diferentes técnicas de análise e a colaboração entre instituições de pesquisa demonstram o valor de abordagens multidisciplinares para a prospecção de recursos minerais no ambiente marinho. As descobertas apresentadas fornecem uma base sólida para futuras investigações e aplicações práticas na exploração de fosforita, com potencial impacto econômico e científico significativo.

Agradecimentos: Agradecemos ao Projeto Fosforita do Serviço Geológico do Brasil, em parceria com a Universidade Federal do Rio Grande (FURG) pela aquisição dos dados com o acervo do pool de geofísica marinha do Laboratório de Oceanografia Costeira (LOC/UFSC) e ao CNPq, Bolsa de Produtividade em pesquisa Nível 1D/ processo 302238/2022-0. Agradecemos também à Agência Nacional de Petróleo, Gás e Biocombustíveis (ANP) pelo fornecimento dos dados multicanal e ao Prof. Dr. Willian C. Burnett da Florida State University pelas informações de datação da amostra de fosforita do Terraço do Rio Grande.

Contribuições dos Autores: Concepção, M.E.A., A.A.M. e A.H.F.K.; metodologia, M.E.A., A.A.M. e A.H.F.K.; software, M.E.A.; validação, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; análise formal, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; pesquisa, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; recursos, A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; preparação de dados, M.E.A. e A.A.M.; escrita do artigo, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; revisão, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; supervisão, M.E.A., A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A.; aquisição de financiamento, A.A.M., A.H.F.K. e R.A.A. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

Conflito de Interesse: Os autores declaram não haver conflito de interesse.

Referências

- Abreu, J.G.N. de; Corrêa, I.C.S.; Horn Filho, N.O.; Calliari, L.J. 2014. Phosphorites of the Brazilian Continental Margin, southwestern atlantic ocean. *Revista Brasileira de Geofísica*, 32: 539-548. <https://doi.org/10.22564/rbgf.v32i3.508>
- Alberton, M.E.; Machado, Arthur A.; Klein, A.H.F.; Alves, R.A. 2024. Ecocaracterização do Terraço do Rio Grande para a identificação de potenciais depósitos de fosforita. *Anais... 20º Congresso Latino-Americano de Ciências do Mar – COLACMAR'2024 e 8º Congresso Brasileiro de Oceanografia – CBO'2024*, 1: 2765-2766. <https://aoceano.org.br/servicos/downloads/>
- Ayres Neto, A.; Falcão, L.C.; Amaral, P.J.T. 2009. Caracterização de ecofácies na margem continental norte Brasileira: estado do conhecimento. *Revista Brasileira de Geofísica*, 27: 97-106. <https://www.sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/1848>
- Barron, E.J. & Frakes, L.A., 1990. Climate model evidence for variable continental precipitation and its significance for phosphorite formation. In: Burnett, W.C. & Riggs, S.R. (Eds.), *Phosphate deposits of the World. III: Neogene to modern phosphorites*: pp. 260-272.
- Burnett, W.C. 1977. Geochemistry and origins of phosphorite deposits from off Peru and Chile. *GSA Bulletin*, 88(6): 813-823. [https://doi.org/10.1130/0016-7606\(1977\)88<813:GAOPD>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0016-7606(1977)88<813:GAOPD>2.0.CO;2)
- Cooke, C.V.; Madureira L.S.P.; Griep, G.H.; Pinho, M.P. 2007. Análise de dados de ecosondagem de fundo oriundos de cruzeiros realizados entre Fortaleza (CE) e Chuí (RS) com enfoque na morfologia e tipos de fundo. *Revista Brasileira de Geofísica*, 25(4): 443–457. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2007000400008>
- Damuth, J.E. & Hayes, D.E. 1975. Echo character of the East Brazilian continental margin and its relationship to sedimentary processes. *Marine Geology*, 24(2): 73-95. [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(77\)90002-0](https://doi.org/10.1016/0025-3227(77)90002-0)
- Davis, J.C. 2002. *Statistics and Data Analysis in Geology* (3rd ed.). New York: John Wiley and Sons, Inc. p.416-452.

- Demarco, L.F.W.; Klein, A.H.F.; Souza, J.A.G. 2017. Marine substrate response from the analysis of seismic attributes in CHIRP sub-bottom profiles. *Brazilian Journal of Oceanography*, 65(3): 332-345. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592017124306503>
- Klein, A.H.F.; Griep, G.H.; Calliari, L.J; Villwock, J.A. 1992. Ocorrência de concreções fosfáticas no Terraço do Rio Grande, RS. *Anais... 37º Congresso Brasileiro de Geologia*. SBG. Resumos. São Paulo, SP, Brasil.
- Lisniewski, M.A.; Alves, R.A.; Lopes, V.H.R. 2022. *Mapa de Classificação Supervisionada de Substrato Marinho no Terraço do Rio Grande*. 1 mapa color (107 x 85 cm). Escala 1:25.0000 (Programa Oceanos, Zona Costeira e Antártica). Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), Rio de Janeiro. <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22948?mode=full>
- Meneses, A.R.A. dos S. 2010. Estudo teórico de atributos sísmicos em dados sísmicos de reflexão. Trabalho de Conclusão de Curso - Universidade Federal da Bahia, Salvador. 86p.
- Mahiques, M.M., Alcántara-Carrió, J., Lobo, F.J., Schattner, U., dos Santos, R.F., Cazzoli y Goya, S., Ramos, R.B., Natorf de Abreu, J.G., Pereira de Souza, L.A., Lopes Figueira, R.C.; Bicego, M.C. 2019. The building, shaping, and filling of an Upper Slope Terrace: the Rio Grande Terrace, SW Atlantic. *Solid Earth Discuss. European Geosciences Union* [preprint]. <https://doi.org/10.5194/se-2018-140>
- Pinho, M.P. De; Madureira, L.S.P; Calliari, L.J; Griep, G.H; Cooke, C.V. 2011. Depósitos fosfáticos marinhos na costa sudeste e sul do Brasil: potenciais áreas de ocorrência identificadas com dados de retroespalhamento acústico do fundo e sedimentológicos analisados sobre mapa batimétrico 3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29: 113-126. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2011000100008>
- Posamentier, H.W. & Vail, P.R. 1988. Eustatic Controls on Clastic Deposition. II. Sequence and Systems Tract Models. In: Wilgus, C.K.; Hastings, B.S.; St. Kendall, C.G.C.; Posamentier, H.; Ross, C.A.; Van Wagoner, J. (Eds.), *Sea Level Changes: An Integrated Approach*, Society for Sedimentary Geology, 42: pp. 125-154. <https://doi.org/10.2110/pec.88.01.0125>
- Riggs, S.R. & Sheldon, R.P. 1990. Paleooceanographic and paleoclimatic controls of the temporal and geographic distribution of Upper Cenozoic continental margin sediments. In: Burnett, W.C. & Riggs, S.R. (Eds.), *Phosphate deposits of the World. III: Neogene to modern phosphorites*, 3: 207-222.
- Silva, C.G. & Mello, S.L. 2004. *Recursos Não-Vivos*. In: O Mar no Espaço Geográfico Brasileiro. Coleção Explorando o Ensino: Geografia. Ministério da Educação, Secretaria de Educação Básica, 8: 160–194.
- Zembruski, S.G. 1979. Geomorfologia da margem continental brasileira e das bacias oceânicas adjacentes. *Série Projeto Remac*, Nº 7. 55p.