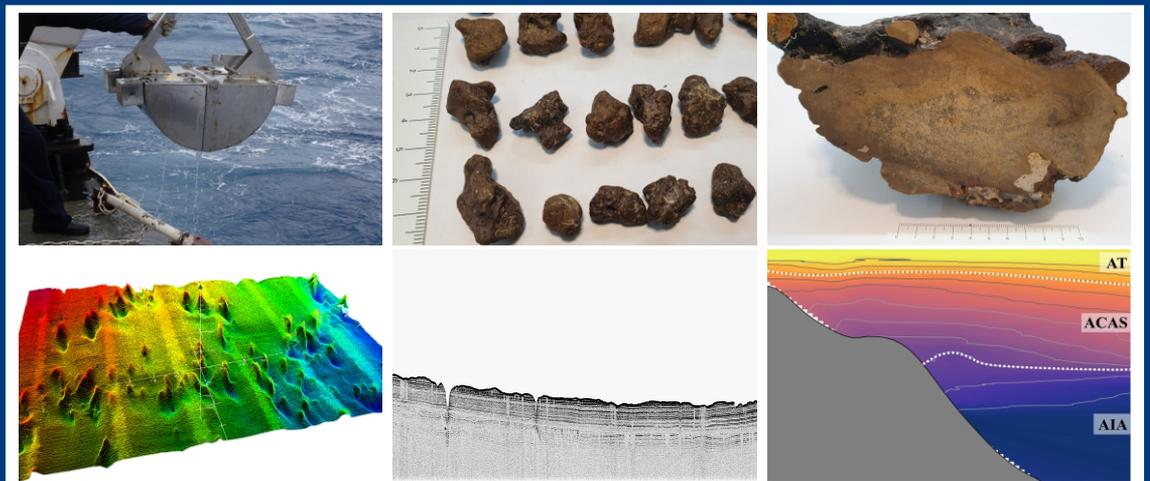


PROGRAMA DE AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE MINERAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA (REMLAC)

PROJETO DE PROSPECÇÃO E EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE FOSFORITAS MARINHAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA



INFORME DE RECURSOS MINERAIS

Série Recursos Minerais Marinhos, nº 05

Levantamento Geológico, Oceanográfico
e Ambiental do Potencial Mineral do
Espaço Marinho e Costeiro

Rio de Janeiro - 2021

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA

Ministro de Estado

Bento Costa Lima de Albuquerque Junior

Secretário de Geologia, Mineração e Transformação Mineral

Pedro Paulo Dias Mesquita

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM

DIRETORIA EXECUTIVA

Diretor Presidente

Esteves Pedro Colnago

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

Diretora de Hidrologia e Gestão Territorial

Alice Silva de Castilho

Diretor de Infraestrutura Geocientífica

Paulo Afonso Romano

Diretor de Administração e Finanças

Cassiano de Souza Alves

COORDENAÇÃO TÉCNICA

Chefe da Divisão de Geologia Marinha

Luciana Felício Pereira

Chefe do Departamento Tecnológico

Neovaldo de Araujo Teixeira

Chefe do Departamento de Geologia

Lúcia Travassos da Rosa Costa

Chefe da Divisão de Geologia Básica

Vladimir Cruz de Medeiros

Chefe da Divisão de Sensoriamento Remoto e Geofísica

Luiz Gustavo Rodrigues Pinto

Chefe do Departamento de Recursos Minerais

Marcelo Esteves Almeida

Chefe da Divisão de Projetos Especiais e Minerais Estragégicos

Ioná de Abreu Cunha

Chefe da Divisão de Geologia Econômica

Felipe Matos Tavares

Chefe da Divisão de Geoquímica

Silvana de Carvalho Melo

Chefe do Departamento de Informações Institucionais

Edgar Shinzato

Chefe da Divisão de Geoprocessamento

Hiran Silva Dias

Chefe da Divisão de Cartografia

Fábio Silva da Costa

Chefe da Divisão de Documentação Técnica

Roberta Pereira da Silva de Paula

Chefe do Departamento de Relações Institucionais e Divulgação

Patrícia Duringer Jacques

Chefe da Divisão de Marketing e Divulgação

Washington José Ferreira Santos

Chefe da Divisão de Apoio Técnico

Maria José Cabral Cezar

Chefe da Divisão de Editoração Geral

Valter Alvarenga Barradas

MINISTÉRIO DE MINAS E ENERGIA
SECRETARIA DE GEOLOGIA, MINERAÇÃO E TRANSFORMAÇÃO MINERAL
CPRM – SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL
DIRETORIA DE GEOLOGIA E RECURSOS MINERAIS

I PROGRAMA DE AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE MINERAL DA PLATAFORMA
CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA (REMLAC) I

LEVANTAMENTO GEOLÓGICO, OCEANOGRÁFICO E AMBIENTAL DO POTENCIAL MINERAL DO ESPAÇO MARINHO E COSTEIRO

PROJETO DE PROSPECÇÃO E EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE FOSFORITAS MARINHAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA

ORGANIZADORES

Roberto Aguiar Alves
Edlene Pereira da Silva
Maria Aline Lisniowski
Leandro Guimarães Silva
Vadim Harlamov

RELATÓRIO DE ETAPA 2010 - 2020



Rio de Janeiro
2021

REALIZAÇÃO

Divisão de Geologia Marinha

COORDENAÇÃO EXECUTIVA

Luciana Felício Pereira
Chefe da Divisão
Mauro Lisboa Souza
Assistente

COORDENAÇÃO TÉCNICA DO PROJETO

Roberto Aguiar Alves
Leandro Guimarães Silva
Edlene Pereira da Silva
Maria Aline Lisniowski
Vadim Harlamov
Mauro Lisboa Souza

COLABORADORES NA PESQUISA

Maísa Bastos Abram
Cleide Regina Moura da Silva
Felipe Rocha Abreu
Vitor Hugo Serravalle Reis Rodrigues

EQUIPE TÉCNICA

Roberto Aguiar Alves
Líder do projeto
Edlene Pereira da Silva
Maria Aline Lisniowski
Leandro Guimarães Silva

Vadim Harlamov
Victor Hugo Rocha Lopes

COLABORADORES NOS TRABALHOS DE CAMPO

Ivo Bruno Machado Pessanha
Heliásio Augusto Simões
Márcio Martins Valle
Ronaldo Gomes Bezerra
Joaquim das Virgens Neto
Rafael Corrêa Melo
Renato Teles Souto
Edlene Pereira da Silva
Roberto Aguiar Alves
Mauro Lisboa Souza

REVISÃO TÉCNICA

Tamara Reginatto Manfredi

PROJETO GRÁFICO/EDITORIAÇÃO**Capa (DIMARK)**

Washington José Ferreira Santos

Diagramação (ERJ)

Pedro da Silva

Revisão Final

Irinéa Barbosa da Silva

Serviço Geológico do Brasil - CPRM

www.cprm.gov.br
seus@cprm.gov.br

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)

P964 Projeto de prospecção e exploração de depósitos de fosforitas marinhas na plataforma continental jurídica brasileira / Organizadores Roberto Aguiar Alves ... [et al.]. — Rio de Janeiro : CPRM, 2021.
1 recurso eletrônico : PDF

Relatório de etapa 2010-2020.
Levantamento geológico, oceanográfico e ambiental do potencial mineral do espaço marinho e costeiro.
ISBN 978-65-5664-187-4

1. Geologia submarina. I. Alves, Roberto Aguiar (org.). II. Silva, Edlene Pereira da (org.). III. Lisniowski, Maria Aline (org.). IV. Silva, leandro Guimarães (org.). V. Harlamov, Vadim (org.). VII. Título.

CDD 551.4608

Ficha catalográfica elaborada pela bibliotecária Teresa Rosenhayme CRB 5662

APRESENTAÇÃO

Os projetos de Geologia Marinha têm como objetivo fundamental produzir informações geológicas de caráter técnico, econômico e ambiental, para subsidiar a tomada de decisão por parte de órgãos governamentais e empresas públicas e privadas quanto às atividades de exploração mineral, planejamento espacial e uso compartilhado da Zona Costeira (ZC), Plataforma Continental Jurídica Brasileira (PCJB) e áreas internacionais adjacentes (AREA).

Conforme estabelecido na Política Nacional para os Recursos do Mar (PNRM) e detalhado nos Planos Setoriais para os Recursos do Mar (PSRM), o Estado Brasileiro considera o Atlântico Sul e Equatorial uma região de interesse nacional não somente pelo aspecto econômico, como também pelo seu caráter político e estratégico. Dentro destes princípios, foram implementados, em âmbito nacional, três grandes programas nacionais, instituídos pela Comissão Interministerial para os Recursos do Mar (CIRM), que são: o Programa de Levantamento da Plataforma Continental Brasileira (LEPLAC), o Programa de Avaliação da Potencialidade Mineral da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (REMLAC) e o Programa de Prospecção e Exploração dos Recursos Minerais da Área Internacional do Atlântico Sul e Equatorial (PROAREA).

O REMLAC foi criado por meio da Resolução nº 004 da CIRM, de 3 de dezembro de 1997, para identificar a potencialidade dos recursos minerais da Plataforma Continental Jurídica Brasileira (PCJB). As atividades são conduzidas por um Comitê Executivo, no âmbito da CIRM, coordenado pelo Ministério de Minas e Energia, com a participação de ministérios e instituições afetas à ação, contando com a assessoria científica a cargo do Programa de Geologia e Geofísica Marinha (PGGM). O planejamento e a gerência operacional são realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM).

O Projeto de Prospecção e Exploração de Depósitos de Fosforitas Marinhas na Plataforma Continental Jurídica Brasileira é um dos projetos temáticos do REMLAC e atende às metas descritas no X PSRM, aprovado pelo Decreto nº 10.544.

Neste Relatório de Etapa são apresentados o histórico do projeto nos últimos dez anos, a compilação dos dados geofísicos e os resultados de caracterização geológica, apesar do pequeno número de amostras. A continuidade do projeto vai aumentar o acervo de dados geológicos, possibilitando a estimativa do potencial mineral para fosfato e outros minerais de interesse econômico na região do Terraço do Rio Grande.

O inestimável valor técnico-científico dos trabalhos desenvolvidos contribui para o acervo intelectual da empresa e a coloca em posição de destaque na geologia marinha no Brasil. A continuidade deste e de outros projetos relacionados à investigação do assoalho oceânico, não necessariamente para fins econômicos, mas certamente para fins técnico-científicos, engrandece o valor e a relevância do SGB-CPRM perante a sociedade brasileira, que faz e fará uso dos dados e informações geológicas básicas fornecidas por esta instituição.

Esteves Pedro Colnago

Diretor-Presidente

Diretor de Geologia e Recursos Minerais

Marcio José Remédio

RESUMO

O Projeto Fosforita pode ser considerado uma das maiores investidas no conhecimento geológico e oceanográfico da plataforma continental brasileira nas últimas décadas, em especial no Terraço do Rio Grande (TRG). Os dados coletados e a integração destes permitiram descobrir e avaliar processos relativos à complexa interação entre correntes marinhas, depósitos sedimentares e o assoalho oceânico. A importância do projeto é a consolidação do TRG como área piloto para estudos de geologia marinha no SGB-CPRM a partir do desenvolvimento de metodologias adequadas (critérios de coleta, análises e integração de dados) a serem realizadas em futuras etapas de investigação de outras regiões da plataforma continental.

Os levantamentos oceanográficos na área de interesse do projeto foram executados em quatro comissões ao longo de 10 anos, sendo adquiridos dados de batimetria multifeixe, sonografia e sísmica, e coletadas amostras de sedimento em 25 estações com amostradores de fundo do tipo Van Veen e box corer. Os primeiros levantamentos batimétricos foram em 2010 e 2011. Em 2017, os dados foram reprocessados e publicados mapas temáticos de batimetria e de intensidade do sinal acústico retroespalhado (*backscatter*). Em 2018, foram levantadas apenas duas pequenas áreas e coletadas amostras geológicas em três estações nos cinco dias em que o navio operou satisfatoriamente até que problemas no motor do navio interromperam o trabalho. No início de 2020, houve um acordo com a Marinha para o aproveitamento de uma das pernas da Comissão ERG2020, quando foi complementado o levantamento batimétrico da área de interesse e realizada a amostragem geológica em 22 estações. Paralelamente, ao longo das linhas de sondagem batimétrica e entre as estações de coleta, houve o levantamento sísmico da porção superficial do fundo marinho.

A integração dos três levantamentos batimétricos gerou mapas temáticos que permitem o estudo da geomorfologia e a classificação do tipo de substrato. A interpretação dos perfis sísmicos revelou ambientes sedimentares distintos relacionados a feições erosivas e de acumulação de sedimentos. Associando a descrição das amostras sedimentares, foi possível estabelecer quais áreas são mais indicativas de acumulação das concreções fosfáticas.

O estudo oceanográfico revelou um sistema complexo de correntes e vórtices atuando na região do TRG, caracterizando um ambiente dinâmico e energético em termos da circulação oceânica, que podem gerar correntes por vezes intensas e misturar as massas d'água. A atuação dos vórtices pode ser associada à ressurgência de quebra de plataforma continental e ao retrabalhamento hidráulico na remoção de material estéril e na concentração dos nódulos de fosforita.

No projeto foram feitas análises químicas em 53 amostras geológicas rochosas. Todas foram analisadas em laboratório, pelo método de fluorescência de raios X (FRX) para os principais óxidos. Desse total, 14 apresentaram teores de P_2O_5 entre 14 % e 18%, sendo classificadas como *packstone* fossilífero fosfático, e duas acima de 18%, classificadas como fosforito. Em geral, essas concreções são seixos contendo minerais fosfáticos como hidroxiapatita, carbonato-fluorapatita, fluorapatita e xenotímio.

ABSTRACT

The Phosphorite Project can be considered one of the biggest investments in geological and oceanographic knowledge of the Brazilian continental shelf in recent decades, especially in the Rio Grande Terrace. The collected data and their integration allowed discovering and evaluating processes related to the complex interaction between marine currents, sedimentary deposits and the ocean floor. The importance of this project is the consolidation of the research area as a pilot area for marine geology studies in the SGB-CPRM, based on the development of appropriate methodologies (data collection, analysis and integration criteria) to be carried out in future stages of investigation in other regions of the continental shelf .

The oceanographic surveys in the project's area of interest were carried out in four commissions over 10 years, with multibeam bathymetry, sonography and seismic data being acquired, and sediment samples were collected at 25 stations with Van Veen and box corer bottom samplers. The first bathymetric surveys were in 2010 and 2011; in 2017, these data were reprocessed and published thematic bathymetry and backscattered acoustic signal intensity maps. In 2018, only two small areas were surveyed and geological samples were collected at three stations in the five days the ship operated satisfactorily until problems in the ship's engine stopped work. In early 2020, there was an agreement with the Navy to take advantage of one of the legs of the ERG2020 Commission, when the bathymetric survey of the area of interest was complemented and geological sampling was carried out at 22 stations. At the same time, along the bathymetric sounding lines and between the sampling stations, there was a seismic survey of the superficial portion of the seabed.

The integration of the three bathymetric surveys generated thematic maps that allow the study of geomorphology and classification of the type of substrate. The interpretation of seismic profiles revealed distinct sedimentary environments related to erosive and sediment accumulation features. By associating the description of the sedimentary samples, it was possible to establish which areas are more indicative of the accumulation of phosphate concretions.

The oceanographic study revealed a complex system of currents and vortices acting in the region, characterizing a dynamic and energetic environment in terms of oceanic circulation that can generate currents that are sometimes intense and mix the masses of water. The action of the vortices can be associated with the resurgence of continental shelf break and hydraulic rework in the removal of sterile material and in the concentration of phosphorite nodules.

In the project, chemical analyzes were carried out in 53 rocky geological samples. All were analyzed in the laboratory, using the X-ray fluorescence (FRX) method for the main oxides. Of this total, 14 had P_2O_5 contents between 14% and 18% being classified as fossiliferous phosphate packstone and two above 18%, classified as phosphorite. In general, these concretions are pebbles containing phosphate minerals such as hydroxyapatite, carbonate-apatite, fluorapatite and xenothym.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Considerações Gerais.....	10
1.2. Exemplos de Exploração da Fosforita em Ambiente Marinho.....	10
1.3. Motivação econômica e estratégica	11
1.4. Histórico do Projeto	12
1.5. Objetivos do Projeto	13
2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA	14
3. PESQUISA DA FOSFORITA NA COSTA BRASILEIRA	15
4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	17
4.1. Gênese, Processos e Controles de Mineralizações Fosfáticas Sedimentares.....	17
4.2. Contexto Oceanográfico	18
4.2.1. O sistema Corrente do Brasil.....	18
4.2.2. Massas d'água	19
4.2.3. Circulação de Plataforma	20
4.2.4. Correntes Secundárias.....	21
5. ASPECTOS GEOLÓGICOS E AMOSTRAGEM	23
5.1. Amostragem Geológica: Metodologia e Resultados Preliminares.....	24
5.1.1. Amostras Pretéritas	24
5.1.2. Amostragem 2018	28
5.1.3. Amostragem 2020	30
5.2. Distribuição dos Teores de P_2O_5	33
5.2.1. Elementos maiores	33
5.2.2. Elementos Menores e Traço.....	35
5.3. Tipologia Sedimentar do Substrato Marinho.....	35
6. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA.....	40
6.1. Batimetria.....	40
6.1.1. Descrição geomorfológica do Terraço do Rio Grande.....	40
6.1.2. Descrição dos dados de retroespalhamento acústico (backscatter).....	41
6.1.3. Modelagem do terreno bentônico (Benthic Terrain Model - BTM)	43
6.1.4. Classificação automatizada	46
6.2. Sonografia	48
6.3. Sísmica	48
6.3.1. Levantamento sísmico com fonte <i>Sparker</i>	49
6.3.2. Resultados da perfilagem sísmica com fonte <i>Sparker</i>	51
6.3.3. Levantamento sísmicos com fonte <i>Chirp</i>	57
6.3.4. Resultados da perfilagem sísmica com fonte <i>Chirp</i>	58
6.4. Dados Oceanográficos	75
6.4.1. Síntese do levantamento.....	75
6.4.2. Síntese dos resultados.....	75
6.4.3. Materiais e métodos.....	75
6.4.3.1. ADCP.....	75

6.4.3.2. XSV	75
6.4.3.3. TSG	76
6.4.3.4. Sensoriamento remoto	76
6.4.4. Resultados e discussão	77
6.4.4.1. Imagens de satélite.....	77
6.4.4.2. Seção hidrográfica da velocidade do som	77
6.4.4.3. Temperatura e salinidade em superfície (TSG)	80
6.4.4.4. Correntes em superfície (ADCP).....	80
7. INTEGRAÇÃO DOS DADOS	86
7.1. Bases para Estimativa do Potencial Mineral	90
8. RECOMENDAÇÕES PARA A PRÓXIMA ETAPA	91
REFERÊNCIAS	93

1. INTRODUÇÃO

1.1. CONSIDERAÇÕES GERAIS

Genericamente, fosforitas marinhas são rochas sedimentares ricas em fosfato, aquelas contendo >18% de P_2O_5 são denominadas de fosforito (Pulfahl & Groat, 2016). O mineral mais comum na sua composição é o cálcio-fluorapatita, podendo apresentar tamanhos variando de areia a matacão. Ocorrem como nódulos e concreções, recobrando grandes extensões do assoalho marinho. As ocorrências são descritas na bibliografia nas margens continentais do México, Peru, Chile, Austrália, Nova Zelândia, Estados Unidos e oeste da África (Burnett 1980, Baturin 1982, Riggs & Sheldon 1990, Compton & Bergh 2016), tendo algumas áreas recebido atenção comercial (Nielsen *et al.* 2014, Kudrass *et al.* 2015).

Acumulações de fosforita marinha são conhecidas especialmente nas plataformas continentais e parte superior do talude continental a profundidades menores de 500 metros e normalmente situadas, com pequenas exceções, em baixas e médias latitudes (Martins & Souza, 2007). Os sedimentos fosfáticos formam-se, principalmente, em áreas sob influência de sistemas de ressurgência, como também em ilhas oceânicas, no topo de montes submarinos e em algumas plataformas que podem não terem sido afetadas por esses sistemas (Glenn *et al.* 1994). Também ocorrem extensivamente sobre platôs e cordilheiras submarinas, entre os mais estudados estão o platô Blake, ao largo do sudeste dos Estados Unidos, e Chatham Rise, no leste da Nova Zelândia.

O presente documento contempla os resultados das atividades de pesquisa desenvolvidas pelo SGB-CPRM no escopo do Projeto Prospecção e Exploração de Depósitos de Fosforitas Marinhas na Plataforma Continental Jurídica Brasileira, com o propósito de avaliar o potencial mineral das ocorrências de rochas fosfáticas na região do Terraço do Rio Grande, adjacente ao litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, numa faixa de profundidade de 200 a 1.000 metros. Trata-se de um projeto pioneiro de coleta e integração de dados geofísicos e geológicos e de ampliação do conhecimento científico para dar base a pesquisas futuras. O detalhamento das áreas pesquisadas por meio da aquisição de registros sísmicos, sonográficos e batimétricos e a coleta de amostras de sedimento e concreções, e as subsequentes análises químicas e mineralógicas formam o conjunto de dados utilizados neste projeto.

1.2. EXEMPLOS DE EXPLORAÇÃO DA FOSFORITA EM AMBIENTE MARINHO

Os depósitos de assoalho oceânico são tipicamente não econômicos, dada a complexidade operacional, baixos índices de recuperação, dispersão do minério e restrição de espessura. Além disso, a obtenção de fosforita oriunda de lavra em alto mar, com posterior beneficiamento em terra, é muito menos competitiva do que fosforitos oriundos de depósitos em terra, por exemplo da Região Norte Africana. No entanto, a maior demanda e preços mais altos, combinados com os avanços na tecnologia de mineração *offshore*, aumentaram a exploração de depósitos de fósforo potencialmente mineráveis (Kudrass *et al.*, 2015).

Projetos na costa da Namíbia, África do Sul, Peru, Nova Zelândia tiveram níveis distintos de desenvolvimento, mas ainda não resultaram em produção sustentada. Kudrass *et al.* (2015), descrevem o estado de exploração e mineração para os projetos mais avançados: Chatham Rise e Namíbia. Em ambos, a recuperação foi planejada com a utilização de uma draga de sucção e enriquecimento por triagem de tamanho a bordo. Foram concedidas licenças de mineração, mas considerações ambientais atrasaram a exploração economicamente viável.

Chatham Rise é uma elevação do assoalho oceânico localizada numa zona de convergência denominada de Frente Subtropical, onde duas correntes principais fluem para leste, o que permite a ascensão lenta de massa d'água a partir de 700 m de profundidade, gerando uma zona de alta produtividade biológica. Os depósitos de fosfato estão associados a uma depressão, onde as correntes retrabalham hidraulicamente as concreções (Nielsen *et al.*, 2014). O topo da elevação está a 400 m de profundidade, a cerca de 450 km da costa da Nova Zelândia. A fosfatogênese ocorreu no Mioceno Superior sobre o calcário hemipelágico, composto principalmente por foraminíferos e restos de algas, formando uma camada residual de espessura de 20 cm (Kudrass *et al.*, 2015). A pesquisa exploratória, realizada em grande parte nas décadas de 70 e 80, identificou o depósito de fosforito, que poderia atender às necessidades de abastecimento da Nova Zelândia por pelo menos 25 anos. O depósito tem um recurso mineral inferido de 80 milhões de m^3 , a um grau médio de 290 kg/m^3 , para um contido de 23 Mt. O potencial de exploração adicional é da ordem de

40 milhões de m³ com 8-12 Mt de fosforito contido a graus entre 200 e 300 kg/m³ (Sterk, 2014).

Uma das principais razões para o aumento do interesse comercial nos depósitos de Chatham Rise foi a descoberta de que o fosforito encontrado não precisa ser convertido em superfosfato, pois é um fertilizante eficaz apenas moído, peletizado e aplicado diretamente ao solo (Falconer, 1989 *apud* Sterk, 2014). O conteúdo médio de fósforo dos nódulos (9,4% P = 21,5% P₂O₅) também é um pouco mais alto do que o fertilizante superfosfato amplamente usado. Ensaio de campo estabeleceram que o fosforito, quando finamente triturado, é adequado para uso como fertilizante de aplicação direta em muitos tipos de solo da Nova Zelândia. A aplicação direta do fosfato de rocha é significativamente mais ecológica, reduzindo o desperdício em 80% a 90% e melhorando a saúde do solo (CRP, 2021).

O sistema de ressurgência de Benguela está entre os mais produtivos atualmente e está associado a grandes depósitos de fosforito expostos sobre uma área de 24.700 km² na plataforma da Namíbia. Consistem em uma camada de areia fosfática lamosa a seixosa, com granulocrescência ascendente, encontrada na plataforma média à externa, numa faixa de profundidade de 190 a 350 m na região offshore ao sul de Walvis Bay (Compton & Berger, 2016). Com base na espessura total dos testemunhos recuperados e na percentagem em peso de P₂O₅, estima-se que a plataforma da Namíbia é hospedeira de depósitos de classe mundial, contendo recurso de rocha fosfática da ordem de 7800 Mt a um grau médio de 19% de P₂O₅ (Compton & Berger, 2016).

O fosfato no ambiente marinho foi descoberto e mapeado regionalmente durante estudos científicos nos anos 60 e 70, com subsequente trabalho exploratório realizado por empresas de mineração sul-africanas na década de 1990 e anos 2000. O depósito de fosfato ao largo de Walvis Bay foi considerado subeconômico, com base nos preços da época do concentrado de fosfato de rocha (em 1991, 42,50 dólares/t). A partir de 2007, o valor do concentrado de rocha fosfática aumentou rapidamente, passando de 80 a 430 dólares, em 2008, resultando em uma reclassificação da viabilidade econômica de projetos de fosfato em todo o mundo (Midgley 2012). Embora várias licenças de mineração tenham sido emitidas, há uma moratória sobre a mineração de fosforito na plataforma namibiana enquanto se aguarda uma avaliação dos impactos potenciais, particularmente para a indústria pesqueira.

Atualmente, as autorizações de mineração para depósitos de fosfato marinho foram suspensas ou recusadas por motivos ambientais. No caso de Chatham Rise, existe um conhecimento considerável na área, em parte como resultado da identificação de ecossistemas marinhos vulneráveis em montes submarinos e do risco potencial

da pesca em alto-mar. A principal característica comum dos ecossistemas, onde minerais são encontrados no fundo do mar, é a falta de conhecimento sobre a ecologia fundamental, o funcionamento (por exemplo: ciclo de vida, dinâmica populacional, conectividade, etc.) e a prestação de serviços ecossistêmicos (Rogers *et al.*, 2015).

1.3. MOTIVAÇÃO ECONÔMICA E ESTRATÉGICA

As concreções fosfáticas podem formar um importante recurso natural que se encontra entre aqueles considerados programas temáticos do REMPLAC. Além do aspecto econômico, há consequências de caráter científico, como a elaboração de modelos sobre a fosfogênese e a ampliação do conhecimento acerca da caracterização desse tipo de ocorrência mineral. Por isso, torna-se imprescindível direcionar ações mais específicas e menos dispendiosas a sua localização e a sua avaliação econômica, que poderiam ser aplicadas para outras áreas da Plataforma Continental Jurídica Brasileira. O projeto contribui no aspecto ambiental, com o fornecimento de informações básicas aos órgãos reguladores e de controle da atividade minerária referentes à exploração em ambiente marinho.

A abordagem do X PSRM prioriza a pesquisa e incentiva o aproveitamento dos recursos minerais de importância econômica e estratégica para o país, encontrados na zona costeira e nas áreas marinhas nacionais e internacionais, com foco em fertilizantes, agregados para construção civil e reconstrução de perfis de praia. Esses recursos são uma alternativa estratégica às fontes continentais, principalmente para suprir as demandas do agronegócio, da construção civil e do gerenciamento costeiro.

No último PSRM foi determinado que o REMPLAC concentrará seu trabalho em detalhar áreas potenciais ao longo da plataforma continental, com bens minerais específicos, como agregados de uso imediato na construção civil e reconstrução costeira e, ainda, materiais utilizados como corretivos de solo, como bioclastos marinhos, necessários ao desenvolvimento da nossa agricultura. Nesse caso, a fosforita estaria enquadrada como corretivos de solo, mas dependendo da concentração do fósforo torna-se uma fonte potencial como fertilizante.

Um detalhamento do projeto nas áreas potencialmente favoráveis à ocorrência/depósitos de concreções fosforíticas, conforme indicações da análise dos dados existentes, atende as diretrizes do PSRM. Esse trabalho de detalhamento permitirá conhecer melhor as características qualitativas do potencial mineral, além das características ambientais, biológicas, oceanográficas e econômicas, necessárias à exploração sustentável dos recursos minerais marinhos.

Para usufruir da futura exploração dos recursos minerais marinhos, é imperativa a realização de uma etapa de

investigação científica exploratória desenvolvida de forma adequada para o conhecimento global do ambiente em termos de processos físicos, químicos e biológicos que conduziram a sua formação. O levantamento sistemático dos depósitos de fosforita em nível de detalhe vem a ser uma ação estratégica, com aplicações a médio e longo prazo, de forma a avaliar o potencial do recurso, que pela indicação de estudos preliminares ocorrem extensivamente na margem continental da Região Sul do Brasil.

Considerando essas informações, é possível que em outros segmentos da plataforma e do talude continental, possam existir sítios de formação e deposição de fosfato, se as condições químicas, físicas e geomorfológicas foram apropriadas ao longo da evolução geológica do local. Uma pesquisa ampla e sistemática ao longo de toda a margem continental poderia responder a essa questão.

1.4. HISTÓRICO DO PROJETO

Apesar de não fazer parte do período de abrangência do Relatório de Etapa, abaixo um breve resumo relatando a origem do projeto, no sentido de contextualizar os esforços iniciais, quando a equipe da Geologia Marinha era bastante reduzida e para a realização dos trabalhos utilizava-se a colaboração com universidades.

Em 2006, foi elaborado o primeiro Plano de Trabalho integrando o Plano Piloto de Investimento (PPI 2007) contando com a participação das instituições de pesquisa da Região Sul do Brasil que integram o Programa de Geologia e Geofísica Marinha (FURG, UFRGS, UFSC, UNIVALI e UFPR). O objetivo principal era a realização de levantamentos geológicos e geofísicos na plataforma continental sul-brasileira, com ênfase na pesquisa de depósitos de fosforita.

Dentro do escopo do PPI, foi realizada a Comissão REMPLAC I a bordo do NOc Antares, no período de 30/07

a 07/08/2007, com o intuito de explorar as ocorrências de fosforita na Plataforma de Florianópolis (Abreu 2010). Foram planejados o levantamento sonográfico e a amostragem geológica com o uso de dragas de arrasto cilíndricas e retangulares e amostradores pontuais tipo busca-fundo. Devido aos problemas técnicos no sonar de varredura lateral, a perfilagem sonográfica não foi realizada, sendo estendida a atividade de coleta de amostras geológicas, que passou de 40 para 94 estações.

Em dezembro de 2008, foi firmado um contrato entre o SGB-CPRM e a UNIVALI para o mapeamento das fosforitas, que resultou na elaboração de um relatório com as atividades de integração de dados, conforme o contrato N°066/PR/08. Após a assinatura, ocorreu a análise dos sedimentos coletados durante a Comissão REMPLAC I e a compilação e o processamento de dados geológicos e geofísicos publicados, que incluíram dados adquiridos durante o Programa REVIZEE (1997-1998). Como conclusão do relatório, Abreu (2010) mostrou que através dos dados compilados e integrados ficava evidenciado a significativa ocorrência de rochas fosfáticas na margem continental sul do Brasil, em particular no Terraço do Rio Grande.

Considerando os levantamentos geofísicos na área de interesse com participação efetiva do SGB-CPRM, foram executadas quatro comissões oceanográficas espaçadas ao longo de 10 anos, conforme Tabela 1.1.

Em 2010, foi realizado a bordo do NHi Sirius, um levantamento com varredura multifeixe em parte do Terraço do Rio Grande, numa área em que amostragens preliminares indicaram a presença de rochas fosfáticas sobre o leito submarino. Em 2011, houve o complemento do levantamento batimétrico pelo mesmo navio no entorno da primeira área levantada.

No final de 2015, foi assinado um Termo de Execução Descentralizada (TED 029/CPRM/2015), com o objetivo de

Tabela 1.1 - Síntese dos levantamentos

LEVANTAMENTOS GEOFÍSICOS	PERÍODO	NAVIO	ÁREA LEVANTADA / DISTÂNCIA PERFILADA	
Batimetria Multifeixe	24 a 28/03/2010	NHi Sirius	1.709 km ²	
Batimetria Multifeixe	18 a 25/03/2011	NHi Sirius	5.212 km ²	
Sonografia (SVL)	27/06 a 01/07/2018	NPq Atlântico Sul	120 km ²	
Sísmica Sparker	27/06 a 01/07/2018	NPq Atlântico Sul	400 km	
Batimetria Multifeixe	28/02 a 04/03/20	NPqHo Vital de Oliveira	1.304 km ²	
Sísmica Chirp	28/02 a 07/03/20	NPqHo Vital de Oliveira	1.860 km	
AMOSTRAGEM GEOLÓGICA	PERÍODO	NAVIO	ESTAÇÕES DE COLETA	QUANTIDADE DE MATERIAL
<i>Van Veen</i>	30/06/2018	NPq Atlântico Sul	3	7,5 kg areia lamosa e concreções fosfáticas
<i>Van Veen e box corer</i>	29/02 a 06/03/2020	NPqHo Vital de Oliveira	22	457 kg de sedimento 85 kg de concreções

formalizar a parceria entre o Serviço Geológico do Brasil (CPRM) e a Universidade Federal do Rio Grande (FURG), para realização de campanhas de levantamento de dados geofísicos e oceanográficos e coleta de amostras geológicas na região da Plataforma de Florianópolis e no Terraço de Rio Grande. O objeto do TED é a utilização do Navio de Pesquisa (NPq) Atlântico Sul e seus equipamentos. Esse instrumento foi renovado duas vezes por Termo de Aditivo de Prazo, sendo sua atual vigência até 30/11/2021.

Inicialmente, as campanhas estavam previstas para 2016, mas devido a uma série de dificuldades, que incluíam o repasse dos recursos, a necessidade de reforma no motor do navio e a importação de equipamentos, o cronograma dos trabalhos foi sucessivamente reajustado e a programação alterada para maio de 2018.

Nessa retomada dos levantamentos geofísicos, houve apenas uma comissão com duração de cinco dias, quando foram adquiridos dados sonográficos e sísmicos para duas áreas onde haviam sido analisadas amostras pretéritas com teores de fosfato em torno de 15%. Também, foi realizada a coleta de sedimentos com a utilização de amostrador *Van Veen*, obtendo sucesso em três de cinco pontos de amostragem.

Fatores operacionais levaram a uma nova paralização das atividades embarcadas, em vista dos problemas apresentados pelo NPq Atlântico Sul e a falta de um navio de médio porte que o substituísse. A solução apresentada pela FURG, foi a reforma do motor em 2019, formalizando-se uma nova programação para abril de 2020. Devido à grave situação sanitária provocada pela pandemia, as atividades foram suspensas.

No início de 2020, foi realizada uma campanha oceanográfica a bordo do Navio de Pesquisa Hidroceanográfico (NPqHo) Vital de Oliveira, com a aquisição de dados de multifeixe ao longo de linhas planejadas em duas áreas. Na região da plataforma continental próxima ao Terraço de Rio Grande, a aquisição foi realizada ao longo de linhas ortogonais espaçadas sem recobrimento total do fundo.

Complementando a área de sondagem batimétrica executada pelo NHi Sirius, linhas paralelas às isóbatas, com recobrimento total e superposição de pelo menos 30%, foram adquiridas no norte do terraço. Concomitantemente ao levantamento multifeixe e na navegação entre estações de coleta, ocorreu a aquisição de dados de sísmica rasa. O posicionamento das estações de coleta foi planejado com base na interpretação de dados de retroespalhamento acústico dos levantamentos batimétricos anteriores e dos mosaicos de sonar de varredura lateral dos levantamentos sonográficos realizados em 2018.

1.5. OBJETIVOS DO PROJETO

- Identificar e caracterizar os processos geológicos e oceanográficos envolvidos na formação das concreções fosfáticas nas áreas de ocorrência da margem continental brasileira.
- Ampliar o conhecimento sobre esses processos, subsidiando pesquisas futuras, tanto em termos de avaliação de potencial mineral quanto em significância científica.
- Contribuir para a formação de especialistas no reconhecimento e mapeamento de jazidas minerais no ambiente marinho.
- Coletar dados para a elaboração de estudo de viabilidade econômica, técnica e ambiental para exploração sustentável da fosforita.
- Fornecer informações para a tomada de decisão por parte de órgãos do governo e empresas de mineração brasileiras quanto à conveniência de efetuar maiores investimentos na região.

Considerando o risco inerente à atividade de exploração mineral, o projeto pretende conhecer melhor os processos atuantes na área de estudo, para avaliação conceitual da relação entre esses processos e a concentração de material fosfatado, permitindo uma avaliação qualitativa do potencial mineral

2. LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE PESQUISA

As áreas de pesquisa localizam-se na margem continental sul-brasileira, entre as coordenadas 27° e 31° de latitude sul, abrangendo as bacias de Santos e de Pelotas (Figura 2.1). Foram propostas duas áreas para a pesquisa: Plataforma de Florianópolis, ao norte, com dimensão aproximada de 22.272 km², e Terraço do Rio Grande, ao

sul, medindo em torno de 14.578 km². Ambas as áreas estão na faixa de 100 a 1.000 m de profundidade.

Até o momento, não houve levantamentos sobre a Plataforma de Florianópolis. Com a continuidade do projeto, essa área será alvo da mesma prospecção geofísica utilizada no Terraço do Rio Grande.



Figura 2.1 - Localização das áreas de pesquisa do projeto: (A) Plataforma de Florianópolis e (B) Terraço do Rio Grande. Fonte: dados extraídos da Base Cartográfica IBGE, 1:250.000, 2017. Autora: Edlene Pereira da Silva, SGB-CPRM / DIGEOM.

3. PESQUISA DA FOSFORITA NA COSTA BRASILEIRA

O número de referências bibliográficas a respeito da formação e ocorrência de fosforita na costa brasileira é reduzido (Abreu *et al.* 2014). Com relação à pesquisa das rochas fosfáticas, podem ser citados os trabalhos do Projeto REMAC (1972-1978): Guazelli & Costa (1978), Melo *et al.* (1978), Menor *et al.* (1979). As principais ocorrências de fosforita registradas nesses trabalhos históricos são relacionadas aos platôs submarinos, províncias com um aporte relativamente grande de nutrientes carreados pelas correntes de fundo.

Os resultados apresentados por Guazelli & Costa (1978) registram teores de 2% a 18,4% de P_2O_5 em rochas calcárias recolhidas no Platô do Ceará, em duas dragagens realizadas entre 305 e 270 m de profundidade no topo e entre 1.371 m e 391 m no flanco nordeste. Foram recuperados sedimentos inconsolidados e nódulos de fosforita, sendo as maiores concentrações associadas a calcários argiloferruginosos silificados. A gênese dos nódulos estaria associada à fosfatização de carapaças de foraminíferos numa área de ressurgência.

Melo *et al.* (1978) descreveram amostras dragadas entre 2.200 m e 1.750 m de profundidade sobre o flanco norte do Platô de Pernambuco, sendo obtido cerca de 150 kg de material sedimentar e nódulos polimetálicos, cujos núcleos eram compostos por fosfato com teores de 14,7% a 29,5% de P_2O_5 , de alta qualidade e passíveis de aproveitamento econômico.

Os trabalhos de Martins & Martins (1985) e Martins *et al.* (1985) não focam em fosforito, mas investigam produtos e processos que podem estar relacionados a retrabalhamento hidráulico de sedimentos, o que favoreceria o enriquecimento de material fosfático na área de estudo. As descrições fornecem informações importantes sobre alguns dos processos mais significativos. Por exemplo, a presença de fragmentos de corais em uma das amostras coletadas na porção sul do TRG indica água com baixa turbidez e concentração moderada de nutrientes, o que sugere ressurgência de águas profundas. Adicionalmente, a repetição de estratos e a distribuição de tipos de sedimentos em algumas amostras sugerem a ação de tempestades na pilha sedimentar ou recorrência de correntes de turbidez.

Durante as dragagens efetuadas durante o Projeto Talude: Pesca em Águas Profundas da Costa Sul Brasileira, que visava estudos de caracterização do assolho marinho para pesca demersal (Klein *et al.*, 1992), foram recuperadas as primeiras amostras de concreções

fosfáticas no Terraço do Rio Grande. Essas rochas, que apresentaram formato irregular e tamanho variando de areia a matacão, foram coletadas a 377 e 500 metros de profundidade e associados a essas ocorrências, encontrou-se glauconita, areia foraminífera e material detrítico. Análises da composição química de duas amostras apresentaram teores de P_2O_5 de 15 e 15,8%, sendo que os autores observaram a semelhança das características geológicas do material coletado com os depósitos de origem pré-quadernária descritos no sudoeste da África por Baturin (1982).

O Programa de Avaliação do Potencial Sustentável de Recursos Vivos na Zona Econômica Exclusiva (REVI-ZEE) contribuiu de forma significativa para a discussão em torno da ocorrência de fosforitas na margem continental sul-brasileira, ao proporcionar a aquisição de dados batimétricos e a coleta de amostras geológicas nas áreas externas da plataforma continental e do talude superior. Em um cruzeiro realizado em 1997 a bordo do NPq Diadorim (Abreu, 2010), foi obtido um perfil ecobatimétrico longitudinal ao Terraço do Rio Grande, cujo registro mostrou uma grande irregularidade do fundo submarino. Nesse mesmo perfil, foi recolhida uma amostra identificada pelo método difratométrico como uma rocha constituída de quartzo, calcita e fluorapatita de origem autigênica.

O primeiro trabalho que relacionou de forma sistemática o tipo de substrato ao padrão de reflexão acústica (backscatter) foi de Pinho *et al.* (2011), através dos dados monofeixe 38 kHz e das Cartas de Sedimentos de Fundo geradas no âmbito REVIZEE. Pinho *et al.*, 2015 e 2016, aprimoraram a modelagem desses dados e criaram mapas em 3D para identificar a presença de depósitos de fosfato na Bacia de Pelotas.

Como contribuição para o conhecimento sobre a fosfatogênese e o potencial mineral e econômico dos depósitos de fosforita marinha na margem continental sul-brasileira, nos trabalhos de Meireles *et al.* 2009 e Abreu *et al.* 2014 foram apresentados os resultados de análises mineralógicas de cinco amostras coletadas acidentalmente pela frota pesqueira ao longo do talude continental (Tabela 3.1).

As análises petrográficas e difratométricas de raios X indicaram uma grande concentração de quartzo e dolomita envolvidos na matriz fosfática constituída por colofano. Os principais minerais fosfáticos são a fluorapatita e hidroxiapatita, formadas através da substituição

Tabela 3.1 - Teor em fosfato e principais minerais de amostras acidentais.

AMOSTRA	LATITUDE (GRAUS)	LONGITUDE (GRAUS)	PROF. (m)	TEORES DE P ₂ O ₅ (%)	PRINCIPAIS MINERAIS
AM-01	31°02.138'S	49°22.346'W	310	-	Quartzo, dolomita, goethita, fluorapatita carbonática, hidroxiapatita
AM-04	27°44.140'S	47°06.787'W	530	5.39	Quartzo, dolomita, goethita, fluorapatita carbonática, hidroxiapatita
AM-06	29°44.825'S	47°49.989'W	495	1.19	Quartzo, dolomita, goethita, philipsita, barita
AM-12	29°18.864'S	47°52.500'W	420-490	3.94	Quartzo, philipsita, baryte, fluorapatita carbonática, clorapatita
AM-13	29°37.708S'	48°00.499'W	350-380	2.34	Quartzo, dolomita, philipsita, goethita, fluorapatita carbonática

de carbonato por fosfato e da alta afinidade iônica do flúor pelo fósforo. Essas amostras foram incorporadas como novas ocorrências e sugerem uma distribuição bem mais ampla de depósitos fosfáticos na margem continental sul-brasileira (Abreu *et al.*, 2014).

Zembruski (1979) fez importantes considerações sobre a morfologia do Terraço do Rio Grande, apesar de possuir dados escassos provenientes de apenas dois perfis batimétricos realizados pelos cruzeiros VEMA-31 e CONRAD-15. O autor classificou a área como um terraço de abrasão plano horizontalizado, interposto entre a quebra da plataforma e o talude inferior. Cita em seu trabalho que nesta área o relevo é irregular, rugoso e sulcado por canais de vários calibres, abertos e preenchidos. A análise dos perfis indicou que há maior consistência ou dureza nos sedimentos do terraço do que nas áreas adjacentes, sendo uma provável superfície aflorante que não recebeu cobertura sedimentar ou que teve a cobertura removida por abrasão marinha (pré-pleistocênica).

Sobre a sedimentação recente no TRG, Mahiques *et al.* (2019) analisaram curvas de distribuição granulométrica de amostras coletadas em 2017 e encontraram uma grande diversidade, variando principalmente entre areia e silte, e com argila como classe secundária. A

distribuição é muito variada, de unimodal a trimodal, com sedimentos muito mal selecionados. Há uma tendência de diminuição do diâmetro da partícula com aumento da profundidade. A areia na região estava enriquecida em fosforita oxidada e a quantidade de areias fosfáticas diminui em direção aos extremos da área.

Dentre os trabalhos mais recentes realizados no TRG, destaca-se a análise de um testemunho coletado a 2.091 m de profundidade, no limite com o Platô de Santa Catarina, pela Fugro Brasil Ltda., para a ANP. As análises do testemunho SIS-249 buscaram fornecer um melhor entendimento sobre os depósitos sedimentares da área mais profunda da margem continental sul-brasileira e identificar evidências de mudanças nas propriedades dos sedimentos que evidenciassem mudanças climáticas (Lopes *et al.*, 2021). As variações na granulometria e na composição dos sedimentos, encontradas em cada porção do testemunho, indicaram que a Corrente do Brasil pode ter influenciado com maior ou menor intensidade a erosão da parte superior e flancos do TRG, permitindo a acumulação nas regiões mais profundas (Lopes *et al.*, 2021). A influência da Corrente do Brasil varia de acordo com as flutuações do nível do mar durante as glaciações.

4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

4.1. GÊNESE, PROCESSOS E CONTROLES DE MINERALIZAÇÕES FOSFÁTICAS SEDIMENTARES

A mineralização de fosfato sedimentar é controlada essencialmente pela concentração de radicais fosfáticos na água conata dos sedimentos (Figura 4.1). Fatores que favorecem a concentração de fósforo na pilha de sedimento incluem condensação estratigráfica (baixa taxa de sedimentação clástica), águas marinhas óxicas a subóxicas, acumulação de matéria orgânica e, principalmente, atuação de bactérias sulfo-oxidantes como as dos gêneros *Thyoploca*, *Beggiatoa* e *Thyomargarita*, que atuam na decomposição de matéria orgânica (Pufahl, 2010). Neste processo, as bactérias eliminam fósforo na pilha de sedimento, contribuindo ativamente para a concentração do elemento e precipitação de carbonato-fluorapatita. Paralelamente, a difusão de flúor a partir da coluna d'água nos sedimentos é necessária e pode ser limitante na formação da carbonato-fluorapatita (Glenn *et al.*, 1994, Pufahl, 2010).

As zonas de ressurgência (*upwelling*) são áreas onde águas profundas, ricas em nutrientes alcançam a superfície, estimulando o aumento da produtividade primária na

zona fótica e, conseqüentemente, a produção de matéria orgânica (Föllmi, 1996; Glenn, 1994; Pufahl, 2010). Conforme pode ser visto na Figura 4.1A, a precipitação de matéria orgânica ao longo da coluna d'água e conseqüente acumulação na pilha de sedimentos favorece a atuação de bactérias sulfo-redutoras, que degradam a matéria orgânica e produzem H_2S . Por sua vez, H_2S é fonte de energia para bactérias sulfo-oxidantes que, ao decomporem a matéria orgânica, concentram o fósforo na água conata (Pufahl, 2010), formando um ciclo de *feedback* positivo. Quanto mais eficiente for a corrente de ressurgência e quanto maior a acumulação de matéria orgânica, melhor o potencial para a acumulação de fosfato no sedimento, caso a coluna d'água mantenha-se de óxica a subóxica. Portanto, a extensão em profundidade da oxigenação da água impacta diretamente a extensão do depósito em relação à costa.

Considerando o modelo de ressurgência de quebra de plataforma (rQPC) induzida pela ação dos vórtices, proposto por Campos *et al.* (2000), torna-se evidente que as taxas de fornecimento do fósforo para os processos biológicos dependerão do período de recorrência desses vórtices e da duração de sua atuação sobre a quebra de

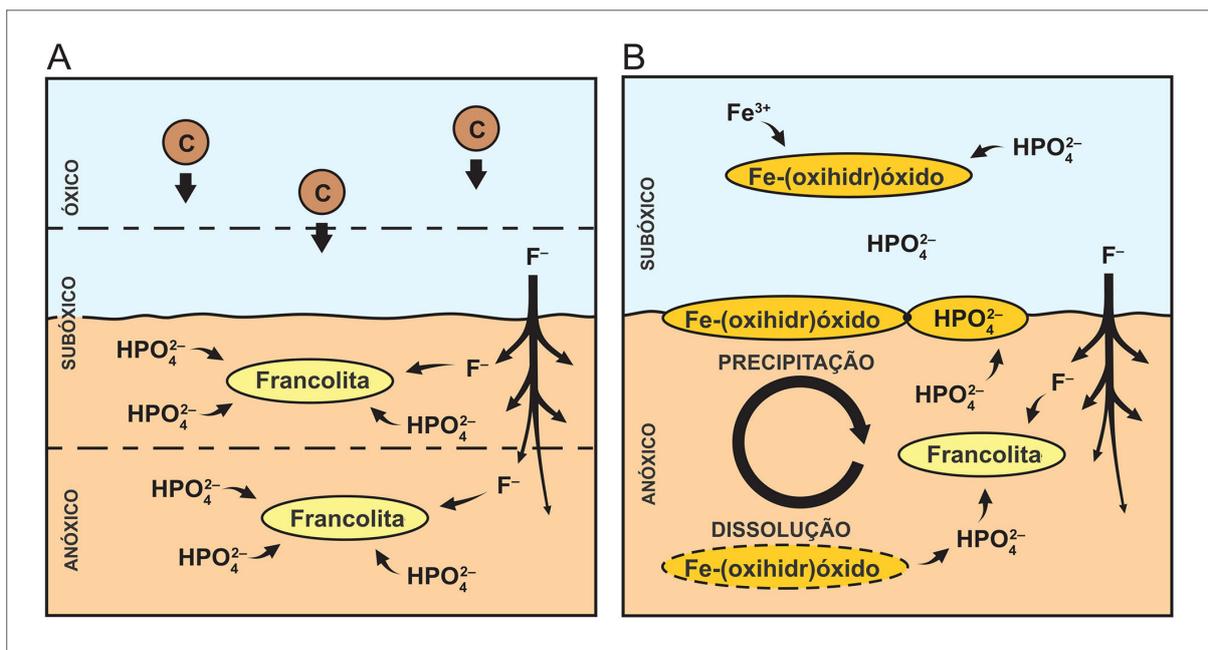


Figura 4.1 - Principais processos de acumulação de fósforo na pilha sedimentar para formação de depósitos de fosforito sedimentar econômico. A) Ambientes de ressurgência, com intenso aporte de matéria orgânica para o assoalho. B) Ausência de ressurgência e concentração de fósforo por bombeamento químico de Fe. Modificado de Pufahl (2010).

plataforma continental (QPC). Na costa do Rio de Janeiro, os vórtices são praticamente estacionários, crescendo e decaindo praticamente no mesmo local (Biló, 2015); na margem continental sul-brasileira, entretanto, os vórtices de mesoescala possuem velocidades de propagação significativas, como será mostrado adiante. Dessa forma, é provável que os episódios de rQPC causados pela ação dos vórtices sobre o TRG, sejam significativamente menos frequentes do que aqueles que ocorrem na costa do Rio de Janeiro, ocorrendo durante o curto período (de poucos dias) em que um vórtice estaria sobre a área. Entretanto, fenômenos de menor escala, como os apontados por Mahadevan (2019), poderiam atuar de forma praticamente contínua, com a ressurgência ocasionada por eles, intensificada periodicamente com a passagem dos vórtices de mesoescala.

O tempo de formação de apatitas autigênicas primárias está na casa dos milhares a dezenas de milhares de anos e requer estabilidade da pilha sedimentar no limite oxidativo, traduzida em baixas taxas de sedimentação no fundo oceânico. Essa formação primária de fosfato é laminar ou peloidal e oscila em profundidade dentro dos primeiros centímetros da pilha sedimentar. Sucessivas lâminas fosfáticas podem formar depósitos métricos de fosfato, denominados pristino, e apresenta teores máximos em torno de 6% de P_2O_5 . Contudo, a formação de depósitos econômicos de fosfato, denominados fosforitos ($>18\% P_2O_5$), dependem do retrabalhamento hidráulico de depósitos pristinos semiconsolidados, principalmente por tempestades, para gerarem depósitos tipicamente econômicos. Esse retrabalhamento remove o material inconsolidado e relativamente estéril por ação de ondas, tempestades, ou combinação dos dois, concentrando naturalmente o material fosfático mais coeso e denso. Portanto, o melhor potencial para fosforitos é onde o retrabalhamento hidráulico dos sedimentos atuou sobre fábricas de pristina bem estabelecidas.

Os principais controles de mineralização estão relacionados à zona de influência das correntes de ressurgência, a eficiência do retrabalhamento hidráulico e da fábrica de pristina (Figura 4.2; Pufahl & Groat, 2016). Esse retrabalhamento pode ser causado por ação conjunta de tempestades, correntes de turbidez e correntes de fundo (conturitos).

Próximo à pycnoclina, a mistura de fluxos, comumente, gera turbilhonamentos que podem desestabilizar o terreno, causando colapso e conseqüente correntes de turbidez. Neste caso, o acúmulo de partículas grandes, tais como concreções, é influenciado pela frequência e intensidade do turbilhonamento. Essa configuração pode estar relacionada à interseção da pycnoclina com a superfície do assoalho oceânico. Depósitos de corrente de fundo ou conturitos são feições deposicionais e erosivas formadas pela ação de correntes de fundo. A

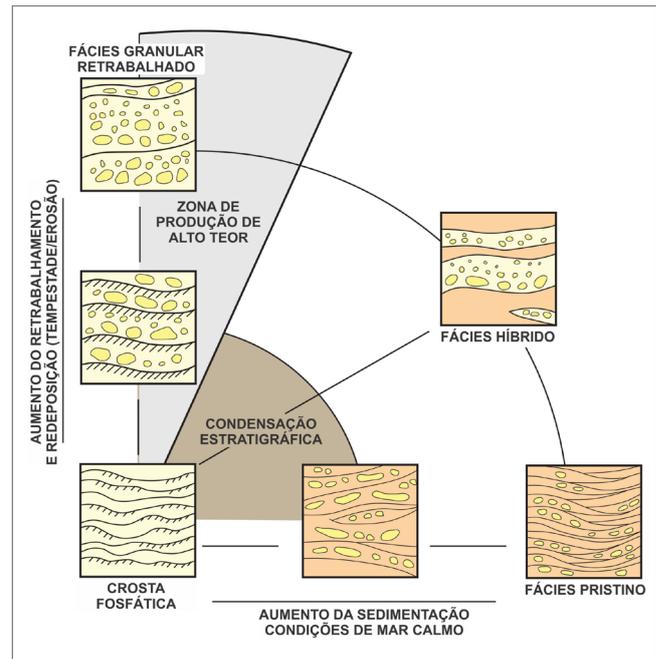


Figura 4.2 - Parâmetros considerados na avaliação de eficiência do retrabalhamento de fosfato sedimentar: condensação estratigráfica, taxa de sedimentação e intensidade/frequência de tempestades e processos erosivos. Modificado de Pufahl e Groat (2016).

complexidade das feições traz desafios para o entendimento da hidrodinâmica em plataformas continentais, porém traz oportunidades que não tiveram tanta atenção no passado.

4.2. CONTEXTO OCEANOGRÁFICO

4.2.1. O sistema Corrente do Brasil

A região da quebra da plataforma continental (QPC) e do talude na margem continental sul-brasileira é afetada por um conjunto complexo de escoamento oceânico permanente conhecido como sistema Corrente do Brasil - CB (Silveira *et al.*, 2000). A porção superficial (e mais conhecida), delimitada entre a superfície e 1500 m de profundidade, compõe o ramo ocidental do giro subtropical do Atlântico Sul (Figura 4.3A), dividida entre a Corrente do Brasil - CB (0-500 m) e a Corrente de Contorno Intermediária - CCI (500-1500 m). Ao sul de 28°S (e próximo à área de interesse), ambas as correntes fluem para sul-sudoeste (Müller *et al.*, 1998; Boebel *et al.*, 1999), na prática configurando um escoamento único e coerente (Figura 4.3B).

A Corrente do Brasil (CB) e os escoamentos intermediários a ela associados são conhecidos por serem jatos fracos e hidrodinamicamente instáveis, passíveis de desenvolverem meandros e emitirem anéis ao sofrerem perturbações externas (Rocha *et al.*, 2014), dentre as

quais a mudança na orientação do contorno oeste (linha de costa ou de QPC). A geometria dos terraços na região do TRG, que avançam cerca de 100 km oceano afora, introduz mudanças abruptas na orientação da QPC e das isóbatas do talude, sendo uma importante fonte de perturbação das correntes de mesoescala que fluem ao longo do talude. Não obstante, a CB é conhecida por desenvolver meandros vultosos e recorrentes ao longo da margem sul (Garfield, 1990; Campos *et al.*, 1996), provavelmente associados aos diversos embaixamentos presentes na QPC (Duarte & Viana, 2007). Um desses vórtices, amostrado em novembro de 2013 e descrito por Biló (2015), foi registrado exatamente ao largo da área de interesse do Projeto Fosforita do SGB-CPRM, situado na isóbata de 1500 m, à latitude de 29°S, com velocidades de até 30 cm/s.

O efeito dessas feições vorticais para o ambiente de talude inclui correntes intensificadas, variáveis espacial e temporalmente, e acentuação dos gradientes ambientais (temperatura, salinidade, propriedades químicas e concentração da biota planctônica). Ademais, a interação entre as correntes transientes e o fundo provoca ressuspensão e transporte do sedimento, matéria orgânica e nutrientes, episódios conhecidos como tempestades bênticas (Gardner *et al.*, 2017). Considerando o fato de os vórtices possuírem escalas de duração de semanas e serem feições recorrentes na margem continental sul-sudeste brasileira, a importância deles para a dinâmica ambiental (geomorfológica, ecossistêmica e física) não deve ser negligenciada.

4.2.2. Massas d'água

As correntes de contorno oeste que fluem ao largo da margem sul-sudeste brasileira transportam, entre a superfície e 2500 m, cinco massas d'água de características e origens distintas e que determinam a zonação, na vertical (e talude abaixo), das propriedades químicas da água, determinando a distribuição das comunidades bênticas de acordo com os teores de oxigênio dissolvido e nutrientes, além da disponibilidade da matéria orgânica (Figura 4.4).

De acordo com Silveira *et al.* (2000), a Água Tropical (AT), definida pela temperatura acima de 20°C e salinidades maiores que 36 psu, é formada no interior do giro subtropical do Atlântico Sul pela da evaporação e aquecimento das águas superficiais. A AT é transportada para sul pela CB dentro da camada limite superficial, sendo restrita a cerca de 100 m de profundidade e caracterizada por ser pobre em sais nutrientes.

Entre 200 e 500 m, flui a Água Central do Atlântico Sul (ACAS), oriunda da região da Confluência Brasil-Malvinas (CfBM) e caracterizada pelos valores de temperatura entre 6°C e 20°C e de salinidade entre 34,6 e 36 psu. A

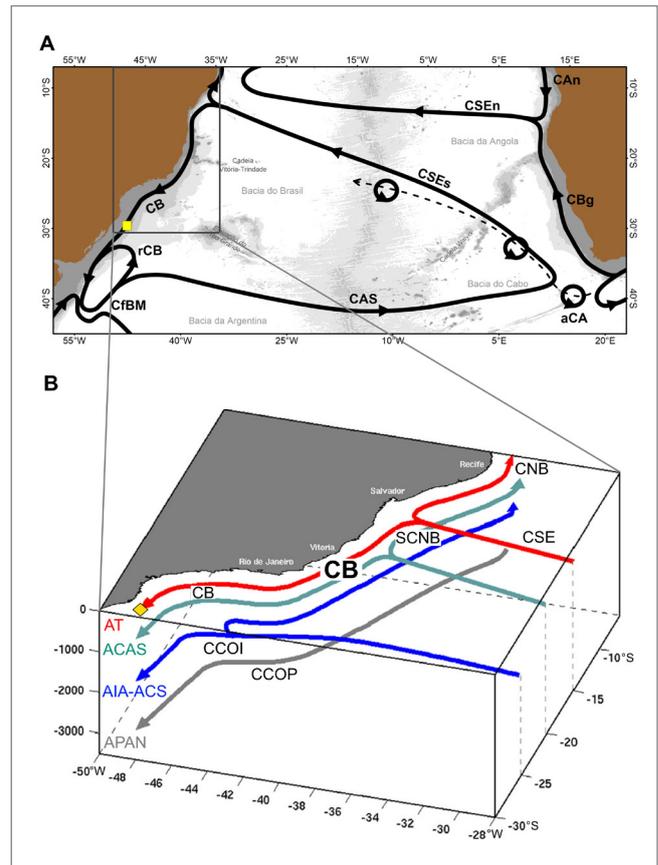


Figura 4.3 - A) Esquema simplificado da circulação superficial média do Atlântico Sul, dando destaque para o giro subtropical e as correntes que o formam: Corrente do Brasil (ramo oeste), Corrente do Atlântico Sul (ramo sul) e Corrente Sul Equatorial (ramo nordeste). Adaptado de Talley *et al.* (2011). **B)** Esquema da circulação de contorno oeste, junto à margem continental brasileira. A margem S-SE é afetada pelas correntes do Brasil (CB), Intermediária de Contorno Oeste (CCOI), Profunda do Contorno Oeste (CCOP), que transportam as massas d'água Tropical (AT), Central do Atlântico Sul (ACAS), Intermediária Antártica e Circumpolar Superior (AIA-ACS) e Profunda do Atlântico Norte (APAN), respectivamente. Indicadas ainda as correntes Norte do Brasil (CNB), Subcorrente Norte do Brasil (SCNB), ambas compondo o ramo norte superficial da bifurcação da Corrente Sul Equatorial (CSE), Adaptado de Biló (2015). A área de estudo está indicada pelo polígono amarelo.

ACAS é responsável por frequentes episódios de eutrofização da plataforma continental no verão, conhecidos como ressurgência, quando ocorre exportação volumosa de matéria orgânica da camada superficial para o fundo (Castro, *et al.*, 2006).

Entre 600 e 1500 m de profundidade são encontradas duas massas d'água intermediárias – Água Intermediária Antártica (AIA) e Água Circumpolar Superior (ACS), as últimas transportadas com o giro subtropical. A característica mais marcante desses corpos d'água é a baixa salinidade (34,2 – 34,6 psu), e, no caso da AIA, altos teores de oxigênio (Mémery *et al.*, 2000); a ACS, por sua vez, é pobre em oxigênio devido à decomposição bacteriana

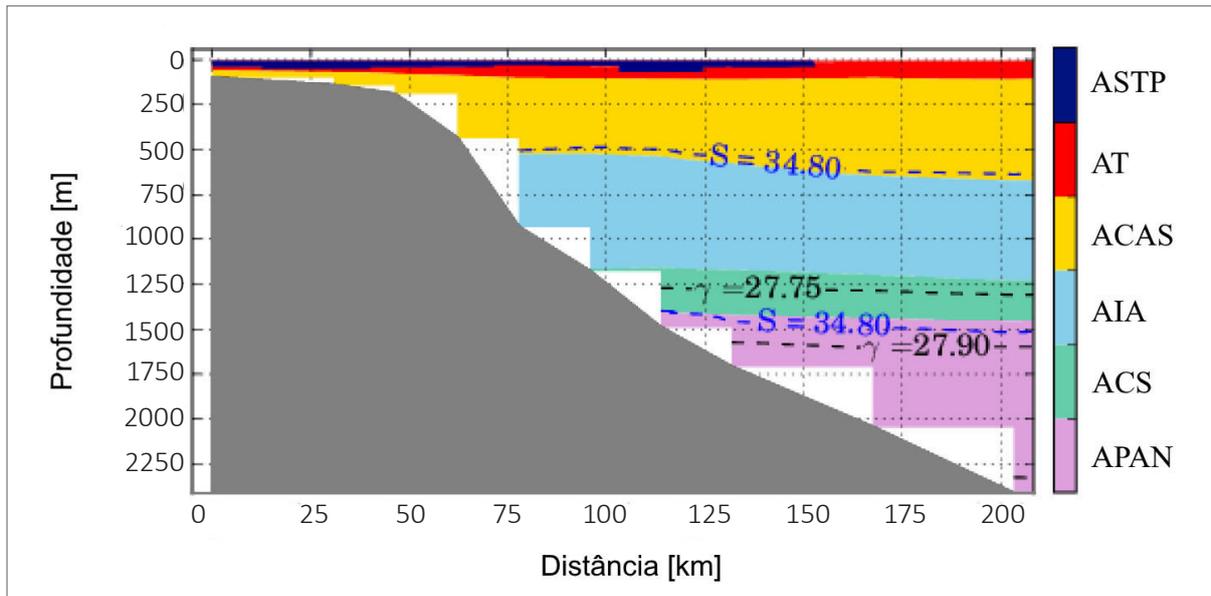


Figura 4.4 - Massas d'água atuantes junto à margem sul brasileira a 29°S. ASTP = Água Subtropical de Plataforma (azul), AT = Água Tropical (vermelho), ACAS = Água Central do Atlântico Sul (amarelo), AIA = Água Intermediária Antártica (azul), ACS = Água Circumpolar Superior (verde), APAN = Água Profunda do Atlântico Norte (magenta). S e γ (gama) indicam as isolinhas de salinidade (psu) e de densidade neutra (kg.m⁻³), respectivamente. O relevo abaixo da seção está demarcado em cinza. Adaptado de Biló (2015).

atuante nessas profundidades e a sua idade (Tsuchiya *et al.*, 1994; Mémerly *et al.*, 2000). Tal variação das propriedades químicas em poucas dezenas de metros na vertical, implica na existência de acentuados gradientes biológicos ao longo do talude, com consequências diretas para a biodiversidade e abundância de organismos.

Em profundidades abaixo de 1500 m, é encontrada a Água Profunda do Atlântico Norte (APAN), com temperaturas entre 3°C e 4°C e salinidades entre 34,35 psu. Oriunda das regiões subpolares do Atlântico Norte, ela flui ao sul junto à margem continental americana, transportada pela Corrente Profunda de Contorno Oeste.

Por fim, sobre a plataforma continental sul-sudeste, águas com salinidade menores que 36 psu e com temperaturas menores que 16°C são encontradas sendo transportadas para norte, podendo atingir latitudes de até 23°S (Campos *et al.*, 1996). Tais águas são resultado da mistura entre a AT e a drenagem continental (Piola *et al.*, 2000) proveniente dos grandes rios e lagoas da região como o Rio da Prata e as lagoas dos Patos e Mirim (Castro *et al.*, 2006). Essa mistura é conhecida como Água Subtropical de Plataforma (ASTP) e seu núcleo, com maiores teores de água interior (e, portanto, mais frio e menos salino), é transportado junto à costa pela Pluma do Rio da Prata (PRP).

4.2.3. Circulação de Plataforma

As correntes na plataforma continental sul são geradas por três forçantes, aqui apontadas na ordem decrescente de importância para a região de interesse situada próxima

à quebra de plataforma: influência da CB, atuação dos ventos e gradientes de densidade devido à descarga continental (Castro *et al.*, 2006). A influência da maré, embora significativa em outras porções da margem continental brasileira, aparenta ser mínima na região, como constatado pelas medições diretas por Zavialov *et al.* (2002). De forma sucinta, a PCS na região do TRG pode ser dividida em três compartimentos de acordo com o tipo de circulação que neles prevalece, conforme Castro (1996):

- i) Plataforma externa (região com profundidades maiores que 200 m), dominada pela CB e seus meandros, com circulação predominantemente para S-SW;
- ii) Plataforma interna (região com profundidades menores que 50 m), dominada por correntes cujo sentido varia ao longo do ano e associadas à descarga continental;
- iii) Plataforma média (profundidades entre 50-200 m), cuja circulação é regida pelo vento e sofre influência dos regimes costeiro e oceânico.

Conforme mencionado, a CB flui ao longo do talude e influencia diretamente regiões entre as isóbatas de, aproximadamente, 200 e 2.000 m. Nessa região, o escoamento é predominantemente para S-SW. Fora esse domínio, seu efeito se dá pelos vórtices; aqueles formados sobre a QPC atuam no sentido de misturar águas oceânicas com as de plataforma. Dependendo da intensidade do evento e da largura local da PC, águas oceânicas advectadas plataforma adentro pela ação do vórtice, podem atingir regiões mais rasas, revertendo o escoamento atuante e alterando por completo o regime hidrográfico local (Silveira *et al.*, 2000).

A região costeira, por outro lado, é dominada por escoamentos sazonais, cujo sentido e magnitude varia em função da época do ano e da latitude. Ao sul do Cabo de Santa Marta Grande (à latitude de 28°30' S), que separa a PCSE da PCS, a circulação junto à costa é predominantemente para norte durante o ano todo (Zavialov *et al.*, 2002). Essa corrente, impulsionada pelas passagens periódicas de frentes frias, tem origem nas descargas de águas continentais através dos vertedouros como o Rio da Prata, lagoas Mirim e dos Patos, mais frias e menos salinas, denominados, de forma genérica, como Pluma do Rio da Prata (PRP), cuja mistura origina a Água Subtropical de Plataforma (ASTP, Piola *et al.* 2000). A atuação da PRP pode se estender, nos meses de outono e inverno, até a latitude de 23°S, e seu avanço para o norte junto à costa se dá em pulsos intensos, seguindo a passagem dos transientes atmosféricos. Durante tais pulsos, podem ocorrer trocas energéticas entre a PRP, fluindo para o norte, e a água de plataforma, fluindo para o sul, gerando vórtices e ondas de cisalhamento. Ademais, a interação entre a PRP e os meandros da CB, aliada à morfologia da PCS, favorece o estabelecimento de regiões de alta produtividade, correspondentes a altas taxas de sedimentação (Mahiques *et al.*, 2010).

Por fim, o escoamento na plataforma média, geralmente determinado pelo vento (e, portanto, reversível de acordo com o sistema atmosférico atuante) constitui, em termos das propriedades hidrográficas, uma mistura entre os regimes de plataforma externa, dominada pela CB e seus meandros, e a interna, dominada pela PRP (Castro *et al.*, 2006).

4.2.4. Correntes Secundárias

O escoamento oceânico de mesoescala pressupõe, dentre várias restrições, movimentos ao longo das isóbatas. Dessa forma, as grandes correntes e mesmo feições mais locais tendem a evitar mudanças abruptas da profundidade, restringindo trocas de massa entre a PC e o oceano aberto. Entretanto, algumas configurações do escoamento violam esse princípio; nessas situações, fluxos plataforma-oceano tornam-se possíveis, principalmente na superfície oceânica e junto ao fundo, dentro das camadas limite (CL) superficial e bêntica.

A ressurgência (*upwelling*) é caracterizada pela divergência horizontal dentro da CL superficial e, por continuidade, do estabelecimento do escoamento compensatório vertical abaixo da CL. Essa divergência pode ser causada pela ação do vento e sua relação com o oceano superior através da dinâmica de Ekman, ou escoamentos ciclônicos (vórtices ou correntes com cisalhamento lateral). Dado tempo suficiente, a água da camada superficial pode vir a ser substituída pela subpicnoclínica, mais densa.

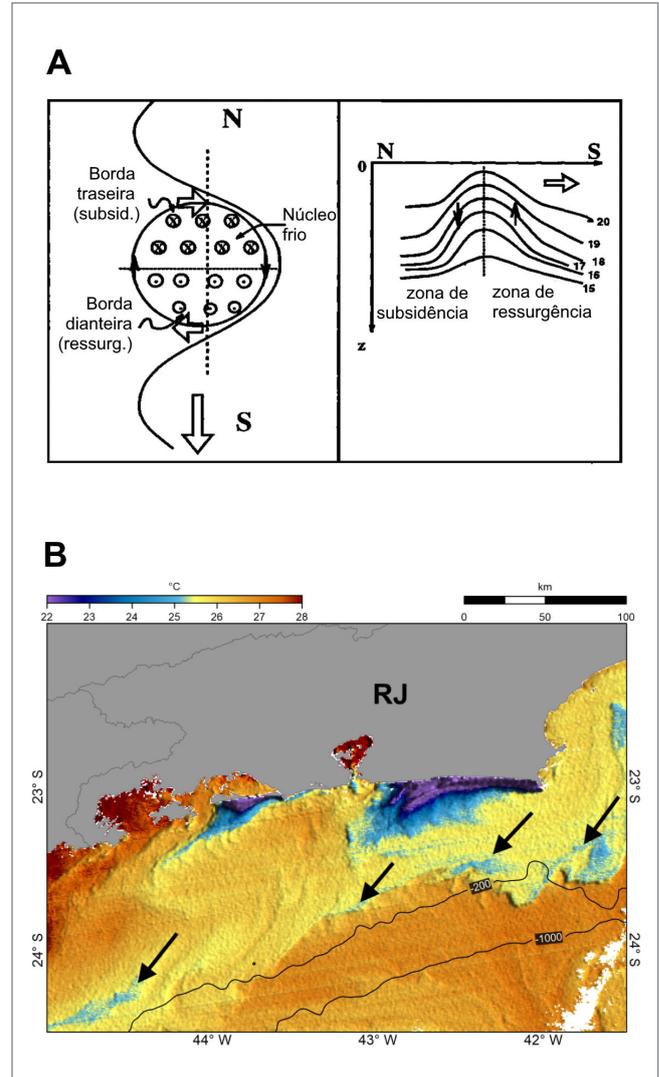


Figura 4.5 - A) Esquema simplificado da dinâmica da ressurgência de quebra de plataforma (rQPC) associada à atuação de vórtices ciclônico. A ressurgência é caracterizada pelo envergamento das isopicnais em direção à superfície, evidenciando o afloramento da água subsuperficial, na porção frontal do vórtice. Extraído de Campos *et al.* (2000). **B)** Imagem de satélite termal (Suomi-NPP, sensor VIIRS, de 09/04/2021) revelando as franjas de água mais fria (indicadas por setas pretas) afloradas junto à isóbata de 200 m pela ação de um vórtice ciclônico ao largo da costa do Rio de Janeiro. Observar também dois focos de ressurgência costeira, mais intensa, na costa do RJ. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

O exemplo mais marcante de ressurgência intensa e recorrente é a região de Cabo Frio (RJ) nos meses de verão; entretanto, há registros de ressurgência costeira desde Espírito Santo até Santa Catarina. Com relação à ressurgência de quebra de plataforma continental (rQPC), seus relatos são mais escassos, dado que o grosso do processo ocorre em subsuperfície, com o afloramento da água fria à superfície ocorrendo apenas em eventos mais energéticos (Figura 4.5). Na costa brasileira, a rQPC foi descrita por Campos *et al.* (2000) ao largo do litoral do estado de São Paulo. Os autores encontraram o

envergamento característico das isopícnais em direção à superfície sobre a QPC, relacionando-o com os vórtices ciclônicos de mesoescala formados pela CB. Segundo esses autores, a atuação da rQPC destaca-se mais no inverno, quando a ressurgência costeira, normalmente mais intensa, cessa. No verão, a rQPC atua no sentido de impulsionar as águas de subsuperfície a adentrarem a PC, onde o vento favorável fornece a energia para advectar essas águas na direção da costa. Esse mecanismo deve ser mais frequente e intenso junto à costa do Rio de Janeiro (Figura 4.5), pois os vórtices ali são praticamente estacionários; na margem sul brasileira, a rQPC, quando ocorrer, deverá ter um caráter mais passageiro, devido à propagação dos vórtices ao longo do talude.

Além do clássico modelo de ressurgência (costeira ou não) induzida pelo vento, há outros mecanismos com potencial de introduzir águas subsuperficiais às camadas superiores do oceano, notadamente variações abruptas da topografia do fundo e feições de pequena escala (e.g., ondas internas e frentes de submesoescala, com duração curta, porém, associados a velocidades verticais com ordens de grandeza maiores, se comparadas àquelas geradas por um vórtice de mesoescala. Tais mecanismos podem atuar de forma independente da ressurgência clássica ou em conjunto com esta, intensificando o processo de afloramento das águas subsuperficiais (Mahadevan, 2019).

No que diz respeito às correntes próximas ao fundo (até 50 m do fundo, espessura aproximada da CL bêntica), ainda que não se tenha conhecimento sobre medições diretas nas proximidades da área de interesse, é possível antecipar algumas formas de existência desse tipo de escoamento, tendo como base a configuração hidrográfica conhecida. A dinâmica dessas correntes está intimamente relacionada com a proximidade do fundo marinho e a atuação maior das forças de atrito, podem ter origem na circulação sobrejacente, seja na forma de um gatilho (e.g., correntes de turbidez) ou uma simples alteração das correntes pelo atrito e pela geometria do fundo (e.g., transporte de Ekman e direcionamento pela topografia). Ademais, existem mecanismos físicos capazes de impulsionar correntes de fundo sem a atuação de um escoamento sobrejacente – notadamente, jatos intermitentes impulsionados pelo efeito conjunto da densidade e da inclinação do fundo (e.g., cascatas e correntes ascendentes). Vale apontar, também, que os mecanismos citados podem atuar simultaneamente, mutuamente reforçando ou inibindo seus efeitos.

Considerando a situação em que uma corrente permanente flui ao longo do talude, estendendo-se até o fundo (como é o caso da margem sul brasileira), a resposta da CL bêntica a esse escoamento se dá através da dinâmica de Ekman. Para uma corrente fluindo para

sul, o transporte de Ekman dentro da CL de fundo se dá para a direita do escoamento principal, portanto, em direção ao continente e subindo o talude (Cushman-Roisin & Beckers, 1994). Esse escoamento teria potencial de contribuir para a ressurgência de quebra de plataforma e suprir nutrientes (incluindo o fósforo) para as camadas superiores (Condie, 1995).

Correntes talude acima podem ser geradas por outros mecanismos, como postulado por Dell & Pratt (2015), após diversas evidências observacionais relacionadas por Thurnherr *et al.* (2005). Aqueles autores descreveram, com base em simulações numéricas, o estabelecimento espontâneo de uma corrente junto ao fundo, num ambiente fracamente estratificado, típico de todos os oceanos, e fundo inclinado, não requerendo atuação de um escoamento prévio. Essa corrente fluiria talude acima, propelida pelo gradiente horizontal de pressão devido à convergência térmica diferencial por conta da inclinação do fundo, à semelhança dos ventos anabáticos que ocorrem em regiões montanhosas. As magnitudes dessas correntes são de poucos cm/s, relatados tanto por Thurnherr *et al.* (2005) por medições diretas, quanto por Dell & Pratt (2015), com base na modelagem numérica.

Em oposição aos mecanismos citados, que gerariam correntes talude acima na margem continental sul, escoamentos talude abaixo podem ser causados por movimentos gravitacionais de massa – água ou sedimento. O primeiro tipo ocorre numa situação em que as águas tornam-se mais densas que as do oceano adjacente, em consequência do resfriamento no inverno. Nessa situação, a instabilidade gravitacional gera uma cascata, deslocando o bolsão mais denso talude abaixo, num evento rápido, com duração de poucas horas e, portanto, bastante difícil de ser observado. As velocidades totais envolvidas também não ultrapassam alguns cm/s (Simpson & Sharples, 2012).

A ausência de medições diretas das correntes, que possam elucidar a natureza do escoamento junto ao fundo na região de interesse, representa um importante obstáculo para estabelecer relações entre a circulação e a geomorfologia da área. Enquanto as correntes de superfície e meia-água fornecem a energia mecânica que propela as de fundo, é a camada limite bêntica o estrato responsável pela transferência de energia entre a água e o substrato, energia que, uma vez atingido o sedimento, irá realizar trabalho no sentido de ressuspender ou erodir as camadas superiores do leito marinho, dada a energia suficiente das correntes. Portanto, compreender esses fluxos de energia mecânica junto ao fundo, através de medições diretas e modelagem numérica, é um passo imprescindível para compreender as relações entre os processos oceanográficos e geomorfológicos locais.

5. ASPECTOS GEOLÓGICOS E AMOSTRAGEM

Geologicamente, a área levantada na pesquisa está inserida no contexto da Bacia de Pelotas, a qual é separada da Bacia de Santos pelo Alto de Florianópolis ou Plataforma Estrutural de Florianópolis (Machado *et al.*, 2010), estendendo-se até o Alto de Polônio na fronteira com o Uruguai (Figura 5.1).

A Bacia de Pelotas é do tipo *rift*, de idade mesozóica, cuja estruturação resulta do processo de abertura e formação do Oceano Atlântico Sul, balizada por esforços tectônicos de ruptura do supercontinente Gondwana, ao longo da abertura e separação da América do Sul e

da África. Ela recobre uma área total de 210.000 km², ocupando cerca de 40.000 km² na porção emersa e estendendo-se offshore até a cota batimétrica de 2.000 m (Abreu, 1998 e Dias *et al.*, 1994).

Segundo trabalhos de Alves (1977); Silveira & Machado (2004) e Fontana (1996), a bacia foi subdividida pelo Arco de Torres em duas regiões geologicamente diferenciadas: a sub-bacia Norte, que compreende o Terraço de Rio Grande, onde foram realizados os levantamentos dos dados da pesquisa (Figura 5.1), e a sub-bacia Sul definida pela região do Cone de Rio Grande.

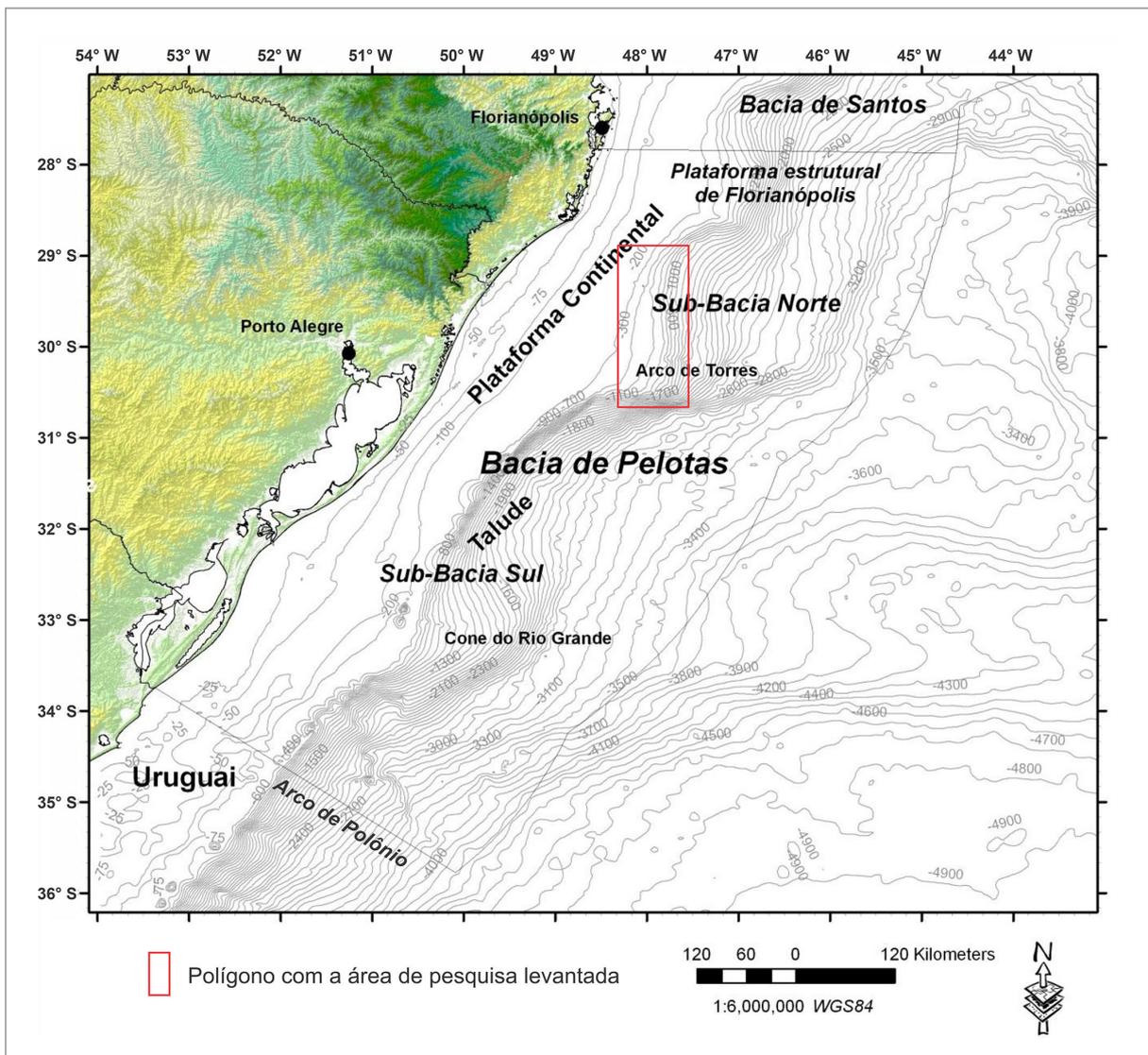


Figura 5.1 - Mapa de localização da Bacia de Pelotas. Fonte: Machado *et al.*, 2010.

De acordo com Santos, (2009); Milani *et al.*, (2000); Zerfass, (2008 e 2009) e Bueno *et al.*, (2007), a bacia apresenta características semelhantes às de outras da margem sudeste-sul brasileira, à exceção da fase evaporítica, a qual é conhecida apenas na porção norte, o que lhe atribui um caráter monótono, pouco deformado.

Conforme estudos de Martins & Martins (1985), as sequências sedimentares e os processos ocorridos na plataforma externa e talude superior são resultantes do material proveniente das terras altas do Rio Grande do Sul (RS) e Santa Catarina (SC) e do complexo deltaico de influência do Rio de La Plata. Esses sedimentos, associados ao material autóctone originado por processos diagenéticos atuantes, formam a sedimentação encontrada na área da pesquisa.

Por meio de estudos envolvendo perfis sísmicos, amostragem de fundo e testemunhos geológicos, foi atestada, por Martins & Martins (1985), uma sedimentação arenoquartzosa e arenoconglomerática bioclástica na borda da plataforma e registros de fluxo gravitacional na região do talude superior na área do RS. Martins *et al.* (1985) revelaram a ocorrência de sedimentos bioclásticos lamosos pleistocênicos, turbiditos terrígenos e bioclásticos, e depósitos por fluxo de grãos pleistocênicos e holocênicos na plataforma externa (SC e RS), congregando uma sequência sedimentar balizada por eventos de glaciação e da transgressão holocênica, com deposição e retrabalhamento dos sedimentos.

A área de pesquisa (Figura 5.1) ocupa parte de duas regiões com características geomorfológicas distintas: o talude superior da margem continental sul-brasileira e o Terraço do Rio Grande (TRG).

O talude superior é normalmente convexo e suave devido a sua origem progradante, o qual foi modelado pela abrasão de ondas e correntes durante os períodos finais das regressões e os períodos iniciais das transgressões marinhas (Zembruski, 1979). O relevo é recoberto por sedimentos de origem holocênica, porém, podem ser encontradas superfícies irregulares de origem pleistocênicas ou pré-pleistocênica, na forma de afloramento de erosões, que podem ser classificados como terraços de abrasão marinha.

O TRG é uma feição protuberante aproximadamente convexa em relação à costa, situada além da quebra da plataforma sobre o Arco de Torres. Apresenta uma morfologia de relevo irregular, rugoso e sulcado por canais de largura variável, abertos e/ou preenchidos por sedimentos modernos (Zembruski, 1979). Alguns perfis ecobatimétricos indicam uma maior consistência e dureza dos sedimentos superficiais para essa área e os cânions e paleocanais, que ocorrem nos seus limites, são conhecidos como Vales Submarinos de Porto Alegre (Fonseca, 2006 e Zembruski, 1979).

5.1. AMOSTRAGEM GEOLÓGICA: METODOLOGIA E RESULTADOS PRELIMINARES

Os dados geológicos obtidos deram suporte às interpretações dos processos que podem estar envolvidos na formação de depósitos de concreções fosfáticas na área de estudo. Foram coletadas amostras de sedimento de fundo, com descrição do material coletado e seleção de concreções. Análises geoquímicas, difração de raios X e petrografia foram feitas a partir das concreções selecionadas, para avaliar os teores de fosfato e feições geológicas associadas.

Até o momento, foram estudados três conjuntos de amostras geológicas na área do projeto. Na Figura 5.2 está representado o posicionamento dos locais de coleta, amostras pretéritas na área do projeto e nos levantamentos geofísicos executados em 2018 e 2020. Na Tabela 5.1 são listados os resultados para os principais óxidos pelo método de fluorescência de raios X.

5.1.1. Amostras Pretéritas

No acervo do Laboratório de Oceanografia Geológica da UNIVALI, há informações da localização de 22 amostras de concreções coletadas aleatoriamente por barcos pesqueiros por redes de pesca de arrasto, ao longo do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, na faixa de 200 a 700 m de profundidade. Desse acervo, amostras unitárias ou formando um conjunto de poucos seixos de 10 locais distintos foram enviadas ao SGB-CPRM para análise quanto à composição química e mineralógica. Na Figura 5.2 somente foram representadas as quatro localidades na área de estudo.

No laboratório da SGS Geosol foram realizadas análises químicas por fusão com tetraborato de lítio e quantificação por XRF (XRF79C) e determinação por fusão com metaborato de lítio - ICP MS (IMS95A). Os resultados para o método XRF79C são apresentados na Tabela 5.1 (Nlab AAZ-553 a AAZ-563).

No Laboratório de Análises Minerais (LAMIN-RJ), foi realizada a análise mineralógica por difratometria de raios X (DRX), em difratômetro modelo X'PERT PRO MPD. As Figuras 5.3 e 5.4 apresentam os difratogramas para amostras com altas concentrações de P_2O_5 , AAZ-558 e AAZ-560. Estão representadas as posições dos principais picos dos minerais identificados por meio de comparação com padrões (fichas) do banco de dados do ICDD-PDF (*International Center for Diffraction Data – Powder Diffraction File*). Na Figura 5.5 estão as fotos das amostras que apresentaram presença significativa de carbonatohidroxiapatita (Ap).

A análise petrográfica de um dos seixos da localização P6, descreveu uma rocha constituída por uma matriz grossa síltica de coloração vermelha amarronzada,

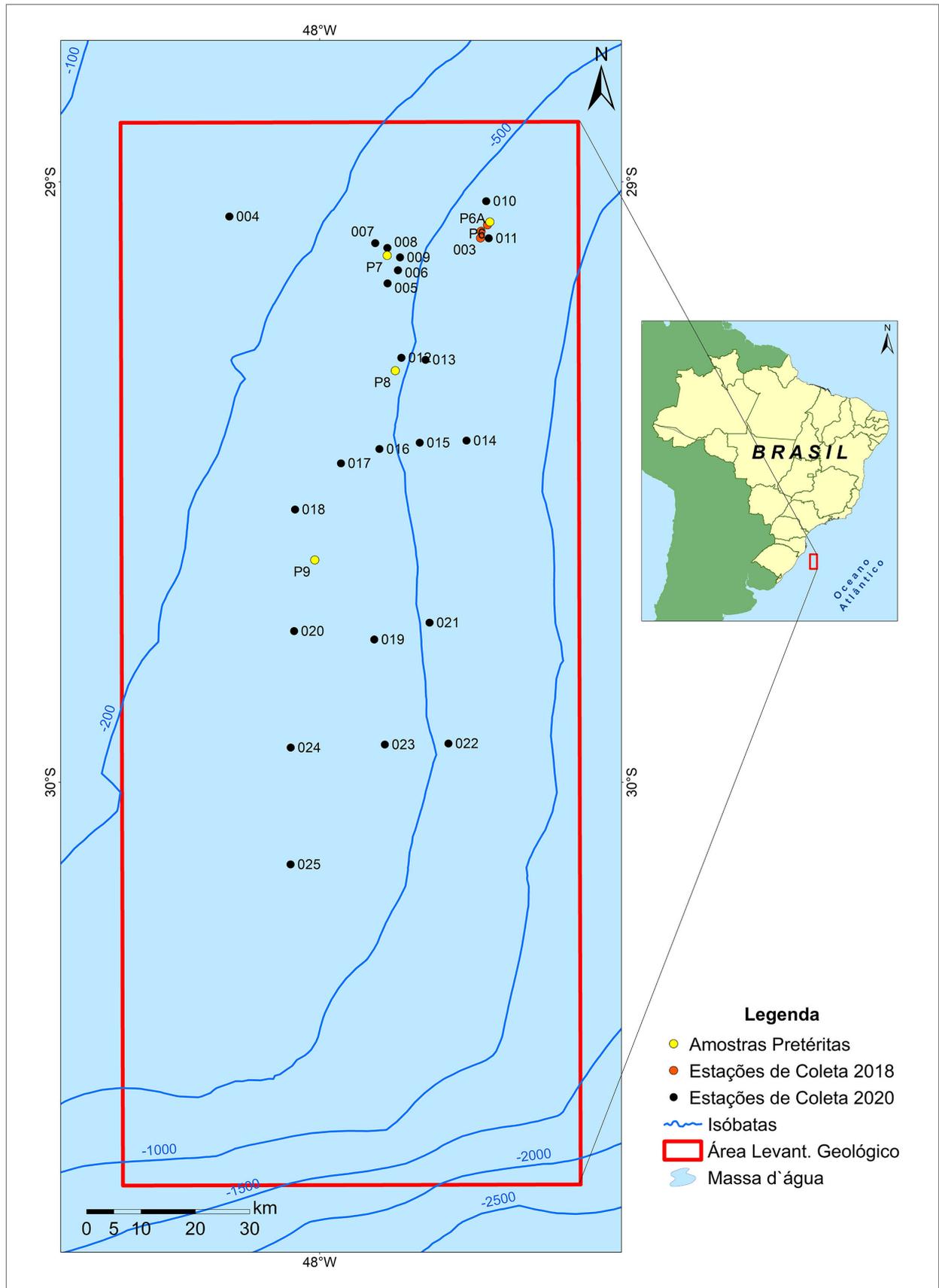


Figura 5.2 - Localização das estações de coleta no Terraço do Rio Grande dos três conjuntos de amostras geológicas estudadas. Fonte: dados extraídos da Base Cartográfica IBGE, 1:250.000, 2017. Autora: Edlene Pereira da Silva, SGB-CPRM / DIGEOM.

Tabela 5.1 - Resultados das análises químicas das amostras por fluorescência de raios X. (método XRF79C). Amostras com texto em negrito pertencem ao grupo “Alto Teor”.

NLAB	ID_CPRM	LOI (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	SrO (%)
AAZ-553	P1	14.40	22.50	1.99	5.00	1.46	1.08	0.07	0.98	0.21	49.40	1.70	-
AAZ-554	P2	24.52	4.38	20.70	11.80	0.87	8.73	0.26	0.88	3.49	23.70	0.36	-
AAZ-555	P3	27.23	4.00	23.10	10.50	0.88	10.10	0.21	0.64	3.86	19.50	0.34	-
AAZ-556	P3A	29.17	4.02	22.00	11.50	0.83	11.10	0.23	0.60	2.37	18.40	0.35	-
AAZ-557	P4	18.77	4.47	24.70	8.67	0.89	6.19	0.18	1.13	8.88	24.80	0.36	-
AAZ-558	P6	7.58	5.62	25.00	6.70	0.97	0.88	0.08	1.69	14.22	34.00	0.49	-
AAZ-559	P6A	7.47	5.57	26.30	3.46	0.96	0.78	0.08	1.69	15.06	36.00	0.48	-
AAZ-560	P7	7.28	5.64	27.10	3.94	0.99	1.00	0.07	1.69	16.01	33.20	0.48	-
AAZ-561	P8	21.15	4.64	20.00	14.40	0.85	6.53	0.28	0.93	4.37	26.20	0.42	-
AAZ-562	P9	30.33	4.22	21.80	7.09	0.79	12.10	0.23	0.77	0.96	21.60	0.38	-
AAZ-563	P10	19.09	6.91	19.70	11.80	1.28	6.31	0.34	1.30	6.25	25.80	0.29	-
FFU-741	4377-MS-R-0001a	8.70	4.74	31.10	3.46	1.10	0.89	0.01	1.53	19.90	28.00	0.49	-
FFU-742	4377-MS-R-0001b	8.80	5.93	27.60	2.68	1.14	0.86	0.06	1.76	16.90	33.80	0.47	-
FFU-743	4377-MS-R-0002Aa	8.90	5.25	28.90	2.25	1.10	0.82	0.08	1.64	17.00	33.70	0.46	-
FFU-744	4377-MS-R-0002Ab	8.90	5.46	28.60	3.52	1.12	0.85	0.07	1.76	17.20	32.00	0.49	-
FFU-745	4377-MS-R-0002Ba	8.00	5.43	22.70	11.00	1.24	0.94	0.11	1.60	14.10	34.30	0.52	-
FFU-746	4377-MS-R-0002Bb	8.00	5.21	26.00	6.45	1.13	0.86	0.08	1.65	16.50	33.60	0.53	-
FFU-747	4377-MS-R-0003Aa	32.10	4.25	17.70	8.98	0.84	9.94	0.57	0.79	0.84	23.60	0.38	-
FFU-748	4377-MS-R-0003Ab	8.00	5.37	27.50	2.77	1.06	0.81	0.05	1.91	16.80	35.30	0.45	-
FFU-749	4377-MS-R-0003Ba	34.60	3.59	22.50	3.20	0.72	12.80	0.29	0.68	0.50	20.70	0.37	-
FFU-750	4377-MS-R-0003Bb	20.30	3.93	21.70	13.60	0.87	5.14	3.26	0.98	9.66	20.30	0.32	-
QVA-300	4377-RB-C-005-a	9.89	4.47	31.50	6.98	0.88	0.96	0.09	1.48	16.85	24.70	0.45	0.19
QVA-302	4377-MS-C-024-a (D)	22.18	4.11	18.40	28.10	0.92	6.47	0.43	0.70	4.20	14.50	0.31	0.05
QVA-303	4377-RB-C-018A-a (D)	25.67	4.19	28.40	14.80	0.87	4.19	0.59	0.65	4.27	15.90	0.28	0.05
QVA-304	4377-RM-C-009-a	12.98	3.48	36.90	7.30	0.75	1.04	0.12	1.23	18.51	15.70	0.29	0.19
QVA-305	4377-MS-C-015A-a (D)	22.67	5.20	17.80	12.20	0.95	8.23	0.34	1.03	2.13	30.40	0.41	0.02
QVA-306	4377-MV-C-011A-a	23.60	5.01	20.20	8.41	0.92	8.75	0.10	1.07	2.83	29.40	0.40	0.03
QVA-307	4377-MV-C-011A-b	23.01	5.25	18.00	11.80	0.96	8.59	0.16	1.12	2.00	29.90	0.45	0.02
QVA-308	4377-MV-C-011B-a	7.55	5.77	28.40	2.96	1.00	0.86	0.09	1.88	16.32	33.50	0.50	0.18
QVA-309	4377-MV-C-011C-a	16.61	5.26	23.80	5.29	0.94	5.74	0.11	1.39	9.04	30.10	0.46	0.11
QVA-310	4377-RM-C-012-a	20.83	5.32	20.90	12.90	0.99	5.79	0.24	1.04	4.29	27.40	0.42	0.04
QVA-311	4377-RM-C-012-b	21.47	5.71	23.50	8.93	1.11	2.50	0.16	1.23	0.71	35.40	0.44	0.03
QVA-312	4377-RM-C-013-a	25.00	5.08	19.00	10.50	0.92	9.61	0.44	1.05	2.07	27.10	0.37	0.02
QVA-313	4377-RM-C-013-b	16.43	6.21	11.40	20.60	1.05	5.54	3.88	1.41	2.88	30.70	0.43	0.03
QVA-314	4377-MV-C-014A-b	33.69	3.69	23.20	12.40	0.62	12.60	0.31	0.49	1.13	12.20	0.26	0.05
QVA-315	4377-MV-C-014B-a	24.15	3.84	18.20	30.30	0.70	7.09	0.26	0.60	3.31	12.20	0.28	0.06
QVA-316	4377-MS-C-015A-a	23.01	5.11	17.30	11.10	0.93	8.63	0.34	1.04	1.92	30.40	0.40	0.02
QVA-317	4377-MS-C-015B-a	18.18	4.91	19.00	14.60	0.91	6.39	0.15	1.11	6.06	28.20	0.38	0.05
QVA-318	4377-MS-C-016-a	21.87	4.90	17.60	14.80	0.90	7.82	0.28	0.98	3.16	27.60	0.44	0.04
QVA-319	4377-RM-C-017A-a	17.35	4.93	26.20	10.40	0.98	2.50	0.26	1.10	7.76	27.60	0.44	0.07
QVA-320	4377-RB-C-018A-a	26.43	4.17	28.70	13.60	0.87	4.45	0.60	0.64	3.85	16.10	0.27	0.05
QVA-321	4377-RB-C-018B-a	24.14	4.11	27.10	21.80	0.81	2.97	0.55	0.59	4.34	13.50	0.29	0.04

Tabela 5.1 - Resultados das análises químicas das amostras por fluorescência de raios X. (método XRF79C). Amostras com texto em **negrito** pertencem ao grupo “Alto Teor”. (Continuação)

NLAB	ID_CPRM	LOI (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	P ₂ O ₅ (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	SrO (%)
QVA-322	4377-RB-C-018B-b	25.62	4.85	26.20	14.40	0.97	4.51	0.54	0.73	2.67	19.50	0.31	0.03
QVA-323	4377-MV-C-019-a	22.56	4.08	27.60	6.88	0.78	8.53	0.10	0.95	9.55	19.20	0.32	0.08
QVA-324	4377-MS-C-020A-a	23.37	4.22	25.30	20.10	0.85	5.14	0.57	0.69	5.75	14.30	0.30	0.06
QVA-325	4377-MS-C-020A-b	26.13	4.16	31.50	14.60	0.70	2.47	0.79	0.68	4.44	14.00	0.29	0.05
QVA-326	4377-MS-C-021-a	25.85	4.45	17.40	15.50	0.76	9.84	0.50	0.84	1.51	23.10	0.36	0.02
QVA-327	4377-MS-C-021-b	12.31	4.02	33.40	7.19	0.81	1.46	0.08	1.37	16.69	20.40	0.35	0.17
QVA-328	4377-RB-C-022A-a	13.87	3.18	36.80	10.80	0.69	1.09	0.08	1.16	17.79	13.80	0.26	0.17
QVA-329	4377-RB-C-022B-a	12.49	3.72	32.20	14.90	0.70	1.13	0.09	1.21	15.86	16.60	0.27	0.15
QVA-330	4377-MS-C-024-a	24.29	4.19	20.60	21.50	0.92	7.27	0.43	0.65	3.89	16.00	0.32	0.03
QVA-331	4377-RM-C-025A-a	23.07	4.09	30.20	9.12	1.17	5.04	0.25	0.86	7.53	18.70	0.37	0.08
QVA-332	4377-RM-C-025B-a	22.42	5.43	21.10	15.90	1.10	4.42	0.17	0.96	1.66	27.90	0.44	0.03

contendo intraclastos arredondados de até 1,5 cm que apresentam uma granulometria fina argilosa. Microscopicamente (Figura 5.6), apresenta duas microfácies com contatos retos.

- Microfácies 1 (M1): granulação fina, predominância de matriz que pode ser de composição fosfática/carbonática, tendo como arcabouço uma grande quantidade de minerais terrígenos, principalmente quartzo, e aloquímicos em menor quantidade. Pode ser classificada como um *packstone*-fosfático (segundo a classificação de Dunham (1962); Cook & Shergold (1986)).

- Microfácies 2 (M2): granulação grossa, tamanho silte, formada predominantemente por aloquímicos e raros siliciclásticos. Ocorre pouca matriz constituída por carbonato micrítico, fosfato e, possivelmente, óxido de ferro. O cimento ocorre sob a forma de calcita espática entre grãos e substituindo alguns bioclasticos. Classificada como um *grainstone*-fosfática (segundo a classificação de Dunham (1962); Cook & Shergold (1986)).
A M2 ocorre sob a forma de matriz da M1. Considerando os aspectos texturais das duas microfácies, pode ser classificada como uma brecha-fosfática (adaptado de

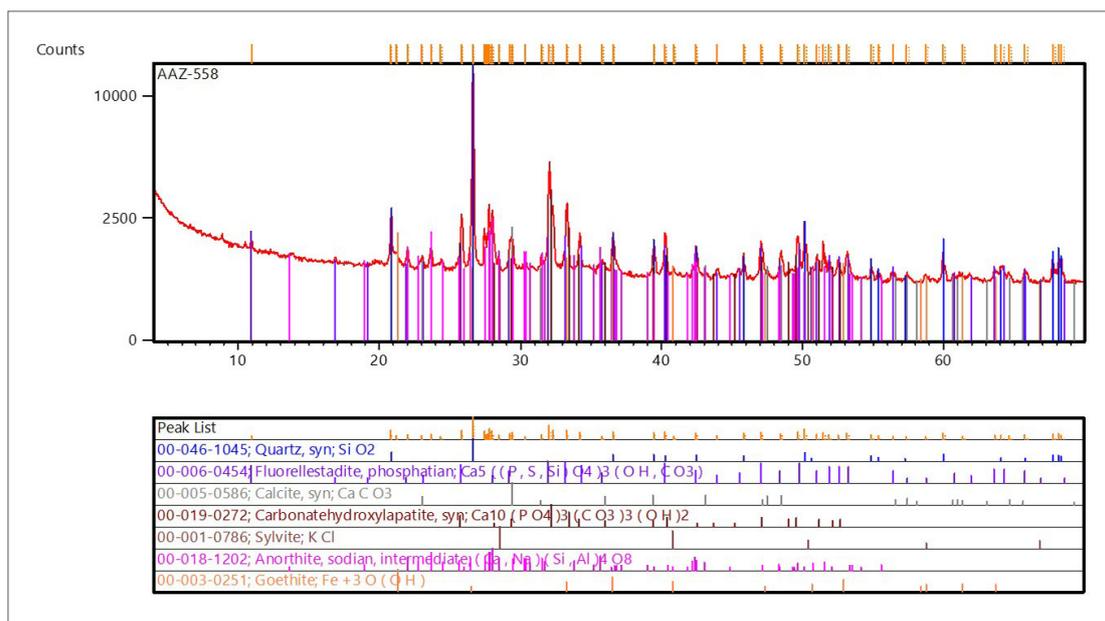


Figura 5.3 - Resultado da análise mineralógica da amostra AAZ-558 (P6), formada principalmente por quartzo e carbonatohidroxiapatita. Fonte: Laboratório de Análises Minerais (LAMIN-RJ).

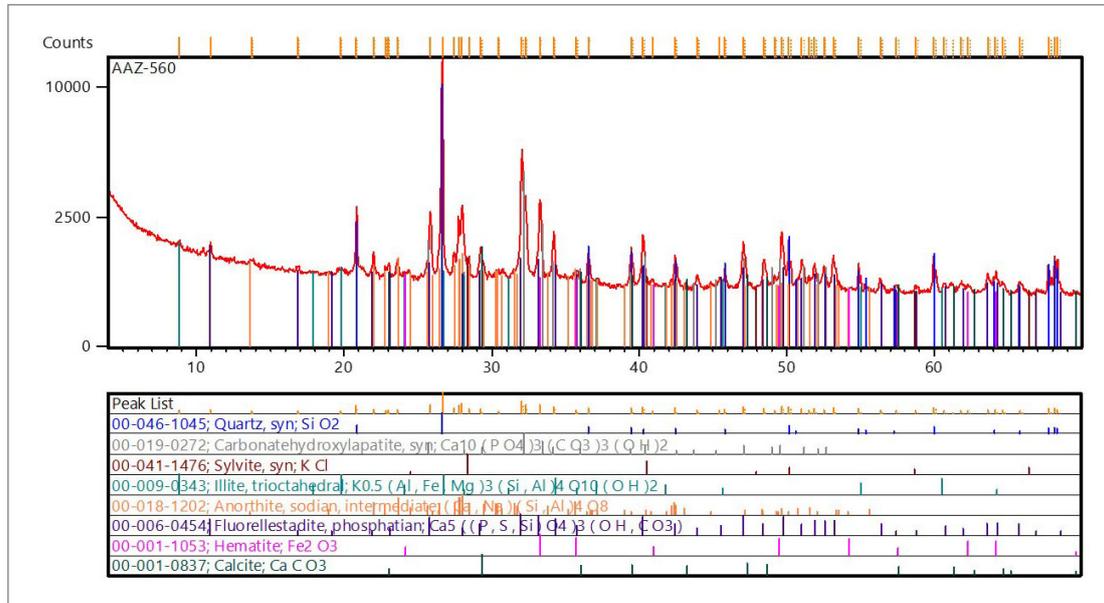


Figura 5.4 - Resultado da análise mineralógica da amostra AAZ-560 (P7), formada principalmente por quartzo e carbonato-hidroxiapatita. Fonte: Laboratório de Análises Minerais (LAMIN-RJ).

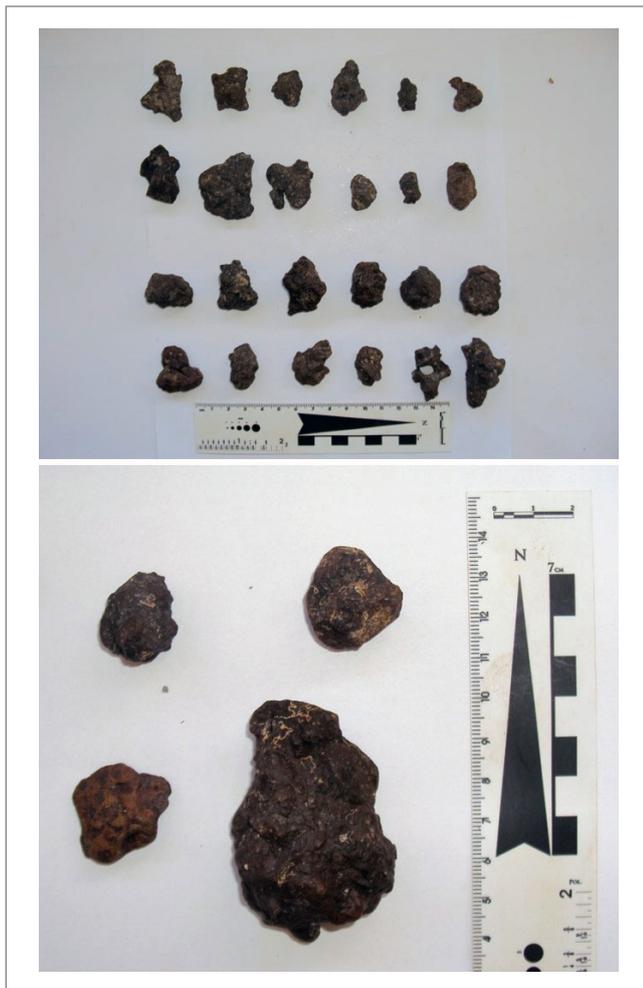


Figura 5.5 - Amostras das localidades ao norte do Terraço do Rio Grande (P6 - AAZ-558 e P7 - AAZ-560). Fonte: acervo fotográfico do Laboratório de Oceanografia Geológica UNIVALI.

Pettijohn, 1973) ou um fosforito retrabalhado (adaptado de Pufhal 2010).

A composição e os tipos de aloquímicos são similares para as microfácies, mudando somente a textura e a quantidade. Os aloquímicos são predominantemente fosfáticos e constituídos por: bioclastos, intraclastos, oóides e pelóides. Dos bioclastos destacam-se os foraminíferos (planctônicos principalmente), ostracodes, algas, fragmentos de conchas, briozoários e bivalves.

5.1.2. Amostragem 2018

Durante o levantamento geofísico de 2018, no período em que houve a manutenção do motor do NPq Atlântico Sul, utilizou-se o tempo que o navio ficou à deriva para amostragem com *Van Veen*, quando foram coletadas amostras contendo areia lamosa e pequenas concreções de granulometria seixo. Foram as três primeiras estações de coleta do projeto, sendo recuperado na totalidade 7,5 kg de material inconsolidado.

Para esse conjunto de amostras, houve um procedimento diferenciado para as análises. Inicialmente, foi feita a seleção de 10 concreções para análise petrográfica e, posteriormente, foram feitas análises pelos métodos de espectrometria de fluorescência de raios X (FRX) e difratometria de raios X (DRX) no LAMIN-RJ, nos tablets que deram origem às lâminas petrográficas. Os resultados, as considerações e recomendações para a continuidade da pesquisa fazem parte do relatório interno sobre a caracterização geológica das amostras (Silva & Alves, 2018). A integração dos dados petrográficos, mineralógicos e geoquímicos permitiu uma

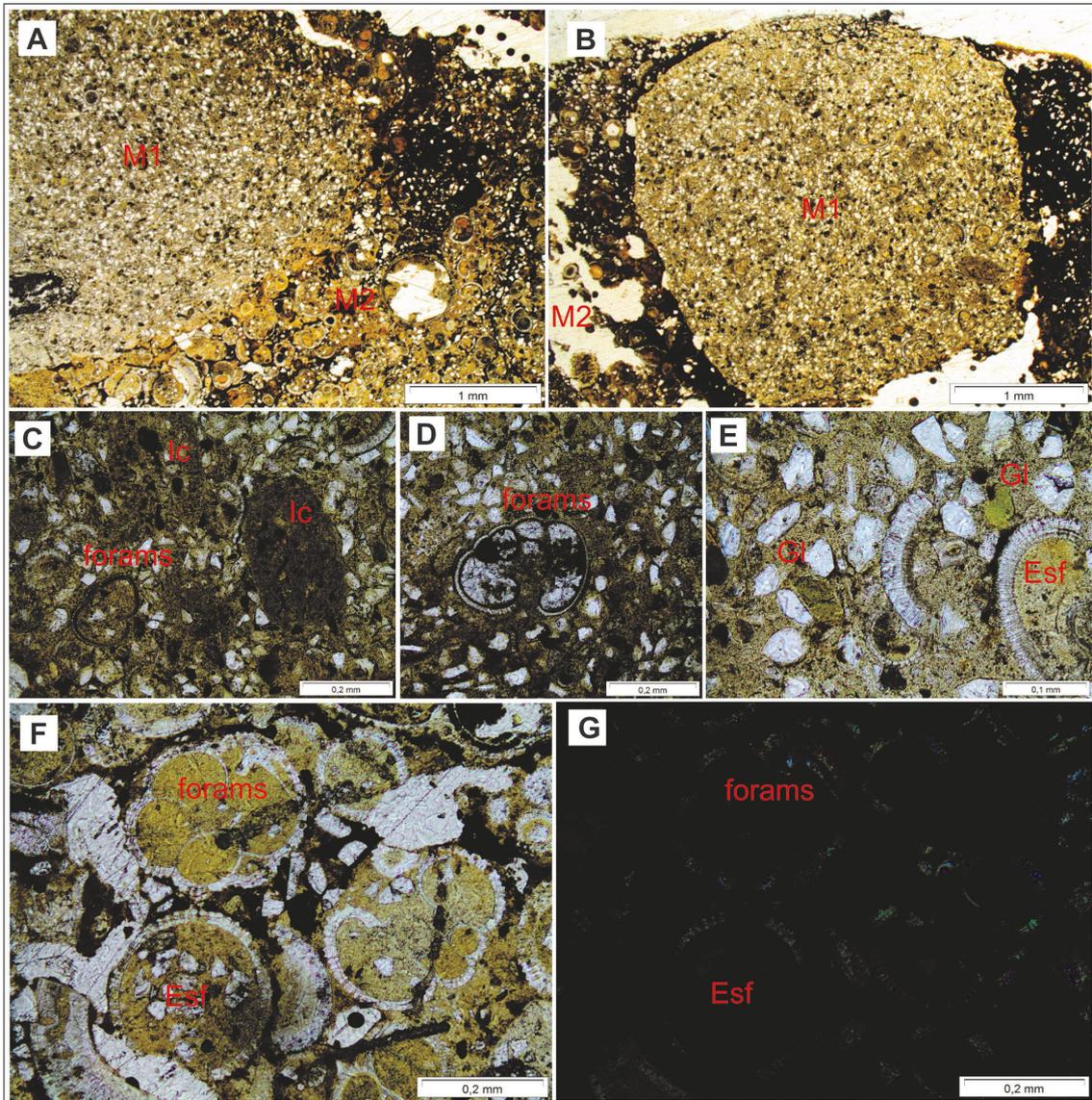


Figura 5.6 - A) Aspecto geral das microfácies (M1 e M2), com destaque para a diferença de textura entre elas; B) Contato das microfácies (M1 e M2), onde M1 ocorre como matriz da M2 (intraclastos); C) Aloquímicos fosfáticos da microfácies M2; D) Aloquímico carbonático da M2; E) Glauconitas da microfácies M2; F) Aloquímicos da microfácies M1; G) Aloquímicos da microfácies M1 extintos, em nicóis cruzados. Ic = intraclastos; forams = foraminífero; Esf = esferulito; Gl = glauconita. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.

melhor compreensão do processo de origem, deposição e retrabalhamento, mas o entendimento da fosfogênese e das condições de sedimentação careciam de algumas análises: bioestratigrafia dos foraminíferos, datação isotópica dos bioclastos, geoquímica para elementos-traços (ETRs), análise do elemento flúor, MEV para identificação dos aloquímicos e química mineral dos grãos e matriz das concreções.

Desse conjunto, uma amostra foi classificada como fosforito (Figura 5.7) com teor de 19,9% (Tabela 5.1, Nlab FFU-741) e as demais, com teores entre 9,66 e 17,2% de P_2O_5 , foram categorizadas como rochas fosfáticas, que segundo critérios texturais e geoquímicos são descritas em brechas intraformacionais fosfáticas

e mudstone/packstone fosfáticos. Na análise de DRX realizadas nas concreções, foi observada uma grande quantidade de minerais comuns a todas as rochas fosfáticas (Figura 5.8).

O fosforito analisado é bastante compacto e endurecido, apresenta coloração vermelha-amarronzada e sem estruturas sedimentares associadas. Na análise petrográfica (Figura 5.7), observa-se uma matriz argilosa com fosfato e ferro, apresenta uma coloração marrom-avermelhada, contendo grãos terrígenos e alguns aloquímicos predominantemente fosfáticos. Os grãos terrígenos têm tamanho silte, são bem selecionados, apresentam contato flutuante, e ocorrem angulosos a subangulosos, são principalmente quartzo

e alguns feldspatos e compõem cerca de 70% do arcabouço. Os aloquímicos ocorrem em menor quantidade e pouco diversificados, sob a forma de intraclastos e raros bioclastos. Os intraclastos são predominantemente fosfáticos com formas arredondadas, de textura muito fina, formado apenas por ortoquímicos (tamanho argila). Algumas formas circulares, semelhantes a nódulos, também foram descritas que nesse caso podem ser compostos por minerais de ferro, têm aspectos de oxidação, e textura fina semelhante aos intraclastos fosfáticos. Os bioclastos são constituídos por foraminíferos e ostracodes. Em geral, esses bioclastos ocorrem substituídos por fosfato, mas podem apresentar carapaça carbonática. Assim, o fosfato ocorre predominantemente sob a forma de matriz criptocristalina, sob a forma de concreções, sob a forma de intraclastos fosfáticos e preenchendo alguns foraminíferos.

Na análise por DRX (Figura 5.8), foi verificada a presença de apatitas autigênicas: carbonato-fluorapatita e fluorapatita, além de calcita e dolomita, fluorita, minerais de ferro como a hematita e goethita, minerais terrígenos com destaque para o quartzo, albita/oligoclásio, microclina e alguns outros minerais, onde é preciso que haja uma análise integrada com os dados geoquímicos, como no caso do xenotímio, monzonita, gipsita e periclásio.

5.1.3. Amostragem 2020

Para a Comissão ERG2020, a bordo do NPqHO Vital de Oliveira, as atividades foram planejadas para a obtenção de dados geofísicos e geológicos do assoalho marinho e de dados físico-químicos da água do mar, com o objetivo de identificar e avaliar a potencialidade mineral de áreas de importância econômica e político-estratégica para o Brasil.

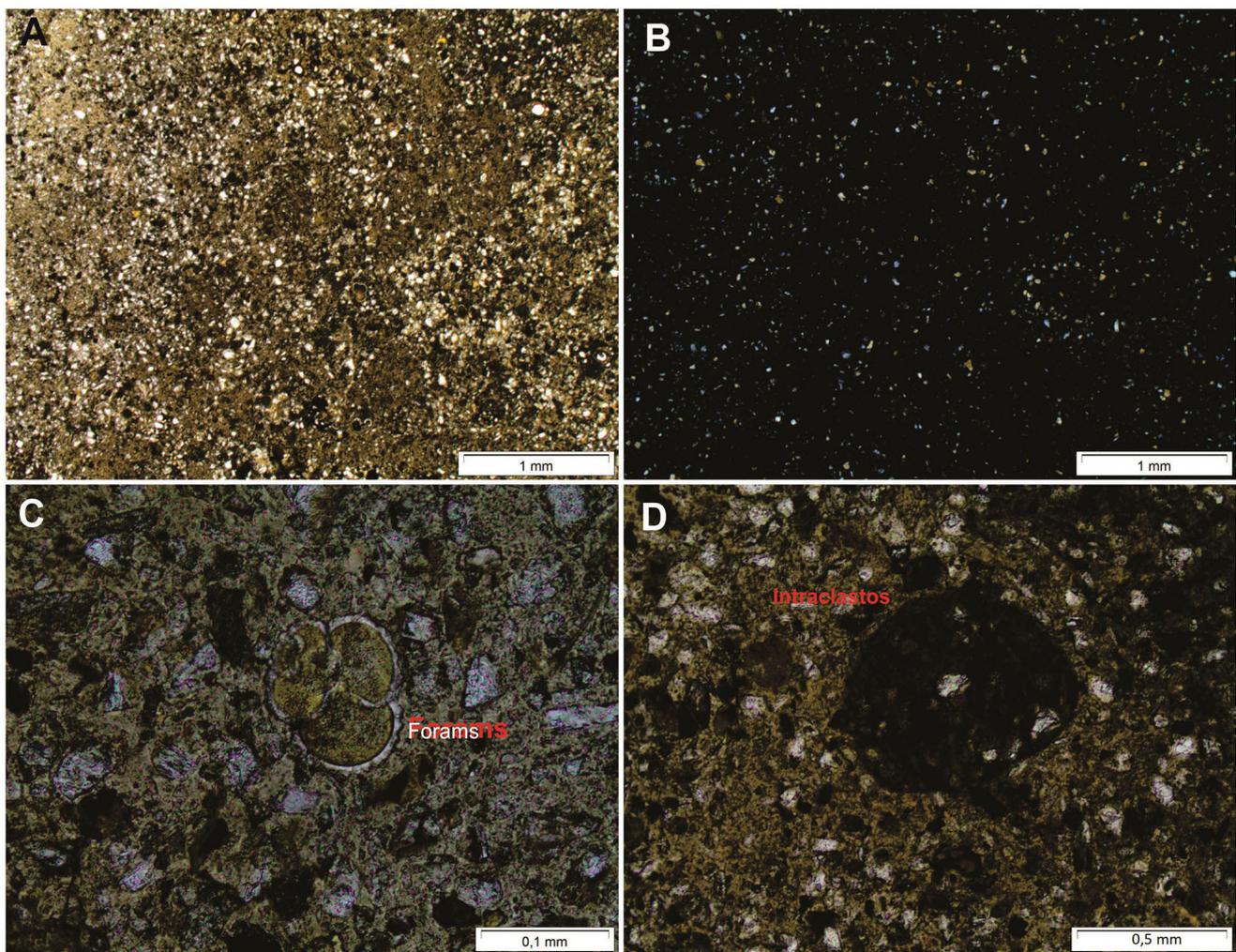


Figura 5.7 - A) Aspecto geral das microfácies (M1 e M2), com destaque para a diferença de textura entre elas; B) Contato das microfácies (M1 e M2), onde M1 ocorre como matriz da M2 (intraclastos); C) Aloquímicos fosfáticos da microfácies M2; D) Aloquímico carbonático da M2; E) Glauconitas da microfácies M2; F) Aloquímicos da microfácies M1; G) Aloquímicos da microfácies M1 extintos, em nicós cruzados. Ic = intraclastos; forams = foraminífero; Esf = esferulito; Gl = glauconita. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.

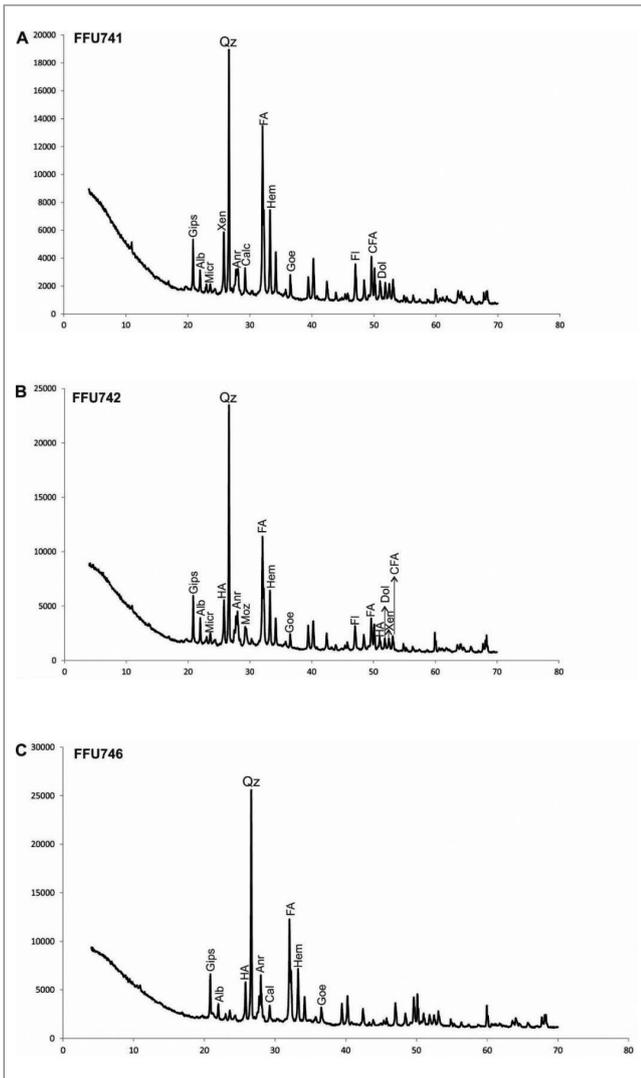


Figura 5.8 - Difratogramas bastante semelhantes, com mineralogia comum às três principais microfácies descritas nas amostras de concreções: A) Minerais relacionados ao fosforito; B) Minerais relacionados às brechas intraformacionais fosfáticos; C) Minerais relacionados aos *packstones/mudstones* fosfáticos. Abreviações: carbonato-fluorapatita (CFA), hidroxiapatita (HA), fluorapatita (FA), xenotímio (Xen), monazita (Moz), fluorita (Fl), hematita (Hem), goethita (Goe), albita (Alb), calcita (Calc), gipsita (Gips) dolomita (Dol), quartzo (Qz). Fonte: Silva & Alves, 2018.

Nessa comissão foi incluída a área do Terraço do Rio Grande, onde juntamente com o levantamento de dados hidrográficos e geofísicos foram coletadas amostras geológicas em 22 estações, com os amostradores de fundo disponíveis no navio:

- *Mega Box Corer Osil*®, construído em aço inoxidável com peso aproximado de 565 kg. O equipamento tem a capacidade de amostrar até 65 cm da camada superior do substrato marinho, preservando sua estratigrafia numa área de 0,25 m² (50 cm x 50 cm). Desce ao fundo com a tampa superior e a lâmina de fechamento aberta até se enterrar no sedimento. Ao ser içado ao convés,

o braço articulado gira em torno de um pivô e a lâmina de fechamento corta o sedimento até fechar totalmente a base da caixa (Figura 5.9)

- *KC Box Corer* 1000 cm², construído em aço inoxidável pela empresa KC Denmark A/S – Research Equipment. Peso aproximado de 340 kg, com dimensões da caixa de 34,5 x 29 x 40 cm, permite amostrar uma área 0,10 m². Possui uma base de apoio, que induziu à mudança no procedimento de descida do equipamento com velocidade mais lenta próximo ao fundo. Passou a ser utilizado nas três últimas estações e, aparentemente, melhorou um pouco a recuperação (Figura 5.10).
- *Van Veen*, fabricado em aço inoxidável pela empresa KC Denmark A/S Research Equipment, com volume interno das conchas aproximado de 50 litros (Figura 5.11).

A localização da maioria das estações foi previamente determinada com base na interpretação de levantamentos geofísicos precedentes, mas algumas foram realocadas ou escolhidas durante o levantamento. Ressalta-se que a taxa de recuperação foi, em geral, baixa em ambos os equipamentos utilizados, possivelmente devido à natureza do fundo que não permitiu uma boa penetração. Apenas em uma estação,



Figura 5.9 - Amostrador Mega Box Corer Osil®. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.



Figura 5.10 - Amostrador KC Box Corer 1000. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.



Figura 5.11 - Amostrador Van Veen 50 litros. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.

a quantidade de material foi considerada satisfatória para a subamostragem por *mini-corers*.

Foram recuperados sedimentos lamosos (lama arenosa ou areia lamosa) e, em algumas amostras, sedimentos arenosos compostos de areia fina a média. Algumas amostras apresentaram estratificação, uma camada de sedimentos de coloração mais clara, oxidada, sobrepunha-se a uma camada de sedimentos de coloração acinzentada verde ou azulada, típica de condições redutoras. Foram coletados cerca de 360 kg de sedimentos, sendo 150 kg acondicionados no freezer e 210 kg em caixas de polietileno.

Misturados ao sedimento, em vários pontos de coleta, foram recolhidas amostras de fosforita de variados tamanhos e aspectos, ora como pequenas concreções de poucos centímetros, de 1 a 5 cm. Em algumas estações foram amostrados nódulos de fosforita bem maiores, medindo de 10 a 20 cm. Foi observado uma grande variabilidade no formato, na cor e no peso (densidade). Muitas concreções e nódulos apresentaram-se com formato arredondado ou retangulares com ângulos retos, faces partidas, alongados ou muito irregulares, algumas achatadas e discoides. Muitas com aspecto massivo, compactas, e outras mais porosas e com muitos orifícios. A coloração também variou de um castanho ou marrom-claro a marrom-avermelhado escuro, com um verniz superficial. Nas estações onde foram observadas a presença das concreções, houve também uma grande variação em relação à quantidade recuperada, de poucas centenas de gramas a nódulos de 30 a 20 kg. Em algumas estações, o volume de fosforitas superou o volume de sedimento.

Foram selecionadas 32 alíquotas (concreções individuais ou em grupo de pequenos seixos) e enviadas para a SGS Geosol para análise dos teores dos óxidos de elementos maiores e menores, elementos-traço e terras-raras (Tabela 5.2). As amostras foram britadas, quarteadas e

Tabela 5.2 - Métodos analíticos utilizados na análise química das concreções.

MÉTODO	ABERTURA	LEITURA	ANALITO
ICM14B	Digestão com água-régia	ICP OES e ICP MS	As, Bi, Ge, Hg, In, Re, Sb, Se, Te e Tl
ICM95A	Fusão com metaborato de lítio	ICP OES/ ICP MS	Al ₂ O ₃ , Ba, CaO, Ce, Co, Cr ₂ O ₃ , Cs, Cu, Dy, Er, Eu, Fe ₂ O ₃ , Ga, Gd, Hf, Ho, K ₂ O, La, Lu, MgO, MnO, Mo, Na ₂ O, Nb, Nd, Ni, P ₂ O ₅ , Pr, Rb, SiO ₂ , Sm, Sn, Sr, Ta, Tb, Th, TiO ₂ , Tl, Tm, U, V, W, Y, Yb, Zn e Zr
XRF79C	Fusão com tetraborato de lítio	Fluorescência de Raios-X (FRX)	Al ₂ O ₃ , BaO, CaO, Cr ₂ O ₃ , Fe ₂ O ₃ , K ₂ O, MgO, MnO, Na ₂ O, P ₂ O ₅ , SiO ₂ , SrO e TiO ₂ .
ISE03A		Íon específico	F
XRF75V	Pó prensado	Fluorescência de Raios-X (FRX)	Cl
CSA17V	Combustão	Infravermelho	C e S
PHY01E	Incineração	Variação da massa	LOI (<i>Loss On Ignition</i> ou Perda ao Fogo)

pulverizadas, seguindo os protocolos estabelecidos e disponíveis para consulta sob demanda.

relação de enriquecimento de fosfato nas concreções menores de granulometria seixo (Figura 5.13).

5.2. DISTRIBUIÇÃO DOS TEORES DE P_2O_5

A partir das amostras analisadas neste projeto, foi possível gerar um mapa da distribuição de P_2O_5 na margem continental sul. As concentrações de P_2O_5 foram divididas em cinco intervalos em termos de percentual (Figura 5.12). Da totalidade das 53 amostras analisadas, 16 apresentaram teores superiores a 14%, sendo duas com teores acima de 18%, consideradas fosforitos. As maiores concentrações estão relacionadas aos seixos que foram coletados na porção norte do TRG e na borda sudeste. Aparentemente, há uma

5.2.1. Elementos maiores

A partir dos teores de óxidos obtidos pelo método XRF79C, foram feitas observações em gráficos de dispersão para pares selecionados (Figura 5.14). A seleção foi feita a partir de elementos e analitos que pudessem trazer luz ao entendimento das relações dos teores e possíveis assembleias mineralógicas. Maior intensificação das análises petrográficas e de difração de raios X, podem auxiliar na definição de fases minerais relacionadas a processos mineralizantes de fosfato e na elaboração de um plano de prospecção mais efetivo.

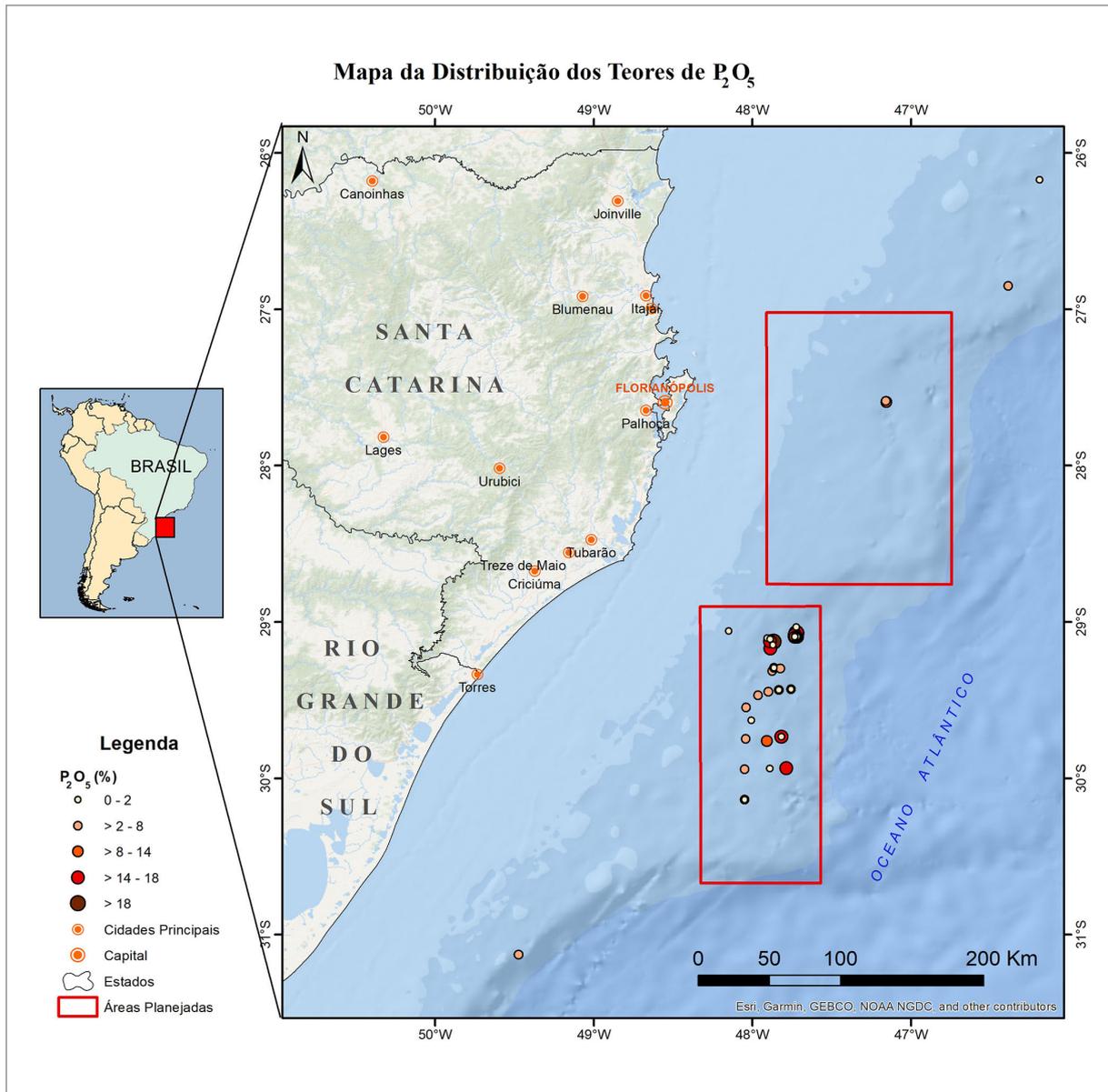


Figura 5.12 - Mapa de distribuição dos teores de P_2O_5 (%) em 53 amostras analisadas. Fonte: dados extraídos da Base Cartográfica IBGE, 1:250.000, 2017. Autora: Edlene Pereira da Silva, SGB-CPRM / DIGEOM.

Quando os teores de P_2O_5 são comparados com outros analitos, destacam-se algumas relações. Por exemplo, a relação P_2O_5 versus SrO forma uma correlação positiva forte e indica que o Ca da francolita foi parcialmente substituído por Sr, o que é esperado em fosfatos autigênicos. Se essa substituição ocorreu durante a precipitação da francolita ou em processos diagenéticos posteriores, ainda há que se verificar. O gráfico

apresenta a formação de dois grupos, que podem ter se formado em idades significativamente distintas e, possivelmente, representar variações de Sr na água marinha em tempos significativamente diferentes. Essa não é uma relação direta e as idades devem ser avaliadas em etapas subsequentes do projeto, de forma a contribuir para o conhecimento dos processos ambientais que ocorreram no passado.



Figura 5.13 - Fotos das amostras analisadas no laboratório da SGS Geosol, cujos resultados para P_2O_5 e F foram considerados altos, característicos da francolita. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM

Outra relação importante é a do P_2O_5 com MgO . No gráfico de dispersão *LOI versus MgO*, é possível ver dois grupos claramente separados, com os teores mais altos com dispersão muito baixa. O MgO está normalmente ligado à formação de dolomita e de minerais de argila. Também, é possível ver no gráfico a correlação positiva no grupo de amostras de baixo teor. A dolomita, que é de comum ocorrência juntamente com os minerais de fosfato, pode responder por parte da correlação positiva. Porém, a relação do MgO com o *LOI* indica que carbonato talvez não seja tão importante para os altos teores de fosfato e sugere que argilominerais como glauconita estejam associados à apatita. De forma geral, os teores mais altos de fosfato estão relacionados a amostras com menor conteúdo de carbonato.

A relação P_2O_5 versus MgO pode indicar origens distintas do fosfato (*e.g.* biogênica ou abiogênica), diferentes processos de precipitação, diagênese, ou uma combinação de diversos fatores. Esse agrupamento também indica que o foco da exploração deve ser regiões onde os minerais de magnésio (*e.g.* carbonatos) estão em menor quantidade. Daí se levanta a necessidade de conhecer melhor a mineralogia, para se entender as etapas de formação dos minerais fosfatados, além de estabelecer as inter-relações entre a geoquímica e os parâmetros a serem utilizados em prospecções futuras.

A distribuição espacial dos teores de fosfato não é clara, possivelmente por causa do pouco conhecimento da estratigrafia e geologia do local. Porém, é possível observar que as amostras com maiores teores são oriundas da Zona Intermediária ou do seu limite com a Zona Profunda. Em ambos os casos, as amostras de alto teor foram obtidas nos locais com dissecação intensa do terreno, o que indica atuação de processos de concentração hidráulica de concreções fosfáticas. Por outro lado, infere-se que o volume de concreções fosfáticas pode ser significativamente restrito às regiões de relevo mais rugoso apenas, o que pode reduzir o potencial para grandes depósitos. A Zona Intermediária deve ser o foco de amostragem por testemunho para campanhas futuras. Também é interessante amostrar a Zona Rasa.

5.2.2. Elementos Menores e Traço

Os métodos analíticos utilizados para quantificar elementos menores e traço foram ICM14B e ICM95A. Os analitos têm sobreposição parcial com as análises de elementos maiores pelo método XRF79C. Por exemplo, o estrôncio (Sr) é lido de forma elemental no método ICM95A, mas também consta do XRF79C com resultados em óxido. Por serem métodos distintos de abertura e leitura, diferenças podem ser observadas

para um mesmo elemento ou um elemento e seu óxido. Utilizando-se o P_2O_5 como referência entre os métodos XRF79C e o ICM95A, observa-se que a regressão dos valores retorna um coeficiente de determinação de 0.9961% (Figura 5.15). Portanto as análises de elementos maiores podem ser relacionadas diretamente aos elementos menores.

Os gráficos de dispersão entre o P_2O_5 e os analitos dos métodos ICM95A e ICM14B não apresentam grandes diferenças em relação ao que foi observado na análise e interpretação dos dados do método XRF79C. Novamente, dois grupos são observados e as melhores correlações são encontradas quando se comparam os analitos que compõem os minerais de fosfato. Em especial o urânio (U), que apresenta baixa dispersão em amostras com teores de P_2O_5 menores que 5% e grande dispersão para teores acima desse valor. Isto pode reforçar a hipótese de dois grupos de minerais de fosfato contido nas amostras.

Para melhor avaliação das análises geoquímicas e dos grupos identificados, a avaliação petrográfica e por difração de raios X serão priorizadas nas próximas etapas do projeto. De posse da avaliação petrográfica e mineralógica, melhores interpretações podem ser feitas, para que o potencial fosfato seja corretamente avaliado e para que anomalias estatísticas tenham um sentido geológico a elas associado. Por exemplo, o analito P_2O_5 pode indicar a ocorrência de vários tipos de apatita, que são os minerais de interesse para extração e utilização em fertilizantes e na indústria química. Porém, o fosfato também está relacionado a minerais radiogênicos, como monazita e xenotímio, que podem servir para outros propósitos. Adicionalmente, o fosfato pode estar adsorvido em minerais como goethita e não apresentam economicidade para extração.

As concreções passaram por diversas fases de retrabalhamento hidráulico e litificação, que podem influenciar no resultado das análises químicas. Portanto, uma análise petrográfica sistemática é necessária para que se possa entender como os teores dos analitos se relacionam com a geologia local.

5.3. TIPOLOGIA SEDIMENTAR DO SUBSTRATO MARINHO

Dentro da área do levantamento geofísico foram realizados 21 pontos de amostragem geológica, descritos na Tabela 5.4. Foram recuperados sedimentos variando entre lama arenosa, areia lamosa, areia fina e areia fina a média. As amostras foram mapeadas e estão identificadas na Figura 5.16.

Descrições visuais das amostras do Cruzeiro Talude, realizado a bordo no NOc. Alpha Crucis do Instituto Oceanográfico da USP, entre novembro e dezembro

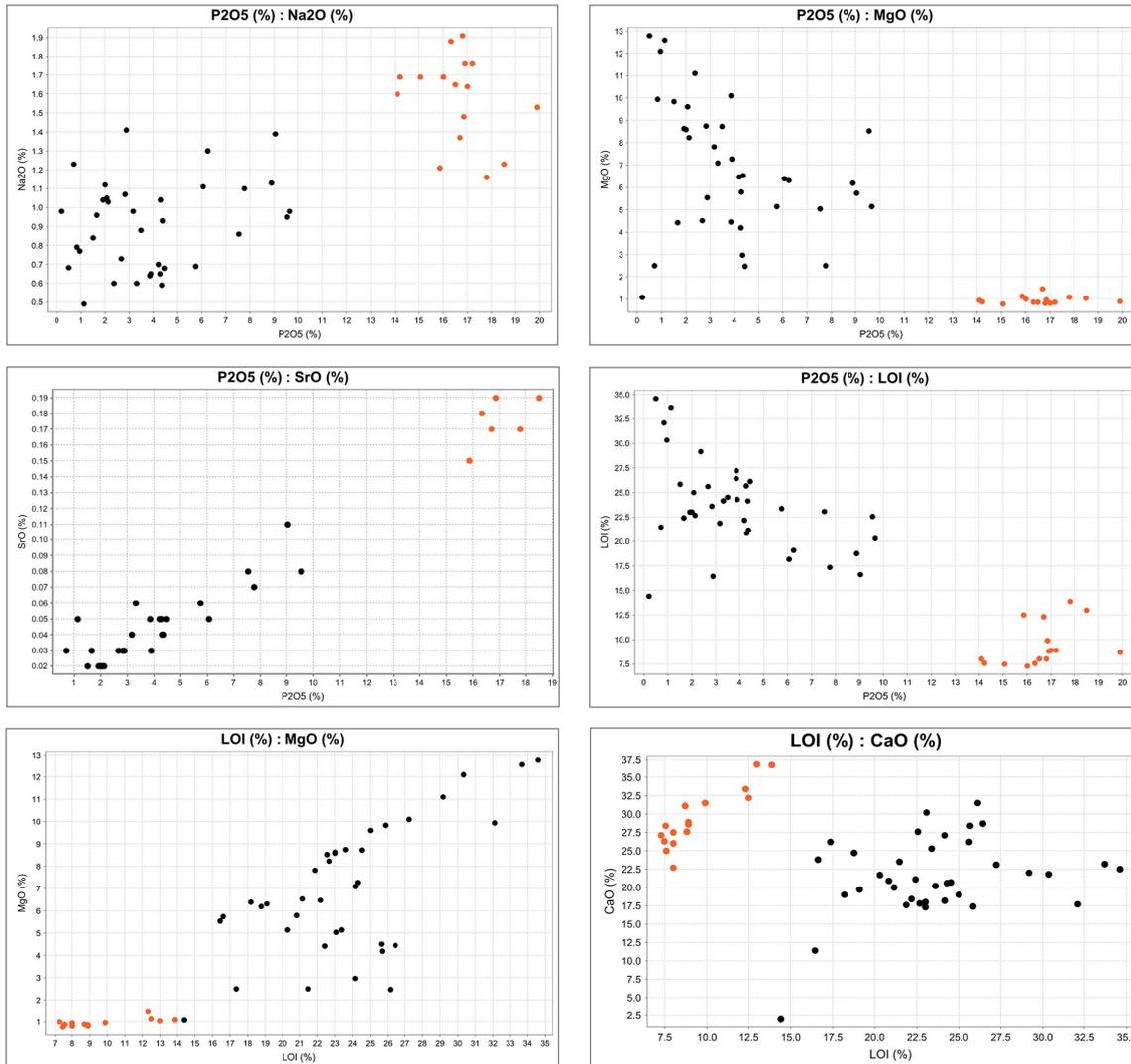


Figura 5.15 - Gráficos de dispersão para os resultados do método XRF79C. Pontos em laranja indicam o grupo “Alto Teor”, com concentrações de $P_2O_5 > 14\%$. A identificação das amostras e a relação com o respectivo grupo constam nas Tabelas 5.1 e 5.3. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQ

de 2017 (Tabela 5.5), também estão apresentadas no mapa da Figura 5.16. A descrição visual indica uma variação entre areia média até lama, com a presença de nódulos e concreções fosfóricas em alguns pontos e uma amostra de coral.

Nota-se que os pontos onde se encontrou maior quantidade de sedimentos finos estão localizados a norte (lama arenosa, areia lamosa) e próximo à quebra da plataforma (Figura 5.16). A parte mais central e ao sul concentra as amostras que apresentaram maior tamanho de grão e há uma tendência de diminuição da granulometria com aumento da profundidade a leste.

Houve uma variação no tamanho das concreções recuperadas durante o cruzeiro do NPqHo Vital de Oliveira e do NOc. Alpha Crucis, entre pequenas, médias, grandes e uma amostra gigante, além de duas ocorrências de coral. Na Figura 5.16 o símbolo para representar a presença de concreções é um quadrado e as

quatro diferenças no diâmetro mostram as variações de tamanho das concreções. Observa-se que há uma correlação entre as amostras lamosas e maior presença ou ocorrência de fosforita.

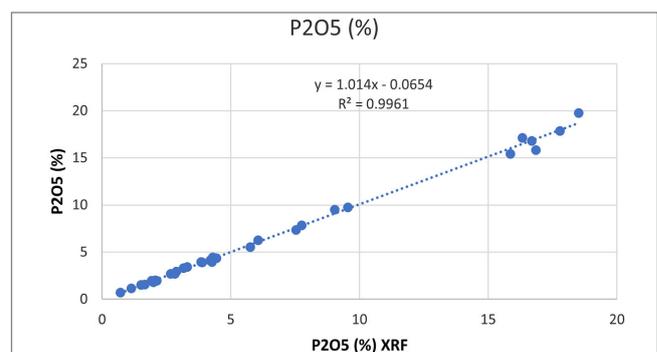


Figura 5.14 - Regressão dos valores de P_2O_5 para os métodos XRF79C e ICM95A. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQ.

Tabela 5.3 - Sumário estatístico dos elementos maiores, apresentados para o conjunto total de amostras e para os grupos de baixo e alto teor de P₂O₅.

	P ₂ O ₅ (%)	LOI (%)	Al ₂ O ₃ (%)	CaO (%)	Fe ₂ O ₃ (%)	K ₂ O (%)	MgO (%)	MnO (%)	Na ₂ O (%)	SiO ₂ (%)	TiO ₂ (%)	SrO (%)	F (ppm)
[Total]: Valores Únicos	53	49	46	47	45	38	51	38	43	49	33	12	32
[Total]: Mínimo	0,209	7,28	3,18	1,99	2,25	0,62	0,78	0,0101	0,49	12,2	0,26	0,02	440
[Total]: Máximo	19,9	34,6	22,5	36,9	30,3	1,46	12,8	3,88	1,91	49,4	1,7	0,19	16471
[Total]: Média	7,7365	19,2826	5,0611	23,8583	11,0081	0,9343	5,1007	0,3720	1,1044	24,9792	0,4091	0,0691	5630
[Total]: Mediana	4,367	21,47	4,74	23,5	10,8	0,92	5,14	0,23	1,04	25,8	0,38	0,0500	3911
[Total]: Intervalo	19,691	27,32	19,32	34,91	28,05	0,84	12,02	3,8699	1,42	37,2	1,44	0,17	16031
[Total]: Intervalo Interquartil	12,9420	12,0050	1,2350	8,1500	7,7100	0,1880	7,3200	0,2950	0,6500	12,0000	0,1350	0,0500	5854
[Total]: Desvio-Padrão	6,3357	7,6639	2,5607	6,1747	6,1935	0,1635	3,6919	0,6675	0,3917	7,9862	0,1963	0,0558	4568
[Total]: 10 percentil	1,0256	8	3,768	17,64	3,304	0,706	0,8588	0,07008	0,64	14,12	0,28	0,02	1185
[Total]: 25 percentil	2,5195	12,4000	4,1100	19,8500	6,7900	0,8370	1,0600	0,0900	0,7500	18,5500	0,3150	0,0300	2059
[Total]: 75 percentil	15,4615	24,405	5,345	28	14,5	1,025	8,38	0,385	1,4	30,55	0,45	0,0800	7913
[Total]: 95 percentil	18,006	32,577	6,42	34,42	23,69	1,252	12,25	1,531	1,796	35,58	0,5235	0,19	15466
Baixo Teor: Valores Únicos	37	36	34	35	30	30	35	28	31	33	23	8	26
Baixo Teor: Mínimo	0,209	14,4	3,59	1,99	3,2	0,62	1,08	0,07	0,49	12,2	0,26	0,02	440
Baixo Teor: Máximo	9,66	34,6	22,5	31,5	30,3	1,46	12,8	3,88	1,41	49,4	1,7	0,11	9486
Baixo Teor: Média	3,9006	23,5476	5,1184	21,4727	13,1641	0,9156	6,8946	0,4990	0,8996	23,3865	0,3975	0,0446	3734
Baixo Teor: Mediana	3,485	23,07	4,45	21,1	12,2	0,9	6,47	0,28	0,93	23,6	0,368	0,04	3515
Baixo Teor: Intervalo	9,451	20,2	18,91	29,51	27,1	0,84	11,72	3,81	0,92	37,2	1,44	0,09	9046
Baixo Teor: Interv. Interquartil	3,135	4,77	1,045	6,7	5,75	0,128	3,965	0,325	0,3785	10,8	0,11	0,0225	2732
Baixo Teor: Desvio-Padrão	2,6459	4,5694	3,0224	5,3839	5,8333	0,1601	2,9529	0,7671	0,2378	7,6328	0,2277	0,0223	2324
Baixo Teor: 10 percentil	0,8132	17,202	3,912	17,38	6,562	0,712	2,5	0,108	0,6	13,9	0,28	0,02	1096
Baixo Teor: 25 percentil	1,96	20,99	4,11	18,3	9,05	0,837	4,775	0,195	0,6815	17,25	0,31	0,03	1988
Baixo Teor: 75 percentil	5,095	25,76	5,155	25	14,8	0,965	8,74	0,52	1,06	28,05	0,42	0,0525	4720
Baixo Teor: 95 percentil	9,5610	33,7810	8,4690	30,3300	28,3200	1,2980	12,6200	3,3220	1,3920	36,8000	0,5840	0,0995	8994
Alto Teor: Valores Únicos	16	13	16	16	15	15	16	11	13	16	15	4	6
Alto Teor: Mínimo	14,1	7,28	3,18	22,7	2,25	0,69	0,78	0,0101	1,16	13,8	0,26	0,1500	12166
Alto Teor: Máximo	19,9	13,87	5,93	36,9	14,9	1,24	1,46	0,12	1,91	36	0,527	0,19	16471
Alto Teor: Média	16,6069	9,4200	4,9288	29,3750	6,0225	0,9775	0,9523	0,0782	1,5781	28,6625	0,4360	0,1750	13847
Alto Teor: Mediana	16,745	8,75	5,31	28,5	5,195	0,995	0,887	0,08	1,645	33,35	0,476	0,175	13534
Alto Teor: Intervalo	5,8	6,59	2,75	14,2	12,65	0,55	0,68	0,1099	0,75	22,2	0,267	0,0400	4305
Alto Teor: Intervalo Interquartil	1,253	4,02	1,475	5,525	4,1875	0,2875	0,175	0,01995	0,345	12,475	0,116	0,0250	2931
Alto Teor: Desvio Padrão	1,4592	2,2095	0,8834	4,0132	3,6520	0,1685	0,1694	0,0244	0,2311	7,7815	0,0900	0,0152	1619
Alto Teor: 10 percentil	14,1840	7,4130	3,3900	24,3100	2,5510	0,6970	0,8003	0,0413	1,1950	15,1300	0,2670	0,1500	12166
Alto Teor: 25 percentil	15,8970	7,6850	4,1325	26,5000	3,0850	0,8275	0,8550	0,0701	1,3975	21,4750	0,3747	0,1650	12381
Alto Teor: 75 percentil	17,15	11,705	5,6075	32,025	7,2725	1,115	1,03	0,09	1,7425	33,95	0,49075	0,19	15312
Alto Teor: 95 percentil	19,9	13,87	5,93	36,9	14,9	1,24	1,46	0,12	1,91	36	0,527	0,19	16471

Tabela 5.4 - Relação dos pontos de amostragem geológica realizada pelo NPqHo Vital de Oliveira em 2020, com suas respectivas coordenadas geográficas em projeção Mercator e as profundidades. Também estão identificados o tipo de substrato e a presença/ausência de concreções fosforíticas.

PONTO DE COLETA	LATITUDE (GRAUS DECIMAIS)	LONGITUDE (GRAUS DECIMAIS)	PROF. (m)	SUBSTRATO	CONCREÇÕES
005	-29.169	-47.8877	441	Lama arenosa	Pequenas
006	-29.147	-47.8706	468	Areia fina	Pequenas
007	-29.102	-47.9081	306	Lama arenosa	--
008	-29.11	-47.8881	397	Areia lamosa	--
009	-29.126	-47.8671	459	Areia lamosa	Médias
010	-29.032	-47.7245	542	Areia fina	--
011	-29.094	-47.7203	682	Lama arenosa	Médias
012	-29.293	-47.8649	478	Lama arenosa	Médias
013	-29.296	-47.8248	547	Lama arenosa	Grandes
014	-29.431	-47.7571	732	Lama arenosa	Gigante
015	-29.435	-47.8344	540	Areia lamosa	Grandes
016	-29.445	-47.9012	430	Areia lamosa	Médias
017	-29.469	-47.9649	384	Areia lamosa	Médias/Coral
018	-29.546	-48.0408	343	Areia lamosa	Médias
019	-29.762	-47.9097	409	Lama arenosa	Grandes
020	-29.748	-48.0424	370	Areia lamosa	Pequenas
021	-29.734	-47.8183	527	Areia fina	Médias
022	-29.935	-47.787	568	Areia fina a média	Pequenas
023	-29.937	-47.8922	431	Areia fina	--
024	-29.942	-48.048	362	Areia fina a média	Pequenas
025	-30.137	-48.0482	364	Areia fina a média	Médias

Tabela 5.5 - Relação dos pontos de amostragem geológica realizada pelo NOc. Alpha Crucis em 2017, com suas respectivas coordenadas geográficas em projeção geográfica e as profundidades. Também estão identificados o tipo de substrato e a presença de concreções fosforíticas. Dados cedidos pelo Prof. J.G.N. Abreu.

PONTO DE COLETA	LATITUDE (GRAUS DECIMAIS)	LONGITUDE (GRAUS DECIMAIS)	PROF. (m)	SUBSTRATO	CONCREÇÕES
421	-29.30955	-47.6804	888	Lama arenosa	--
422	-29.31675	-47.78763	688	Areia média	Pequenas
423	-29.322	-48.07377	234	Areia fina a média	--
426	-29.65622	-47.82683	534	Lama	Pequenas
427	-29.65612	-48.09097	344	Areia lamosa	Médias
428	-29.8518	-48.08567	358	Areia lamosa	Médias
429	-29.85505	-48.02272	348	Areia média	Médias
430	-29.85117	-47.83278	483	Areia fina	--
431	-29.85068	-47.69982	800	Lama arenosa	--
432	-30.34498	-48.1847	332	Lama arenosa	--
433	-30.28458	-47.91242	490	Areia lamosa	--
434	-30.3691	-47.79765	746	Areia média	--
435	-30.05658	-47.71557	797	Areia média	Coral

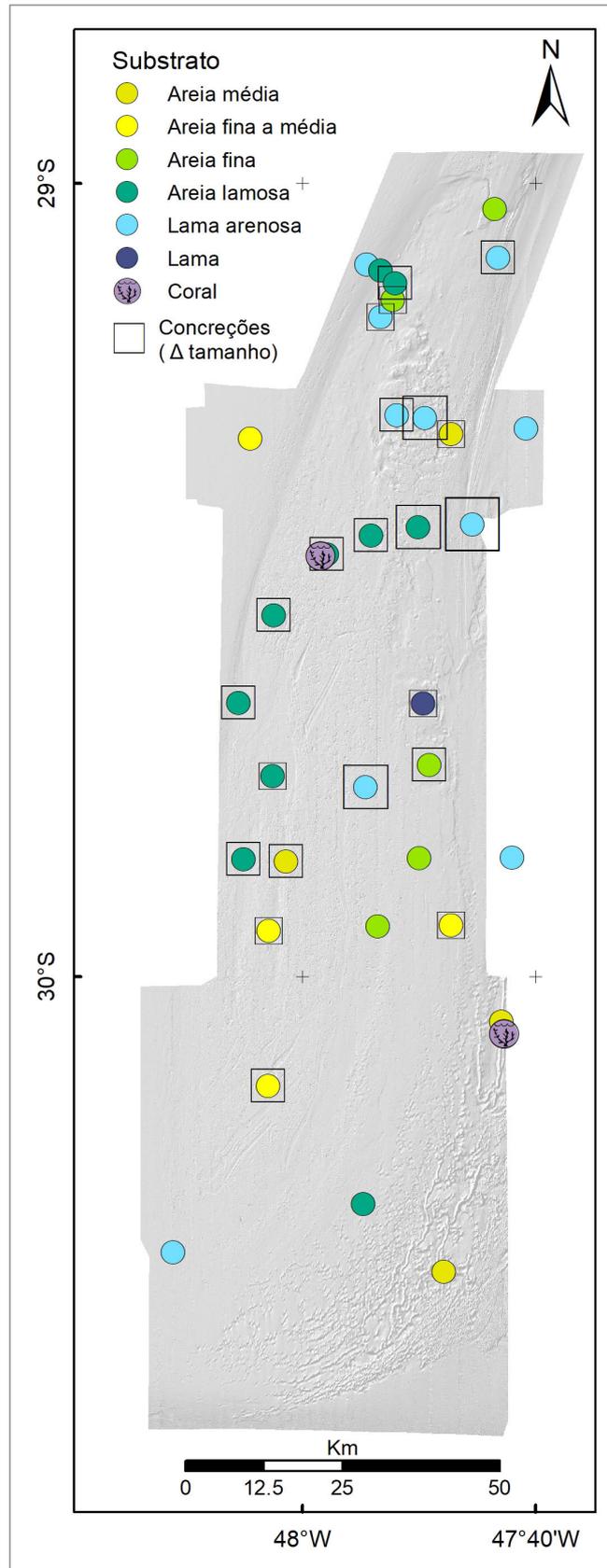


Figura 5.16 - Localização das amostras de sedimentos coletadas na área dos levantamentos geofísicos. No total, são 21 pontos de amostragem do embarque realizado pelo Vital de Oliveira em 2020 e 13 pontos do cruzeiro científico realizado pelo navio Alpha Crucis em 2017. Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

6. PROSPECÇÃO GEOFÍSICA

Entre 2010 e 2020, foram realizadas quatro campanhas geofísicas na área do Terraço do Rio Grande (Figura 6.1). Em 2010 e 2011, foi executada a batimetria; em 2018, houve levantamentos de detalhe utilizando sonar de varredura lateral e sísmica, com fonte *Sparker*, em duas pequenas áreas ao norte do TRG; e, em 2020, a batimetria foi complementada e, concomitantemente, houve a sísmica com fonte *Chirp*, ao norte do TRG. Nessa campanha, foram levantados dados oceanográficos com ADCP.

Nos próximos tópicos, são apresentadas a aquisição, o processamento e discutidos os resultados preliminares dos métodos.

6.1. BATIMETRIA

O levantamento batimétrico fornece as principais características sobre as feições topográficas de uma determinada área, possibilitando a distinção em várias classes geomorfológicas, por exemplo: plataforma, cânion e declive (Harris & Baker, 2011). Além disso, seus produtos derivados, como o retroespalhamento acústico (*backscatter*), trazem informações essenciais sobre a natureza do substrato e tornam possível a classificação do terreno.

Os dados batimétricos apresentados neste estudo foram levantados pelo Navio Hidrográfico Sirius (H21), da Marinha do Brasil, em 2010 e 2011, e pelo NPqHO Vital de Oliveira, em 2020 (Figura 6.2). O equipamento usado na primeira e na segunda aquisição foi um MBES (*multibeam echo sounder*) da fabricante Kongsberg, modelo EM-302. Na última aquisição, o equipamento instalado no navio Vital de Oliveira era um Kongsberg, modelo EM-122.

O processamento inicial dos dados brutos no formato *.ALL*, foi realizado no *software* Caris HIPS and SIPS versão 10 e, posteriormente, na versão 11, visando gerar mapas da superfície batimétrica e o mosaico do retroespalhamento acústico, com resolução de 50 m.

6.1.1. Descrição geomorfológica do Terraço do Rio Grande

O mapa de batimetria está representado na Figura 6.3, junto a quatro perfis topográficos (A-A', B-B', C-C', D-D') escolhidos nas áreas mais destacadas da morfologia. A variação da profundidade mostra um intervalo entre 180 m e 1.307 m e, de forma geral, temos um

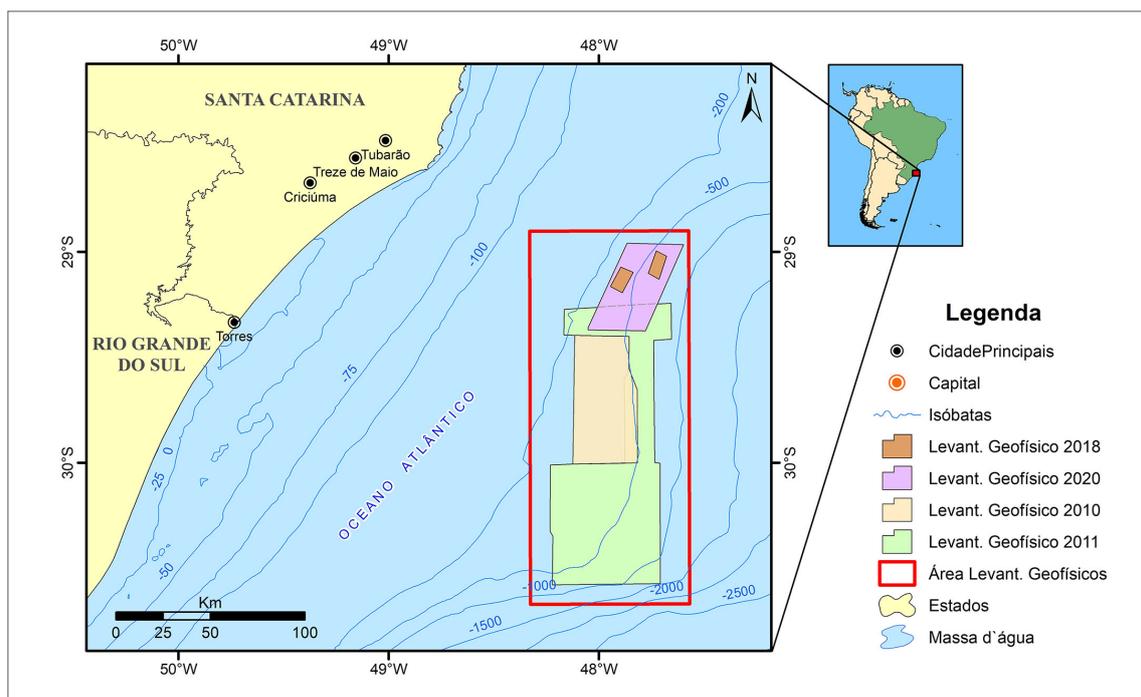


Figura 6.1 - Localização dos levantamentos geofísicos no Terraço do Rio Grande. Fonte: dados extraídos da Base Cartográfica IBGE, 1:250.000, 2017. Autora: Edlene Pereira da Silva, SGB-CPRM / DIGEOM.

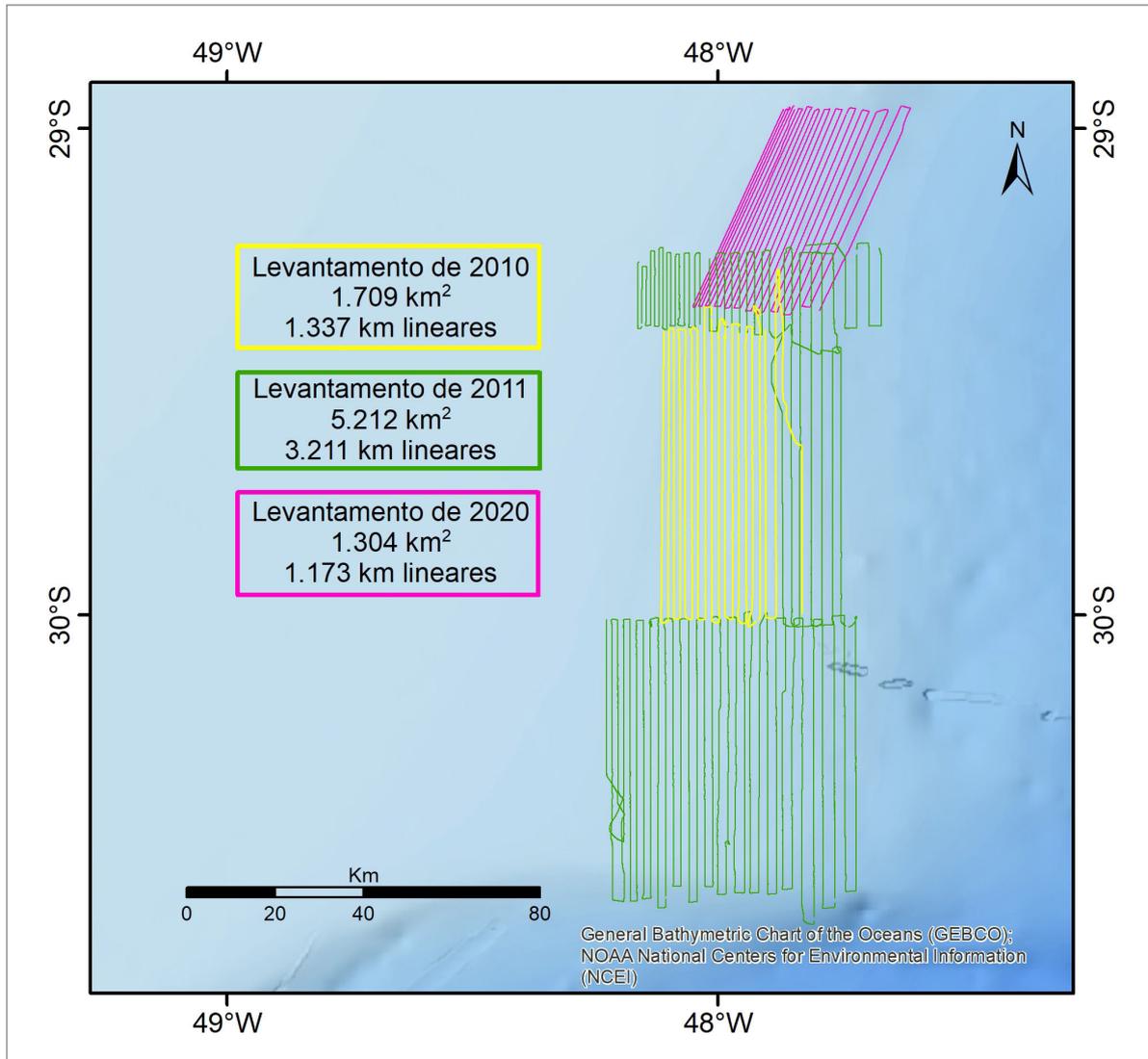


Figura 6.2 - Localização da área de estudo onde foram realizados os três levantamentos batimétricos.
Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

ambiente de talude sem a presença de cânions incisivos em direção à região mais profunda.

O Terraço do Rio Grande está limitado, a oeste, pela quebra da plataforma, na isóbata de aproximadamente 200 m. Apenas uma pequena parte do levantamento compreende essa região e apresenta-se como uma superfície sem rugosidades e com menor declividade (início dos perfis A e B na Figura 6.3).

O perfil A-A' foi o que apresentou maior grau de variação, ou seja, a maior declividade do início ao fim do perfil. A aproximadamente 500 m de profundidade, há uma estrutura em formato de cúspide que se prolonga em direção ao sul (Figura 6.3), mas o aspecto textural superficial da feição não é compatível com fundos coesivos (lamosos).

O relevo generalizado do Terraço do Rio Grande pode ser visualizado no perfil B-B', composto por uma área mais plana elevada próxima à quebra da plataforma,

seguida de uma região bastante rugosa e com muitas incisões marcadas no terreno entre 300 m e 400 m (Figura 6.3). Entre 500 e 600 m de profundidade, não há rugosidade e estruturas na porção central, porém, ao norte, há depósitos sedimentares indicando correntes de turbidez e movimentos gravitacionais. O perfil C-C' evidencia dois canais (ou furrows) e rugosidades menores na topografia. No último perfil topográfico D-D', a configuração muda bastante e são observadas cristas mais estreitas e alinhadas com os contornos batimétricos. Nessa região foram coletadas amostras de corais (Martins *et al.* 1985).

6.1.2. Descrição dos dados de retroespalhamento acústico (backscatter)

O retroespalhamento acústico é a medida, em decibéis, da intensidade do retorno do mesmo sinal empregado para

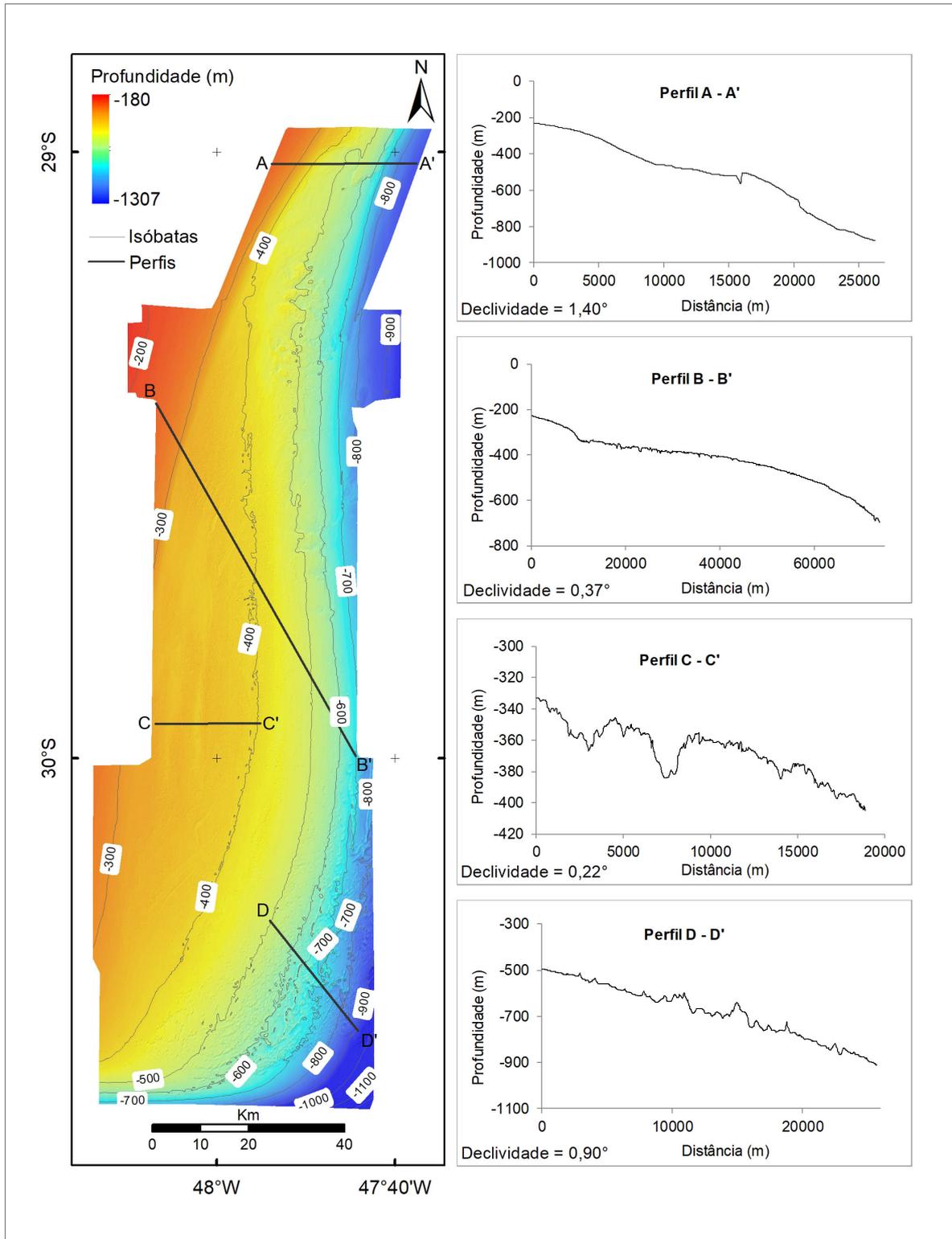


Figura 6.3 - Mapa de batimetria para as áreas de interesse no Terraço do Rio Grande (resolução de 50 m).
 Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

detectar a profundidade. As variações encontradas relacionam-se diretamente à natureza do substrato e podem caracterizar remotamente as suas propriedades físicas (Lurton & Lamarche, 2015). A intensidade pode ser traduzida na força do sinal, ou seja, a capacidade inerente do substrato marinho

de refletir energia (Lamarche & Lurton, 2018) ligada às suas características: um material mais duro ou com rugosidades retorna mais energia. Por sua vez, um retorno de baixa energia indica a presença de material sedimentar inconsolidado ou com textura lisa.

O mapa do mosaico do retroespalhamento acústico da Figura 6.4 apresenta quatro padrões principais de respostas na intensidade do RA reconhecidos como diferentes fácies: a) alta intensidade com textura homogênea (preto); b) moderada a alta intensidade e fácies heterogênea (cinza-escuro médio e muitas feições visíveis); c) baixa a moderada intensidade e perfil heterogêneo (cinza-médio e algumas feições) e d) baixa intensidade com textura homogênea (cinza mais claro).

Foram encontradas três áreas principais onde o padrão do sinal revela superfícies irregulares com padrões de texturas específicos. Na Figura 6.4 A, a aproximadamente 500 m de profundidade, há formações circulares de 1 km de diâmetro com o interior em tons de cinza mais claros que o entorno. Considerando o ambiente de talude e a existência de correntes de turbidez, os depósitos podem ser gerados por movimentos de massa gravitacionais. Seria interessante verificar a composição do assoalho oceânico para definir com mais clareza a natureza do material que compõe o substrato e, também, quais processos estão atuando.

Na porção mais central da área de estudo, são encontradas feições retilíneas contínuas (Figura 6.4 B) de até 10 km de comprimento, grande parte no sentido NE-SW. A origem não é conhecida. Ao sul (Figura 6.4 C), são visualizadas as estruturas de cristas e depressões, possivelmente numa área mais arenosa bioclástica, onde foram coletadas amostras de corais.

Com o intuito de mostrar a relação direta entre os dados de morfologia e da intensidade do retroespalhamento acústico, foram montadas figuras com a composição dos dois dados (Figuras 6.5 e 6.6). Na Figura 6.5 o levantamento de 2020 (mais ao norte) é visualizado em 3D, com sobreposição apenas das maiores intensidades do retroespalhamento acústico em preto. A estrutura mais elevada, que se prolonga ao sul no perfil A-A', tem uma refletividade maior do que o seu entorno, o que indica se tratar de um material mais rígido resistente à erosão, enquanto as laterais estão perdendo material sedimentar. À esquerda na Figura 6.5, são observados com mais detalhe as marcas de fluxos gravitacionais, em áreas com declividades maiores. As feições mais escuras também podem ser mais resistentes aos fluxos turbulentos, compondo um assoalho mais compacto.

No setor Sul, a variação de declividade é menos acentuada e as feições possuem outro perfil (Figura 6.6). A área muito rugosa e pontiaguda, no canto esquerdo inferior da figura, não foi alvo de interesse para pesquisa de concreções fosforíticas e especula-se que sua constituição tenha relação com formações coralíneas. No centro, são observados canais com baixa refletividade, que podem estar preenchidos parcialmente por sedimentos lamosos, provenientes de uma sedimentação posterior.

6.1.3. Modelagem do terreno bentônico (Benthic Terrain Model - BTM)

A modelagem do terreno bentônico é uma ferramenta para o programa ArcGIS, conhecida por sua sigla BTM (Benthic Terrain Modeler). Foi desenvolvida para ser usada, principalmente, com dados de batimetria, a fim de realizar a classificação automática dos tipos geomórficos em uma determinada área. A ferramenta contém um conjunto de rotinas (scripts) que permitem a criação de grides baseados no índice de posição batimétrica (BPI – Bathimetric Position Index), declividade, orientação e rugosidade. Além disso, as rotinas permitem que o usuário crie as suas próprias estruturas de classificação geomórficas e defina as relações que as caracterizam (Lundblad *et al.*, 2006; Rinehart *et al.*, 2004).

O BPI é equivalente ao Índice de Posição Topográfica, usado para os modelos digitais de terreno (MDT) continentais, e caracteriza as feições no seu contexto local/regional (Weiss, 2001). O índice representa uma tentativa de descrever quantitativamente o ambiente bentônico, baseado em um MDT derivado da batimetria ou um conjunto de dados equivalente (*grid, raster, xyz, ASCII*).

Os dados de rugosidade da Figura 6.7 podem variar entre 0 (nenhuma variação) até 1 (variação completa). Os valores típicos para as geomorfologias marinhas variam entre 0 e 0.4, mas os números nem sempre podem ser comparados diretamente entre áreas de estudo diferentes. As variações da declividade mostram que grande parte da superfície do terraço apresenta gradientes entre 0° e 5°, com valores superiores representando as estruturas locais (cristas, depressões). A principal diferença entre a rugosidade e a declividade é que a primeira é calculada pela diferença direta entre os 9 pixels vizinhos e a declividade considera a resolução da imagem e uma distância maior entre as células analisadas. Dessa forma, a rugosidade traz informações mais localizadas sobre as características texturais do fundo.

As duas imagens à direita na Figura 6.7 (*fine BPI e broad BPI*) referem-se aos mapas com os índices normalizados (*standardized BPI*), em escala ampla e fina. A escala ampla assemelha-se muito mais às características originais do relevo, enquanto a escala fina mostra as variações das estruturas em menor escala.

Observando-se a morfologia na área de estudo, foram estabelecidas seis feições principais, que posteriormente entraram como classes no modelo bentônico do terreno (Figura 6.8):

- Declives contínuos;
- Depressões de correntes erosivas;
- Cristas consolidadas;
- Feições erosivas;
- Planos elevados;
- Depressões

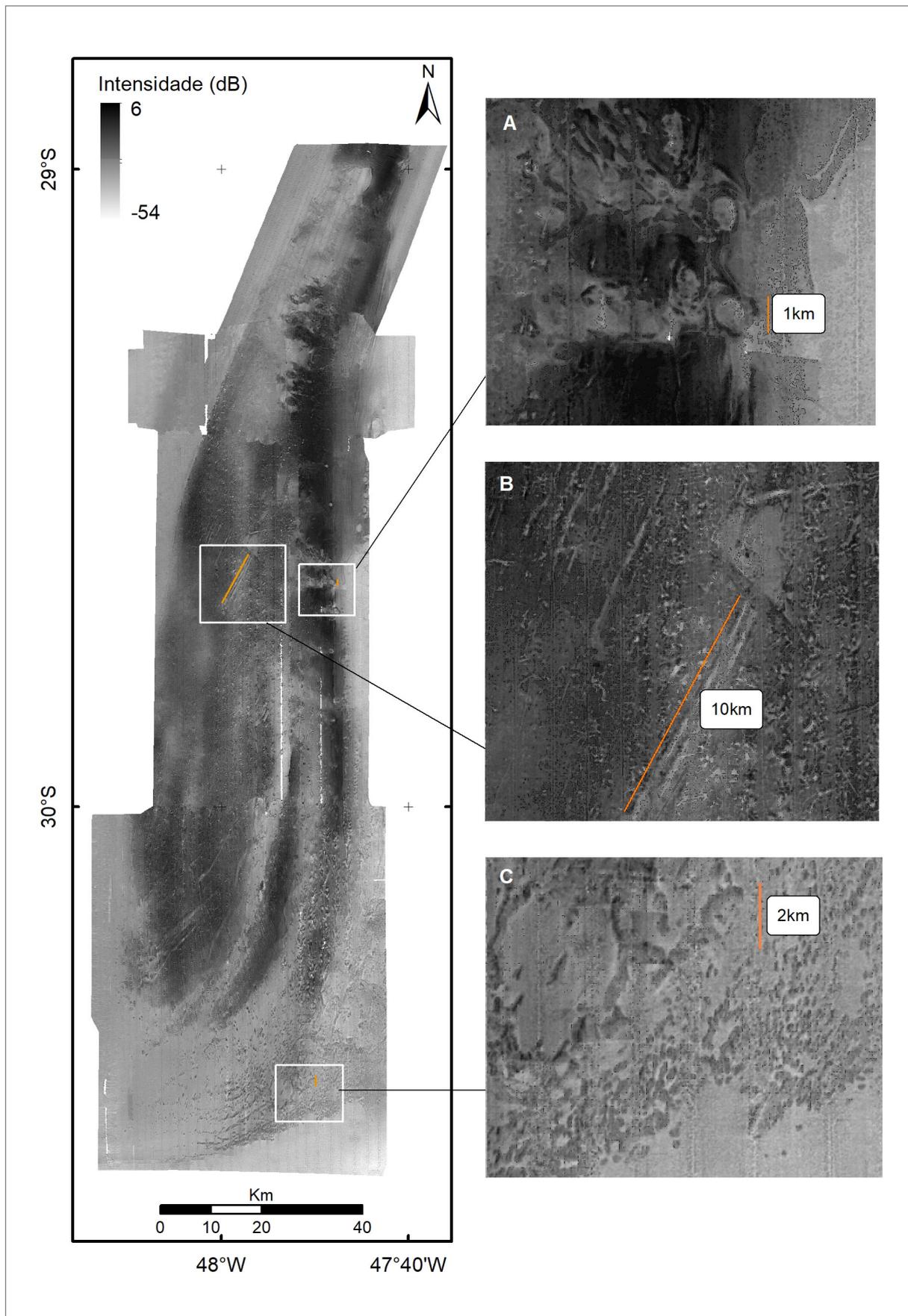


Figura 6.4 - Mapa do mosaico do retroespalhamento acústico. Destaque para três feições marcantes encontradas na área (A, B e C). Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

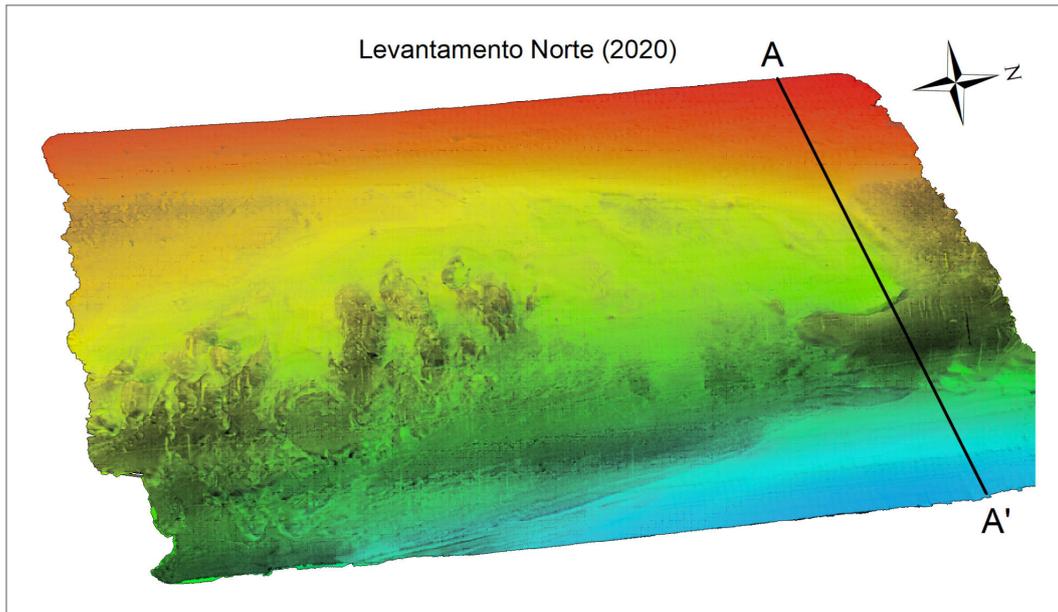


Figura 6.5 - Composição da batimetria do levantamento de 2020 e os dados de maior intensidade do retroespalhamento acústico (exagero vertical 10x). Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

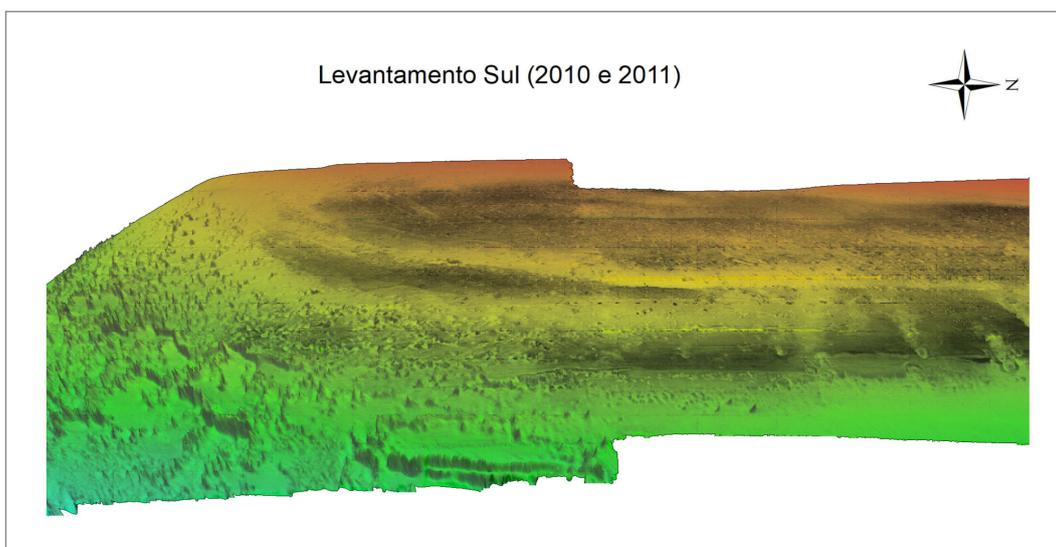


Figura 6.6 - Composição da batimetria do levantamento de 2020 e os dados de maior intensidade do retroespalhamento acústico (exagero vertical 10x). Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

Os “declives contínuos” (azul) compreendem a maior parte do Terraço do Rio Grande, desde porções mais rasas do terreno até áreas profundas e irão abarcar outras estruturas. Devido à continuidade do perfil de declividade, podem ser considerados ambientes mais monótonos.

Na parte mais profunda, onde temos “depressões de correntes erosivas” (roxo), é possível observar estruturas sedimentares que evidenciam a ação de fortes correntes de norte, possivelmente a Corrente do Brasil. As “depressões” (verde) são canais erosivos formados nessa região específica.

Com um intenso retorno do sinal do retroespalhamento acústico, as “cristas consolidadas” estão classificadas em

magenta no mapa da Figura 6.8. Nos perfis batimétricos, essas estruturas também aparecem destacadas devido às maiores declividades e rugosidades. Isto se deve à provável resistência dos materiais que compõem o substrato nesses locais, que resistem à erosão provocada pelas correntes e permanecem na topografia formando cristas.

As “feições erosivas” (amarelo) podem estar associadas aos materiais mais rígidos, formando cavas ao redor das cristas ou em estruturas retilíneas. Em alguns trabalhos, como o de Zembruscki (1979), foi sugerido que as incisões como estas podem ser indicativas de linhas prográdantes e regressivas do nível do mar em períodos anteriores. Lopes et

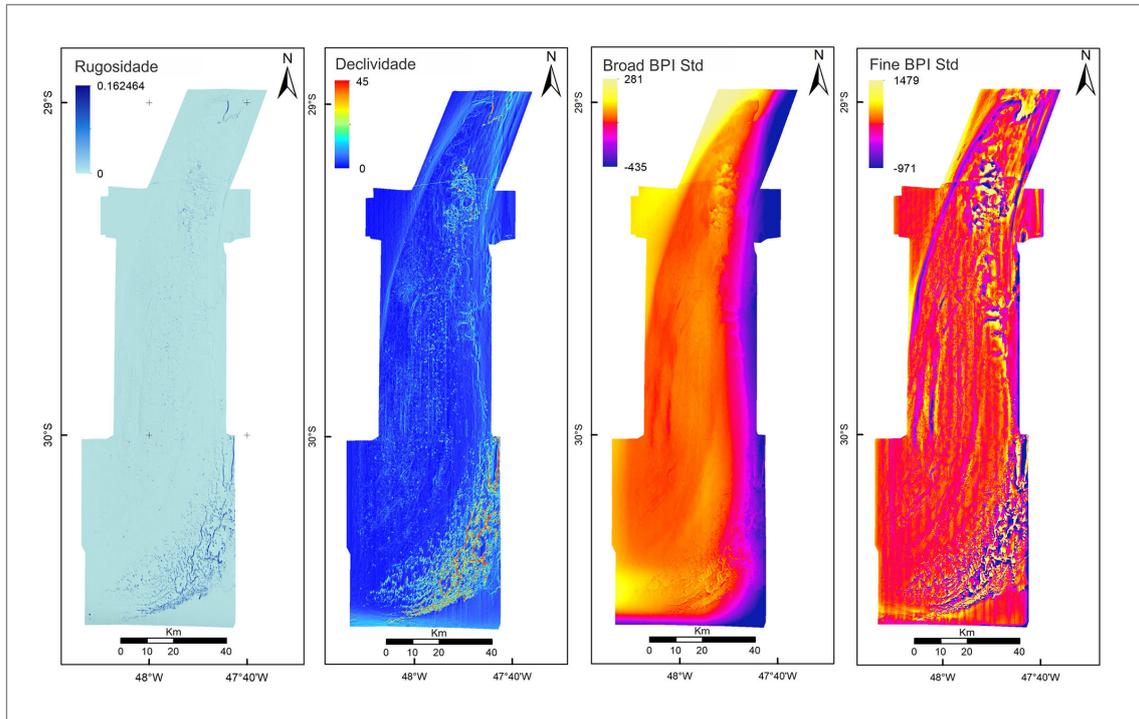


Figura 6.7 - Mapas com os cálculos do BPI amplo e fino (*broad, fine*), rugosidade e declividade.
 Autora: Maria Aline Lisniewski, SGB-CPRM / DIGEOM.

al. (2021), comentam sobre a influência das variações do nível do mar na configuração geomorfológica da região, mas devido à profundidade do TRG não é possível determinar se a origem das feições se deve à ação remota da Corrente do Brasil, de flutuações do nível do mar ou outros processos hidrodinâmicos recentes.

Por último, os “planos elevados” (laranja) são áreas de textura que se diferenciam do entorno, sem rugosidades, que estão no limite da quebra da plataforma continental, em torno de 180 m a 200 m.

6.1.4. Classificação automatizada

Embora o mapa de batimetria tenha a informação essencial sobre as feições geomorfológicas e possibilite a análise de tipos geomórficos no BTM, o mosaico com a intensidade do retroespalhamento acústico é um dado adicional e fornece informações indiretas sobre a composição do substrato. Dessa forma, a imagem do mosaico foi analisada juntamente com a batimetria no RSOBIA, a fim de obter uma classificação para diferentes setores da área levantada no Terraço do Rio Grande.

A análise de imagem orientada a objeto por sensoria-mento remoto (RSOBIA) faz a classificação quantitativa da geomorfologia e do substrato (retroespalhamento acústico e dados sobre a composição do fundo) para o ArcGIS 10.x (Le Bas, 2016). O tipo de análise é baseado na distribuição da informação e sua correlação espacial, não apenas em sua similaridade textural ou temática.

A ferramenta consiste em três seções: a primeira foi desenvolvida para uso com imagens de banda única e cria derivações matemáticas, como mapas de declividade a partir da topografia. Assim como o BTM, o RSOBIA calcula declividade, rugosidade, orientação (aspect), além da curvatura (Le Bas, 2016). A segunda seção tem os principais algoritmos de segmentação para criar os dados com polígonos separando as diferentes feições. O dado usado para a segmentação pode ser tanto uma imagem multibanda, imagens RGB ou uma combinação de grides com apenas uma camada que compõe um banco de dados com multicamadas. A seção final do RSOBIA destina-se à classificação e interpretação dos polígonos de feições.

Para dados multifeixe (MBES) há um assistente específico, onde são inseridos os dados de batimetria e de retroespalhamento acústico. É usado para facilitar e realizar todas as operações disponíveis no RSOBIA, com a vantagem de ser um método mais rápido e demandar um número menor de parâmetros. Finalmente, a classificação do tipo de substrato é feita a partir de amostras de sedimentos e rochas da área de estudo. As classes são atribuídas aos polígonos e um mapa final é gerado com o mapeamento dos substratos.

As descrições das amostras coletadas no levantamento de 2020 foram usadas para correlacionar os ambientes às quatro classes do RSOBIA, definidos como: 1 – Areia lamosa ou lama arenosa com concreções maiores; 2 – Areia lamosa com concreções variadas; 3 – Areia lamosa sem concreções e 4 – Lama arenosa com concreções pequenas (Figura 6.9).

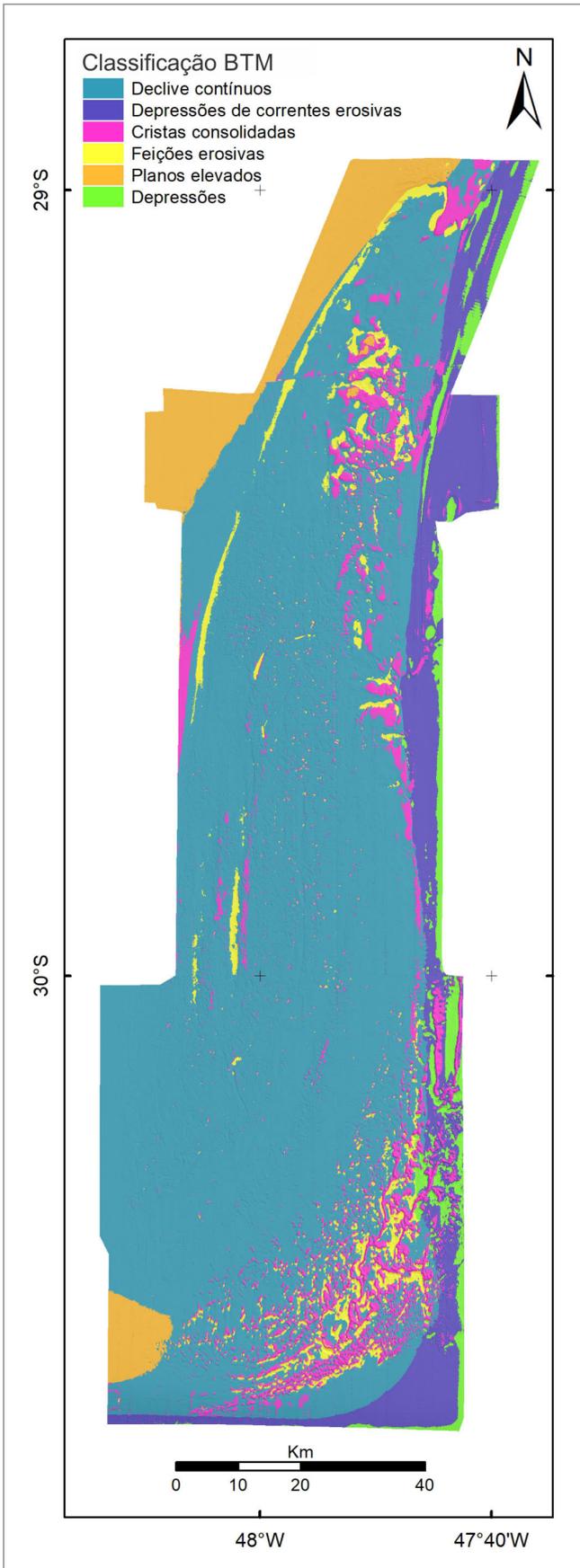


Figura 6.8 - Mapa de classificação BTM, mostrando as principais feições geomórficas da área. Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

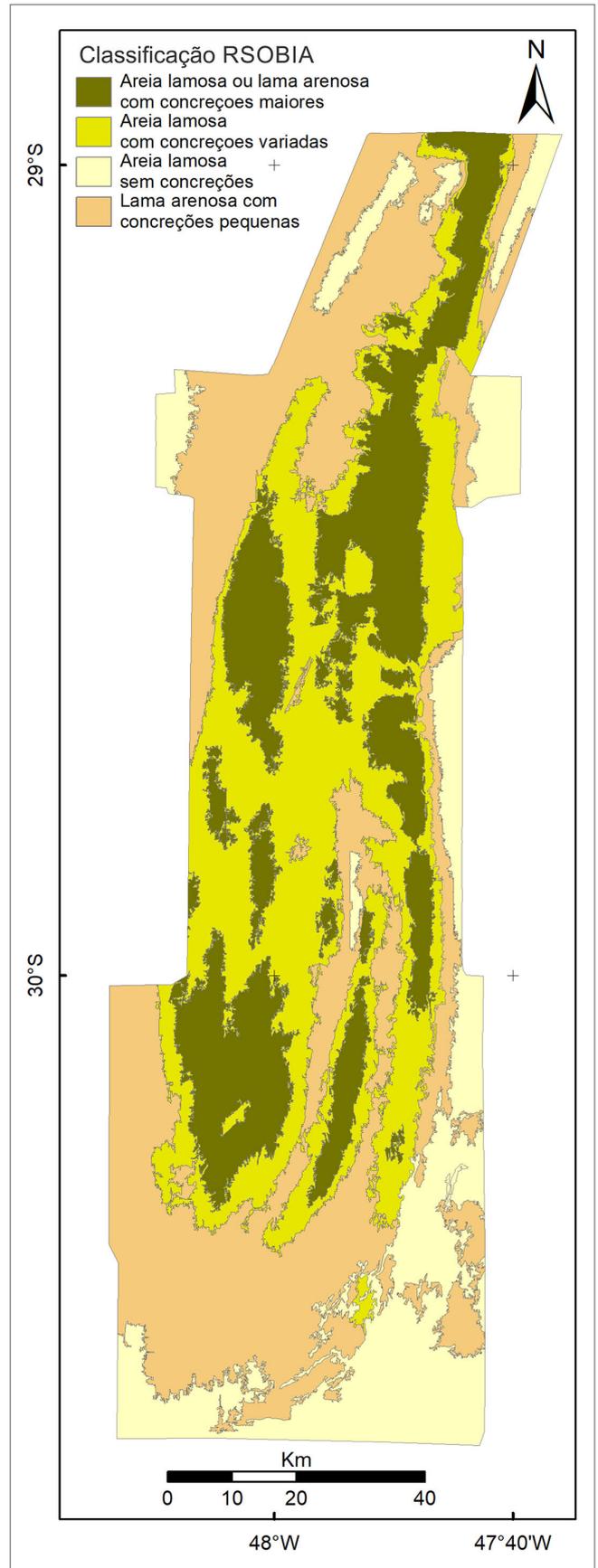


Figura 6.9 - Mapa de classificação de substrato gerada pelo RSOBIA, a partir da descrição das amostras coletadas em 2020. Autora: Maria Aline Lisniowski, SGB-CPRM / DIGEOM.

6.2. SONOGRAFIA

Os dados do sonar foram registrados simultaneamente em 100 kHz e 500 kHz, devido à aquisição em dupla frequência do Sonar de Varredura Lateral (SVL) Klein 3000. Para a elaboração do mosaico completo das áreas de levantamento, optou-se por utilizar os dados com maior varredura, 100 kHz.

O processamento inicial dos dados sonográficos foi realizado com uma versão antiga do SonarWiz 5 (V5.05.0020 de 2013), em sistema operacional Windows 10 de 64 bits. Após as etapas iniciais que envolvem a importação dos dados, conversão no formato interno do software, identificação do primeiro retorno acústico associado à detecção do fundo (*bottom tracking*) e verificação dos dados de navegação e profundidade, foram realizados alguns testes utilizando as diferentes possibilidades de correções e ganhos disponíveis no software para equalização das amplitudes de sinal, sendo escolhida a técnica de Normalização Empírica do Ganho (*Empirical Gain Normalization - EGN*).

Os mosaicos das áreas 3 e 4 (Figuras 6.10 e 6.11) foram exportados utilizando-se a tabela de cores KLEIN

em formato *GeoTiff*. Devido às limitações da versão do programa, esses mosaicos foram considerados preliminares e foi proposto um reprocessamento com a versão atualizada do SonarWiz 7, que será realizado nas próximas etapas do trabalho, gerando um produto mais elaborado e um estudo de detalhe, aproveitando a alta resolução do método empregado.

6.3. SÍSMICA

Para o levantamento geofísico por meio da sísmica de reflexão de alta resolução, foram disponibilizados dois tipos de fonte acústica: *Sparker* em 2018 e *Chirp* em 2020.

Uma fonte sísmica ideal é aquela que produz um pulso num tempo mínimo, com amplo espectro de frequências

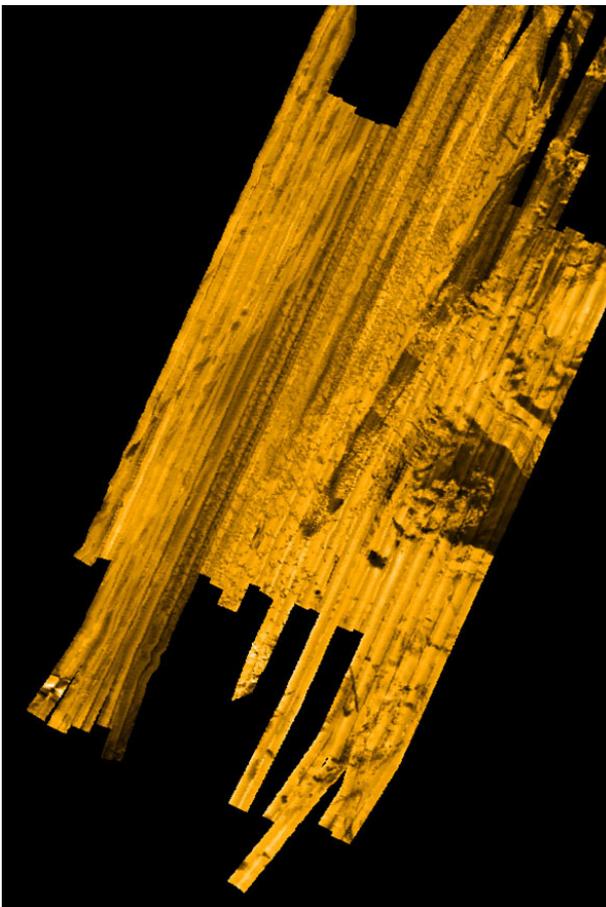


Figura 6.10 - Mosaico preliminar do sonar de varredura lateral da ÁREA 3. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

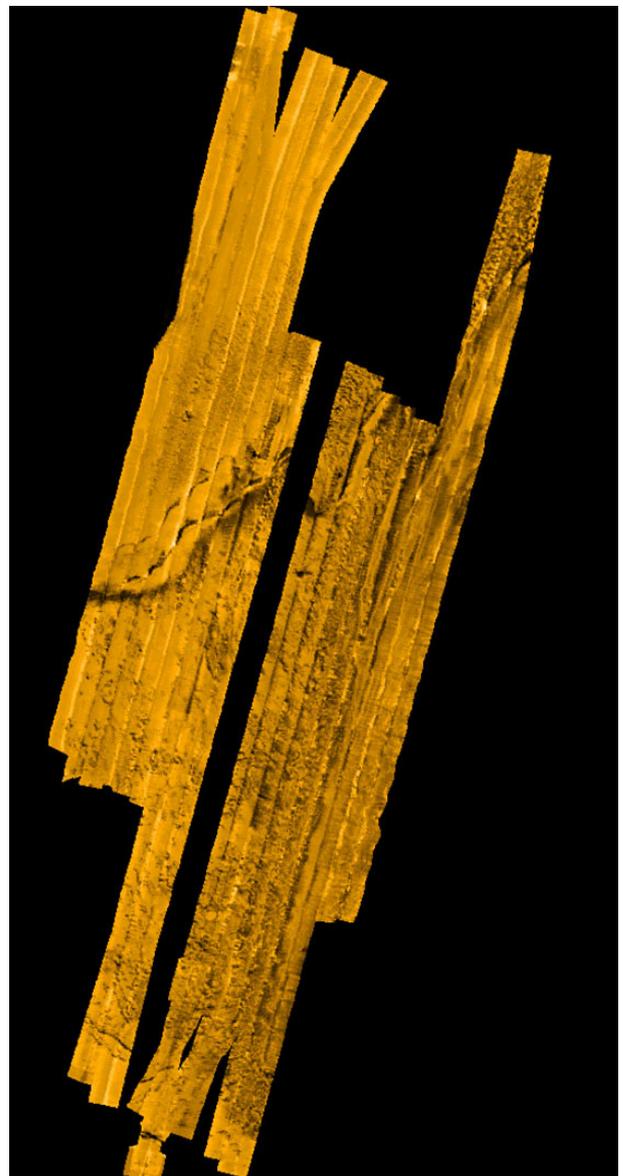


Figura 6.11 - Mosaico preliminar do sonar de varredura lateral da ÁREA 4. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

com alta energia. Fisicamente, essa configuração não é possível, já que a energia armazenada numa fonte acústica não pode ser transferida de maneira instantânea para o meio geológico. A maioria das fontes acústicas é basicamente de dois tipos: aquelas que tentam se aproximar do ideal, emitindo um amplo espectro de frequências num menor tempo possível (*sparkers, air-guns*), classificadas como impulsivas por liberarem grande quantidade de energia num intervalo próximo de zero, e aquelas que emitem um determinado espectro de frequências ao longo de um intervalo de tempo pré-definido (p.ex. *chirp*, vibradores), classificadas como ressonantes porque o sinal acústico origina-se da frequência de ressonância das pastilhas piezelétricas (Souza, 2006).

6.3.1. Levantamento sísmico com fonte *Sparker*

Em 2018, utilizou-se o equipamento *Sparker* SIG 2mille System, acoplado a um streamer de 32 hidrofones rebocado pelo NPq Atlântico Sul. Foram levantadas duas áreas, onde foram coletadas amostras com alto teor de P_2O_5 no centro destas, indicando a presença de rochas fosfáticas (Figura 6.12). O objetivo foi definir com mais detalhe as áreas de ocorrência de fosforita ao norte do Terraço do Rio Grande. Este tipo de fonte tem por princípio a geração de uma descarga elétrica num eletrodo (Figura 6.13), mergulhado num meio condutor e conectado a um banco de capacitores instalado e gerenciado na embarcação. A descarga elétrica cria uma bolha de

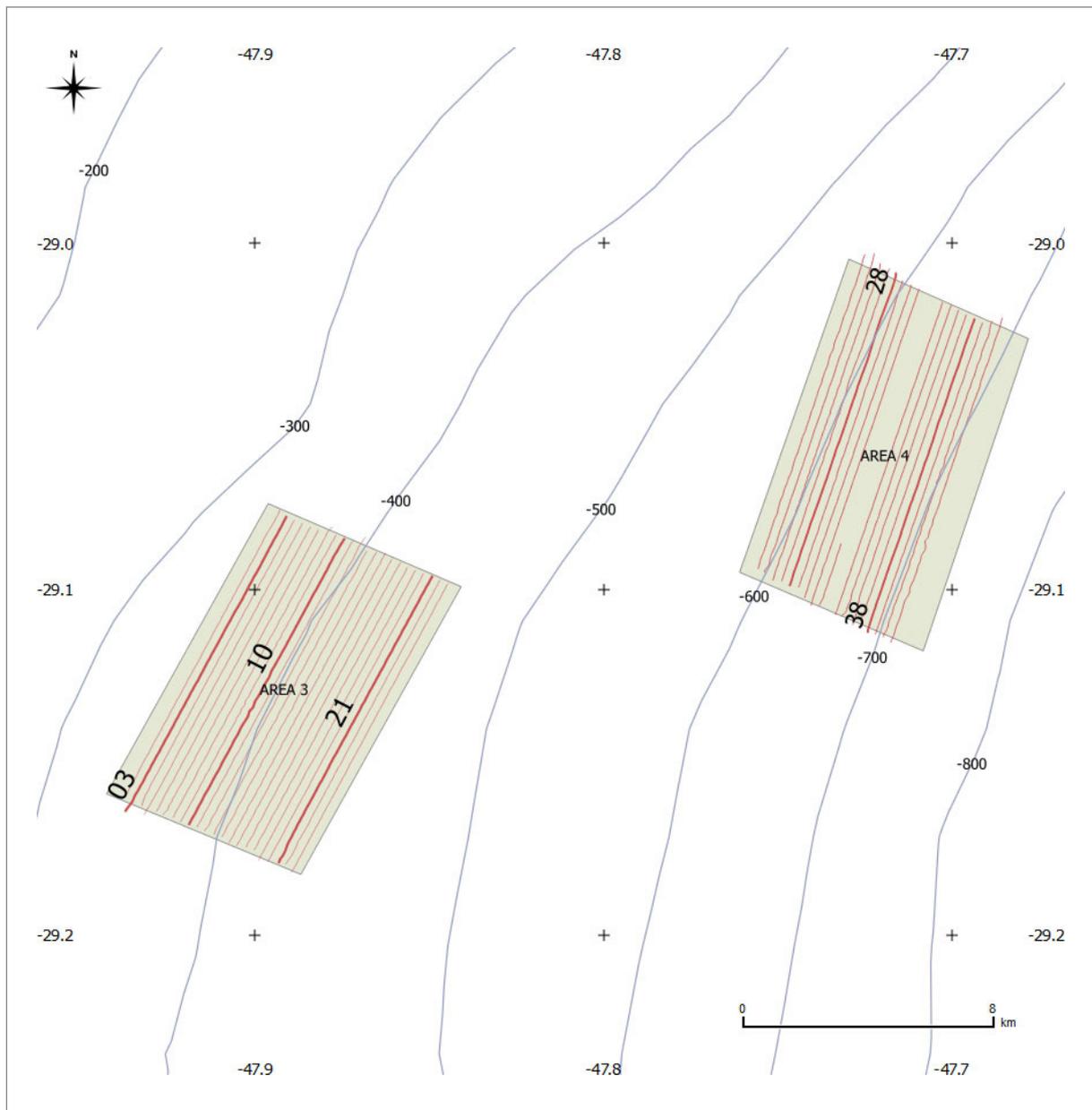


Figura 6.12 - Localização das linhas sísmicas obtidas com fonte Sparker, destacando os perfis 03, 10, 21, 28 e 38 que são descritos no tópico 6.3.2. Autor: Roberto Aguiar Alves, SGB-CPRM / DIGEOM.



Figura 6.13 - Sparker-eletrodos modelo ECL820 da SIG utilizado nas operações a bordo do NPq Atlântico Sul. Peso 1.8 kg, extensão 1 m, energia entre 750 e 1000 J e espectro de frequências entre 900-1400 Hz. Fonte: acervo fotográfico do Projeto Fosforita, SGB-CPRM / DIGEOM.

vapor, que em rápida expansão, gera um impulso positivo que se propaga na coluna d'água gerando o sinal sísmico (Souza, 2006).

No período em que o navio NPq Atlântico Sul operou satisfatoriamente, foram levantadas as 23 linhas programadas para a ÁREA 3 e 16 linhas das 23 programadas para a ÁREA 4, totalizando cerca de 400 km.

O processamento dos dados da ÁREA 3 foi executado pelo geofísico Vitor Rodrigues. Foi utilizado no processamento o SonarWiz (V5.03.0025), software da empresa Chesapeake Technology, e o Seismic Unix, software open-source de processamento sísmico para Linux desenvolvido pelo CWP, da Colorado School of Mines. Etapas de processamento: 1) Split no dado SGY e reordenação do delrt (delay record time); 2) Pré-processamento no SonarWiz, utilizando um filtro de frequência entre 100 e 700 Hz do tipo Blackman com o maior valor de Num Taps possível; 3) Filtro de swell; 4) Análise no domínio da frequência e definição do filtro do tipo trapezoidal, no qual definiu-se os limites superior e inferior e duas frequências intermediárias atenuantes, frequências máximas e mínimas 50 e 700 Hz e 100 e 500 Hz como frequências intermediárias; 5) Aplicação de ganhos de divergência esférica e do tipo AGC; 6) Deconvolução Spiking.

Para a ÁREA 4 foi utilizada a rotina de processamento do SonarWiz 7 (V7.07.01), que consiste interativamente na aplicação de filtros e ganhos, a fim de tornar mais nítida a visualização dos perfis sísmicos. Foi aplicado um filtro passa-banda entre 100 e 700 Hz, com o número de iterações (Num Taps) 500 e tipo de filtro Blackman.

Sparkers são um tipo de fonte sonora amplamente utilizada em levantamentos sísmicos para fornecer imagens de alta resolução do subfundo raso (ou seja, <1000 m). Embora sejam fontes relativamente simples, baratas e de alta frequência (100–2500 Hz), têm várias armadilhas potenciais devido à sua assinatura complicada e imprevisível (Kluesner *et al.*, 2018).

Num levantamento sísmico de alta resolução, são registrados o sinal e os ruídos de aquisição, que derivam das relações entre as propriedades do método e o ambiente de aplicação, como a interação das altas frequências com as propriedades do meio atravessado, ruídos da embarcação e do uso de flutuadores, não compensação das ondas do mar, atenuação com a profundidade e com o tipo de material, registro de chegada múltipla de sinal, dentre outros (Gomes, 2009). Tudo isso deve ser levado em consideração no processamento dos dados para a obtenção de um registro adequado à interpretação.

Um reprocessamento dos dados poderia utilizar pacotes de software de código aberto (por exemplo, Sioseis e Seismic Unix) ou comerciais (PROMax), baseado no fluxo de processamento indicado por Kluesner *et al.* 2018, que envolvem as seguintes etapas: filtro de frequência passa-banda, geometria e cálculo de CMP, que contabilizam mudanças na velocidade do navio, rejeição de dados ruidosos e *spikes*, correção de ganho, filtro de fase mínima *Butterworth*, filtro FK, classificação CMP, correção de NMO com base na análise de velocidade, compensação CMP ou correções residuais estáticas, empilhamento CMP, mistura de traços, deconvolução preditiva pós- empilhamento (filtro de *Wiener*), migração, filtro passa-banda de fase

zero e controle automático de ganho. O perfil *sparker* monocanal pode ser processado usando um fluxo de trabalho semelhante, exceto a correção NMO e a estática residual CMP, que não são aplicadas.

6.3.2. Resultados da perfilagem sísmica com fonte *Sparker*

Nas Figuras 6.14 a 6.18, são descritos cinco perfis sísmicos obtidos com a fonte *Sparker* nas áreas 3 e 4 (Figura 6.12). Em função da maior penetração e boa resolução do método, notam-se numerosos refletores. A profundidade foi estimada a partir da velocidade de propagação do som na água do mar de 1.500 m/s.

Perfil 03 – Observa-se duas seqüências estratificadas separadas por uma discordância (D1), truncando os refletores mais antigos. Na seqüência superior (S1), os refletores são menos nítidos e apresentam uma declividade oposta aos refletores da seqüência inferior (S2). Presença de ecos hiperbólicos descontínuos (EH) ao longo da seção.

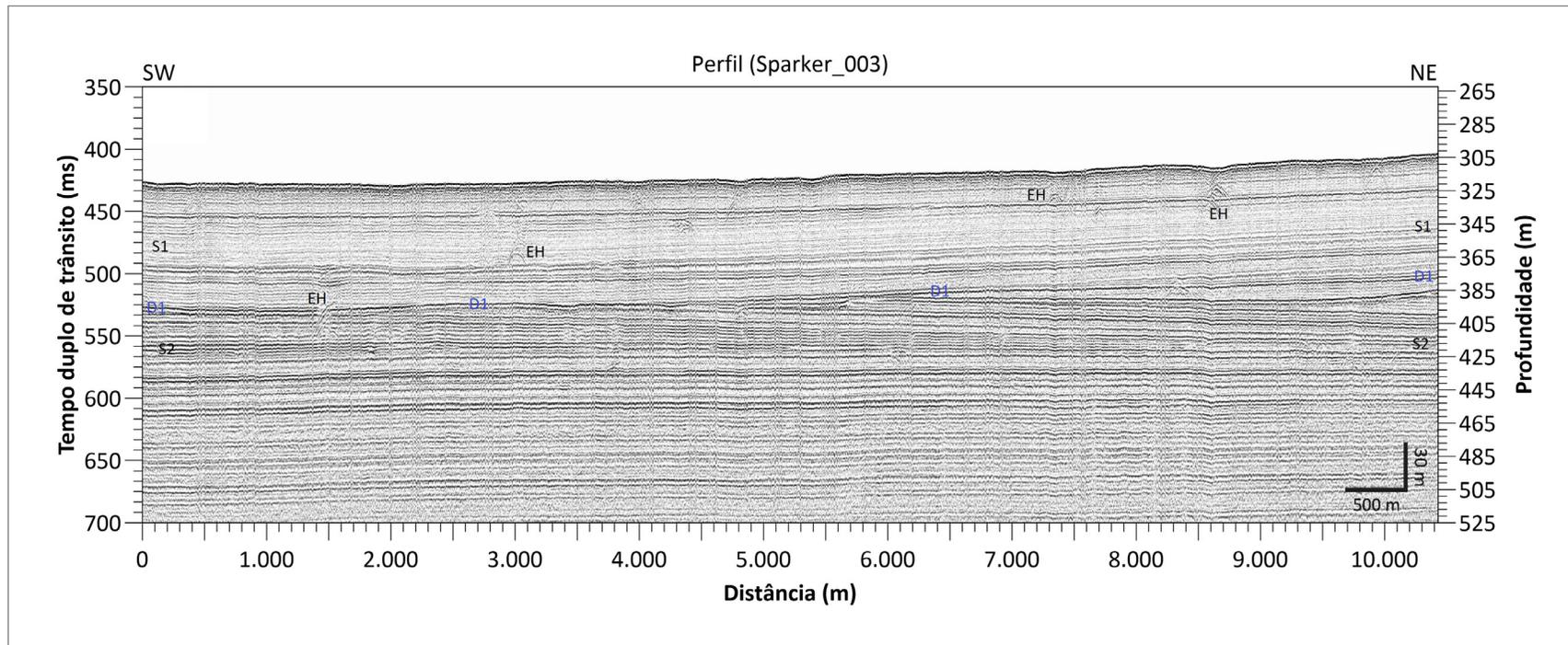


Figura 6.14 - Perfil 03 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 10 – Presença de paleocanal no centro do perfil (PC), onde se observam estratos inclinados preenchendo-o. Nas laterais do canal, há um refletor de maior amplitude (D1), delimitando a base da sequência superior.

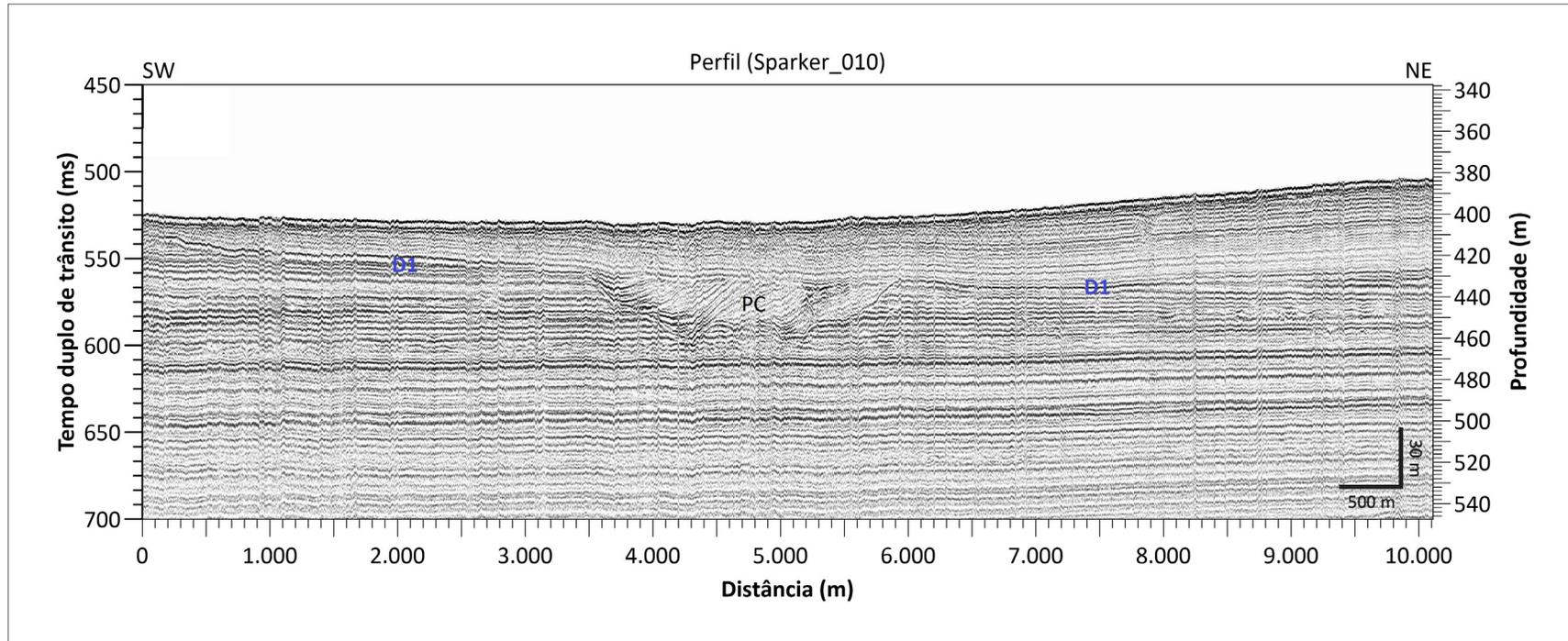


Figura 6.15 - Perfil 10 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 21 – Observa-se um largo canal no centro do perfil e abaixo dele refletores inclinados e caóticos preenchendo um canal mais antigo.

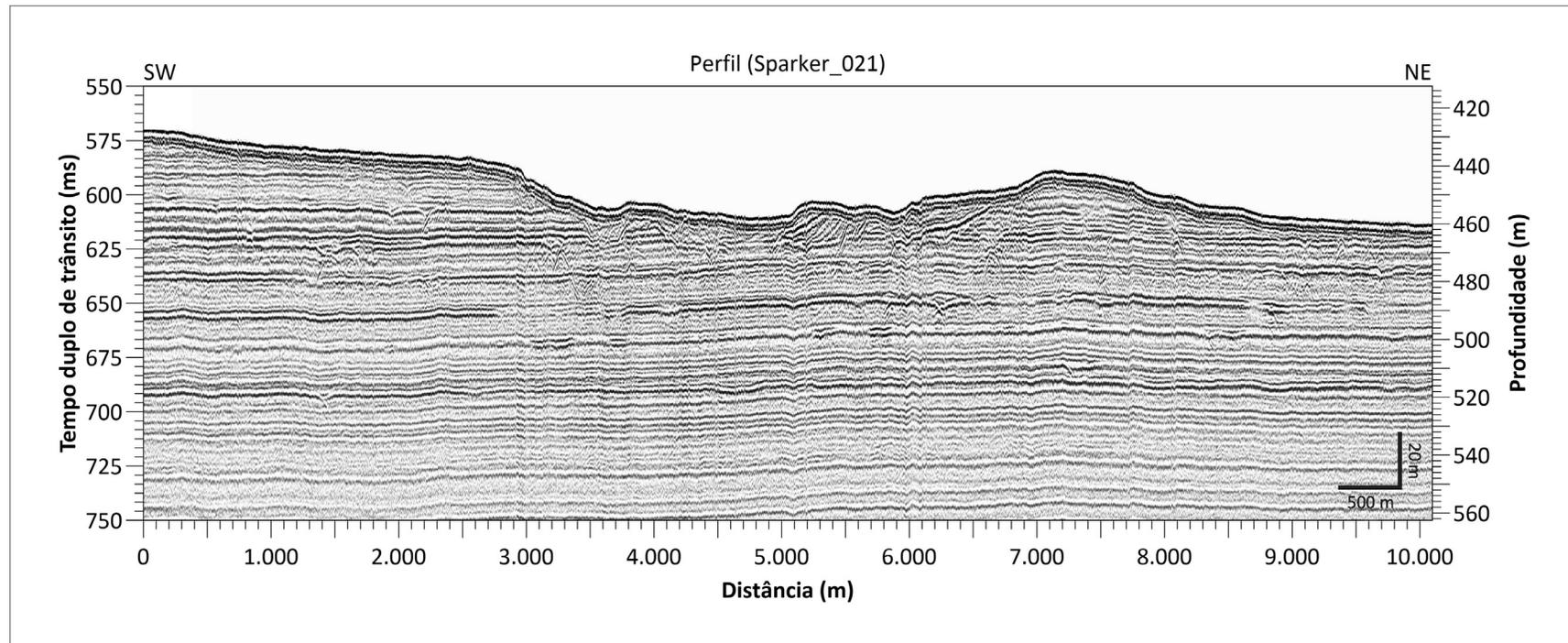


Figura 6.16 - Perfil 21 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 28 – Observa-se a NNE uma sequência de idade mais recente (S3) com mais de 50 m de espessura sobreposta à sequência inferior mais espessa (S4). A discordância (D2) que as separa torna-se o atual fundo do mar no trecho a SSW. Os refletores na sequência superior são contínuos e subparalelos; na inferior, são caóticos e perdem amplitude com a profundidade.

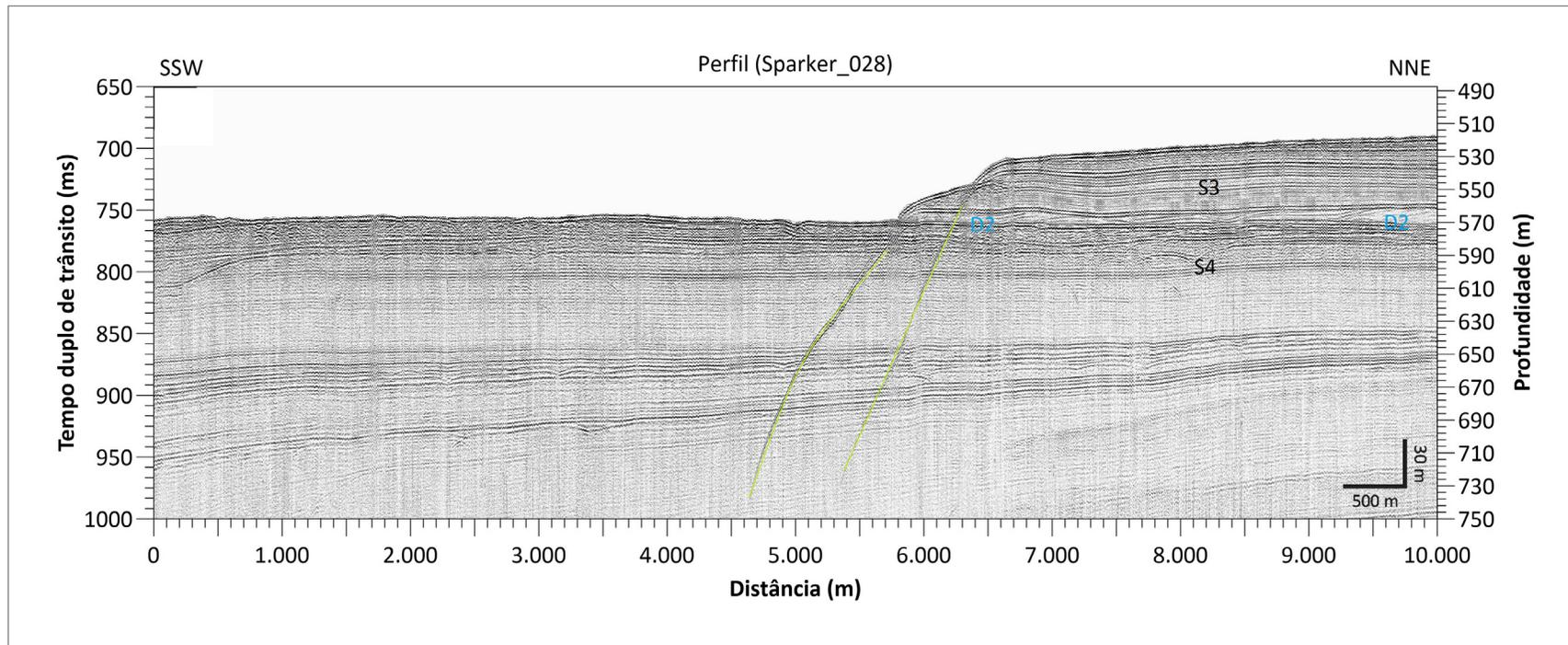


Figura 6.17 - Perfil 28 processado. As linhas verdes são artefatos. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 38 – O pacote sedimentar a NNE, que faz parte da sequência superior (S3), apresenta refletores caóticos, passando a paralelos na base. Na região central, há depósitos sedimentares recentes, com refletores descontínuos e irregulares e uma formação do tipo mound (M). Refletores hiperbólicos a SSW, em torno de 1000 ms, podem indicar a presença de gás (EH) ou ser um artefato. Um reprocessamento dessa seção e das anteriores pode melhorar a interpretação com o aumento da relação sinal/ruído.

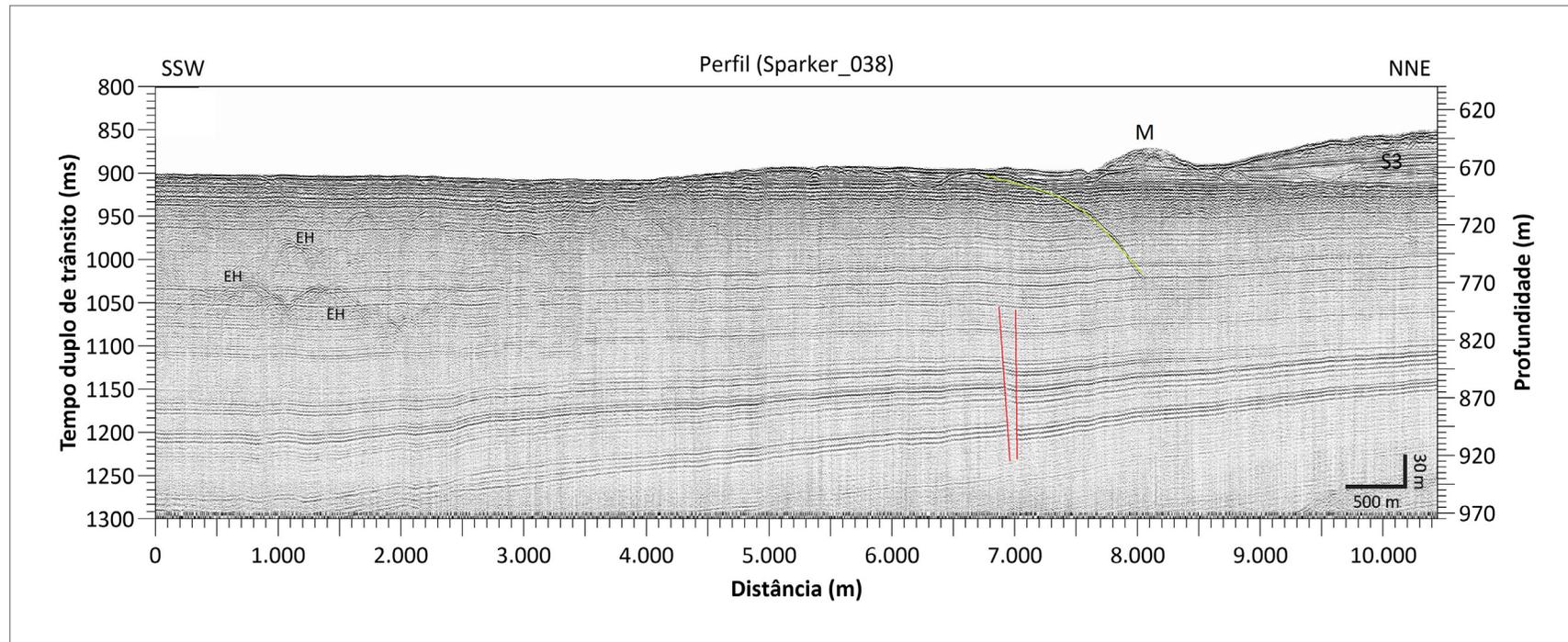


Figura 6.18 - Perfil 38 processado. As linhas vermelhas foram interpretadas como falhas, a linha verde é um artefato. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

6.3.3. Levantamento sísmicos com fonte *Chirp*

Em 2020, durante a campanha a bordo do NPqHo Vital de Oliveira, utilizou-se o perfilador de subfundo SBP120, fabricado pela Kongsberg Maritime AS, instalado no casco do navio para o levantamento da área rasa da plataforma continental próximo ao TRG, da área de detalhe ao norte do TRG e entre as estações de coleta de amostras geológicas (Figura 6.19).

Esse equipamento emite uma onda sonora do tipo *chirp* linear entre as frequências de 2,5 kHz e 6,5 kHz, que permite uma máxima resolução vertical de 0,3 ms. Foram ajustados uma largura de pulso de 10 ms e potência da fonte em -10

dB durante o levantamento. Esse tipo de fonte constitui-se num único módulo que contém o sistema emissor e receptor. O SBP 120 reduziu significativamente a largura dos feixes em comparação com os perfiladores convencionais de subfundo, fornecendo uma maior penetração e uma resolução angular mais alta.

Para a visualização e geração dos perfis no SonarWiz 7 V7.07.01, primeiramente, foram convertidos os dados originais no formato RAW para SEG Y ainda a bordo do navio. No processo de importação dos dados, deve-se informar os bytes 109-110 *Delay ms* no item Sensor Depht. Após a aplicação de filtros passa-banda e de ganho AGC, foi aplicado o *bottom tracking* para eliminar o ruído da coluna d'água.

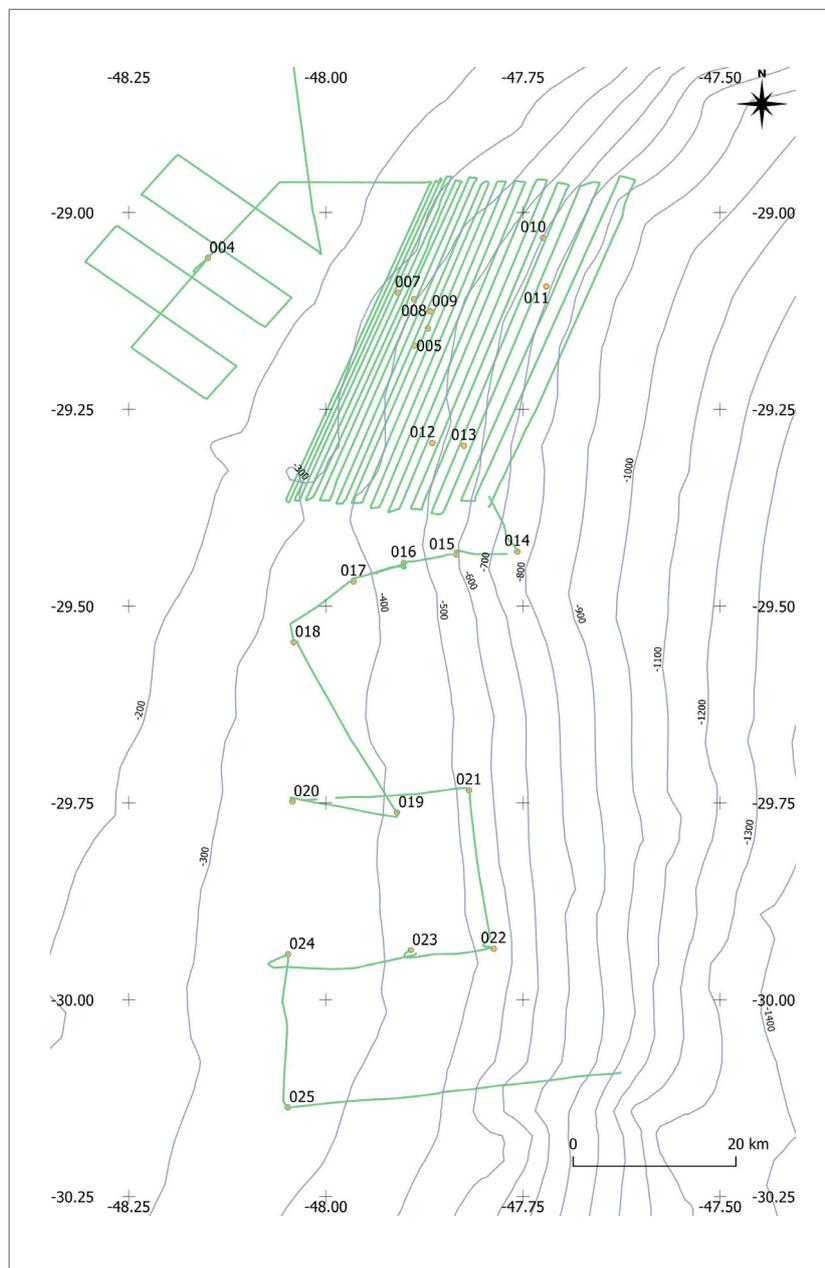


Figura 6.19 - Posicionamento das linhas de sísmica rasa obtidas com o perfilador SBP120 e dos pontos de coleta de amostras geológicas na região do Terraço do Rio Grande. Autor: Roberto Aguiar Alves, SGB-CPRM / DIGEOM.

6.3.4. Resultados da perfilagem sísmica com fonte *Chirp*

Nos painéis a seguir, são apresentados perfis sísmicos obtidos pelo *Chirp*. Numa tentativa de associar as fácies sísmicas à geologia sedimentar nas estações de coleta, os pontos próximos às linhas foram projetados aos perfis (Figuras 6.20 e 6.31). Na descrição dos perfis (Figuras 6.21 a 6.30 para os perfis no norte do TRG; Figuras 6.32 a 6.37 para os perfis na parte central do TRG), são informados o tipo de fundo e os resultados das análises de P_2O_5 .

Como o levantamento sísmico foi realizado juntamente com o batimétrico na área no norte do TRG, cuja metodologia de aquisição é orientada por uma navegação paralela às isóbatas, somente linhas longitudinais (*strike*) foram adquiridas. O ideal seria termos também linhas transversais (*dip*), que poderiam acrescentar um melhor entendimento à sismoestratigrafia da área. Na próxima etapa do projeto, planeja-se levantamentos sísmicos com linhas perpendiculares à margem continental, englobando desde a quebra da plataforma até a isóbata de 900 m de profundidade.

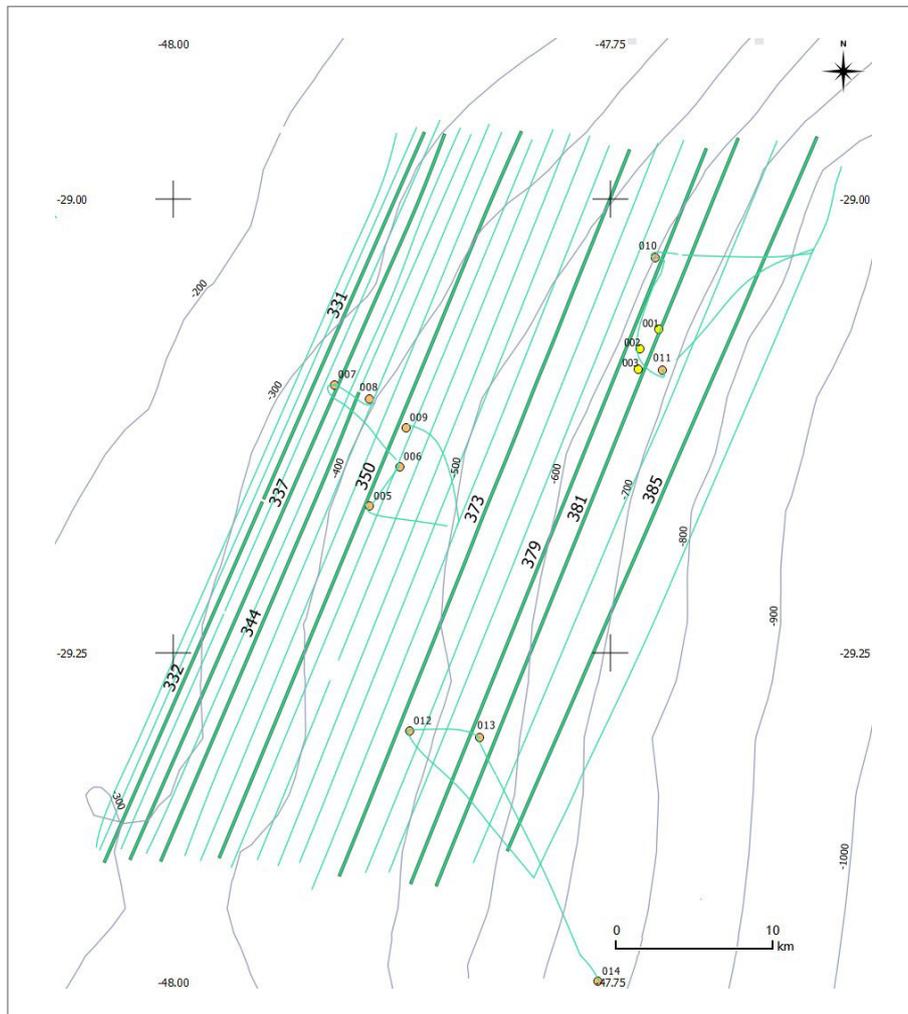


Figura 6.20 - Localização das linhas sísmicas *Chirp* na área ao norte do TRG, com destaque para os perfis descritos nos painéis (331, 332, 337, 344 e 350 na região proximal, 373, 379, 381 e 385 na região distal). Os círculos em laranja representam as estações de coleta em 2020 e os amarelos em 2018. Autor: Roberto Aguiar Alves, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 331 – Penetração variando de 15 a 20 m ao longo do perfil. Refletores de subfundo contínuos e paralelos de alta amplitude na camada superficial, logo abaixo há uma perda de amplitude do sinal. Ecos de fundo nítidos e contínuos com refletores de subfundo contínuos e paralelos foram associados, por Damuth & Hayes (1977) e Damuth (1980), a regiões com pouco ou nenhum sedimento grosseiro (silte, areia, cascalho). Observa-se vários indícios de escape de gás (G) ao longo do perfil.

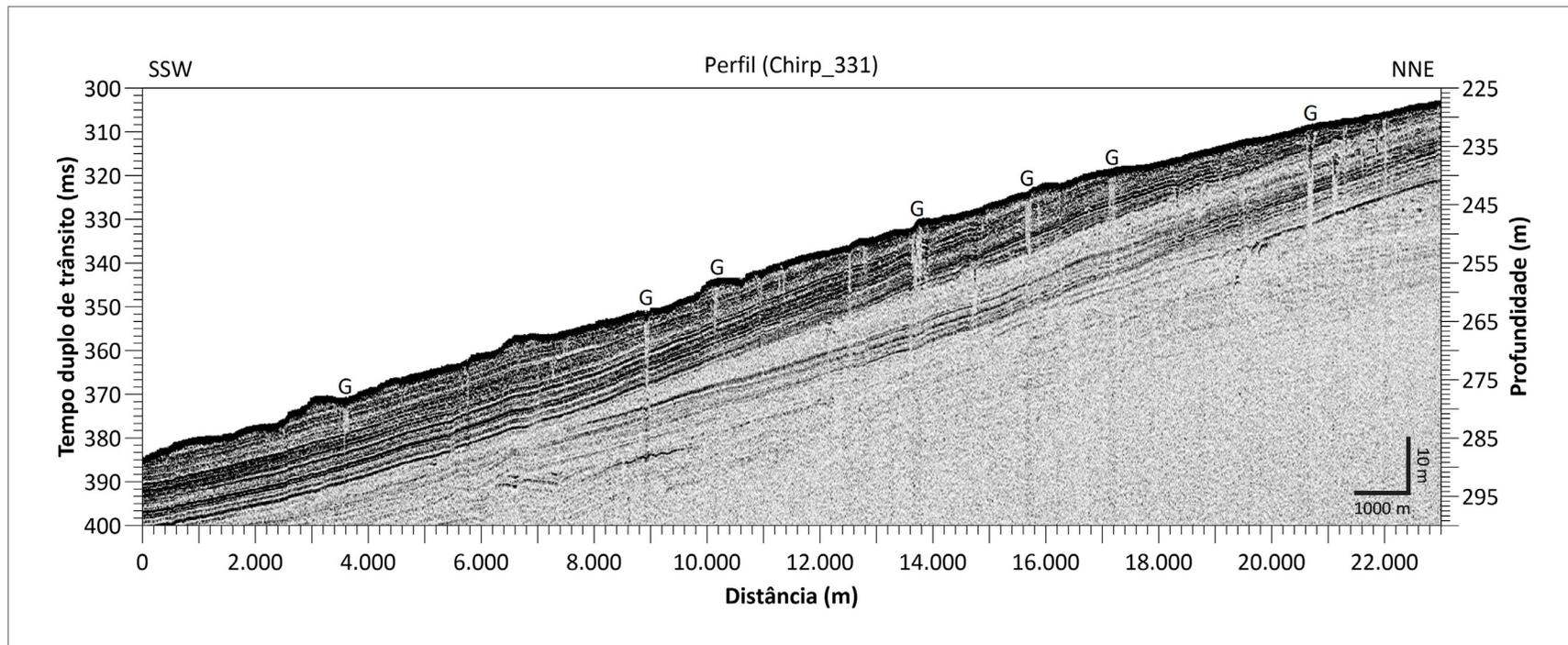


Figura 6.21 - Perfil 331 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 332 – Continuação do perfil 331. Refletores paralelos interrompidos localmente por zonas com ausência de sinal diretamente abaixo de depressões no fundo do mar, indicando zonas de escape de gás (G). A maior depressão próxima ao final do perfil, a SSW, mostra um pockmark (PK), que foi observado na batimetria, com 100 m de diâmetro e 16 m de profundidade.

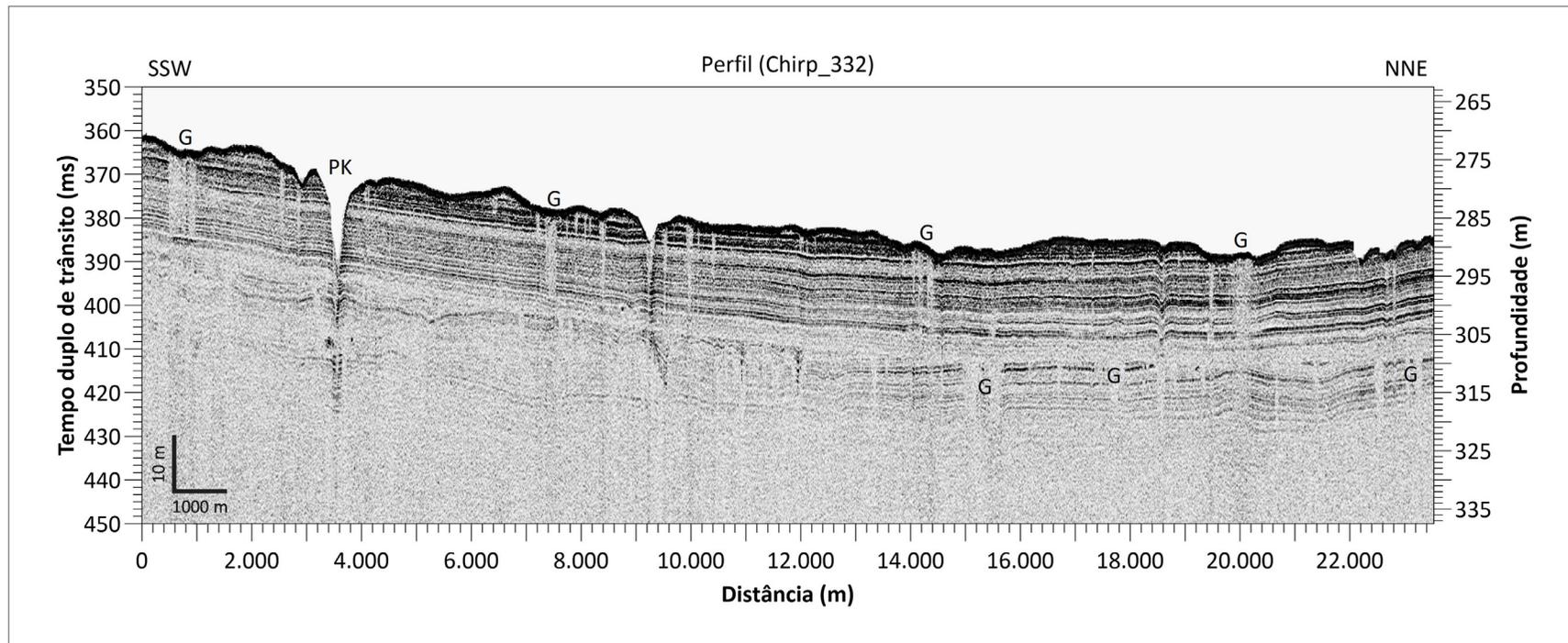


Figura 6.22 - Perfil 332 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM..

Perfil 337 – Refletores paralelos de alta amplitude na sequência superficial (S1), cuja base trunca as terminações dos refletores da sequência abaixo (S2) no trecho a SSW. A discordância (D1) pode indicar um hiato deposicional antecedido por um evento erosivo, para confirmar essa hipótese precisaria fazer um testemunho. Em ambas as sequências, vários indícios de escape de gás representados pela ausência de sinal (G). Na estação 007 foi coletada lama arenosa sem concreções.

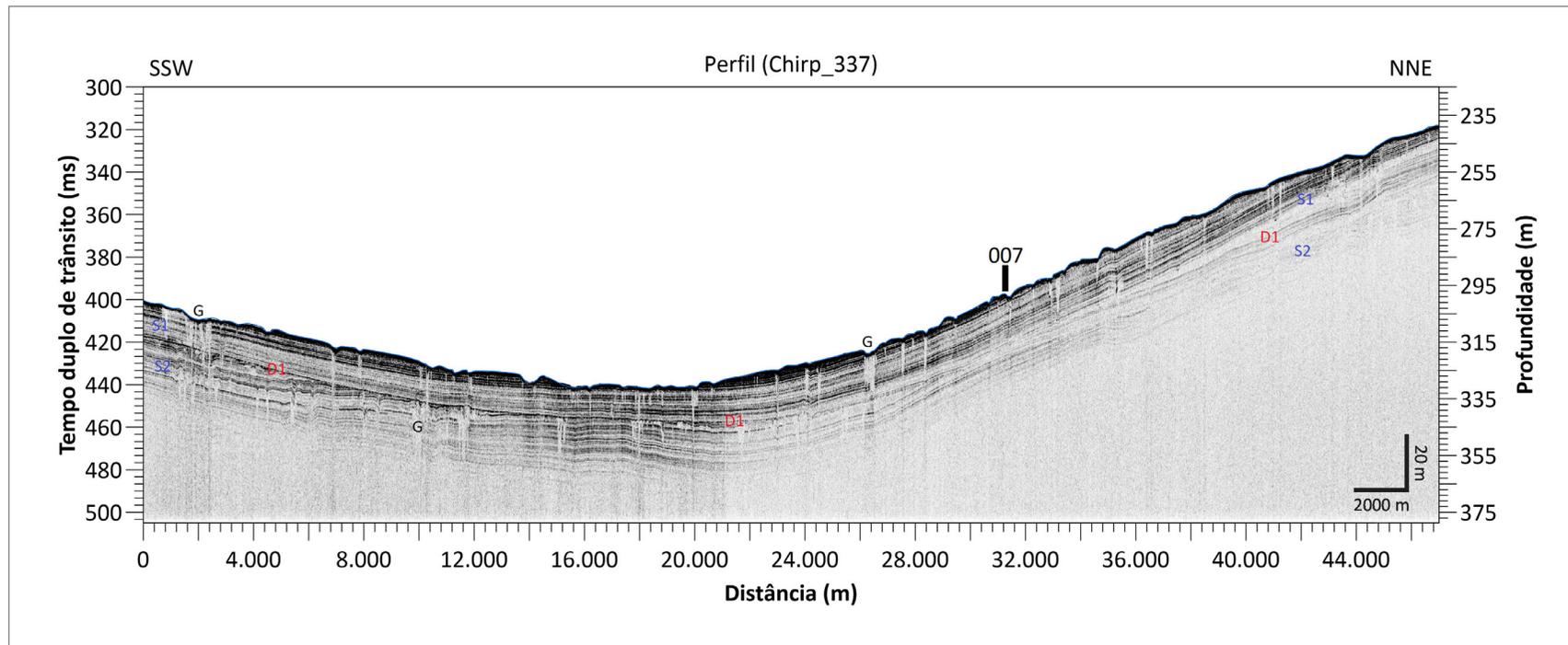


Figura 6.23 - Perfil 337 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 344 – Os refletores de subfundo são truncados pelo do fundo do mar, numa região côncava, onde observa-se o limite (L) entre duas regiões de fácies sísmicas distintas: ecos semiprolongados, descontínuos a SSW, e ecos de subfundo nítidos, contínuos e subparalelos a NNE. Vários indícios de escape de gás representados pela ausência de sinal (G) nessa região.

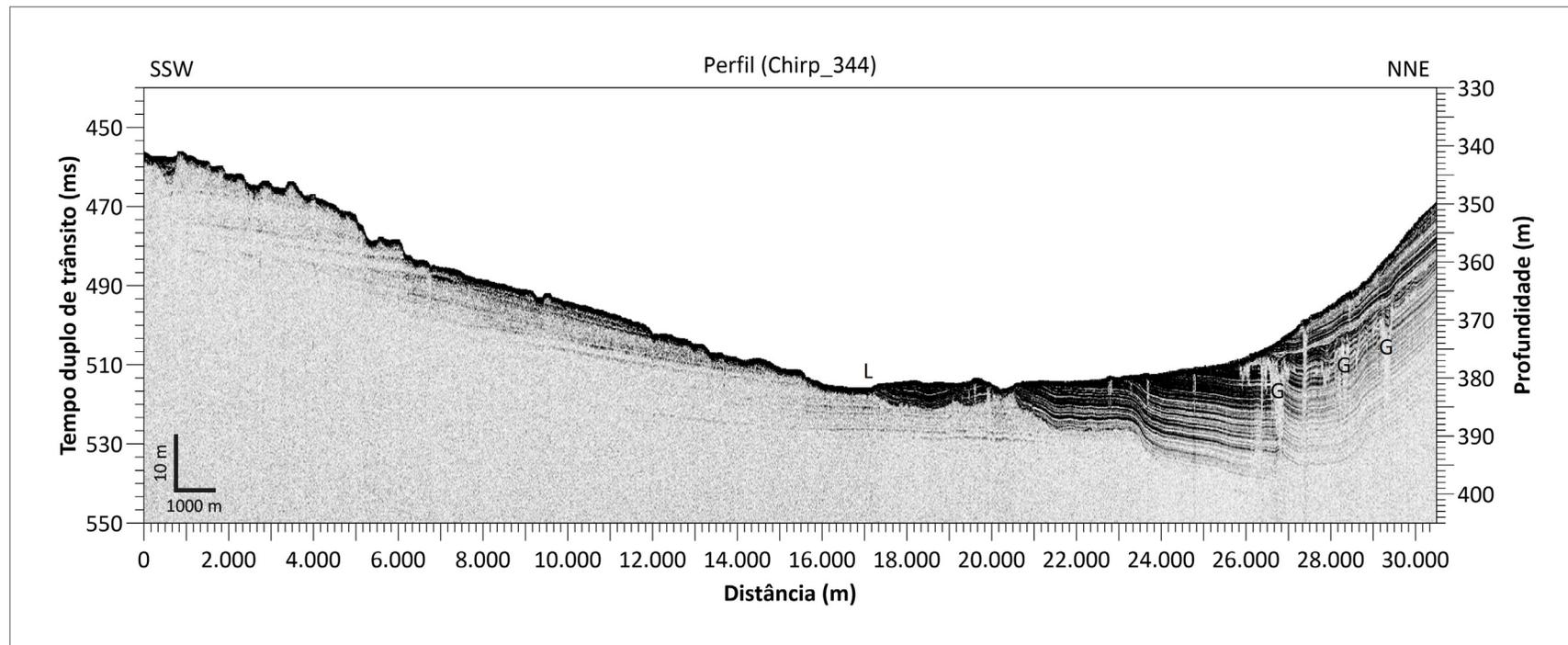


Figura 6.24 - Perfil 344 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 350 – Larga depressão, onde foram amostradas as estações 005 e 009. Nas estações, foi coletada areia lamosa com poucas concreções centimétricas (volume reduzido), mas com teores de P_2O_5 acima de 16 %. Nesse trecho predominam ecos de fundo prolongados com poucos refletores de subfundo intermitentes. Segundo Damuth & Hayes (1977) e Damuth (1980), esse tipo de eco indica alta concentração de sedimentos grosseiros.

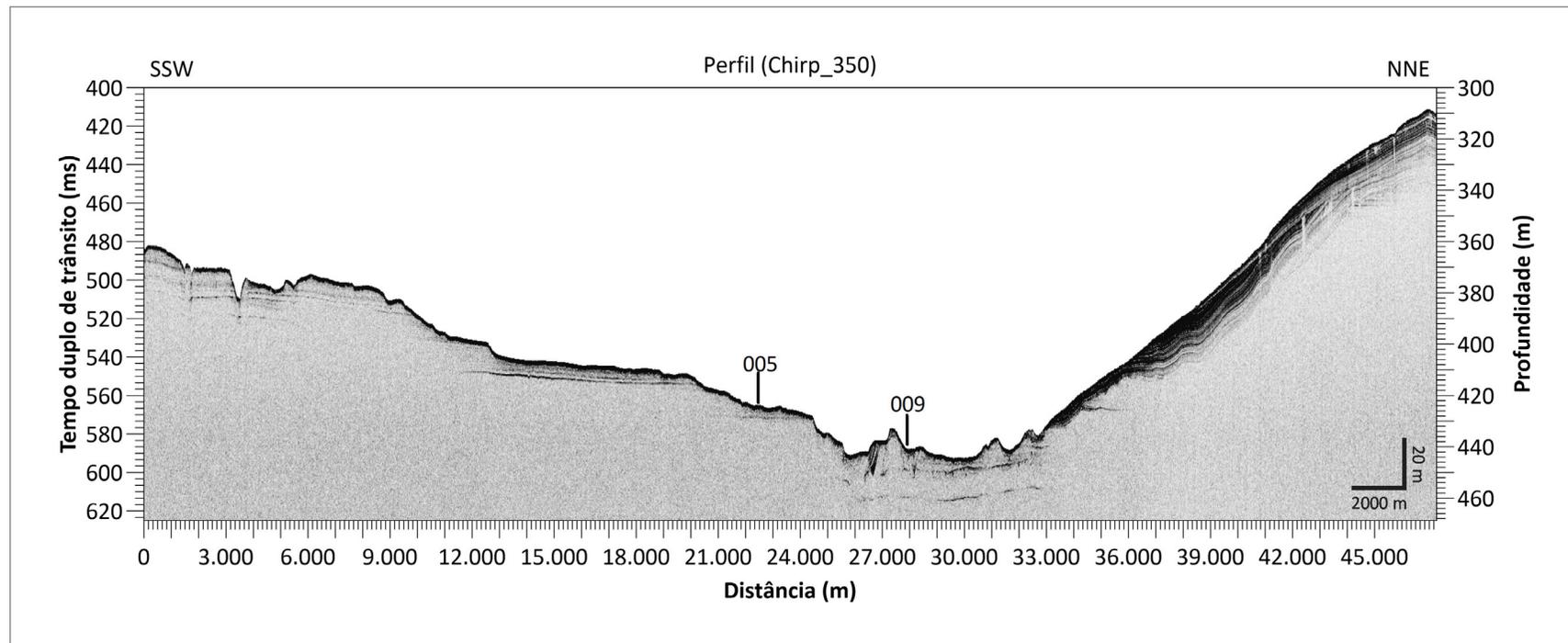


Figura 6.25 - Perfil 350 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM..

Perfil 373 – Observa-se no trecho a SSW várias elevações do fundo marinho recortadas por vales incisivos; presença de refletores plano-paralelos descontínuos em contato erosivo com o fundo escarpado. Na área mais profunda, há um refletor de subfundo irregular, rugoso e descontínuo. Na estação 012 foi coletada lama arenosa marrom, com espessura de 5 cm, sobreposta à camada de argila cinza-esverdeado. No box corer, a amostra tinha 20 cm de espessura indicando uma boa recuperação de 30 %. Presença de três concreções maiores que 5 cm e uma maior que 10 cm, pesando aproximadamente 2,5 kg o conjunto. Das amostras analisadas, o teor mais alto foi de 4,29 % P_2O_5 . A estação situa-se no topo de uma elevação de 50 m em relação aos vales que circundam a feição.

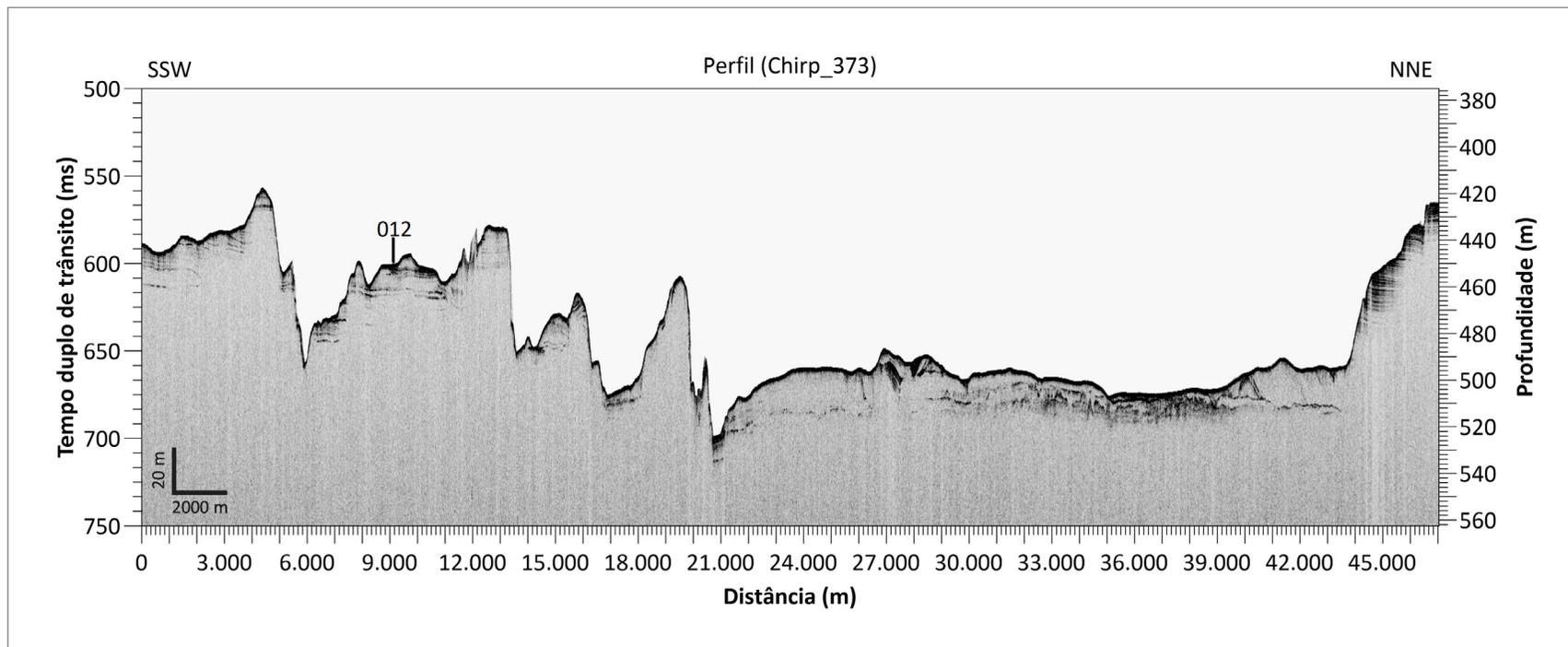


Figura 6.26 - Perfil 373 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 379 – A medida que aumenta a profundidade, as elevações a SSW aparentam estar mais erodidas no topo e nos flancos. No trecho central do perfil, observa-se novamente a presença do refletor de subfundo irregular, aflorando por longas distâncias. A NNE ocorre uma região cerca de 50 m mais elevada, o topo apresenta refletores de subfundo ondulados, paralelos e contínuos. Na estação 013, foi coletada lama arenosa com biodetritos, sendo baixa a recuperação nos dois equipamentos; presença de concreções de tamanhos variados, sendo duas com mais de 10 cm. As amostras analisadas apresentaram baixos teores P_2O_5 , entre 2 e 3 %. Na estação 010, foi coletada areia fina a média, com presença de biodetritos e somente uma pequena concreção.

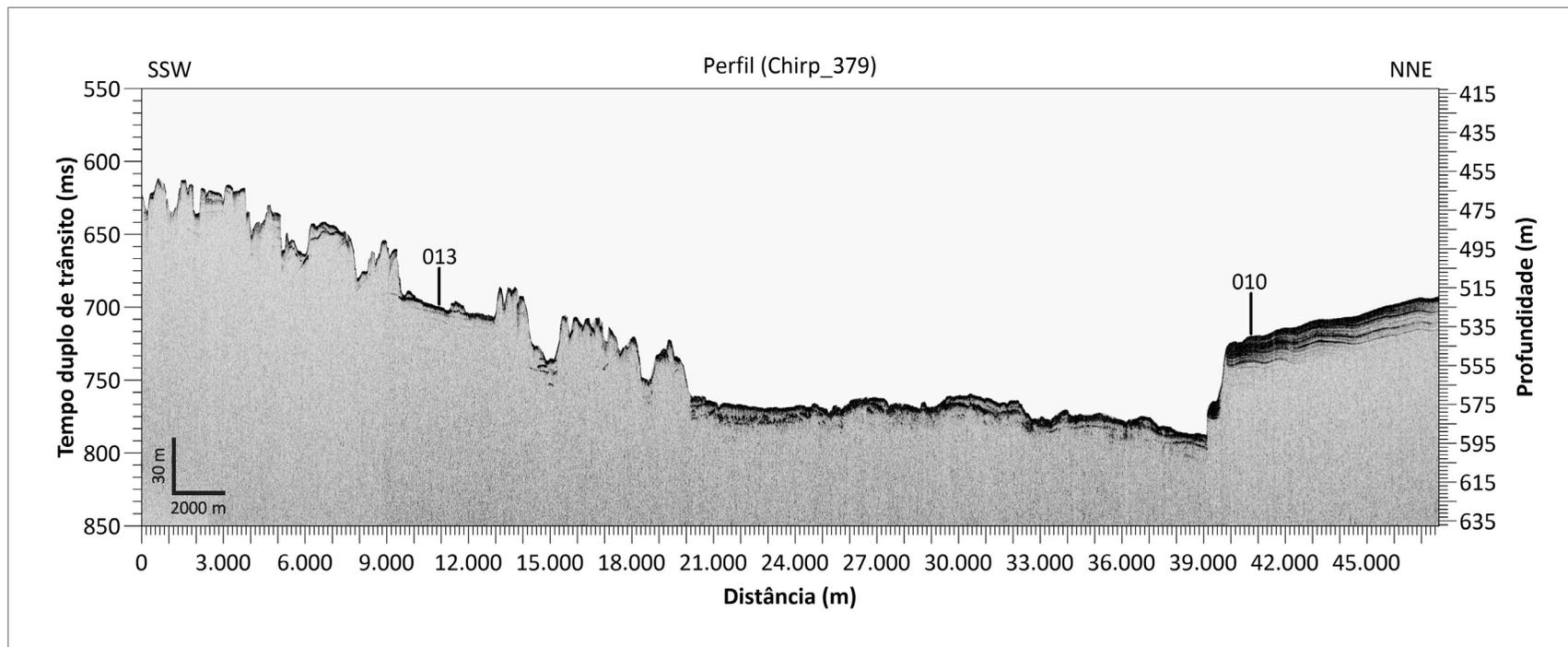


Figura 6.27 - Perfil 379 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 381 – Comparando com o perfil 379, observa-se um relevo mais contínuo a SSW e características de fundo semelhantes nos trechos central e elevado a NNE. Na Figura 6.29, é mostrado um detalhe do trecho próximo às estações 001, 002 e 003 na campanha de 2018, onde observam-se camadas pouca espessas sobre um refletor de subfundo de alta amplitude que aflora no fundo do mar. Nas três estações, foi coletado um sedimento arenoso e muitas concreções do tamanho de seixo com concentrações superiores a 15% de P_2O_5 . A fácies sísmica desse refletor de fundo pode ser considerada um exemplo de correlação da sísmica com locais de presença significativa de fosforita.

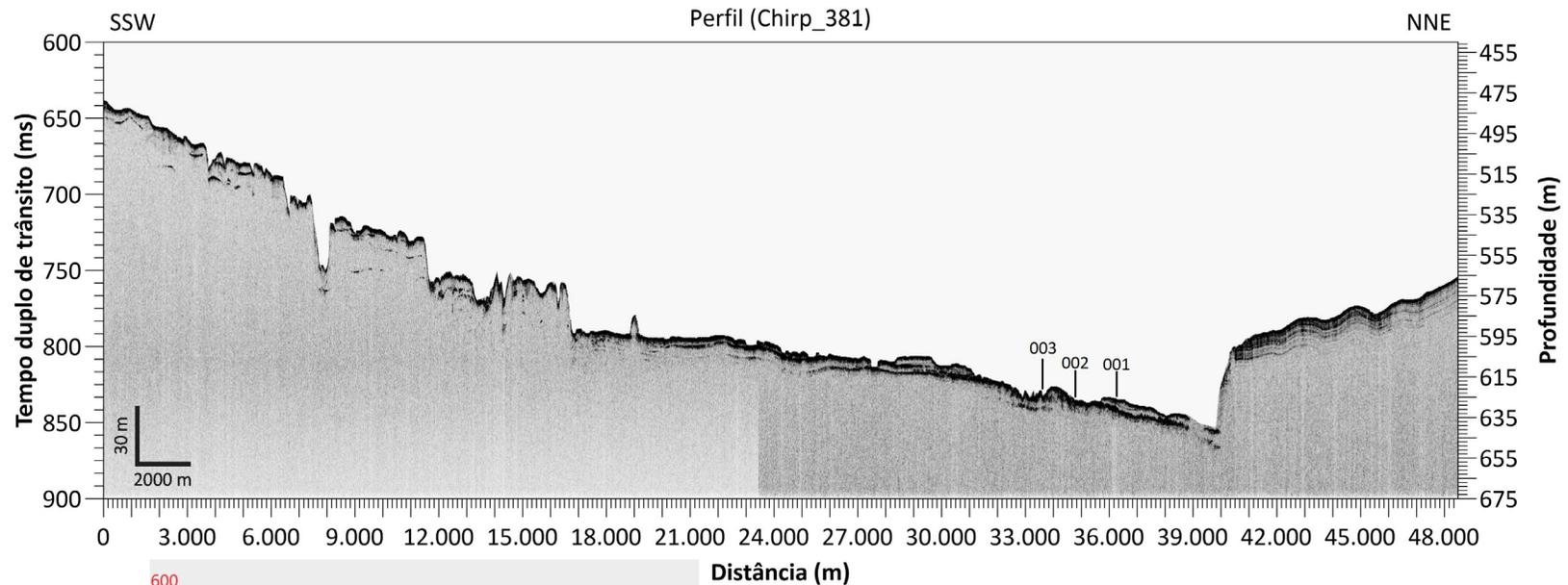


Figura 6.29 - Detalhe do perfil 381, próximo às estações 001, 002 e 003. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

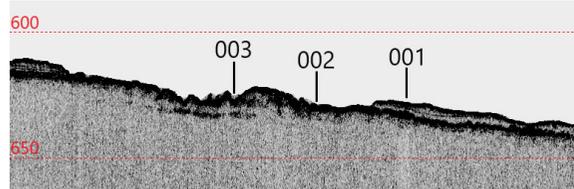


Figura 6.28 - Perfil 381 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 385 – Relevo irregular apresentando vários blocos de topo aplainado no trecho mais raso a SSW, gradativamente passando para um fundo mais suave, onde observam-se refletores de subfundo paralelos descontínuos. Aparentemente, são o resultado do retrabalhamento por correntes de contorno do sedimento depositado por fluxos de massa. Essa hipótese deverá ser investigada na continuidade do trabalho, pois esses mecanismos têm influência na hidrodinâmica em plataformas continentais e, portanto, no retrabalhamento hidráulico.

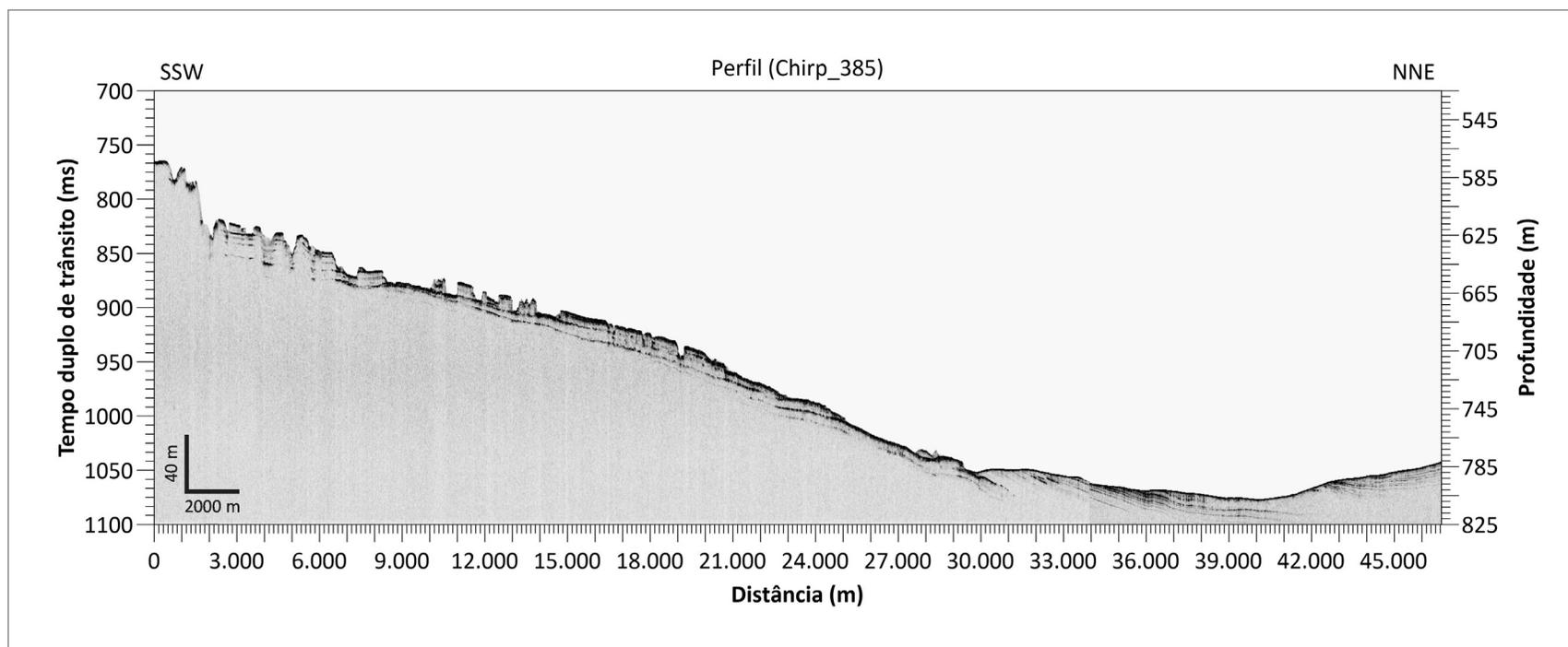


Figura 6.30 - Perfil 385 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

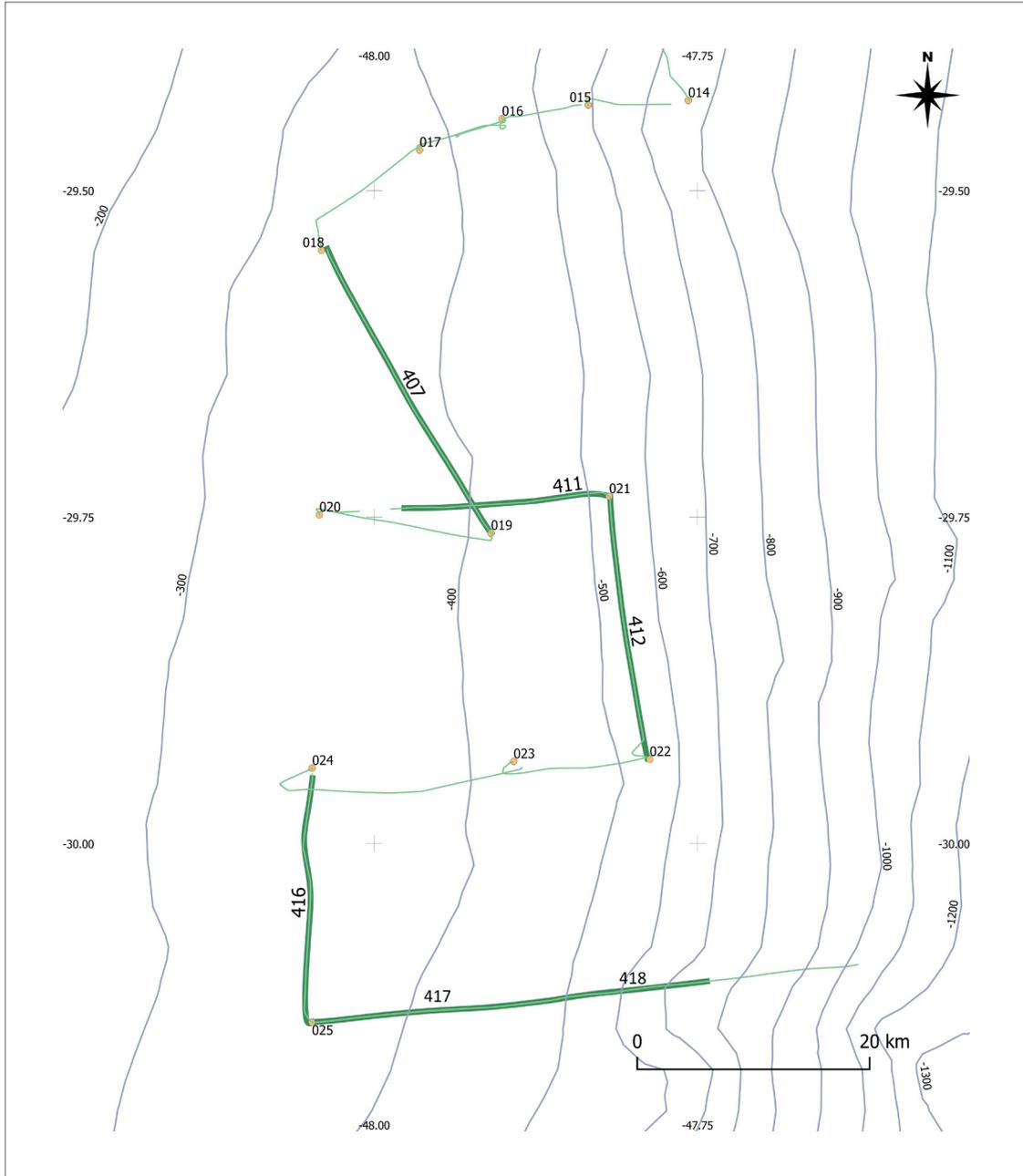


Figura 6.31 - Localização das linhas sísmicas Chirp na área central do TRG, com destaque para os perfis apresentados nos painéis (407, 411, 412, 416, 417 e 418). Os círculos em laranja representam as estações de coleta de 2020. Autor: Roberto Aguiar Alves, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 407 – Ao longo do perfil observam-se refletores de subfundo inclinados descontínuos, de baixa amplitude, terminando em contato erosivo com o leito marinho bastante rugoso. Presença de um canal com profundidade de 30 m e largura de 100 m (C). Na estação 019, foi amostrada uma lama arenosa coesa e concreções de tamanhos seixo a bloco. A amostra analisada apresentou um teor médio de 9.55 % de P_2O_5 .

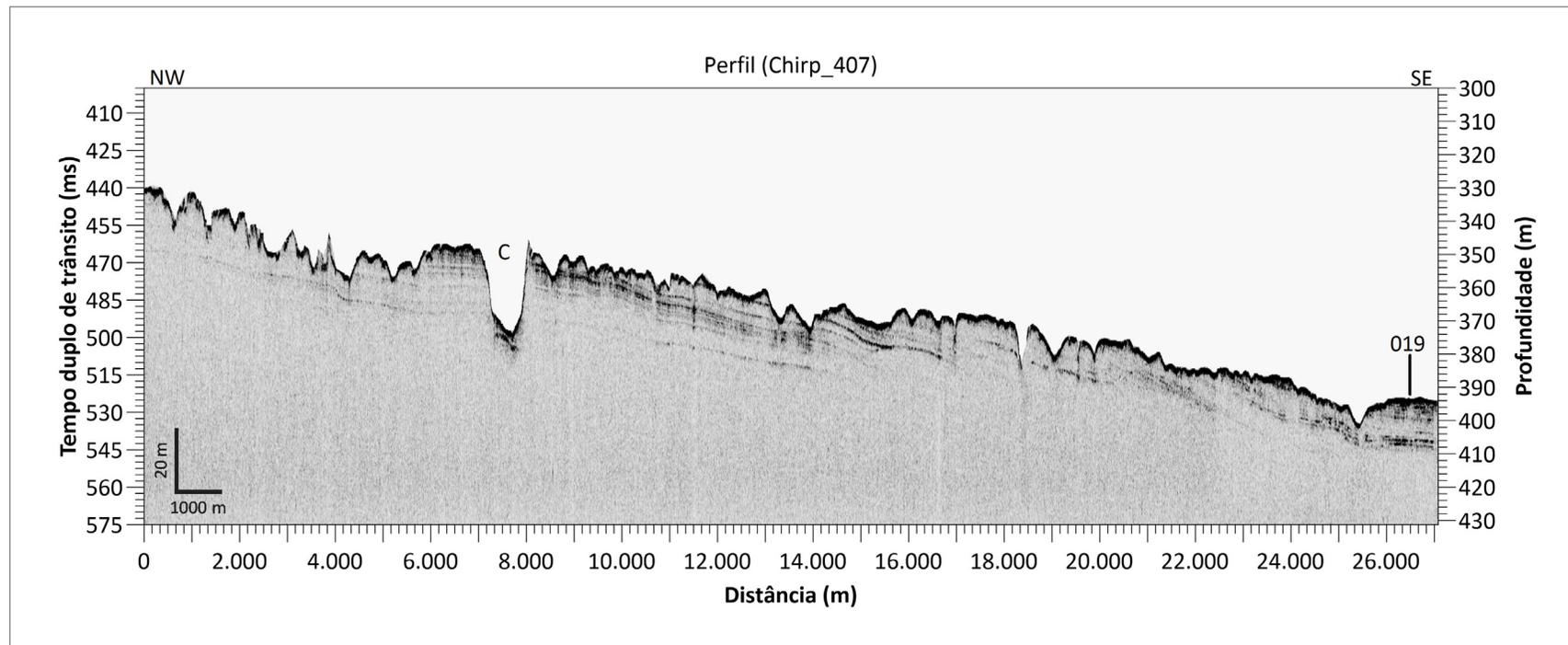


Figura 6.32 - Perfil 407 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 411 – Observa-se, a oeste, a quase ausência de refletores de subfundo, característica de sedimentos grosseiros na camada superficial. No trecho a leste, observam-se refletores inclinados em contato erosivo com o fundo mar. Na estação 021, foi coletada areia fina marrom com concreções e nódulos menores variando de 1 a 7 cm. Um teor alto de 16.69 % de P_2O_5 foi encontrado em um dos conjuntos de amostras analisadas, formado por pequenos seixos de 1 a 2 cm.

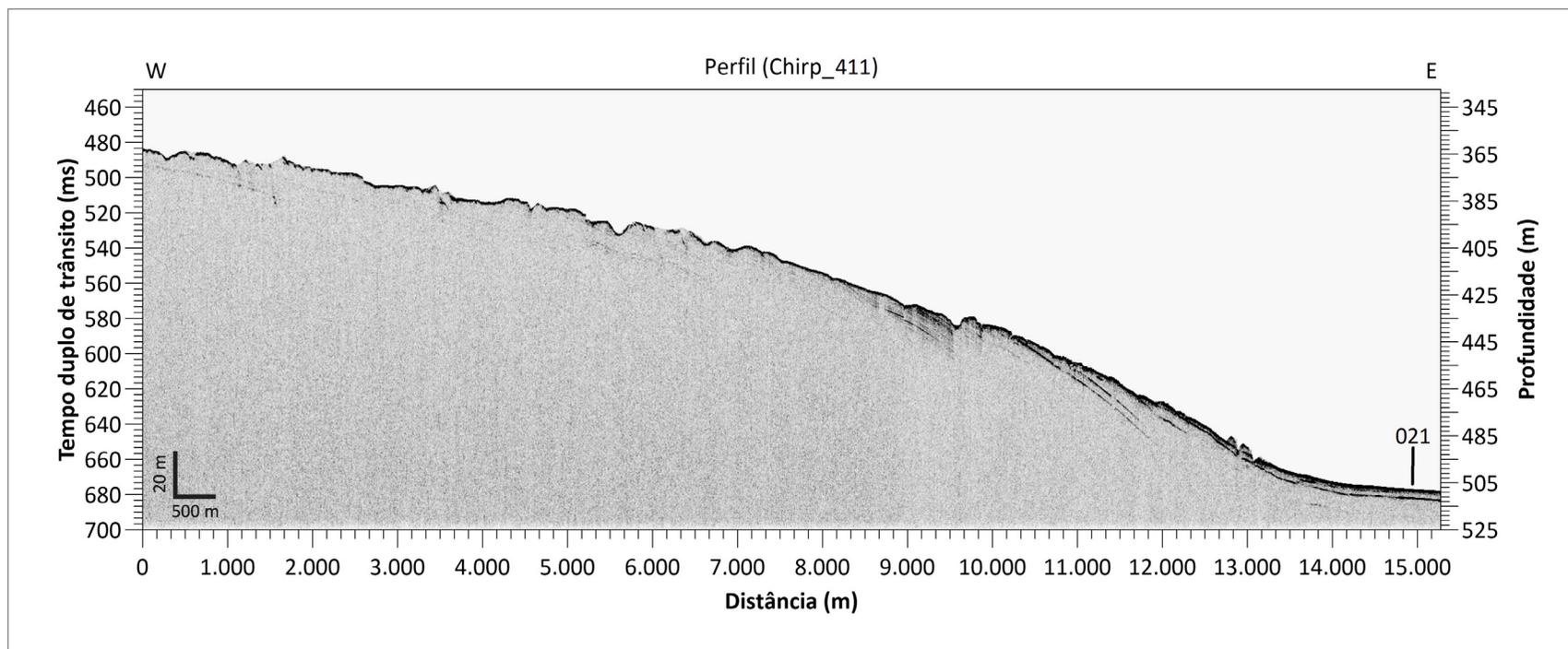


Figura 6.33 - Perfil 411 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 412 – Observam-se refletores de baixa amplitude inclinados, que podem estar relacionados com a formação de depósitos causados por correntes de fundo. Na estação 022, foi coletada areia fina a média, marrom-acinzentada com pouca lama. Presença de várias concreções centimétricas. Em duas amostras, formadas por vários seixos de 1 a 5 cm e por seixos irregulares em torno de 5 cm, foram encontrados altos teores de P_2O_5 , 15.86 e 17.79 %.

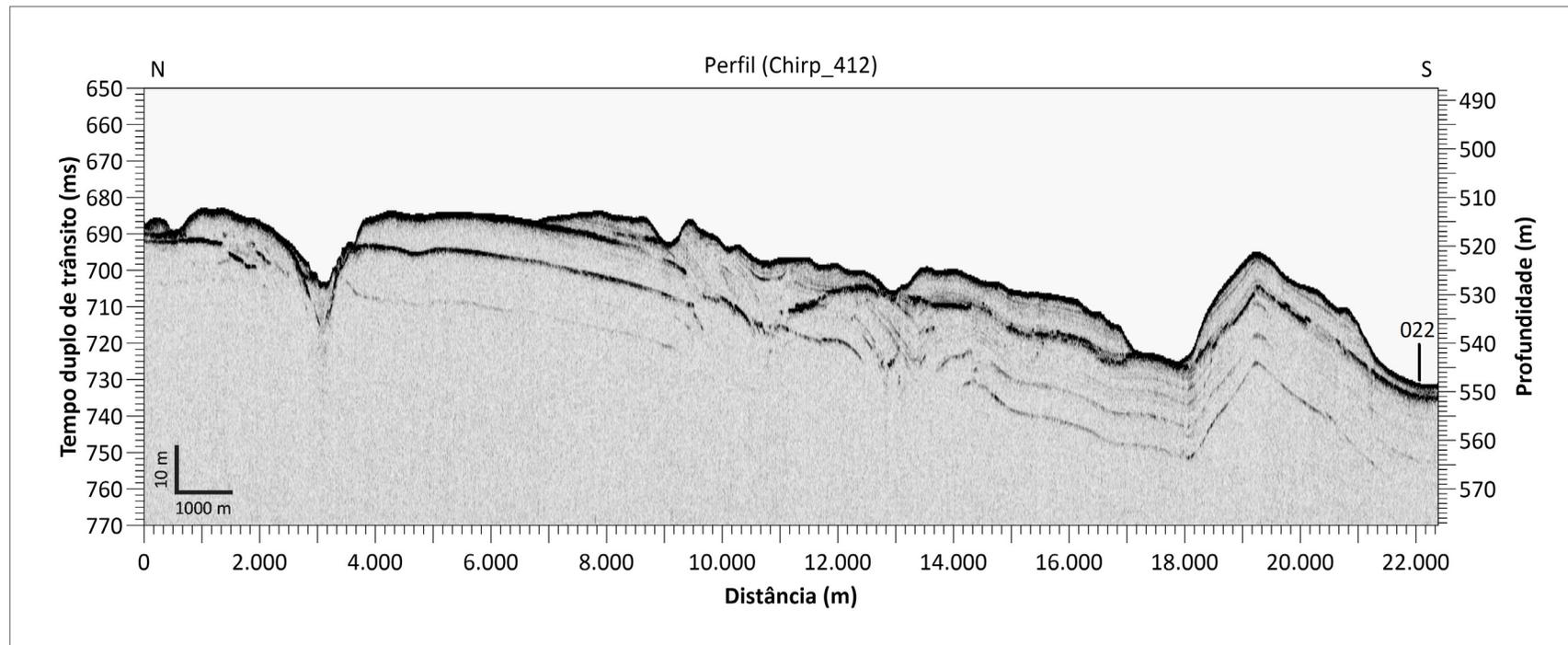


Figura 6.34 - Perfil 412 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 416 – Trecho entre as estações 024 e 025, apresentando o fundo bastante irregular e praticamente sem penetração acústica. Esse tipo de fácies sísmica foi relacionado a áreas de afloramento de fosforita (Abreu, 2010). Na estação 024, o sedimento coletado constitui-se de areia fina à média, matriz lamosa com biodetritos, concreções pequenas de 1 a 2 cm e nódulos maiores até 8 cm. Teores em torno de 4 % P_2O_5 foram analisados em duas amostras duplicatas.

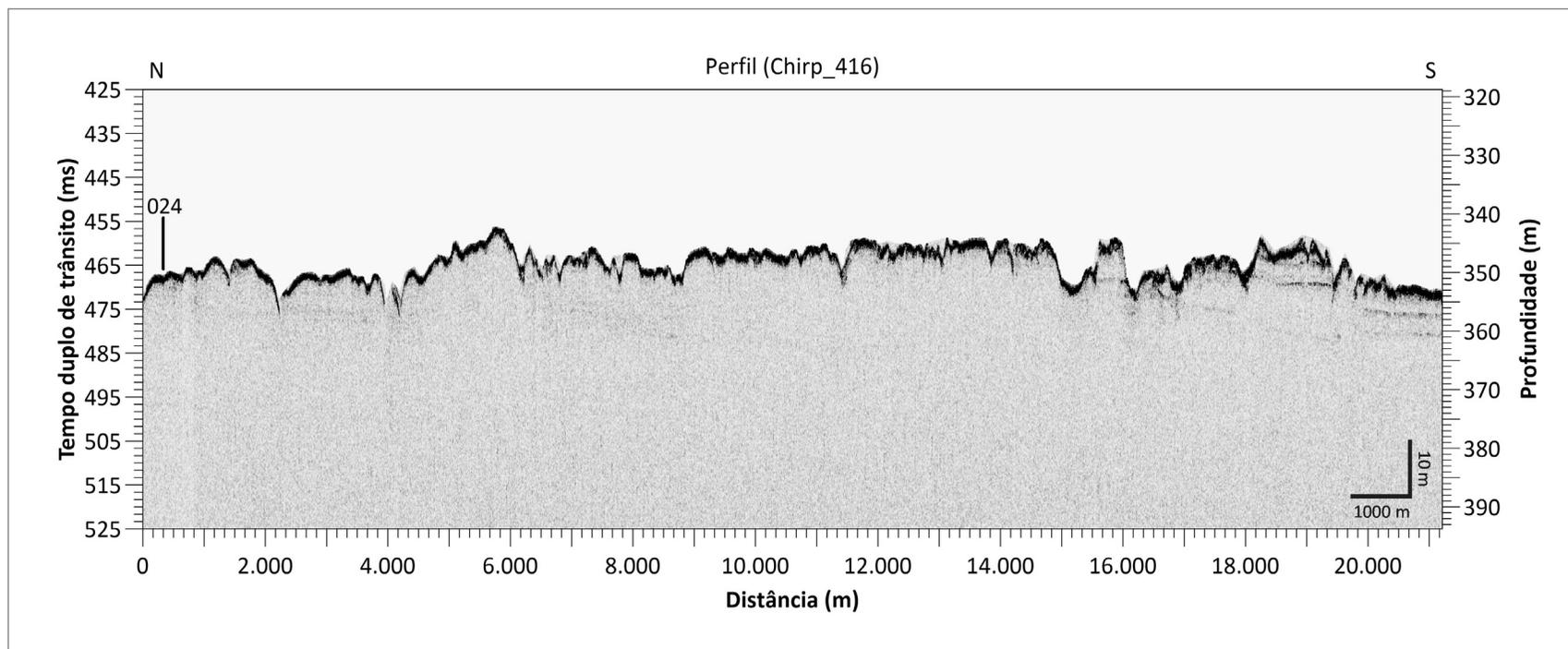


Figura 6.35 - Perfil 416 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 417 – No trecho a oeste, o fundo é rugoso e praticamente sem refletores, destacando-se um pináculo (P) de aproximadamente 15 m de altura, sendo um alvo interessante para futura investigação por ROV. A leste, observa-se uma boa penetração e a presença de refletores inclinados. Na estação 025, houve uma boa recuperação na amostragem por Van Veen. Areia fina a média numa camada superficial de cerca de 10 cm. No box corer, foi recuperada uma grande quantidade de concreções e pouco sedimento. Nódulos de tamanhos variados de 1 a 7 cm pesando 4.15 kg. Teores de 1.66 e 7.53 % de P_2O_5 em duas amostras analisadas.

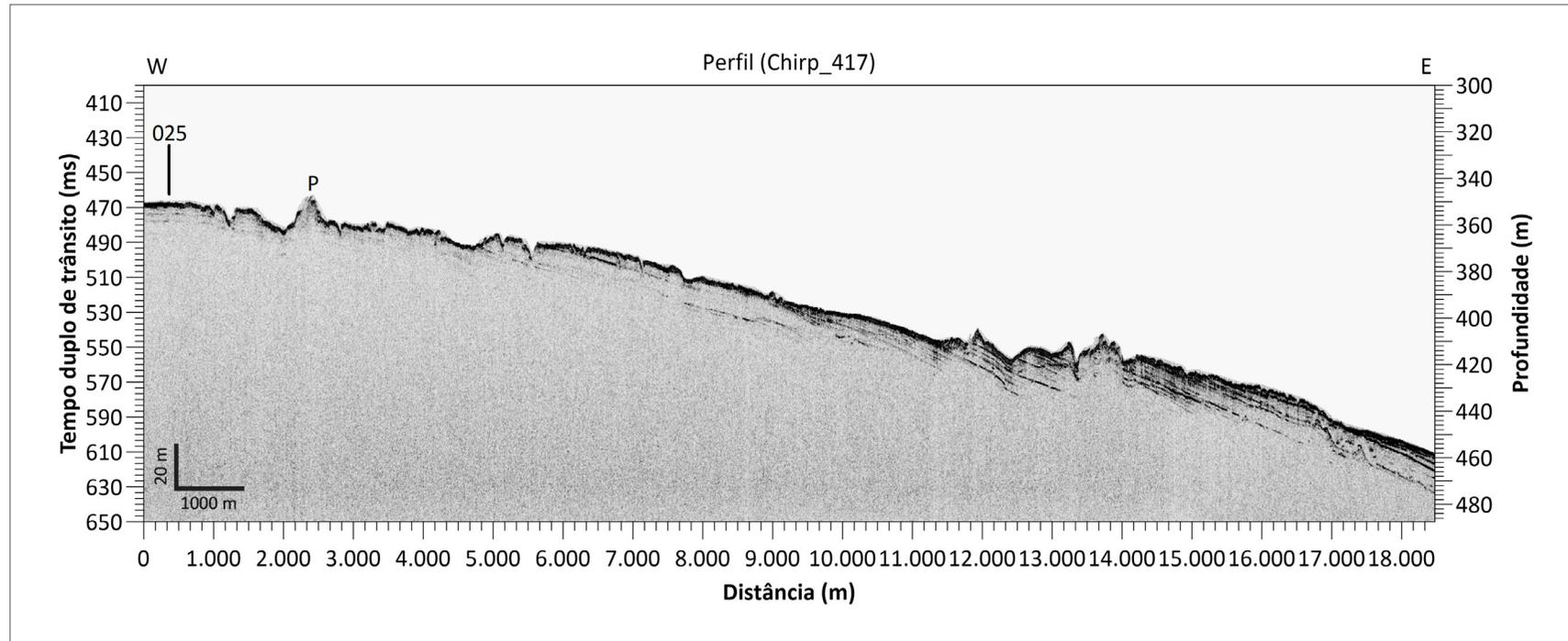


Figura 6.36 - Perfil 417 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

Perfil 418 – Continuação do perfil anterior. No trecho a oeste, o fundo inclinado é mais plano que a leste e apresenta um refletor de subfundo nítido de alta amplitude (R1). Presença de dois canais paralelos no trecho central (C1 e C2). No trecho mais profundo, as elevações no fundo do mar (RC1 e RC2), na faixa de profundidade entre 600 e 650 m, podem ser recifes de coral de mar profundo. No mapa batimétrico, é nítida a presença de extensas cristas no setor SW mais profundo do TRG, onde, num dos testemunhos da operação GEOMAR XIII (Martins et al. 1985), foi descrito uma ocorrência de fragmentos grosseiros de corais em toda coluna. Em termos de conhecimento científico, essas feições poderiam ser estudadas com a utilização de ROV para a coleta de material biológico. Ambientalmente, são de grande importância para avaliação de atividades de exploração na região.

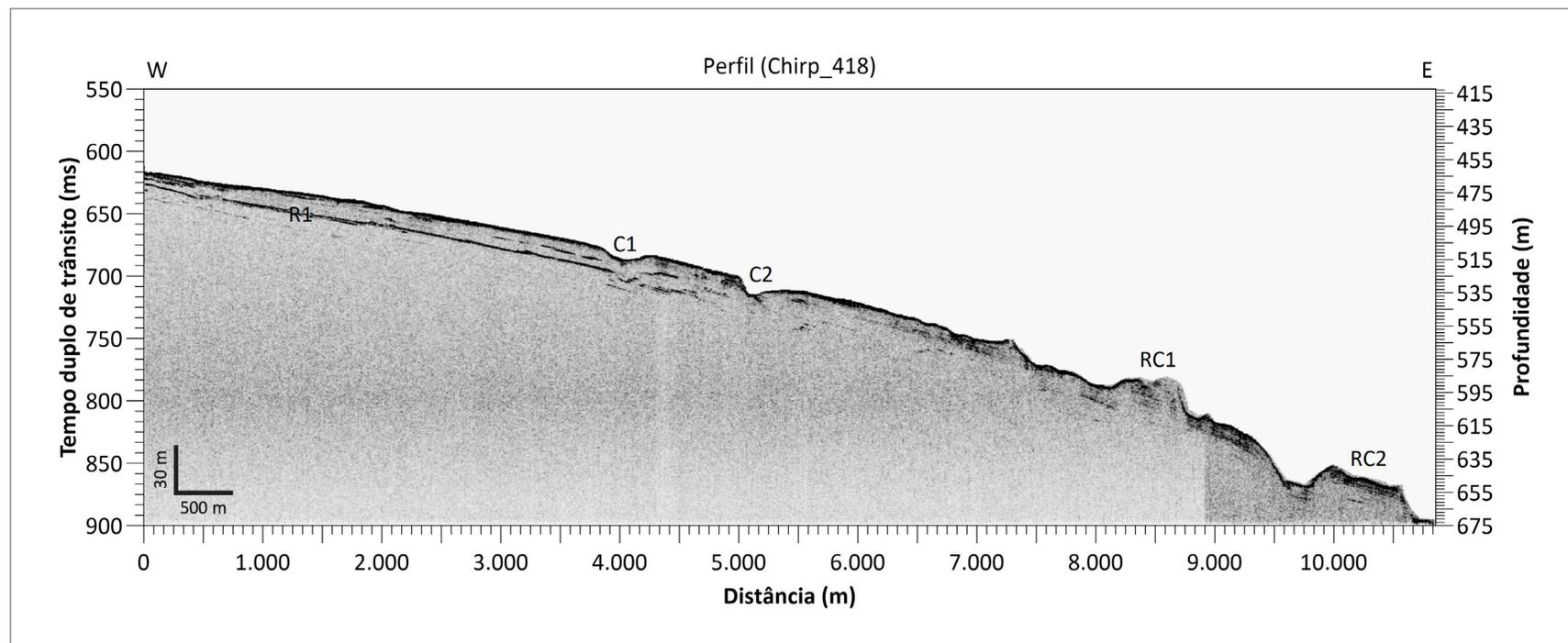


Figura 6.37 - Perfil 418 processado. Elaborado pela equipe do projeto, SGB-CPRM / DIGEOM.

6.4. DADOS OCEANOGRÁFICOS

6.4.1. Síntese do levantamento

Entre 28/02/2020 e 07/03/2020, o SGB-CPRM conduziu uma campanha de levantamento geofísico, geológico e oceanográfico sobre o TRG situado na margem continental sul-brasileira, ao largo do Cabo de Santa Marta Grande. O levantamento oceanográfico consistiu na medição contínua de:

- 1) Correntes entre 0 e 200 m de profundidade, usando um perfilador acústico Doppler de casco (ADCP);
- 2) Temperatura e salinidade de superfície, medidos a cada 10 min por um termossalinógrafo (TSG);

Além disso, foram aquiritados cinco perfis verticais de velocidade do som, usando sondas XSV, com intuito principal de corrigir a aquisição batimétrica e secundário, de revelar a estrutura da coluna d'água na região. Para auxiliar na interpretação dos resultados, foram analisadas, além dos dados aquiritados, imagens de satélite de temperatura da superfície do mar (TSM) e cor do oceano.

6.4.2. Síntese dos resultados

Os dados e as imagens de satélite revelaram um sistema complexo de correntes e vórtices atuando nessa região do Atlântico Sul. Nas proximidades do TRG, a interação entre a Corrente do Brasil, fluindo para o sul sobre o talude, e a Pluma do Rio da Prata, fluindo para o norte junto à costa, gera uma série de transientes de circulação que contribuem por gerar correntes por vezes intensas, acima de 70 cm/s, e variáveis temporal e espacialmente, além de misturar águas de origens diferentes.

Esses resultados revelam um ambiente dinâmico e energético em termos da circulação oceânica, ainda que o levantamento curto (7 dias) e pontual não represente mais do que um instantâneo quasi-sinótico da circulação. Não se obteve medidas das correntes junto ao fundo, restando especular sobre sua natureza e características. Observações futuras deverão ser norteadas no sentido de compreender a variabilidade temporal do ambiente e inferir a incidência de eventos extremos, de maneira a desenvolver um plano de operação segura em caso de exploração mineral.

6.4.3. Materiais e métodos

Nesta seção, segue uma breve explicação dos equipamentos e métodos empregados para a investigação oceanográfica básica na área do TRG em 2020 (Figura 6.38). Por não ter sido escopo do levantamento, a investigação contou apenas com um ADCP (perfilador de correntes acústico) de casco e alguns perfis verticais da velocidade do som, além de dados remotos. Assim,

explica-se o tratamento resumido aplicados aos dados oceanográficos aquiritados; na seção seguinte, é realizada a integração das informações obtidas.

6.4.3.1. ADCP

Dados da direção e intensidade das correntes marinhas foram aquiritados ao longo da derrota com um perfilador acústico Doppler acoplado ao casco do navio (ADCP), modelo WorkHorse de banda larga e com frequência do pulso acústico de 150 kHz, fabricado pela Teledyne RDI. O instrumento ensonifica até 400 m de lâmina d'água, com resolução vertical de até 8 m. Devido à razão sinal-ruído baixa (por conta da velocidade do navio muito superior às velocidades das correntes, além de ondas e atitude do navio), os dados utilizados para o processamento constituem médias de 5 minutos. As médias minimizam o ruído aleatório e aquele causado por insuficiência da compensação da atitude, aumentando significativamente a razão sinal-ruído.

6.4.3.2. XSV

Para a perfilagem da coluna d'água foram usadas sondas descartáveis do tipo velocímetro de som XSV-02 (*"expendable Sound Velocimeter"*), fornecidas pela Sippican. O equipamento possui resolução vertical de 60 cm, com precisão de 0,04 m/s e acurácia de 0,25 m/s, sensível a variações na velocidade do som na faixa entre 1400 e 1560 m/s. A profundidade máxima de aquisição é de 2.000 m e a acurácia na estimativa da profundidade (dada pelo tempo de queda livre) é de 4,6 m ou 2% da profundidade total, o que for superior.

A aquisição dos perfis de XSV não visou, inicialmente, qualquer reconhecimento oceanográfico que não fosse a correção da velocidade do som para fins de aquisição batimétrica. Entretanto, coincidentemente, quatro dos cinco perfis dispuseram-se numa seção transversal às isóbatas, com distância entre perfis sucessivos não excedendo 30 km, permitindo assim uma análise quasi-sinótica, em primeira aproximação. O perfil 24, situado mais ao sul e em águas mais profundas, foi aquiritado fora do eixo da seção formada pelos perfis 20-23; contudo, por ainda aparentar estar localizado no mesmo domínio hidrográfico, decidiu-se incluí-lo na seção, de forma tentativa, adotando coordenadas que apontem para uma localidade com a mesma profundidade de S2-24 e que esteja alinhada com a seção (pS2-24). Tal inclusão é justificada pelo fato de que a distribuição da densidade da água (e, portanto, a velocidade do som), em locais próximos entre si e afastados da costa, é predominantemente função da profundidade, o que não ocorreria com variáveis não conservativas (oxigênio, clorofila e outras).

6.4.3.3. TSG

Informações sobre a temperatura e a salinidade da superfície do mar foram adquiridas ao longo de toda a derrota, de forma contínua. Para esse fim, foi empregado um termosalinógrafo da SeaBird Electronics, modelo Seacat. O equipamento realiza análises discretas das amostras de água tomadas a 5 m de profundidade a cada 10s, permitindo uma aquisição contínua.

6.4.3.4. Sensoriamento remoto

Para a melhor compreensão dos processos oceânicos que afetaram a região à época da coleta, fez-se uso das imagens de satélite de temperatura da superfície do mar (TSM/SST) e clorofila-a da superfície do mar (ChlaSM/

SSChla) fornecidas gratuitamente pela NASA no site Ocean Color (NASA, 2020). Para a análise, foi realizada a composição de três satélites – Aqua e Terra, com os sensores embarcados MODIS – Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS, 2020), e Suomi-NPP, com o sensor VIIRS – Visible Infrared Imaging Radiometer Suite (VIIRS, 2020). As imagens foram reprojetaadas para EPSG:4326 (WGS 84). Para a composição TSM, foram escolhidas imagens entre os dias 27 e 29 de fevereiro de 2020, sendo a maior parte da imagem adquirida em 28/02/2020. O mesmo intervalo temporal foi usado para a composição ChlaSM, com imagens adquiridas durante o dia. Adicionalmente, visando investigar o deslocamento espacial das feições de circulação, foram analisadas imagens para os dias 06/03/2020 e 14/03/2020, adquiridas de forma análoga às mencionadas acima.

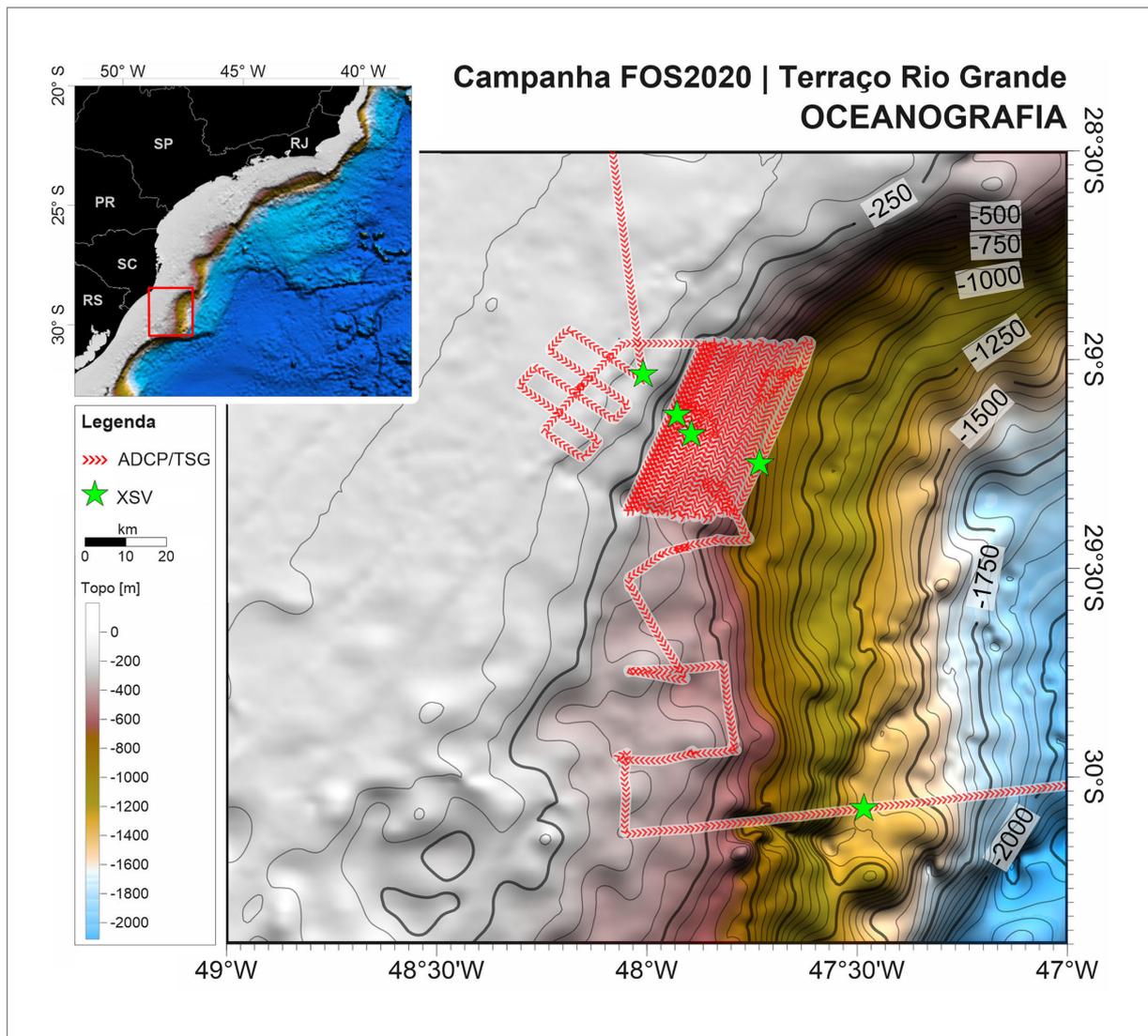


Figura 6.38 - Mapa da região levantada em 2020 (campanha SGB/FOS2020) no Terraço Rio Grande, margem continental sul-brasileira, indicando os dados oceanográficos levantados. Ao longo de toda a derrota, houve aquisição contínua de ADCP e TSG, além de cinco sondagens discretas de velocidade do som (XSV). A topografia de fundo foi extraída do ETOPO1, com isóbatas espaçadas a cada 50 m. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

6.4.4. Resultados e discussão

6.4.4.1. Imagens de satélite

O TRG é o maior de um conjunto de terraços erosivos, característicos dessa região e localizados entre a quebra da plataforma continental (QPC) e o talude inferior (Zembruski, 1979). Geometricamente, constitui uma considerável proeminência da quebra de plataforma na direção sul-sudeste, de cerca de 100 km oceano adentro, delimitada por embaiamentos de 200-300 km de comprimento. Tal geometria introduz mudanças abruptas na orientação da QPC e das isóbatas do talude, sendo uma importante fonte de perturbação das correntes de mesoescala que fluem ao longo do talude.

Observa-se na Figura 6.39 a interpretação qualitativa da circulação no dia 28/02/2020. Em geral, nota-se a diferença de escala das feições (vórtices e meandros) entre os ambientes oceânico (a leste da CB) e de plataforma (a oeste da CB). O lado oceânico não é restrito pela geometria do fundo e sustenta feições mais amplas e, provavelmente, mais duradouras. Já a porção de plataforma e talude, além de exibir (ao menos, no momento estudado) uma maior diversidade de feições, estas são reduzidas e, em geral, confinadas às zonas de transição (plataforma interior-plataforma média e plataforma-talude).

Na plataforma média, destaca-se uma zona de cisalhamento entre a corrente costeira da PRP e o escoamento sobre a plataforma externa e oceano (Figura 6-39), associado à CB fluindo para o sul. Ao longo dessa zona de cisalhamento, denominada Frente Subtropical de Plataforma (FSTP, Piola *et al.*, 2000), nota-se diversos vórtices menores, de poucos quilômetros de extensão, dispostos na forma de um trem de ondas. Essa configuração aponta para a energética elevada da região, o que se traduz em um clima de correntes variável em diversas escalas (de horas, devido à maré, até semanas e meses), com potencial para “eventos severos”, com rajadas de correntes da ordem de 1 m/s. Essa afirmação é parcialmente corroborada por um pacote de ondas de gravidade internas longas, situado sobre a FSTP e na latitude aproximada da área de amostragem (identificada por estrelas verde e vermelha). A existência dessas ondas é devida ao grande contraste de temperatura (e, portanto, de densidade) e do escoamento em sentidos opostos nessa região.

A atuação dos vórtices de mesoescala e da própria CB na Bacia de Santos, ao norte da área de interesse, é conhecida pelo “efeito enceradeira” (Mahiques *et al.*, 2010), no sentido de inibir sedimentação significativa e expor superfícies relictas (Maly *et al.*, 2019). No TRG, o esforço erosivo das correntes geostróficas associadas ao sistema CB é atestado pelas feições como cicatrizes de grandes proporções, alinhadas ao escoamento médio.

Essas cicatrizes foram identificadas tanto nos mapas de batimetria multifeixe, feitas pelo SGB-CPRM e relatadas neste informe, quanto em trabalhos pretéritos (e.g. Zembruski, 1979; Mahiques *et al.*, 2019).

Analisando imagens de satélite entre os dias 28/02 e 14/03 de 2020 (Figura 6.40), nota-se que o vórtice amostrado não permaneceu estacionário sobre a área. Sua translação, ao longo do talude e no rumo S-SW, venceu 180 km em 15 dias. A velocidade de propagação média de 14 cm.s⁻¹ ou 12 km.dia⁻¹ possibilitou a travessia completa do TGR em apenas 2 semanas. Esse cálculo está em boa concordância com os resultados obtidos tanto por Fernandes *et al.* (2009), que encontrou velocidades de translação de 20 cm.s⁻¹, quanto por Rocha *et al.* (2014), que relatou velocidades de 15 cm.s⁻¹ nessa região. Apesar da nossa estimativa ser baseada num único evento, o resultado é interessante por ser uma validação dos estudos desses autores, que trabalharam apenas com simulações numéricas.

6.4.4.2. Seção hidrográfica da velocidade do som

A seção do perfil de velocidade do som (XSV), adquirida durante o levantamento, pode ser considerada um proxy para a estrutura de massa da coluna d'água, visto que a velocidade do som depende da densidade da água. Dessa forma, a seção de perfis de velocidade do som tem o mesmo aspecto de (e pode ser interpretada tal qual) uma seção análoga de temperatura ou de densidade. Na Figura 6.41A é apresentada a seção no plano XZ (distância-profundidade), destacando as interfaces climatológicas das massas d'água encontradas na região. A região do talude da plataforma continental sul amostrada em 2020 é banhada por quatro massas d'água de origens e propriedades químicas distintas (AT, ACAS, AIA e ACS). O efeito dessas massas d'água sobre o ambiente do talude é de estabelecer zonas horizontais de propriedades químicas variáveis. Nos locais em que as interfaces entre as massas d'água interceptam o assoalho, são esperados gradientes mais acentuados dessas propriedades (oxigênio, nutrientes e salinidade, entre outras), que acarretam uma zonação, em escala de poucos a dezenas de quilômetros, das comunidades bentônicas locais.

Na Figura 6.41B, percebe-se que a seção atravessou um vórtice ciclônico em sua porção sul. A assinatura desse tipo de feição é o arqueamento para cima das isolinhas de temperatura/salinidade/densidade/velocidade do som (e demais variáveis correlatas), devido ao alívio de pressão sobre as camadas inferiores da coluna d'água por causa do déficit de massa na parte superior, caracterizando uma área de baixa pressão hidrostática. Atentando para as isotacas de som, nota-se

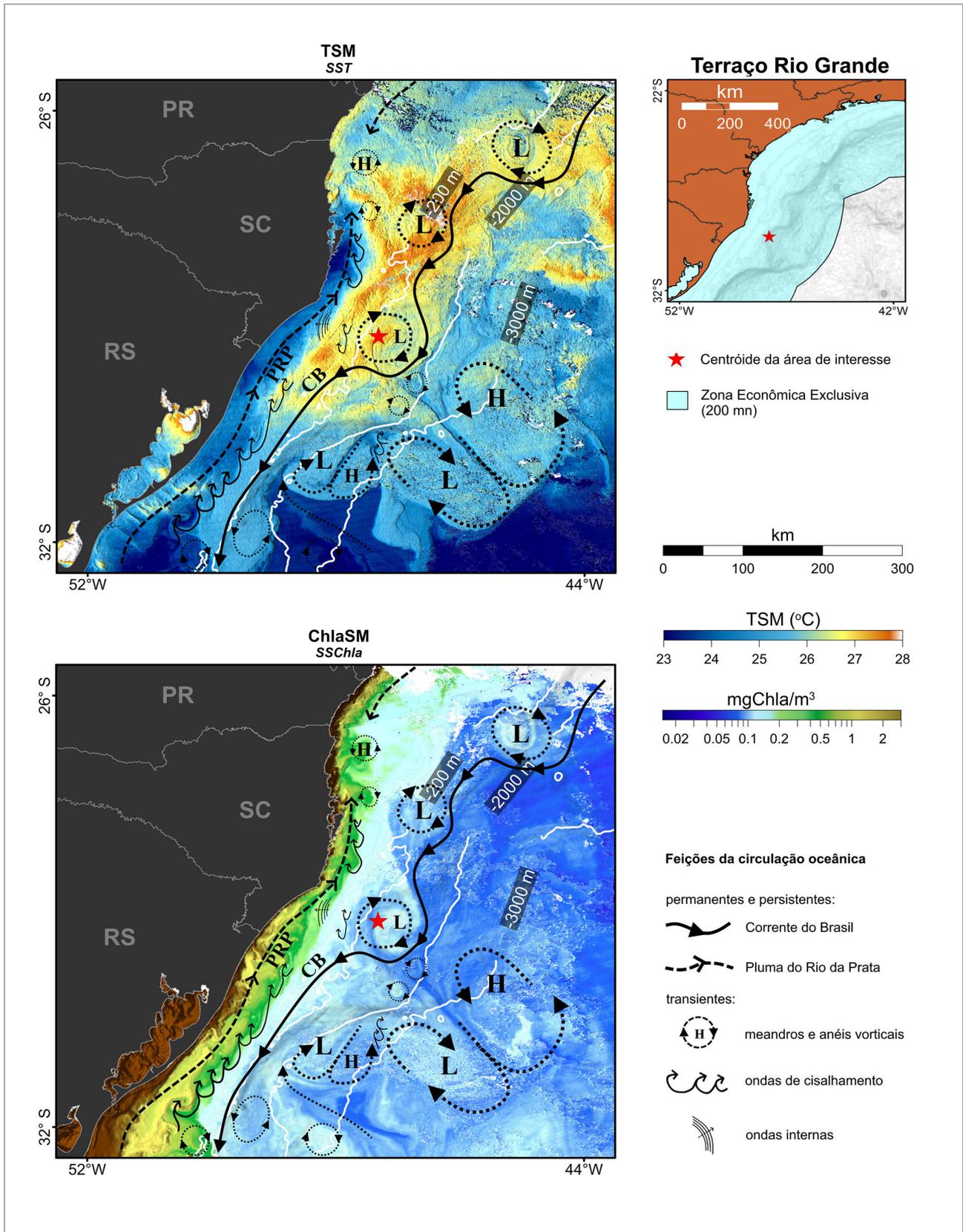


Figura 6.39 - Interpretação do escoamento superficial com base nas imagens de satélite (28/02/2020) de: A) TSM e B) ChlSM. As letras H e L no interior dos vórtices indicam centros de alta e baixa pressão hidrostática, respectivamente. A interpretação é meramente qualitativa, não havendo qualquer informação nas imagens sobre a magnitude das correntes, que normalmente atingem 30-50 cm/s nessa região. As isobatimétricas estão representadas por linhas cinza finas. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

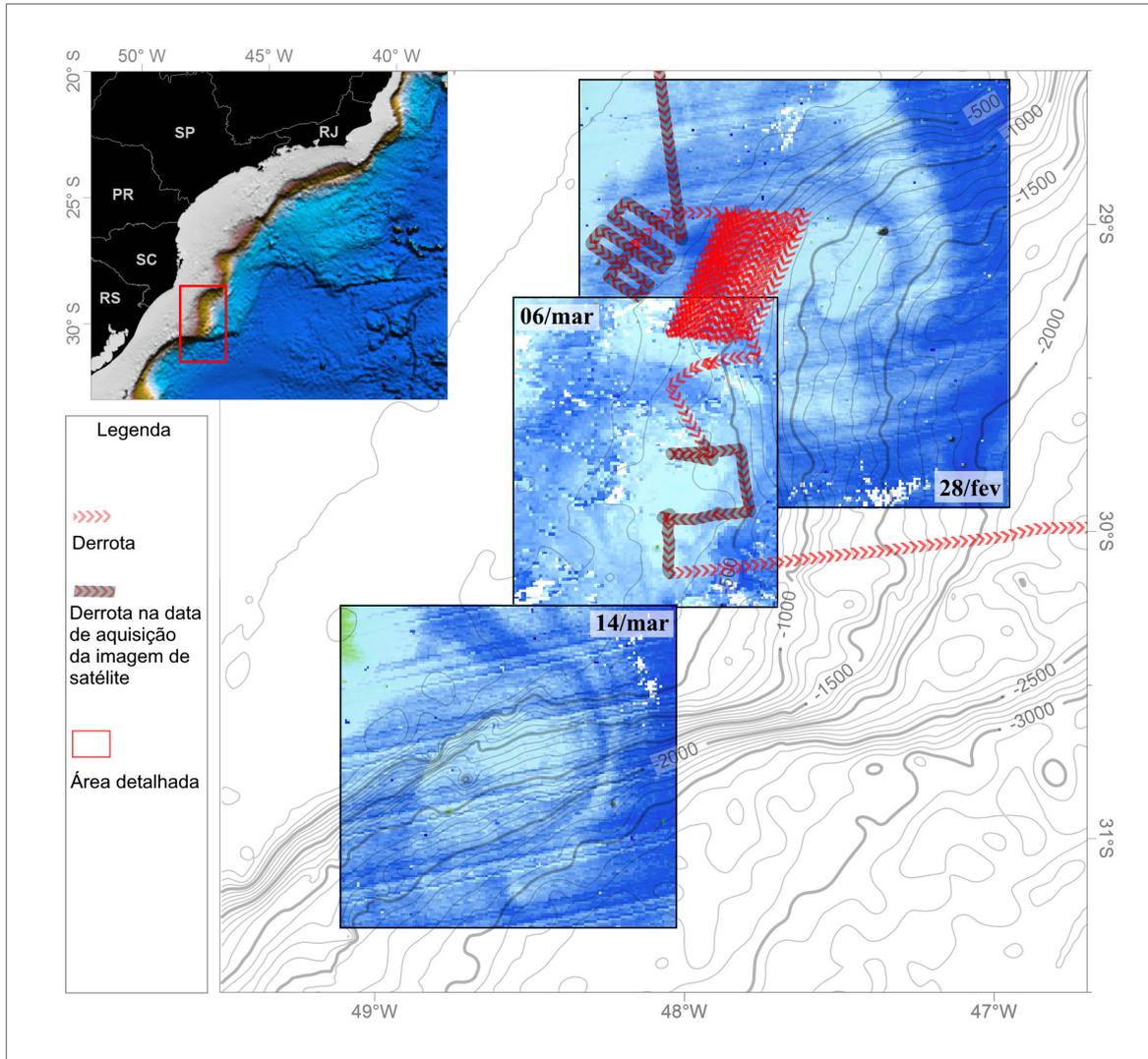


Figura 6.40 - Sucessão temporal (28/fev a 14/mar de 2020) de imagens de satélite da cor do oceano (ChlaSM, mosaico MODIS/VIIRS), onde observa-se a propagação do vórtice na direção SW, ao longo do talude. Tons mais azulados representam águas oceânicas; tons esverdeados, águas de plataforma continental e produção primária autóctone. O traço vermelho indica o traçado e o sentido da derrota percorrida durante a campanha, entre os dias 28/02 e 07/03; segmentos sombreados da derrota foram percorridos nos dias de aquisição das respectivas imagens de base. As isóbatas, derivadas do conjunto ETOPO1, estão espaçadas em 50 m. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

que tal arqueamento é perceptível pelo menos nas massas d'água Tropical (AT) e Central do Atlântico Sul (ACAS), sendo que esta última é de espessura maior, se comparada à espessura ao largo.

O arqueamento das isotacas de som em direção à superfície, observado entre os perfis 21 e 23 e associado ao talude, assemelha-se razoavelmente com a estrutura da ressurgência de quebra de plataforma continental (rQPC) discutida na sessão 13.2.5, situação na qual águas subsuperficiais são compelidas a aflorar para profundidades maiores. Embora não tenha sido observada a ressurgência de fato (quando há afloramento das isolinhas na superfície), águas mais profundas atingindo profundidades menores contribuem para trazer nutrientes (incluindo o fósforo) às camadas mais

iluminadas, onde esses nutrientes poderão ser assimilados pela microflora marinha, incorporando-se à teia trófica e, eventualmente, exportados na forma de restos de organismos para o sedimento.

O vórtice observado tem como uma de suas características reter e transportar um volume de água e evitar sua mistura com o oceano adjacente. Os efeitos descritos acima, ainda que recorrentes à medida que novos vórtices são formados, provavelmente afetam uma região bastante restrita do talude (em termos regionais) e têm duração de poucas semanas. Não obstante, tais vórtices representam um fator importante para a manutenção dos ecossistemas profundos, criando "oásis" temporários junto ao fundo ao injetarem grandes quantidades de matéria orgânica, se comparadas ao fluxo médio.

6.4.4.3. Temperatura e salinidade em superfície (TSG)

Temperatura e salinidade da superfície do mar amostradas continuamente por um termossalinógrafo (TSG) a cerca de 5 m de profundidade, foram analisadas e interpretadas. A Tabela 6.1 abaixo caracteriza os valores medidos quanto a sua média e dispersão.

Tabela 6.1 - Descritores básicos dos valores de temperatura e salinidade superficiais medidos entre 28/02/2020 e 07/03/2020 sobre o TRG.

VARIÁVEL	MÉDIA ± DP	MÁXIMO	MÍNIMO
Temperatura (°C)	25,81 ± 0,24	26,77	24,56
Salinidade (psu)	36,72 ± 0,15	37,05	36,30

Os dados coletados pelo termossalinógrafo revelam a presença de águas quentes e, em geral, mais salinas, característico de regime de verão e de influência oceânica. Menores valores de salinidade acusam, entretanto, atuação considerável de águas costeiras que são misturadas às águas de plataforma pelos processos turbulentos que ocorrem na zona de cisalhamento entre o escoamento para o norte, junto à costa, e o escoamento de plataforma média, para o sul (Figura 6.39). Por outro lado, a presença de águas oceânicas, mais quentes e salinas, demonstra a atuação da CB e de seus meandros (em particular, o vórtice atuando sobre o TRG na época da coleta).

A complexidade e alta variabilidade dos processos físicos na superfície do oceano sobre o TRG torna-se evidente ao analisar a distribuição espacial de temperatura e salinidade ao longo da derrota (Figura 6.42). Em geral, maiores valores de temperatura e de salinidade apontam para a atuação da água oceânica sendo transportada plataforma adentro pelo vórtice visto na imagem; pelo contrário, valores menores de ambas as variáveis indicam a presença das águas de plataforma continental. Pelo fato da região de quebra de plataforma continental (QPC) ser de transição e, portanto, bastante dinâmica, a situação vista na imagem de satélite é válida para o dia 28/02 e dias adjacentes. Nesse período, o levantamento se deu na região denominada borda de Plataforma Continental (bPC, dias 28 e 29 de fevereiro), quando se esperava a influência do braço sul do vórtice transportando água oceânica em direção à plataforma; de fato, percebe-se maiores valores de temperatura e salinidade na porção S-SE da região bPC. Por outro lado, a correspondência entre os dados e a imagem de satélite torna-se menor na região norte do TRG (nTRG, dias 29/02 a 05/03) e na região central do TRG (cTRG, dias 05/03 e 06/03).

A variabilidade do ambiente (em termos de temperatura e salinidade) observada na região nTRG é devida, provavelmente, à movimentação do vórtice e à influência de seus ramos à medida que este se desloca ao longo do talude. Nessa região, é notável uma sucessão de regimes conforme o levantamento era realizado em direção ao oceano aberto, paralelamente às isóbatas. Nas primeiras linhas (na porção oeste), houve uma alternância rápida entre a incursão de águas oceânicas (denotada pelos valores maiores de temperatura e de salinidade), seguida pelo domínio de águas mais frias e menos salinas em sua porção central, devido certamente à influência do ramo norte do vórtice (bem demarcado na porção NE das figuras, estendendo-se na direção NW-SE), que drena a água de plataforma para o oceano. Tal atuação dos meandros e vórtices da CB, aliada à geometria da região (especificamente, o TRG e a Plataforma de Florianópolis ao norte) pode contribuir para transportar sedimento para o oceano e, localmente, aumentar a sedimentação sobre o talude (Schattner *et al.*, 2019).

As regiões bPC e cTRG são as que apresentam melhor correspondência entre as imagens de satélite e os dados de TSG. Enquanto a primeira foi levantada na região periférica do vórtice, a região cTRG, por coincidência, foi ocupada justamente sobre o vórtice, tendo cruzado a feição no dia 06/03. Isso torna-se evidente ao perceber a variação espaço-temporal rápida de temperatura e, principalmente, de salinidade. Entretanto, enquanto a salinidade varia entre valores praticamente extremos encontrados nas três regiões de aquisição, a oscilação da temperatura é mais modesta, se comparada à região nTRG. Tal fato pode ser explicado pela advecção do vórtice sobre a plataforma no dia 06/03, como visto na Figura 6.40, com menor influência das águas oceânicas e afetando águas de plataforma mais ao sul e, portanto, mais frias. Menores profundidades afetam a dinâmica do vórtice, que, ao adentrar essa região, passaria a girar mais lentamente e, portanto, apresentaria taxas menores de troca de água entre a plataforma e o oceano. Por outro lado, tal resfriamento e mistura podem também ser atribuídos à passagem de frentes frias que têm a capacidade de misturar águas superficiais, amostradas pelo TSG, sem afetar significativamente o conteúdo de sal.

6.4.4.4. Correntes em superfície (ADCP)

Dados sobre velocidade e direção das correntes, adquiridos nos primeiros 100 m da coluna d'água ao longo do percurso, foram analisados quanto à variabilidade espacial-temporal sobre o TRG entre 28/02/2020 e 07/03/2020. A dispersão dos valores de magnitude e direção foi considerável em virtude da atuação do vórtice de mesoescala que atuara na região, tendo sido o principal evento responsável pela modulação do escoamento

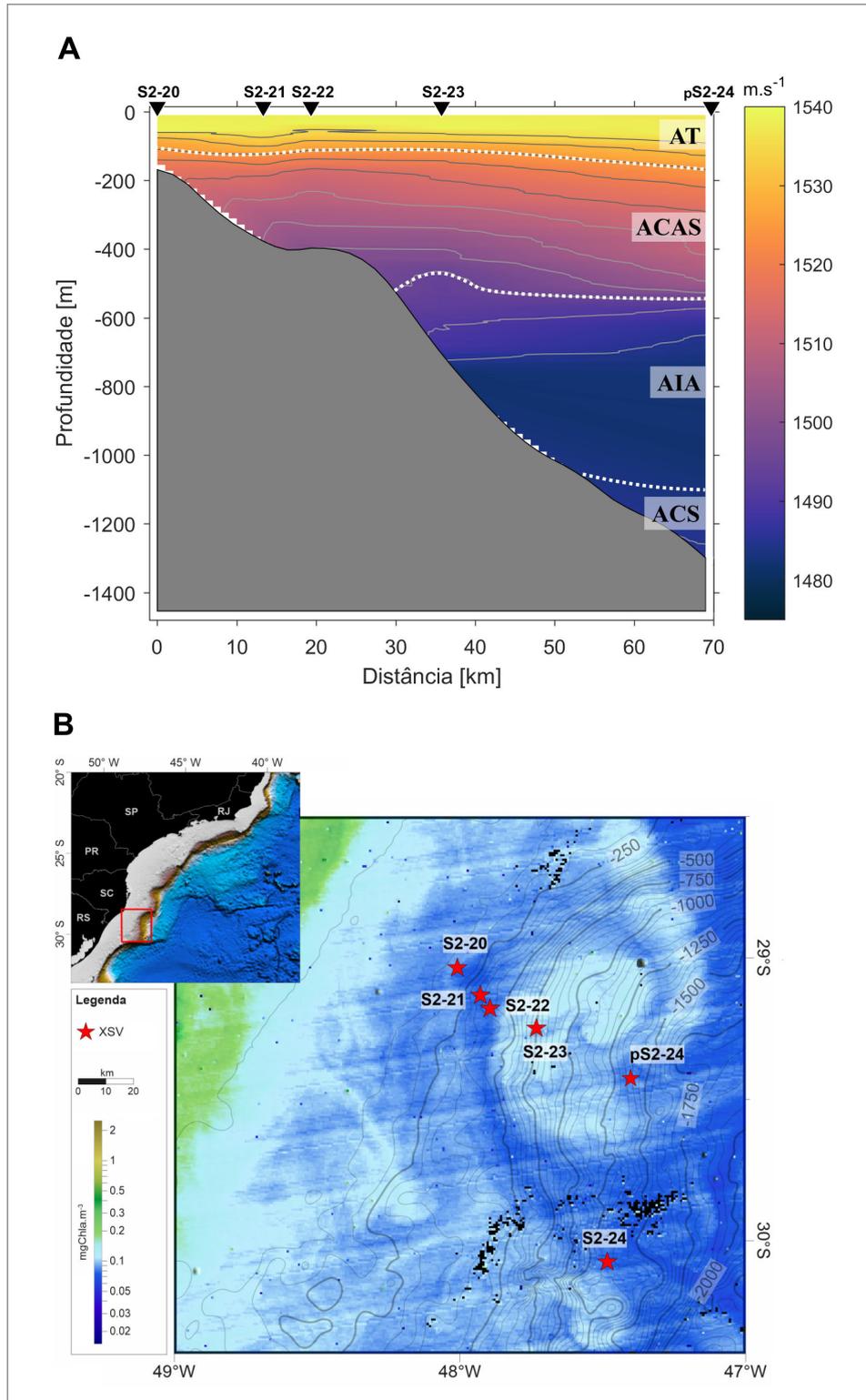


Figura 6.41 - A) Seção de velocidade do som ao longo de um perfil transversal às isóbatas aqisitado durante a campanha FOS2020. As massas d'água Tropical (AT), Central do Atlântico Sul (ACAS), Intermediária Antártica (AIA) e Circumpolar Superior (ACS) estão indicadas juntamente com as respectivas interfaces, destacadas com linha branca tracejada. Triângulos pretos na parte superior indicam a posição dos perfis de XSV usados para a interpolação. A topografia de fundo ao longo da seção está indicada pelo polígono hachurado em cinza. As isolinhas da velocidade do som estão indicadas de forma qualitativa, para fins de revelar a estrutura vertical da coluna d'água. B) Sobreposição dos pontos de coleta com a imagem de satélite de Chl a SM de 28/02/2002, destacando também as isóbatas da região (linhas cinza). Observa-se em detalhe a estrutura do vórtice formado pela CB. Imagens de Chl a SM serão usadas como base de alguns mapas daqui em diante para permitir uma visão geral dos processos regionais; mapas com base na TSM foram preteridas devido ao baixo contraste de temperatura superficial na região (BILÓ, 2015), dificultando o discernimento de feições da circulação. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

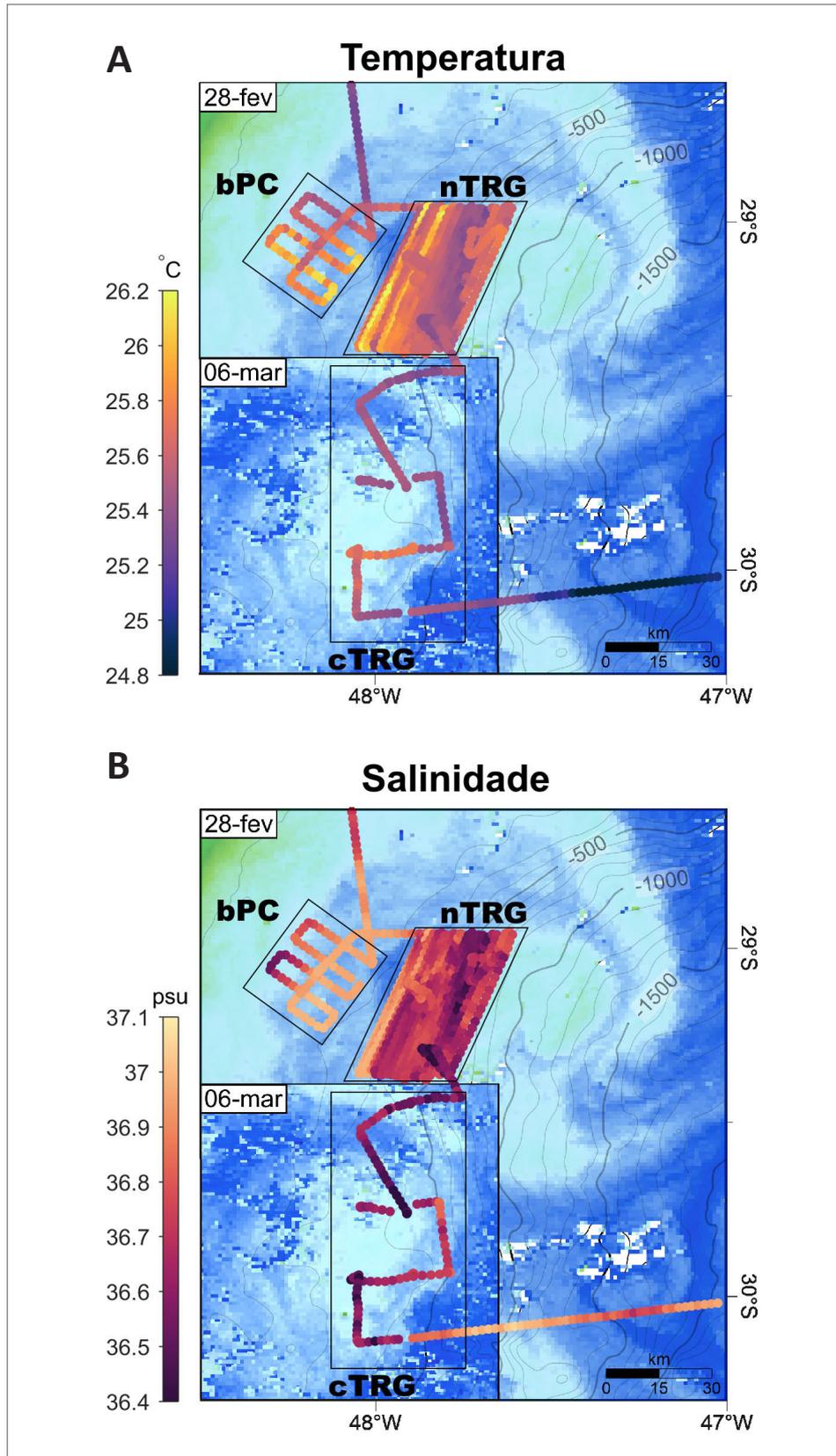


Figura 6.42 - Distribuição superficial de (A) temperatura e (B) salinidade, medidos entre 28 de fevereiro e 7 de março de 2020. A base da figura é composta pela imagem de satélite de clorofila-a superficial de 28/02/2020, tal qual apresentada na Figura 6-39. Em termos qualitativos, águas oceânicas são caracterizadas por tons azuis; águas de plataforma, tons verdes. Atentar à heterogeneidade de valores devida à passagem do vórtice e à influência variável das águas de origens distintas que afetaram a região de interesse. As regiões demarcadas como borda de Plataforma Continental (bPC), norte do TRG (nTRG) e central do TRG (cTRG) foram levantadas nos períodos de 28/02 a 29/02, 29/02 a 05/03 e 05/03 a 06/03, respectivamente. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

na área. Para a análise, foram escolhidos dois níveis de profundidade, 30 e 100 metros. A razão para a escolha do nível de 30 m, em vez da superfície, baseou-se em minimizar a influência das correntes geradas pelo vento local nas camadas superficiais, de forma a considerar apenas o escoamento de caráter mais regional.

A Tabela 6.2 traz uma descrição estatística sucinta dos dados obtidos. Magnitudes acima de 70 cm/s foram medidas em 30 e em 100 m de profundidade, entretanto, a média das observações girou em torno de 28 cm/s próximo à superfície e 23 cm/s em 100 m, com desvio-padrão elevado, apontando para alta variabilidade espacial e/ou temporal do escoamento, que apresentou também momentos de calmaria, com intensidades menores que 1 cm/s e, portanto, no limite de detecção.

Tabela 6.2 - Descritores estatísticos das magnitudes das correntes observadas entre 28/02 e 07/03, durante a campanha de 2020.

PROF. (m)	MÉDIA ± DP (cm/s)	MÁXIMO (cm/s)	MÍNIMO (cm/s)
30	27,7 ± 13	75,9	0,7
100	22,9 ± 14	74,1	0,1

Considerando a direção das correntes medidas, foi constatado que o escoamento predominante (e mais intenso) é para S-SW, compondo cerca de 40% de todas as observações em ambas as profundidades (Figura 6.43). Ademais, valores intensos, acima de 70 cm/s, foram observados em 30 m para correntes fluindo para E-NE. Correntes fluindo ao longo da direção NW-SE foram as menos frequentes. Esse comportamento evidencia a presença da CB e do escoamento da plataforma que, em geral, fluem no sentido sul, com raras inversões ocasionadas por eventos transientes. Contudo, são esses transientes aparentemente responsáveis pelas maiores intensidades das correntes. No conjunto de dados, foi registrado em 30 m de profundidade, algumas das correntes mais intensas (acima de 70 cm/s) fluindo para E-NE, associadas, provavelmente, ao ramo costeiro (norte) do vórtice visto nas imagens anteriores (e.g. Figura 6.40), demonstrando uma vigorosa exportação da água de plataforma para o oceano naquele momento. A título de comparação, magnitudes semelhantes foram relatadas por Silveira *et al.* (2000), para níveis intermediários do sistema CB na região da Bacia de Santos. Por outro lado, o vórtice descrito por Biló (2015) sobre o TRG em 2017, ainda que seja muito semelhante (em termos da posição e natureza dele) ao descrito aqui nesse informe, ostentou máximos de apenas 30 cm/s. Por fim, dada a maior frequência de valores mínimos a 100 m, se comparado

à superfície, pode-se especular sobre a natureza baroclínica das correntes, natureza essa regida pela variação lateral da densidade da água (em oposição às variações laterais do nível do mar) e, em consequência, pelo cisalhamento vertical do escoamento (Cushman-Roisin & Beckers, 1994).

Considerando o comportamento espacial do escoamento, exibido na Figura 6.44 para as profundidades de 30 e 100 m, é notável a transição da embarcação entre o ambiente de plataforma externa, com magnitudes do escoamento modestos e com sentido preferencial para sul-sudeste, e a região próxima à QPC, cuja circulação naquele momento era fortemente influenciada pela passagem do vórtice de mesoescala visto nas imagens de satélite aqui apresentadas. Preferiu-se não interpolar o dado para uma melhor visualização, haja vista que o campo das velocidades estava em transição e mudou substancialmente entre a entrada na região, no dia 28/02, e o término do levantamento, no dia 07/03. Dessa forma, faz sentido analisar o dado por partes, de oeste para leste e de norte para o sul, conforme avançava-se o levantamento.

O escoamento variou, em termos de sentido das correntes, para SW-S-SE no início da campanha (região bPC da Figura 6.42), alternando entre SW-W-NW na região nTRG (mais próxima à costa) e tornando a fluir para SW-S-SE na porção oceânica da área do levantamento, à medida que o vórtice e seus ramos estariam atravessando a região. Correntes SE denotam o ramo costeiro do vórtice, expondo sua influência na organização da circulação da PC; correntes SW-W-NW estão associadas ao ramo oceânico e à intrusão de água vinda do oceano aberto para a PC.

Ao deixar a região nTRG, no dia 05/03 e tomar o rumo à região cTRG, o vórtice já estava ao sul (imagem de satélite do dia 06/03 da Figura 6.40), com seu ramo costeiro advectando águas da plataforma.

Os resultados divergem substancialmente daqueles relatados por Mahiques *et al.* (2019), tanto com relação às magnitudes das correntes, quanto à variabilidade de sua direção. Naquele trabalho, realizado em novembro e dezembro de 2017, os autores encontraram um ambiente menos energético e mais homogêneo, com magnitudes das correntes aparentando não exceder 40 cm/s e com sentido de escoamento razoavelmente constante, para sul (Mahiques *et al.*, 2019). Nossos dados, entretanto, mostram magnitudes acima de 70 cm/s, ainda que em menos de 5% das observações e fluindo em direções variáveis, embora o sentido S-SW prevaleça, com cerca de 40% das observações. O motivo para tal discrepância foi a atuação do vórtice de mesoescala sobre o TRG, descrito neste capítulo, em oposição à aparente ausência de atividade de mesoescala significativa durante a coleta de dados realizada por aqueles autores.

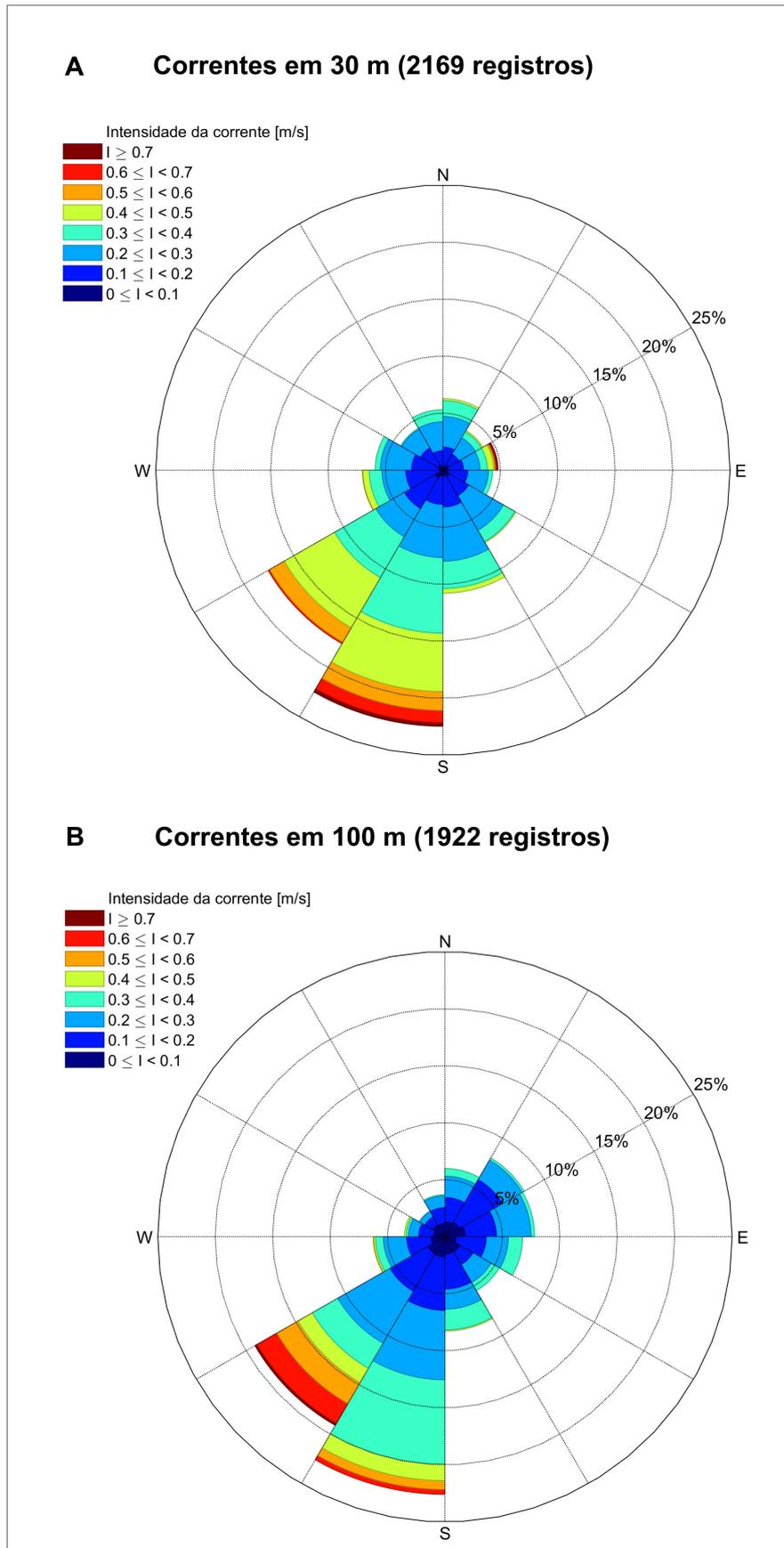


Figura 6.43 - Histograma das correntes medidas pelo ADCP na forma de rosa-dos-ventos em A) 30 m e B) 100 m sobre o TRG entre os dias 28/02/2020 e 07/03/2020. As porcentagens indicam a frequência das observações, sendo que 100% equivalem ao conjunto inteiro de medidas (n) em uma dada profundidade. Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

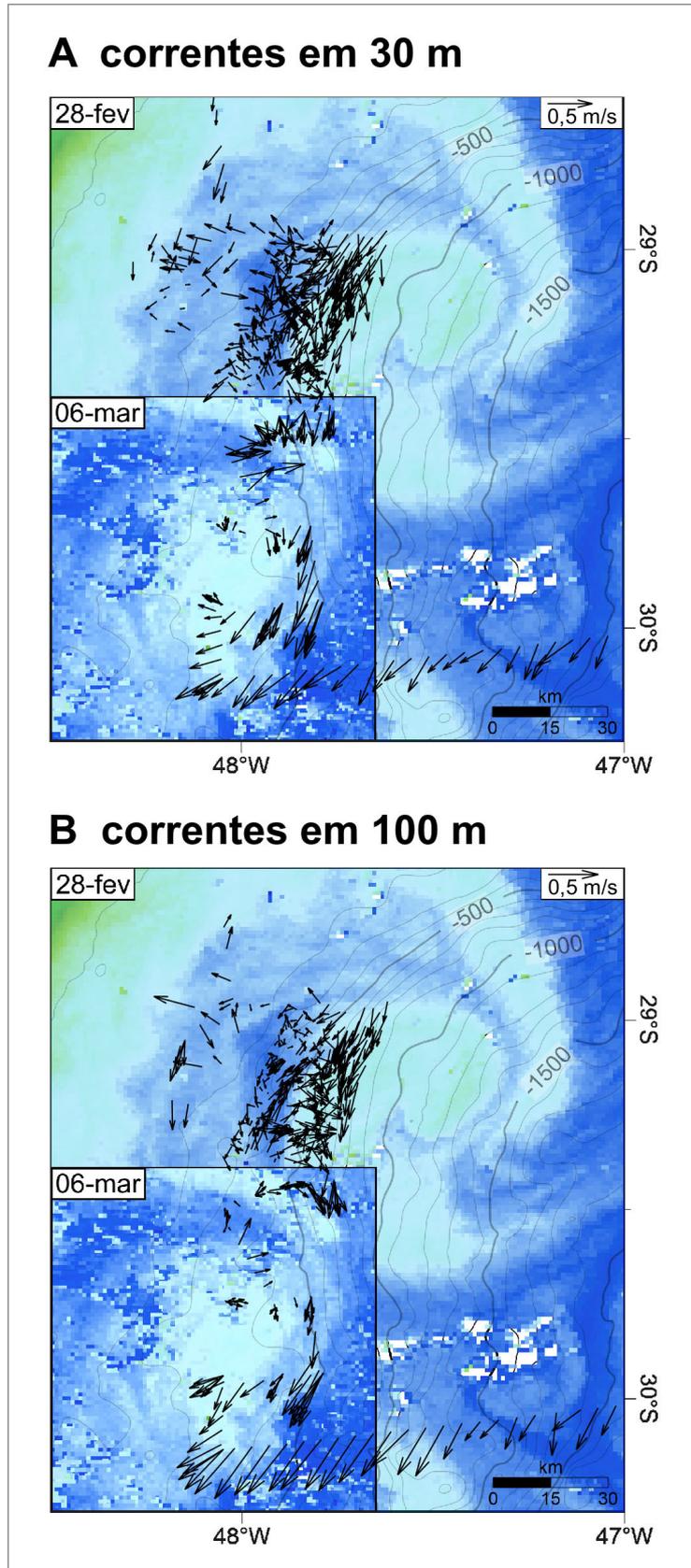


Figura 6.44 - Comportamento das correntes em A) 30 m e B) 100 m de profundidade tal qual medido pelo ADCP de caso ao longo do levantamento realizado entre 28/02/2020 e 07/03/2020 sobre o TRG. Os vetores de referência podem ser conferidos no canto superior direito das figuras. As imagens de satélite de cor do oceano denotam o vórtice, tal qual era em 28/02/2020 e 06/03/2020 no mesmo sistema de referência geográfica, evidenciando seu deslocamento para SW. Notar as maiores intensidades do escoamento na porção sul do levantamento, quando a embarcação atravessou o vórtice (Figura 6-40, dia 06/03). Autor: Vadim Harlamov, SGB-CPRM / DIGEOM.

7. INTEGRAÇÃO DOS DADOS

As concreções coletadas apresentam características típicas de depósitos de assoalho oceânico de margem passiva, contendo fragmentos fósseis, terrígenos e minerais autigênicos. A quase totalidade das concreções é classificada como *packstone* fossilífero fosfático (Silva & Alves, 2018). O aspecto retrabalhado de algumas das amostras indica influência recorrente de agitação ou correntes hidráulicas, que podem ter prevenido a acumulação de argilas. A presença de grãos silticos angulosos e subangulosos de quartzo e feldspato podem indicar transporte eólico e posterior deposição na bacia. As fases minerais de origem biogênica são foraminíferos bentônicos e planctônicos, briozoários, ostracodes, bivalves e fragmentos ósseos de peixes. Intraclastos são comuns e formados, na sua maioria, por material fosfático. Minerais autigênicos incluem glauconita, fosfatos diversos, dolomita, calcita, *goethita* e hematita. As fases fosfáticas incluem hidroxiapatita, carbonato-fluorapatita, fluoroapatita e xenotímio.

As concreções estudadas têm dimensões variáveis e apresentam cimento manganêsífero e ferrífero, típico de depósitos de assoalho oceânico com pouco aporte de siliciclásticos. Os teores das concreções podem apresentar individualmente valores de interesse econômico, porém a metodologia utilizada na amostragem não dá suporte para tipificação mais específica das ocorrências. Uma das razões é que as concreções encontravam-se imersas em material inconsolidado arenoso a argiloso e foram seletivamente coletadas para análise. Desta forma, a proporção entre concreções e sedimento não pode ser estimada ou determinada por limitações técnicas ou operacionais.

Os perfis sísmicos levantados no projeto foram de grande valia para o melhor entendimento da relação entre a geometria dos depósitos sedimentares e os processos relacionados às correntes de fundo. Nota-se claramente, nas imagens de batimetria e *backscatter*, o contraste entre a região mais rasa do projeto, que tem topografia suave e textura relativamente homogênea, uma área intermediária, com perfil levemente abaulado e textura rugosa e as áreas mais profundas, onde feições sedimentares, como cristas alongadas e marcas de redemoinho (*eddies*), são evidentes. Para facilitar a interpretação geológica, a área de estudo foi dividida em três zonas, denominadas Rasa, Intermediária e Profunda (Figura 7.1). Na Zona Rasa, os estratos encontram-se geralmente horizontalizados, sem feições de erosão e

com notável continuidade dos estratos. Feições erosivas e rugosidade (Figuras 7.3 e 7.4) dominam a Zona Intermediária, onde maiores teores de P_2O_5 foram levantados. Na Zona Profunda, cristas e fossos, provavelmente ligados a conturitos, são observados (Figura 7.5) e algumas amostras apresentam teor interessante de P_2O_5 .

Observa-se também que a Zona Rasa apresenta um contato abrupto em relação à Zona Intermediária (Figura 7.1). Uma corrente flui de norte para sul sobre a Zona Rasa, carreando e retrabalhando sedimentos da plataforma. Porém, não se nota nenhuma estrutura sedimentar que indique avanço dos sedimentos sobre a Zona Intermediária. Ao contrário, o que se vê nas seções sísmicas que cruzam o limite dessa zona, são feições erosivas, sugerindo uma ativa corrente em sentido contrário ao aporte de sedimentos carregados pela Corrente do Brasil, que impede a acumulação de sedimentos (Figuras 7.2, 7.5 e 7.6). Ou seja, uma corrente perene de sul para norte deve estar presente para evitar o recobrimento desta área desnudada por sedimentos oriundos da porção norte da área. Adicionalmente, a corrente em direção a norte diseca o terreno, expondo estratos mais resistentes e erodindo os mais susceptíveis. Essa hipótese, baseada nas feições morfológicas do assoalho e nas feições erosivas e deposicionais dos depósitos sedimentares, indica que há permanentemente uma interação entre as correntes de norte e de sul, corroborando nesta área o potencial de retrabalhamento hidráulico dos sedimentos, erosão de feições de carapaça (*hardground*), onde são favoráveis a deposição de fosfato e a concentração de concreções com potencial fosfático. Esse cenário encontra suporte nas amostras com alto teor e na grande proporção de concreções na Zona Intermediária. No caso da Zona Profunda, feições de acumulação e deposição são interpretadas como resultado da ação de correntes de fundo, em regime superior de fluxo, gerando cristas e fossos no assoalho a partir de sedimentos inconsolidados. A granulometria das amostras coletadas nessa zona também é rica em areia e seixos, o que é compatível com conturitos de alta energia. Adicionalmente, feições do tipo cometa indicam direção de corrente para sul, o que implica pelo menos três diferentes massas d'água atuantes na área de estudo.

A Zona Intermediária pode também ser a fábrica de fosfato, pelo baixo aporte de sedimento e alta energia dos fluxos d'água, além de turbilhonamento por vórtices

episódicos e sazonais. A parte norte da Zona Intermediária apresenta batimetria levemente mais baixa que a parte sul, o que também favorece a acumulação de sedimentos mais grossos. Trabalhos futuros devem focar levantamentos sísmicos e amostragem entre as áreas 3 e 4, para investigar a hipótese de ambiente favorável ao retrabalhamento hidráulico de sedimentos.

A corrente em direção a norte sobre a Zona Intermediária é possivelmente fria, com baixa turbidez e moderada em nutrientes, dada a presença de corais na parte sul da área, onde a corrente provavelmente ascende ao TRG. Essas condições são favoráveis à acumulação de fosfato no sedimento, desde que a condição geral sobre a pilha sedimentar não seja anóxica. Em trabalhos futuros, a persistência ou sazonalidade dessa corrente deve ser investigada, pois apesar do registro sedimentar indicar direção de corrente para norte, não há ainda referência de tal corrente na literatura.

Os perfis sísmicos também indicam feições erosivas, possivelmente, associadas a correntes de fundo. Amostras coletadas na superfície do assoalho oceânico não trazem informações sobre estruturas sedimentares ou empilhamento estratigráfico que poderiam auxiliar nas interpretações. Similarmente, imagens de fundo poderiam fornecer maiores detalhes sobre as estruturas presentes no assoalho, uma vez que a resolução dos dados geofísicos é de 20m.

As correntes responsáveis por esculpir as feições sedimentares modernas são, em geral, distintas das grandes correntes oceânicas como a Corrente do Brasil, por exemplo. A distinção decorre em função de sua escala espacial e temporal e, conseqüentemente, do mecanismo físico que as origina e mantém. Assim, correntes que atuam diretamente sobre o assoalho, remobilizando o sedimento, tipicamente afetam simultaneamente uma área de poucos quilômetros quadrados e, por serem transientes, são caracterizadas por períodos na faixa de algumas horas. Sua origem vem das grandes feições da circulação oceânica como as correntes geostólicas e a maré, com caráter mais duradouro e/ou recorrente e regional. Tal qual correntes de deriva litorânea geradas pelas ondas que atingem a costa, essas correntes menores, porém mais intensas, constituem o resultado da canalização da energia mecânica num ambiente fisicamente mais restrito que o oceano aberto, acarretando eventos rápidos e intensos. No caso do TRG, a CB, seus vórtices e processos de submesoescala associados, fornecem a energia para a camada limite de fundo, cujos processos mais finos e rápidos, atuam no retrabalhamento hidráulico da plataforma externa e do talude, removendo o material estéril e concentrando a fosforita.

O ambiente hidrográfico sobre o TRG compõe um arranjo complexo da circulação oceânica. Junto à costa, atua uma corrente vinda de sul propelida pelas frentes

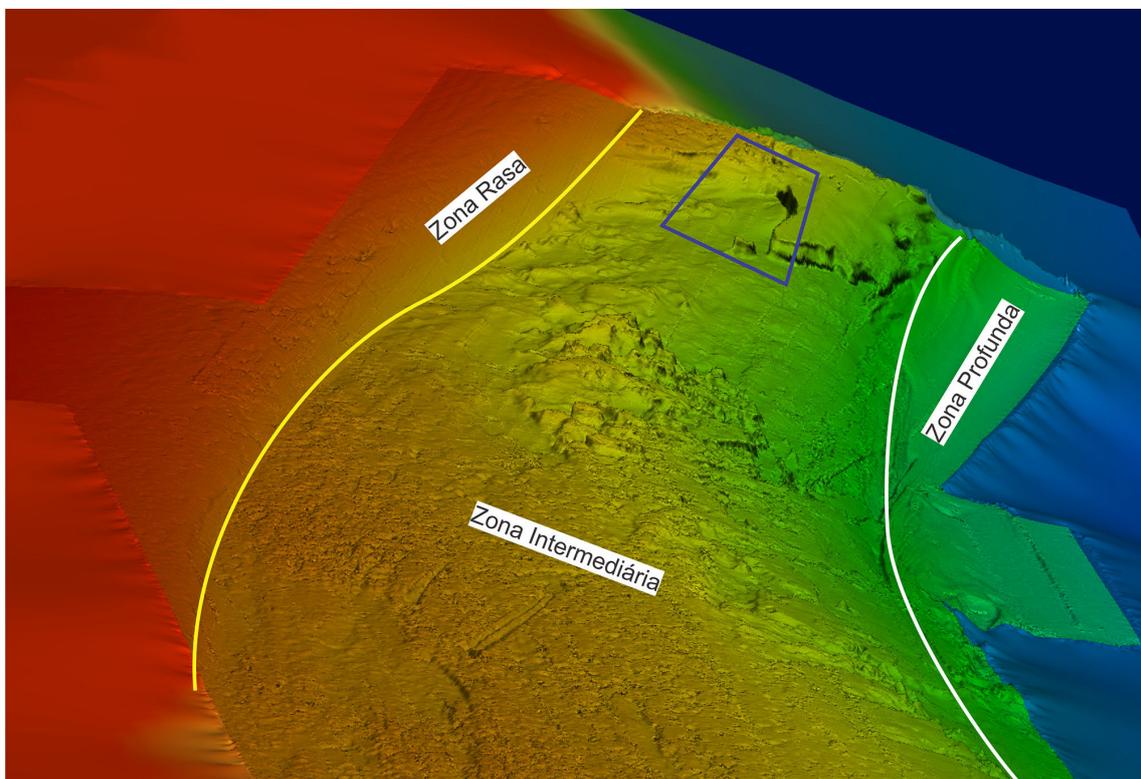


Figura 7.1 - Contorno dos contatos entre as zonas Rasa e Intermediária (linha amarela) e entre as zonas Intermediária e Profunda (linha branca). Notar escarpa e duna no extremo norte da área, detalhe na Figura 7.2. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEOQ.

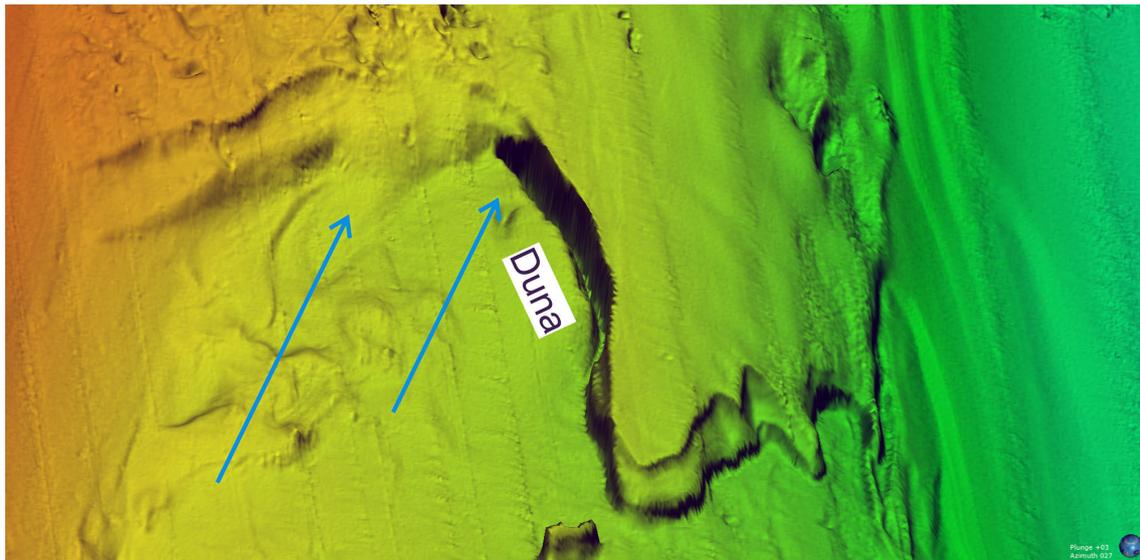


Figura 7.2 - Detalhe da figura anterior, mostrando escarpa provavelmente formada por escoamento com sentido NNE (setas azuis). Formação de duna a oeste da escarpa corrobora esta interpretação. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQO.

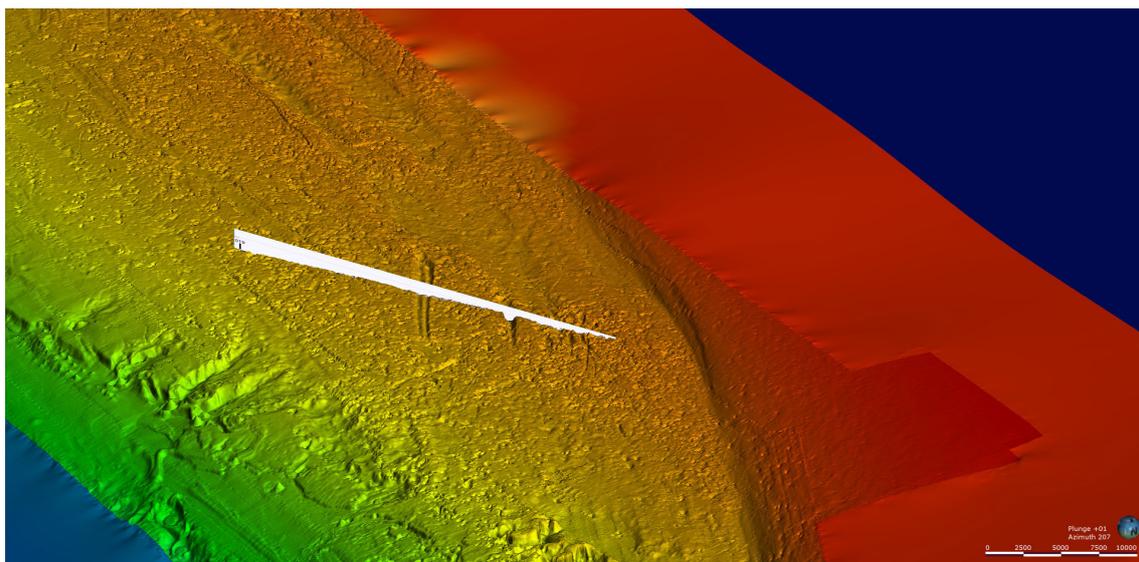


Figura 7.3 - Visualização de feições erosivas e linha sísmica (faixa branca representa o posicionamento do perfil 407), complementada na Figura 7-4. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQO.

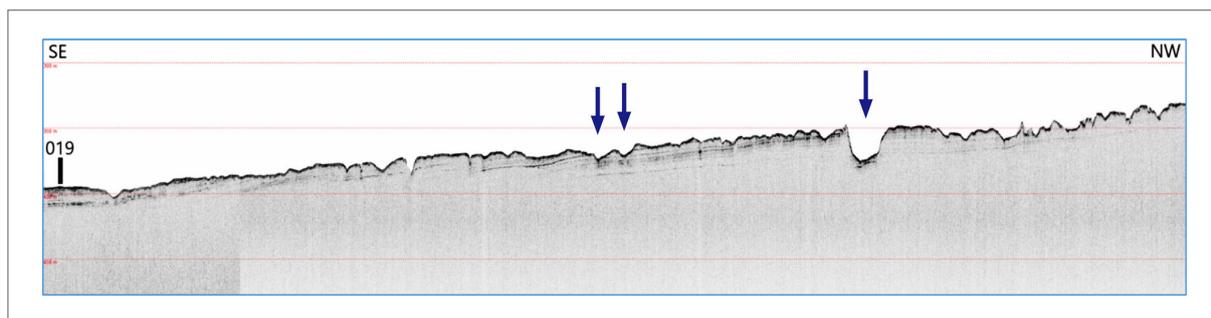


Figura 7.4 - Perfil 407 com refletores inclinados em direção à pendente e com feições erosivas em toda a sua extensão. Setas indicam intensa erosão localizada no substrato, possivelmente causada por vigorosas correntes de fundo com sentido de sul para norte (ver Figura 7-3).

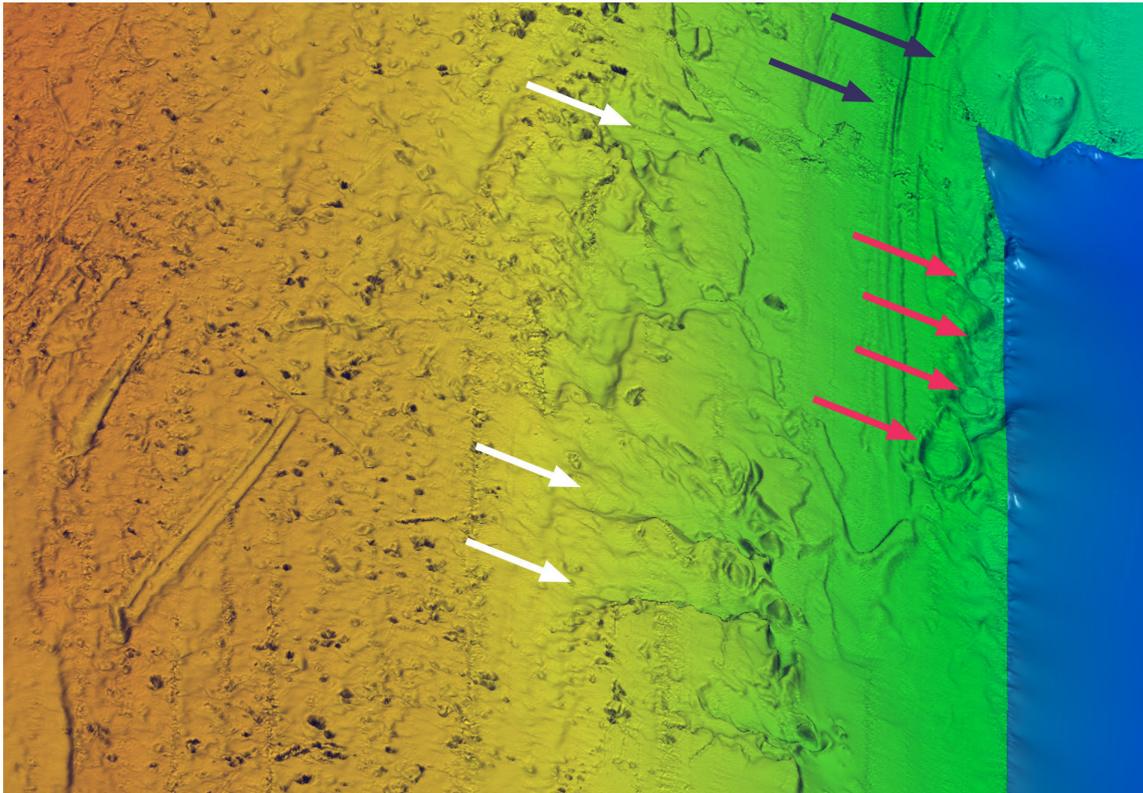


Figura 7.5 - Contato entre as zonas Intermediária (tons amarelos) e Profunda (tons verdes). Setas pretas indicam cristas e fossos, tipicamente formados por conturitos. Setas vermelhas indicam feições de turbilhonamento. Setas brancas indicam prováveis canais turbidíticos. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQ.

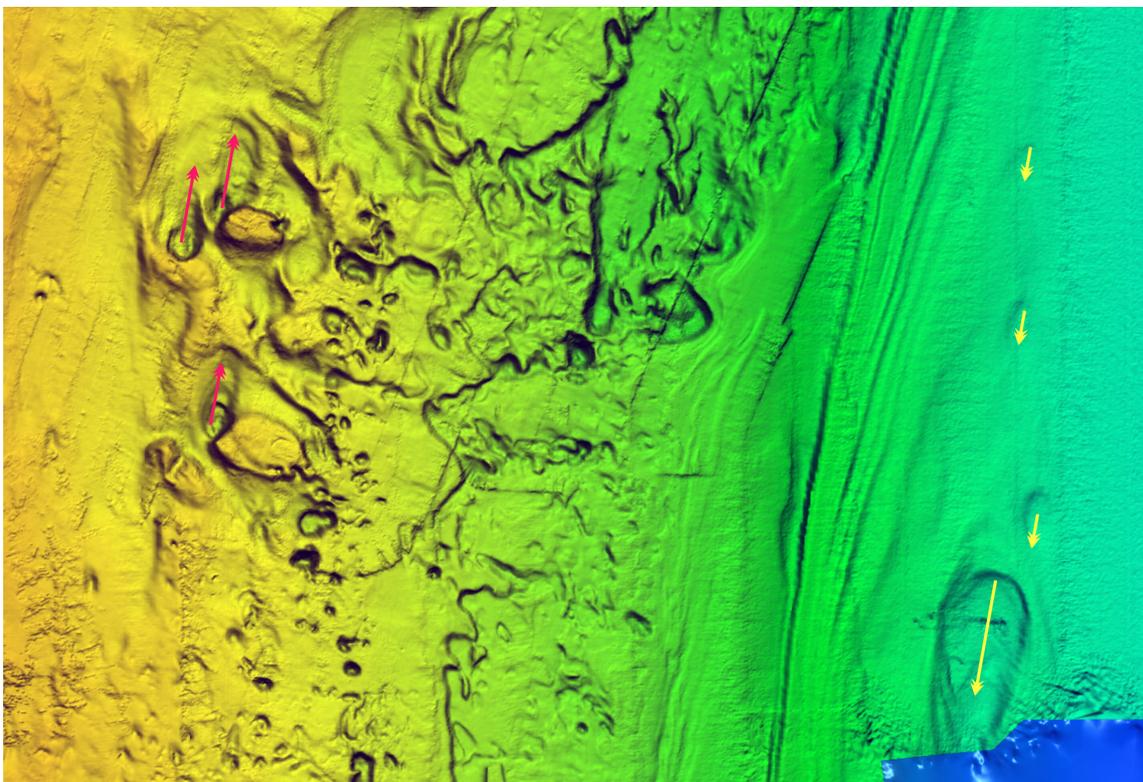


Figura 7.6 - Feições de erosão e acumulação sedimentar no assoalho oceânico podem indicar direção de correntes. Setas vermelhas indicam correntes para norte na Zona Intermediária. Setas amarelas indicam correntes para sul na Zona Profunda do levantamento. Autor: Leandro Guimarães Silva, SGB-CPRM / DIGEQ.

frias em pulsos energéticos. Essa corrente transporta águas mais frias e menos salinas, oriundas da drenagem continental. Já no talude, há o domínio da Corrente do Brasil intensa (> 70 cm/s) e profunda (> 1.200 m), transportando para sul, em superfície, águas de origem tropical, quentes e salinas. A topografia bastante irregular na região da QPC, com sucessivos terraços intercalados por embaiamentos amplos, atua no sentido de redirecionar e perturbar a CB, gerando vórtices de mesoescala que afetam a circulação da plataforma e interação com a corrente costeira vinda do sul. Tal interação manifesta-se no estabelecimento de zonas de transição bastante energéticas; nelas, ocorrem geração de vórtices ainda menores alimentados pelo cisalhamento lateral das correntes fluindo em sentido oposto.

Processos de ressurgência gerados por feições finas, como frentes de submesoescala e ondas internas, devem atuar na área, caracterizada por abruptos gradientes topográficos na região da QPC; entretanto, a amostragem em 2020 não se mostrou adequada para identificar tais feições na área de estudo. Considerando a passagem recorrente dos vórtices da CB na região e o estabelecimento da rQPC breve durante sua atuação no talude, é de se supor que tal processo não seja contínuo, ainda que periódico.

7.1. BASES PARA ESTIMATIVA DO POTENCIAL MINERAL

Os dados geofísicos coletados no projeto, juntamente com futuros dados de correntes marinhas oferecem grande potencial para melhorar a metodologia de definição do potencial para fosfato na região estudada. A identificação de padrões de correntes, dispersão de sedimentos, morfologia do substrato oceânico e caracterização dos sedimentos que compõem as amostras são fatores que devem ser avaliados cautelosamente para a definição de como os processos envolvidos operaram, para que se viabilize uma investida mais robusta em termos de pesquisa mineral. Essa avaliação ainda está em andamento e a expectativa é de que nas próximas campanhas de amostragem para fins de estimativa de potencial, após efetuadas as etapas de processamento dos dados coletados, traga melhores informações e perspectivas do real potencial para fosfato e outros minerais de interesse econômico.

A identificação de processos atuantes em uma bacia depende diretamente da preservação dos seus produtos, principalmente de feições sedimentares. Portanto, a distribuição espacial e a qualidade do material coletado são fundamentais para a identificação de estruturas sedimentares e empilhamento estratigráfico. Com base nestes dois conjuntos de dados básicos, é possível estabelecer

a correlação entre os teores encontrados e os processos mais importantes para a concentração dos teores.

Nas imagens geofísicas, é possível observar influência de correntes de fundo associadas a feições geomorfológicas alongadas na direção aproximada N-S, direção das correntes locais. Essas feições alongadas são interpretadas como conturitos, o que é interessante, pois indica intenso retrabalhamento hidráulico do sedimento. Adicionalmente, a interação entre correntes, especialmente quando estas possuem propriedades contrastantes, podem favorecer fluxos turbulentos, que também favorecem a concentração de material concrecionário. Zonas sob influência de tempestade também podem apresentar potencial, devido à potencial amalgamação de estratos ricos em material fosfático.

Mudanças na direção de correntes de fundo aparentemente são controladas pelas quebras de relevo e afunilamento em relação à linha de costa. Esse processo parece ser importante na concentração de concreções fosfáticas, dada a associação das áreas de mudanças de direção e altos teores amostrados. Ainda na plataforma, áreas com variação topográfica mais significativa tende a ter amostras com teores entre 4 e 8% P_2O_5 , enquanto amostras do talude e em zonas de intensa interação de correntes com a topografia tendem a ser acima de 10% P_2O_5 . As variações topográficas podem resultar em erosão submarina, associada à remoção contínua de parte do aporte de clásticos e possível turbilhonamento de fluxos, o que propicia o retrabalhamento hidráulico dos sedimentos e consequente enriquecimento do material fosfatado.

No caso do Terraço do Rio Grande, o que se observa nas imagens de batimetria e *backscatter* é possivelmente mais um exemplo da complexidade oceanográfica afetando os sistemas deposicionais da plataforma continental. As direções de corrente interpretadas a partir de estruturas sedimentares apresentam padrão geralmente bimodal, mas com menor influência de correntes esporádicas ou mais fracas, com direções variadas. A faixa entre -350 e -700 m tem estruturas sedimentares e erosivas que sugerem fluxo de sul para norte, enquanto as feições observadas em profundidades acima e abaixo dessa faixa indicam direção geral para sul. Adicionalmente, em torno da latitude 29,3° S, é observado um padrão de estruturas formadas por fluxos turbulento e lamelar, possivelmente com influência de eventos esporádicos (tempestades) e fluxos de turbidez. Esta possível interpretação é compatível com o descrito acima a respeito de áreas mais favoráveis à acumulação de concreções, uma vez que fluxos combinados podem melhor selecionar o sedimento. Na área de estudo, são observadas feições que podem indicar turbilhonamento por interações de correntes e, portanto, podem ser interessantes para acumulação de concreções.

8. RECOMENDAÇÕES PARA A PRÓXIMA ETAPA

Muitas variáveis podem influenciar os resultados analíticos obtidos neste projeto. Especialmente em relação ao teor de fosfato, além da própria gênese das concreções, que podem apresentar variações importantes; o método de coleta e a manipulação das amostras são fatores que influenciam diretamente a avaliação e a interpretação dos dados. Para a questão da gênese das concreções, uma avaliação mais detalhada, envolvendo as diversas partes de uma concreção e as diversas concreções oriundas de um mesmo ponto de coleta podem dar suporte a melhores interpretações acerca dos processos de precipitação inicial do fosfato, refinando a localização espacial e temporal de áreas mais favoráveis à fábrica de fosfato pristino.

Em relação ao método de coleta das amostras, dificilmente uma avaliação de potencial pode ser estabelecida com confiabilidade, uma vez que a massa inicial das amostras não foi preservada. Adicionalmente, a coleta de concreções a partir do material original coletado foi feita seletivamente e visualmente, impossibilitando a recomposição ou cálculo proporcional dos teores de fósforo. Portanto, uma amostragem sistemática e robusta, com procedimentos específicos se faz necessária. Adicionalmente, amostras que preservem o registro estratigráfico e sedimentar são recomendadas, para refinar os locais potenciais para geração e acumulação de concreções fosfáticas de alto teor.

Campanhas futuras deverão focar no estabelecimento de critérios para conexão entre os processos que podem formar depósitos nas áreas estudadas. Isto inclui, mas não se limita ao entendimento das correntes marinhas locais, origens das correntes de turbidez, áreas mais suscetíveis aos impactos de reconcentração por tempestades e, principalmente, a localização da fábrica do fosfato. Levantamento das feições sedimentares com uso de testemunhagem e amostragem ao longo de linhas sísmicas, deve ser considerado como um dos focos principais.

Sugere-se para as próximas etapas um protocolo mínimo de amostragem, para que as informações obtidas de análises químicas e petrográficas tenham melhor correlação com o ambiente estudado. Para a coleta da amostra, alguns pontos devem ser observados:

- A amostra coletada deve ser recuperada em sua totalidade, até a chegada em um laboratório, com supervisão de pessoal experiente em amostragem para exploração mineral, para somente então ser fracionada.

- O número de campo deve ser utilizado para a amostra completa, referindo-se a um ponto no espaço no qual a amostra foi coletada, com coordenada bem estabelecida.
- Os números de laboratório devem ser atribuídos a cada fracionamento da amostra física após a determinação do procedimento a ser utilizado (cata, separação granulométrica, amostras de petrografia etc.), quando remessas ou lotes distintos forem formados ou quando for mais apropriado diferenciar a mesma amostra (e.g. métodos diferentes). Isto evitará futuras confusões quando da manipulação das alíquotas e dos dados analíticos.
- Dada a grande heterogeneidade da maioria das amostras coletadas em etapas anteriores, recomenda-se a separação e a análise química por faixa granulométrica.
- Análises de difração de raios X e petrografia são recomendados, para que os elementos tenham correlação com os ambientes de sedimentação e, assim, contribuam para a interpretação dos dados.

Em relação aos perfis sísmicos, é interessante, para pelo menos parte deles, observar a orientação perpendicular ao declive geral do terreno e a extensão cobrindo as três zonas, para melhor avaliação e interpretação das feições geológicas. Adicionalmente, trajetos observando o alinhamento geral das amostras coletadas, independente do teor observado, também é importante para ligação entre processos sedimentares e formação/acumulação de concreções.

Sugere-se também, a extensão dos dados geofísicos coletados para cobrir a região a norte do terraço, onde mais informações sobre as feições morfológicas do terreno podem ser coletadas. Isto dará base para o melhor entendimento de como as correntes interagem e os produtos gerados a partir dessa interação.

Coleta de amostras em todas as regiões morfológicas definidas nesse trabalho. Se possível, priorizar amostras com espaçamento aproximadamente regular. Fotos do assoalho oceânico também são importantes para definição do tipo de sedimento, estruturas sedimentares e detalhes de acidentes morfológicos.

Com relação à oceanografia, são recomendadas perfilagens de água e correntes com CTD/LADCP com alta resolução espacial entre os pontos de amostragem e/ou através de um sistema tow-yo, descida e subida

do equipamento com o navio em movimento. A alta densidade de pontos de amostragem é necessária para resolver feições finas preconizadas de existirem na região e vai ao encontro da amostragem regular, proposta para as coletas de sedimento.

A continuidade do projeto atende às diretrizes do X PSRM, ao priorizar a pesquisa e incentivar o aproveitamento dos recursos minerais de importância econômica e

estratégica para o país. Um detalhamento do projeto nas áreas potencialmente favoráveis à ocorrência de depósitos de nódulos fosfáticos, seguindo um protocolo bem estruturado e utilizando métodos diretos de observação como a filmagem do substrato marinho e a amostragem por testemunhos, possibilitará um conhecimento mais robusto das características qualitativas e quantitativas do recurso mineral.

REFERÊNCIAS

- ABREU, J.G.N. 2010. Relatório Final de Integração de Dados Geológicos e Geofísicos nas Áreas dos Depósitos de Fosforita do Talude Continental das Bacias de Pelotas e Santos. Contrato 066/PR/08.
- ABREU, J.G.N.; CORRÊA I.C.S.; HORN N.O.; CALLIARI, L.J. 2014. Phosphorites of the Brazilian Continental Margin, Southwestern Atlantic Ocean. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 32, p. 539–548.
- ABREU, V.S. 1998. Geologic Evolution of Conjugate Volcanic Passive Margins: Pelotas Basin (Brazil) and Offshore Namíbia (África): Implication for global sea-Level Changes. Doutorado - Rice University, Houston, Texas. USA. 354p.
- ALVES, E.C. 1977. Estrutura Rasa do Talude e Sopé da Margem Continental do Rio Grande do Sul e Uruguai. Dissertação de Mestrado. UFRGS, 74p.
- BATURIN, G.N. 1982. Phosphorites on the sea floor: Origin, composition and distribution. 1.ed. New York: Elsevier, 345 p.
- BILÓ, T.C. 2015. The Changing Brazil Current system between 23°S-31°S: vertical structure and mesoscale dynamics. Dissertação de mestrado. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. 87 p.
- BOEBEL, O.; DAVIS, R.E.; OLLITRAULT, M.; PETERSON, R.G.; RICHARDSON, P.L.; SCHMID, C.; ZENK, W. 1999. The Intermediate Depth Circulation of the Western South Atlantic. *Geophys. Res. Lett.*, 26(21): 3329–3332.
- BURNETT, W.C. 1980. Apatite-glaucinite associations off Peru and Chile: paleo-oceanographic implications. *Journal of Geological Society of London*, 137, 757-764.
- BUENO, G. V., ZACHARIAS, A. A., OREIRO, S. G., CUPERTINO, J. A., FALKENHEIN F. U. H., MARTINS NETO, M. A. 2007. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 551-559.
- CAMPOS, E.J.D., Y. IKEDA, B.M. CASTRO, S.A. GAETA, J.A. LORENZZETTI, M.R. STEVENSON. 1996. Experiment Studies Circulation in the Western South Atlantic. *EOS*, 77(27): 253–264.
- CAMPOS, E.J.D.; VELHOTE, D.; da SILVEIRA, I.C.A. 2000. Shelf break upwelling driven by Brazil Current cyclonic meandres. *Geophys. Res. Letters*. 27(6): 751-754
- CASTRO, B.M. 1996. Correntes e massas de água da plataforma continental norte de São Paulo. Tese de Livre-Docência, Universidade de São Paulo, Brasil, 248 pp.
- CASTRO, B. M., BRANDINI, F. P., PIRES-VANIN, A. M. S., & MIRANDA, L. B. 2006. Multidisciplinary oceanographic processes on the Western Atlantic continental shelf between 4 N and 34 S. *The sea*, 11, 209-251.
- COMPTON, J.S., BERGH, E.W. 2016. Phosphorite deposits on the Namibian shelf. *Marine Geology* 380: 290–314.
- CONDIE, S.A. 1995. Interactions between western boundary currents and shelf waters: A mechanism for coastal upwelling. *Journal of Geophysical Research—Oceans* 100(C12): 24811–18.
- COOK P. J. & SHERGOLD J. H. 1986. Phosphate Deposits of the World. Volume 1. Proterozoic and Cambrian Phosphorites. Results of IGCP Project 156. 386 pp.
- COSTA, P.L.; MADUREIRA, L.A.S.P.; DE PINHO, M.P. 2013. Seabed acoustic classification in the Pelotas basin, Brazil. *Brazilian Journal of Oceanography*, v. 61, n. 1, p. 13–22.
- CRP 2021. Chatham Rock Phosphate Limited. Disponível em: <rockphosphate.co.nz>. Acesso em: 23 maio 2021.
- CUSHMAN-ROISIN, B.; BECKERS, J.-M. 1994. Introduction to Geophysical Fluid Dynamics: Physical and Numerical Aspects. *International Geophysics Series*, 101. 2ªed., Elsevier.
- DAMUTH, J.E. & HAYES, D.E. 1977. Echo character of the East Brazilian Continental Margin and its relationship to sedimentary processes. *Mar. Geol.*, 24: 73-95.
- DAMUTH, J.E., 1980. Use of high-frequency (3.5-12 kHz) echograms in the study of near-bottom sedimentation processes in the deep-sea: a review. *Mar. Geol.*, 38: 61-75.
- DELL, R.W.; PRATT, L.J. 2015. Diffusive boundary layers over varying topography. *J. Fluid. Mech.* 769: 635-653.
- DIAS, J. L.; SAD, A. R. E.; FONTANA, R. L.; FEIJÓ, F. J. 1994. Bacia de Pelotas. *Boletim de Geociências da Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 8, n. 1, p. 235-245, jan./mar. 1994.
- DUARTE, C.S.L. & VIANA, A. 2007. Santos Drift System: stratigraphic organization and implications for late Cenozoic palaeocirculation in the Santos Basin, SW Atlantic Ocean *Geological Society, London, Special Publications*, 276(1):171.
- DUNHAM, R.J. 1962. Classification of Carbonate Rocks According to Depositional Texture. In, W.E. Hamm (ed.), *Classification of Carbonate Rocks, A Symposium*. American Association of Petroleum Geologists, p. 108-121.
- FERNANDES, A.M.; SILVEIRA, I.C.A.; CALADO, L. CAMPOS; PAIVA, A.M. 2009. A two-layer approximation to the Brazil Current–Intermediate Western Boundary Current System between 20°S and 28°S. *Ocean Modelling*, 29(2): 154-158. <https://doi.org/10.1016/j.ocemod.2009.03.008>.
- FIGUEIREDO Jr. A.G. & MADUREIRA, L. 2004. Topografia, composição, refletividade do substrato marinho e identificação de províncias sedimentares na Região Sudeste-Sul do Brasil. *Série Documentos REVIZEE – SCORE SUL*, 65p

- FIGUEIREDO A.G. & TESSLER, M.G. 2004. Topografia e Composição do Substrato Marinho da Região Sudeste-Sul do Brasil. Série Documentos REVIZEE – SCORE-SUL. Instituto Oceanográfico da USP. São Paulo, 64p.
- FÖLLMI B. 1996. The phosphorus cycle, phosphogenesis and marine phosphate-rich deposits. *Earth-Sci Rev* 40:55–124
- FONSECA, V. P. da. 2006. Estudos morfotectônicos aplicados à planície costeira do Rio Grande do Sul e adjacências. Tese de doutorado em Geologia Marinha –Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre. 309p.
- FONTANA, R.L. 1996. Geotectônica e Sismoestratigrafia da Bacia de Pelotas e Plataforma de Florianópolis. Tese de Doutorado. UFRGS. Porto Alegre, RS. 214p.
- GARDNER, W.D.; TUCHOLKE, B.E.; RICHARDSON, M.J.; BISCAYE, P.E. 2017. Benthic storms, nepheloid layers, and linkage with upper ocean dynamics in the western North Atlantic. *Marine Geology*, 385: 304–327. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2016.12.012>
- GARFIELD, N.I. 1990. The Brazil Current at subtropical latitudes. Tese de doutorado (Ph.D.), Uni. de Rhode Island, Rhode Island, EUA.
- GLENN, C.R., FÖLLMI, K.B., RIGGS, S.R., BATURIN, G.N., GRIMM, K.A., TRAPPE, J., ABED, A.M., GALLI-OLIVER, C., GARRISON, R.E., ILYIN, A.V., JEHL, C., ROHRICH, V., SADAQAH, R.M.Y., SCHIDLOWSKI, M., SHELDON, R.E., AND SIEGMUND, H., 1994. Phosphorus and phosphorites: Sedimentology and environments of formation. *Eclogae Geologicae Helveticae*. 87, p. 747-788.
- GOMES, M. P., 2009. Aquisição, Processamento e Análise de Dados de Sísmica de Alta Resolução na Plataforma Continental Norte do Rio Grande do Norte: Vale Inciso do Rio Açú. Dissertação de mestrado. Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Natal-RN. 2009, 95p
- GUAZELLI, W. & COSTA, M.P.A. 1978. Ocorrência de fosfatos no Platô do Ceará. In: Ocorrência de fosforita e de nódulos polimetálicos nos platôs do Ceará e de Pernambuco. Rio de Janeiro. PETROBRAS, CENPES, DINTEP, Série Projeto REMAC 3: 7–14.
- HARRIS, P. T. & BAKER, E. K. 2011. Seafloor Geomorphology as Benthic Habitat. London: Elsevier.
- KLEIN, A.H.F.; GRIEP, G.H.; CALLIARI, J.L.; VILLWOCK, J.A. 1992. Ocorrências de concreções fosfáticas no terraço de Rio Grande. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37. Camboriú, SC. Resumos Expandidos p. 202-203.
- KOWSMANN, R.; LEYDEN, R.; FRANCISCONI, O. 1977. Marine Seismic Investigations, Southern Brazil Margin. AAPG Bulletin (American Association of Petroleum Geologists), v. 61, n. 4, p. 546–557.
- KLUESNER J.; BROTHERS D.; HART P.; MILLER N.; G. HATCHER 2018. Practical approaches to maximizing the resolution of sparker seismic reflection data. *Marine Geophysical Research*. <https://doi.org/10.1007/s11001-018-9367-2>
- KUDRASS H., WOOD R., FALCONER R. 2017. Submarine Phosphorites: The Deposits of the Chatham Rise, New Zealand, off Namibia and Baja California, Mexico—Origin, Exploration, Mining, and Environmental Issues. In: Sharma R. (eds) *Deep-Sea Mining*. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-52557-0_5
- LAMARCHE, G. & LURTON, X. 2018. Recommendations for improved and coherent acquisition and processing of backscatter data from seafloor-mapping sonars. *Marine Geophysical Research*, v. 39, n. 1–2, p. 5–22.
- LE BAS, T. P. 2016. RSOBIA - A new OBIA Toolbar and Toolbox in ArcMap 10.x for Segmentation and Classification.
- LOPES, R. P.; BONETTI, C.; SANTOS, G.S.; PIVEL, M.A.G.; PETRÓ, S.M.; CARON F.; BONETTI, J. 2021. Late Pleistocene sediment accumulation in the lower slope off the Rio Grande terrace, southern Brazilian Continental Margin. *Quaternary International*, v. 571, n. July 2020, p. 97–116.
- LUNDBLAD, E.R; WRIGHT, D.J.; MILLER, J.; LARKIN, E.M.; RINEHART, R.; NAAR, D.F.; DONAHUE B.T.; ANDERSON S.M. & BATTISTA T. 2006. A Benthic Terrain Classification Scheme for American Samoa, *Marine Geodesy*, 29:2, 89-111, DOI: 10.1080/01490410600738021
- LURTON, X. & LAMARCHE, G. 2015. Backscatter measurements by seafloor-mapping sonars. Guidelines and recommendations. GEOHAB - Marine Geological & Biological Habitat Mapping. [s.l: s.n.].
- MACHADO, L.G. 2010. Evolução morfo-tectônica do Alto de Florianópolis que segmenta as bacias de Santos e Pelotas, margem sudeste da costa brasileira / Leandro Gonçalves Machado. - Niterói, 2010. 125f. Dissertação (Mestrado em Geologia e Geofísica Marinha) – Universidade Federal Fluminense.
- MAHADEVAN, A. 2019. Submesoscale processes. In *Encyclopedia of Ocean Sciences* (pp. 35–41). Elsevier. DOI: 10.1016/B978-0-12-409548-9.10828-0
- MAHIQUES, M.M.; SOUSA, S.H.M.; FURTADO, V.V.; TESSLER, M.G.; TOLEDO, F.A.L.; BURONE, L; FIGUEIRA, R.C.L.; KLEIN, D.A.; MARTINS, C.C., ALVES, D.P.V. 2010. The Southern Brazilian shelf: general characteristics, quaternary evolution, and sediment distribution. *Brazilian Journal of Oceanography*, 58(spe2), 25-34. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592010000600004>
- MAHIQUES, M.M., ALCÁNTARA-CARRIÓ, J., LOBO, F. J., SCHATTNER, U., SANTOS, R. F., CAZZOLI Y GOYA, S., RAMOS, R. B., ABREU, J.G.N., PEREIRA DE SOUZA, L. A., LOPES FIGUEIRA, R. C., BÍCEGO, M. C. 2019. The building, shaping, and filling of an Upper Slope Terrace: the Rio Grande Terrace, SW Atlantic, *Solid Earth Discuss.* [preprint], <https://doi.org/10.5194/se-2018-140>
- MALY, M.; SCHATTNER, U.; LOBO, F.J.; DIAS, R.; RAMOS, R.; COUTO, D.; SUMIDA, P.; MAHIQUES, M. 2019. The Alpha Crucis Carbonate Ridge (ACCR): Discovery of a giant ring-shaped carbonate complex on the SW Atlantic margin. *Sci Rep* 9, 18697. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55226-3>

- MARTINS L. R. S., MARTINS, I. R. 1985. Contribuição a Sedimentologia da Plataforma Externa e Talude Superior de Santa Catarina. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 17, n. 17, p.: 91-111, jan./abr, 1985.
- MARTINS L. R. S., MARTINS, I. R., CORRÊA I. C. S. 1985. Aspectos Sedimentares da Plataforma Externa e Talude Superior do Rio Grande do Sul. *Pesquisas em Geociências*, Porto Alegre, v. 17, n. 17, p.: 68-90 jan/abr, 1985.
- MARTINS, L.R.S. & SOUZA, K. G. 2007. Ocorrência de recursos minerais na Plataforma Continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes. *Parcerias Estratégicas*, Número 24, p. 137-190.
- MEIRELES, R.P.; ABREU J.G.N.; BATISTA M.H. 2009. Mineralogia das Fosforitas Marinhas na Plataforma Continental Sul Brasileira. *Revista UnG-Geociências*, v. 8, n.1, p.5-13.
- MÉMERY, L.; ARHAN, M.; ALVAREZ-SALGADO, X.A.; MESSIAS, M.-J.; MERCIER, H.; CASTRO, C.G.; RIOS, A.F. 2000. The water masses along the western boundary of the south and equatorial Atlantic, *Progress in Oceanography*, 47(1): 69-98. [https://doi.org/10.1016/S0079-6611\(00\)00032-X](https://doi.org/10.1016/S0079-6611(00)00032-X).
- MELO, U.; GUAZELLI W. & COSTA M.P.A. 1978. Nódulos polimetálicos, com núcleo de fosforitas, no Platô de Pernambuco. Rio de Janeiro. PETROBRAS, CENPES, DINTEP, Série Projeto REMAC 3: 15–32.
- MENOR E.A.; COSTA M.P.A. & GUAZELLI W. 1979. Depósitos de fosfato. Rio de Janeiro. PETROBRAS, CENPES, DINTEP, Série Projeto REMAC 10: 51–72.
- MIDGLEY, J. 2012. Environmental Impact Assessment for the proposed dredging of phosphate enriched sediments from Marine Licence Area No. 170. J. Midgley & Associates. Draft Report Namibian Marine Phosphate (Pty) Ltd.
- MILANI, E. J., BRANDÃO, J. A. S. L, ZALÁN, P. V. & GAMBOA, L. A. P. 2000. Petróleo na margem continental brasileira: geologia, exploração, resultados e perspectivas. *Brazilian Journal of Geophysics*, Vol. 18 (3). São Paulo.
- MÜLLER, T. J., IKEDA, Y., ZANGENBERG, N., & NONATO, L. V. 1998. Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20 S and 28 S. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 103(C3), 5429-5437.
- NIELSEN, S.H.H.; MCKENZIE, C.; MILLER, A.; PARTINGTON, G.; PAYNE, C.; PUCCIONI, E.; STOKES, M.; WILDMAN, C.; FALCONER, R.K.H.; WOOD, R. 2014. Chatham Rise nodular phosphate — Modelling the prospectivity of a lag deposit (off-shore New Zealand): A critical tool for use in resource development and deep sea mining. *Ore Geology Reviews*. <http://dx.doi.org/10.1016/j.oregeorev.2014.10.013>
- PINHO, M.P.; MADUREIRA, L.; CALLIARI, J.L.; 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*, v. 29, n. 1, p. 113–126.
- PETTIJOHN, F.J. 1983. *Sedimentary Rocks*. 4 ed. New York: Hapers Brothers, 628p.
- PINHO, M.P.; MADUREIRA, L.; CALLIARI, J.L. 2015. 3D Bathymetry and Bottom Backscattering Maps Applied to Identify Potential Phosphate Deposits in the Pelotas Basin, Brazil. 1-6. 10.1109/RIOAcoustics.2015.7473632.
- PINHO, M. P.; MADUREIRA, L.S.P.; CALLIARI, L.J.; WEIGERT, S.C.; COSTA, P.L. 2016. 3D bathymetry and acoustic seabed classification of pelotas basin, Brazil. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 34, n. 1, p. 117–129.
- PIOLA, A.; CAMPOS, E.; MÖLLER, O.; CHARO, M.; MARTINEZ, C. 2000. Subtropical Shelf Front off eastern South America. *J. Geoph. Res.* 105(C3), 6565-6578. <https://doi.org/10.1029/1999JC000300>
- PUFAHL, P.K. 2010. Bioelemental Sediments. In James, N.P. and Dalrymple, R.W. (eds.), *Facies Models*, 4th Edition, Geological Association of Canada, 477-503.
- PUFAHL, P.K. & GROAT, L.A. 2016. Sedimentary and Igneous Phosphate Deposits: Formation and Exploration: An Invited Paper. *Economic Geology*, Vol. 112(3), pp. 483–516.
- RIGGS, S.R.; SHELDON, R.P. 1990. Paleooceanographic and paleoclimatic controls of the temporal and geographic distribution of Upper Cenozoic continental margin phosphorites. In. BURNET, W.C. and RIGGS, S.R. (Eds.) *Phosphate deposits of the world. V.3. Neogene to modern phosphorites*. Cambridge University Press, p. 207-222.
- RINEHART, R.W.; WRIGHT, D.J.; LUNDBLAD, E.R.; LARKIN, E.M.; MURPHY, J.; CARY-KOTHEA, L. 2004 ArcGis 8.X Benthic Terrain Modeler: Analysis in American Samoa. Proceedings of the 24th Annual ESRI User Conference, Anais, San Diego, USA. http://dusk.geo.orst.edu/esri04/p1433_ron.html
- ROCHA, C.; SILVEIRA, I.; CASTRO, B.; LIMA, J. 2014. Vertical structure, energetics, and dynamics of the Brazil Current System at 22°S–28°S. *J. Geoph. Res. – Oceans*, 119(1): 52 – 69. <https://doi.org/10.1002/2013JC009143>
- ROGERS, A.D., BRIERLEY, A., CROOT, P., CUNHA, M.R., DANOVARO, R., DEVEY, C., HOEL, A.H., RUHL, H.A., SARRADIN, P.-M., TREVISANUT, S., VAN DEN HOVE, S., VIEIRA, H., VISBECK, M. (2015) *Delving Deeper: Critical challenges for 21st century deep-sea research*. LARKIN, K.E., DONALDSON, K. AND MCDONOUGH, N. (Eds.) Position Paper 22 of the European Marine Board, Ostend, Belgium. 224 pp. ISBN 978-94-920431-1-5
- SANTOS, V. L. C. 2009. Banco de Dados Ambientais da Bacia de Pelotas: Uma ferramenta para elaboração de Estudos de Impacto Ambiental. Universidade Federal do Rio Grande-FURG.
- SCHATTNER, U.; LOBO, F.J.; LÓPEZ-QUIRÓS, A.; NASCIMENTO, J.L.P.; MAHIQUES, M.M.; 2019. What feeds shelf-edge clinoforms over margins deprived of adjacent land sources? An example from southeastern Brazil. *Basin Research*, 32: 293 – 301. <https://doi.org/10.1111/bre.12397>

- SILVA, C.R.M. & ALVES, R.A. 2018. Caracterização Petrográfica, Mineralógica e Geoquímica dos Fosforitos e Rochas Fosfáticas na Margem Continental da Região Sul do Brasil. Relatório Interno, SGB-CPRM / DIGEOM.
- SILVEIRA, I.C.A., SCHMIDT, A.C.K., CAMPOS, E.J.D., GODOI, S.S., IKEDA, Y. 2000. A Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Rev. Bras. Oceanogr.*, 48(2):171-183.
- SILVEIRA, D. P., MACHADO, M. A. P. 2004. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia de Pelotas. Aracaju: Fundação Paleontológica Phoenix. Séries Bacias Sedimentares, ano 6, n. 67.
- SIMPSON, J.H.; SHARPLES, J. 2012. Introduction to the physical and biological oceanography of shelf seas. Cambridge University Press, New York, 466pp.
- SOUZA, L.A.P. 2006. Revisão Crítica da Aplicabilidade dos Métodos Geofísicos na Investigação de Áreas Submersas Rasas. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico, São Paulo, p.284.
- STERK, R. 2014. Independent JORC (2012) Technical Report and Mineral Resource Estimate on the Chatham Rise Project in New Zealand. RSC Consulting Ltd. <https://idea.imidro.gov.ir/IdeaWeb/Files/Data/Library/20186271617366.pdf>
- TSUCHIYA, M.; TALLEY, L.; McCARTNEY, M. 1994. Water-mass distributions in the western South Atlantic; A section from South Georgia Island (54S) northward across the equator. *J. Mar. Res.*, 52: 55-81. <https://doi.org/10.1357/0022240943076759>
- TURNHERR, A.M.; ST. LAURENT, L.C.; SPEER, K.G.; TOOLE, J.M.; LEDWELL, J.R. 2005. Mixing Associated with Sills in a Canyon on the Mid-ocean Ridge Flank. *J. Phys. Oceanog.*, 35: 1370-1381.
- WEISS, A. D. 2001. Topographic position and landforms analysis. Poster presentation, ESRI User Conference, San Diego, CA, v. 64, p. 227-245.
- ZAVIALOV, P.; MÖLLER, O.; CAMPOS, E. 2002. First direct measurements of currents on the continental shelf of Southern Brazil. *Continental Shelf Research*, 22(14): 1975-1986. [https://doi.org/10.1016/S0278-4343\(02\)00049-3](https://doi.org/10.1016/S0278-4343(02)00049-3).
- ZEMBRUSKI, S.G. 1979. Geomorfologia da Margem Continental Sul Brasileira e das Bacias Oceânicas Adjacentes. PETROBRAS, CENPES, DINTEP, Série Projeto REMAC 7: 129-177.
- ZERFASS, G. S. A., SOUZA P. A. & CHEMALE JR, F. 2008. Biocronoestratigrafia da Bacia de Pelotas: estado atual e aplicação na geologia do petróleo. *Revista Brasileira de Geociências*. 38 (2) - suplemento: 47-62.
- ZERFASS, G. S. A. 2009. Estudos paleoambientais com base em isótopos de carbono, oxigênio e estrôncio em foraminíferos do Terciário da Bacia de Pelotas. / Tese (Doutorado) - Porto Alegre: IGEO/UFRGS [233] f.

O SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL - CPRM E OS OBJETIVOS PARA O DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL - ODS

Em setembro de 2015 líderes mundiais reuniram-se na sede da ONU, em Nova York, e formularam um conjunto de objetivos e metas universais com intuito de garantir o desenvolvimento sustentável nas dimensões econômica, social e ambiental. Esta ação resultou na *Agenda 2030*, a qual contém um conjunto de *17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável - ODS*.

A Agenda 2030 é um plano de ação para as pessoas, para o planeta e para a prosperidade. Busca fortalecer a paz universal, e considera que a erradicação da pobreza em todas as suas formas e dimensões é o maior desafio global, e um requisito indispensável para o desenvolvimento sustentável.

Os 17 ODS incluem uma ambiciosa lista 169 metas para todos os países e todas as partes interessadas, atuando em parceria colaborativa, a serem cumpridas até 2030.



O **Serviço Geológico do Brasil – CPRM** atua em diversas áreas intrínsecas às Geociências, que podem ser agrupadas em quatro grandes linhas de atuação:

- Geologia
- Recursos Minerais;
- Hidrologia; e
- Gestão Territorial.

Todas as áreas de atuação do SGB-CPRM, sejam nas áreas das Geociências ou nos serviços compartilhados, ou ainda em seus programas internos, devem ter conexão com os ODS, evidenciando o comprometimento de nossa instituição com a sustentabilidade, com a humanidade e com o futuro do planeta.

A tabela a seguir relaciona as áreas de atuação do SGB-CPRM com os ODS.

Áreas de atuação do Serviço Geológico do Brasil – CPRM e os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável – ODS

ÁREA DE ATUAÇÃO GEOCIÊNCIAS

LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS



LEVANTAMENTOS AEROGEOFÍSICOS



AVALIAÇÃO DOS RECURSOS MINERAIS DO BRASIL



LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS MARINHOS



LEVANTAMENTOS GEOQUÍMICOS



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUPERFICIAIS



SISTEMAS DE ALERTA HIDROLÓGICO



AGROGEOLOGIA



LEVANTAMENTOS BÁSICOS DE RECURSOS HÍDRICOS SUBTERRÂNEOS



RISCO GEOLÓGICO



GEODIVERSIDADE



PATRIMÔNIO GEOLÓGICO E GEOPARQUES



ZONEAMENTO ECOLÓGICO-ECONÔMICO



GEOLOGIA MÉDICA



RECUPERAÇÃO DE ÁREAS DEGRADADAS PELA MINERAÇÃO



ÁREA DE ATUAÇÃO SERVIÇOS COMPARTILHADOS

GEOPROCESSAMENTO E SENSORIAMENTO REMOTO



TECNOLOGIA DA INFORMAÇÃO



LABORATÓRIO DE ANÁLISE MINERAIS



MUSEU DE CIÊNCIAS DA TERRA



PALEONTOLOGIA



PARCERIAS NACIONAIS E INTERNACIONAIS



REDE DE BIBLIOTECAS



REDE DE LITOTECAS



GOVERNANÇA



ÁREA DE ATUAÇÃO PROGRAMAS INTERNOS

SUSTENTABILIDADE



PRÓ-EQUIDADE



COMITÊ DE ÉTICA



PROGRAMA DE AVALIAÇÃO DA POTENCIALIDADE MINERAL DA PLATAFORMA CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA (REMLAC)

INFORME DE RECURSOS MINERAIS

Série Recursos Minerais Marinhos, nº 05

Levantamento Geológico, Oceanográfico
e Ambiental do Potencial Mineral do
Espaço Marinho e Costeiro

PROJETO DE PROSPECÇÃO E EXPLORAÇÃO DE DEPÓSITOS DE FOSFORITAS MARINHAS NA PLATAFORMA CONTINENTAL JURÍDICA BRASILEIRA

Os produtos da Série Recursos Minerais Marinhos, parte integrante do Programa Oceanos, Zona Costeira e Antártica, objetivam sistematizar e divulgar os resultados dos trabalhos desenvolvidos pela Serviço Geológico do Brasil - CPRM, nas áreas de Geologia e Geofísica Marinhas, Geoquímica, Sedimentologia e Oceanografia, com foco nos campos de geologia econômica, prospecção, meio ambiente, pesquisa e economia mineral.

Cada exemplar da Série Recursos Minerais Marinhos apresenta os resultados da abordagem temática relacionada à potencialidade estratégica dos bens minerais da Zona Econômica Exclusiva brasileira, na perspectiva de promover o interesse da indústria de mineração para novos alvos de investimento no país, em compatibilidade com o equilíbrio ambiental. São apresentados sob a forma de estudos, artigos, relatórios e mapas.

Neste volume da série, são apresentados os resultados dos quatro levantamentos de dados geofísicos e geológicos, no período de 2010 a 2020, sobre o Terraço do Rio Grande. Localizado a 180 km do litoral dos estados de Santa Catarina e Rio Grande do Sul, o terraço ocupa a porção superior do talude continental, entre as isóbatas de 200 a 1.000 m de profundidade. A integração dos levantamentos batimétricos gerou mapas temáticos que permitem o estudo da geomorfologia e a classificação do tipo de substrato. A interpretação dos perfis sísmicos revelou ambientes sedimentares distintos relacionados a feições erosivas e de acumulação de sedimentos. Associando os dados geofísicos à descrição das amostras sedimentares e às análises geoquímicas, foi possível estabelecer quais áreas são mais indicativas de acumulação das concreções fosfáticas.

Os dados levantados foram integrados neste Informe de Recursos Minerais e em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), bases de dados e mapas temáticos, vinculados ao banco de dados coporativo da CPRM, o GeoSGB, e estão disponíveis para download no endereço eletrônico www.cprm.gov.br.

Serviço Geológico do Brasil - CPRM

Sede

Setor Bancário Norte - SBN - Quadra 02, Asa Norte
Bloco H - 5º andar - Edifício Central Brasília
Brasília - DF - CEP: 70040-904
Tel: 61 2108-8400

Escritório Rio de Janeiro

Av Pasteur, 404 - Urca
Rio de Janeiro - RJ - Cep: 22290-255
Tel: 21 2295-5337 - 21 2295-5382

Diretoria de Geologia e Recursos Minerais

Tel: 21 2546-0212 - 61 3223-1166

Departamento de Geologia

Tel: 91 31821326

Departamento de Recursos Minerais

Tel: 21 2295-4992

Diretoria de Infraestrutura Geocientífica

Tel: 21 2295-5837 - 61 2108-8457

Divisão de Geologia Marinha

Tel: 21 22295-0032

Assessoria de Comunicação

Tel: 61 2108-8468

E-mail: asscom@cprm.gov.br

Ouvidoria

Tel: 21 2541-6344

E-mail: ouvidoria@cprm.gov.br

Serviço de Atendimento ao Usuário – SEUS

Tel: 21 2295-5997

E-mail: seus@cprm.gov.br

www.cprm.gov.br