UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE

INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA E GEOFÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Natália de Jesus Lopes Chaves

ANÁLISE DE PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR DA BACIA DE SANTOS

Niterói - RJ

2023

ANÁLISE DE PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR DA BACIA DE SANTOS

Dissertação apresentada por

NATÁLIA DE JESUS LOPES CHAVES

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Orientador: Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Júnior

Coorientadora: Drª. Juliane Castro Carneiro

Niterói - RJ

2023

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

C512a Chaves, Natália de Jesus Lopes
Análise de Proveniência Sedimentar da Bacia de Santos / Natália de Jesus Lopes Chaves. - 2023.
64 f.: il.

Orientador: Alberto Garcia de Figueiredo Júnior.
Coorientador: Juliane Castro Carneiro.
Dissertação (mestrado)-Universidade Federal Fluminense, Instituto de Geociências, Niterói, 2023.

1. Proveniência Sedimentar. 2. Mineralogia. 3. Química Mineral. 4. Bacia de Santos. 5. Produção intelectual. I. Figueiredo Júnior, Alberto Garcia de, orientador. II. Carneiro, Juliane Castro, coorientadora. III. Universidade Federal Fluminense. Instituto de Geociências. IV. Título.

CDD - XXX

Bibliotecário responsável: Debora do Nascimento - CRB7/6368

ANÁLISE DE PROVENIÊNCIA SEDIMENTAR DA BACIA DE SANTOS

Dissertação apresentada por

NATÁLIA DE JESUS LOPES CHAVES

Dissertação apresentada à Universidade Federal Fluminense como requisito parcial do Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra para a obtenção do título de Mestre na área de Geologia e Geofísica.

Aprovada em 15 de dezembro de 2023.

Comissão examinadora:

Sérgio Cadena de Vasconcelos.

Prof. Dr. Sérgio Cadena de Vasconcelos (Membro PUC-Rio)

José Antônio Baptista Neto.

Prof. Dr. José Antônio Baptista Neto (Membro - UFF)

Dr. João Régis dos Santos Filho (Membro - UFF)

Juliane Castro Carneiro

Drª. Juliane Castro Carneiro (Coorientadora - UFF)

Alberto G. Figueiredo

Prof. Dr. Alberto Garcia de Figueiredo Júnior (Orientador - UFF)

In memorian à minha amada avó Maria Rosa, grande incentivadora dos meus sonhos, que hoje torce por mim lá do céu.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por ser o centro de tudo em minha vida e me permitir concluir mais um ciclo na geologia.

Ao meu marido, Francisco Abrantes, por acreditar sempre em mim e ser meu maior incentivador, não me deixando desistir nos momentos mais difíceis durante essa caminhada acadêmica.

À minha filha, Ana Alice, por ser minha dose diária de alegria e ternura, deixando tudo mais leve e feliz.

À minha mãe, Maria Trindade, por suas orações constantes e por toda força e apoio depositados a mim.

À toda minha família do Pará, que mesmo longe torce e ora por mim e pelos meus estudos e compreendeu minha ausência em vários momentos.

Ao meu orientador, Professor Alberto Figueiredo, por ter me aceitado como orientanda e pelos inúmeros ensinamentos durante os seminários em grupo.

À minha coorientadora, Juliane Castro, pela paciência e reuniões, me ajudando a entender e me orientando sempre que se fez necessário.

Ao professor Victor Salgado, pelo suporte nas análises de Difratometia de raios-x (DRX).

À PETROBRAS, à CAPES e à Fundação Euclides da Cunha (FEC) pela concessão da bolsa de mestrado.

À Universidade Federal Fluminense (UFF) e ao Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e da Terra (PPGDOT) pela infraestrutura oferecida.

Ao geólogo, Jorge Nadir pela ajuda na utilização durante o uso do programa Arcgis.

Aos demais colegas bolsistas e colaboradores do Projeto PCR-BS/UFF: Fernanda Scofano Pinheiro, Gabriela de Jesus Rocha, João Régis dos Santos Filho, Alexandre Alcázar Plácido Teixeira, Leonardo Junius Chapeta Santos, Eduardo Thomaz de Aquino Ribeiro, Jonathan de Souza Silva de Araujo, Allan Soares Ramalho e Allan Sandes de Oliveira, pela ajuda durante a preparação de amostras e análises do grupo do PCR-BS.

“Faça o teu melhor na condição que você tem, enquanto você não tem condições melhores para fazer melhor ainda.”

CORTELLA, Mário Sérgio.

RESUMO

A Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar *offshore* do Atlântico Sul Ocidental, possuindo extensos reservatórios de óleo e gás natural nas rochas do pré-sal. A região conta também com os principais portos do país, importantes rotas comerciais, atividades pesqueiras e turísticas, além da proximidade com as capitais mais populosas do país. Compreender os padrões hidrodinâmicos, a morfologia e a distribuição dos sedimentos no assoalho oceânico da bacia representa base fundamental para a execução das atividades econômicas e ambientais na bacia. O objetivo principal desta pesquisa foi o melhor entendimento da distribuição dos sedimentos de fundo da bacia, buscando identificar as áreas de sedimentação e possíveis áreas fontes atuantes na Bacia de Santos, utilizando aspectos mineralógicos, distribuição de elementos químicos e análises estatísticas. Para isto, foi aplicado o conceito '*Source-to-Sink*', que envolve: o entendimento dos processos sedimentares responsáveis pelo transporte e deposição de sedimentos a partir de uma ou mais áreas fontes até a bacia; a identificação das áreas fontes mais atuantes na sedimentação, assim como os materiais fornecidos pelas mesmas; e a redistribuição dos sedimentos por correntes/processos atuantes dentro da bacia. A Bacia de Santos é representada basicamente pela distribuição heterogênea de fácies arenosas, lamosas e carbonáticas: (i) no Setor Sul, ocorre uma grande área com fácies lamosas da parte intermediária a quebra da plataforma, enquanto nas áreas mais rasas ocorrem sedimentos arenosos; (ii) no Setor Norte, existe a ocorrência de uma área dominada pela fácies lamosa na porção intermediária da plataforma, sendo as regiões mais rasas são arenosas e a quebra da plataforma carbonática. No talude os sedimentos tendem a ser mais lamosos no setor sul e no Platô de São Paulo os sedimentos tendem a ser mais ricos em carbonatos. De modo geral, as fácies arenosas proximais são fortemente enriquecidas em Si e K, além de Zr e Ti próximos a Baía de Santos, enquanto as fácies lamosas são ricas em K, Al, Fe, Rb e Zn, e as fácies carbonáticas em Ca e Sr. As análises dos componentes principais (PCA) indicaram boa correlação entre os dados granulométricos e a química mineral, indicando áreas fontes locais (adjacentes a bacia) para as fácies arenosas e carbonáticas (bioclastos e bioconstruções), além de forte influência da Pluma do Rio De la Plata e do Rio Itajaí na sedimentação das fácies lamosas. Verificou-se que os sedimentos finos do De la Plata contribuem na sedimentação dos setores sul e norte da bacia, bem como são redistribuídos no talude do Setor Sul, após captura parcial pelo Cânion da Cananéia.

Palavras-chave: Proveniência sedimentar; Mineralogia; Química mineral; Sedimentação marinha; Bacia de Santos.

ABSTRACT

The Santos Basin is the largest offshore sedimentary basin in the Western South Atlantic, having extensive reservoirs of oil and natural gas in the pre-salt rocks. The region also has the country's main ports, important commercial routes, fishing and tourist activities, as well as proximity to the country's most populous capitals. Understanding the hydrodynamic patterns, morphology and distribution of sediments on the basin's ocean floor represents a fundamental basis for carrying out economic and environmental activities in the basin. The main objective of this research was to better understand the distribution of bottom sediments in the basin, seeking to identify sedimentation areas and possible source areas in the Santos Basin, using mineralogical aspects, distribution of chemical elements and statistical analysis. For this, the 'Source-to-Sink' concept was applied, which involves: understanding the sedimentary processes responsible for the transport and deposition of sediments from one or more source areas to the basin; the identification of the most active source areas in sedimentation, as well as the materials provided by them; and the redistribution of sediments by currents/processes acting within the basin. The Santos Basin is basically represented by the heterogeneous distribution of sandy, muddy and carbonate facies: (i) in the South Sector, there is a large area with muddy facies from the middle part to the break of the platform, while in the shallower areas there are sandy sediments; (ii) in the North Sector, there is the occurrence of an area dominated by muddy facies in the middle portion of the platform, with the shallower regions being sandy and the carbonate platform breaking. On the slope, the sediments tend to be muddy in the southern sector and on the São Paulo Plateau, the sediments tend to be richer in carbonates. In general, the proximal sandy facies are strongly enriched in Si and K, in addition to Zr and Ti near Santos Bay, while the muddy facies are rich in K, Al, Fe, Rb and Zn, and the carbonate facies in Ca and Mr. Principal component analysis (PCA) indicated a good correlation between granulometric data and mineral chemistry, indicating local source areas (adjacent to the basin) for sandy and carbonate facies (bioclasts and bioconstructions), in addition to a strong influence of the De River Plume. la Plata and the Itajaí River in the sedimentation of muddy facies. It was found that the fine sediments of De la Plata contribute to the sedimentation of the southern and northern sectors of the basin, as well as being redistributed on the slope of the Southern Sector, after partial capture by the Cananéia Canyon.

Keywords: Sedimentary provenance; Mineralogy; Mineral chemistry; Marine sedimentation; Santos Basin.

SUMÁRIO

RESUMO vii
ABSTRACT viii
LISTA DE FIGURAS xi
LISTA DE TABELAS xiii

1 INTRODUÇÃO 14
1.1 Apresentação 14
1.2 Objetivos 16

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ARÉA DE ESTUDO 17
2.1 Bacia de Santos 17
2.1.1 Aspectos gerais 17
2.1.2 Sedimentação e morfologia da Bacia de Santos 19

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA 20
3.1 O conceito de *Source-to-Sink* 20
3.2 Ambientes marinhos rasos e profundos 20

4 METODOLOGIA 22
4.1 Revisão bibliográfica 22
4.2 Amostragem e banco de dados 22
4.3 Análises granulométricas 23
4.4 Difratometria de raios-X (DRX) 27
4.5 Fluorescência de raios-X (XRF) 29
4.6 Tratamento dos dados por meio de ARCGIS e COREL DRAW 30
4.7 Análise dos componentes principais (PCA – *Principal Component Analysis*) 30

5 RESULTADOS 31
5.1 Aspectos granulométricos dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos 31
5.2 Caracterização mineralógica 34
5.2.1 Mineralogia dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos 36

5.2.2 Mineralogia das áreas fontes 36

5.3 Distribuição dos elementos químicos 37

5.3.1 Bacia de Santos..... 37

5.3.1.1 Elementos maiores (>1%) 37

5.3.1.2 Elementos menores (1-0,1%) e traços (<1%) 40

5.3.2 Áreas fontes: Rio de la Plata, Rio Grande, Rio Itajaí e Baía de Santos 44

5.4 Análise dos componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*) 46

6 DISCUSSÃO 51

7 CONCLUSÕES 59

8 REFERÊNCIAS 61

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Mapa de localização da Bacia de Santos com destaque para os pontos amostrados e principais sistemas de drenagens relacionados 15

Figura 2. Modelo conceitual de source-to-sink em uma bacia sedimentar marinha 20

Figura 3. Navio RV Ocean Stalwart utilizado nas campanhas oceanográficas (Santos Filho et al., 2022). Legenda: 1 - guindaste, 2 - guinho com cabo de kevlar, 3 - deck de meia-nau e entrada para o laboratório, e 4 - berço e amostrador 22

Figura 4. A) Amostras pulverizadas; B) Peneira utilizada para o peneiramento; C) Amostras sendo pesadas em 10g; D) Resquícios após o peneiramento; E) Defloculante Hexametafosfato de sódio; F) Amostras depositadas na mesa agitadora 24

Figura 5. A) Granulômetro; B) Dados no Gradistat 26

Figura 6. Banco de dados do Gradistat 27

Figura 7. Processamento das amostras através da técnica de Difração de raios-x (DRX) 28

Figura 8. Mapa de distribuição dos sedimentos de fundo na Bacia de Santos 33

Figura 9. Difratogramas dos sedimentos arenosos, lamosos e carbonáticos da Bacia de Santos e áreas fontes 35

Figura 10. Mapas de concentrações dos elementos Si, K, Al, Fe, Ca e Cl nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS 38

Figura 11. Mapas de concentrações dos elementos Ti, Zr, Rb, Zn, Mn e Eu nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS 41

Figura12. Mapas de concentrações dos elementos Sr, S, Pb, Ni e Cu nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS 43

Figura 13. Resultado da análise dos componentes principais em coordenadas 2D dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. A) Gráfico do setor sul; B) Gráfico do setor norte; C) Gráfico geral da bacia 48

Figura 14. Gráficos de carregamento de elementos PC1 (Componente 1) e PC2 (Componente 2). A) Gráfico do setor sul; B) Gráfico do setor norte; C) Gráfico geral da bacia 49

Figura 15. Análise dos componentes principais dos sedimentos das áreas fontes selecionadas neste estudo. A) Coordenadas 2D; B) Carregamento de elementos PC1 (Componente 1) e PC2 (Componente 2) 50

Figura 16. Mapas geológicos simplificados com as idades dos principais grupos de rochas associados às drenagens da área de estudo (Modificado de CPRM, 2022). A) Localização das bacias sedimentares brasileiras. B) Principais drenagens e geologia das áreas fontes relacionadas à Bacia de Santos. C) Geologia e drenagens que desaguam nas Laguna dos Patos e alimentam o canal do porto de Rio Grande. D) Extensão da bacia de drenagem do Rio de la Plata 53

Figura 17. Mapas geológicos simplificados detalhando os sistemas de drenagem que desaguam na Bacia de Santos (Modificado de CPRM, 2022). A) Porção oeste do setor sul da bacia, região em que está localizado o Rio Itajaí; B) Porção norte do setor da bacia, região de ocorrência da Baía de Santos. C) Setor norte da Bacia de Santos 54

Figura 18. Mapa integrado da distribuição granulométrica e de elementos químicos nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos, incluindo as contribuições das áreas fontes 55

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição dos minerais identificados através de difração de raios-x (DRX) nas amostras das áreas fontes e sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Qz - Quartzo; Kfs - Feldspato potássico; Pl - Plagioclásio; Mc - Muscovita; Kln - Caulinita; Chl - Clorita; Arg - Aragonita; Cal - Calcita; Dol - Dolomita; Hl - Halita 34

Tabela 2. Proporções de elementos químicos maiores e menores (%) por XRF nas áreas fontes selecionadas neste estudo 45

Tabela 3. Proporções de elementos químicos menores e traços (ppm) por XRF nas áreas fontes selecionadas neste estudo 45

1 INTRODUÇÃO

1.1 Apresentação

A Bacia de Santos é a maior bacia sedimentar *offshore* no Atlântico Sul Ocidental, sendo desenvolvida durante o rifteamento das placas Sul-americana e Africana, cobrindo uma área de 350.000 km^2 (MIO ET AL., 2005). A bacia é limitada a norte pelo Alto de Cabo Frio, separando-a da Bacia de Campos, e no Sul pelo Alto de Florianópolis, que a separa da Bacia de Pelotas (GAMBOA E RABIONOWITZ, 1981). A oeste, a bacia é limitada pelas cadeias de montanhas que compreendem a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira, sendo estas as áreas fontes de sedimentos recentes mais próximas da bacia (MILANI, 2000). Estes sedimentos estão distribuídos nas diferentes zonas morfológicas da bacia, que compreendem a plataforma continental, o talude e o Platô de São Paulo. A plataforma continental compreende uma área de 134 mil km^2, sendo a região mais estudada Bacia de Santos (FIGUEIREDO JR ET AL, 2022). Esta plataforma estende-se desde a costa até à quebra da plataforma a 200 m de profundidade, sendo mais estreita no limite norte de Cabo Frio (75 km) e mais larga desde a Ilha de São Sebastião (220 km) em direção ao Sul até a Ilha de Florianópolis (Figueiredo Jr et al., 2022). Por outo lado, informações e dados referentes ao talude (ente 200 e 1900m) e o Platô de São Paulo (profundidades maiores que 1900) são mais escassos na literatura.

A grande importância dada a está região está relacionada ao fato da Bacia de Santos abrigar os três maiores campos produtores de petróleo e gás natural do Pré-sal (Tupi, Búzios e Sapinhoá), além de vários outros importantes campos (Pereira et al., 196). Ela é uma das bacias sedimentares mais relevantes da margem brasileira devido à atividade de muitos portos e aos reservatórios dos campos de exploração de petróleo e do pré-sal.

Os sedimentos acumulados em uma bacia sedimentar possuem diversas origens, podendo ser provenientes das áreas circundantes ou serem formados/retrabalhados na própria bacia. Trabalhos envolvendo estudos de sedimentos recentes da Bacia de Santos foram desenvolvidos por diversos autores, entre eles, as pesquisas de Figueiredo Jr et al. (2022) e Santos Filho et al (2022), que enriqueceram e trouxeram interpretações significativas a respeito do tema aqui dissertado. Logo, buscando contribuir e ampliar o entendimento da distribuição e origem das fácies lamosas, arenosas e carbonáticas da Bacia de Santos, um estudo integrado de mineralogia e distribuição de elementos na bacia e em áreas fontes específicas é sugerido aqui.

Neste contexto, insere-se o presente trabalho, que buscou entender e reconhecer a proveniência e distribuição das partículas e materiais sedimentares que ocorrem na Bacia de Santos. Os resultados e dados obtidos e discutidos pelos autores acima citados, auxiliaram a realização deste trabalho, sendo interpretados e complementados ao longo dos resultados e discussões.

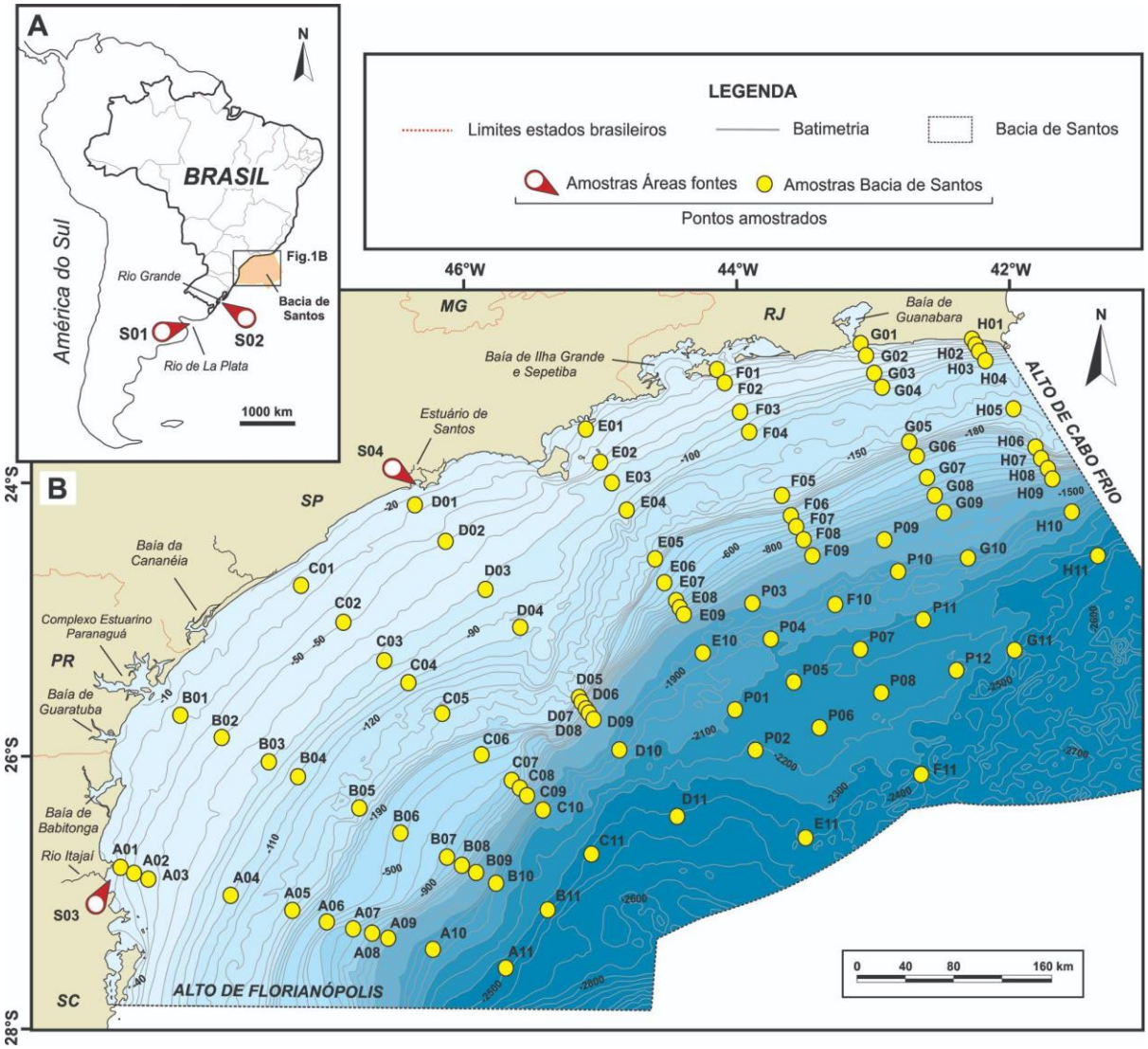


Figura 1. Mapa de localização da Bacia de Santos com destaque para os pontos amostrados e principais sistemas de drenagens relacionados.

1.2 Objetivos

O objetivo principal desta pesquisa é o melhor entendimento da distribuição dos sedimentos de fundo (recentes) na Bacia de Santos, a partir das indicações das possíveis áreas fontes, bem como da identificação da mineralogia principal nas diferentes fácies granulométricas. Para isto foi aplicado o conceito de '*Source-to-Sink*', que envolve tanto a identificação das possíveis fontes de sedimentos, como sua distribuição dentro da bacia.

Como objetivos específicos, destacam-se:

(1) Caracterização granulométrica e distribuição dos elementos químicos presentes nos sedimentos de fundo e áreas fontes;

(2) Identificação da mineralogia principal das fácies arenosas, lamosas e carbonáticas;

(3) Comparação dos dados mineralógicos e químicos em mapas de distribuição e análises geoestatísticas dos componentes principais;

(4) Delimitação das bacias de drenagem e geologia das principais áreas fontes;

(5) Desenvolvimento de um mapa integrado da distribuição granulométrica e elementos químicos nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos.

2 CONTEXTO GEOLÓGICO DA ÁREA DE ESTUDO

2.1 Bacia de Santos

2.1.1 Aspectos Gerais

A Bacia de Santos tem sua origem relacionada aos primeiros pulsos tectônicos do Juro-Cretáceo, que geraram a separação dos continentes Sul-Americano e Africano. É uma bacia de margem passiva gerada através do processo em que houve a ruptura do continente Gondwana (Neocomiano), o que culminou resultando na abertura do Oceano Atlântico Sul. A evolução da bacia é reconhecida através de três fases evolutivas principais, sendo elas: (i) a fase Rifte, com rochas vulcânicas básicas de idade hauterivianas com depósitos flúvio-lacustres (conglomerados, arenitos e coquinas); (ii) a fase Transicional (Pós-rifte), com importantes deposições de halita; e (iii) a fase de Margem Passiva (Drift).

A fase rifte se desenvolveu no Cretáceo Inferior. O registro sedimentar da fase rifte é chamado de Megassequência Continental por Chang et al. (1992) ou Sequências do Continente e do Lago por Asmus & Porto (1980). Segundo (Pereira & Feijó, 1994), registros mais antigos da fase rifte são datados do Hauteriviano, perdurando até o início do Aptiano, sendo formado por um magmatismo basal recoberto por uma sequência depositada em ambiente flúvio-lacustre, constituída por folhelhos, carbonatos e depósitos grossos associados a leques aluviais.

Para diversos autores a evolução e a própria estruturação da fase rifte da Bacia de Santos é fortemente influenciada por heterogeneidades de expressão regional, presentes na crosta sobre a qual a bacia se desenvolveu (Mohriak & Dewey, 1987; Macedo, 1990; Davison, 1997 e Meisling et al., 2001). Estas heterogeneidades representam descontinuidades em escala regional que afetam a crosta e muito provavelmente o manto superior (Ferreira, 1982; Campanha & Sadowski, 1999; Soares et al., 2000).

Geneticamente, compreendem zonas de sutura entre blocos continentais, cinturões de dobramento e cavalgamento, zonas de cisalhamento e enxames de diques máficos. São reconhecíveis no embasamento aflorante em escala regional, através de fotos aéreas, imagens de satelite e principalmente em mapas magnéticos e gravimétricos por justaporem blocos crustais com diferentes caracteristicas petrológicas e estruturais. Estas descontinuidades controlam o arcabouco estrutural do embasamento da Bacia de Santos através da reativação de estruturas durante o processo de estiramento e abertura (Mio, 2005).

Separada da fase rifte pela discordância Pré-Alagoas, a fase transicional (pós-rifte) ocorreu durante o final do Aptiano, sendo caracterizada pela subsidência térmica flexural, seguida de uma relativa estabilidade tectônica em um ambiente deposicional do tipo golfo alongado. Essa fase é composta por uma espessa seção de rochas evaporíticas, depositadas durante o Aptiano em um ambiente marinho restrito, com contribuição de depósitos de *sabkha*. Os depósitos evaporíticos do Aptiano, com passagem para ambiente de plataforma carbonática no Albiano, compõem a Megassequência Transicional Evaporítica e a Megassequência de Plataforma Carbonática Rasa (Chang et al., 1992) ou Sequência do Golfo (Asmus & Porto, 1980). Essas condições proporcionaram a deposição de extensas e espessas camadas carbonáticas (Formação Barra Velha) e evaporíticas (Formação Ariri). Os evaporitos são compostos predominantemente por halita, seguido por anidrita. (Moreira et al., 2007; Macedo, 1990.)

A fase de margem passiva (drift) começou durante o Albiano, com o primeiro estágio de formação do Oceano Atlântico. A evolução dessa fase se deu com a ampliação do assoalho oceânico (abertura do Atlântico Sul), que criou condições marinhas profundas, afogando uma plataforma carbonática. (Pereira e Macedo 1990). A subsidência continua da bacia foi acompanhada, no cretáceo tardio, por uma imensa transferência de sedimentos continentais, principalmente pela inclinação flexural da margem, o que elevou as zonas costeiras, como a Serra do Mar e a Serra da Mantiqueira. Essa elevação gerou aumento no processo de erosão, aumentando a carga sedimentar que preenchia a parte interna da bacia. Consequentemente, desenvolveu-se a halocinese, que perdura até os dias de hoje. (Pereira e Feijo 1994; Almeida e Carneiro, 1998; Meisling et al. 2001; Modica e Brush, 2004).

Sobre os evaporitos da fase transicional, instalou-se, durante o Albiano inferior, ampla plataforma carbonática, bordejada por sistemas de leques aluviais, iniciando a fase de margem passiva na bacia que perdura até hoje. (Chang et al 2005). A fase de margem passiva compreende à Megasequencia de Mar Aberto (Chang et al., 1992) ou a Sequência do Mar (Asmus & Porto, 1980).

A estrutura crustal da Bacia de Santos tem sido objeto de diversas discussões quanto à sua geometria, espessura e taxas de deformação (Leyden et al., 1971; Moriak&Dewey, 1987; Chang et al., 1992; Franca & Assumcão, 2004). Kowsmann et al. (1982) apontam natureza essencialmente continental para a crosta sob a área do Platô de São Paulo, defronte às bacias

de Campos e Santos, admitindo que as porções mais a leste poderiam conter porções de crosta transicional, devido à presença de rochas magmáticas intrudidas. (Chang et al., 2005).

2.1.2 Sedimentação e morfologia da Bacia de Santos

Um ambiente de sedimentação é a parte da superfície da terra onde se acumulam ou se acumularam sedimentos cujas características físicas químicas e biológicas são distintas das áreas adjacentes. Essa parte da superfície da Terra está sujeita ao controle da fauna, da flora, geologia, geomorfologia, clima, profundidade e salinidade da água e sistemas de correntes operantes, podendo ser atual ou pretérito. (Silva et al., 2003).

Para que exista um ambiente de sedimentação é necessário que exista aporte de sedimentos, de forma ininterrupta para que não ocorra estabilidade (e desenvolvimento de solo) e erosão. Esses ambientes são divididos da seguinte forma: Os continentais, sendo: leques aluviais, fluviais, desérticos e lagos; os transicionais como: deltaicos, estuarinos, lagunas e planícies de maré, e os marinhos como os costeiros, de mar raso e mar profundo.

A fisiografia da margem continental é constituída pela Plataforma Continental, Talude e Sopé, onde está situado o Platô de São Paulo. A Plataforma Continental se estende das áreas rasas, que são dominadas por processos costeiros, ao limite superior do talude, que são dominados por processos oceânicos. Ela constitui um ambiente complexo, no qual, processos hidrodinâmicos e climáticos levam a uma enorme variabilidade em diferentes escalas de tempo e espaço. (Castro Filho, 1996).

O Talude Continental é a província fisiográfica da Margem Continental que demonstra os valores mais elevados de declividade do fundo do mar. Nesta província estão presentes inúmeras feições, entre elas podemos destacar: pockmarks, contornitos, ondas de sedimentos e cânios submarinos, que são as maiores feições erosivas da margem (Dias Rodolfo, 2015).

A atual morfologia se dá pela combinação de estruturas herdadas de processos tectônicos, halocinese, pelo retrabalhamento dos sedimentos e processos de correntes de fundo e também pela circulação superficial, no caso da Plataforma Continental. (Rebesco et al 2014.)

3 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

3.1 O conceito de *Source-to-Sink*

Segundo Martinsen et al. (2010), *Source-to-Sink* é o sistema de análises de todos os sistemas deposicionais, que procede desde a fonte (sua origem) até a bacia (destino final). Seu conceito se enquadra para entender de forma coesa a tectônica, o clima, as mudanças do nível do mar e outros agentes que controlam a produção, o transporte e a acumulação de sedimentos e solutos, desde sua fonte até a bacia.

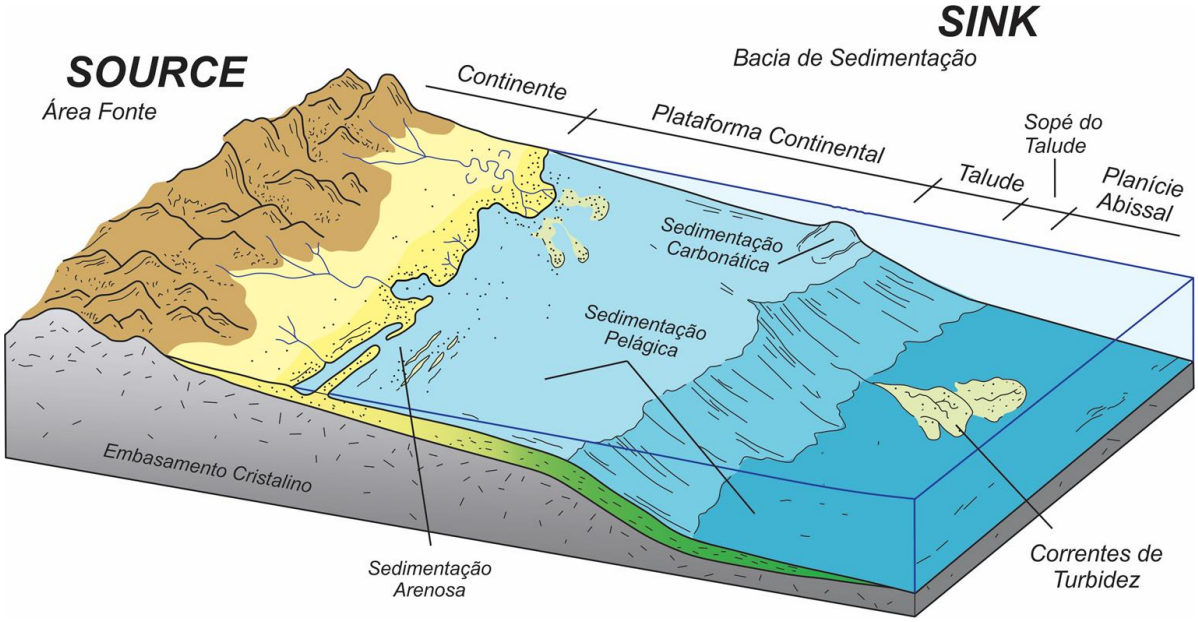


Figura 2. Modelo conceitual de *source-to-sink* em uma bacia sedimentar marinha.

3.2 Ambientes marinhos rasos e profundos

Os processos meteoceanográficos em águas rasas e profundas que influenciam a geomorfologia e a composição sedimentar da Bacia de Santos, como ondas, correntes e massas de água, são minuciosamente discutidos por Dottori et al. (2023) e Silveira et al. (2023). (Figueiredo et al., 2022).

Sob o ponto de vista da sedimentologia, considera- se que os ambientes de águas profundas são aqueles situados abaixo do nível base das ondas de tempestade, ou seja, em uma profundidade a partir da qual as ondas não interagem com o fundo. O ambiente marinho profundo é constituído por diversos tipos de sedimentos, sendo eles: sedimentos terrígenos,

biogênicos, autigênicos, vulcanogênicos e cosmogênicos. Os sedimentos terrígenos são trazidos do continente pelo gelo, pelos rios ou pelo vento, e sua composição reflete a constituição da área fonte.

Geralmente os sedimentos de maior granulometria (areia e cascalho) ficam retidos junto à região costeira. Porém, correntes de turbidez são capazes de transportar grandes volumes de sedimentos clásticos grossos, até grandes distâncias da costa, por dezenas ou centenas de quilômetros, resultando em depósitos espessos e relativamente contínuos, que possuem frequentemente boa qualidade como rocha-reservatório para petróleo.

A dinâmica sedimentar em águas profundas é dominada por uma série de processos: fluxos gravitacionais de sedimentos, fluxos gravitacionais de massa e correntes de fundo. O ambiente marinho profundo cobre cerca de metade da superfície terrestre, e nosso conhecimento sobre estes depósitos está em fase crescente, mas ainda é inicial. O modo de vida da sociedade mundial é ainda muito dependente do petróleo, pois não existe, a curto prazo, um substituto energético à altura do petróleo, que garanta condições de custo e o suprimento em larga quantidade.

4 METODOLOGIA

4.1 Revisão bibliográfica

Para esse trabalho, foi realizado um levantamento bibliográfico por meio de análises de publicações e descrições de vários autores a respeito do tema na bacia. Essa fundamentação teórica deu sustentação às ideias, argumentos e conceitos para o tema escolhido para a dissertação, consistindo na busca de referências em outros autores, pesquisadores e pesquisas acadêmicas.

4.2 Amostragem e banco de dados

A coleta de amostras foi organizada em pontos ao longo de transectos dentro do projeto "Caracterização química, biológica e geológica do sistema bentônico da Bacia de Santos- PCR-BS". Foram realizadas oitenta e oito estações ao longo de oito transectos em isóbadas específicas (25, 50, 75, 100, 150, 400, 700, 1000, 1300, 1900 e 2.400 m). e onze estações no Platô de São Paulo, totalizando 297 amostras. Foram utilizados um box-corer de 50x50x50 cm e um mega van Veen de 90x92x55 cm (231 L), utilizando o navio RV Ocean Stalwart como plataforma (Figura 3). Os sedimentos foram amostrados em três estratos de profundidade: 0-2 cm, 2-10 cm e 0-10 cm, no entanto, para essa pesquisa apenas a profundidade de 0-2cm será utilizada.

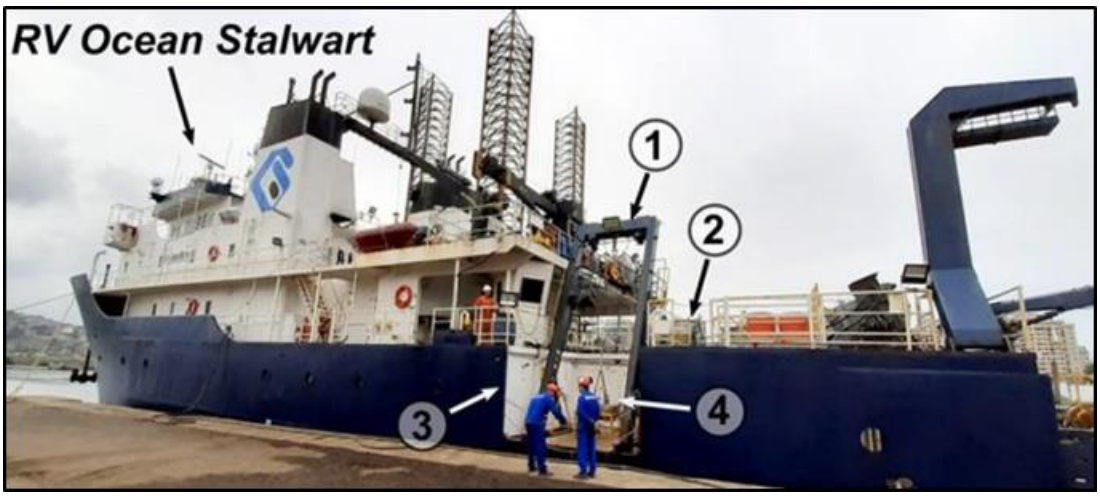


Figura 3. Navio RV Ocean Stalwart utilizado nas campanhas oceanográficas (Santos Filho et al., 2022). Legenda: 1 - guindaste, 2 - guinho com cabo de kevlar, 3 - deck de meia-nau e entrada para o laboratório, e 4 - berço e amostrador.

4.3 Análises granulométricas

A análise granulométrica foi realizada na amostra bruta sem a remoção de carbonatos e matéria orgânica. Este procedimento foi adotado de forma que a distribuição de grãos pudesse representar a realidade para os organismos que estão em contato com os sedimentos. Essas análises foram efetuadas no intervalo (0-2cm) e em lotes para o processamento, onde se seguiu a ordem de amostragem. Assim que as amostras chegaram ao laboratório, foi necessário pesá-las para obter o peso úmido das mesmas e, consequentemente, o volume coletado. Para esse intervalo (0-2cm), adotou-se os seguintes procedimentos (Figura 4): (1) Liofilização; (2) Granulometria; (3) Defloculante (Hexametafosfato de sódio); (4) Granulômetro - Mastersizer 2000; e (5) Gradistat.

1 - Liofilização: Depois do procedimento de pesar as amostras úmidas e reembalar nos potes plásticos, as amostras foram liofilizadas. O procedimento de liofilização começou preparando as amostras que estavam congeladas enquanto o freezer atingia a temperatura de -40º, e após a temperatura ser atingida as amostras foram depositadas no equipamento, sendo postas na cuba e a tampa em seguida, certificando-se que estava tudo bem vedado.

2 - Ao término da liofilização, as amostras foram preparadas para dar início ao processo de granulometria. Inicialmente, elas foram depositadas em um recipiente, desagregando manualmente, com atenção para que não houvesse quebra nem perda dos sedimentos finos. (Figura 4A). Em seguida foi pesado aproximadamente 10 g de sedimento (Figura 4C) Antes de passar na peneira, foi verificado se a peneira e o recipiente inferior estavam devidamente limpos e higienizados, caso houvesse algum resquício de amostras, passava-se o pincel para limpar e começar o processo. (Figura 4D). Após verificar esse processo de limpeza, as amostras passaram nas peneiras de 2 mm e de 1 mm com cuidado e atenção para que não houvesse perda de sedimentos finos. As peneiras foram colocadas na seguinte ordem: 2mm primeiro e 1 mm em baixo, e então o fundo.(Figura 4B) O peso inicial foi anotado para o caso de se encontrar sedimentos maiores de 2 mm e 1mm, e assim ser feita a quantificação (%) de sedimentos mais grossos nas amostras. Em seguida, foi pesado o sedimento de granulometria maior que 2 mm e 1mm depois armazenado, identificado e guardado. Posteriormente, os recipientes com a identificação da amostra e da peneira que ficou retida foram fotografados.

3 - O uso do Defloculante Hexametafosfato de sódio acontece antes das amostras serem levadas ao granulômetro (Figura 4E). Primeiro elas devem permanecer, no mínimo, 3h na mesa

agitadora. (Figura 4F). Para este processo, foi preciso inicialmente separar um tubo falcon (tubo de centrífuga) por amostra devidamente identificado. Posteriormente, colocou-se uma quantidade de aproximadamente ~1g de cada amostra dentro de cada tubo falcon e adicionou-se então a solução defloculante (de 10 ml). Então, os tubos foram levados para a mesa agitadora com agitação a 50%. (Figura 4F).

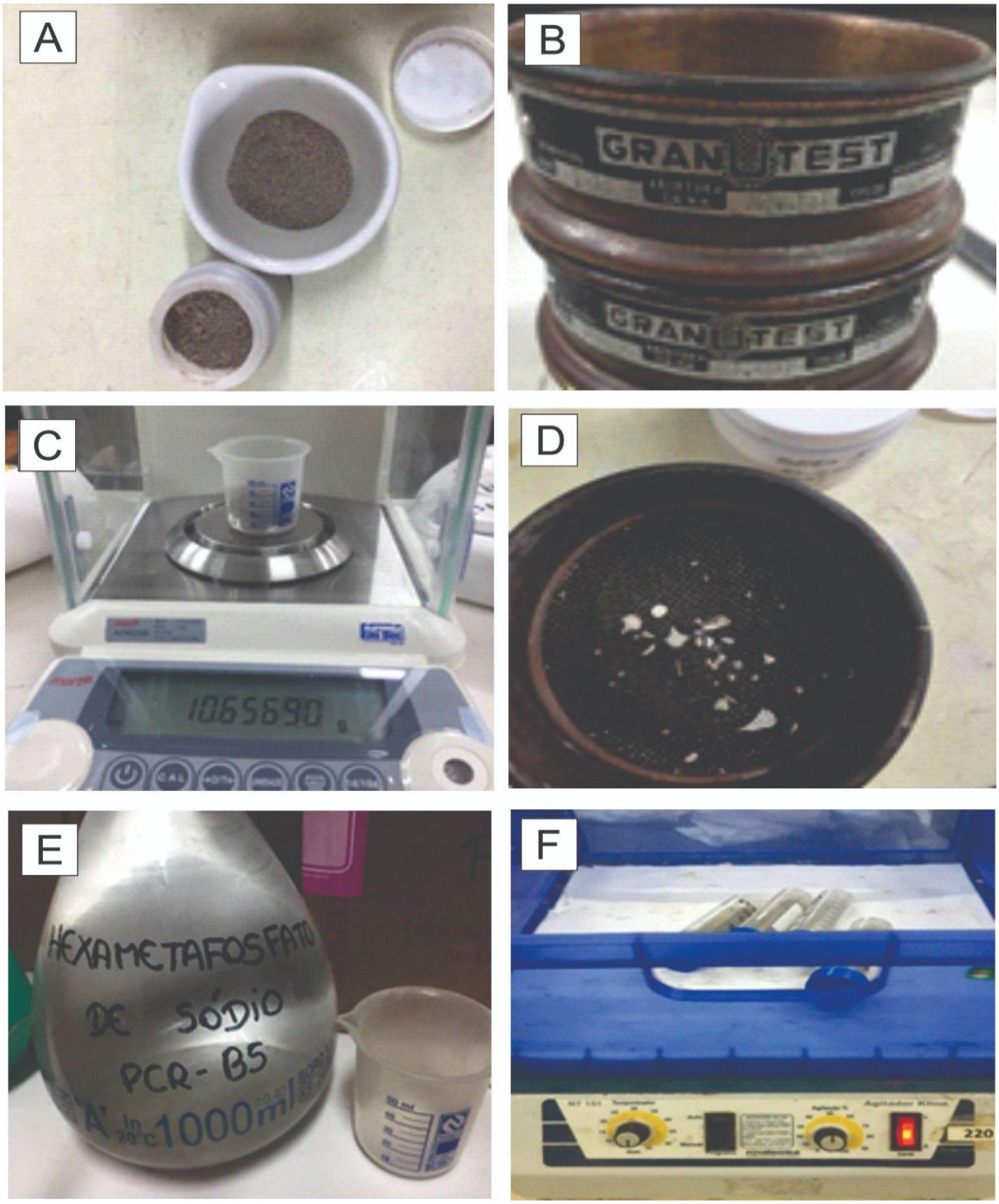


Figura 4. A) Amostras pulverizadas; **B)** Peneira utilizada para o peneiramento; **C)** Amostras sendo pesadas em 10g; **D)** Resquícios após o peneiramento; **E)** Defloculante Hexametafosfato de sódio; **F)** Amostras depositadas na mesa agitadora.

4 - Após o processo da mesa agitadora e do defloculante, foram inseridos no Malvern apenas sedimentos que foram passados na peneira de 1mm. Com, no mínimo, 4 horas na mesa agitadora, a granulometria pôde efetivamente ser realizada. (Figura 5A). No instante em que o software solicitou a inserção da amostra, a mesma foi retirada da mesa agitadora e foi lançada no reservatório com o auxílio de uma pipeta de plástico incluindo sempre o resíduo da amostra que ficou no fundo do tubo falcon. Feito isso, o start pôde ser dado. O tempo de processamento de cada amostra no equipamento foi de aproximadamente 17 minutos. Para começar o procedimento do granulômetro foi necessário abrir o Mastersizer 2000 e aguardar cerca de 30min antes de começar a rodar as amostras e ligar o sistema. Para iniciar as medidas foi necessário criar um arquivo, e com esse arquivo já criado começou-se então a realizar o procedimento. A ordem para nomear as amostras foi colocando primeiro a estação das amostras, em seguida a réplica e depois o intervalo em que ela foi coletada.

A quantidade de amostra a ser utilizada depende da natureza do material a ser analisado e é função da obscuração do laser. Este parâmetro é fornecido pelo equipamento e é definido como a quantidade de luz perdida pelo laser ao atravessar a solução dispersa. Segundo o fabricante, o intervalo ótimo de obscuração é entre 10 e 20 %. Importante ser maior que 11% porque foi usado o ultrassom nas análises, e caso não chegasse aos 20% poderia ocorrer de entupir o granulômetro. Inicialmente foi analisada cada amostra, se fosse possível, toda a quantidade do falcon era inserida, se não, ia-se inserindo aos poucos com uma pipeta a quantidade suficiente que não ultrapasse os 20%. Importante destacar que essa metodologia incluiu dois cuidados essenciais com a desagregação das partículas, sendo eles: a mecânica na mesa agitadora após ser inserido o defloculante e a de ultrassom antes das análises no equipamento. após esse processo iniciou-se então o processo de inserir as amostras. (Figura 5A).

5 - A distribuição granulométrica foi compilada no programa Gradistat (Blott & Pye, 2001) e gerou parâmetros como: média, mediana, desvio padrão, assimetria, curtose, curtose normalizada, classificação Wentworth, grau de seleção e classificação de curtose. (Figura 5B) Os parâmetros estatísticos das distribuições granulométricas foram calculados a partir dos diâmetros granulométricos expressos em phi, média, mediana, desvio padrão, assimetria, curtose, através das equações propostas por Folk e Ward (1957).

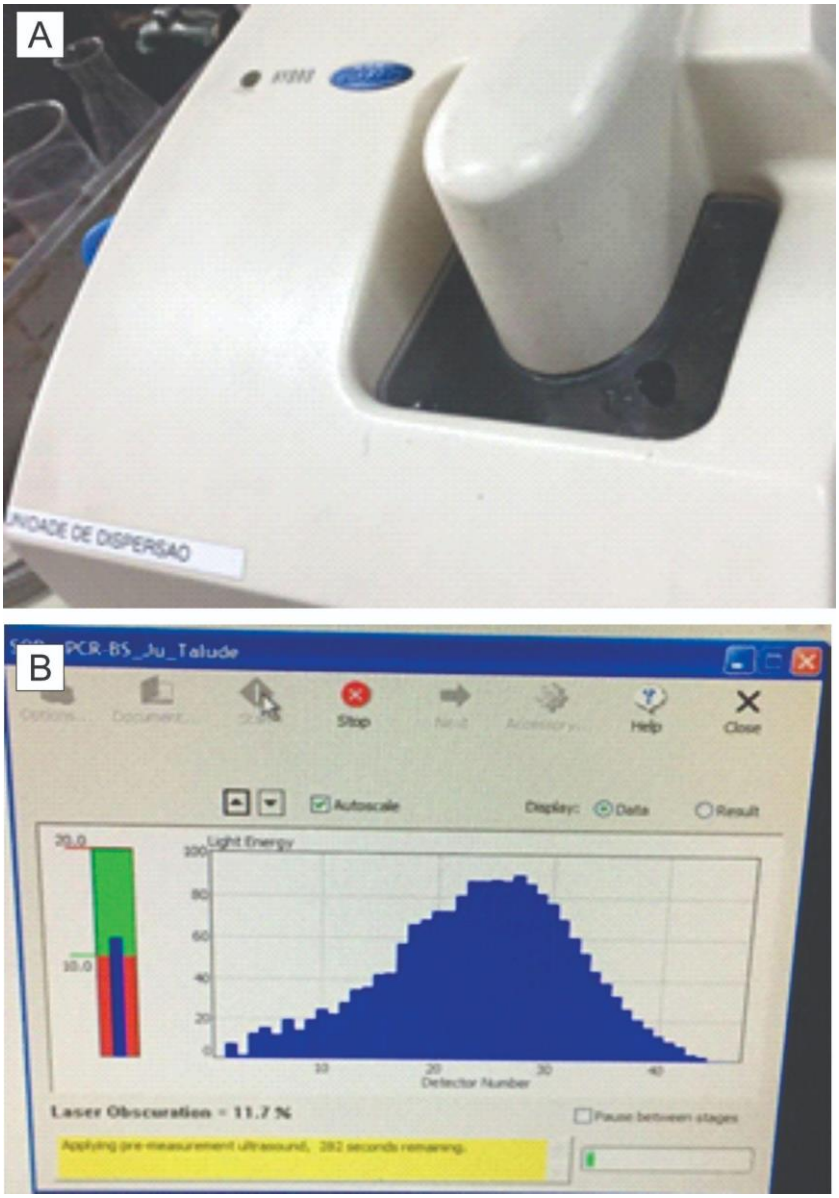
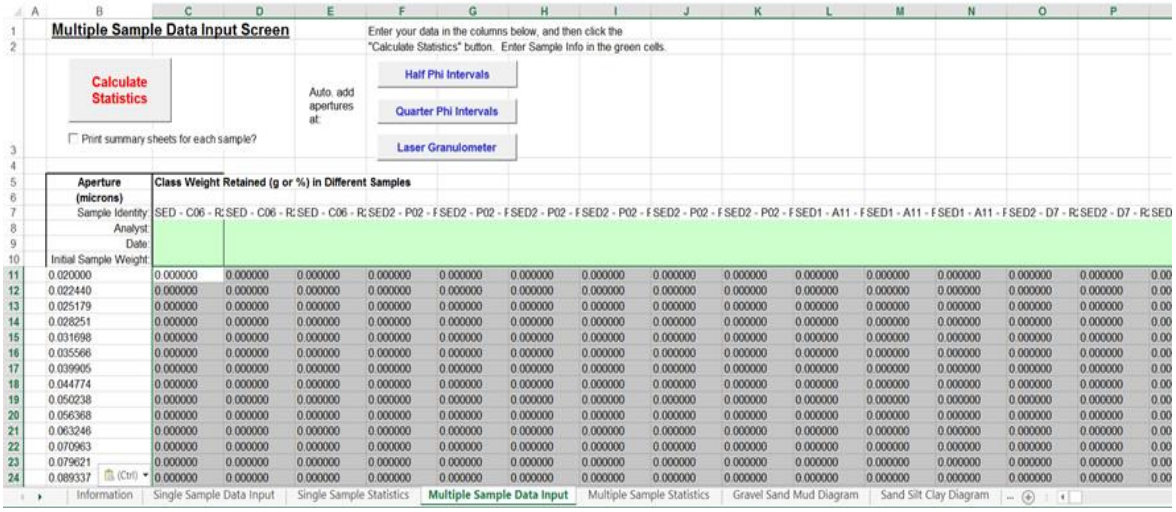


Figura 5. A) Granulômetro; **B)** Dados no Gradistat.

Os dados foram exportados para o Mastersizer para ficar pronto para o Gradistat, e feito isso, o próximo passo foi transpor os dados (Transformar linhas em colunas e vice-versa) para que o Gradistat pudesse ler da forma adequada. Após transpor os dados, a planilha foi exportada para o excel e depois os dados foram inseridos no Gradistat. Depois de terminar a planilha e preservando uma ordem, as colunas das amostras com a identificação foram copiadas para o banco de dados Gradistat. (Figura 6).



Multiple Sample Data Input Screen

Enter your data in the columns below, and then click the "Calculate Statistics" button. Enter Sample Info in the green cells.

Calculate Statistics

Print summary sheets for each sample?

Auto. add apertures at:

Half Phi Intervals

Quarter Phi Intervals

Laser Granulometer

Aperture (microns)	Class Weight Retained (g or %) in Different Samples													
Sample Identity:	SED - C06 - R	SED - C06 - R	SED - C06 - R	SED2 - P02 - F	SED2 - P02 - F	SED2 - P02 - F	SED2 - P02 - F	SED2 - P02 - F	SED2 - P02 - F	SED1 - A11 - F	SED1 - A11 - F	SED1 - A11 - F	SED2 - D7 - R	SED2 - D7 - R
Analyst:														
Date:														
Initial Sample Weight:														
0.020000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.022440	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.025179	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.028251	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.031698	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.035566	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.039905	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.044774	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.050238	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.056368	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.063246	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.070963	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.079621	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00
0.089337	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.000000	0.00

Information | Single Sample Data Input | Single Sample Statistics | Multiple Sample Data Input | Multiple Sample Statistics | Gravel Sand Mud Diagram | Sand Silt Clay Diagram

Figura 6. Banco de dados do Gradistat.

4.4 Difratometria de raios-x (DRX)

As análises por difração de raios-x (DRX) foram feitas através do equipamento Bruker D8 Advanced no Laboratório Multiusuário de Difração de Raios X da UFF (LDRX). Essa análise permitiu a caracterização dos principais minerais/argilominerais, além de possibilitar identificar e quantificar diferentes fases cristalinas presentes nas dezessete amostras pulverizadas. (Figura 7D).

Para o conhecimento dessas fases foi estudado o banco de dados obtido do ICDD (International Center Diffraction Data) para auxiliar nesta identificação de fases cristalinas. As amostras para essa técnica estavam homogeneizadas e na forma de pó finamente disperso, pois não pode ser granulada para essa técnica. Dessa forma, toda a cavidade do porta amostra onde foi depositada a amostra foi preenchida e rente ao plano superior do porta-amostra, não podendo estar acima nem abaixo do plano superior do mesmo (Figura 7A).

As 17 amostras analisadas por essa técnica de DRX estão todas localizadas na plataforma continental algumas na porção rasa próximo a possíveis áreas fontes, outras na plataforma média e para finalizar algumas na borda da plataforma onde predominam os carbonatos e dessa forma avaliar as conexões com as áreas fontes (Figura 1).

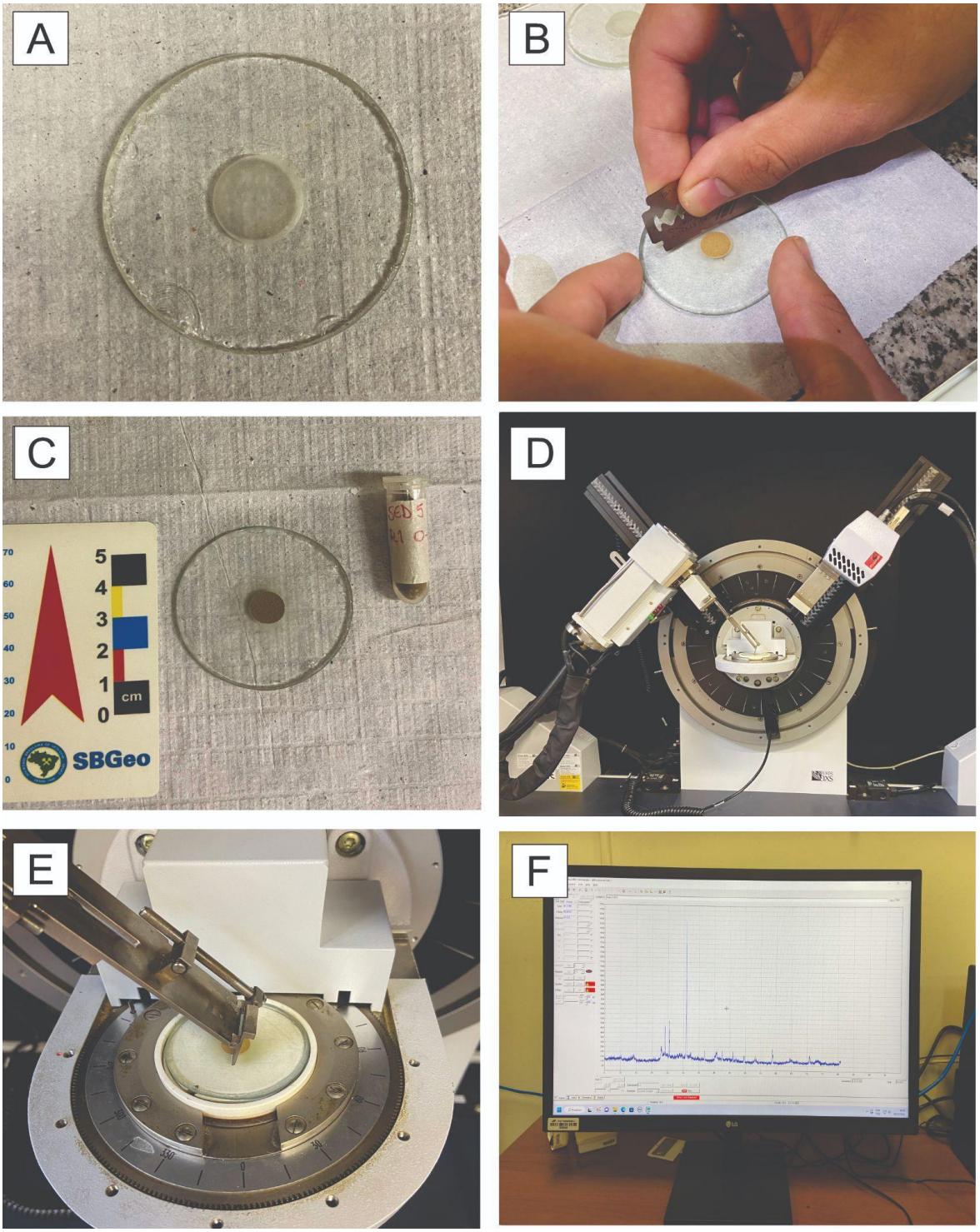


Figura 7. Processamento das amostras através da técnica de Difração de raios-x (DRX).

4.5 Fluorescência de raios-x (XRF)

A Espectroscopia de Fluorescência de Raios X (XRF) é um dos métodos mais utilizados e bem estabelecidos nos estudos da composição geoquímica de rochas, sedimentos e amostras geológicas (Kramar, 1997; Ling et al., 2017; Tosolana Delgado & McKingley, 2016; Weltje & Tjallingii, 2008; Young, Evans, Hodges, Bleacher, & Graff, 2016 apud Oyedotun, 2018). Por muitos anos, a espectrometria de XRF vem sendo utilizada na determinação de concentrações geoquímicas para uma variedade de elementos maiores e menores e elementos-traços (em nível de partes por milhão (ppm))(Oyedotun, 2018). Entre as vantagens encontradas no uso da Fluorescência de Raios-X, pode-se destacar o fato de ser uma técnica de fácil aplicação, de ser rápida e de não ser destrutiva.

O objetivo dessa técnica é determinar elementos químicos de forma qualitativa e quantitativa, medindo sua radiação característica, a partir disso então, é possível detectar a composição química presente em diferentes tipos de amostras e as concentrações de cada elemento de acordo com as intensidades lidas pelo equipamento.

O equipamento utilizado para as análises químicas de XRF foi o Epsilon 1 da Malvern Panalytical (figura X), configurado no modo Omnian, composto por um espectrômetro, um computador embutido e um software de análise integrado, fornecendo a cada leitura, os elementos presentes nas amostras e suas respectivas concentrações.

A geoquímica dos sedimentos foi analisada em 18 amostras através do espectrômetro de fluorescência de raios X (XRF), no Laboratório de Geologia Marinha (LAGEMAR). As medições foram realizadas em seções superficiais do box-core entre os intervalos de 0-2 cm. Os seguintes elementos foram determinados: K, Al, Ca, Ti, Mn, Fe, Br, Rb, Sr, Zr, Ni, Cu e Eu, sendo eles utilizados para determinar a contribuição relativa de sedimentos terrígenos, o que possibilitou uma análise espacial da influência de material continental para a plataforma continental e região adjacente.

4.6 Tratamento dos dados por meio de ARCGIS E COREL DRAW

Com o banco de dados obtidos através das tabelas na técnica de difração de raios-x **(*DRX*)** e com os dados adquiridos pela fluorescência **(XRF)**, foi possível gerar mapas por meio do Arcgis, dos elementos maiores, menores e traços, assim como fazer o tratamento das imagens e mapas no Corel Draw.

4.7 Análise dos componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*)

A análise de componentes principais-ACP ou PCA (do inglês *Principal Component Analysis*) é um método que tem por finalidade básica a análise dos dados usados visando sua redução e eliminação de sobreposições, é um dos métodos estatísticos de multivariáveis mais simples. A técnica PCA, foi utilizada com o intuito de realçar semelhanças e encontrar diferenças através da identificação de padrões dentro da área.

5 RESULTADOS

5.1 Aspectos granulométricos dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos

Os levantamentos realizados pelo projeto PCR-BS integrados com os dados públicos de diversos autores sobre os aspectos granulométricos da Bacia de Santos, permitiram a individualização de pelo menos três diferentes tipos de sedimentos: (i) arenosos; (ii) lamosos; e (iii) carbonáticos. A integração destes dados e o mapeamento da distribuição das fácies sedimentares na plataforma continental da bacia foram previamente publicados por Santos Filho *et al.* (2022), que descreveram as fácies carbonáticas, e por Figueiredo *et al.* (2023), que detalharam as fácies siliciclásticas e os teores de carbonatos. Estas duas publicações serviram de base para a elaboração de um mapa de distribuição de sedimentos na área de estudo, integrando as fácies siliciclásticas e carbonáticas (Figura 8). Devido ao espaçamento das amostras e a ausência de dados públicos, na região do talude e do Platô de São Paulo apenas a classificação granulométrica por ponto foi possível. Figueiredo Jr *et al.* (2022) dividem a bacia nos setores norte e sul, e esta será adotada para o melhor detalhamento dos resultados descritos.

No setor sul da Bacia de Santos, os sedimentos arenosos e lamosos dominam na plataforma continental e no talude (Figura 8). Os sedimentos ricos em areia (acima de 50%) ocorrem nas profundidades mais rasas, até aproximadamente a isóbada de 70m, entre o norte da foz do rio Itajaí e a Ilha de São Sebastião (Figura 8). Estes grãos ocorrem nas frações areia média a muito fina, sendo bem a moderadamente selecionados nas áreas mais costeiras e mal selecionados a maiores profundidades. Os sedimentos lamosos ocorrem com um formato alongado na plataforma, com até 100 km de largura e pelo menos 480 km de extensão, estreitando-se ao norte e ocupando a plataforma externa e a quebra da plataforma de Florianópolis a Baía de Santos (Figura 8). A maior parte das amostras do talude e do Platô de São Paulo são lamosas. As fácies carbonáticas ocorrem dispersas em pequenas áreas da plataforma continental, sendo concentradas na quebra da plataforma, a norte do cânion de Cananéia (Figura 8). Segundo Santos Filho *et al.* (2022), estes sedimentos carbonáticos são compostos de cascalhos carbonáticos, corais de águas frias, bioclastos e recifes mesofóticos.

No setor norte da bacia, os sedimentos arenosos e carbonáticos dominam na plataforma continental, sendo os carbonatos característicos da quebra da plataforma (Figura 8). As areias dominam até aproximadamente a isóbada de 100 m, ocorrendo em toda a extensão deste setor. A área com maior proporção de areia está entre a Baía de Guanabara e a Ilha de Arraial do

Cabo. Os grãos ocorrem dominantemente na fração areia média, podendo chegar a areias muito grossas, sendo moderadamente a mal selecionados. As fácies lamosas ocupam uma área menor que no setor sul (com proporção maior que 50%), sendo observadas na parte intermediária da plataforma entre 100 e 135 m, estendendo-se da Ilha de São Sebastião até a Baía de Guanabara (aproximadamente 55 km de largura e 200 km de extensão). Considerando apenas as amostras de PCR-BS, as fácies lamosas predominam no talude e no Platô de São Paulo, enquanto as areias são mais frequentes na parte norte do talude (Figura 8). Os carbonatos ocorrem em praticamente toda a quebra da plataforma do setor norte, entre as isóbadas de 100 e 200 m. As maiores extensões laterais destes sedimentos aumentam para o norte do setor, sendo dominados por cascalhos e bioclastos mesofóticos (Santos Filho *et al.*, 2022).

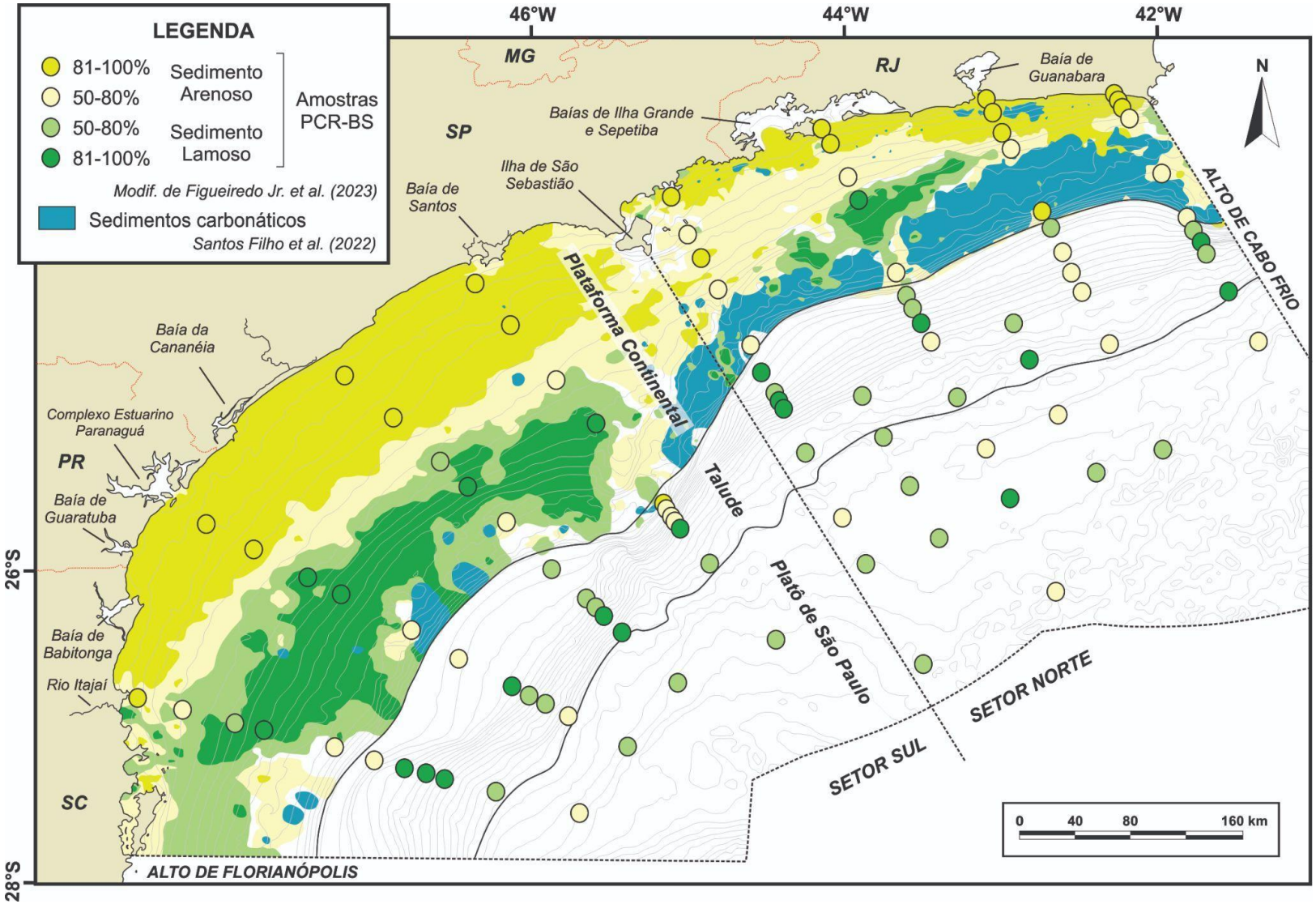


Figura 8. Mapa de distribuição dos sedimentos de fundo na Bacia de Santos (nomenclatura das estações na Figura 1).

5.2 Caracterização mineralógica

Foram analisadas 17 amostras através da técnica de difratometria de raios-x (DRX), sendo quatro amostras das áreas fontes e treze dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. (Tabela 1; Figura 9). Os minerais identificados foram: quartzo, K-feldspato, plagioclásio, muscovita, argilominerais (caulinita e clorita), aragonita, calcita, dolomita e halita. Os principais picos característicos para identificação dos minerais em difratogramas estão destacados na tabela 1.

Tabela 1. Distribuição dos minerais identificados através de difração de raios-x (DRX) nas amostras das áreas fontes e sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Qz - Quartzo; Kfs - Feldspato potássico; Pl - Plagioclásio; Mc - Muscovita; Kln - Caulinita; Chl - Clorita; Arg - Aragonita; Cal - Calcita; Dol - Dolomita; Hl - Halita.

AMOSTRA	SIMBOLOGIA	Qz	Kfs	Pl	Mc	Kln	Chl	Arg	Cal	Dol	Hl
P8KM10APU	S01 (Rio de La Plata)	X		X	X	X					
RG42014	S02 (Rio Grande)	X		X	X	X	X				X
ITAJAÍB2016	S03 (Rio Itajaí)	X		X	X	X		X	X		X
A8BSANTOS	S04 (Baía de Santos)	X		X	X	X					X
SED6A1R102	A01	X		X					X		X
SED6A2R102	A02	X		X	X				X	X	X
SED6A2R102	A02’	X		X	X				X	X	X
SED6A3R102	A03	X	X	X							X
SED6A4R102	A04	X	X	X							X
SED6B4R102	B04	X		X							X
SED6B5R102	B05	X	X	X					X		X
SED6C3R102	C03	X	X	X							X
SED6C4R102	C04	X		X		X			X		X
SED5F3R102	F03	X							X		X
SED5F3R1210	F03’	X		X				X	X		X
SED5F4R102	F04	X			X						X
SED5F5R102	F05	X						X	X		X
d (Å)		**3,34**	**3,24**	**3,18**	**10,0**	**7,00**	**14,0**	**3,86**	**3,03**	**3,00**	**2,81**

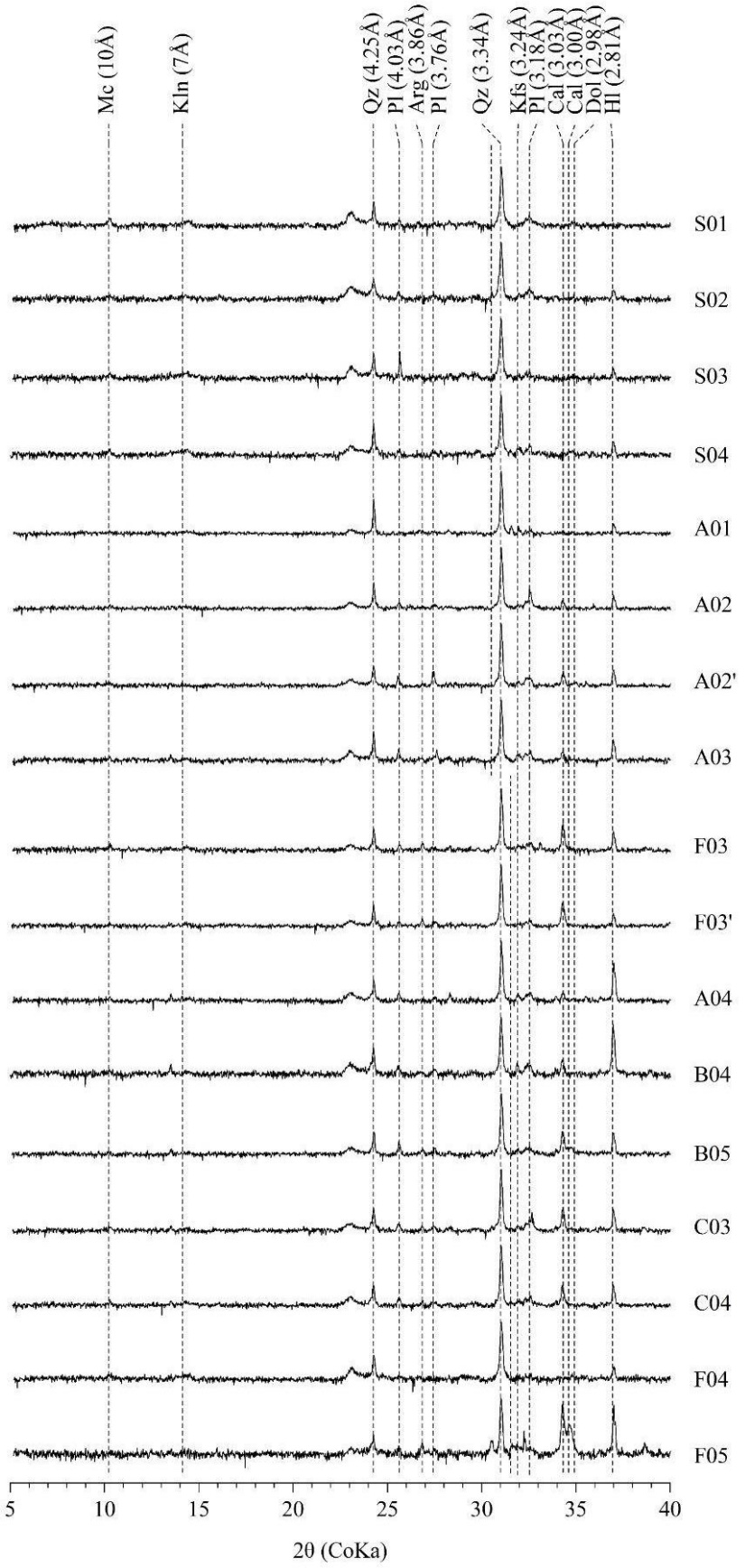


Figura 9. Difratogramas dos sedimentos arenosos, lamosos e carbonáticos da Bacia de Santos e áreas fontes.

5.2.1 Mineralogia dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos

Nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos foram caracterizados os minerais das fácies arenosas, lamosas e carbonáticas (Figura 9). Nas facies arenosas, representadas pelas amostras A01, A02, A02', A03, F03 e F03', as análises indicaram o predomínio (picos mais intensos) de quartzo, feldspatos e halita, e menor proporção de calcita e dolomita. Nestas amostras, dois minerais foram identificados localmente: (i) muscovita, na amostra A02, coletada próximo a desembocadura do rio Itajaí (setor sul); e (ii) aragonita, na amostra F03' (isóbada de 75m), próximo as baías de Ilha Grande e Sepetiba (setor norte).

Nas fácies lamosas (amostras A04, B04, B05, C03, C04, e F04) prevalecem os minerais quartzo, k-feldspato, plagioclásio e halita, com menor proporção de calcita (Figura 9). Na amostra C04, isóbada de 100m na plataforma continental do setor sul, foi identificado o argilomineral caulinita. Por outro lado, na amostra F04 foi identificada a presença de muscovita, ocorrendo unicamente com quartzo e halita.

As fácies carbonáticas estão representadas pela amostra F05, coletada na isóbada de 150 m, próximo a borda da plataforma do setor norte da bacia (Figura 9). Nesta amostra foi identificado o predomínio de calcita, quartzo e halita, com menor quantidade de aragonita.

5.2.2 Mineralogia das áreas fontes

Foram analisadas quatro amostras para a caracterização mineralógica de parte das áreas fontes da bacia, sendo selecionados: Rio de La Plata (S01); Rio Grande (S02); Rio Itajaí (S03); e Baía de Santos (S04). No Rio de La Plata foram encontrados minerais como quartzo, plagioclásio, muscovita e caulinita, enquanto no Rio Grande, além destes, foi identificada clorita e halita (Figura 9). Nos sedimentos do rio Itajaí, a mineralogia é representada principalmente por quartzo, plagioclásio, muscovita e caulinita, com menor proporção de aragonita, calcita e halita. Na Baía de Santos, os sedimentos são constituídos de quartzo, plagioclásio, muscovita, caulinita e halita (Figura 9).

5.3 Distribuição dos elementos químicos

5.3.1 Bacia de Santos

5.3.1.1 Elementos maiores (>1%)

Os elementos maiores analisados foram (Figura 10): Si, K, Al, Fe, Ca e Cl. O silício (Si) apresenta uma proporção máxima de aproximadamente 70% na área, ocorrendo de maneira contínua nas regiões mais próximas da costa (aproximadamente até a isóbata de 50m) e com valores reduzindo gradualmente para as áreas mais profundas da bacia (Figura 10A). No setor sul, as maiores proporções encontram-se nas regiões costeiras influenciadas pelo Rio Itajaí, Complexo Estuarino de Paranaguá, Baía de Cananéia, Rio Una do Prelado e Baía de Santos. Neste setor, as proporções na plataforma continental (isóbatas de 25 a 200 m) diminuem até 16%, enquanto no talude (400-1900m) e no Platô de São Paulo (>1900 m) atingem valores menores que 5% (Figura 10A). No setor norte da bacia, os maiores valores ocorrem nas regiões costeiras das baías de Sepetiba e de Guanabara, até a Ilha de Arraial do Cabo (Figura 10A). Diferentemente do setor sul, as proporções tendem a ser menores na plataforma, com valores inferiores a 16% a partir de 120 m de profundidade, chegando a 2% no Platô de São Paulo (Figura 10A). O silício é o principal constituinte dos silicatos, mas os maiores teores deste elemento tendem a ser indicadores da ocorrência de sedimentos ricos em quartzo e feldspatos, transportados como carga de fundo na bacia (Tucker, 2001).

O potássio (K) ocorre em proporções variando de 0,7 a 8%, estando concentrado principalmente na plataforma continental (Figura 10B). As maiores concentrações estão localizadas em duas áreas da bacia: no setor sul, nas proximidades do rio Itajaí e da Baía de Guaratuba; e no setor norte, em torno da Ilha de São Sebastião. No setor sul, as maiores proporções estão em torno de 6 a 8% entre as isóbadas de 25 e 100 m de profundidade, próximo à foz do rio Itajaí. Essa proporção diminui para norte da plataforma continental, com valores entre 5 e 6%, e em direção ao talude, onde atinge até 3% (Figura 10B). Esse intervalo de 5 a 6% ocorre até a região da Ilha de São Sebastião, como uma faixa contínua na plataforma. No setor norte, os teores de potássio são menores que no setor sul, com intervalos de 5 a 3% até a isóbada de 100m e valores menores predominantes para as regiões mais profundas. Aumentos locais nestes teores podem ser observados próximos as baías de Ilha Grande, Sepetiba e Guanabara (Figura 10B). De maneira geral, os valores no Platô de São Paulo são inferiores a 2%. O potássio em sedimentos é indicador da presença de K-feldspatos e minerais micáceos,

transportados das áreas continentais. O K-feldspato é transportado como carga de fundo, geralmente na fração siltosa-arenosa, enquanto os minerais micáceos, devido seu hábito placóide(filossilicatos), são transportados em suspensão e depositados juntamente com sedimentos argilosos (Pettijohn et al., 1972; Tucker, 2001).

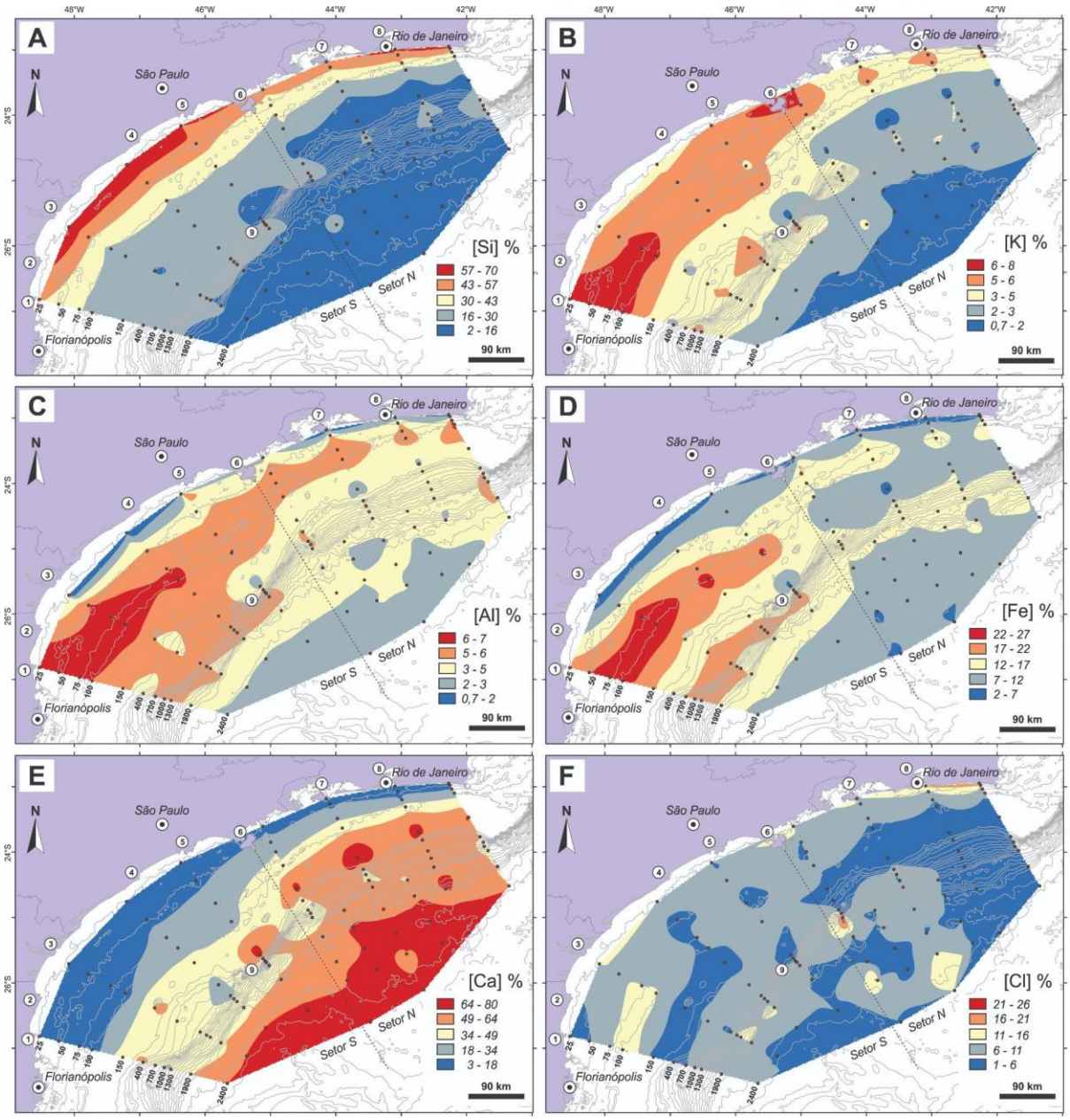


Figura 10. Mapas de concentrações dos elementos Si, K, Al, Fe, Ca e Cl nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS.

O alumínio (Al) e o ferro (Fe) apresentam distribuição bastante semelhante na bacia, com maiores proporções entre as isóbadas de 50 e 100 m no setor sul, e as menores nas áreas costeiras (ambos os setores) até a isóbada de 25 m (Figuras 10C e 10D). No setor sul, os maiores teores de Al (6 a 7%) ocorrem nas isóbadas de 25 a 100m, desde a foz do rio Itajaí até parte central da plataforma continental, e os maiores teores de Fe (22 a 27%) ocorrem entre as isóbadas de 50 e 120 m, seguindo a mesma tendência do Al, porém não tendo grandes teores próximos a foz do rio Itajaí (Figuras 10C e 10D). Os valores tendem a diminuir gradualmente em direção às áreas costeiras (na isóbada de 25m, apresenta até 0,7% de Al e 2% de Fe) e no Platô de São Paulo (2 % de Al e 7% de Fe). No talude continental deste setor, do cânion da Cananéia para o sul, ocorre um aumento nos teores médios de Al e Fe (Figuras 10C e 10D). No setor norte, as proporções de Al tendem a ser maiores entre as isóbadas 50 e 120m (5 a 6%), diminuindo para proporções de 5 a 3% na plataforma e talude, além do Platô de São Paulo, com intervalos menores que 3% (Figuras 10C e 10D). As proporções de Fe são maiores entre as isóbadas 50 e 120m e no talude (15 a 17%), diminuindo nas outras regiões deste setor (7 a 12%) (Figuras 10C e 10D). O alumínio e o ferro são indicadores de argilominerais e micas, ambos transportados como carga em suspensão e depositados com sedimentos argilosos (Tucker, 2001). Em relação às micas, a biotita é o mineral micáceo com maiores teores de ferro.

O cálcio (Ca) apresenta uma distribuição praticamente oposta aos elementos descritos anteriormente (Figura 10E): (i) possuem proporções maiores nas regiões mais profundas; e (ii) são dominantes no setor norte da bacia. No setor sul, os teores de Ca na plataforma continental até a isóbada de 100m variam de 3 a 18%, chegando a 40% na sua borda e no talude. Um valor alto anômalo para este setor ocorre a norte do cânion da Cananéia (Figura 10E). No Platô de São Paulo os teores chegam a 70%. Por outro lado, no setor norte, os valores mais baixos encontram-se até a isóbada de 50m, dominando valores mais altos no restante da plataforma, talude e platô, atingindo teores na faixa de 64 a 80% (Figura 10E). O cálcio está diretamente relacionado com a ocorrência de carbonatos, como calcita e aragonita (Tucker, 2001). A ocorrência destes minerais indica sedimentação carbonática de borda de plataforma e sedimentação pelágica no talude proveniente de carapaças de plânctons (p.e., foraminíferos e pterópodes).

O cloro (Cl) ocorre de forma irregular ao longo de toda a bacia, com teores variando de 1 a 11% (Figura 10F). No setor sul, ocorre uma área pontual no talude com valores anômalos de 21 a 26% próximo a isóbada de 1300 m, além de uma ocorrência entre as isóbadas de 75 e

120 m mais a sul do setor. No setor norte, os maiores valores estão localizados na região costeira (até a isóbada de 25m) entre a Baía de Guanabara e a Ilha de Arraial do Cabo, com teores de 16 a 21% (Figura 10F). A ocorrência de Cl é um forte indicador de minerais evaporíticos, formados pela precipitação direta de cristais de halita em águas supersaturadas (Warren, 2006). No entanto, este elemento pode ocorrer em combinação com argilominerais expansivos (Melo, 2010).

5.3.1.2 Elementos menores (1-0,1%) e traços (<1%)

Os elementos menores e traços analisados foram: Ti, Zr, Rb, Zn, Mn, Eu, Sr, S, Pb, Ni e Cu. O titânio (Ti) e o zircônio (Zr) apresentam o mesmo padrão de distribuição, estando concentrados nas porções mais rasas da plataforma continental, entre as isóbadas de 25 e 100 m (Figuras 11A e 11B). Os maiores teores estão localizados na saída das baías de Santos, Ilha Grande e Sepetiba, com valores de 4 a 5% de titânio e 4860 a 6440 ppm de zircônio. No setor sul da bacia, o titânio pode atingir teores de 1 a 2% no talude (Figura 11A e 11B). Estes elementos são característicos de minerais pesados, como rutilo, ilmenita e zircão, sendo bons indicadores de áreas proximais e sedimentação arenosa (Tucker, 2001).

As maiores proporções dos elementos rubídio (Rb), zinco (Zn), manganês (Mn) e európio (Eu) ocorrem no setor sul da bacia, se estendo das áreas próximas do rio Itajaí e da Baía de Guaratuba para o nordeste da plataforma continental, entre as isóbadas de 50 e 100 m (Figuras 11C-F). No setor sul, o rubídio e o zinco ocorrem de maneira mais contínua na plataforma, com teores máximos de 808 a 995 ppm e 641 a 784 ppm, respectivamente. Valores intermediários ocorrem no talude continental deste setor, do cânion da Cananéia para o sul, e valores mais baixos estão distribuídos no Platô de São Paulo (Figuras 11C e D). No setor norte, os teores médios de rubídio variam de 248 a 434 ppm na plataforma continental e talude, com um aumento nas proximidades da Ilha de São Sebastião e baías de Ilha Grande e Sepetiba (434 a 621 ppm), e menores que 248 ppm no Platô de São Paulo (Figura 11C). Por outro lado, o zinco possui valores baixos em todo o setor norte (355 a 69 ppm), com valores intermediários no talude (355 a 498 ppm; Figura 11D). O manganês e o európio estão concentrados no setor sul da bacia, com teores mais altos em torno de 1,7 a 2% (Mn) e 3000 a 4000 ppm (Eu), cobrindo as mesmas áreas de ocorrência do Rb e Zn (Figuras 11E e 11F). No setor norte os valores são os mais baixos para estes elementos, com exceção de um aumento de európio

próximo a Ilha de São Sebastião. O rubídio ocorre como elemento traço nas micas e feldspatos substituindo o potássio na estrutura cristalina, enquanto o manganês ocorre nas micas e argilominerais, o zinco em argilominerais e o européio nos feldspatos (Melo, 2010; Klein e Dutrow, 2012).

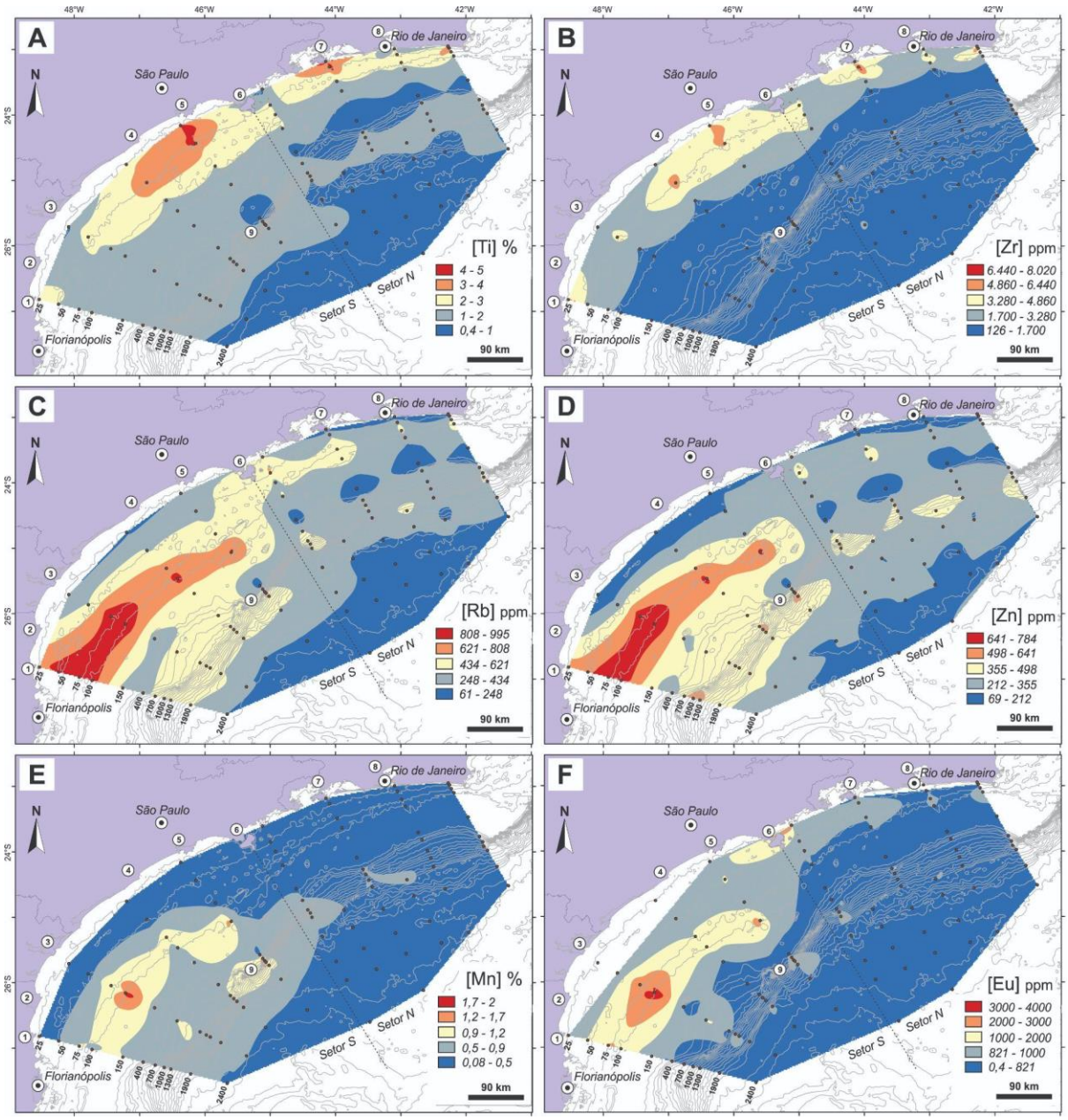


Figura 11. Mapas de concentrações dos elementos Ti, Zr, Rb, Zn, Mn e Eu nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS.

Os maiores teores de estrôncio (Sr) ocorrem nas regiões mais profundas da bacia, principalmente no setor norte (Figura 12A). Os teores dominantes neste setor estão em torno de 4000 a 6000 ppm, com valores de 6000 a 9000 ppm na borda da plataforma continental. Os maiores teores de estrôncio (> 9000 ppm) estão localizados no setor sul, a norte do cânion da Cananéia (Figura 12A). O estrôncio ocorre como traço nos carbonatos, substituindo o cálcio (Klein e Dutrow, 2012). O enxofre (S) apresenta teores entre 160 a 8000 ppm em toda a bacia, com uma ocorrência pontual no talude com valores anômalos de 3 a 4 % próximo a isóbada de 1300 m, além de uma ocorrência entre as isóbadas de 75 e 120 m mais a sul do setor (1 a 2%). O S ocorre em associação com minerais evaporíticos, além da possibilidade de ser absorvido por argilominerais (Warren, 2006).

Os elementos com menores proporções nos sedimentos analisados são chumbo (Pb), níquel (Ni) e cobre (Cu). O chumbo e o níquel ocorrem principalmente na plataforma continental (isóbadas de 25 a 120 m) e no talude (isóbadas de 400 a 1300 m) do setor sul da bacia (Figuras 12C e 12D), enquanto o cobre ocorrem em maior proporção na parte central da plataforma continental (entre as isóbadas de 50 a 120 m), no talude e no Platô de São Paulo (Figura 12E). O cobre apresenta menores teores na plataforma continental do setor norte da bacia. Estes três elementos são comuns de ocorrerem em associação com argilominerais (Melo, 2010).

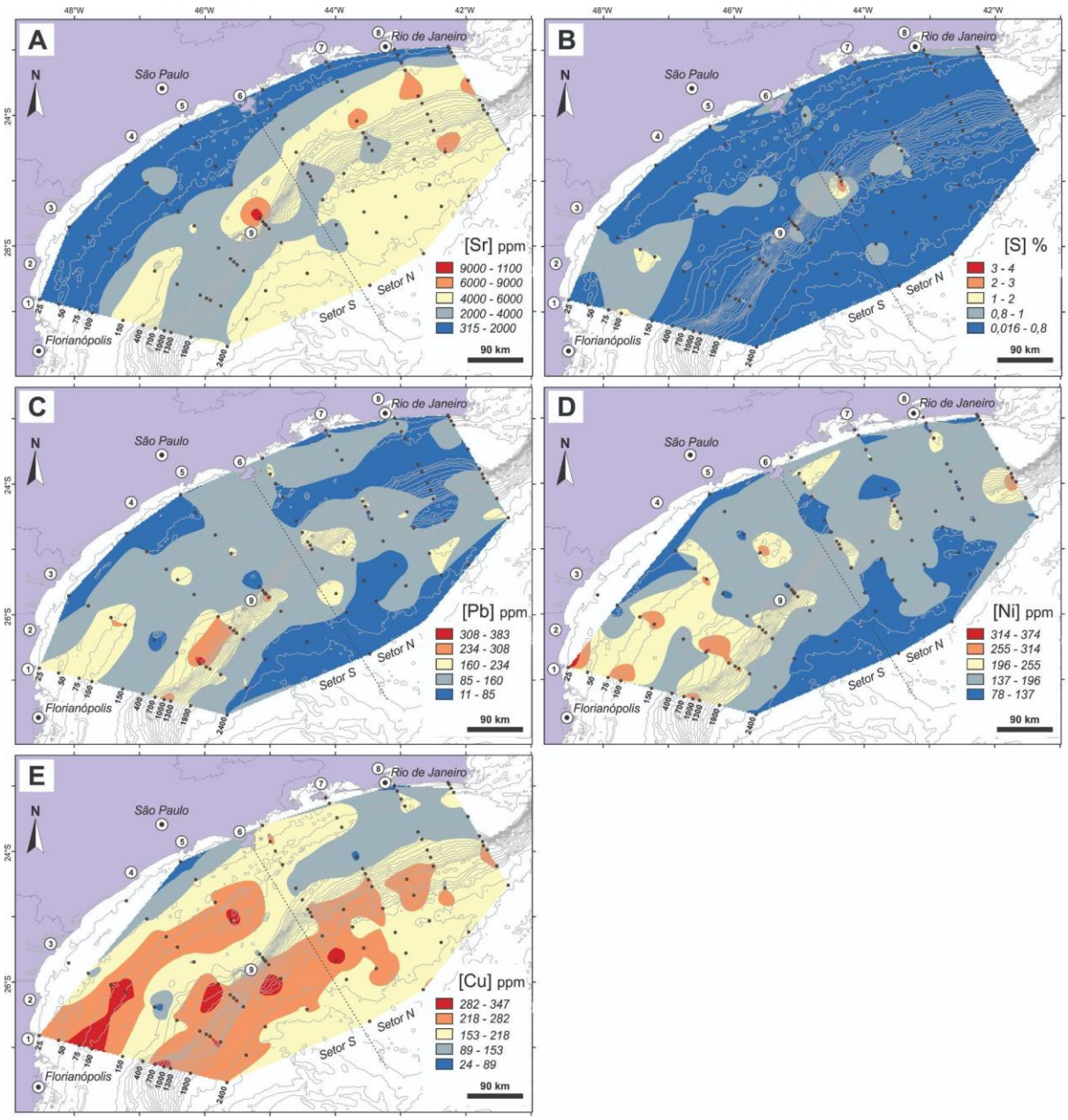


Figura12. Mapas de concentrações dos elementos Sr, S, Pb, Ni e Cu nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. Legenda: 1 - Rio Itajaí; 2 - Baía de Guaratuba; 3 - Complexo Estuarino Paranaguá; 4 - Rio Una do Prelado; 5 - Baía de Santos; 6 - Ilha de São Sebastião; 7 - Baías de Ilha Grande e Sepetiba; 8 - Baía de Guanabara; 9 - Cânion da Cananeia; Pontos pretos - Amostragem PCR-BS.

5.3.2 Áreas fontes: Rio de la Plata, Rio Grande, Rio Itajaí e Baía de Santos

Para a caracterização dos elementos químicos presentes nos sedimentos das áreas fontes, foram analisados (Tabelas 2 e 3): Si, Al, K, Fe, Ca, Cl, Ti, S, Zr, Rb, Mn, Sr, Eu, Zn, Pb, Ni e Cu. O silício (Si) é o elemento mais abundante nas quatro áreas estudadas, com proporção média de 22,94%. A foz de Rio Grande possui a maior concentração deste elemento, com valor de 24,87%, além de apresentar valores consideráveis de ferro (11,07%), cálcio (1,69%), zircônio (762,9 ppm), estrôncio (475,8 ppm) e níquel (254,4 ppm). Por outro lado, possui os menores teores de potássio (2,06%), rubídio (181,0 ppm), zinco (396,5 ppm) e cobre (135,6 ppm). Os sedimentos da Baía de Santos apresentam altos valores de silício (24,35%), potássio (2,41%), cálcio (1,93%), cloro (2,57%), zircônio (858,7 ppm), rubídio (291,5 ppm), manganês (3373,9 ppm), európio (733,8 ppm) e zinco (681,5 ppm), enquanto as proporções de ferro (9,99%), titânio (1,19%) e estrôncio (383,1 ppm) são as menores. Os elevados teores de Si nestas duas áreas fontes, indicam uma mineralogia mais quartzo-feldspática. No entanto, os valores mais elevados de Fe, K, Rb, Zn e Zr na Baía de Santos sugerem maior contribuição de feldspatos, micas e minerais pesados.

Os principais elementos que ocorrem no Rio de la Plata são: silício (22,81%), alumínio (3,49%), potássio (2,686%), ferro (14,37%), titânio (1,37%), rubídio (291,9 ppm), manganês (5278,7 ppm), európio (811,4 ppm), zinco (516,2 ppm), chumbo (191,2 ppm) e cobre (253,6 ppm). As proporções de cálcio (0,97%), cloro (0,90%), enxofre (0%) e zircônio (683,2 ppm) são as menores fontes analisadas. Os altos teores de Al, K, Fe e Mn sugerem uma grande proporção de minerais micáceos nos sedimentos amostrados, bem como uma maior afinidade com sedimentação argilosa, corroborada pelos baixos valores de Zr (indicador de sedimentação arenosa). Além disso, as proporções reduzidas de Ca, Sr, Cl e S indicam uma maior sedimentação continental nestas áreas e menor ocorrência de minerais carbonáticos e evaporíticos marinhos.

Os sedimentos do Rio Itajaí são os que apresentam menor valor de silício (19,7%), porém destacam-se nos teores de alumínio (3,59%) e ferro (16,51%). Estes sedimentos possuem valores intermediários de potássio (2,29%), cloro (2,02%), titânio (1,39%), rubídio (211,3 ppm) e estrôncio (449,0 ppm), além de baixas proporções de cálcio (1,01%) e zircônio (676,2 ppm). A combinação destes elementos indica forte contribuição de argilominerais enriquecidos em micas, com baixa sedimentação arenosa.

Tabela 2. Proporções de elementos químicos maiores e menores (%) por XRF nas áreas fontes selecionadas neste estudo.

Áreas Fontes	Si	Al	K	Fe	Ca	Cl	Ti	S
S01 - Rio de la Plata	22,813	3,496	2,686	14,366	0,973	0,899	1,368	0,000
S02 - Rio Grande	24,874	3,160	2,067	11,075	1,688	1,996	1,297	0,608
S03 - Rio Itajaí	19,698	3,592	2,290	16,509	1,009	2,023	1,387	0,664
S04 - Baía de Santos	24,358	3,348	2,406	9,981	1,928	2,573	1,189	0,600

Tabela 3. Proporções de elementos químicos menores e traços (ppm) por XRF nas áreas fontes selecionadas neste estudo.

Áreas Fontes	Zr	Rb	Mn	Sr	Eu	Zn	Pb	Ni	Cu
S01 - Rio de la Plata	683,2	291,9	5278,7	389,3	811,4	516,2	191,2	140,0	253,6
S02 - Rio Grande	762,9	181,0	1783,4	475,8	449,0	396,5	109,7	254,4	135,6
S03 - Rio Itajaí	676,2	211,3	1103,8	449,0	378,0	429,1	84,1	94,8	182,0
S04 - Baía de Santos	858,7	291,5	3373,9	383,1	733,8	681,5	133,9	304,7	229,8

5.4 Análise dos componentes principais (PCA - *Principal Component Analysis*)

Os resultados das análises PCA das composições geoquímicas semi-quantitativas nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos e áreas fontes indicaram a separação de diferentes grupos de elementos químicos de acordo com a granulometria, profundidade e setor da bacia (Figuras 13, 14 e 15). Para as amostras da Bacia de Santos, foram analisados os elementos Al, Si, K, Ca, Ti, Fe, S, Cl, Sr, Zr e Rb, relacionando-os com a granulometria e profundidade. Por outro lado, para as áreas fontes foram carregados Si, Al, K, Fe, Ca, Cl, Ti, S, Zr, Rb, Mn, Sr, Eu, Zn, Pb, Ni e Cu, relacionando-os com as diferentes áreas estudadas. Devido ao grande número de amostras dos sedimentos de fundo da bacia, optou-se por reduzir o número de elementos analisados para uma melhor precisão geoestatística. As análises PCA foram realizadas em quatro diferentes carregamentos: (i) SS - Setor sul da Bacia de Santos; (ii) SN - Setor norte da Bacia de Santos; (iii) BS - Aspecto geral da Bacia de Santos; e (iv) AF - Áreas fontes.

A análise dos componentes principais do setor sul da bacia permitiu a diferenciação dos elementos em três grupos, denominados de SS1, SS2 e SS3 (Figura 13). O primeiro grupo (SS1) é representado pelos elementos Si, Zr, e Ti, sendo dominado pelas amostras coletadas nas profundidades 25 e 50m, e secundariamente pelas de 75 m (Figura 13A). Este grupo é o que possui maior afinidade com as fácies arenosas (Figura 13A). O grupo SS2 é representado por K, S, Cl, Al, Fe e Rb, e pelas amostras coletadas nas isóbadas 75, 100, 400 e 700m (Figura 13A). Esta região do gráfico é representada pelos elementos com afinidade com sedimentos lamosos (Figura 13A). O terceiro grupo, denominado de SS3, é formado pelos elementos Ca e Sr, e amostras das isóbadas de 700 a 2400 m, indicando os sedimentos dominados por sedimentação carbonática e as maiores profundidades (Figuras 13A e 14A). Vale destacar que as amostras coletadas próximo a isóbada de 150 m não estão inseridas em nenhum destes grupos e ocorrem em uma área do gráfico de transição dos grupos SS1 e SS3 (Figura 13A).

O gráfico de PCA do setor norte da bacia permitiu a individualização de três grupos distintos de elementos químicos (Figuras 13B e 14B): (i) SN1, representado pelos elementos Si, Zr, Ti, Cl e S, característicos dos sedimentos arenosos; (ii) SN2, formado por K, Al, Fe e Rb, e apresentando maior correspondência com o sedimento lamoso; e (iii) SN3, constituído pelos elementos Ca e Sr, relacionados às maiores profundidades e aos sedimentos carbonáticos. Vale destacar que o titânio fica na zona de transição entre as fácies arenosas e lamosas, além do grupo SN3 possuir uma certa proximidade com as fácies lamosas (Figura 13B). Em relação às profundidades das amostras coletadas, o grupo SN1 é representado principalmente pelas

amostras das isóbadas 25 e 50 m, e subordinadamente de 75, 100, 400 e 700 m (Figura 13B). Por outro lado, o grupo SN2 é representado pelas profundidades 75, 100 400, 700 e 1000m, e o grupo SN3 pelo intervalo de 75 a mais de 2400 m, incluindo as amostras de 150 m (Figura 13B).

A análise PCA integrada da Bacia de Santos também permitiu a individualização de três grupos distintos, seguindo os padrões observados para os setores norte e sul (Figuras 13C e 14C). Nesta terceira classificação, os sedimentos arenosos (grupo BS1) estão representados pelos elementos Si, Zr, Ti e Cl, nas amostras das profundidades 25, 50 e 75 m. O segundo grupo, denominado de BS2, corresponde aos sedimentos lamosos e os elementos K, Rb, Al e Fe, em amostras das profundidades de 75 a 1300 m (com exceção de 150 m), e o grupo BS3, pelos sedimentos de maiores profundidades (carbonáticos), variando de 75 a mais de 2400 m.

Os resultados das análises PCA para as áreas fontes permitiram a individualização de três grupos de elementos químicos (Figura 15): (i) AF1, representado pelos elementos Si, Zr e Ni, representativos das fácies arenosas; (ii) AF2, correspondente aos elementos Ti, Fe, Al, K, Cu, Pb, Mn, Rb, Eu e Zn, relacionados às fácies argilosas; e (iii) AF3, pelos elementos Ca, Cl, S e Sr, correspondentes as fácies mais carbonáticas. As quatro amostras analisadas plotaram em porções diferentes do gráfico. A amostra do Rio de La Plata (S01) possui maior proximidade com o grupo AF2, tendo maior afinidade com os elementos Fe, Al e K, enquanto a amostra de Rio Grande (S02) possui maior afinidade com o grupo AF3, destacando-se os elementos Sr, S e Cl (Figura 15). A amostra do Rio Itajaí (S03) está na transição entre os grupos AF2 e AF3, relacionada a Sr, Ti e Fe, e a amostra da Baía de Santos (S04) entre AF1 e AF2, com maior proximidade aos elementos Zr, Si, Zn e Eu (Figura 15).

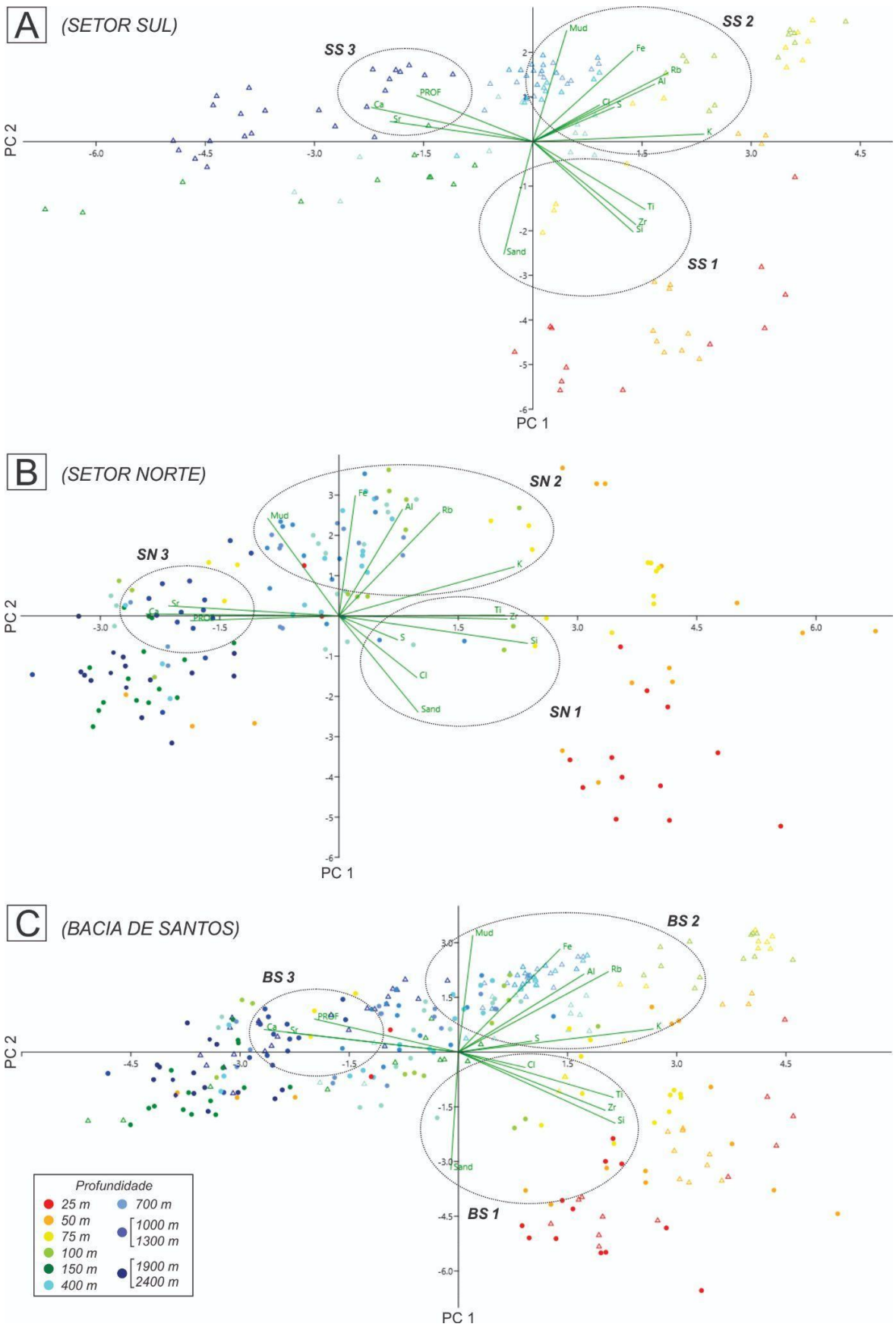


Figura 13. Resultado da análise dos componentes principais em coordenadas 2D dos sedimentos de fundo da Bacia de Santos. A) Gráfico do setor sul; B) Gráfico do setor norte; C) Gráfico geral da bacia.

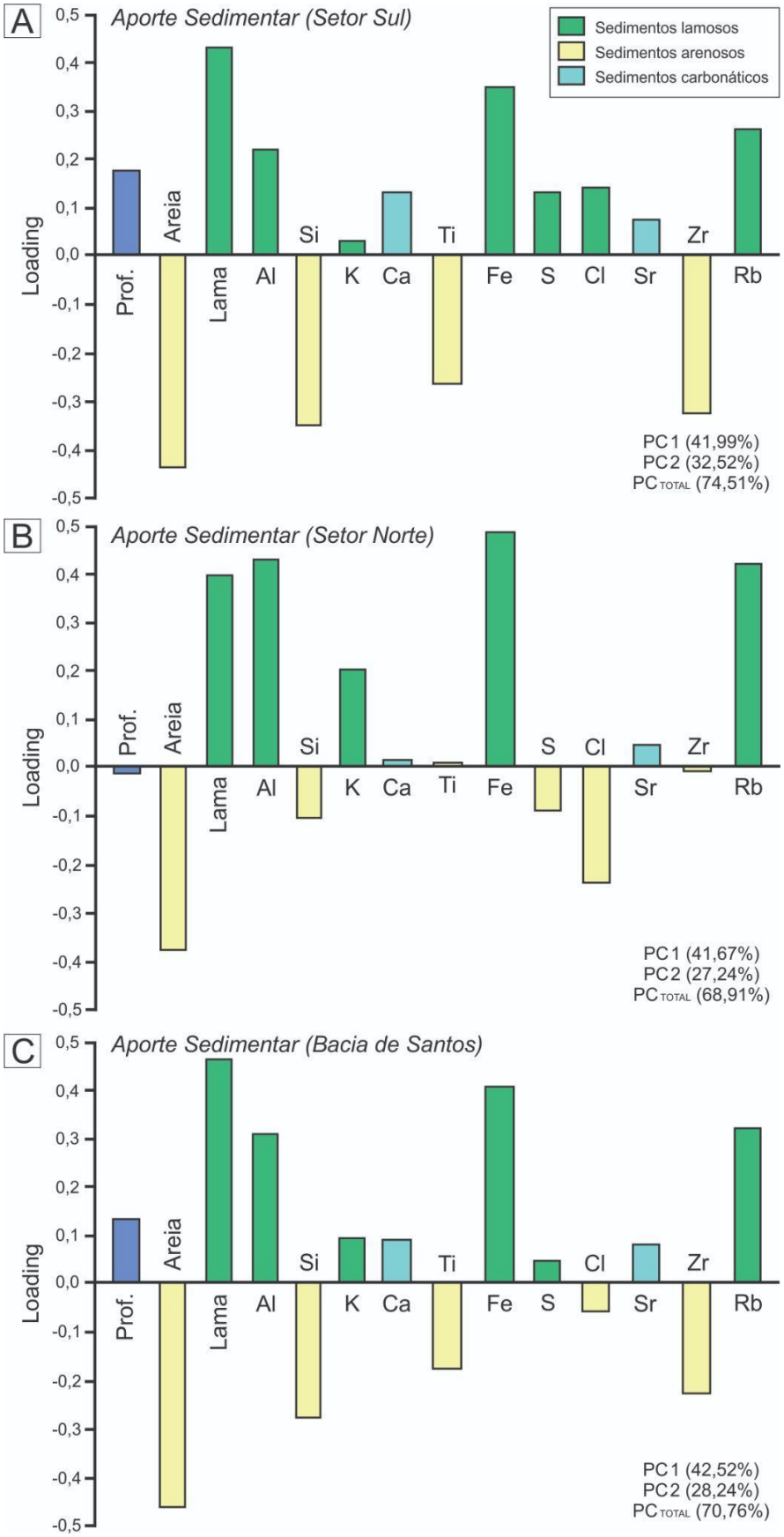


Figura 14. Gráficos de carregamento de elementos PC1 (Componente 1) e PC2 (Componente 2). A) Gráfico do setor sul; B) Gráfico do setor norte; C) Gráfico geral da bacia.

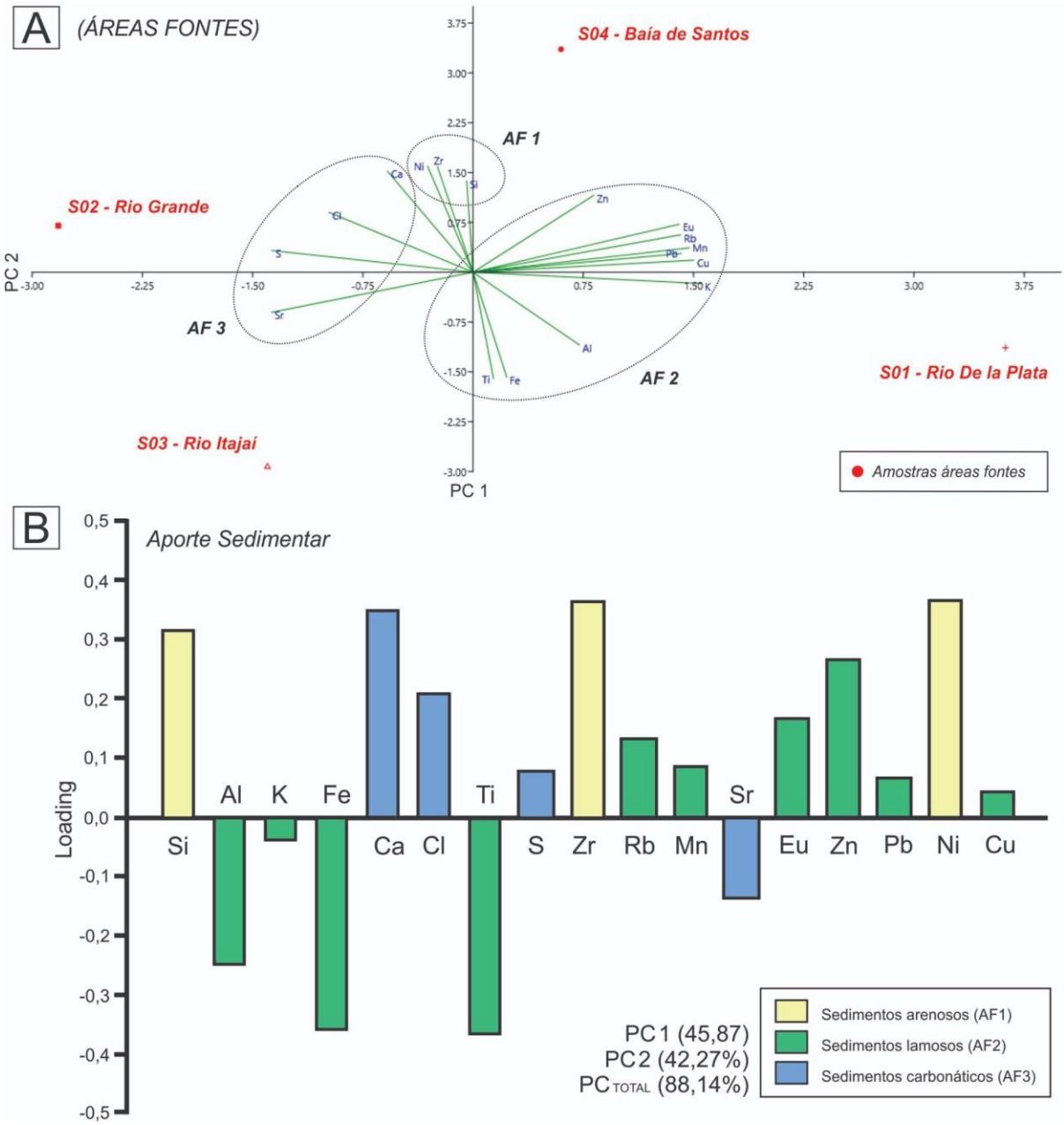


Figura 15. Análise dos componentes principais dos sedimentos das áreas fontes selecionadas neste estudo. A) Coordenadas 2D; B) Carregamento de elementos PC1 (Componente 1) e PC2 (Componente 2).

6 DISCUSSÃO

A Bacia de Santos ocupa uma área de aproximadamente 350.000 km² do sudeste brasileiro, sob lâmina d'água de até 3.000 m (Mio *et al.*, 2005). A sedimentação recente da bacia é bastante heterogênea, sendo dominada por siliciclásticos arenosos nas porções mais rasas da plataforma continental, e sedimentos lamosos e carbonáticos na plataforma interna e externa, talude e Platô de São Paulo (Kowsmann e Costa, 1979; Santos Filho *et al.*, 2022; Figueiredo Jr *et al.*, 2023). Os sedimentos arenosos ocorrem em toda a plataforma interna, dominando até 70 m de profundidade no setor sul e 100 m no setor norte (Figueiredo Jr *et al.*, 2023). Os sedimentos lamosos estão concentrados em duas áreas principais da plataforma continental (Carreira et al., 2023; Figueiredo Jr *at al.*, 2023): (i) no setor sul, ocupando uma ampla área da porção externa e quebra da plataforma, com regiões enriquecidas em matéria orgânica; e (ii) no setor norte, em menores proporções, na região intermediária da plataforma entre depósitos arenosos e carbonáticos. Os carbonatos ocorrem preferencialmente na quebra da plataforma, sendo mais abundantes no setor norte da bacia, representados por sedimentação pelágica, bioclastos e bioconstruções irregulares (Santos Filho *et al.*, 2022; Figueiredo Jr *et al.*, 2023). Os dados mineralógicos e as análises químicas semi-quantitativas adotadas neste trabalho permitiram uma boa caracterização destas diferentes fácies nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos, bem como fazer inferências sobre a dinâmica sedimentar na área estudada.

No setor sul da Bacia de Santos, os sedimentos arenosos que ocorrem nas porções mais rasas da plataforma são marcados por teores altos de Si, K, Ti e Zr, que indicam uma assembleia mineralógica de quartzo, feldspatos, micas e minerais pesados (p.e., rutilo, ilmenita e zircão). No entanto, a análise PCA indica uma maior afinidade do K com as fácies lamosas (Grupo SS2; Figura 13A). As areias mais quartzosas ocorrem do rio Una do Prelado até a Ilha de São Sebastião, das isóbadas mais rasas até 40 m, se tornando arcoseanas a partir desta profundidade até 80 m (Figura 10A). As maiores proporções de sedimentos ricos em K estão próximos ao rio Itajaí, enquanto os maiores teores de Zr e Ti (minerais pesados) estão na foz da Baía de Santos, sugerindo forte relação destas fontes a esses elementos. Os sedimentos lamosos apresentam concentrações altas de K, Al, Fe, Rb e Zn, indicando a presença principalmente de micas e argilominerais, além de K-feldspato. As maiores concentrações destes elementos estão no sul deste setor, entre as isóbadas de 25 e 100 m, com as proporções diminuindo gradativamente para norte/nordeste da plataforma (Figuras 10 e 11). As lamas ricas em K e Al apresentam maiores teores desde a amostra mais próxima do rio Itajaí (isóbada de 25 m),

enquanto Fe, Rb e Zn possuem maiores teores no intervalo 50 - 100 m, estendendo-se para região sul da bacia (provavelmente seguindo para Bacia de Pelotas). Teores intermediários destes elementos estão distribuídos no talude e início do Platô de São Paulo, do limite sul da bacia até o cânion da Cananéia. Outros elementos como Mn, Eu, Pb, Ni e Cu também são característicos destes sedimentos mais finos. Os sedimentos carbonáticos são bem marcados pelos altos teores de Ca e Sr, indicando abundante presença de calcita e aragonita ao longo da quebra da plataforma, estando mais concentrados a norte do cânion da Cananéia e no Platô de São Paulo (Figuras 10E e 12A).

No setor norte da bacia, os sedimentos arenosos também ocorrem nas regiões rasas da plataforma, porém apenas com teores mais altos de Si (quartzo), e localmente K, Ti e Zr (feldspatos, micas e minerais pesados). As análises de PCA também indicaram uma relação destes sedimentos com o Cl e S, devido às maiores proporções encontradas entre a Baía de Guanabara e a Ilha de Arraial do Cabo (Grupo SN1; Figura 13B). As areias mais feldspáticas ocorrem no entorno da Ilha de São Sebastião e entre as isóbatas de 50 e 70 m, enquanto as mais enriquecidas em minerais pesados próximos às baías de Ilha Grande e Sepetiba, e de Arraial do Cabo. Os sedimentos lamosos deste setor apresentam concentrações altas de K e Al, intermediárias de Fe e Rb, e baixas de Zn (Figuras 10, 11 e 12). Estas concentrações fazem parte do mesmo '*trend*' observado no setor sul, mostrando uma conexão entre os estes padrões, que se repetem nas análises PCA (Figura 13B). No talude ocorrem concentrações significativas de Al e Fe, enquanto no platô de São Paulo apenas o Al (Figura 10). Os sedimentos carbonáticos estão amplamente distribuídos na quebra da plataforma e nas maiores profundidades do Platô de São Paulo, sendo representados pelos altos teores de Ca e Sr (aragonita e calcita).

Com base nos padrões de distribuição dos elementos químicos e mineralogia, foi possível estabelecer algumas relações entre os sedimentos de fundo da bacia e suas áreas fontes:

(1) Os sedimentos arenosos são fornecidos por áreas fontes locais, desde o rio Itajaí no setor sul, até a região da Baía de Guanabara no setor norte (Figuras 16, 17 e 18). Estas áreas fontes contribuem com sedimentos quartzo-feldspáticos ricos em minerais micáceos, característicos dos terrenos cristalinos pré-Cambrianos do Sistema Orogênico Mantiqueira, incluindo gnaisses, anfibolitos, quartzitos, mármores, xistos, granitoides e diabásios (Hasui, 2012). Os sistemas de drenagens do setor sul ocupam áreas bem maiores que as do setor norte (Figura 17), sugerindo maior contribuição de siliclásticos e corroborando com a distribuição granulométrica e de elementos químicos. Sedimentos mais ricos em minerais pesados estão

relacionadas à Baía de Santos e às baías de Ilha Grande e Sepetiba. Estes sedimentos são retrabalhados nas áreas costeiras em resposta das correntes costeiras, marés e ondas (Figueiredo et al., 2023);

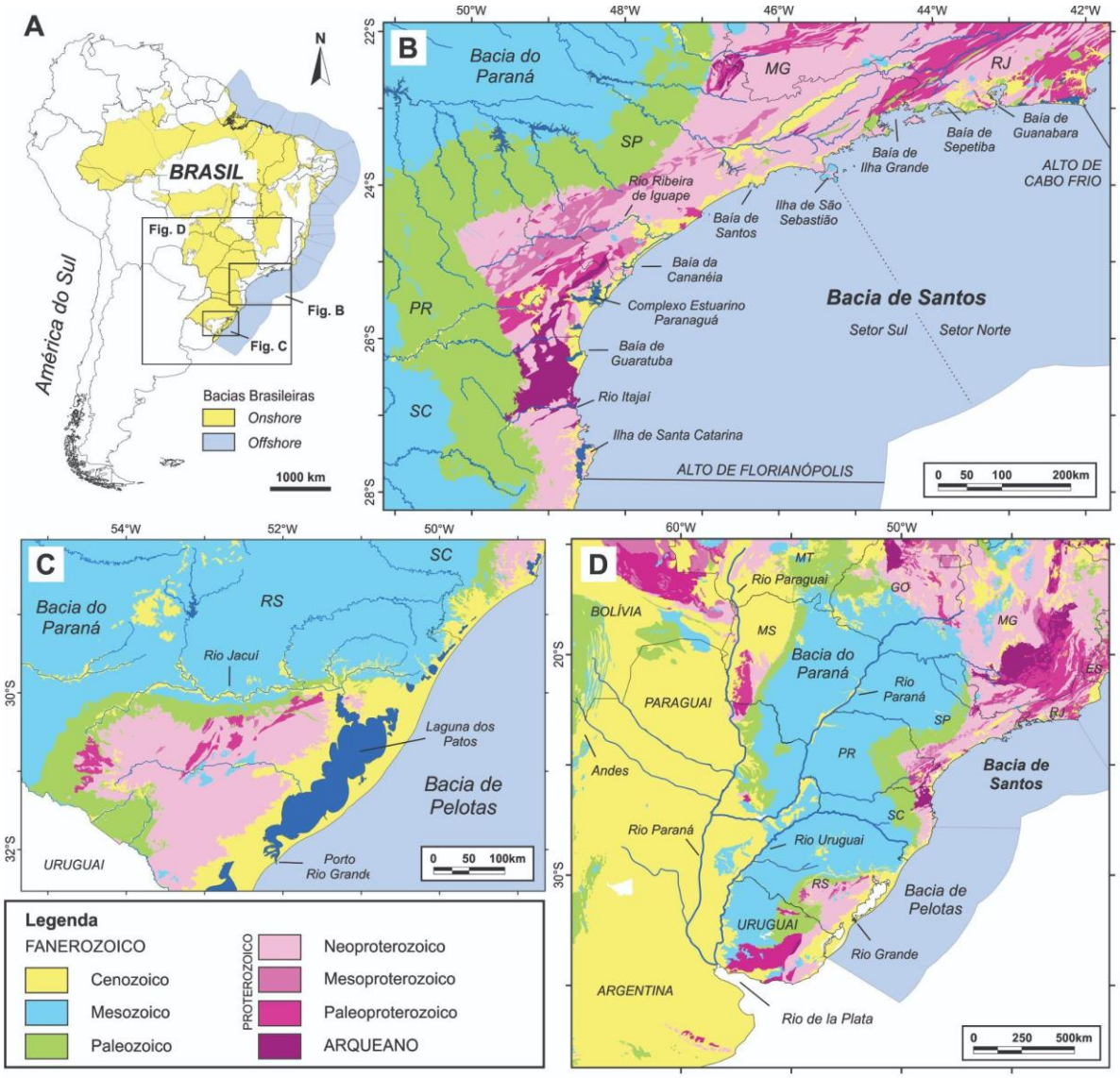


Figura 16. Mapas geológicos simplificados com as idades dos principais grupos de rochas associados às drenagens da área de estudo (Modificado de CPRM, 2022). A) Localização das bacias sedimentares brasileiras. B) Principais drenagens e geologia das áreas fontes relacionadas à Bacia de Santos. C) Geologia e drenagens que desaguam nas Laguna dos Patos e alimentam o canal do porto de Rio Grande. D) Extensão da bacia de drenagem do Rio de la Plata.

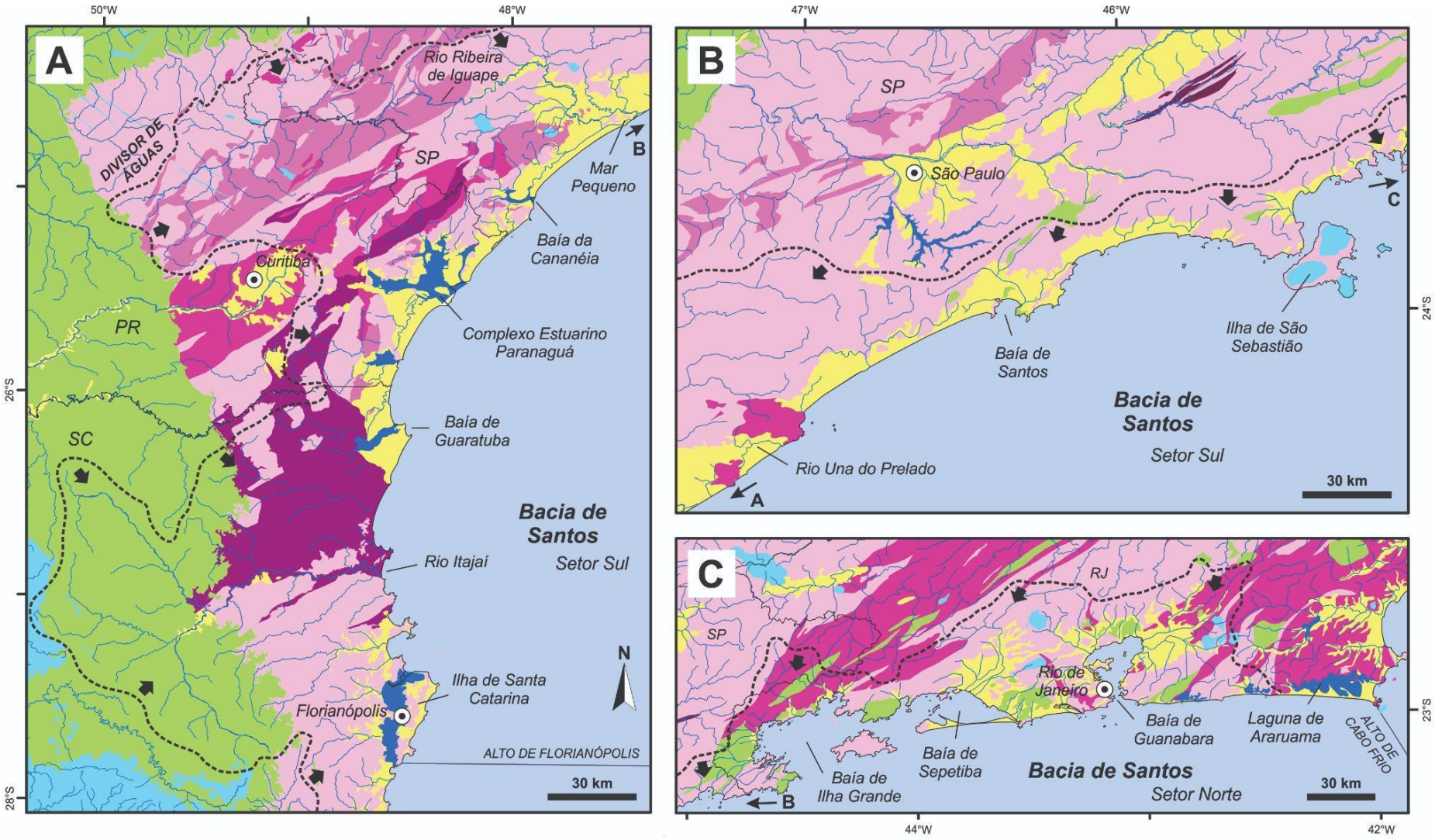


Figura 17. Mapas geológicos simplificados detalhando os sistemas de drenagem que desaguam na Bacia de Santos (Modificado de CPRM, 2022). A) Porção oeste do setor sul da bacia, região em que está localizado o Rio Itajaí; B) Porção norte do setor da bacia, região de ocorrência da Baía de Santos. C) Setor norte da Bacia de Santos.

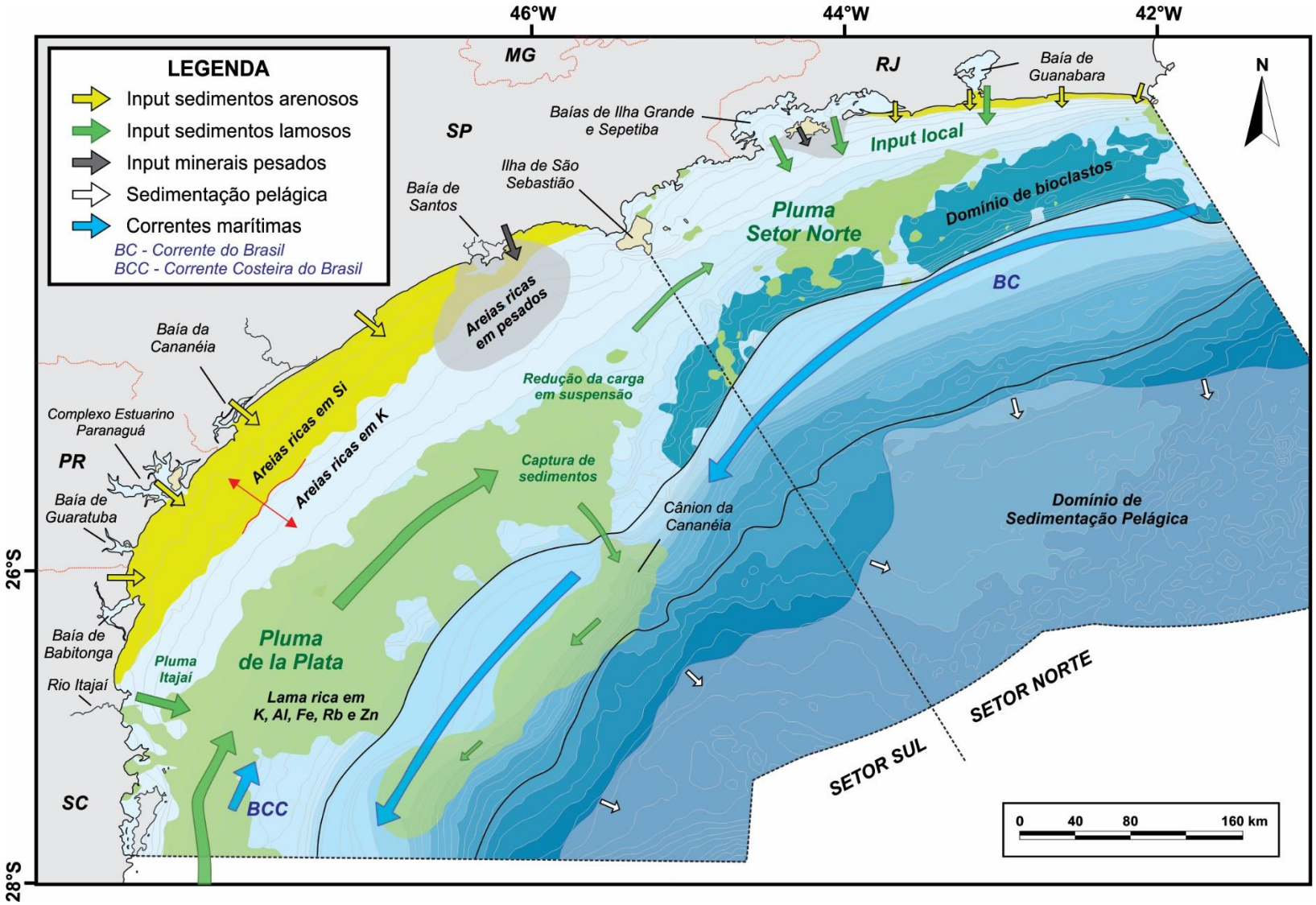


Figura 18. Mapa integrado da distribuição granulométrica e de elementos químicos nos sedimentos de fundo da Bacia de Santos, incluindo as contribuições das áreas fontes.

(2) Os sedimentos lamosos são fornecidos por fontes locais e externas da Bacia de Santos (Mahiques *et al.*, 2010; Dottori *et al.*, 2022; Figueiredo Jr *et al.*, 2023). A grande pluma de sedimentos finos localizada no setor sul da bacia, são considerados como acumulação de sedimentos trazidos pela pluma do Rio de la Plata pela Corrente Costeira do Brasil (*Brazilian Coastal Currrent - BCC*), que distribui os sedimentos do sul da plataforma continental até as proximidades do cânion da Cananéia (Mahiques *et al.*, 2010). Na região do cânion, estes sedimentos são capturados e distribuídos na porção superior do talude (Figueiredo Jr *et al.*, 2023). A distribuição dos elementos químicos corrobora com estas interpretações, indicando as mesmas tendências para os elementos K, Al, Fe, Rb e Zn, tanto na plataforma continental quanto no talude (Figura 18). Os dados também indicam a grande contribuição do Rio Itajaí, que fornece sedimentos lamosos ricos em K e Al. Estas grandes quantidades de sedimentos lamosos podem ser explicadas pelas grandes dimensões das bacias de drenagem dos rios de La Plata (3,1 milhões de km²) e Itajaí (15.111 km²), além de escavarem rochas sedimentares ricas em siliciclásticos (Figuras 16 e 17). No talude superior, a distribuição dos elementos sugere uma distribuição do cânion da Cananéia em direção ao sul, talvez relacionado a distribuição dos sedimentos capturados pelo cânion e transportados pela Corrente do Brasil (*Brazilian Current - BC*), que segue para sudoeste (Figura 18). Por outro lado, a origem da pluma lamosa do setor norte, de menor expressão areal, é interpretada como acumulação relacionada apenas pelos *inputs* locais das baías de Ilha Grande, Sepetiba e Guanabara (Gyllencreutz *et al.*, 2010; Lazzari *et al.*, 2019). Os dados geoquímicos não indicaram uma separação entre estas duas áreas, apenas uma redução dos teores no sentido da BCC (Figura 18). Isso permite inferir que parte dos sedimentos da Pluma de La Plata seguem para o setor norte e são somados com os *inputs* locais;

(3) Os sedimentos carbonáticos são produtos biogênicos e biogeoquímicos locais da bacia, particularmente na quebra da plataforma (Santos Filho *et al.*, 2022; Figueiredo Jr *et al.*, 2023). Estás fácies são representadas na plataforma por bioclastos derivados de algas calcárias ricos e carapaças de moluscos, além de bioconstruções, dispostos entre o canion de Cananéia e a Arraial do Cabo (Santos Filho *et al.*, 2022). A menor proporção de fácies lamosas no setor norte da bacia provavelmente é responsável pela maior ocorrência de carbonatos na plataforma externa deste setor (Santos Filho *et al.*, 2022). Os dados geoquímicos indicam bem este aumento dos teores de carbonatos para as porções mais profundas da bacia, evidenciando o predomínio de sedimentação carbonática no Platô de São Paulo, principalmente a partir da isóbada de 2400 m (Figura 18). Figueiredo Jr et al. (2023) sugerem origem pelágica para esta

região, formados pela sedimentação de extensas vasas de foraminíferos e pterópodes no fundo oceânico.

Para a verificação e confirmação da influência de algumas áreas fontes na sedimentação da bacia, principalmente para a contribuição de sedimentos lamosos, foram analisadas quatro áreas específicas: (i) Rio de La Plata; (ii) Foz de Rio Grande; (iii) Rio Itajaí; e (iv) Baía de Santos. Destas fontes, o Rio de la Plata e a foz de Rio Grande estão localizadas fora da bacia e podem ser consideradas como influenciadoras nas plumas lamosas que ocorrem na Bacia de Santos (Mahiques *et al.*, 2010; Dottori *et al.*, 2022; Figueiredo Jr *et al.*, 2022).

As análises dos elementos químicos e PCA indicaram que a Baía de Santos e a foz de Rio Grande são as áreas de maior afinidade com sedimentação arenosa (Figura 15). Estas análises indicaram que a Baía de Santos está perfeitamente correlacionada com teores elevados de Si e Zr. Os rios que drenam as escarpas da Serra do Mar (Sistema Orogênico Mantiqueira; Figuras 16 e 17) são responsáveis pelo aporte de sedimentos na Baía de Santos (CPEA, 2011). No entanto, apesar de existir uma forte influência do regime de marés dentro da baía, esta apresenta um padrão de correntes com baixa competência para transportar os sedimentos ao longo dos canais estuarinos, sendo dominante o processo de deposição local devido à baixa intensidade das correntes (Ponçano 1976, 1985; Coelho, 2011).

Os dados geoestatísticos da foz de Rio Grande mostraram uma maior afinidade com os elementos Sr, S, Cl e Ca, geralmente correlacionados as fácies carbonáticas apresentadas nos resultados, além de uma correlação com as fácies arenosas (Figura 15). A foz do canal do Rio Grande faz parte do Complexo Lagunar Patos-Mirim, no sul do Brasil (Figura 16C). Os sedimentos são transportados pelo sistema de drenagem Guaíba (rios Jacuí, Taquari, Caí, Sinos e Gravataí) para a Lagoa dos Patos, sendo os sedimentos mais finos concentrados na região norte (fluvial) e sul (estuarina) da laguna, e mais arenosos nas margens (Toldo, 1991; Martins et al., 1989). A diminuição de sedimentos em suspensão na laguna são indicadores de menor influxo fluvial e aumento da salinidade (Hartmann *et al.*, 1986). Os dados apresentados nos resultados não indicam que a sedimentação de Rio Grande influencia diretamente na Pluma do de la Plata, apenas que esta fonte, dentre as estudadas, é a mais influenciada por mudanças de salinidades com indicações de Sr, S, Cl e Ca.

Os dados de PCA sugerem maior correção dos rios Itajaí e de la Plata com a sedimentação lamosas, sendo o Rio Itajaí correlacionado com os elementos Ti, Fe e Sr, e o Rio de la Plata com Fe, Al e K (Figura 15). O Rio Itajaí (ou Itajaí-Açú) é estreito, com aproximadamente 200 m de largura, tem comprimento de ~70 km e profundidade de ~8 m, sendo sua morfologia o resultado do ajuste hidráulico do regime fluvial e sua foz classificada

como uma frente deltaica, segundo o modelo de classificação de Fairbridge (1980; Schettini, 2002). A vazão do rio Itajaí é de aproximadamente 228 m³/s, com valores mínimos de 17 m³/s e máximos de 5390 m³/s, sendo 70% do aporte dominado por contribuição fluvial e alta proporção de sedimentos argilosos em suspensão (Schettini, 2002; Pereira *et al.*, 2006). A entrada de água do mar em direção a montante do rio se dá pelo fundo da lâmina d'água em função de sua maior densidade, enquanto os sedimentos lamosos de menor densidade são transportados em suspensão diretamente para o mar (Schettini, 2002; Pereira *et al.*, 2006). Este conjunto de processos favorece o transporte dos sedimentos finos para as maiores profundidades do setor sul da Bacia de Santos, contribuindo com carga sedimentar fina (rica em Fe e Al) para a Pluma do de La Plata.

A bacia hidrográfica do Rio de la Plata é considerada uma das maiores do planeta, cobrindo uma ampla área da América do Sul, incluindo partes do cerrado e do pantanal brasileiro, mata atlântica e Cordilheira dos Andes (Figura 16D). Sua pluma se expande ao longo do norte da Argentina, Uruguai e sul do Brasil, influenciando amplamente os ecossistemas costeiros (Pimenta *et al*., 2005; Mahiques *et al.*, 2010; Dottori *et al.*, 2022). As águas deste rio compõem uma pluma de baixa salinidade com alta proporção de sedimentos finos (silte e argila), com concentração entre 100 e 300 mg/l (Mello, 2007). A baixa densidade das águas e os fortes ventos de sudoeste, somados ao aumento da vazão dos rios produzem uma penetração mais profunda da pluma em direção ao norte ao longo da costa e da BCC, permitindo que os sedimentos cheguem, nas épocas de maior descarga fluvial, próximos a Arraial do Cabo (Pimenta *et al*., 2005; Mahiques *et al.*, 2010). Estas informações somadas a distribuição dos elementos característicos das fácies lamosas (K, Al, Fe, Rb e Zn), corroboram para que os sedimentos da Pluma de La Plata contribuam na sedimentação do setor norte através da BCC, e no talude pelo cânion da Cananéia e redistribuição no talude pela BC.

7 CONCLUSÕES

A sedimentação atual da Bacia de Santos ocorre na plataforma continental, no talude e no Platô de São Paulo, sendo marcada pela distribuição heterogênea de fácies arenosas, lamosas e carbonáticas nos diferentes setores da bacia: (i) no Setor Sul, ocorre uma grande área com sedimentação de fácies lamosas da parte intermediária a quebra da plataforma, enquanto nas áreas mais rasas ocorrem sedimentos arenosos; (ii) no Setor Norte, existe a ocorrência de uma área dominada pela fácies lamosa na porção intermediária da plataforma, sendo as regiões mais rasas dominadas por sedimentos arenosos e a quebra da plataforma por sedimentação carbonática. No talude os sedimentos tendem a ser mais lamosos no setor sul e no Platô de São Paulo os sedimentos tendem a ser mais ricos em carbonatos (pelágicos) para as maiores profundidades.

As análises mineralógicas por difratometria de raios-x (DRX) permitiram a caracterização dos minerais presentes nas diferentes fácies sedimentares que ocorrem na bacia, indicando que nas fácies arenosas ocorre o predomínio (picos mais intensos) de quartzo, feldspatos e halita, e menor proporção de calcita, dolomita, muscovita e aragonita, nas fácies lamosas prevalecem quartzo, k-feldspato, plagioclásio e halita, com menor proporção de calcita, e as fácies carbonáticas identificaram o predomínio de calcita, quartzo e aragonita. Nas quatro áreas fontes foram encontrados principalmente: quartzo, plagioclásio, muscovita e caulinita no Rio de La Plata; quartzo, plagioclásio, muscovita, caulinita, clorita e halita nos sedimentos do Rio Grande; quartzo, plagioclásio, muscovita, caulinita, aragonita, calcita e halita no Rio Itajaí; e quartzo, plagioclásio, muscovita, caulinita e halita na Bacia de Santos.

Os mapas de distribuição dos elementos químicos apresentaram uma boa correlação com os dados granulométricos e mineralógicos, permitindo a identificação e relação dos sedimentos da bacia e as possíveis áreas fontes. As fácies arenosas proximais são fortemente enriquecidas em Si e K, além de Zr e Ti próximos a Baía de Santos, enquanto as fácies lamosas são ricas em K, Al, Fe, Rb e Zn, e as fácies carbonáticas em Ca e Sr. As análises dos componentes principais (PCA) corroboraram com a relação entre granulometria, química mineral e profundidade, permitindo indicar que as áreas fontes das fácies arenosas ocorrem nas regiões lateralmente adjacentes à bacia, enquanto as fácies lamosas possuem contribuições locais (com destaque para a Pluma do Rio Itajaí) e maior influência da Pluma do Rio De la Plata, como já publicado em outros artigos. Constatou-se que os sedimentos lamosos da Pluma

do De la Plata contribuem na sedimentação de finos do setor norte da bacia, bem como são redistribuídos no talude do Setor Sul, após captura parcial no Cânion da Cananéia.

8 REFERÊNCIAS

AMOROSI, A.A.I., SAMMARTINO, B.I.,, DINELLI, E.A., CAMPO, A, T. GUERCIA A, F. TRINCARDI C, C. PELLEGRINI. Provenance and sediment dispersal in the Po-Adriatic source-to-sink system unraveled by bulk-sediment geochemistry and its linkage to catchment geology. 2023

CASTRO, FILHO, B.M.,1996. Correntes e massa de água da plataforma continental norte de são Paulo. Tese livre docência. Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo. São Paulo. 246p.

DÁVILA, R., ARAGÃO,M.A.N.F., ARIENTI, L.M., VESELY, F- Ambientes Marinhos Profundos: Sistemas Turbidíticos (Deep Water Environments: Turbidite Systems) 2008.

FERREIRA, 1982; CAMPANHA & SADOWSKI, 1999; SOARES ET AL., 2000

FIGUEIREDO JR, A.G., PACHECO, C.A.P., VASCONCELOS, S.C., SILVA, F.T- Continental shelf geomorphology and sedimentology 2016. Cap. 2

FIGUEIREDO JR., A. G., CARNEIRO, J. C., SANTOS FILHO, J. R. 2023. Santos Basin continental shelf morphology, sedimentology, and slope sediment distribution. Ocean and Coastal Research, 71(suppl3), e23007. DOI: 10.1590/2675-2824071.22064agfj

FILHO, J.P- Dinâmica Biogeoquimia do Estuário do Rio Itajaí-Açú SC; 2006

GAMBOA, L.A.P.; PHILIPP D. RABIONOWITZ, P.D. 1981. The Rio Grande fracture zone in the westem South Atlantic and its tectoniv implications, Earth and Planetary Science Letters, Volume 52, Issue 2, Pages 410-418.

KOWSMANN, R. O. & COSTA, M. P. A. 1979. Sedimentação quaternária da margem continental brasileira e áreas oceânicas adjacentes. In: Reconhecimento global da margem continental brasileira. Rio de Janeiro: PETROBRAS/CENPES, pp. 1-55.

MAHIQUES, M. M., HANEBUTH, T. J. J., MARTINS, C. C., MONTOYA-MONTES, I., ALCÁNTARA-CARRIÓ, J., FIGUEIRA, R. C. L., ET AL. (2016). Mud depocentres on the continental shelf: a neglected sink for anthropogenic contaminants from the coastal zone. Environ. Earth Sci. 75, 1–12. doi:10.1007/s12665-015-4782-z.

MAHIQUES, M. M., MISHIMA, Y., AND RODRIGUES, M. (1999). Characteristics of the sedimentary organic matter on the inner and middle continental shelf between Guanabara Bay and Sao Francisco do Sul, southeastern Brazilian margin. Cont. Shelf Res. 19, 775–798. doi:10.1016/S0278-4343(98)00105-8.

MAHIQUES, M. M., SIEGLE, E., FRANCINI-FILHO, R. B., THOMPSON, F. L., DE REZENDE, C. E., GOMES, J. D., ET AL. (2019). Insights on the evolution of the living

Great Amazon Reef System, equatorial West Atlantic. Sci. Rep. 9, 1–8. doi:10.1038/s41598-019-50245-6.

MAHIQUES, M. M., TESSLER, M. G., MARIA CIOTTI, A., DA SILVEIRA, I. C. A., E SOUSA, S. H. D. M., FIGUEIRA, R. C. L., ET AL. (2004). Hydrodynamically driven patterns of recent sedimentation in the shelf and upper slope off Southeast Brazil. Cont. Shelf Res. 24, 1685–1697. doi:10.1016/j.csr.2004.05.013.

MAHIQUES, M. M., GOYA, S. C., MATOS, M. C. DA S. N. DE, OLIVEIRA, R. A. U. DE, KIM, B. S. M., FERREIRA, P. A. DE L., ET AL. (2021). Grain-size end-members and environmentally sensitive grain-size components: A comparative study in the mud shelf depocenters off southern Brazil. Int. J. Sediment Res. 36, 317–327. doi:10.1016/j.ijsrc.2020.07.004.

MAHIQUES, M. M, FIGUEIRA, R.C.L, SOUSA. S.H.M, SANTOS. R.F., FERREIRA. P.A.L, MI KIMA. B.S, GOYA S.C.Y, MATOS M.C.S.N, MARCIA CARUSO BÍCEGOA- Sedimentation on the southern Brazilian shelf mud depocenters: Insights on potential source areas. 2020

MELLO, R. L. (2007). Estudo numérico do transporte de sedimentos pela Pluma do Rio da Prata (Tese (Doutorado). Universidade de São Paulo, São Paulo, BSP.

MILANI, E.J. & THOMAZ FILHO, A. 2000. Sedimentary Basins of South America. In: CORDANI, U.G., MILSN, E.J.M THOMAZ FILHO, A. & CAMPOS, D.A. (eds). Tectonic Evolution of South America, 31st International Geological Congress, Rio de Janeiro, 389-449.

MIO, E., CHANG, H. K. & CORRÊA, F. S. 2005. Integração de métodos geofísicos na modelagem crustal da Bacia de Santos. Revista Brasileira de Geofísica, 23(3), 275-284.

MODICA, CHRISTOPHER J.; BRUSH, EUGENE R. 2004. Postrift sequence stratigraphy, paleogeography, and fill history of the deep-water Santos Basin, offshore southeast Brazil. AAPG bulletin, v.88, n. 7, p. 923-945

MOHRIAK & DEWEY, 1987; MACEDO, 1990; DAVISON, 1997 E MEISLING ET AL., 2001

MOREIRA, D. L. ET AL. 2023. Multidisciplinary scientific cruises for environmental characterization in the Santos Basin – methods and sampling design. Ocean and Coastal Research, 71(suppl3), e23022. DOI: 10.1590/2675-2824071.22072dlm

PIMENTA, F.M., CAMPOS, E.J.D, MILLER, J.L, PIOLA, A.R - A Numerical Study Of The Plata River Plume Along The Southeastern South American Continental Shelf-

REBESCO, M., HERNANDEZ, M, F.J., ROOIJ, D.V., WAHLIN, A.2014. Contourites and associated sedimnets controlled by deep-water circulation processes. State-of-the-art and future considerations. Marine Geology 352:111-154

REIS, P.A.G -Avaliação Das Vazões De Contribuição Da Bacia Hidrográfica Do Rio Grande À Calha Do Rio São Francisco Para Atendimento Dos Usos Múltiplos -2018

RENATO S. CARREIRA, R. S, LAZZARI1 L., CECCOPIERI1 M, ROZO L., MARTINS D., FONSECA G., VIEIRA D. C., MASSONE. C. G.,- Sedimentary organic matter accumulation provinces in the Santos Basin, SW Atlantic: insights from multiple bulk proxies. http://doi.org/10.1590/2675-2824071.22061rsc

R. ZÜHLKE, J. CONTRERAS1,, S. BOWMAN, AND T. BECHSTÄDT- Numerical Modeling of the Brazilian Offshore Continental Margin – Campos, Santos, Pelotas Basins* 2012

SANTOS, F.J.R, FIGUEIREDO JR, A.G, CARNEIRO J.C, DIAS, G.T.M, RAMALHO, A.S (2022). Mesophotic bioclastics and bioconstructions at the continental shelf of Santos Basin, Brazil

SCHATTNER U,. QUIRÓS A, L., NASCIMENTO, J.L.P., MAHIQUES, M M -What feeds shelf-edge clinoforms over margins deprived of adjacent land sources? An example from southeastern Brazil, 2018, DOI: 10.1111/bre.12397

SCHATTNER, URI ET AL, 2018, What feeds shelf-edge clinoforms over margins Oceanographic conditions of the continental slope and deep waters in Santos Basin: the SANSED cruise (winter 2019).

SCHETTINI, C.A.F.; RESGALLA JR., C.; PEREIRA FILHO, J.; SILVA, M.A.C.; TRUCCOLO, E.C. & RÖRIG, L.R.- Variabilidade Temporal Das Características Oceanográficas E Ecológicas Da Região De Influência Fluvial Do Rio Itajaí-Açu 2005.

SCHETTINI, C.A.F- Caracterização Física do Estuário do Rio Itajaí-açu, SC- - 2002

SCHETTINI, C.A.F (2008)- Hidrologia do Saco da Fazenda, Itajaí, SC. DOI: 10.14210/bjast.v12n1.p49-58 · Source: DOAJ

SILKA, M.B- O método Sísmico e a Bacia de Santos 2007

SILVEIRA, I.C.A , PIERO S. B., LAZANEO, C.Z, AMORIM, J.P.M, SILVA, M.B, MARTINS, R.C., SANTOS, D.M.C MARCELO DOTTORI 1, BELO, W.C., MARTINS, R.P., GUERRA, L.A.A., MOREIRA, D.L 2- Oceanographic conditions of the continental slope and deep waters in Santos Basin: the SANSED cruise (winter 2019)

WHITNEY L. D - 2010- Abbreviations for Names of Rock-Forming Minerals