

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

ÍTALO MARTINS PALADINO

CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ NO
PRESENTE E NO PASSADO RECENTE - UMA ABORDAGEM MULTI-PROXY

PONTAL DO PARANÁ

2023

ÍTALO MARTINS PALADINO

CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ NO
PRESENTE E NO PASSADO RECENTE - UMA ABORDAGEM MULTI-PROXY

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos, Campus Pontal do Paraná Setor de Centro de Estudos do Mar, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Hanae Nagai.

PONTAL DO PARANÁ

2023

DADOS INTERNACIONAIS DE CATALOGAÇÃO NA PUBLICAÇÃO (CIP)
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS – BIBLIOTECA DO CENTRO DE ESTUDOS DO MAR

Paladino, Ítalo Martins

Condições ambientais do Complexo Estuarino de Paranaguá no presente e no passado recente – uma abordagem *multi-proxy* / Ítalo Martins Paladino. – Pontal do Paraná, 2023.

1 recurso on-line : PDF.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Campus Pontal do Paraná, Centro de Estudos do Mar, Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos.

Orientadora: Profa. Dra. Renata Hanae Nagai .

1. Sedimentos estuarinos. 2. Oceanografia dos estuários. I. Nagai, Renata Hanae. II. Universidade Federal do Paraná. Programa de Pós-Graduação em Sistemas Costeiros e Oceânicos. III. Título.

Bibliotecária: Fernanda Pigozzi CRB-9/1151

TERMO DE APROVAÇÃO



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
REITORIA
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO SISTEMAS COSTEIROS
E OCEÂNICOS - 40001016054P6

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da Dissertação de Mestrado de **ITALO MARTINS PALADINO** intitulada: **CONDIÇÕES AMBIENTAIS DO COMPLEXO ESTUARINO DE PARANAGUÁ NO PRESENTE E NO PASSADO RECENTE - UMA ABORDAGEM MULTI-PROXY**, sob orientação da Profa. Dra. RENATA HANAE NAGAI, que após terem inquirido o aluno e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua APROVAÇÃO no rito de defesa.

A outorga do título de mestre está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

Pontal do Paraná, 31 de Janeiro de 2023.

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 12:55:10,0

RENATA HANAE NAGAI

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 11:51:46,0

CARLOS CONFORTI FERREIRA GUEDES

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ)

Assinatura Eletrônica

01/02/2023 14:08:39,0

TAILISI HOPPE TREVIZANI

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO)

*Aos meus pais, por sempre acreditaram em
mim, e me deram todo suporte em todas
minhas escolhas durante essa caminhada.*

Obrigado.

AGADECIMENTOS

Agradeço meus pais, **Edna Alves Martins Jorge Eduardo Paladino**, e meus irmãos por todo o amor e suporte incondicional: Essa conquista é nossa.

Agradeço ao meu pequeno sobrinho **Nicolas**, que eu possa ensinar e ajudá-lo a se apaixonar pela ciência tanto quanto eu.

Agradeço a todos meus amigos de Rio Preto, em especial ao **Robson Lima, Evandro del Campo e Igor Matiello**, que sempre estiveram comigo todo esse tempo

Agradeço a minha orientadora **Prof^a. Dr^a Renata Hanae Nagai** por todo apoio durante esses 8 anos (e virão muitos outros) de trabalho com Oceanografia e a pesquisa, que sempre fez o melhor para me ajudar em ensinar, além de ser uma inspiração e que faz toda a diferença para me tornar o profissional que sou hoje.

Agradeço a equipe do **LabPaleo²** por todos os bate-papos, reuniões e debates que contribuíram muito para o andamento do trabalho.

Agradeço a todos amigos da graduação, pós-graduação, PMP e comunidade do CEM, que fizeram meus dias melhores (difícil citar todos). Amo vocês.

Agradeço em especial ao meu grupo, **Bryan, Gabrielle, Jamile, Victoria, Giovana e Matheus** que estiveram ao meu lado em todos os momentos difíceis, me ensinando o poder da amizade.

Agradeço a **PGSISCO** e ao **Centro de Estudos do Mar** por toda a infraestrutura que auxiliaram na execução do trabalho.

Agradeço ao pessoal do **Instituto Oceanográfico da USP** por todo apoio, troca de conhecimento e logística nas análises granulométricas.

Agradeço à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa DS durante todo o mestrado (código de financiamento 001), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPQ) pelo suporte financeiro através do projeto “Panorama Histórico e Perspectivas Futuras Frente à Ocorrência de Estressores Químicos Presentes no Complexo Estuarino de Paranaguá (EQCEP) Edital MCTIC/CNPq 21/2017 (processo n ° 441265/2017-0).

*“Há verdadeiramente duas coisas diferentes: saber e
crer que se sabe. A ciência consiste em saber; em crer
que se sabe reside a ignorância.”*

Hipócrates

RESUMO

O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizado no litoral do Paraná, abriga diversas atividades socioeconômicas, uma extensa área de Mata Atlântica e outros ecossistemas de importância ecológica. No entanto, o nosso conhecimento sobre os fatores que controlam os processos deposicionais atuais e no passado recente deste ambiente ainda é limitado. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os fatores que controlam a dinâmica sedimentar do CEP, no presente e nos últimos 120 anos, por meio de uma abordagem *multi-proxy*. Para isso, 109 amostras de sedimentos superficiais e 130 amostras sedimentares pertencentes a três registros sedimentares, foram analisadas quanto a sua composição granulométrica e composição elementar. Dois modelos matemáticos com base em dados granulométricos (*End-member* e *Sediment Trend Analysis*) foram aplicados aos dados de sedimentos superficiais do CEP permitindo a avaliação de fonte e de processos de transporte dos sedimentos. Os resultados indicam que os processos sedimentares atuais são controlados pelo aporte de sedimentos da Serra do Mar, transportados na direção oeste-leste pela descarga dos rios - principalmente dos rios Cachoeira e Nhundiaquara - e depositados na Baía de Antonina até a zona de máxima turbidez; e sedimentos mais grossos transportados em direção ao centro do estuário devido às correntes geradas pelas ondas e marés, sendo depositados nas Baías de Paranaguá e Laranjeiras. A avaliação integrada dos três testemunhos evidenciou mudanças nas condições ambientais do CEP nos últimos 120 anos associadas a mudanças no regime de precipitação e no uso e ocupação do solo do entorno do estuário. Além disso, os resultados apontam para uma mudança significativa nos processos deposicionais do CEP em 1970, com a mudança abrupta no tamanho dos sedimentos depositados no CEP, como resultado principalmente do desenvolvimento socioeconômico da região e, consequente, mudanças no uso e ocupação do solo no entorno do CEP. Ainda, nossos resultados sugerem que as alterações antropogênicas foram determinantes nas mudanças observadas para os processos deposicionais do CEP, com menor influência de mudanças nas condições climáticas.

Palavras-chave: processos de estuarinos, modelos granulométricos, razões elementares, estuário subtropical

ABSTRACT

The Paranaguá Estuarine Complex (PEC), located on the coast of Paraná, is home to several socioeconomic activities, an extensive area of Atlantic Forest, and other ecosystems of ecological importance. However, our knowledge about the factors that control the current and recent past depositional processes of this environment is still limited. The present work aims to evaluate the factors that control the CEP sedimentary dynamics, in the present and in the last 120 years, through a multiproxy approach. For this, 109 samples of surficial sediments and 130 sedimentary samples belonging to three sedimentary records were analyzed for their grain size composition and elemental composition. Two grain size-based mathematical models (End-member and Sediment Trend Analysis) were applied to the data obtained in the PEC surficial sediments allowing the evaluation of sediments source and transport processes. The results show that current sedimentary processes are controlled by the input of sediments from the Serra do Mar (EM1), mainly from the Cachoeira and Nhundiaquara rivers, transported in the west-east direction by river discharge and deposited from Antonina Bay to the Maximum Turbidity Zone; and coarser sediments (EM2 and EM3), transported towards the center of the estuary due to currents generated by waves and tides, are deposited in the Paranaguá and Laranjeiras Bays. The integrated evaluation of the three sedimentary cores showcases changes in the PEC's environmental conditions over the last 120 years, associated with changes in the precipitation regime and in land use and occupation around the estuary. The results point to a significant change in the CEP's depositional processes in 1970, with an abrupt change in the grain size of the sediments deposited in the PEC, due mainly to the region's socioeconomic development and, consequently, changes in land use and occupation. Our results also suggest that anthropogenic alterations were determinant in the changes observed for CEP depositional processes, with a less significant influence of climatic conditions changes.

Keywords: estuarine processes, granulometric models, elemental ratio, subtropical estuary

LISTA DE FIGURAS

Figure 2.1 - Map of the mean grain size of surface sediments in the Paranaguá Estuarine Complex, based on Angeli et al. (2020). Black dots indicate the location of the samples collected in 2018; numbers 1 to 5, and the black lines represent the sectors of the PEC according to Noernberg et al. (2006): (1) Mixture - situated close to the Mel Island, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras, and (5) Pinheiros; the TMZ represents the location of the Turbidity Maximum Zone; dashed lines represent the navigation channel. 23

Figure 2.2 - Progressive coefficients of determination (R^2) obtained through the BasEMMA..... 24

Figure 2.3 - (a) BasEMMA result indicating each EM and their respective grain size ranges (ϕ); (b,c,d) Distribution maps of the percentage distribution of each EM in the PEC..... 27

Figure 2.4 - (a) Bathymetry field of the Paranaguá Estuarine Complex interpolated with the spatial distribution of vectors (black arrows) resulting from the GSTA, which indicate the direction and intensity of net sediment transport (b) interpretation of net sediment transport. The numbers (1-5) represent the PEC sectors according to Noernberg et al. (2006): (1) mixture, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras, and (5) Pinheiros. .. 28

Figure A. 1– Residual bottom circulation map of the Paranaguá Estuarine Complex -PR, by Guilherme A. S. Franz..... 34

Figure A.2– (a) EM subpopulation grain size ranges (ϕ); and (b) Grain size ranges from samples representing the four Noernberg et al. (2006) PEC sectors: (1) Mixture, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras. 35

Figura 3.1 – Mapa de localização do Complexo Estuarino de Paranaguá e dos testemunhos (T2, T3 e T5 – pontos vermelhos com cruz) utilizados neste trabalho. As linhas coloridas marcam os limites municipais da região, círculos com barco denotam a localização dos Portos de Antonina (amarelo) e Paranaguá (vermelho) e quadrados com pontos no centro indicam a localização das Ilhas da Cotinga (verde), do Mel (rosa) e dos Superagui (vermelho). 41

Figura 3.2 – Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 9,3\mu\text{m}$), (c) EM2 ($M_0 = 177,0 \mu\text{m}$) e (d)

EM3 ($M_0 = 210,0 \mu\text{m}$) e das razões (e) Fe/Ca, (f) K/Ca, (g) Fe/K e (h) K/Rb ao longo dos últimos 80 anos observada no testemunho T3 (Baía de Antonina). 45

Figura 3.3 – Resultado do BasEMMA para cada EM e seus respectivos intervalos de tamanho de grão (μm) para os testemunhos (a) T3, (b) T2 e (c) T5. 47

Figura 3.4 - Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 5,2\mu\text{m}$), (c) EM2 ($M_0 = 15,6\mu\text{m}$), (d) EM3 ($M_0 = 177,0\mu\text{m}$) e (e) EM4 ($M_0 = 500,0\mu\text{m}$); e das razões (f) Fe/Ca, (g) K/Ca, (h) Fe/K e (i) K/Rb ao longo dos últimos 120 anos observada no testemunho T2 (Baía de Paranaguá). 49

Figura 3.5 – Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 88,4\mu\text{m}$); (c) EM2 ($M_0 = 149,0\mu\text{m}$); e (d) EM3 ($M_0 = 210,0\mu\text{m}$) e das razões (e) Fe/Ca, (f) K/Ca, (g) Fe/K e (h) K/Rb ao longo dos últimos 110 anos observada no testemunho T5. 51

Figura S.1– Variação do ^{210}Pb nos testemunhos (a) T2, (b) T3 e (c) T5. 57

Figura S.2– Modelos de idade para os testemunhos T2 (azul), T3 (preto) e T5 (cinza). 58

Figura S.3 – Coeficiente de determinação progressivo (R^2) obtido pelo BasEMMA, para os testemunhos (a) T3, (b) T2 e (c) T5. 59

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Dados de localização geográfica dos locais de coleta dos testemunhos, com a profundidade da lâmina d'água (m) e o comprimento da coluna sedimentar recuperada (cm).....	42
--	----

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	16
2. CAPÍTULO I	18
2.1. Introduction	19
2.2 Study area	21
2.3. Materials and methods	23
2.3.1. End-member modeling analysis (EMMA)	24
2.3.2. Grain Size Trend Analysis (GSTA)	25
2.4. Results	25
2.4.1. End-member modeling analysis (EMMA)	26
2.4.2. Grain Size Trend Analysis (GSTA)	27
2.5. Discussion	29
2.6. Conclusions	32
Appendix A1	34
Appendix A2	35
3. CAPÍTULO II	36
3.1. Introdução	37
3.2. Área de estudo	39
3.3. Materiais e métodos	41
3.3.1. Geocronologia	42
3.3.2. Análises granulométricas e modelo de End-members.....	42
3.3.3. Composição elementar dos sedimentos	43
3.4. Resultados	43
3.4.1. Testemunho T3 (Baía de Antonina)	43
3.4.2. Testemunho T2 (Baía de Paranaguá).....	46
3.4.3. Testemunho T5 (Ilha da Cotinga).....	50
3.5. Discussão	52
3.6. Conclusão	55
Figuras suplementares – Capítulo II	57
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS	62
ANEXO-1	69

HIGHLIGHTS

- O panorama atual e histórico de processos sedimentares do CEP é apresentado;
- Modelos granulométricos são eficazes na identificação caminhos *source-to-sink* do CEP;
- Distribuição granulométrica categoriza o CEP como um estuário como dominado por ondas;
- Aplicação de uma abordagem *multi-proxy* no entendimento de processos deposicionais do CEP nos últimos 120 anos;
- Fatores antrópicos controlaram mudanças nos processos deposicionais do CEP nos últimos 50 anos;

RESUMO EM LINGUAGEM ACESSÍVEL

A ocupação no estado do Paraná teve seu início em torno do sec. XVII, quando bandeirantes paulistas adentram o litoral paranaense em busca de aumentar suas colônias de exploração de aurífera. Desde então, este movimento expansionista e o aumento demográfico no Estado gerou diversas estruturas econômicas e sociais, que durante sua expansão foram conquistando novas terras aumentando o uso e ocupação do solo. O Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP), localizado no litoral do Paraná, é formado por 5 municípios (Morretes, Antonina, Paranaguá, Pontal do Paraná e Guaraqueçaba). Atualmente, a região do CEP abriga atividades econômicas que giram em torno das ações portuárias, turismo, pesca e indústrias. Além disso, essa região é um importante centro ecológico, abrigando uma vasta biodiversidade de manguezais, mata Atlântica, marismas, dunas. Entretanto, pouco se sabe sobre os efeitos que a ocupação humana do entorno desse estuário teve sobre as condições ambientais desse importante ecossistema. Com isso, o intuito deste trabalho é avaliar as condições ambientais no CEP no presente, e reconstruir as mudanças que ocorreram nos últimos 120 anos. Para isso amostras de sedimentos superficiais e subsuperficiais foram analisadas em relação ao tamanho dos grãos e composição elementar de metais e metalóides. As condições ambientais no presente, foram avaliadas usando modelos matemáticos baseados nas características dos grãos (*End-Member* e *Sediment Trend Analysis*) que identificaram três principais fontes de sedimentos para o CEP, com transporte sedimentar orientado de Oeste para Leste nas Baías de Antonina e Paranaguá e de Leste para Oeste na região de desembocadura do estuário. O panorama histórico mostra que nos últimos 120 anos, mudanças na dinâmica sedimentar do CEP, influenciada por mudanças no regime de precipitação e no uso e ocupação do solo do seu entorno. Ainda, que nos últimos 50 anos, houve aumento na chegada de sedimentos da Serra do Mar para o CEP, principalmente associado a ações humanas de desmatamento de novas áreas para ocupação, dragagens dos canais artificiais e construção de hidrelétricas.

1. INTRODUÇÃO

Durante o desenvolvimento populacional, as regiões costeiras são utilizadas como depósitos de diversos compostos, que podem ser associados a efeitos adversos ao ecossistema. O rápido aumento populacional nessas regiões, ocasionado pelo aumento nas atividades costeiras, causaram grandes impactos nos ecossistemas como manguezais, recifes de corais e até mesmo nas estruturas morfológicas estuarinas (TIBBETTS, 2002). Atualmente, aproximadamente um terço da população mundial (STEINER, 2006), e 24% da população brasileira habitam as regiões costeiras (IBGE, 2016).

As principais atividades humanas nessas áreas estão entre industriais, portuárias e turismo em larga escala (GRUBER et al., 2003; DAVENPORT & DAVENPORT, 2006). Atualmente, a economia em torno da indústria portuária marítima tem importante papel na economia global (BURUAEM et al., 2012). O desenvolvimento dessas atividades em áreas costeiras tem potencial de gerar impactos ambientais negativos durante sua instalação, manutenção e funcionamento (p.e. derramamento de óleos, animais invasores transportados pela água de lastro, produtos químicos do casco dos navios, áreas desmatadas, dragagem etc.) (BREBBIA, 2000; BURUAEM et al., 2012).

A região costeira do Paraná vem sendo alvo de intensa exploração desde o 1614, com a vinda de bandeirantes Paulista para região de Superagui e logo colonizando o interior da baía conforme as atividades extrativistas foram mudando (MACHADO, 1987). A presença de um estuário, abrigado por um uma ilha, proporcionou um ambiente favorável para o desenvolvimento de diversas atividades antrópicas e conquista da região. Entre elas, as atividades portuárias no Paraná, tiveram início na Baía de Antonina durante o sec. XVII, com foco na exportação de madeira e erva-mate (PIERRI et al. 2006). Após a 2ª guerra mundial, houve aumento de investimento no porto de Paranaguá, para a exportação de soja (PIERRI et al., 2006). Atualmente, o Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) possui o maior porto comercial da região sul do Brasil.

No entanto, pouco se sabe sobre as condições ambientais do CEP anteriores à ocupação humana, o que representa um fator limitante no diagnóstico do estado de saúde desse importante ecossistema do litoral do Paraná. O CEP, é considerado um estuário subtropical com grande importância ecológica, protegido por lei por meio da Área de Proteção Ambiental de Guaraqueçaba (decreto nº90.883 de 31 de janeiro de 1985) e o Parque Nacional de Superagui (decreto nº 97.688 de 25 de abril de 1989). Atualmente, o entorno do CEP abriga uma diversidade de atividades econômicas que giram em torno da

pesca, turismo, industriais, além de terminais de combustíveis e do terceiro maior terminal portuário de exportação e importação de grãos do país (MARTINS et al., 2010). Entretanto, devido a ocupação do CEP ao longo do tempo ter diferentes estágios, tais como, desmatamento, mudanças na hidrodinâmica, dragagem, obras de linha de costa, pouca atenção foi dada para os efeitos da antropização e aos processos costeiros de formação sedimentar (ANGULO et al., 2020).

Neste contexto, o objetivo desse trabalho é avaliar as condições ambientais do CEP no presente e nos últimos 120 anos, a partir do entendimento das condições de transporte sedimentar e processos deposicionais atuais e de sua resposta as mudanças climáticas e de natureza antrópica ocorridas a partir de 1900. Para atingir este objetivo, aplicou-se uma abordagem *multi-proxy* (granulometria e composição elementar) a sedimentos superficiais e em três registros sedimentares coletados ao longo do gradiente estuarino do CEP. Os resultados aqui apresentados têm potencial de subsidiar trabalhos futuros associados ao monitoramento e avaliação do impacto de ações humanas sobre as condições ambientais do CEP. A identificação e o melhor entendimento dos processos estuarinos e forçantes (naturais e antrópicas) que influenciam CEP tem potencial de nos auxiliarem a atingir os resultados societários “*Um Oceano limpo*” e “*Um Oceano Previsível*” elencados para a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2030) da Organização das Nações Unidas ONU).

Este trabalho está estruturado em dois capítulos principais, apresentados em formato de artigos científicos, seguidos por um texto de integração dos capítulos e conclusão final do trabalho. O Capítulo I intitulado “*End-member modeling and Sediment Trend Analysis as tools for sedimentary processes inference in a subtropical estuary*” aplica dois modelos matemáticos baseados em parâmetros granulométricos nos dados obtidos para os sedimentos superficiais do CEP, permitindo a determinação de fontes de sedimentos e padrões de transporte sedimentar ao longo do estuário. Este trabalho foi publicado na *Estuarine, Coastal and Shelf Science* (ISSN: 0272-7714; Qualis (2017-2020) A2 na área de Biodiversidade; Fator de Impacto: 3,23; CiteScore: 5,3) - <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108126>. O Capítulo II intitulado “*Uma perspectiva histórica da influência antrópica em um estuário subtropical (sítio RAMSAR)*” aplica uma abordagem *multi-proxy* (granulometria e composição elementar) em três testemunhos coletados ao longo do gradiente estuarino do CEP, permitindo a obtenção do panorama histórico dos fatores que alteraram os processos deposicionais do CEP nos últimos 120 anos.

2. CAPÍTULO I

End-member modeling and Sediment Trend Analysis as tools for sedimentary processes inference in a subtropical estuary

Título em português: Modelo de *End-member e Sediment Trend Analysis* como ferramentas para inferência de processos sedimentares em um estuário subtropical

Paladino, Í. M., Mengatto, M. F., Mahiques, M. M., Noernberg, M. A., Nagai, R. H. (2022). End-member modeling and sediment trend analysis as tools for sedimentary processes inference in a subtropical estuary. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 278, 108126. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108126>

Abstract

Mathematical models based on grain size data enable identifying sediment transport sources and processes in coastal regions, helping to understand the relationship between hydrodynamic and sedimentary processes. This study applied *End-Member Analysis* and *Grain Size Trend Analysis* to a grain size database from the Paranaguá Estuarine Complex (PEC), a subtropical estuary in southern Brazil. The end-member analysis allowed identifying three grain size populations, whose spatial distribution is influenced by the dynamics between river discharge and tidal currents acting in the Paranaguá Estuarine Complex. The end-member 1 — formed by finer sediments — is mainly distributed over Antonina Bay and extends into the turbidity maximum zone. The Grain Sized Trend Analysis revealed that these sediments — derived from the weathering of rocks from the Serra do Mar mountain range system — are transported in the west-east direction by river discharge, mainly from the Cachoeira and Nhundiaquara rivers. Furthermore, our results indicate that sediments from end-members 2 and 3 — which are coarser — are distributed in the Paranaguá and Laranjeiras Bays. The transport of these sediments happens towards the center of the estuary due to wave- and tidal-generated currents.

Keywords: Grain size, Mathematical models, End-member, Sediment transport, Estuarine dynamics.

Regional index terms: Southern Brazil, State of Paraná, Paranaguá.

2.1. Introduction

Grain size parameters of sediments deposited in coastal and marine environments are widely used in environmental and paleoenvironmental studies (e.g., le ROUX et al., 2002; BEUSCHER et al., 2017). In addition, grain size distribution analyses assist in interpreting sediment sources and transport processes. For this reason, they have traditionally been applied to understand the interplay between depositional and hydrodynamic processes (MCCAVE & HALL, 2006; ZHANG et al., 2016). The spatial distribution of sediments results from the interaction between different factors, such as grain size, dimensional morphology of the system, and hydrodynamic processes, which influence their origin and deposition (HARTMANN, 2007). The spatial distribution of grain size parameters alone does not provide reliable sediment transport and deposition information, although it can indicate potential sources (HARTMANN, 2007; LI & LI, 2018).

The end-member modeling analysis (EMMA) is a statistical approach applied to grain size data to identify distinct subpopulations based on grain size distribution (WELTJE, 1997; van HATEREN et al., 2018). This model is based on different statistical parameters (parametric and non-parametric) and classifies sediments into end-members (EMs), which represent grain size subpopulations (van HATEREN et al., 2018).

Applying EMs to a bimodal dataset quantifies and qualifies different sedimentary processes contributing to the sample distribution (ZHANG et al., 2016; DIETZE & DIETZE, 2019). Thus, the division into subpopulations, represented by each EM, facilitates the interpretation of heterogeneous grain size data. It allows inferring sediment sources, bottom currents, climatic reconstructions, and depositional processes (PRINS et al., 2002; BOULAY et al., 2007; PARRIS et al., 2010; ZHANG et al., 2016; LI & LI, 2018).

Assessing the spatial change of grain size parameters — such as mean grain size, degree of selection, and skewness — can be used to identify net sediment transport patterns. Based on the Sediment trend analysis (STA[®]) model — first proposed by McLaren (1981) — the grain size parameters can be integrated to obtain one-dimensional

(1D) vectors for net sediment transport. In addition to the 1D method, different authors proposed two others. The 2D point-to-point method was used by Gao & Collins (1991; 1992) and Le Roux (1994), who proposed a variation from the former. Based on the combination of the 1D and 2D methods, Poizot and Méar, (2010) developed the Grain Size Trends tool, which relies on geographic information systems (GIS) to process and define transport vectors.

The net sediment transport reflects the transport processes averaged over the study area. The STA[®] analysis, in turn, establishes the direction of sediment transport based on the natural changes that occur during grain distribution (LI & LI, 2018; McLaren et al., 2007). The analysis of transport patterns through the STA[®] method is complementary to the interpretation of grain size distribution in marine and coastal environments and was applied in several studies in these regions (RÍOS et al., 2002; JIA et al., 2003; VEIGA et al., 2005; LI & LI, 2018; CARVALHO & GUERRA, 2020). In addition, these models are also applied in estuarine environments.

Estuaries are ephemeral geological features located in coastal regions. Its sediment sources are fluvial and marine, extending from the land boundary to the sea (DALRYMPLE et al., 1992). Geomorphologically, these environments were formed during the last sea-level rise and are located between the continent and the ocean, constituting the transition between terrestrial and marine environments (COOPER, 2001; MEADE, 1969). The internal dynamics of an estuary are mainly influenced by river flow and marine forces (waves and tides), resulting in the retention of sediments from marine and terrestrial sources (MEADE, 1969). Likewise, these internal dynamics mix the salty water that moves progressively up the estuary with fresh water from discharging of rivers (MEADE, 1969)

The Paranaguá Estuarine Complex (PEC) is one of the largest estuaries in the Southwest Atlantic (MARONE et al., 2005). The region where it is located — the state of Paraná, in southern Brazil — is an important economic center characterized by the presence of the ports of Antonina and Paranaguá. Together, they account for a large part of the country's imports and exports. According to their administration (APPA, 2022), the ports of Paraná handled approximately 57 million tons of imported and exported products in 2021. Of this total, 62% are dry bulk, such as soybeans, corn, soybean meal, and sugar. In 1972, an artificial navigation channel was opened to meet the demands of port activities. The channel needs regular maintenance dredging to preserve its depth and, thus, navigation safety. In addition, the complex has ecological relevance, as it

encompasses a significant remaining portion of the Atlantic Forest, mangrove forests, salt marshes, dunes, and rocky coasts. These environments are home to several marine species (LANA et al., 2001), which is why, since 1980, a series of conservation units have been created to preserve the region (MARONE et al., 2005; PIERRI et al., 2006).

Thus, this study aims to identify sediment transport patterns and better understand the influence of hydrodynamic processes on sediment distribution and deposition in the PEC by applying the EMMA and STA[®] mathematical tools. Our results were analyzed alongside data on the chemical composition of surface sediments and estuarine circulation patterns available in the literature, which helped us understand the grain size distribution patterns of surface sediments in the PEC. Furthermore, they indicate the feasibility of using mathematical models in highly dynamic environments — as in the case of estuaries — contributing to the interpretation of sedimentary transport and deposition processes.

2.2 Study area

The PEC (25°00'S - 25°35'S and 48°15'W - 48°40'W) is located on the northern coast of the state of Paraná, occupying an area of 552 km² (NOERNBERG et al., 2006). The mean depth of this estuary is 5 m, except for the dredged channel, whose depth reaches 33 m (MARONE et al., 2005; LAMOUR et al., 2004). It comprises four bays, distributed in two orientation axes: the Paranaguá and Antonina Bays, on the east-west axis — with 56 km of extension; and the Laranjeiras and Pinheiros Bays, oriented on the north-south axis — with 30 km of extension (Figure 2.1). The region's climate is controlled by a permanent anticyclonic gyre in the South Atlantic Ocean and by the passage of frontal systems (ANGULO et al., 2016).

The PEC's hydrodynamic processes are mainly influenced by the river drainage of the Serra do Mar — a system of mountain ranges and escarpments in Southern Brazil that runs parallel to the coast — and by currents generated by waves and tides (LANA et al., 2001). According to Marone et al. (2005), concerning the annual average of 200 m³ s⁻¹, river drainage varies from 30 % to 170% for dry and wet periods. The mean annual rainfall is 2,500 mm (maximum 5,300 mm), the rainy season begins in late spring and lasts throughout the summer, and autumn and winter are considered dry periods (LANA et al., 2001). The semi-diurnal variation of the spring tide reaches 1.3 m and 2.7 m at the entrance of the estuary and Antonina Bay, respectively (LANA et al., 2001; MARONE et al., 2005). The ebb tide current is 16-48% higher than flood during the spring cycles;

the velocity varies from 1.1 during the ebb tide to 0.81 m s⁻¹ in flood (MANTOVANELLI et al., 2004). Based on these hydrodynamic patterns, Noernberg et al. (2006) proposed a spatial subdivision of the PEC into five sectors: (1) Mixture — situated close to Mel Island; (2) Paranaguá; (3) Antonina; (4) Laranjeiras; and (5) Pinheiros (Figure 2.1).

Regarding sediment distribution, finer sediments — fine silt — are observed mainly in Antonina Bay. On the other hand, coarser sediments — coarse and very coarse sand — are kept in the main tributaries' mouths and the Paranaguá and Laranjeiras Bays (BIGARELLA et al., 1970; SOARES et al., 1996; LAMOUR et al., 2004; ANGELI et al., 2020), being classified as poorly sorted, and with low presence of organic matter and carbonates (LAMOUR et al., 2004). The distribution of grain size parameters in the east-west axis of the PEC follows the hydrodynamic patterns. Based on grain size distribution, Soares et al. (1996) divide this axis into the following sectors: a) upstream of the estuary (Antonina Bay), with a higher percentage of fine sediments arising mainly from river discharge; b) intermediate, with fluvial and marine influence and limited by the TMZ; c) near the mouth of the estuary, with a higher concentration of sandy sediments.

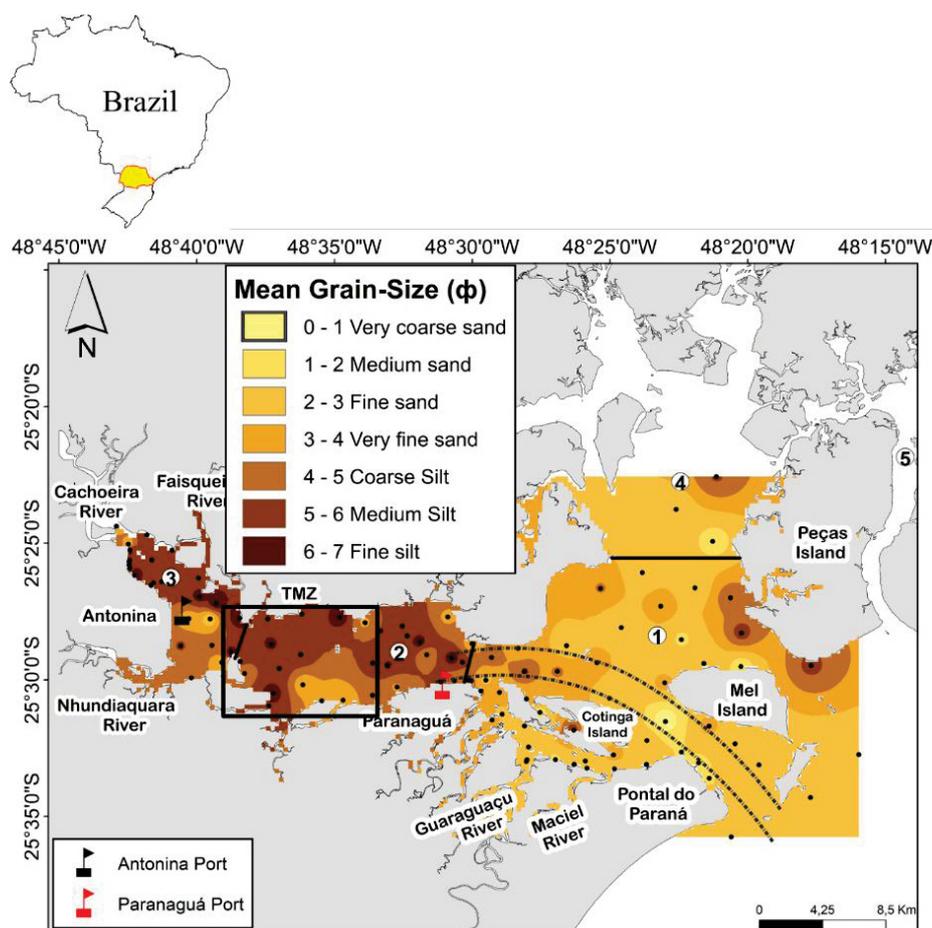


Figure 2.1 - Map of the mean grain size of surface sediments in the Paranaguá Estuarine Complex, based on Angeli et al. (2020). Black dots indicate the location of the samples collected in 2018; numbers 1 to 5, and the black lines represent the sectors of the PEC according to Noernberg et al. (2006): (1) Mixture - situated close to the Mel Island, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras, and (5) Pinheiros; the TMZ represents the location of the Turbidity Maximum Zone; dashed lines represent the navigation channel.

2.3. Materials and methods

The data analyzed in this study stem from 109 surface sediment samples collected at a 0-3 cm depth in March 2018 along the north-south and east-west axes using a Van-Veen grab sampler (Figure 2.1). The grain size data — published by Angeli et al. (2020) — were obtained after removing the organic matter and calcium carbonate fraction with solutions of 30 % H_2O_2 and 10 % HCl , respectively. Samples were analyzed on a Malvern Mastersizer 2000 laser granulometer, and data were processed by the GRADISTAT software, a free extension of MS-Excel[®] (BLOTT, 2010). This software

obtains the percentages of sand, silt, clay, and grain size parameters of mean, sorting, skewness, and kurtosis according to Folk and Ward (1957) classification.

2.3.1 End-member modeling analysis (EMMA)

The EMMA analysis method decomposes a dataset into population subgroups (ZHANG et al., 2016). In this study, we used the Basic-EM model (BasEMMA) (ZHANG et al., 2020), a free extension of the MS-Excel[®] software whose theoretical basis is presented by Zhang et al. (2020). The number of final EMs was determined by analyzing the inflection curve of the progressive coefficients of determination (R^2) (MAHIQUES et al., 2021; PATERSON & HESLOP, 2015), shown in Figure 2.2. Based on the inflection point of the sample-wise curve, we decided to consider three end members as the most suitable condition for mapping the bay. Distribution maps were generated using ArcMap 10.5 software and the Inverse Distance Weighting (IDW) method for both grain size data and EMMA results.

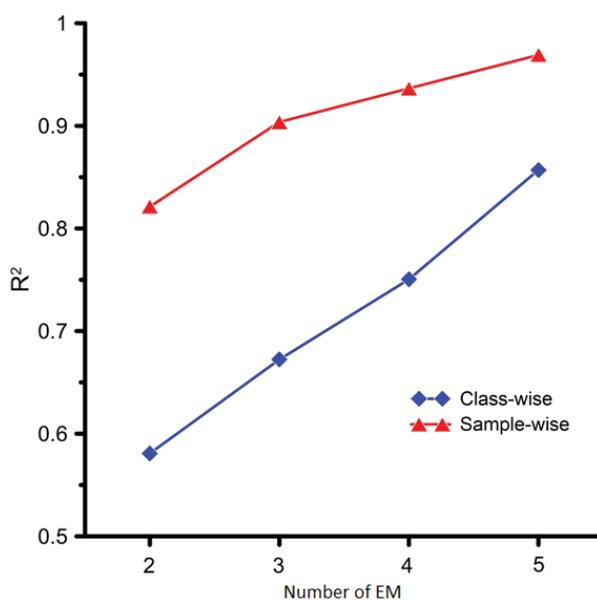


Figure 2.2 - Progressive coefficients of determination (R^2) obtained through the BasEMMA.

2.3.2 Grain Size Trend Analysis (GSTA)

To obtain the transport vectors, sediment transport analyses are based on the interaction between grain size parameters (mean, kurtosis, and skewness) and the characteristic distance (D_{cr}) between samples (MCLAREM, 1981; GAO & COLLINS, 1992; POIZOT & MÉAR, 2010). Statistically, there are eight combinations between these parameters in total. However, Gao & Collins (1994) and Poizot & Méar (2010) suggest that the combination of two of them (1) finer, better sorted, and skewness more negatively (FB-); and (2) coarser, better sorted, and skewness more positively (CB+) can be adopted to define net transport direction. Field observations validate these combinations as they present the highest probability of occurrence in the net transport direction.

Considering the uneven sampling, the PEC was divided into 1-Antonina, 2-Paranaguá, 3-Misture zone, and Laranjeiras Bay. The D_{cr} was explicitly defined to fit each zone sampling spacing as 1500 m, 2200 m, and 3500 m for zones 1, 2, and 3, respectively. The GiSedTrend plugin was developed by Poizot & Méar (2010) for the 2.x versions of QGIS software and was used to analyze the PEC sediments. This model enables an exclusive operation, denoted XOR, that adopts the region's particularities (e.g., estuary format, rocks, and islands). For this reason, we use a PEC shapefile to delimit the estuary boundaries and islands.

2.4 Results

The mean grain size of the PEC surface sediments — described here in terms of phi (ϕ) — ranges from fine silt to very coarse sand. The sand percentage is lower in Antonina Bay (3 %) than in Paranaguá Bay (100 %). The finest sediments ($4\phi - 7\phi$) occur along the west-east axis in Antonina Bay and the area facing the city of Paranaguá (Figure 2.1). Coarser sediments are observed in the center of the estuary and at the southern mouth of the complex. In addition, coarse silt can be found in the mouths of the Nhundiaquara and Cachoeira rivers (Figure 2.1).

2.4.1 End-member modeling analysis (EMMA)

According to the BasEMMA model, the PEC surface sediments can be subdivided into three end-members subpopulations: EM 1, EM 2, and EM 3 (Figure 2.3a). Their modes are 4.75ϕ ($37.2 \mu\text{m}$) for EM 1, 2.75ϕ ($149 \mu\text{m}$) for EM 2 and 2ϕ ($250 \mu\text{m}$) for EM 3. Regarding their spatial distribution, EM 1 has a higher percentage of occurrence ($>50\%$) between Antonina Bay and Paranaguá Port (Figure 2.3b). In contrast, EM 2 mainly occurs ($>50\%$) in the Cotinga Island regions (Figure 2.3c), and EM 3 has a higher occurrence ($>50\%$) in the Paranaguá and Laranjeiras Bays, as well as at the center of the estuary (Figure 2.3d).

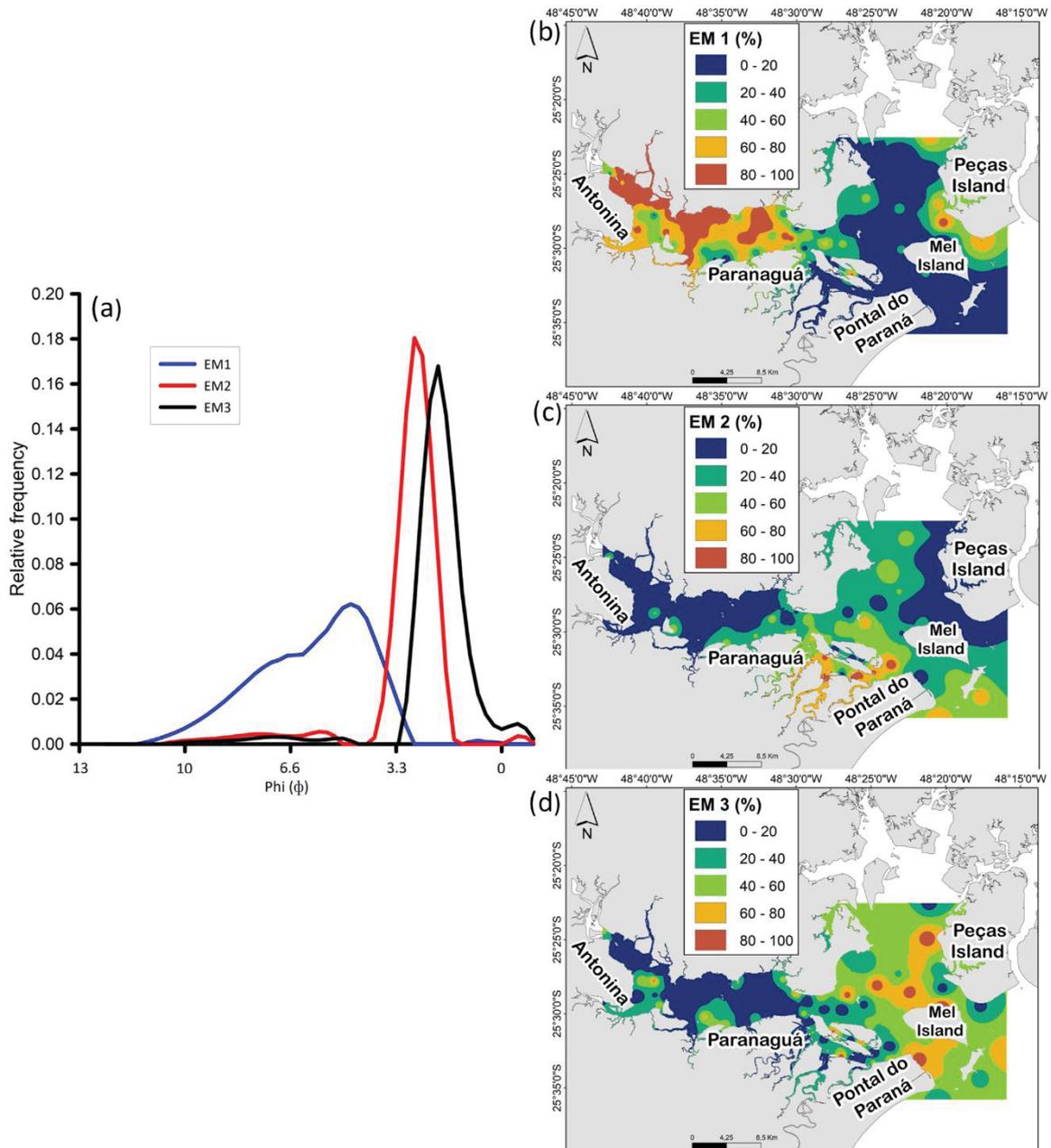


Figure 2.3 - (a) BasEMMA result indicating each EM and their respective grain size ranges (ϕ); (b,c,d) Distribution maps of the percentage distribution of each EM in the PEC.

2.4.2 Grain Size Trend Analysis (GSTA)

The net grain transport results obtained through the GSTA model are shown in Figure 2.4. The sediment transport direction in Antonina Bay is predominantly west-east, while the vectors in Laranjeiras Bay have a north-south direction, that is, towards the center of

the estuary. In Paranaguá Bay and the PEC's northern and southern mouths, the vectors of net sediment transport have an east-west direction towards the inner estuary.

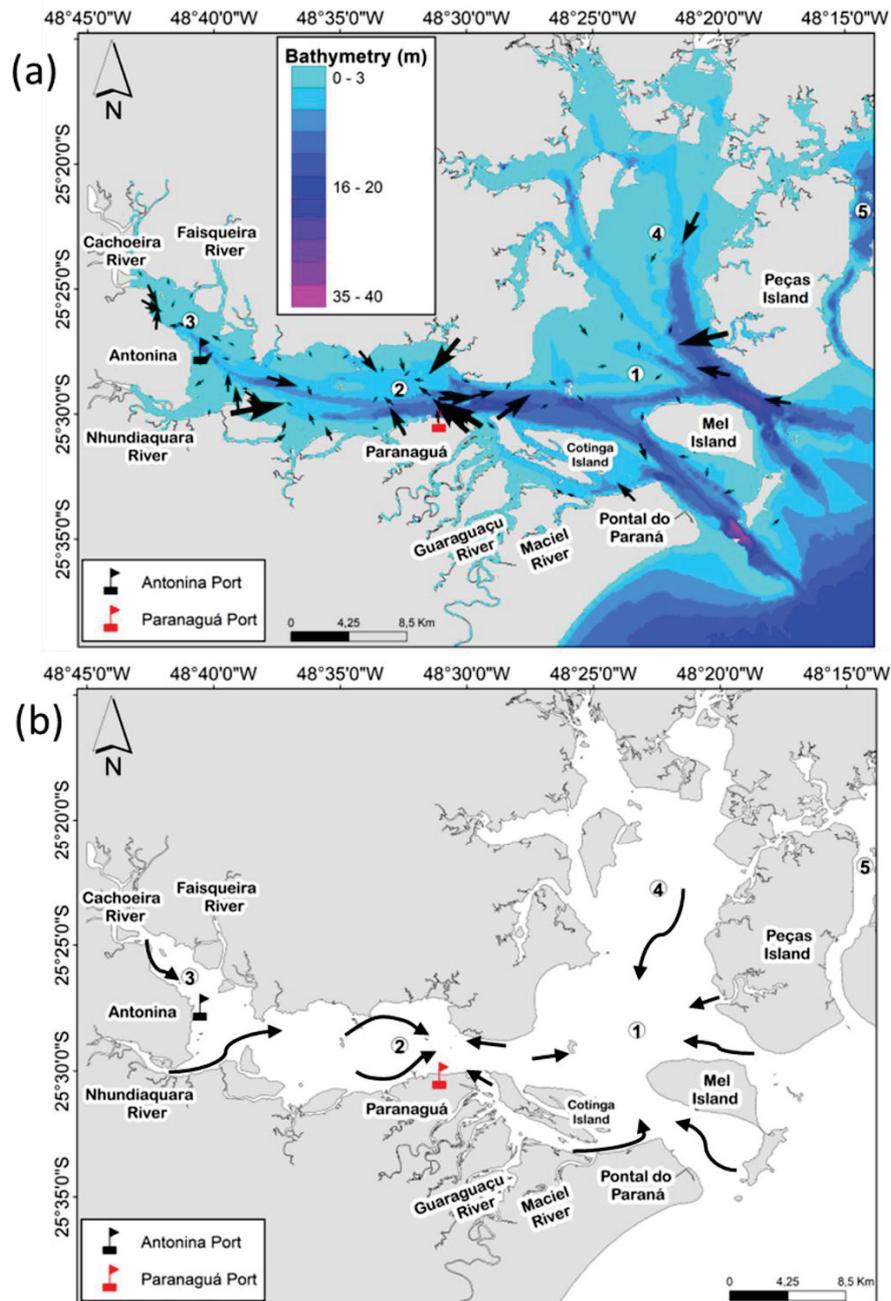


Figure 2.4 - (a) Bathymetry field of the Paranaguá Estuarine Complex interpolated with the spatial distribution of vectors (black arrows) resulting from the GSTA, which indicate the direction and intensity of net sediment transport (b) interpretation of net sediment transport. The numbers (1-5) represent the PEC sectors according to Noernberg et al. (2006): (1) mixture, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras, and (5) Pinheiros.

2.5 Discussion

Mathematical models using grain size data are valuable for identifying sediment sources and understanding the processes associated with their transport in coastal and marine environments. In estuarine environments, comparing model results with additional variables — such as the sediments' geochemical signature — allows for a more robust interpretation of the possible sediment sources. In these environments, the spatial distribution heterogeneity of the grain size parameters is a consequence of the hydrodynamic interaction between river flows and tidal and wave currents. In this sense, to interpret the EMMA and GSTA results, we considered the sediments' geochemistry and the PEC's hydrodynamic conditions.

Our findings indicate that the EM 1 subpopulation sediments, which are finer, are mainly deposited in Antonina Bay (Figure 2.3b). The spatial distribution demonstrates that the Nhundiaquara and Cachoeira rivers contribute to this subpopulation. Once in the bay, these grains are transported and deposited between the upstream and the estuary TMZ (Figure 2.4a). According to Angeli et al. (2020), the sediments deposited in Antonina Bay have relatively high K/Rb ratios, indicating rich in recently eroded K-feldspars. Nhundiaquara and Cachoeira rivers are among the main tributaries of the bay, transporting approximately $57.6 \text{ t km}^{-2} \text{ a}^{-1}$ of sediments produced by the weathering of rocks from Serra do Mar (RUTYNA et al., 2020).

The river discharge also influences the hydrodynamic processes and sediment distribution in the PEC (Figure A.1). Annually, the complex receives approximately $200 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ of freshwater, leading to Antonina Bay's pattern of residual bottom circulation that follows the direction of river discharge (NOERNBERG et al., 2006; MARONE et al., 2005). This influence is also evidenced by the GSTA results, which showed that net sediment transport in this region has a west-east direction, indicating the predominant role of river discharge (Figure 2.4).

On the other hand, the EM 2 subpopulation, composed of coarser sediments, is mainly deposited in the south portion of the PEC, are associated with the mouths of rivers near the Cotinga Island, at first being influenced primarily by the tributaries of this region (Figure 2.3c). Cotinga Island rivers' hydraulic gradients are smaller than those of the Cachoeira and Nhundiaquara rivers (NOERNBERG et al., 2006). This pattern could

explain the presence of the coarser terrigenous sourced sediments of EM 2 in this area. In addition, the EM 3 subpopulation, composed of very coarse sediments, is mainly deposited in the eastern portion of the PEC, between the center of the estuary and Laranjeiras Bay (Figure 2.3d). These sediments present lower Fe/Ca ratios, indicating that the region is strongly influenced by marine sediments (ANGELI et al., 2020). Additionally, the higher Ti/Al ratios sediments (ANGELI et al., 2020) indicate a more energetic condition, probably associated with stronger currents that favor the deposition of coarser sediments.

Our EM results suggest that the PEC sedimentary processes are closely related to estuarine hydrodynamic. However, if circulation is the primary factor influencing PEC's sediment deposition, we would expect EM subpopulation grain size ranges to correspond to the four Noernberg et al. (2006) sectors (Figure A.2). Instead, what we observe is that EM subpopulation grain size ranges reflect the interplay between circulation patterns and sediment source (Figure 2.3).

The net sediment transport results obtained through the GSTA indicate that sediment transport is from east to west (i.e., from the PEC mouth to the interior of the estuary) (Figure 2.4). This behavior agrees with the inward direction of the residual bottom circulation and sediment transport observed by Cruz and Noernberg (2020) in the southern mouth of the estuary. In their study, Noernberg et al. (2007) evidenced a clear relationship between high wave energy events and increased sediment transport in the southern mouth navigation channel.

The predominance of the EM 1 subpopulation in the PEC northern mouth is noteworthy. The sediment deposition may be related to the lower energy of bottom currents at this location (Figure A.1). According to Lamour et al. (2004), the increase in the depth of the navigation channel redirected the ebb tide flow to the northern mouth. Since, in sum, the sediment transport is a function of grain size and flow transport capacity (DYER, 1995), this redirection may have influenced depositional processes in the area by (i) allowing a higher transport of suspended particulate matter (MAYERLE et al., 2015); and (ii) decreasing the velocity of the active bottom currents (Figure A.1). These factors enable the deposition of finer sediments at the northern mouth.

The fact that our GSTA vector field of net sedimentary transport is closely related to PEC bathymetry (Figure 2.4a) and with the residual bottom circulation (Figure A.1)

highlights the influence of bathymetry on flow sediment transport capacity. The deeper parts of the PEC are associated with the artificial deepening of the estuary for the navigation channel. Hence, the continuous dredging of the navigation channel results in a change of estuarine sediment transport direction and deposition spatial distribution, mostly directing finer sediments to be transported along the navigation channel and deposited at PEC's northern mouth. In this sense, our findings support previous grain size-based works (e.g., LAMOUR et al., 2004; ANGULO et al., 2006) suggestions of the impact of this activity on sediment transport within the PEC.

Our results suggest that the depositional processes of the PEC respond to the interaction between sediment sources and hydrodynamic patterns, allowing the recognition of three distinct areas: (i) Antonina Bay, where river discharge plays a key role in the input and transport of sediments originating from the Serra do Mar; (ii) the TMZ, where the hydrodynamic balance of river drainage and marine intrusion within the estuary favor the deposition of finer sediments; and (iii) the area downstream of the estuary, where the marine influence on hydrodynamic patterns and sediment sources predominates. Therefore, the PEC presents the three classical zones of the Dalrymple et al. (1992) tripartite model: (i) the inner zone, with hydrodynamic influence dominated by river runoff; (ii) the central zone, with low energy and where the river and marine processes (wave + tidal) are approximately equal; and (iii) the outer portion, dominated by oceanic forcings such as waves and tidal currents.

It is important to highlight that the PEC is a complex estuary with some river-dominated bays and tidal currents acting as the primary forcing of hydrodynamic patterns (CRUZ & NOERNBERG, 2020; MANTOVANELLI et al., 2003). However, depositional and sedimentary patterns suggest that PEC fits the classification of a wave-dominated estuary, as the Dalrymple et al. (1992) model. The classification of the PEC as wave-dominated does not neglect tidal influence, as a typical wave-dominated estuary presents a very well-defined tripartite model. At the estuary mouths, the constant energy of the tides is potentiated by the waves' energy, accentuating the sediments' resuspension. In high-energy events, sediment transport is into the estuary, while in normal conditions, it is alongshore (NOERNBERG, 2007). Additionally, based on the PEC Holocene stratigraphy, Lessa et al. (1998) classified it as a wave-dominated estuary. For these reasons, we recommend that future works analyze physical, geomorphological, and sedimentary variables together.

2.6 Conclusions

For the first time in a study, mathematical models based on grain size data were applied to analyze the characteristics of the PEC. Comparison with geochemical and hydrodynamic data suggests that our results — obtained from the BasEMMA and GSTA models — are robust for identifying source-to-sink paths of sediment in this region.

The spatial distribution of the EM 1 subpopulation upstream of the estuary suggests that the Serra do Mar rocks are the primary source of fine sediments for the PEC. The spatial distribution of coarser sediments near Cotinga Island (EM 2) is predominantly influenced by the river in this region. Furthermore, the presence of EM 3 deposits near the PEC mouth and Laranjeiras Bay highlights the influence of marine processes. The net grain transport obtained from the GSTA model follows the hydrodynamic patterns resulting from the interaction between river discharge and oceanic forcings, creating a depositional pattern that corroborates the tripartite model proposed by Dalrymple et al. (1992).

Our results support the classification of the PEC as a wave-dominated estuary. Moreover, they prove that the employed mathematical tools can facilitate understanding the hydrodynamic interaction with depositional processes in a dynamic environment. Thus, we recommend that future works apply these models in time series and environmental monitoring studies to improve our ability to assess the impact of anthropogenic activities (i.e., dredging activities in navigation channels, such as in the ports of Antonina and Paranaguá). Furthermore, it is worth noting that using these tools in environments where forcings and economic and ecological importance vary (e.g., port regions) is favorable to ensuring optimal environmental monitoring.

Acknowledgments

We thank the National Council for Scientific and Technological Development (CNPq) and the Ministry of Science, Technology, and Innovations (MCTI) for funding the project "Historical overview and future perspectives facing the occurrence of chemical stressors present in the Paranaguá Estuarine Complex" (CNPq/MCTI 441265/2017-0). We are also grateful for the support of the *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel) with the DS master's scholarship – Brazil (CAPES) – Funding Code 001. In addition, we thank

Guilherme A. S.Franz for providing the background residual circulation map and the reviewers for enriching our discussion. The authors would also like to thank the Academic Publishing Advisory Center (*Centro de Assessoria de Publicação Acadêmica*, CAPA – www.capa.ufpr.br) of the Federal University of Paraná (UFPR) for assistance with English language translation and developmental editing. M.M. de M. acknowledges CNPq for the Research Grant no. 300962/2018-5.

Appendix A1.

This figure represents the residual bottom circulation of the Paranaguá Estuarine Complex. The residual currents are obtained by the hourly average hydrodynamical model from September 2020 to April 2022, with horizontal grid resolutions of 200 m x 200 m. The hydrodynamical model integrates an operational modeling system, the Brazilian Sea Observatory. Additional information about the modeling system can be found in Franz et al. 2021.

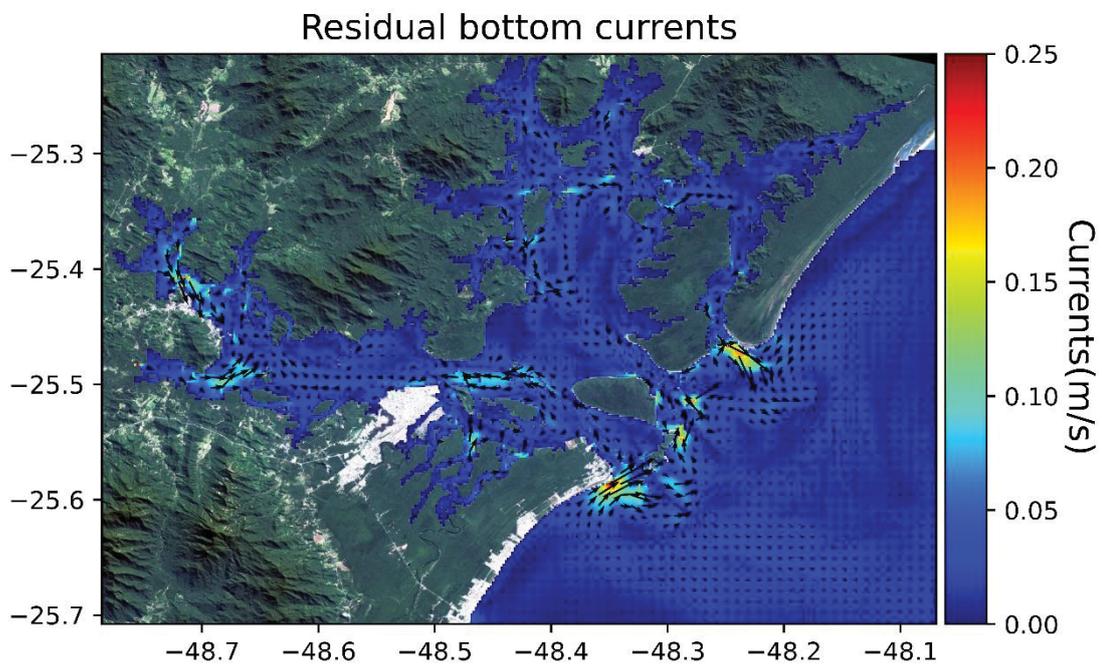


Figure A. 1– Residual bottom circulation map of the Paranaguá Estuarine Complex -PR, by Guilherme A. S. Franz.

Appendix A2.

This figure represents a comparison between the grain size ranges seen in (a) End-Members modeling results and (b) one sample of each section of the Paranaguá Estuarine Complex (PEC) subdivide by Noernberg et al. (2006). The author defines five principal sections; here, we present the curves of four of them because of a lack of sampling in Pinheiros bay.

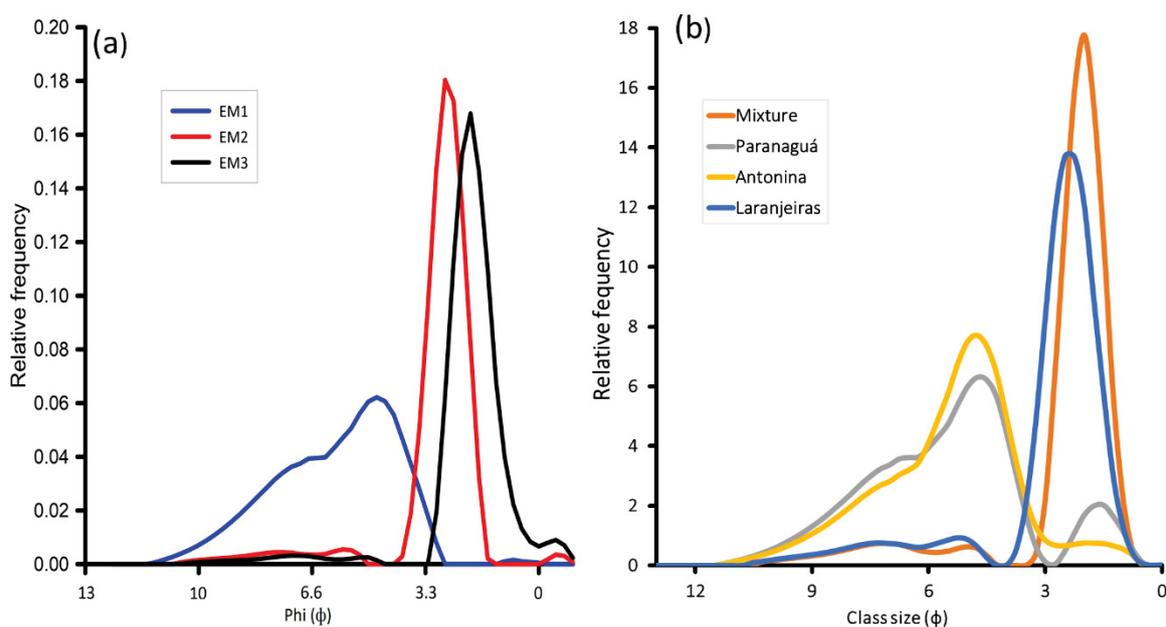


Figure A.2– (a) EM subpopulation grain size ranges (ϕ); and (b) Grain size ranges from samples representing the four Noernberg et al. (2006) PEC sectors: (1) Mixture, (2) Paranaguá, (3) Antonina, (4) Laranjeiras.

References

Following the normative of the Federal University of Paraná, all cited references are at the end of this document.

3. CAPÍTULO II

Título provisório em português: Uma perspectiva histórica da influência antrópica em um estuário subtropical (sítio RAMSAR)

Título em inglês: *A historical perspective of anthropic influence in a subtropical estuary (RAMSAR site)*

Revista pretendida: Science of The Total Environment, Online ISSN: 1879-1026, IF 10,753, Qualis CAPES A1

Autores: Ítalo M Paladino, Renata H. Nagai

RESUMO

A planície litorânea do Paraná é alvo de intensa ocupação humana desde o século XVII. Hoje, a região possui grande importância econômica, baseada principalmente em atividades portuárias e industriais, além de seu uso para turismo e extração de recursos naturais vivos, particularmente desenvolvidas no entorno do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP). Dentro deste contexto, este trabalho tem como objetivo fornecer um panorama histórico das condições ambientais do CEP nos últimos 120 anos, buscando avaliar a influência que mudanças naturais e antrópicas sobre este ambiente. Para isso, análises granulométricas e geoquímicas (razões Fe/Ca, K/Ca, Fe/K e K/Rb) foram realizadas em três registros sedimentares, coletados ao longo do gradiente Leste-Oeste do CEP. Os resultados sugerem que durante o período de 1900-1970, a intensificação no desenvolvimento humano no entorno da Baía de Antonina e Paranaguá potencialmente contribuíram para as mudanças na hidrodinâmica local e nos processos deposicionais, indicados pela presença de sedimentos grossos nessa região e maiores valores das razões Fe/Ca e K/Ca. Após 1970, a mudança abrupta na granulometria observada em todos os registros sedimentares e o progressivo aumento nos valores das razões Fe/K e K/Rb, apontam para um aumento no aporte sedimentar finos oriundos da Serra do Mar e sugerem que, nos últimos 50 anos, as mudanças de uso e ocupação do solo no entorno do CEP tiveram um impacto mais significativo em seus processos deposicionais do que mudanças no regime de precipitação global, associados a mudanças climáticas em 1970.

Palavras-chave: reconstrução ambiental, razões elementares, modelagem de *End-member*, dinâmica estuarina

ABSTRACT

The coastal plain of Paraná has been subject of intense human occupation since the 17th century. Today, the region has great economic importance, mainly due to port and industrial activities, tourism and the natural living resources extraction, particularly developed around the Paranaguá Estuarine Complex (PEC). This work aims to provide a historical overview of the PEC's environmental conditions over the last 120 years, seeking to evaluate the influence that natural and anthropogenic changes have on this environment. For this, grain size and geochemical analyzes (Fe/Ca, K/Ca, Fe/K, and K/Rb ratios) were carried out in three sedimentary records, collected along the East-West gradient of the PEC. The results suggest that between 1900 and 1970, the intensification of human development around Antonina and Paranaguá Bay potentially contributed to changes in local hydrodynamics and depositional processes, indicated by the presence of coarser sediments and higher values of the Fe/Ca and K/Ca ratios in this region. After 1970, the abrupt change in grain size observed in all sedimentary records and the progressive increase in the values of Fe/K and K/Rb ratios point to an increase in the input of fine sediments from Serra do Mar and suggest that, in the last 50 years, changes in land use and occupation around the PEC had a more significant impact on its depositional processes than changes in the global precipitation regime, associated with the 1970 climate changes.

Key-words: environmental reconstruction, elemental ratios, end-member modelling, estuarine dynamics

3.1 Introdução

Estuários são ambientes deposicionais de transição entre o continente e o oceano. A maioria dos estuários modernos têm sua gênese associada à última variação do nível médio do mar que ocorreu durante o final da Época Pleistoceno (DYER, 1995). Esses ambientes deposicionais são conhecidos pela sua alta complexidade e têm seus processos regulados pela diluição da água oceânica em água doce (HIBMA et al., 2004; VILAS et al., 2014). A geomorfologia estuarina resulta da interação entre o aporte de sedimentos, primariamente do continente, e processos hidrodinâmicos, fluviais e marinhos (DYER,

1995). Historicamente essas regiões são ocupadas pelo homem e utilizadas para o desenvolvimento de atividades sócio-econômicas (i.e., atividades portuárias e industriais, obtenção de recursos naturais, entre outras) devido a sua localização geográfica, que permite comunicação livre com o oceano e abrigo de intempéries meteorológicas. Neste sentido, as regiões estuarinas foram utilizadas no processo de expansão das colônias, que buscavam aumentar seus territórios e explorar recursos minerais (PIERRI et al. 2006).

A presença do Complexo Estuarino de Paranaguá (CEP) na planície costeira do estado do Paraná facilitou o desenvolvimento das atividades de mineração do estado. A ocupação da região teve início em 1614, pelas Ilhas de Superagui e Cotinga, num período em que barcos e/ou navios representavam o principal meio de transporte (MARTINS, 1995; SERRA, 1992). Atualmente, o entorno do CEP abriga uma diversidade de atividades econômicas como pesca, turismo, industriais, além de terminais de combustíveis e do terceiro maior terminal portuário de exportação e importação de grãos do país (MARTINS et al., 2010). O CEP possui ainda um importante papel ecológico, abrigando vasta biodiversidade (p.e., dunas, manguezais, costões rochosos e áreas de restinga) e uma porção significativa da Mata Atlântica (LANA, et al., 2001; ESTADES, 2003). Ainda assim, pouco se sabe sobre as condições ambientais do CEP no período anterior à ocupação humana e quais foram os impactos do uso e ocupação do entorno do CEP na sua qualidade ambiental, o que representa um fator limitante no diagnóstico do estado de saúde desse importante ecossistema do litoral do Paraná.

Neste contexto, o objetivo deste trabalho é melhor compreender a influência de mudanças em processos naturais (p.e., regime de precipitação e circulação estuarina) e antrópicos (uso e ocupação do solo) sobre os processos deposicionais do CEP nos últimos 120 anos. Para isso, aplicamos uma avaliação integrada de dados granulométricos e geoquímicos de três registros sedimentares coletados ao longo do gradiente estuarino do CEP (T3 – Baía de Antonina, T2 – Baía de Paranaguá e T5 – Ilha da Cotinga). A perspectiva histórica sobre como mudanças ambientais naturais e antrópicas influenciam os processos deposicionais e hidrodinâmicos do CEP, permite contextualizar o cenário atual do CEP e subsidia futuras análises de qualidade ambiental, o que auxilia o alcance do resultado societal “*Um oceano limpo*” esperado para a Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (2021-2031) da Organização das Nações Unidas.

3.2 Área de estudo

A planície costeira do Estado do Paraná, localizado no sudeste do Brasil, é formada principalmente por rochas magmáticas e metamórficas que formam o embasamento da Plataforma Sul-Americana, recobertas por sedimentos não consolidados depositados durante o Período Cenozóico (últimos 65 Ma – milhões de anos) particularmente nos últimos 2,8 Ma (MINEROPAR, 2001; BESSER et al., 2021). A região juntamente com a Serra do Mar e o primeiro planalto do Estado do Paraná, forma o chamado Escudo Paranaense (MINEROPAR, 2001). O CEP ($25^{\circ}00'S - 25^{\circ}35'S$ e $48^{\circ}15'W - 48^{\circ}40'W$), localizado no litoral norte do Paraná (Figura 3.1), ocupa uma área de aproximadamente 552km^2 , sendo classificado com um estuário parcialmente misturado tipo b (NOERNBERG et al., 2006). A profundidade média do estuário é de 5m, exceto pelo canal artificialmente dragado que pode chegar a 33m de profundidade (MARONE et al., 2005; LAMOUR et al., 2004).

Os processos hidrodinâmicos são influenciados principalmente pela descarga fluvial e ondas e marés (NOERNBERG et al., 2006). Os principais tributários para região, localizados na Baía de Antonina, são os rios Cachoeira, Nhundiaquara e Faisqueira, com uma descarga média anual de $200\text{m}^3\text{ s}^{-1}$ (MARONE et al., 2005). O regime de marés é semi-diurno, variando durante a sizígia de 1,7 a 2,7m na entrada do estuário e à montante, respectivamente (MARONE & JAMIYANNA, 1997).

Os processos sedimentares do CEP são principalmente controlados pela interação de fluxos fluviais, de maior importância na região da Baía de Antonina, e por intensas correntes geradas por ondas e marés, particularmente na região de desembocadura do estuário favorecendo a deposição de sedimentos mais grossos (ANGELI et al., 2020a; PALADINO et al., 2022). Os sedimentos de fundo são classificados como pobremente selecionados, com pouca presença de matéria orgânica e carbonato de cálcio (LAMOUR et al., 2004). A distribuição granulométrica que pode ser subdividida em 3 setores: Baía de Antonina, Zona de Máxima Turbidez e Centro de do estuário e Baía de Laranjeiras (PALADINO et al., 2022). Segundo estes autores, a maior parte dos sedimentos mais finos (silte e argila), oriundos do intemperismo de rochas que compõem a Serra do Mar, estão depositados nas baías de Antonina e Paranaguá; enquanto sedimentos mais grossos (areia muito grossa) ocorrem associados a Baía de Laranjeiras e na região próxima à Ilha da Cotinga.

A distribuição de fácies geoquímicas do CEP está associada às características granulométricas dos sedimentos superficiais. Os sedimentos siltosos depositados na Baía de Antonina, refletem o aporte de sedimentos recém-erodidos da Serra do Mar, ricos em K (K-feldspatos), enquanto a Baía de Paranaguá, marcada por maior porcentagem de argilas, associados à presença da Zona de Máxima Turbidez (ZMT) (ANGELI et al., 2020b). Em direção à desembocadura do CEP, menores valores da razão Fe/Ca indicam a presença de frações mais biogênicas, associadas a uma maior influência de processos marinhos (principalmente marés), que também influenciam de forma predominante a foz do CEP e a Baía das Laranjeiras, onde há pouca deposição de lama (ANGELI et al., 2020b).

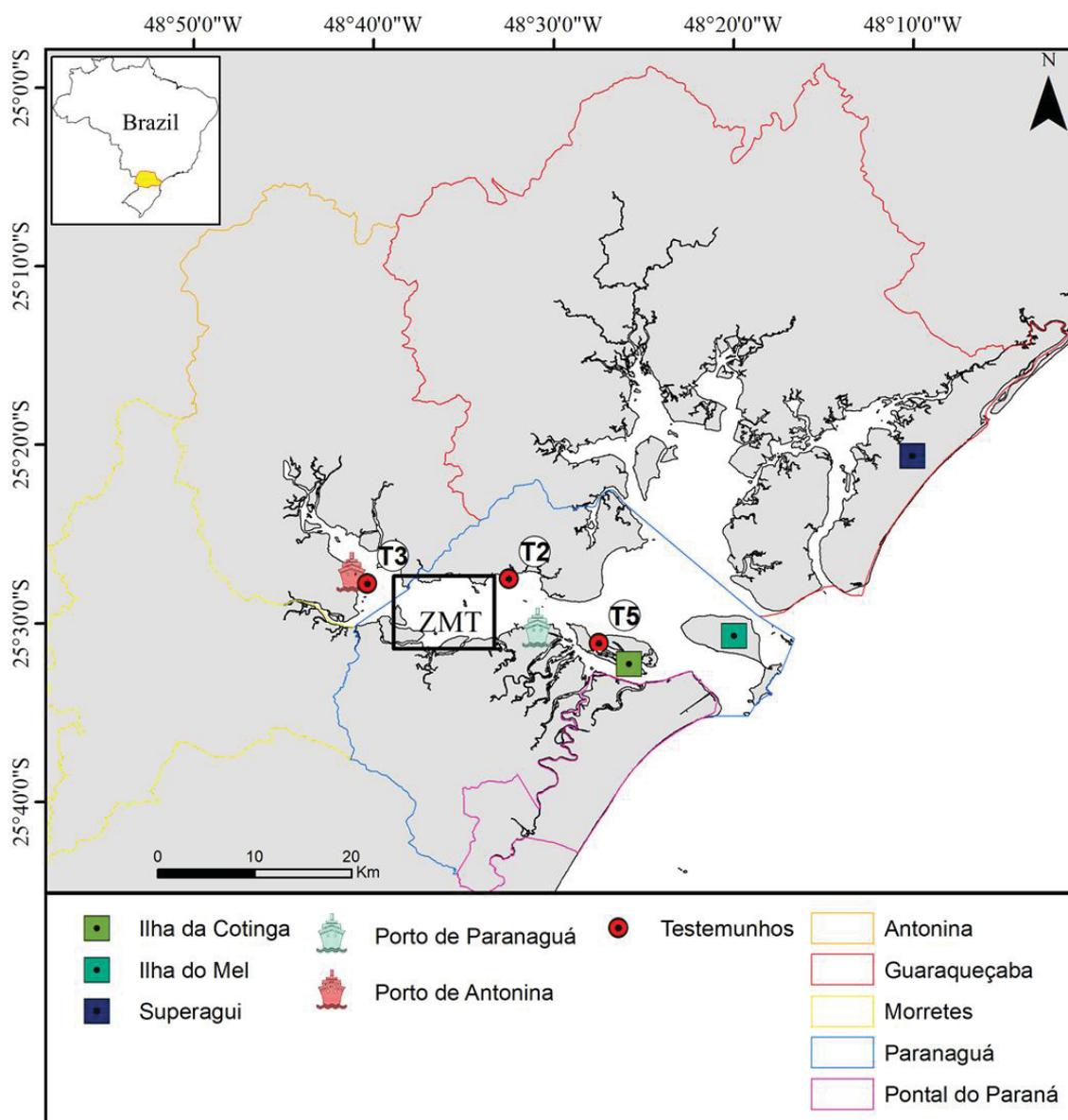


Figura 3.1 – Mapa de localização do Complexo Estuarino de Paranaguá e dos testemunhos (T2, T3 e T5 – pontos vermelhos com cruz) utilizados neste trabalho. As linhas coloridas marcam os limites municipais da região, círculos com barco denotam a localização dos Portos de Antonina (amarelo) e Paranaguá (vermelho) e quadrados com pontos no centro indicam a localização das Ilhas da Cotinga (verde), do Mel (rosa) e dos Superagui (vermelho).

3.3 Materiais e métodos

O material analisado neste estudo provém de três testemunhos (T2 – Baía de Paranaguá, T3 – Baía de Antonina e T5 – Ilha da Cotinga, Anexo-1) coletados em 2019,

com auxílio de um *gravity corer*, ao longo do eixo L - S do CEP (Tabela 3.1, Figura 3.1). Após a análise de XRF, os testemunhos foram subamostrados em intervalos regulares de 2cm, congeladas, liofilizadas e armazenadas em potes plásticos para posteriores análises.

Tabela 3.1 – Dados de localização geográfica dos locais de coleta dos testemunhos, com a profundidade da lâmina d'água (m) e o comprimento da coluna sedimentar recuperada (cm).

Testemunho	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Profundidade (m)	Recuperação sedimentar (cm)
T2	-25,45815	-48,54112	1,2	246
T3	-25,46232	-48,67268	1,9	246
T5	-25,51817	-48,45812	1,6	239

3.3.1 Geocronologia

A cronologia dos testemunhos foi obtida a partir da obtenção de taxas de sedimentação baseadas no decaimento radioativo do ^{210}Pb e ^{226}Ra . As análises foram realizadas com detector gama da marca EGG & ORTEC, modelo GMX50P, em dezenove amostras dentre os primeiros 100cm dos testemunhos T2, T3 e T5, com picos de 46,52keV para o ^{210}Pb e 609,31 para o ^{214}Bi – que está em equilíbrio secular com o ^{226}Ra para a determinação da atividade desses elementos ao longo das camadas sedimentares, como descrito por Figueira et al. (2006) e Ferreira et al. (2015). As idades foram obtidas com base no modelo CRS (*Constant Rate of Supply*) que considera as taxas sedimentação variáveis ao longo do tempo, e consequentemente, estabelecer um modelo geocronológico () para cada registro sedimentar.

3.3.2 Análises granulométricas e modelo de End-members

As análises granulométricas foram realizadas nos primeiros 100cm da coluna sedimentar dos testemunhos T2, T3 e T5 em alíquotas de 2g de sedimento seco, em amostras livres de carbonatos e matéria orgânica. Para isso, as amostras foram submetidas a acidificação com 10% HCl, para eliminar de carbonatos, e 30% H_2O_2 , para eliminar da matéria orgânica. O tamanho dos grãos foi obtido com o auxílio do granulômetro a laser Malvern Mastersize 2000. Para evitar a floculação de partículas finas, antes de cada

análise, as amostras passam por um banho de ultrassom por 5 minutos. Os dados granulométricos foram reprocessados para obtenção do diâmetro médio dos grãos e da porcentagem de areia, silte e argila utilizando o software *Sysgran 3.0* (CAMARGO, 2006).

A análise de *End-members* foi realizada com base nos dados granulométricos utilizando o modelo estatístico Basic-EM (BasEMMA) (ZHANG et al., 2020). Esta análise é utilizada para um conjunto de dados não-paramétricos e que possuem heterogeneidade espacial/temporal. O modelo, disponível gratuitamente na forma de macro para o software *MS-Excel*[®] (GitHub - oucxd/BasEMMA: *Basic end member model algorithm*), foi desenvolvido por Zhang et al. (2020). O número de *End-Members* (EM) finais foi determinado pela análise do ponto de inflexão da curva cumulativa dos coeficientes progressivos (R^2) (MAHIQUES et al., 2021; PATERSON HESLOP, 2015) (Figura S.3).

3.3.3 Composição elementar dos sedimentos

As análises de Ca, Fe, K e Rb foram realizadas por meio de fluorescência de raios-X (XRF) com o Olympus Delta Professional (XRF), equipado com um ânodo de Au e Ta e potência de 4W. Os resultados da composição elementar por XRF foram aplicados sob a forma de razões elementares, para analisar as relações entre influência marinha-terrígena (razões K/Ca e Fe/Ca) (GOVIN et al., 2012), proveniência dos sedimentos e grau de intemperismo dos sedimentos (razões Fe/K e K/Rb) (ANGELI et al., 2020b).

3.4 Resultados

3.4.1 Testemunho T3 (Baía de Antonina)

O testemunho T3 atinge a idade de 1915 ± 10 em 100cm, com valores de $41,52 \pm 4,10$ Bq.Kg⁻¹ à $6,52 \pm 0,60$ Bq.Kg⁻¹ para o ²¹⁰Pb_{exc} no topo da coluna sedimentar e em 100cm de profundidade, respectivamente (Figura S.1, Figura S.2). As taxas de sedimentação variam ao longo do testemunho de $0,60 \pm 0,06$ cm.a⁻¹ na base, chegando a $6,70 \pm 0,70$ cm.a⁻¹ em 30cm e $0,80 \pm 0,08$ cm ano⁻¹ no topo do testemunho.

O testemunho T3 é composto por sedimentos de tamanho areia média (287µm) à silte muito fino (5,3µm), diâmetro médio de 59,9µm, pobremente selecionados e/ou muito pobremente selecionados (Figura 3.2a). Ao longo do testemunho as porcentagens

máximas e mínimas de areia variam de 2,6% a 86,9%, em 1946 e 1983 respectivamente; enquanto a porcentagem de silte oscila entre 10,0% e 78,0%, em 1984 e 1948, respectivamente.

O BasEMMA revela a presença de três subpopulações granulométricas (EM1, EM2 e EM3) (Figura S.3). O EM1 tem moda em $9,3\mu\text{m}$ (silte fino), o EM2, $177,0\mu\text{m}$ (areia fina) e o EM3, $210,0\mu\text{m}$ (areia fina) (Figura 3.3Figura 3.3a). A porcentagem do EM1 oscila entre 0 e 50% no período de 1937 e 1970, onde tem aumento abrupto em sua porcentagem; entre 1970 e 2000, com subsequente aumento em sua porcentagem de 2010 a 2020 (Figura 3.2b). O EM2, apresenta tendência de aumento em sua porcentagem a partir de 1950 até 1965, onde atinge valores de 70%, seguido por uma diminuição progressiva até meados de 2010 (Figura 3.2c). Enquanto o EM3 apresenta maior porcentagem (~60%) entre 1935 e 1970, com diminuição abrupta em 1970, quando desaparece, exceto em 2004 (16%) e 2017 (9%) (Figura 3.2d).

Os resultados das razões Fe/Ca, K/Ca, Fe/K e K/Rb estão representados na Figura 3.2. A razão Fe/Ca apresenta valores relativamente constantes entre 1937 e 1955, oscilando, respectivamente, entre 6,2 e 2,5. Em 1961 ocorre um aumento nos valores na razão Fe/Ca chegando a 7,5 permanecendo constante com poucas oscilações até 2020. A razão K/Ca ao longo do testemunho, apresenta valores entre 0,9 em 1937 e 0,7 em 1970, atingindo valor máximo de 1,1 em 1989, com subsequente diminuição até atingir 0,8 em 2020. A razão Fe/K apresenta valores relativamente menores entre 1937 e 1970, oscilando entre 5,3 e 9,8 com aumento expressivo em meados de 1970; após 1970, os valores da razão Fe/K oscilam em torno da média de 10,3 atingindo o máximo de 12,3. Em contrapartida, a razão K/Rb apresenta tendência de aumento progressivo ao longo dos últimos 80 anos, com valores de 24,6 em 1937 e 42,2 em 2020.

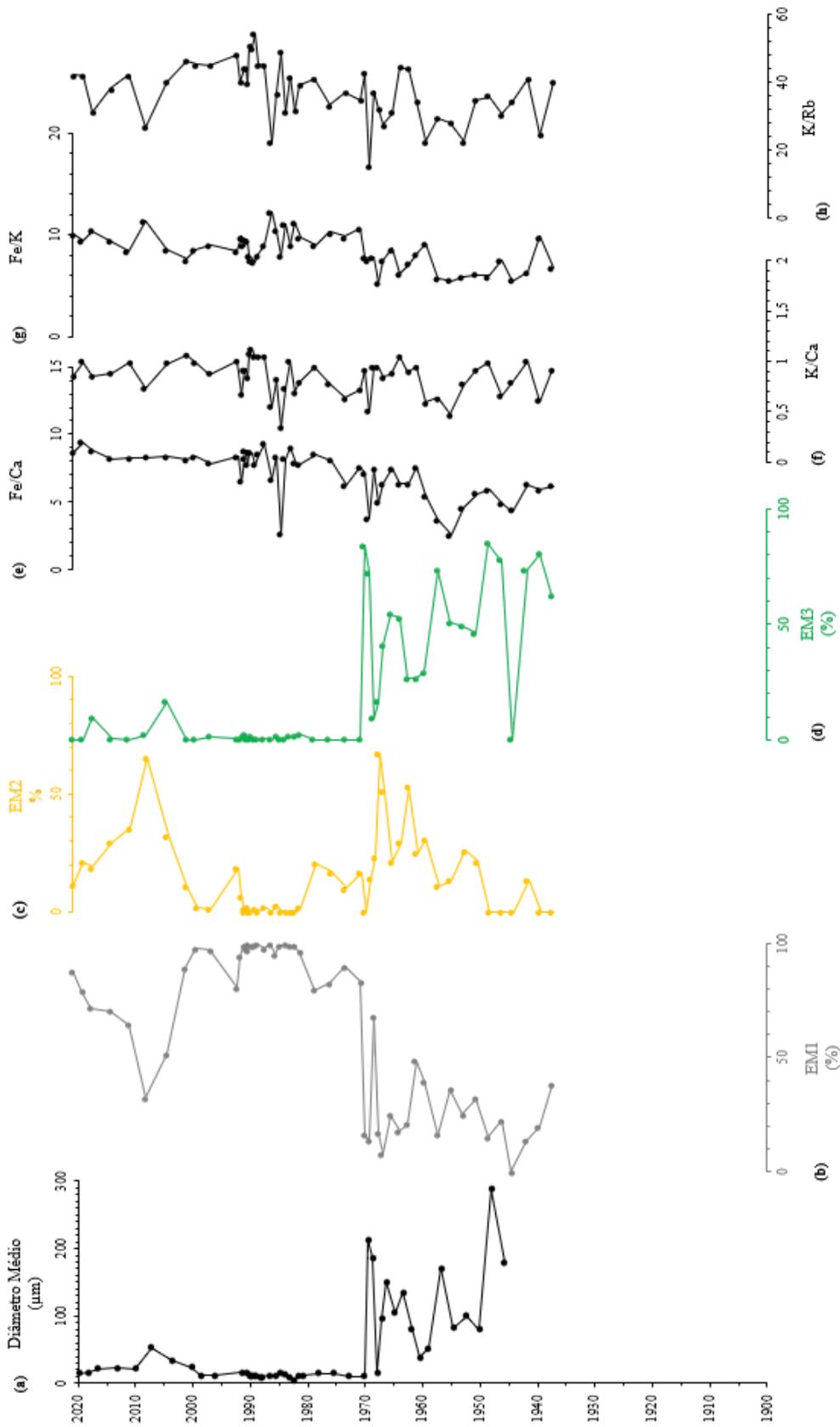


Figura 3.2 – Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 9,3\mu\text{m}$), (c) EM2 ($M_0 = 177,0\mu\text{m}$) e (d) EM3 ($M_0 = 210,0\mu\text{m}$) e das razões (e) Fe/Ca, (f) K/Ca, (g) Fe/K e (h) K/Rb ao longo dos últimos 80 anos observada no testemunho T3 (Baía de Antonina).

3.4.2 Testemunho T2 (Baía de Paranaguá)

O testemunho T2 atinge a idade de 1755 ± 27 em 100cm, com valores de ^{210}Pb de $8,37 \pm 0,84 \text{ Bq.Kg}^{-1}$ e $5,00 \pm 0,50 \text{ Bq.Kg}^{-1}$ no topo da coluna sedimentar e em 100cm de profundidade, respectivamente (Figura S.1, Figura S.2). As taxas de sedimentação variam ao longo do testemunho de $0,11 \pm 0,01 \text{ cm.a}^{-1}$ na base, com um máximo de $3,18 \pm 0,30 \text{ cm.a}^{-1}$ em 46cm chegando a $1,08 \pm 0,11 \text{ cm. ano}^{-1}$ no topo da coluna sedimentar.

Os sedimentos que compõem o testemunho T2 variam de argila grossa ($3,3\mu\text{m}$) à areia média ($414,0\mu\text{m}$), com diâmetro médio de $68,4\mu\text{m}$ (Figura 3.4), e são pobremente selecionados e/ou muito pobremente selecionados. Ao longo da coluna sedimentar as porcentagens máximas e mínimas de areia grossa variam entre 88,3% e 4,3%, em 1977 e 1837, respectivamente, e de silte entre 72,4% e 9,4%, em 1837 e 1977, respectivamente.

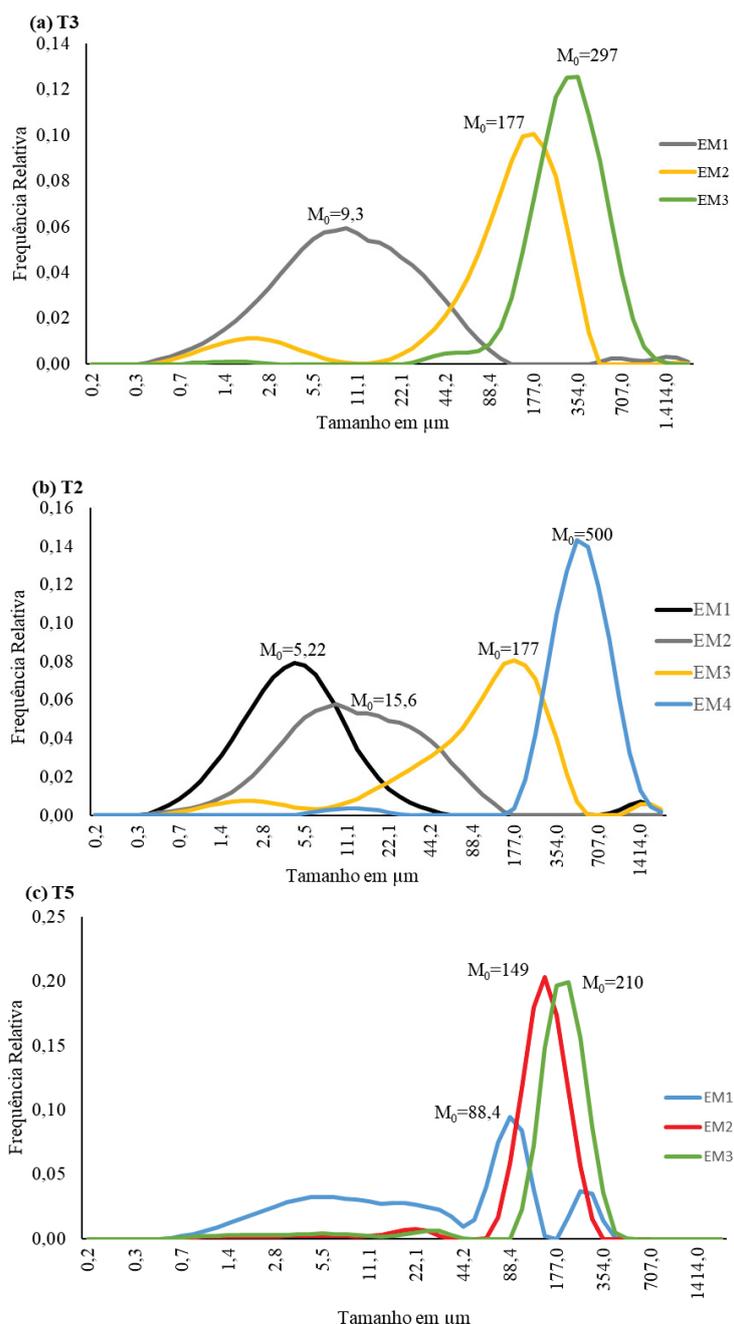


Figura 3.3 – Resultado do BasEMMA para os testemunhos (a) T3, (b) T2 e (c) T5 com seus respectivos *end-members* representados pelos intervalos de tamanho de grão (μm).

O modelo BasEMMA indicou quatro subpopulações granulométricas para no testemunho T2 (Figura S.3). O EM1 tem moda de 5,2 μm (silte fino); o EM2, 15,6 μm (silte médio); o EM3, 177,0 μm (areia fina); e o EM4, 500,0 μm (areia média) (Figura 3.3). O EM1 representa em média 15% da população granulométrica, variando entre 0 e 58% (em 1999), com valores relativamente maiores (>14%) entre 1920 e 1940 (Figura 3.4b). O EM2 apresenta tendência de diminuição progressiva entre 1903 (85%) e 1977

(0%), seguido por aumento progressivo até 2011, quando atinge 26%, e com valores >50% até 2020 (Figura 3.4c). Enquanto o EM 3 apresenta valores médios de 25% ao longo do testemunho, com maiores porcentagens de ocorrência (>40%) em 1910, 1930, 1945 e 2010 (Figura 3.4d). O EM4, apresenta valores médios de 21%, com maiores porcentagens de ocorrência (>50%) entre 1975 e 1992 (Figura 3.4e).

Os resultados das razões elementares Fe/Ca, K/Ca, Fe/K e K/Rb estão representados na Figura 3.4. A razão Fe/Ca apresenta valores superiores a 8,8 entre 1900 e 1940, seguido por diminuição progressiva até 1984, oscilando entre 1,9 e 7,8. Entre 1984 e 2020 a razão Fe/Ca apresenta tendência de aumento chegando a valores de máximos de 7,7. A razão K/Ca, apresenta diminuição em seus valores 1,0 e 0,5 entre 1900 e 1955, apresentando valores relativamente maiores de 1955 a 2020, com valores de 0,3 a 0,9, respectivamente. Enquanto a razão Fe/K, indicativa de condições de intemperismo, apresenta uma tendência de diminuição em seus valores de 1916 a 1922 (9,9 a 4,4, respectivamente), com aumento após 1922 atingindo 7,7 em 2020. A razão K/Rb apresenta comportamento similar a razão K/Ca ao longo do testemunho, apresenta diminuição em seus valores 40,0 e 14,0 entre 1900 e 1967, apresentando valores relativamente maiores após 1967 até 2020, quando atinge valor de 42.

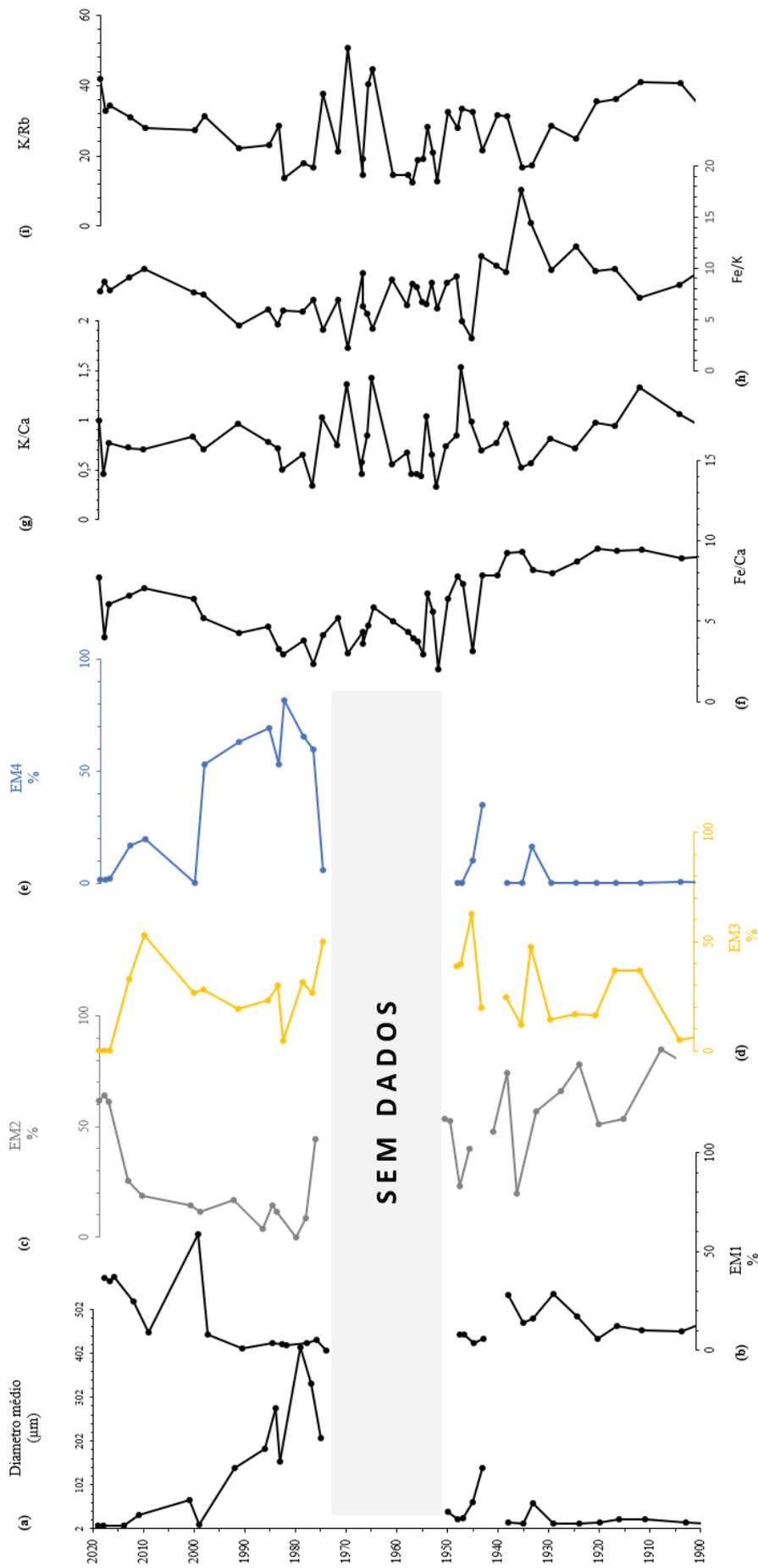


Figura 3.4 - Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 5,2\mu\text{m}$), (c) EM2 ($M_0 = 15,6\mu\text{m}$), (d) EM3 ($M_0 = 177,0\mu\text{m}$) e (e) EM4 ($M_0 = 500,0\mu\text{m}$); e das razões (f) Fe/Ca, (g) K/Ca, (h) Fe/K e (i) K/Rb ao longo dos últimos 120 anos observada no testemunho T2 (Baía de Paranaguá).

3.4.3 Testemunho T5 (Ilha da Cotinga)

Os resultados obtidos para o testemunho T5 estão apresentados na Figura 3.5. Este testemunho atinge idades de 1872 ± 15 em 120 cm com valores de $^{210}\text{Pb}_{\text{exc}}$ de $23,20 \pm 2,30$ Bq.Kg^{-1} à $14,10 \pm 1,40$ Bq.Kg^{-1} , do topo até 100cm, respectivamente (Figura S.1, Figura S.2). As taxas de sedimentação variam ao longo da coluna sedimentar, atingem valores mínimos de $0,10 \pm 0,02$ cm.a^{-1} na base, máximo $5,20 \pm 0,50$ cm.a^{-1} em 24cm e $1,80 \pm 0,20$ cm.ano^{-1} no topo do testemunho.

O tamanho dos grãos dos sedimentos que compõem o T5 varia de silte grosso ($50\mu\text{m}$) à sedimentos mais grossos – areia fina ($210,4\mu\text{m}$). Com diâmetro médio de $127,1\mu\text{m}$ classificados como moderadamente selecionados a pobremente selecionados (Figura 3.5a). Ao longo do testemunho o conteúdo de areia varia de 93,5% a 61,3%, em 1946 e 1986, respectivamente, e de silte entre 26,5% e 4,5%, em 1986 e 1946, respectivamente.

Com base nos resultados do BasEMMA foram determinadas três subpopulações (Figura S.3). O EM1 tem moda de $88,4\mu\text{m}$ (areia muito fina); o EM2, $149\mu\text{m}$ (areia fina); e o EM3, $210\mu\text{m}$ (areia fina) (Figura 3.3). O EM1, apresenta valores relativamente menores ($<20\%$) entre 1916 e 1970, e valores $>40\%$ após 1970 até 2020 (Figura 3.5b). Enquanto o EM2 apresenta valores $>80\%$ entre 1925 e 1970, seguido por diminuição progressiva em suas porcentagens, até atingir 45% em 1985, com novo aumento chegando a valores próximos a 90% de ocorrência em 2020 (Figura 3.5c). O EM3, composto por areias finas, possui as menores porcentagens de ocorrência ao longo do testemunho, com valores $<20\%$ (Figura 3.5d).

As razões Fe/Ca e K/Ca apresentam um aumento progressivo em seus valores de 1915 a 1975, de 2,3 e 0,4 para 5,4 e 1,0, respectivamente (Figura 3.5e, f). Entre 1975 e 1989, os valores das razões Fe/Ca e K/Ca diminuem atingindo 2,7 e 0,4 em 1989, respectivamente. A diminuição nos valores de Fe/Ca e K/Ca é seguida por aumento relativo após 1989, com valores médios de 3,86 e 0,68, respectivamente. Enquanto a razão Fe/K apresenta valores relativamente menores em torno da média 5,6 entre 1915 e 1960, seguido por aumento nos valores da razão, que oscilam em torno da média 6,3 (Figura 3.5g). A razão K/Rb, possui padrão semelhante a razão Fe/K, com valores relativamente menores entre 1915 e 1975 (média $\sim 35,0$), seguido por tendência de aumento progressivo em seus valores até 2017, quando tem valor de 47,6 (Figura 3.5h).

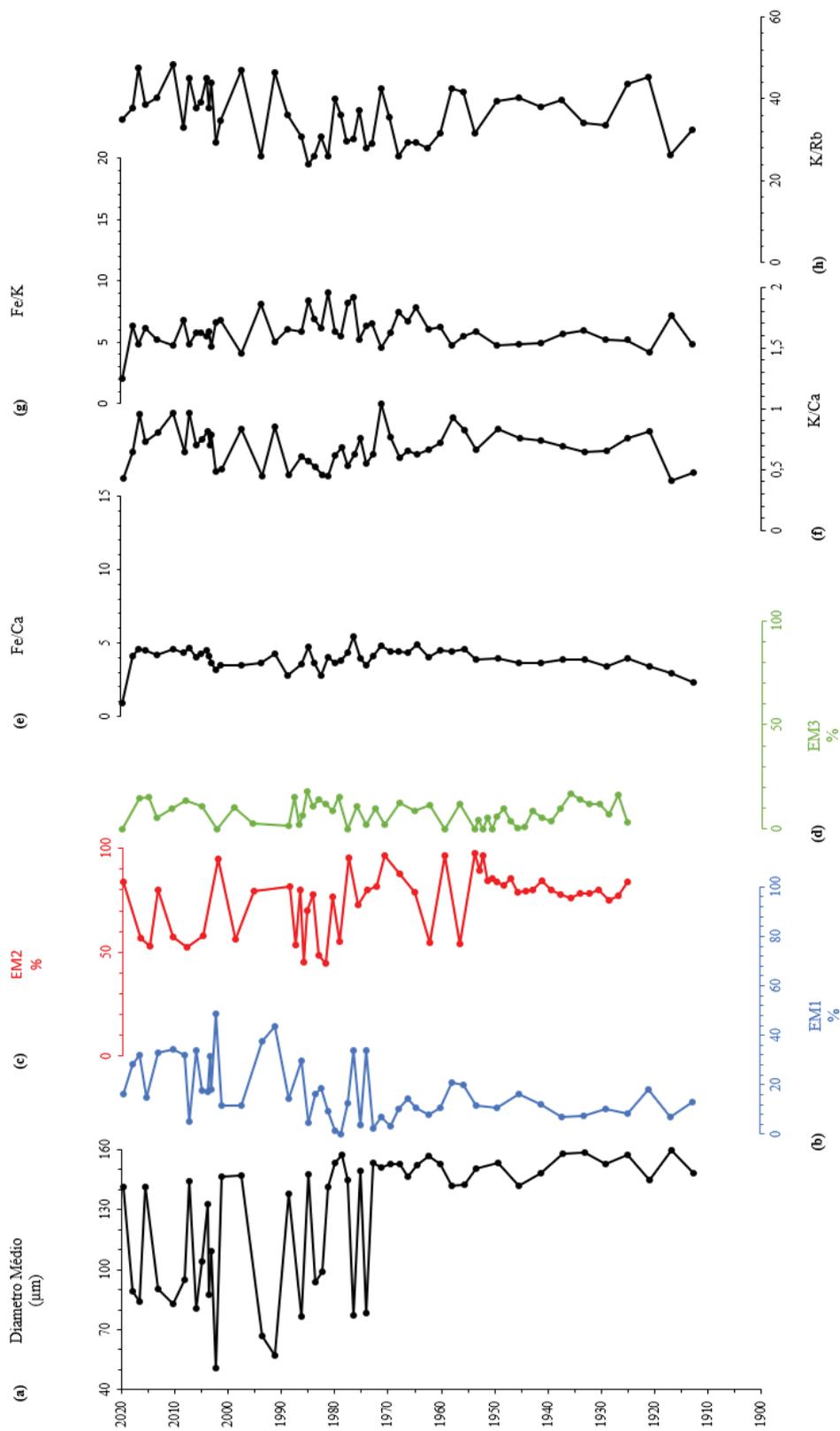


Figura 3.5 – Variação do (a) diâmetro médio dos grãos (μm), porcentagem das subpopulações granulométricas (b) EM1 ($M_0 = 88,4\mu\text{m}$); (c) EM2 ($M_0 = 149,0\mu\text{m}$); e (d) EM3 ($M_0 = 210,0\mu\text{m}$) e das razões (e) Fe/Ca, (f) K/Ca, (g) Fe/K e (h) K/Rb ao longo dos últimos 110 anos observada no testemunho T5.

3.5 Discussão

A reconstrução de condições ambientais no passado é uma ferramenta importante para a contextualização da qualidade ambiental de regiões costeiras e estuarinas, auxiliando na compreensão da avaliação das respostas desses ambientes a mudanças naturais e/ou antropogênicas. A avaliação integrada de diferentes *proxies* permite uma interpretação mais robusta de possíveis mudanças de fontes sedimentares e de processos hidrodinâmicos que ocorreram no passado do CEP; auxiliando no melhor entendimento das respostas ambientais frente a presença de estressores antrópicos.

Em regiões estuarinas os processos sedimentares respondem ao aporte de sedimentos associados a diferentes fontes e processos hidrodinâmicos. No CEP, a interação desses fatores resulta na deposição de sedimentos de composição geoquímica (ANGELI et al., 2020b) e granulométrica em distintos setores (PALADINO et al., 2022). Os sedimentos superficiais do CEP são compostos por três principais subpopulações granulométricas (com modas em 37,5 μ m, 149,0 μ m, e 250,0 μ m) (PALADINO et al., 2022). Os nossos resultados mostram a presença de subpopulações granulométricas (Figura 3.3) nos testemunhos analisados semelhantes àquelas encontradas por Paladino et al.(2022), para os sedimentos superficiais do CEP. Todos os testemunhos analisados apresentam subpopulações representativas de sedimentos mais grossos (areia fina); enquanto apenas os testemunhos T3 (Baía de Antonina) e T2 (Baía de Paranaguá), localizados nas porções mais internas do estuário, apresentam subpopulações granulométricas mais finas (silte).

As variações nas porcentagens das diferentes subpopulações granulométricas encontradas ao longo dos registros sedimentares das Baías de Antonina e Paranaguá sugerem que, ao longo dos últimos 120 anos, a deposição de sedimentos nestes setores do CEP sofreu influência de mudanças na fonte de sedimentos oriundos da Serra do Mar e/ou nas condições hidrodinâmicas locais. Enquanto, a ausência de sedimentos mais finos no testemunho T5 (Ilha da Cotinga) sugere que esta região não recebeu aporte significativo de sedimentos oriundos da Serra do Mar nos últimos 110 anos; e teve como fonte principal de sedimentos os pequenos cursos fluviais do entorno da Ilha da Cotinga e de fontes marinhas.

De maneira geral, as razões elementares obtidas nestes três registros sedimentares apresentam padrão semelhante ao encontrado para os sedimentos superficiais descrito por Paladino et al. (2022). Seguindo o gradiente estuarino, os testemunhos coletados nas

Baías de Antonina (T3) e Paranaguá (T2) apresentam maiores valores das razões elementares associadas a influência continental (Fe/Ca e K/Ca) do que o testemunho coletado na Ilha da Cotinga (T5). Ainda, os maiores valores da razão K/Rb são, de maneira geral, encontrados no testemunho T3 (Baía de Antonina), onde há maior aporte de feldspatos ricos em K recém-erodidos (ANGELI et al., 2020b); e valores mais baixos da razão K/Rb no testemunho T2 (Baía de Paranaguá), como resultado da maior deposição de argilosos na ZMT (ANGELI et al., 2020b). Neste sentido, a avaliação integrada destes três testemunhos nos permite avaliar a evolução histórica dos processos deposicionais do CEP. Nossos resultados sugerem que esta evolução histórica pode ser dividida em duas fases distintas: entre 1900 e 1970 e de 1971 a 2020; cuja transição ocorre de forma abrupta (Figura 3.2, Figura 3.4 e Figura 3.5).

Na primeira fase (1900 a 1970), na Baía de Antonina, há deposição predominante de sedimentos mais grossos (EM3), com valores relativamente mais baixos da razão Fe/Ca (Figura 3.2), associadas a presença de sedimentos mais arenosos (ANGELI et al., 2020b). Na Baía de Paranaguá (T2), há deposição de sedimentos mais grossos (EM3), com tendência de diminuição na deposição de sedimentos mais finos (EM1 e EM2) e da influência continental (diminuição da razão Fe/Ca) (Figura 3.4). A deposição de sedimentos mais grossos e menor influência continental na porção mais interna do CEP neste período sugere a presença de condições hidrodinâmicas mais intensas que, em conjunto com condições climáticas mais secas, impediram o aporte e deposição de sedimentos mais finos oriundos da Serra do Mar. Enquanto na região da Ilha da Cotinga (T5), porção mais externa do CEP, este período é marcado pela deposição de sedimentos grossos (EM2) formados sobre condições de intemperismo intenso (razões Fe/K e K/Rb); ainda há tendência de aumento progressivo na influência terrígena (razões Fe/Ca e K/Ca) para a região (Figura 3.5).

Este período é marcado pelo início do crescimento populacional e econômico do litoral do Paraná, associados à expansão agrícola na região (PIERRI et al., 2006). Após a construção da estrada de ferro, ligando a capital Curitiba ao litoral, e a instalação de indústrias ligadas ao Porto de Antonina entre 1904 e 1914, em 1920 o Porto de Antonina intensificou suas atividades, se tornando o 4º porto de exportação do Brasil. Ainda, em 1935, foi inaugurado o Porto de Paranaguá, que teve sua primeira ampliação de infraestrutura, entre 1955 e 1961. A intensificação do desenvolvimento de atividades humanas como desmatamento de grandes áreas de entorno e a realização de dragagens

para ampliação portuária, potencialmente intensificaram a hidrodinâmica local e contribuíram para as mudanças granulométrica observadas, particularmente na Baía de Antonina (T2) entre 1940 e 1970.

Após 1970, é possível observar uma mudança abrupta na composição granulométrica do CEP nos três registros sedimentares aqui estudados. Na Baía de Antonina (T3), sedimentos mais grossos (EM2 e EM3) são substituídos por sedimentos mais finos (EM1) (Figura 3.2) e na Baía de Paranaguá (T2), sedimentos mais grossos (EM4) passam a estar presentes no registro sedimentar (Figura 3.4). Enquanto na Ilha da Cotinga (T5), há aumento de sedimentos relativamente mais finos, pertencentes à subpopulação EM1 (Figura 3.5). Ainda, na Baía de Antonina (T3) é também possível observar um aumento abrupto na razão Fe/K sem uma diminuição abrupta nos valores da razão K/Rb (Figura 3.2).

A razão Fe/K pode ser aplicada no reconhecimento do grau de intemperismo e da área fonte dos sedimentos (RAZIK et al., 2015). No entanto, nos sedimentos superficiais do CEP, a granulometria dos sedimentos tem influência significativa na distribuição da razão Fe/K, com valores mais altos de Fe/K presentes nas áreas caracterizadas por sedimentos mais finos (ANGELI et al., 2020b). Isso indica que na Baía de Antonina (T3) o aumento na razão Fe/K está mais associado ao aumento na deposição de sedimentos mais finos do que em mudanças abruptas no grau de intemperismo na área de formação dos sedimentos. As mudanças observadas no CEP estão relacionadas a ação conjunta de dois fatores: intervenção antrópicas, ligadas a mudanças no uso e ocupação do solo no entorno e nas margens do CEP, e mudanças no regime de precipitação da região, ligadas ao *shift* climático de 1970 (REID et al., 2016; SARKAR & MAITY, 2021).

Na Baía de Antonina, a deposição de sedimentos finos após 1970 reflete o aumento do aporte de sedimentos da Serra do Mar para a baía (ODRESKI et al., 2003) resultante da construção da Usina Hidrelétrica Governador Pedro Viriato Parigot de Souza, em Antonina (1963-1970), que interligou os rios Capivari e Cachoeira (PIERRI et al., 2006; PATCHINEELAM et al., 2008). Enquanto na Baía de Paranaguá e na Ilha da Cotinga, as mudanças observadas parecem refletir mudanças hidrodinâmicas associadas a uma série de intervenções nas margens do CEP (p.e., obras de ampliação do cais de Paranaguá – 1971 e a construção do Oleoduto ligando o cais de inflamáveis à refinaria da Petrobras em Araucária - 1975) e de dragagens de manutenção do Canal da Galheta (1968, 1972) que ocorreram no final da década de 1960 e no início da década de 1970,

impulsionadas pelo aumento na movimentação de cargas pelo Porto de Paranaguá (PORTOS DO PARANÁ, 2020).

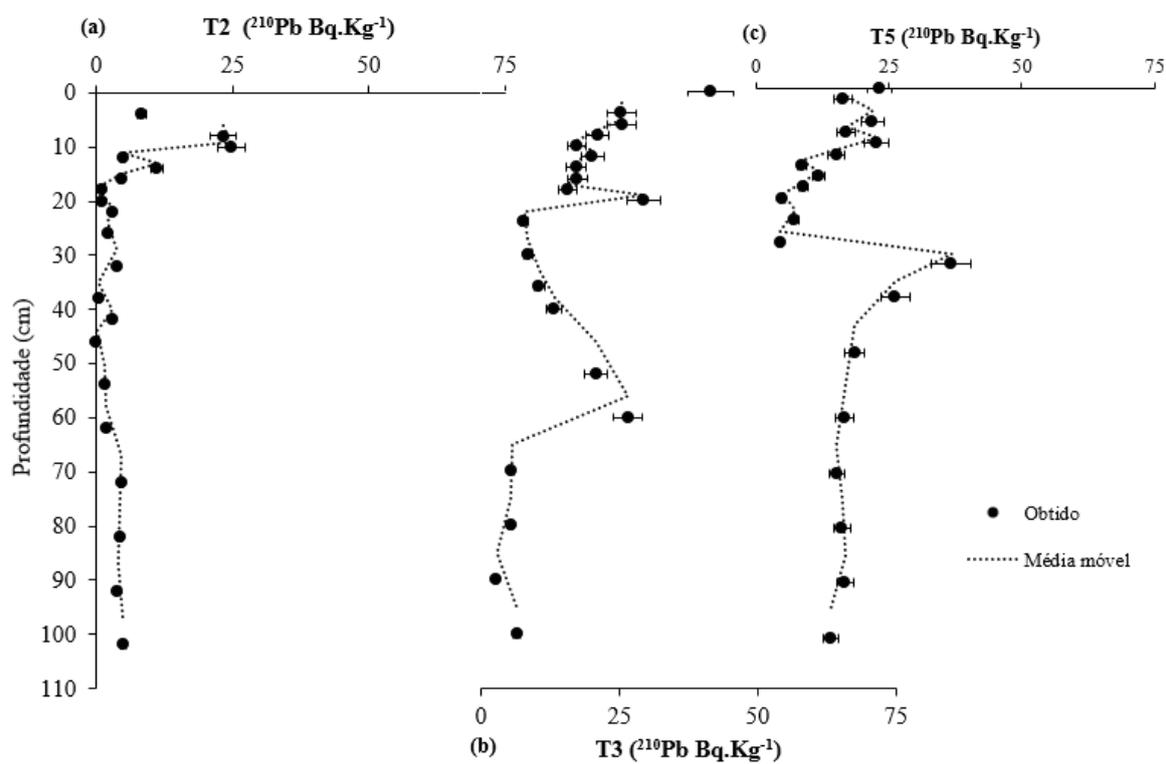
Além da influência das atividades antrópicas mudanças no regime de precipitação da região também podem ter tido impacto nos processos deposicionais do CEP. O início da década de 1970 representa o início do *shift* climático de 1970, marcado por aumento nos regimes de precipitação globais (SARKAR & MAITY, 2021). Na América do Sul, mudanças na temperatura da superfície do mar do Oceano Pacífico Tropical, separaram uma década tipo La-Niña para uma tipo El-Niño (JACQUES-COPERA & GARREAUD, 2014). A região de entorno do CEP é caracterizada por intenso regime pluvial, com médias anuais de 2500mm ano^{-1} , e caracterizada por períodos chuvosos ao longo do ano todo (LANA et al., 2001) e eventos extremos de precipitação associados a eventos El-Niño (AMORIM et al., 2020). O aumento progressivo na razão K/Rb, observados nos três testemunhos do CEP, indicam a prevalência de condições climáticas relativamente mais úmidas na região desde 1970, o que é corroborado pelo aumento da influência terrígena no CEP, evidenciado pelo aumento das razões Fe/Ca e K/Ca neste período. Estas mudanças no regime de precipitação da região contribuíram para o aumento no aporte de sedimentos terrígenos para o CEP.

3.6 Conclusão

A avaliação integrada de dados granulométricos e geoquímicos de três registros sedimentares coletados ao longo do gradiente estuarino do CEP (T3 – Baía de Antonina, T2 – Baía de Paranaguá e T5 – Ilha da Cotinha) permitiu melhor compreender a influência de mudanças em processos naturais (p.e., regime de precipitação e circulação estuarina) e antrópicos (uso e ocupação do solo) afetarem os processos deposicionais do CEP nos últimos 120 anos. Nossos resultados sugerem que esse período pode ser dividido em duas fases. Ao longo da primeira (1900-1970) a presença de sedimentos mais grossos e maiores valores nas razões Fe/Ca e K/Ca nas Baías de Antonina e Paranaguá, sugerem que o crescimento populacional e econômico, resultante da intensificação do desenvolvimento humano no entorno do CEP, potencialmente contribuíram para a alteração hidrodinâmica local. Durante a segunda fase (1971-2020), a mudança abrupta na granulometria em todos os testemunhos, ocasionada por um maior aporte sedimentar potencialmente foi resultante do conjunto de ações antrópicas e naturais (p.ex. transposição do rio Capivari para o

Cachoeira, obras de ampliação e construções no Porto de Paranaguá, aumento no índice pluviométrico na região associada a mudanças no regime de precipitação global que ocorreram durante o *shift* climático de 1970). Entretanto, essas alterações graduais nos *proxies* geoquímicos e granulometria, indicam que mudanças de uso e ocupação do solo no entorno do CEP tiveram um impacto mais significativo em seus processos deposicionais do que as mudanças climáticas que ocorreram nos últimos 50 anos.

Figuras suplementares – Capítulo II

Figura S.1– Variação do ^{210}Pb nos testemunhos (a) T2, (b) T3 e (c) T5.

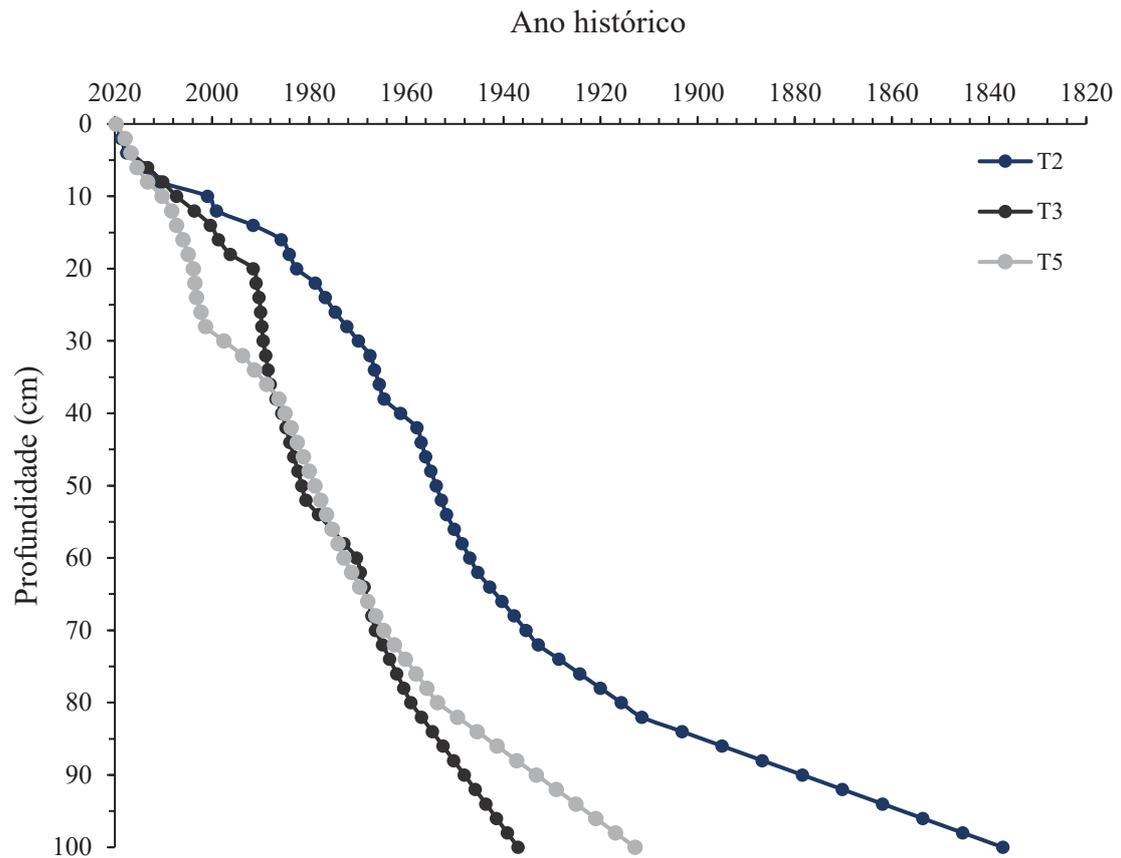


Figura S.2– Modelos de idade para os testemunhos T2 (azul), T3 (preto) e T5 (cinza).

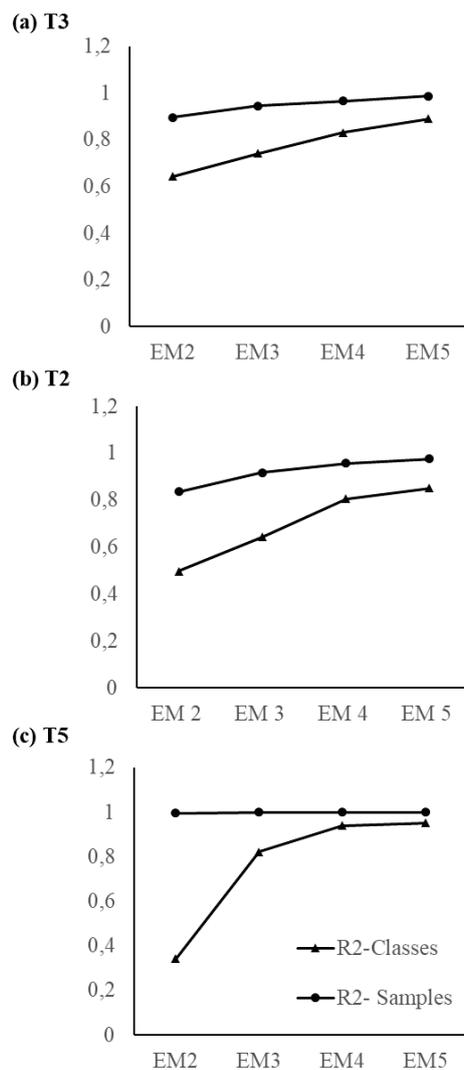


Figura S.3 – Coeficiente de determinação progressivo (R^2) obtido pelo BasEMMA, para os testemunhos (a) T3, (b) T2 e (c) T5.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da aplicação de modelos matemáticos em dados granulométricos obtidos em amostras de sedimentos superficiais coletadas ao longo do CEP, foi possível melhor entender caminhos *source-to-sink* (fonte-a-sumidouro) e processos deposicionais desse sistema estuarino subtropical. Ainda, a abordagem *multi-proxy* empregada na avaliação integrada de dados granulométricos e geoquímicos de três registros sedimentares permitiu a avaliação dos principais fatores naturais (p.e. regime de precipitação e circulação) e antrópicos (uso e ocupação do solo) que influenciaram nas mudanças hidrodinâmicas e de fonte sedimentares no passado recente do CEP.

Os sedimentos do CEP são compostos por três principais subpopulações granulométricas distintas, cuja distribuição espacial está atrelada à fonte dos sedimentos e a padrões hidrodinâmicos. Os sedimentos mais finos, provenientes da Serra do Mar, são depositados entre a Baía de Antonina e região da cidade de Paranaguá; enquanto sedimentos mais grossos, depositados no entorno da Ilha da Cotinga e na Baía de Laranjeiras, como resultado do aporte direto dos rios da região e forçantes marinhas, respectivamente. O padrão de deposição permitiu ainda encaixar o CEP no modelo tripartido, descrito por Dalrymple et al. (1992), categorizando o estuário como dominado por ondas, cujo transporte de sedimentos apresenta clara semelhança com os padrões de circulação estuarina. A aplicação de modelos matemáticos com base em dados granulométricos se mostrou uma ferramenta importante no mapeamento e entendimento de processos deposicionais no CEP e monitoramento ambiental.

Nos últimos 120 anos, é possível determinar que houve uma mudança significativa nos processos deposicionais do CEP em 1970, como resultado de mudanças ambientais associadas a alterações no regime de precipitação e no desenvolvimento socioeconômico do litoral do Paraná. No período de 1900 a 1970, o grande desenvolvimento humano da região, tiveram influência direta nos processos deposicionais do estuário, particularmente na hidrodinâmica estuarina na Baía de Antonina. Em 1970, a mudança abrupta no tamanho dos sedimentos depositados no CEP, sugere um aumento do aporte sedimentar para o estuário. Destacamos aqui o potencial impacto da transposição do rio Capivari, associado à construção da Usina Hidrelétrica Pedro Viriato Parigot de Souza (1963-1970) em conjunto com o aumento de precipitação regional associado ao *shift* climático de 1970, aumentando o aporte de sedimentos para o CEP. Nos últimos 50 anos, as mudanças no uso e ocupação do solo no entorno do CEP, resultantes do desenvolvimento

socioeconômico da região, foram determinantes nas mudanças observadas para os processos deposicionais do CEP, com menor influência de mudanças nas condições climáticas. O que reforça a aplicação de avaliações integradas geoquímicas e granulométricas no monitoramento dos impactos humanos para este sistema estuarino subtropical.

REFERÊNCIAS

- AMORIM, A. C. B.; SCUDELARI, A. C.; CUNHA, C.; GONÇALVES, J. E. Eventos Extremos de Precipitação no Litoral do Paraná (Baía de Paranaguá). **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 35, p. 563-575, 2020.
- aANGELI, J. L. F.; KIM, B. S. M.; PALADINO, Í. M.; NAGAI, R. H.; MARTINS, C. C.; DE MAHIQUES, M. M.; FIGUEIRA, R. C. L. Statistical assessment of background levels for metal contamination from a subtropical estuarine system in the SW Atlantic (Paranaguá Estuarine System, Brazil). **Journal of Sedimentary Environments**. v.5, n.1, p. 137-150. 2020.
- bANGELI, J.L.F.; TREVIZANI, T.H.; NAGAI, R.H.; MARTINS, C.C.; FIGUEIRA, R.C.L.; DE MAHIQUES, M.M. Geochemical mapping in a subtropical estuarine system influenced by large grain-shipping terminals: Insights using Metal/Metal ratios and multivariate analysis. **Environmental Earth Sciences**. v.,79. 2020. <https://doi.org/10.1007/s12665-020-09211-z>
- ANGULO, R. J.; SOUZA, M. D.; LAMOUR, M. R. Coastal erosion problems induced by dredging activities in the navigation channel of Paranaguá and São Francisco do Sul harbor, southern Brazil. **Journal of Coastal Research**, 39, 1801-1803. 2006.
- ANGULO, R.J.; BORZONE, C.A.; NOERNBERG, M.A.; DE QUADROS, C.J.L.; DE SOUZA, M.C.; DA ROSA, L.C. The state of paraná beaches, in: Coastal Research Library. **Springer**. p.419–464. 2016 https://doi.org/10.1007/978-3-319-30394-9_16.
- ANGULO, R. J.; DE SOUZA, M. C.; NOERNBERG, M. A. Anthropogenic impacts on the morphological and sedimentary processes in the coast of State of Paraná, in Southern Brazil: past and future perspectives. **Journal of Integrated Coastal Zone Management/Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 20, n. 1, p. 5-25, 2020.
- APPA – Administração dos Portos de Paranaguá e Antonina, 2022. Disponível <<https://www.portosdoparana.pr.gov.br/Noticia/portos-do-parana-fecham-2021-com-57-milhoes-toneladas-de-cargas-movimentadas>>
- BIGARELLA, J. J.; ALESSI, A.H.; BECKER, R. D.; DUARTE, G. M. Natureza dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina. **Rev. Instituto de Biologia e Pesquisas Tecnológicas**. v.15, p.30-33. 1970.
- BESSER, M. L.; BRUMATTI, M.; SPISILA, A. L. Mapa geológico e de recursos minerais do estado do Paraná. 2021. <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/22492>
- BEUSCHER, S.; KRÜGER, S.; EHRMANN, W.; SCHMIEDL, G.; MILKER, Y.; ARZ, H.; SCHULZ, H. End-member modelling as a tool for climate reconstruction — An Eastern Mediterranean case study. **PLoS ONE**. 12. 2017. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0185136>
- BOULAY, S.; COLIN, C.; TRENTESAUX, A.; CLAIN, S.; LIU, Z.; LAUERLEREDDE, C. Sedimentary responses to the Pleistocene climatic variations recorded in the South China Sea. **Quaternary Research**. v.68, p.162–172. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2007.03.004>

- BREBBIA, C. A. Environmental impact of port activities C. Trozzi, R. Vaccaro Techne srl, Via N. **Zabalía** 3, 00153 Rome (Italy), 2000.
- BURUAEM, L. M.; HORTELLANI, M. A.; SARKIS, J. E.; LOTUFO, L. V. C.; ABESSA, D. M. S. et al. Contamination of port zone sediments by metals from large marine ecosystems of Brazil. **Marine Pollution Bulletin**, v. 64, n. 3, p. 479–488, 2012
- CARVALHO, B.C.; GUERRA, J.V. Applying a sediment trend analysis model to barrier-island: Restinga da marambaia (rj, se brazil). **Anuário do Instituto de Geociências**. v.43, p.101–118. 2020. https://doi.org/10.11137/2020_2_101_118
- CAMARGO, M. G. SysGran: um sistema de código aberto para análises granulométricas do sedimento. **Revista Brasileira de Geociências**, v.36, n.2, p.371-378, 2006
- COOPER, J. A. G. Geomorphological variability among microtidal estuaries from the wave-dominated South African coast. **Geomorphology**. v.40, p.99-122. 2001. [https://doi.org/10.1016/S0169-555X\(01\)00039-3](https://doi.org/10.1016/S0169-555X(01)00039-3)
- CRUZ, O.G.; NOERNBERG, A.M.; Bedforms controlled by residual current vortices in a subtropical estuarine tidal channel. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.232. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2019.106485>
- DALRYMPLE, R. W.; ZAITLIN, B. A.; BOYD, R.; Estuarine facies models; conceptual basis and stratigraphic implications. **Journal of Sedimentary Research**. v.62, p.1130-1146. 1992
- DAVENPORT, J. & DAVENPORT, J. L. The impact of tourism and personal leisure transport on coastal environments: **A review**. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 67, n. 1–2, p. 280–292, 2006.
- DIETZE, E.; DIETZE, M., Grain-size distribution unmixing using the R package EMMAgeo. **E&G Quaternary Science Journal**. v.68, p.29–46. 2019. <https://doi.org/10.5194/egqsj-68-29-2019>
- DYER, K. R. **Sediment transport processes in estuaries**. In *Developments in Sedimentology*. Elsevier. v. 53, p.423-449, 1995.
- ESTADES, N. P. O litoral do Paraná: entre a riqueza natural e a pobreza social. *Desenvolvimento e meio ambiente*, v. 8, 2003.
- FERREIRA, P.A.L.; SIEGLE, E.; SCHETTINI, C.A.F.; MAHIQUES, M.M.; FIGUEIRA, R.C.L. Statistical validation of the model of diffusion-convection (MDC) of ¹³⁷Cs for the assessment of recent sedimentation rates in coastal systems. **Journal of Radioanalytical Nuclear Chemistry** v.303, p.2059–2071, 2015.
- FIGUEIRA, R.C.L.; TESSLER, M.G.; MAHIQUES, M.M.; CUNHA, I.I.L. Distribution of ¹³⁷Cs, ²³⁸Pu and ²³⁹⁺²⁴⁰Pu in sediments of the southeastern Brazilian shelf-SW Atlantic margin. **Science of Total Environment**. v.357, p.146–159, 2006.
- FOLK, R. L.; WARD, W. C. Brazos River bar [Texas]; a study in the significance of grain size parameters. **Journal of sedimentary research**, v.27(1), p.3-26. 1957.

FRANZ, G.; GARCIA, C. A. E.; PEREIRA, J.; et al. Coastal ocean observing and modeling systems in Brazil: Initiatives and future perspectives. **Frontiers in Marine Science**. v.8, p.2296-7745. 2021 <https://doi.org/10.3389/fmars.2021.681619>

GAO, S.; COLLINS, M., A critique of the “McLaren Method” for defining sediment transport paths: **Journal of Sedimentary Petrology**. v.61, p.143-146. 1991.

GAO, S.; COLLINS, M.. Net sediment transport patterns inferred from grain-size trends, based upon definition of “transport vectors”. **Sedimentary Geology**. v.81, p.47-60. 1992.

GOVIN, A.; HOLZWARTH, U.; HESLOP, D.; FORD KEELING, L.; ZABEL, M.; MULITZA, S.; CHIESSI, C. M. Distribution of major elements in Atlantic surface sediments (36 N–49 S): Imprint of terrigenous input and continental weathering. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**, v. 13, n. 1, 2012.

GRUBER, N.; BARBOZA, E.; NICOLODI, J. Geografia dos sistemas costeiros e oceanográficos: subsídios para gestão integrada da zona costeira. **Gravel**, n. 1, p. 81–89, 2003.

HARTMANN, D. From reality to model: Operationalism and the value chain of particle-size analysis of natural sediments. **Sedimentary Geology**. v.202, p.383–401. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.013>

HIBMA, A.; STIVE, M. J. F.; WANG, Z. B. Estuarine morphodynamics. **Coastal Engineering**, v. 51, n. 8–9, p. 765–778, 2004.

IBGE. **Brasil uma visão geográfica e ambiental no início do século XXI**. 2016.

JACQUES-COPER, M.; GARREAUD, R. D. Characterization of the 1970s climate shift in South America. **International Journal of Climatology**, v. 35, n. 8, p. 2164-2179, 2015.

JIA, J.J.; GAO, S.; XUE, Y.C. Sediment dynamic processes of the Yuehu inlet system, Shandong Peninsula, China. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.57, p.783–801. 2003. [https://doi.org/10.1016/S0272-7714\(02\)00406-7](https://doi.org/10.1016/S0272-7714(02)00406-7)

LANA, P. C.; MARONE, E.; LOPES, R. M.; MACHADO, E. C. The subtropical estuarine complex of Paranaguá Bay, Brazil. In: Coastal marine ecosystems of Latin America. **Springer, Berlin, Heidelberg**. p.131-145. 2001. <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v55i0.4286>

LAMOUR, M. R.; SOARES, C. R.; CARRILHO, J. C. Mapas de parâmetros texturais de sedimentos de fundo do complexo estuarino de Paranaguá PR. **Boletim Paranaense de Geociências**. v.55. 2004.

LESSA, G. C.; MEYERS, S. R.; MARONE, E. Holocene stratigraphy in the Paranaguá Bay estuary, southern Brazil. **Journal of Sedimentary Research**. v.68, p.1060-1076. 1998. <https://doi.org/10.2110/jsr.68.1060>

le ROUX, J. P. An alternative approach to the identification of net sediment transport paths based on grain-size trends. **Sedimentary Geology**. v.94, p.97-107. 1994. [https://doi.org/10.1016/0037-0738\(94\)90149-X](https://doi.org/10.1016/0037-0738(94)90149-X)

- le ROUX, J.P.; O'BRIEN, R.D.; RIOS, F.; CISTERNAS, M. Analysis of sediment transport paths using grain-size parameters. **Computers and Geosciences**. v.28, p.717–721. 2002. [https://doi.org/10.1016/S0098-3004\(01\)00074-7](https://doi.org/10.1016/S0098-3004(01)00074-7)
- LI, T.; LI, T.J. Sediment transport processes in the Pearl River Estuary as revealed by grain-size end-member modeling and sediment trend analysis. **Geo-Marine Letters**. v.38, p.167–178. 2018. <https://doi.org/10.1007/s00367-017-0518-2>
- MACHADO, B. P. Esboço de uma Sinopse da História Regional do Paraná. **História: Questões & Debates**. Curitiba, v.8, n.14-15, p.177-205, 1987.
- MAHIQUES, M.M.; Y GOYA, S.C.; MATOS, M.C. DA S.N. DE.; OLIVEIRA, R.A.U. DE.; KIM, B.S.M.; FERREIRA, P.A. DE L.; FIGUEIRA, R.C.L.; BÍCEGO, M.C. Grain-size end-members and environmentally sensitive grain-size components: A comparative study in the mud shelf depocenters off southern Brazil. **International Journal of Sediment Research**. v.36, p.317–327. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ijsrc.2020.07.004>
- MANTOVANELLI, A.; MARONE, E.; DA SILVA, E. T.; LAUTERT, L. F.; KLINGENFUSS, M. S.; PRATA JR, V. P.; NOERNBERG, M.A.; KNOPPERS, B.A.; ANGULO, R. J. Combined tidal velocity and duration asymmetries as a determinant of water transport and residual flow in Paranaguá Bay estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.59, p.523-537. 2003. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2003.09.001>
- MARONE, E.; JAMIYANAA, D. Tidal characteristics and a numerical model for the M2 tide at the Estuarine Complex of the Bay of Paranaguá, Paraná, Brazil. **Revista Nerítica**, v. 11, n. 1-2, p. 95-107, 2022.
- MARONE, E.; MACHADO, E.C.; LOPES, R. M.; TEIXEIRA DA SILVA, E.; Land-ocean fluxes in the paranaguá bay estuarine system, southern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**. v.53, p.169-181. 2005.
- MARTINS, R.; Histórias do Paraná. **Travessa dos Editores**, 1995.
- MARTINS, C. C.; BRAUN, J. A.F.; SEYFFERT, B.H.; MACHADO, E.C.; FILMANN, G. Anthropogenic organic matter inputs indicated by sedimentary fecal steroids in a large South American tropical estuary (Paranaguá estuarine system, Brazil). **Marine pollution bulletin**, v. 60, n. 11, p. 2137-2143, 2010
- MAYERLE, R.; NARAYANAN, R.; ETRI, T.; ABD WAHAB, A.K. A case study of sediment transport in the Paranagua Estuary Complex in Brazil. **Ocean Engineering**. v.106, p.161–174. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2015.06.025>
- MCCAIVE, I.N.; HALL, I.R. Size sorting in marine muds: Processes, pitfalls, and prospects for paleoflow-speed proxies. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**. v.7. 2006. <https://doi.org/10.1029/2006GC001284>
- MCLAREN, P. An interpretation of trends in grain size measures. **Journal of Sedimentary Research**. v.51, p.611-624. 1981. <https://doi.org/10.1306/212F7CF2-2B24-11D7-8648000102C1865D>

MCLAREN, P.; HILL, S.H.; BOWLES, D. Deriving transport pathways in a sediment trend analysis (STA). **Sedimentary Geology**. v.202, p.489–498. 2007. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2007.03.011>

MEADE, R. H. Landward transport of bottom sediments in estuaries of the Atlantic coastal plain. **Journal of Sedimentary Research**. v.39, p.222-234. 1969. <https://doi.org/10.1306/74D71C1C-2B21-11D7-8648000102C1865D>.

MINEROPAR. Minerais, do Paraná. S.A. **Atlas geológico do Estado do Paraná**. Curitiba: v.1., 2001

NOERNBERG, M. A.; LAUTERT, L. F. C.; ARAÚJO, A. D.; MAONE, E.; ANGELORRI, R.; NETTO JR, J. P. B.; KRUG, L. A. Remote Sensing and GIS integration for modelling the Paranaguá estuarine complex-Brazil. **Journal of Coastal Research**. p. 1627-1631. 2006.

NOERNBERG, M. A.; MARONE, E.; ANGULO, R. J. Correntes costeiras e transporte de sedimentos nos canais de navegação do estuário da Baía de Paranaguá. **Boletim Paranaense de Geociências**. v.60. 2007. <http://dx.doi.org/10.5380/geo.v60i0.9616>

ODRESKI, L. L. R.; SOARES, C. R.; ANGULO, R. J.; ZEM, R. C. Taxas de assoreamento e a influência antrópica no controle da sedimentação da Baía de Antonina-Paraná. **Boletim Paranaense de Geociências**. v.53. 2003.

PALADINO, Í. M.; MENGATTO, M. F.; MAHIQUES, M. M.; NOERNBERG, M. A.; NAGAI, R. H. End-member modeling and sediment trend analysis as tools for sedimentary processes inference in a subtropical estuary. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.278, n.108126. 2022 <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2022.108126>

PARRIS, A.S.; BIERMAN, P.R.; NOREN, A.J.; PRINS, M.A.; LINI, A. Holocene paleostorms identified by particle size signatures in lake sediments from the northeastern United States. **Journal of Paleolimnology**. v.43, p.29–49. 2010. <https://doi.org/10.1007/s10933-009-9311-1>

PATERSON, G. A.; HESLOP, D. New methods for unmixing sediment grain size data. **Geochemistry, Geophysics, Geosystems**. v.16, p.4494-4506. 2015. <https://doi.org/10.1002/2015GC006070>

PATCHINEELAM, S. M.; SOARES, C. R.; CALLIARI, L. J. Assoreamento aterros e dragagens. In: NETO, J. A. B.; WALLNER-KERSANACH, M.; PATCHINEELAM, S. M. **Poluição Marinha**. Rio de Janeiro: Editora Interciência. p.335-349. 2008.

POIZOT, E.; MÉAR, Y. Using a GIS to enhance grain size trend analysis. **Environmental Modelling and Software**. v.25, p.513–525. 2010. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2009.10.002>

PORTOSDOPARANÁ. **Portos do Paraná e a História**. Disponível em <<http://www.portosdoparana.pr.gov.br/Pagina/Os-Portos-do-Parana-e-Historia>>. Acesso em 29/06/2020

PIERRI, N.; ANGULO, R. J.; SOUZA, M. C.; KIM, M. K. The occupation and land use in the coast of Parana: conditionals, conflicts and tendencies. **Desenvolvimento e Meio Ambiente**. v.13, p.137-167. 2006.

PRINS, M. A.; BOUWER, L. M.; BEETS, C. J.; TROELSTRA, S. R.; WELTJE, G. J.; KRUK, R. W.; KUIJPERS, A.; VROON, P. Z. Ocean circulation and iceberg discharge in the glacial North Atlantic: Inferences from unmixing of sediment size distributions. **Geology**. v.30, p.555-558. 2002. [https://doi.org/10.1130/0091-7613\(2002\)030<0555:OCAIDI>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1130/0091-7613(2002)030<0555:OCAIDI>2.0.CO;2)

RAZIK, S.; GOVIN, A.; CHIESSI, C. M.; VON DOBENECK, T. Depositional provinces, dispersal, and origin of terrigenous sediments along the SE South American continental margin. **Marine Geology**. v.363, p.261-272. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.margeo.2015.03.001>

REID, P. C.; HARI, R. E.; BEAUGRAND, G.; LIVINGSTONE, D. M.; MARTY, C.; STRAILE, D.; et al. Global impacts of the 1980s regime shift. **Global change biology**, v.22, n.2, p.682-703. 2016.

RUTYNA, B. B.; SOARES, C. R.; WROBLEWSKI, C. A.; PAULA, E. V. Assoreamento nas baías de Antonina e de Paranaguá-PR: análise integrada das áreas fontes de sedimentação e obras de dragagem. **Revista Brasileira de Geografia e Física**. v.14, p.676 – 693. 2021.

RÍOS, F.; CISTERNAS, M.; LE ROUX, J.; CORREA, I. C. S. Seasonal sediment transport pathways in Lirquen Harbor, Chile, as inferred from grain-size trends. **Investigaciones Marinas**. Chile. v.30, p.3-23. 2002.

SARKAR, S.; MAITY, R. Global climate shift in 1970s causes a significant worldwide increase in precipitation extremes. **Scientific reports**. v. 11, n. 1, p. 1-11, 2021.

SERRA, E. Os Primeiros Processos de Ocupação da Terra e a Organização Pioneira do Espaço Agrário no Paraná', os Primeiros Processos de Ocupação da Terra e a Organização Pioneira do Espaço Agrário no Paraná. **Boletim de Geografia- UEM**, v.10, n.01, pp. 61–94, 1992.

SOARES, C. R.; LESSA, G. C.; NETO, A. G.; RIESEMBERG, C. E.; SILVA, C. B. Caracterização da distribuição dos sedimentos de fundo das baías de Paranaguá e Antonina, Estado do Paraná. **In Congresso Brasileiro de Geologia**. v.39, p.390-393. 1996.

STEINER, A. A year of change, a year of reform. **UNEP**, 2006

TIBBETTS, J. Coastal cities: living on the edge. **Environmental Health Perspectives**, v. 110, n. 11, p. A674-A681, 2002.

van HATEREN, J.A.; PRINS, M.A.; VAN BALEN, R.T. On the genetically meaningful decomposition of grain-size distributions: A comparison of different end-member modelling algorithms. **Sedimentary Geology**. v.375, p.49–71. 2018. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2017.12.003>

VEIGA, F. A.; ANGULO, R. J.; MARONE, E.; BRANDINI, F. P.; SOARES, C. R. Padrões de Transporte de Sedimentos Baseado em Três Programas Geradores de Vetores de Tendências de Transporte a Partir de Parâmetros Granulométricos na Porção Sul do Delta de Desembocadura do Complexo Estuarino de Paranaguá-Sul Do Brasil. **Boletim Paranaense de Geociências**. v.57. 2005.

VILAS F., RUBIO B., REY D., BERNABEU A.M. Estuary. In: Encyclopedia of Planetary Landforms. **Springer, New York, NY**, 2014

WELTJE, G.J. End-member modeling of compositional data: numerical-statistical algorithms for solving the explicit mixing problem. **Mathematical Geology**. v.29, p.503-549. 1997. <https://doi.org/10.1007/BF02775085>

ZHANG, X.; WANG, H.; XU, S.; YANG, Z. A basic end-member model algorithm for grain-size data of marine sediments. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**. v.236. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2020.106656>

ZHANG, X.D.; JI, Y.; YANG, Z.S.; WANG, Z.B.; LIU, D.S.; JIA, P.M. End member inversion of surface sediment grain size in the South Yellow Sea and its implications for dynamic sedimentary environments. **Science China Earth Sciences**. v.59, p.258–267. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11430-015-5165-8>

ANEXO-1

Para o testemunho T2 (Figura A.1) foram observados a ocorrência de lama com areia fina nos primeiros 14cm, com maior umidade no topo. Dos 14 aos 40cm há ocorrência de lama com areia média, com aumento na granulometria e umidade. De 40 a 64cm aparece cheiro característico com a presença de lama, areia média e umidade, ocorrendo rachaduras no testemunho em 54cm. De 164 a 200cm ocorre a diminuição da granulometria, com a presença de vegetais (em 70 e 116cm) e fragmentos de conchas (em 142 e 178cm). De 200 a 246cm há a presença de areia média e lama, com partes com areia mais clara (237 a 240cm).

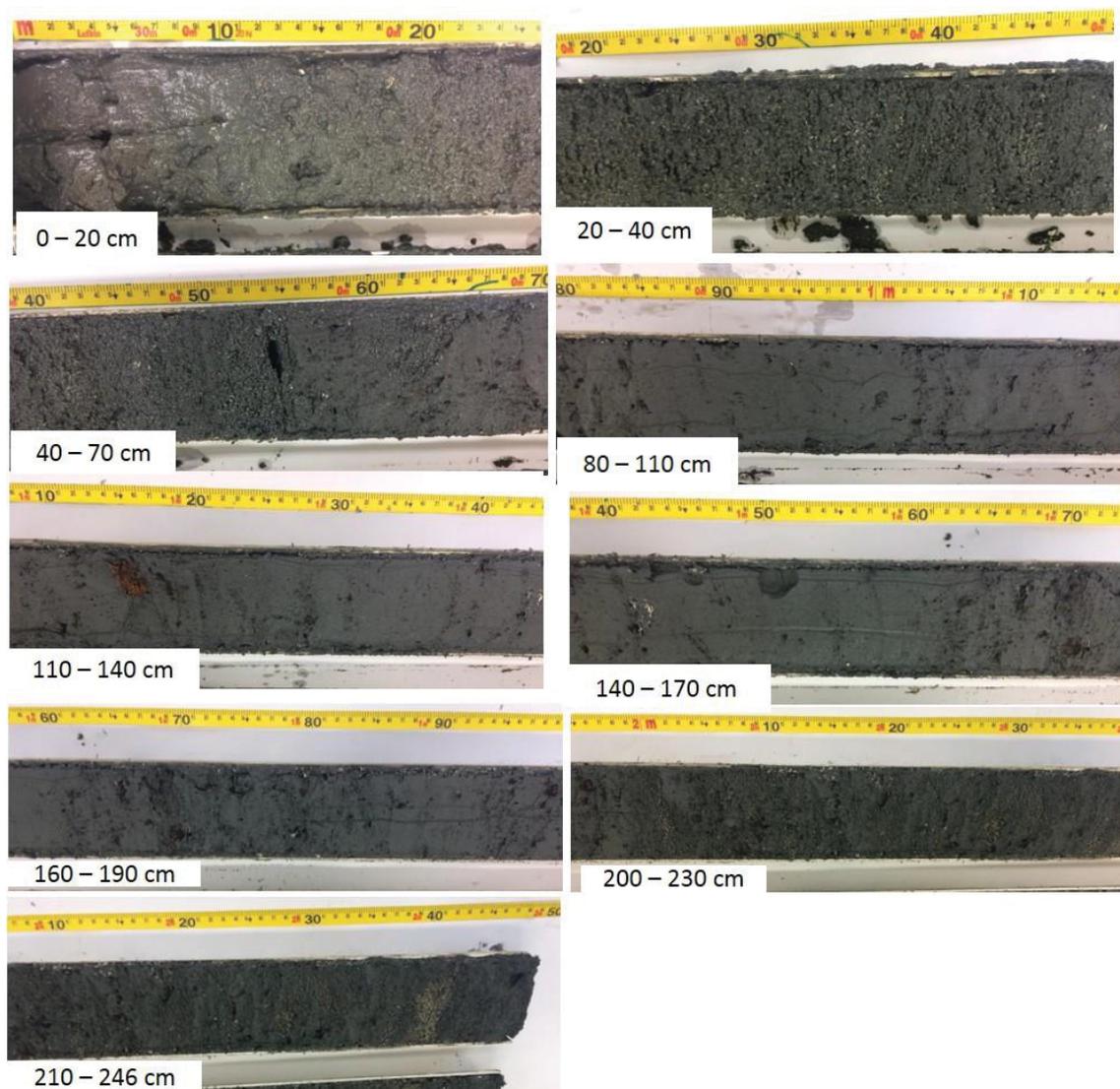


Figura A.1 – Foto do testemunho T2.

Para o testemunho T3 (Figura A.2), os primeiros 14cm apresentou lama com areia muito fina sem fragmentos de conchas, e pouco úmido. De 14cm a 40cm ocorre a presença de lama maciça, sem fragmentos de concha. De 58cm a 62cm ocorreu a presença de areia fina e lama, com poucos fragmentos de conchas. De 62cm a 65cm há o predomínio de areia média, lama e poucos fragmentos de conchas. De 65 a 86cm há o predomínio de lama, e menos areia fina além de maior umidade. Entre 86 e 109cm ocorre a presença de lama, areia fina e fragmentos de concha. De 109 a 115cm há presença de lama, com fragmentos de concha e redução da umidade. Entre 115 e 120cm há predomínio de areia fina, com presença de fragmentos de concha, e redução de lama e umidade. Já de 120 a 123cm, mudança brusca na cor, uma faixa mais escura, além de fragmento vegetal. De 123 a 180cm ocorre lama e areia fina, com aumento na umidade. Entre 180 a 191cm há lama e areia média, mudando para areia grossa em 191 e 202cm. Por fim, de 202 a 246cm ocorre areia fina clara, com partes de sedimentos mais grosso e escuro em 216cm.

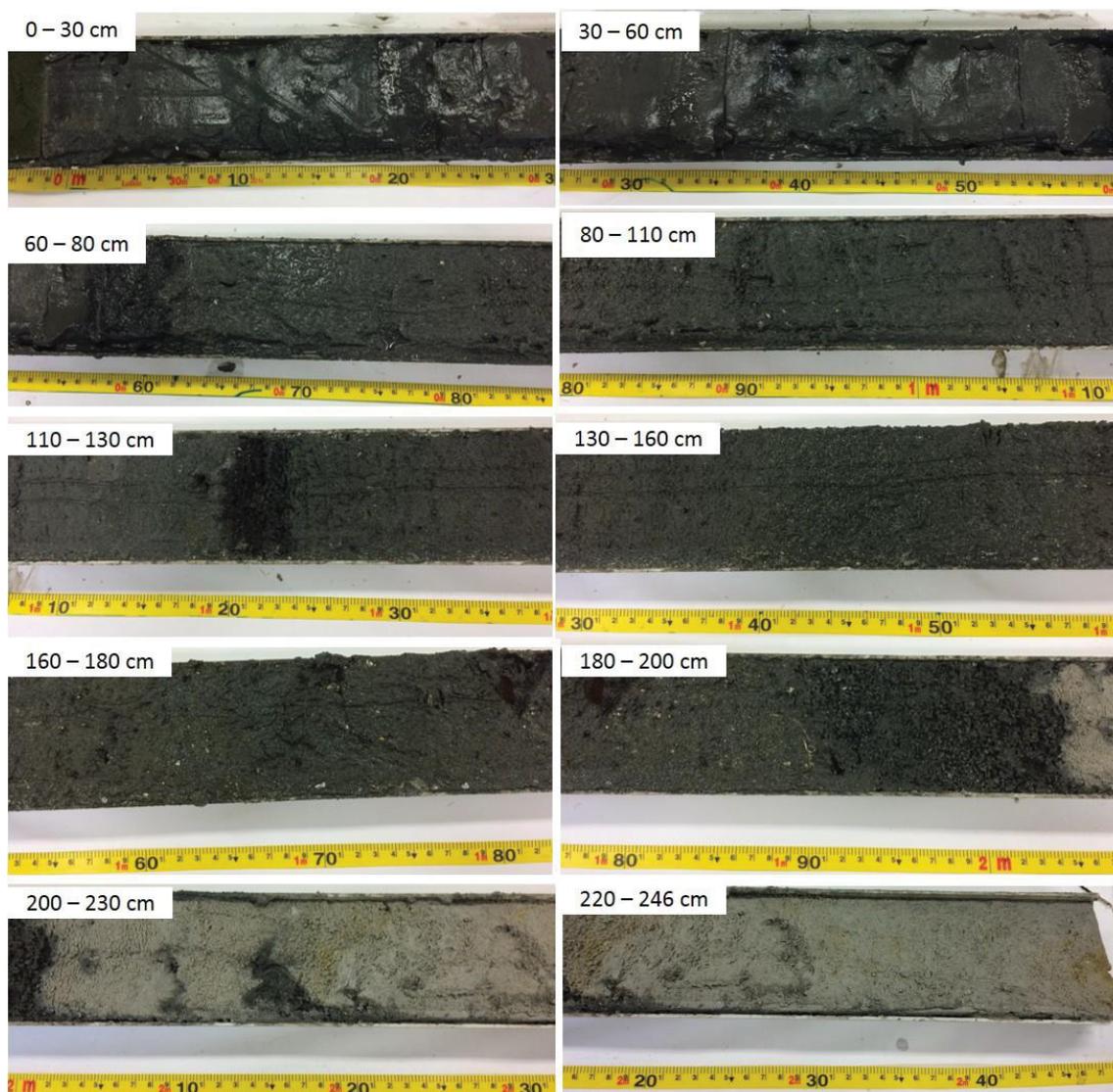


Figura A.2 – Foto do testemunho T3.

O testemunho T5 (Figura A.3) apresentou lama do topo até 8cm com a presença de areia fina e muito fina, além de pedaços de vegetais. Dos 8cm aos 42cm há presença de lama com areia fina, além de fragmentos de vegetais e conchas. De 42cm a 58cm ocorre a menor presença de lama com areia fina e fragmentos de vegetais e conchas. De 58cm a 75cm ocorre a presença de areia fina, com aumento de lama e menor umidade. De 99cm a 128cm há presença de areia fina e aumento pouca lama e menor umidade, seguido de diminuição de lama e aumento na umidade até a base (239cm) apresentando conchas nos últimos 18cm.

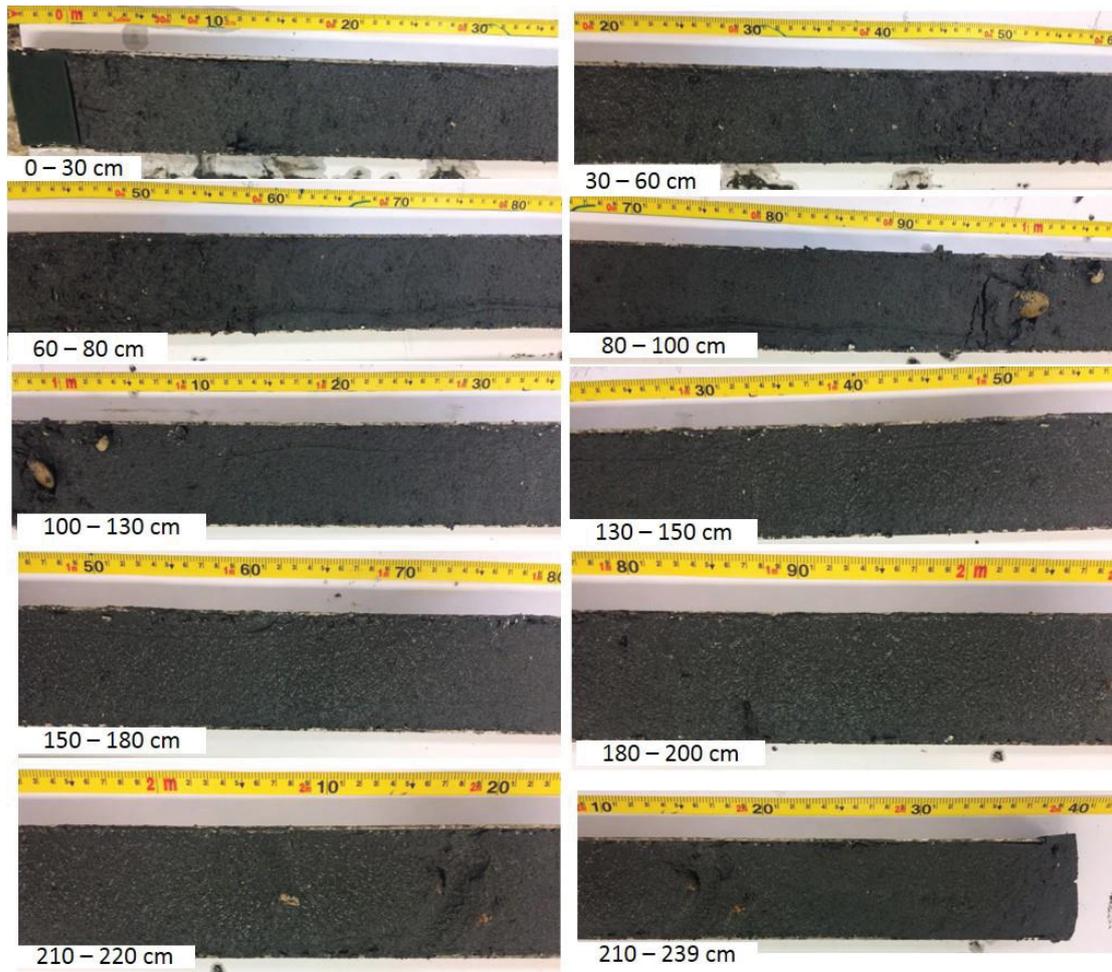


Figura A.3 – Foto do testemunho T5.