



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE
PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO E PESQUISA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM DESENVOLVIMENTO E
MEIO AMBIENTE**



RAPHAELLA RIBEIRO ANDRADE

**VALORAÇÃO DO CUSTO SOCIAL DO ESTOQUE DE CARBONO EM MANGUEZAIS EM
DIFERENTES ESTÁGIOS SUCESSIONAIS NO ESTADO DE SERGIPE**

São Cristóvão/SE
Abril, 2026

RAPHAELLA RIBEIRO ANDRADE

**VALORAÇÃO DO CUSTO SOCIAL DO ESTOQUE DE CARBONO EM MANGUEZAIS EM
DIFERENTES ESTÁGIOS SUCESSIONAIS NO ESTADO DE SERGIPE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Desenvolvimento e Meio Ambiente, na área de Planejamento e Gestão Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Milton Marques Fernandes

Linha de Pesquisa: Dinâmica avaliação ambiental.

São Cristóvão/SE
Abril, 2026

RAPHAELLA RIBEIRO ANDRADE

**VALORAÇÃO DO CUSTO SOCIAL DO ESTOQUE DE CARBONO EM MANGUEZAIS EM
DIFERENTES ESTÁGIOS SUCESSIONAIS NO ESTADO DE SERGIPE**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, da Universidade Federal de Sergipe, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestra em Desenvolvimento e Meio Ambiente, na área de Planejamento e Gestão Ambiental.

Aprovado em 28 de abril de 2026.

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes
PRODEMA/UFS
Orientador

Prof. Dr. Adauto de Souza Ribeiro
PRODEMA/UFS
Examinador Interno

Profa. Dra. Márcia Rodrigues de Moura Fernandes
Departamento de Ciências
Florestais Examinadora
Externa

São Cristóvão/SE
Abril 2026

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA BIBLIOTECA CENTRAL
UNIVERSIDADE FEDERAL DE SERGIPE

A553v Andrade, Raphaella Ribeiro.
 Valoração do custo social do estoque de carbono em
 manguezais em diferentes estágios sucessionais no Estado de
 Sergipe / Raphaella Ribeiro Andrade ; orientador Milton Marques
 Fernandes. – São Cristóvão, SE, 2026.
 76 f.: il.

 Dissertação (mestrado em Desenvolvimento e meio ambiente)
 – Universidade Federal de Sergipe, 2026.

 1. Meio ambiente - Sergipe. 2. Ecologia dos manguezais. 3.
 Carbono. 4. Sedimentos (Geologia). 5. Metais – Toxicologia. I.
 Fernandes, Milton Marques, orient. II. Título.

CDU 504.5(813.7)

DECLARAÇÃO DE CESSÃO DE DIREITOS

É concedido ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS), responsável pelo Curso de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, permissão para disponibilizar, reproduzir cópia desta Dissertação e emprestar ou vender tais cópias.

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes
PRODEMA/UFS
Orientador

Raphaella Ribeiro Andrade
Orientanda

DECLARAÇÃO DE VERSÃO FINAL

Este exemplar corresponde à versão final da Dissertação de Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente, concluído no Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal de Sergipe (UFS).

Prof. Dr. Milton Marques Fernandes

PRODEMA/UFS

Orientador

Raphaella Ribeiro Andrade

Orientanda

AGRADECIMENTOS

Hoje eu ergo meu verso
Com o peito a transbordar,
Agradeço a Deus primeiro
E às forças que vêm guiar,
Mesmo tendo em outros
tempos
Mais de uma vez a tentar.
Teve hora que a cabeça
Parecia até endoidar, Que
desistir do caminho
Parecia o melhor lugar,
Mas a missão era maior
E não podia deixar.
Pois meus filhos, Illo e
Enzo,
Meu abrigo e meu farol,
Já me deram o maior título
Que não cabe em nenhum
rol,
E eu não podia desistir
Pra honrar esse meu
papel.
Vocês dois me ensinaram
O tamanho do meu ser,
A força que eu carrego
Sem nem mesmo
perceber,
E o amor mais profundo
Que alguém pode
conhecer.
Aos meus pais, Hortência
e Régis,
Minha base, meu chão
firme,
Seguraram minhas ondas
Quando o mar quis me
levar,
Foram porto, foram força
Sem jamais me soltar.
Me ensinaram que a
educação
É luz que não se extingue,
E que ser gente de verdade
Vai além de um simples
título,

É ter honra e honestidade
E coragem pra lutar.
Aos meus irmãos, Regina e
Gonçalo,
Companhia de raiz,
Sempre perto, sempre
junto
Nos caminhos que eu
escolhi,
Ter vocês na minha vida
É riqueza como o povo
diz. À minha avó, Dona
Isabel, Que lá atrás já me
via, Observando as
formigas Com curiosa
alegria, Disse: “isso é
coisa de bióloga”
E plantou a profecia.
Hoje vejo, minha avó,
Que a senhora já sabia,
Que esse amor pela
natureza
Era mais que fantasia,
Era semente guardada
Que o tempo amadurecia.

Aos pequenos da Titica,
Maria, Bebel, Gabriel,
Serginho, Amora e
Ravi, Me ensinaram
papel a papel
Que a vida pede leveza
Pra ser doce como mel.
Aos amigos que escutaram
Meus sonhos e meu falar,
Sobre mangue, sobre vida,
Sobre o mundo
transformar,
Vocês foram companhia
Pra eu não desanimar.
À UFS e ao
PRODEMA,
Que abrem portas e
caminhos,
Fortalecendo o saber
E formando novos
destinos,
Entre ciência e esperança
Cultivam futuros vivos.
Ao meu orientador,
Professor Milton Marques,
Com paciência e maestria
Me guiou por firmes
trilhos
Do saber e da pesquisa.
E assim sigo agradecendo
Por tudo que aqui vivi,
Cada passo, cada queda,
Cada força que senti,
Hoje encerro esse ciclo
Mas sigo sendo quem fui.
Pois o título é conquista,
Mas maior é a missão:
Seguir cuidando da vida
Com ciência e coração,
E nos mangues
compreendi
A mais profunda lição:
É a força da natureza,
Do divino e do povão,
Que vive e dele depende
Pra sustento e proteção.

RESUMO

Os manguezais são ecossistemas costeiros fundamentais para a manutenção da biodiversidade e para a prestação de serviços ecossistêmicos essenciais, destacando-se pela elevada capacidade de sequestro e armazenamento de carbono azul. Nesse contexto, esta pesquisa teve como objetivo quantificar o estoque de carbono e avaliar a concentração de metais em sedimentos de manguezais em diferentes estágios sucessionais no Estado de Sergipe, além de estimar a valoração econômica associada ao carbono armazenado. Foram coletadas amostras de sedimento em três áreas de manguezal, em duas profundidades (0–10 cm e 10–20 cm), totalizando 24 subamostras. O carbono orgânico foi determinado pelo método sulfocrômico via úmida, baseado no procedimento de Walkley-Black modificado, enquanto a quantificação de metais foi realizada após digestão ácida assistida por micro-ondas, com posterior determinação multielementar por ICP-OES. O estoque de carbono foi estimado a partir da densidade aparente, da profundidade da camada analisada e do teor de carbono orgânico, sendo posteriormente convertido para Mg C ha^{-1} e utilizado na estimativa do custo social do carbono. Os resultados indicaram que as concentrações de elementos potencialmente tóxicos, como As, Pb, Co, Cu, Cr, Ni, Zn e Ag, permaneceram abaixo dos Valores de Prevenção estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009 em todos os locais e profundidades avaliados. Em relação ao estoque de carbono, a área de Areia Branca apresentou os maiores valores (32,70 e 33,20 Mg C ha^{-1} nas camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, respectivamente), enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores (18,80 e 18,90 Mg C ha^{-1}). Consequentemente, os maiores valores estimados para o custo social do carbono ocorreram em Areia Branca (até US\$ 5.852,56/ha), enquanto os menores foram observados em Nossa Senhora do Socorro (até US\$ 3.321,71/ha). Os resultados demonstram que áreas de manguezal com melhores condições de conservação e maior desenvolvimento estrutural tendem a apresentar maior capacidade de armazenamento de carbono, evidenciando a relevância desses ecossistemas para a mitigação das mudanças climáticas. Dessa forma, reforça-se a importância da conservação e do manejo sustentável dos manguezais, considerando seu papel ecológico, climático e socioeconômico.

Palavras-chave: Manguezais; Carbono azul; Estoque de carbono; Sedimentos; Metais potencialmente tóxicos.

ABSTRACT

Mangroves are coastal ecosystems that play a fundamental role in maintaining biodiversity and providing essential ecosystem services, standing out for their high capacity for blue carbon sequestration and storage. In this context, this study aimed to quantify carbon stocks and evaluate metal concentrations in mangrove sediments at different successional stages in the state of Sergipe, Brazil, as well as to estimate the economic valuation associated with stored carbon. Sediment samples were collected from three mangrove areas at two depths (0–10 cm and 10–20 cm), totaling 24 subsamples. Organic carbon was determined using the wet sulfocromic method based on the modified Walkley-Black procedure, while metal quantification was performed after microwave-assisted acid digestion followed by multielement determination using ICP-OES. Carbon stock was estimated based on bulk density, analyzed layer depth, and organic carbon content, subsequently converted to Mg C ha^{-1} and used to estimate the social cost of carbon. The results indicated that concentrations of potentially toxic elements, such as As, Pb, Co, Cu, Cr, Ni, Zn, and Ag, remained below the Prevention Values established by CONAMA Resolution No. 420/2009 at all evaluated sites and depths. Regarding carbon stocks, the Areia Branca area presented the highest values (32.70 and 33.20 Mg C ha^{-1} in the 0–10 cm and 10–20 cm layers, respectively), while Nossa Senhora do Socorro showed the lowest values (18.80 and 18.90 Mg C ha^{-1}). Consequently, the highest estimated values for the social cost of carbon were observed in Areia Branca (up to US\$ 5,852.56 ha^{-1}), whereas the lowest values occurred in Nossa Senhora do Socorro (up to US\$ 3,321.71 ha^{-1}). The results demonstrate that mangrove areas with better conservation conditions and greater structural development tend to present a higher carbon storage capacity, highlighting the relevance of these ecosystems for climate change mitigation. Therefore, the study reinforces the importance of mangrove conservation and sustainable management, considering their ecological, climatic, and socioeconomic roles.

Keywords: Mangroves; blue carbon; carbon stock; sediments; potentially toxic metals.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1. Local de coleta das amostras de sedimento no Bairro Areia Branca.	Erro! Indicador não definido.
Figura 2. Rhizophora mangle.....	26
Figura 3. Propágulo de Mangue vermelho.....	Erro! Indicador não definido.
Figura 4. Sururu	28
Figura 5. Construções às margens do rio.	28
Figura 6. Construções às margens do rio..	29
Figura 7. Local utilizado pela comunidade tradicional para guardar embarcações.....	29
Figura 8. Local de coleta das amostras de sedimento em Nossa Senhora do Socorro.	
Figura 9. Área de carcinicultura abandonada.....	30
Figura 10. . Embarcações utilizadas por pescadores..	31
Figura 11. Local de coleta das amostras de sedimento no Tramandaí.33	Erro! Indicador não definido.
Figura 12. Área do Parque Tramandaí.	33
Figura 13. Área do Parque Tramandaí.Figura.....	33
Figura 14. Manguezal degradado no Parque Tramandaí.....	34
Figura 15. EcobarreiraFigura	Erro! Indicador não definido.
Figura 16. "Chama-maré".	35
Figura 17. Espátula metálica utilizada na coleta.	37
Figura 18. Seringa utilizada para calcular a densidade.	
Figura 19. Secagem ao ar, em temperatura ambiente.....	38
Figura 20. Destorroamento manual do sedimento seco.	38
Figura 21. Peneiramento e material peneirado..	39
Figura 22. Amostras armazenadas para análise.....	40
Figura 23. Boxplot das concentrações de “Ag” nas áreas estudadas.	47
Figura 24. Boxplot das concentrações de “As” nas áreas estudadas.....	49
Figura 25. Boxplot das concentrações de “C” nas áreas estudadas.	50
Figura 26. Boxplot das concentrações de Co nas áreas estudadas.	52
Figura 27. Boxplot das concentrações de Cr nas áreas estudadas.....	54
Figura 28. Boxplot das concentrações de Cu nas áreas estudadas.	55
Figura 29. Boxplot das concentrações de MO nas áreas estudadas.	57
Figura 30. Boxplot das concentrações de Ni nas áreas estudadas.....	59
Figura 31. Boxplot das concentrações de Pb nas áreas estudadas.....	61
Figura 32. Boxplot das concentrações de Zn nas áreas estudadas.	63
Figura 33. Mapa de calor das concentrações dos elementos químicos nas diferentes áreas e profundidades analisadas.....	64
Figura 34. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos elementos químicos nas áreas de manguezal estudadas	66
Figura 35. Percentual de variância explicada pelos componentes principais obtidos na análise PCA.Figura 34. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos elementos químicos nas áreas de manguezal estudadas.....	66

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais.	19
Tabela 2. Instrumentos Internacionais (Base do Mercado de Carbono).	21
Tabela 3. Evolução da Regulação do Mercado de Carbono no Brasil.	23
Tabela 4. Estimativa do Custo Social do Carbono na camada de 0–10 cm.	70
Tabela 5. Estimativa do Custo Social do Carbono na camada de 10–20 cm.	70
Tabela 6. Estimativa do Custo Social do Carbono na soma das camadas de 0–10 cm e de 10 - 20 cm.	71

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT — Associação Brasileira de Normas Técnicas
Ag — Prata
Al — Alumínio
APP — Área de Preservação Permanente
As — Arsênio
B — Boro
C — Carbono
CCME — Canadian Council of Ministers of the Environment
CO₂ — Dióxido de Carbono
Co — Cobalto
CONAMA — Conselho Nacional do Meio Ambiente
Cr — Cromo
CSC — Custo Social do Carbono
Cu — Cobre
DA — Densidade Aparente
EPA — Environmental Protection Agency
Fe — Ferro
GEE — Gases de Efeito Estufa
ICP-OES — Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry (Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado)
ITPS — Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe
LABECO — Laboratório de Ecologia e Restauração Florestal
Mg C ha⁻¹ — Megagrama de carbono por hectare
mg kg⁻¹ — Miligrama por quilograma
Mn — Manganês
MO — Matéria Orgânica
Ni — Níquel
ODS — Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
Pb — Chumbo
PEL — Probable Effect Level
PNGC — Plano Nacional de Gerenciamento Costeiro
PNMA — Política Nacional do Meio Ambiente
PNMC — Política Nacional sobre Mudança do Clima
PNPSA — Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais
SBCE — Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa
SDGs — Sustainable Development Goals
SNUC — Sistema Nacional de Unidades de Conservação
tCO₂e — Tonelada de dióxido de carbono equivalente

TEL — Threshold Effect Level

UFS — Universidade Federal de Sergipe

US EPA — United States Environmental Protection
Agency

V — Vanádio

Zn — Zinco

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	11
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	15
2.1	Ecossistema Manguezal	15
2.2	Impactos ambientais em manguezais	17
2.3	Mercado de carbono	20
3	MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1	Localização e caracterização da área de estudo	25
3.1.1	Bairro Areia Branca – Aracaju	25
3.1.2	Nossa Senhora do Socorro	32
3.1.3	Parque Ecológico Tramandaí	36
3.1.4	Método de abordagem	42
3.2	Metodologia	42
3.3	Determinação do Carbono Orgânico do Solo	47
3.4	Determinação de Metais em Solo e Sedimento	49
3.5	Estimativa do estoque de carbono orgânico no sedimento	49
3.6	Valoração do custo social do carbono	51
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.1	Análises das amostras de sedimentos	53
4.2	Custo social do carbono	60
5	CONCLUSÃO	63
6	REFERÊNCIAS	66

1 INTRODUÇÃO

Os manguezais são comuns nos trópicos e subtropicais e são considerados importantes ecossistemas costeiros do ponto de vista ecológico, social e econômico e representam a transição entre os meios terrestres e marinho sendo considerados eficientes sumidouros de carbono, especialmente nos sedimentos, uma vez que capturam e armazenam o carbono, prioritariamente na biomassa subterrânea. São considerados cruciais para mitigar os efeitos das mudanças climáticas globais e desempenham uma série de serviços ecossistêmicos, dentre os quais a proteção costeira, o abrigo para a biodiversidade e o sustento de populações tradicionais. Assim, sua degradação não apenas interrompe a captura de carbono, mas também transforma depósitos anteriores em fontes de gases de efeito estufa (GEE), contribuindo para o aquecimento global (SCHAEFFER-NOVELLI, 1995; SCHAEFFER-NOVELLI, 2002; DONATO et al., 2011; ALONGI, 2014; COSTANZA et al., 2014; ESTRADA et al., 2014; SOARES et al., 2019).

Considerados importantes ambientes de “carbono azul”, por mais frágeis que possam se apresentar, mediante pressões antrópicas, os manguezais possuem um valor ecológico agregado em relação à biodiversidade e ao bem-estar humano, sendo essenciais diante das emergências climáticas, como estratégia para mitigar a emissão de gases de efeito. O Brasil, por possuir uma extensa área de manguezais, há bilhões de toneladas de CO₂ armazenadas nesses ecossistemas, o que destaca a necessidade de implementação de políticas de conservação e restauração do patrimônio natural estufa (GEE) (LOVELOCK; REEF, 2020; THORHAUG et al., 2020; ALONGI, 2014; UILLE; LORENZEN; WANDSCHEER, 2024).

Por mais que o arcabouço legal voltado à proteção dos manguezais seja robusto, como é o caso do Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), que considera os manguezais como Área de Preservação Permanente (APP), o que demonstra que a mera existência do arcabouço legal não é suficiente para garantir a preservação e conservação dos manguezais, uma vez que é evidente a lacuna existente entre a existência da legislação e sua eficaz aplicabilidade, o que reforça a necessidade de ampliar a articulação entre políticas públicas efetivas e instrumentos econômicos, como o caso do mercado de carbono, pagamento por serviços ambientais e fortalecimento da governança ambiental (BRASIL, 2012; CONAMA, 2002; IPCC, 2019).

Considerado o quarto Estado do país com maior área de manguezal, Sergipe de acordo com dados fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), possui em seu território cerca de 22.959 ha de manguezal, no entanto a especulação imobiliária, ocupação irregular, estresse antrópico e a carcinicultura representam uma ameaça constante à manutenção dos

serviços ecossistêmicos, conservação e preservação do ecossistema, por meio da perda de estoques pesqueiros, biodiversidade biológica e da capacidade de sequestro de carbono, além da degradação da qualidade da água, o que resulta na redução do estoque de carbono no solo e dos serviços ecossistêmicos relacionados. (SILVA; ALMEIDA; MACEDO, 2017; SANTOS; ARAJO; SOUZA, 2021; GOMES; BONILLA, 2022).

Considerado o quarto Estado do país com maior área de manguezal, Sergipe de acordo com dados fornecidos pelo Ministério do Meio Ambiente (MMA), possui em seu território cerca de 22.959 ha de manguezal, no entanto a especulação imobiliária, ocupação irregular, estresse antrópico e a carcinicultura representam uma ameaça constante à manutenção dos serviços ecossistêmicos, conservação e preservação do ecossistema, por meio da perda de estoques pesqueiros, biodiversidade biológica e da capacidade de sequestro de carbono, além da degradação da qualidade da água, o que resulta na redução do estoque de carbono no solo e dos serviços ecossistêmicos relacionados. (SILVA; ALMEIDA; MACEDO, 2017; SANTOS; ARAJO; SOUZA, 2021; GOMES; BONILLA, 2022).

A carcinicultura e o despejo irregular de esgoto favorecem a liberação de metais pesados nos manguezais, os quais, por não serem degradados naturalmente, acumulam-se nos sedimentos e na biota, representando riscos à qualidade ambiental e ao equilíbrio ecológico. Devido à elevada concentração de matéria orgânica e às altas taxas de sedimentação, os manguezais tornam-se ambientes suscetíveis ao acúmulo desses contaminantes, fazendo dos sedimentos importantes indicadores ambientais. Além dos impactos ambientais, a degradação desses ecossistemas compromete serviços ecossistêmicos essenciais e gera prejuízos sociais e econômicos, de modo que a valoração baseada no custo social do carbono surge como ferramenta importante para estimar os impactos associados às emissões de CO₂ decorrentes da degradação ambiental, reforçando a necessidade de políticas públicas voltadas à conservação dos manguezais (KENNISH, 1992; SCHAEFFER-NOVELLI, 2004; AES, 2006; BARBIER et al., 2008; PINHEIRO et al., 2012; NOAA, 2014;).

Ao considerar estratégias voltadas à conservação ambiental, especialmente diante das pressões econômicas frequentemente associadas à degradação dos ecossistemas, o mercado de carbono surge como importante instrumento de mitigação climática. Baseado na precificação das emissões de gases de efeito estufa, esse mecanismo busca incentivar a redução, remoção e sequestro de carbono da atmosfera por meio da compensação ambiental e da comercialização de créditos de carbono. Estruturado inicialmente no âmbito da Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima e do Protocolo de Quioto, o mercado de carbono foi posteriormente fortalecido pelo Acordo de Paris, sendo classificado em regulado e voluntário.

Enquanto o mercado regulado é estabelecido por legislações específicas e limites obrigatórios de emissão, o voluntário caracteriza-se pela adesão espontânea de empresas e instituições interessadas em compensar suas emissões de carbono (GODOY; SAES, 2015; UNFCCC, 1992; UNFCCC, 2008; UNFCCC, 2015; BRASIL, 2024).

No Brasil, o fortalecimento das políticas climáticas ampliou as discussões sobre o mercado de carbono como mecanismo econômico de conservação ambiental. Nesse contexto, os manguezais apresentam elevado potencial para projetos de conservação, recuperação e manejo sustentável, considerando sua capacidade de armazenamento de carbono e os benefícios socioambientais associados, como proteção da biodiversidade, manutenção do modo de vida de comunidades tradicionais e adaptação às mudanças climáticas (IPCC, 2019; HOWARD et al., 2019; BRASIL, 2021b; BRASIL, 2024). Dessa forma, este estudo relaciona-se diretamente aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), especialmente os ODS 13, 14 e 15, além do ODS 8, ao abordar a conservação dos manguezais, o sequestro de carbono e a relevância socioeconômica desses ecossistemas.

Assim, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o estoque de carbono e a concentração de metais pesados em sedimentos de manguezais em diferentes estágios sucessionais no estado de Sergipe, bem como realizar a valoração econômica com base no custo social do carbono e objetivos específicos: Quantificar o estoque de carbono no sedimento de manguezais em diferentes estágios sucessionais no Estado de Sergipe; estimar o valor econômico dos estoques de carbono identificados nas áreas amostradas, com base no Custo Social do Carbono e comparar os valores de estoque e valoração do carbono entre os estágios sucessionais, identificando o potencial de conservação e uso sustentável desses ecossistemas.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Ecossistema Manguezal

Embora muitas vezes utilizados como sinônimos, os termos “mangue” e “manguezal” remetem a conceitos distintos: mangue refere-se às espécies arbóreas adaptadas às condições costeiras, enquanto manguezal designa o ecossistema como um todo, que integra vegetação, fauna, sedimentos e os diversos serviços ecossistêmicos que emergem dessa interação. Trata-se de um ambiente de transição entre os meios terrestre e marinho, marcado pela presença de espécies lenhosas dotadas de adaptações fisiológicas e estruturais, como raízes aéreas e tolerância à salinidade, que lhes permitem sobreviver em solos instáveis, pouco oxigenados e sujeitos à dinâmica diária das marés e em condições adequadas podem chegar a 45-50 metros de altura e distribuem-se principalmente em regiões tropicais entre os trópicos de Câncer e Capricórnio, abrangendo áreas das Américas, África, Ásia e Oceania (TWILLEY et al., 1992; KJERFVE; LACERDA, 1993; SCHAEFFER-NOVELLI, 1995; DONATO et al., 2011; ALONGI, 2012; ESTRADA et al., 2014).

Além da resiliência ambiental, esses ecossistemas desempenham funções essenciais, como proteção costeira, manutenção da biodiversidade, fonte de renda para povos e comunidades tradicionais, elevada produtividade biológica, barreira geográfica contra o avanço das marés e fixação do carbono em sua biomassa e sedimentos, o que os torna eficientes acumuladores de carbono, muitas vezes superiores às florestas tropicais. Dessa forma, sua conservação e restauração são estratégias altamente eficiente diante das mudanças climáticas, pois além de reter grandes quantidades de “carbono azul”, também oferecem benefícios ambientais, sociais e econômicos (SCHAEFFER-NOVELLI, 1982; CINTRON; SCHAEFFER-NOVELLI, 1983; MCLEOD; CHMURA; BOUILLON, 2011; DUARTE; MIDDELBURG, 2005; PENDLETON; DONATO; MURRAY, 2012; HERR et al., 2017; KAUFFMAN et al., 2018; LOVELOCK; REEF, 2020; CHARLES et al., 2020).

Os manguezais são ecossistemas capazes de capturar e estocar carbono de forma prolongada, sendo a eles atribuído o conceito de “carbono azul”, em cenário de relevância internacional, por estarem diretamente ligados a estratégias de mitigação e adaptação climática, bem como políticas contemporâneas de descarbonização (MACREADIE; ANTON; RAVEN, 2019; THORHAUG et al., 2020).

Tabela 1. Serviços ecossistêmicos prestados pelos manguezais.

Serviço	Benefício	Relação com clima
Proteção costeira	Reduz erosão	Adaptação
Berçário pesqueiro	Sustento comunitário	Segurança alimentar
Carbono azul	Mitigação climática	Créditos de carbono

Fonte: Elaborado pela autora, com base em MEA (2005), Barbier et al. (2011), McLeod, Chmura e Bouillon (2011) e Howard et al. (2019).

Os manguezais brasileiros desempenham funções ecológicas e serviços ecossistêmicos essenciais, como consta na Tabela 1, e sustentam a subsistência de inúmeras comunidades costeiras, que deles dependem para obtenção de alimento, geração de renda e manutenção de práticas culturais e saberes tradicionais. Esses ecossistemas se estendem ao longo de praticamente todo o litoral brasileiro, desde o Oiapoque, no extremo norte, até o município de Laguna, em Santa Catarina, e são formados predominantemente por seis espécies arbóreas: *Avicennia germinans*, *Avicennia schaueriana*, *Laguncularia racemosa*, *Rhizophora mangle*, *Rhizophora racemosa* e *Rhizophora harrisonii* (SAENGER; HEGERL; DAVIE, 1983; SCHAEFFER-NOVELLI, 1987; DIEGUES, 1998; MAIA et al., 2006; BARBIER et al., 2011).

O mangue-vermelho (*Rhizophora mangle*) destaca-se como a espécie típica de áreas sujeitas ao fluxo das maré e se sustenta por meio de rizóforos, que são raízes arqueadas que emergem do tronco e oferecem sustentação em sedimentos instáveis e lodosos, além de favorecer a formação de bosques densos, que resistem a ventos fortes e à força das marés (TOMLINSON, 1986; SILVA, 2003).

O mangue-branco (*Laguncularia racemosa*) é uma espécie que possui adaptação a regiões degradadas ou em regeneração, com incidência permanente de radiação solar e sedimentos mais arenosos. É considerada espécie pioneira na recuperação natural de manguezais, possui lenticelas discretas que favorecem a respiração mesmo em áreas mais alagadiças, podendo apresentar-se de forma isolada ou em bosques (TOMLINSON, 1986; SILVA, 2003; KILCA et al., 2010; LONDE et al., 2013).

O mangue-preto ou siriúba (*Avicennia* spp.) apresenta relativa uniformidade morfológica e ampla adaptação a diversas condições ambientais, incluindo ambientes hipersalinos, o que favorece sua ampla distribuição em diferentes zonas tropicais (TOMLINSON, 1986; SILVA, 2003).

2.2 Impactos ambientais em manguezais

Culturalmente no Brasil, o termo “mangue” simboliza não apenas a definição estritamente ecológica, mas também cultural e simbólica no imaginário coletivo, onde muitas vezes está associado a sujeira, desorganização, insalubridade e conectada direta ou indiretamente a uma sensação de insegurança, que se associa uma imagem distorcida e percepções negativas quanto ao ambiente e aos povos e comunidades que dependem dos frutos da maré para subsistência ou mesmo complementação da renda familiar, o que remete ao período colonial, onde muitas vezes os manguezais estavam associados aos pântanos e às doenças e insalubridade que a associação proporciona, historicamente motivou o desmatamento e políticas de urbanização e saúde pública que buscavam aterrar e descaracterizar os manguezais. (SCHAEFFER-NOVELLI, 1990; VANNUCCI, 1999; DIEGUES, 2000).

Historicamente, os aglomerados humanos concentraram-se em zonas costeiras e estuarinas. Nesse contexto, a percepção dos manguezais como ambientes insalubres, associados à propagação de doenças e incompatíveis com o ideal de progresso urbano, contribuiu para a supressão dessas áreas ao longo do processo de expansão das cidades. Como resultado, os manguezais passaram a ocupar as margens dos adensamentos urbanos, tornando-se mais suscetíveis à conversão para moradias, implantação de infraestrutura, disposição de resíduos sólidos e lançamento de efluentes domésticos e industriais (HEIKE et al., 2006; ANDRADE; ALMEIDA, 2012; ROCHA, 2013).

Como forma de mitigar, conservar e preservar o ecossistema dos manguezais, existe um arcabouço de instrumentos legais que visam incidir sobre a proteção, o uso e a gestão dos manguezais em diferentes escalas institucionais, Federal, Estadual e Municipal, como consta na tabela 2. No âmbito Federal, a proteção dos manguezais está ancorada em dispositivos constitucionais e infraconstitucionais, como o artigo 225 da Constituição Federal:

Art 225: Todos têm direito ao meio ambiente ecologicamente equilibrado, bem de uso comum do povo e essencial à sadia qualidade de vida, impondo-se ao poder público e à coletividade o dever de defendê-lo e preservá-lo para as presentes e futuras gerações.

E ainda o Código Florestal (Lei nº 12.651/2012), por meio do artigo 4º, inciso VII, que classificam os manguezais em toda sua extensão como Área de Preservação Permanente (APP), assegurando sua proteção integral. As resoluções do CONAMA reforçam esse enquadramento ao estabelecer critérios específicos para definição, licenciamento e controle de atividades em áreas de manguezal, conferindo maior detalhamento técnico à aplicação da legislação. Nesse contexto, no Estado de Sergipe, a Lei

Estadual nº 8.327/2017, institui a Política Estadual da Carcinicultura e reconhece essa atividade como agrossilvopastoril, de relevante interesse social e econômico. O que confere à carcinicultura um tratamento semelhante ao de sistemas produtivos rurais e na prática, tem sido interpretado como um fator de flexibilização dos processos de licenciamento ambiental, associada a fragilidades na fiscalização e a priorização de interesses econômicos, especialmente em áreas costeiras, pode abrir brechas normativas que favorecem a expansão da atividade sobre ecossistemas sensíveis, como os manguezais, intensificando conflitos socioambientais e processos de degradação ambiental (SERGIPE, 2017; NETO, 2025).

2.3 Mercado de carbono

A partir da década de 1990, o aumento das emissões de gases de efeito estufa provocou preocupação internacional, com a adoção da Convenção Quadro das Nações Unidas sobre Mudanças do Clima (UNFCCC), a qual estabelece bases institucionais para a cooperação global, o que representou um marco e desencadeou compromissos concretos, como a assinatura do Protocolo de Quioto, em 1997, que estabeleceu metas obrigatórias de redução de emissões para países industrializados e impulsionou a criação do mercado internacional de carbono, como uma alternativa para enfrentar problemas ambientais, utilizando estratégias econômicas voltadas à redução e compensação de emissões, sem recorrer a instrumentos de natureza fiscal (UNFCCC, 1992; UNFCCC, 2008; GODOY; SAES, 2015; UNFCCC, 2021).

Diante de limitações operacionais e institucionais do Protocolo de Quioto, constatou-se a necessidade da implementação do Acordo de Paris, em 2015, que culminou na maior participação, a partir de metas voluntárias, onde por meio do artigo 6º consolidou a continuidade do mercado de carbono, no entanto estabelecendo estratégias econômicas, sem a imposição de instrumentos fiscais diretos. Atualmente, o mercado de carbono encontra-se em processo de amadurecimento regulatório, com avanços na definição de regras para evitar a dupla contagem de emissões e garantir a integridade ambiental dos créditos (UNFCCC, 2015; IPCC, 2019; UNFCCC, 2021).

Tabela 2. Instrumentos Internacionais (Base do Mercado de Carbono).

Ano	Instrumento	Conteúdo e Importância
1992	Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNC)	Primeiro tratado internacional que reconhece a necessidade de estabilizar as emissões de gases de efeito estufa (GEE).
1997	Protocolo de Kyoto	Cria os primeiros mecanismos de mercado: MDL (Mecanismo de Desenvolvimento Limpo) e comércio de emissões entre países.

2005	Protocolo de Kyoto	Entrada em vigor do mercado regulado internacional de carbono.
2015	Acordo de Paris	Define metas globais de redução de emissões e estabelece o Artigo 6º como base para novos mercados de carbono.
2021	Glasgow Climate Pact (COP26)	Regulamenta regras do Art. 6º do Acordo de Paris e estrutura o novo mercado global.

Fonte: Elaborado pela autora, com base na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 1992), no Protocolo de Kyoto (1997), no Acordo de Paris (2015) e nas Leis Federais nº 12.187/2009, nº 14.119/2021 e nº 15.042/2024.

A trajetória evolutiva do mercado de carbono no Brasil é marcada por um alinhamento gradual com os compromissos climáticos internacionais e tem como marco inicial a Lei nº 12.187/2009, que instituiu a Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC) e adotou uma base legal para adoção de instrumentos econômicos voltados à mitigação das emissões dos gases do efeito estufa, assim como mecanismos de mercado e foi regulamentada pelo Decreto nº 7.390/2010, que definiu metas setoriais voluntárias de redução de emissões. (BRASIL, 2009; BRASIL, 2010).

No cenário internacional, a Conferência das Nações Unidas sobre Desenvolvimento Sustentável (Rio+20,) realizada em 2012, provocou debates sobre economia verde, precificação do carbono e pagamento por serviços ambientais, influenciando o direcionamento das políticas públicas ambientais brasileiras. Em 2015, com a apresentação da Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC,) o Brasil assumiu compromissos formais de redução de emissões no âmbito do Acordo de Paris, reforçando a necessidade de instrumentos econômicos eficazes e compatíveis com as diretrizes da UNFCCC (UNFCCC, 2015).

Avanços relevantes ocorreram a partir de 2021, com a promulgação da Lei nº 14.119/2021, que instituiu a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PNPSA,) reconhecendo o carbono como serviço ambiental e abrindo espaço para iniciativas relacionadas ao carbono florestal e ao carbono azul. O Decreto nº 10.828/2021 estruturou operacionalmente o PSA no país, criando o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Paralelamente, intensificaram-se as discussões legislativas por meio dos Projetos de Lei nº 528/2021 e nº 412/2022, que propuseram a criação do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE), sinalizando a transição para um mercado regulado de carbono (BRASIL, 2021; BRASIL, 2021).

O que culminou, em 2024, com a aprovação do marco regulatório do mercado de carbono brasileiro, por meio da Lei nº 15.042/2024, que instituiu oficialmente o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões (SBCE), que estabelece diretrizes para a definição de limites de emissão, setores obrigados, alocação e comercialização de créditos de carbono, consolidando o Brasil no cenário internacional como país com mercado regulado de carbono. (BRASIL, 2024).

Tabela 3. Evolução da Regulação do Mercado de Carbono no Brasil.

Ano	Norma/Instrumento	Principais Contribuições
2009	Lei nº 12.187/2009 – Política Nacional sobre Mudança do Clima (PNMC)	Primeira base legal brasileira sobre clima; prevê instrumentos econômicos e mercado de carbono.
2010	Decreto nº 7.390/2010	Regulamenta a PNMC e estabelece metas setoriais voluntárias de redução de emissões.
2012	Rio+20 (Economia Verde)	Impulsiona debates sobre precificação do carbono e PSA ambiental.
2015	Contribuição Nacionalmente Determinada (NDC Brasil)	Brasil assume compromissos internacionais de redução de emissões no âmbito do Acordo de Paris.
2021	Lei nº 14.119/2021 – Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais (PSA)	Base fundamental para carbono como serviço ambiental, incluindo carbono azul e florestal.
2021	Decreto nº 10.828/2021	Estrutura o funcionamento do PSA e o Cadastro Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais.
2022	Discussões do PL 528/2021 e PL 412/2022	Projetos estruturantes para criação do Mercado Brasileiro de Redução de Emissões (MBRE).
2023	Avanço da Estratégia Nacional de Precificação de Carbono	Governo federal inicia estruturação técnica do Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões.
2024	Aprovação do marco regulatório do mercado de carbono (SBCE)	Brasil cria oficialmente o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões.

Fonte: Elaborado pela autora, com base na Convenção-Quadro das Nações Unidas sobre Mudança do Clima (UNFCCC, 1992), no Protocolo de Kyoto (UNFCCC, 2008), no Acordo de Paris (UNFCCC, 2015) e nas Leis Federais nº 12.187/2009, nº 14.119/2021 e nº 15.042/2024 (BRASIL, 2009; BRASIL, 2021b; BRASIL, 2024).

O mercado de créditos de carbono estrutura-se em dois grandes arranjos institucionais, o mercado oficial (ou regulado) e o mercado voluntário. O mercado oficial tem origem em acordos internacionais voltados ao controle das emissões de gases de efeito estufa, estabelecendo compromissos obrigatórios para países ou setores específicos, com regras e metas formalmente definidas. Nesse contexto, foram criados mecanismos de flexibilização que permitem o cumprimento das metas de redução por meio da comercialização de créditos de carbono, como o Mecanismo de Desenvolvimento Limpo, a Implementação Conjunta e o Comércio de Emissões (MICHEL; KALLWEIT; PFEIL, 2016).

Esses mecanismos do mercado regulado possibilitam que agentes com maiores custos de redução de emissões adquiram créditos gerados por projetos realizados em outros países ou setores, promovendo maior eficiência econômica no cumprimento das metas ambientais. No entanto, a complexidade institucional, os elevados custos de transação e a rigidez dos critérios metodológicos tornam o acesso a esse mercado mais restrito, especialmente para projetos vinculados a ecossistemas naturais e países em desenvolvimento (ZANETTI, 2019; UNFCCC, 2008).

Por outro lado, o mercado voluntário caracteriza-se pela adesão espontânea de empresas, organizações e indivíduos que buscam compensar suas emissões de forma independente de obrigações legais. Esse mercado apresenta maior flexibilidade regulatória, permitindo a inclusão de uma ampla variedade de projetos ambientais, incluindo aqueles voltados à conservação e restauração de ecossistemas, o que amplia suas possibilidades de aplicação em contextos locais e regionais (GODOY; SAES, 2015; UNFCCC, 2021).

Apesar dessa flexibilidade, o mercado voluntário também enfrenta desafios, como a ausência de um marco regulatório único e a variabilidade nos padrões de certificação, o que pode gerar incertezas quanto à integridade ambiental e à credibilidade dos créditos comercializados. Ainda assim, esse mercado tem desempenhado papel relevante na ampliação das iniciativas de mitigação climática, sobretudo em áreas onde o mercado regulado apresenta limitações operacionais ou institucionais (MICHEL; KALLWEIT; PFEIL, 2016; UNFCCC, 2021).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada em três áreas de manguezais localizadas no Estado de Sergipe, Brasil. Os locais escolhidos representam diferentes estágios sucessionais do ecossistema manguezal.

3.1.1 Bairro Areia Branca – Aracaju

O primeiro ponto de amostragem localiza-se no bairro Areia Branca, situado na zona sul do município de Aracaju, Sergipe. Essa área é caracterizada como estágio sucessional avançado com a presença de extensos manguezais ao longo das margens do canal do Santa Maria, afluente do rio Vaza- Barris, que se interligam a canais de maré e áreas urbanas adjacentes. Apesar de estar inserido em uma região de ocupação urbana crescente, o manguezal de Areia Branca apresenta vegetação densa e bem desenvolvida, com espécies típicas como *Rhizophora mangle*, *Avicennia schaueriana* e *Laguncularia racemosa*. A área recebe influência direta das marés e o ecossistema mantém características estruturais preservadas.

Figura 1. Local de coleta das amostras de sedimento no Bairro Areia Branca.



Fonte: Elaboração própria (2026).

A área analisada apresenta um manguezal com vegetação bem desenvolvida, caracterizado pelo expressivo adensamento de indivíduos de *Rhizophora mangle* (mangue vermelho), como consta na Figura 2, espécie dominante no trecho avaliado. Além da predominância do mangue-vermelho, é possível identificar a ocorrência de *Laguncularia racemosa*, distribuída de forma esparsa no interior do bosque.

Nos manguezais urbanos de Aracaju, Santana et al. (2020) identificaram a maior ocorrência de *Laguncularia racemosa*, atribuindo esse padrão à elevada capacidade da espécie de se adaptar a ambientes submetidos a alterações antrópicas, bem como à sua associação com fases iniciais e intermediárias do processo de regeneração florestal. Por outro lado, no manguezal do Mosqueiro, caracterizado por menor intensidade de impactos antrópicos e maior tempo de recuperação ambiental, foi registrada uma maior representatividade de *Rhizophora mangle*, o que indica um estágio sucessional mais avançado

Figura 2. *Rizophora*



Fonte: Autora, 2026.

De modo geral, o ambiente apresenta elevada cobertura vegetal, baixa evidência de supressão e manutenção das características ecológicas típicas de manguezais, como consta na Figura 3. Também é possível visualizar a presença de propágulos de ambas as espécies, indicando capacidade de regeneração natural do manguezal, conforme apresentado na figura 4 . Observa-se ainda a existência de fluxo hídrico no local, relacionado à dinâmica de marés e à circulação de água no interior do ecossistema.

Figura 3. Propágulo de Mangue vermelho.



Fonte: Autora, 2016

É possível identificar também a presença de fauna típica dos manguezais, como caranguejos, massunis, sururu conforme ilustrado na Figura 4.

Figura 4. Sururu



Fonte: Autora, 2026.

No entanto, apesar do bom estado de conservação aparente do manguezal, observa-se no entorno imediato a presença de construções residenciais e empreendimentos comerciais de alto padrão implantados na margem do rio, como consta na figura 5, em possíveis Áreas de Preservação Permanente (APP), o que demonstra uma pressão antrópica sobre o ecossistema e sinaliza um fator potencial de risco à manutenção da integridade ambiental do ecossistema.

Figura 58. Construções às margens do rio.



Fonte: Autora, 2026.

Figura 611. Construções às margens do rio.



Fonte: Autora, 2026.

Também são identificadas estruturas associadas ao uso tradicional do estuário, como pequenos portos e locais destinados ao abrigo e à manutenção de embarcações utilizadas por pescadores e marisqueiras, como consta na Figura 07.

Figura 7. Local utilizado pela comunidade tradicional para guardar embarcações.



Fonte: Autora, 2026.

3.1.2 Nossa Senhora do Socorro

O segundo ponto de amostragem está localizado em um manguezal em estágio de regeneração natural, sendo considerado em estágio sucessional médio, situado no município de Nossa Senhora do Socorro, Sergipe, integrante da Região Metropolitana de Aracaju. A área apresenta evidências de restauração passiva ou assistida após impactos antrópicos anteriores, principalmente relacionados à atividade de carcinicultura anteriormente instalada na região. Atualmente, a vegetação é composta predominantemente por indivíduos jovens, de porte arbustivo a arbóreo.

Figura 8. Local de coleta das amostras de sedimento em Nossa Senhora do Socorro.



Fonte: Elaboração própria autora (2026).

A área analisada corresponde a um antigo empreendimento de carcinicultura atualmente abandonado, como consta na figura 09, onde é possível constatar o processo de regeneração natural do manguezal. Observa-se a presença de indivíduos jovens, ainda de menor porte e com densidade reduzida em comparação a manguezais mais consolidados.

Figura 9. Área de carcinicultura abandonada.



Fonte: Autora, 2026

Verifica-se também a presença de habitações populares implantadas em áreas originalmente ocupadas por manguezal, caracterizando possível ocupação em Área de Preservação Permanente.

Também são identificadas embarcações utilizadas por pescadores e comunidades tradicionais armazenadas no local, como consta na Figura 10, evidenciando o uso contínuo do estuário para atividades de subsistência. Esse conjunto de fatores reforça a complexidade socioambiental da área, marcada simultaneamente por processos de recuperação ecológica e por impactos decorrentes da ocupação e uso inadequado do ecossistema.

Figura 10. . Embarcações utilizadas por pescadores.



Fonte: Autora, 2026

Apesar do estágio de regeneração, o ambiente apresenta evidentes sinais de pressão antrópica, com ocorrência de descarte irregular de resíduos sólidos, incluindo materiais domésticos e resíduos da construção civil. Em relação à fauna, não foi identificada visualmente a presença de animais típicos de manguezal em grande proporção, especialmente quando comparada à área da Areia Branca.

3.1.3 Parque Ecológico Tramandaí

O terceiro ponto de amostragem corresponde a um manguezal degradado, localizado na região do Parque Ecológico Tramandaí, localizado no município de Aracaju, Sergipe, o qual encontra-se submetido a intensas pressões antrópicas, decorrentes principalmente da ocupação irregular das margens, do lançamento de resíduos sólidos e efluentes domésticos, além de alterações no regime hidrológico local. Como consequência, observa-se baixa cobertura vegetal, presença de solos expostos e processos erosivos, bem como sinais evidentes de estresse ecológico, incluindo mortalidade de árvores, acúmulo de sedimentos finos e redução da biodiversidade. A área apresenta comprometimento das funções ecossistêmicas típicas do manguezal.

Figura11. Local de coleta das amostras de sedimento no Tramandaí.



Fonte: Elaboração própria (2026)

O local apresenta um notável adensamento urbano em seu entorno, estando inserido em uma área intensamente antropizada e sob forte influência de infraestrutura urbana, conforme evidenciado na Figura 12.

Figura 12. Área do Parque Tramandaí.



Fonte: Autora, 2026.

Figura 13. Área do Parque Tramandaí.



Fonte: Autora, 2026

É possível identificar claramente a ocorrência de manguezais secos, com indivíduos mortos e estruturas lenhosas em avançado estado de deterioração, evidenciando comprometimento da vegetação, como consta na Figuras 14.

Figura 14. Manguezal degradado no Parque Tramandaí.



Fonte: Autora, 2026

Observa-se a instalação de uma estrutura do tipo “ecobarreira”, como consta na Figura 15, destinada à retenção de materiais descartados inadequadamente. No momento da coleta de dados, parte dos resíduos acumulados encontrava-se acondicionada em uma caixa estacionária para armazenamento temporário.

Figura 24. Ecobarreira



Fonte: Autora, 2026

Apesar de se tratar de uma Área de Preservação Permanente (APP) e de constituir bem pertencente à União, o local encontra-se submetido a intensas pressões antrópica, evidenciando conflitos de uso e comprometimento da funcionalidade ambiental do ecossistema manguezal.

Ainda assim, apesar da aparente mortandade de indivíduos de mangue em determinados trechos, é possível constatar a presença significativa de fauna característica desse ambiente, como caranguejos chama-maré e aves associadas a ecossistema, como consta na Figura 16.

Figura 16. "Chama-maré".



Fonte: Autora, 2026

3.1.4 Método de abordagem

O método de pesquisa adotado é uma abordagem quantitativa e analítica. O enfoque quantitativo permite a coleta e o tratamento sistemático de informações mensuráveis, enquanto o caráter analítico possibilita a interpretação comparativa entre diferentes estágios sucessionais dos ecossistemas estudados.

3.2 METODOLOGIA

A coleta de sedimentos foi realizada manualmente, utilizando-se uma espátula metálica com aproximadamente 20 cm de comprimento (29 e 30), conforme procedimentos recomendados pela metodologia da Embrapa (2017) para amostragem de solos e sedimentos. O instrumento possibilitou adequado controle do volume e da porção de material coletado, independentemente da consistência do sedimento, assegurando maior precisão na retirada das camadas superficiais e subsuperficiais analisadas.

As coletas foram realizadas em três áreas de manguezais localizadas no Estado de Sergipe, sendo dois locais de coleta localizados no Município de Aracaju, localizados no Bairro Areia Branca e no Parque Ecológico Tramandaí, e outro ponto de coleta localizado no Município de Nossa Senhora do Socorro. Em cada área, a amostragem foi distribuída em três pontos distintos, totalizando oito subamostras por área, sendo quatro na camada superficial (0–10 cm) e quatro na camada subsuperficial (10–20 cm), de modo a representar a variabilidade vertical do sedimento, conforme protocolos amplamente empregados em estudos de carbono em ecossistemas de manguezal.

Figura 17. Espátula metálica utilizada na coleta.



Fonte: Autora, 2026

Para a determinação da densidade aparente do sedimento, foi utilizada uma seringa graduada de 60 mL devidamente adaptada. O procedimento consistiu na remoção da extremidade (“bico”) da seringa, permitindo sua utilização como um cilindro volumétrico para a extração do material sedimentar. Dessa forma, o sedimento foi coletado diretamente até o volume correspondente a 60 mL, garantindo a padronização do volume amostrado, conforme ilustrado na Figura 18. Posteriormente, a amostra foi submetida à secagem e pesagem em laboratório, possibilitando o cálculo da densidade aparente a partir da razão entre a massa seca obtida e o volume conhecido do amostrador.

$$DA(kgm^{-3}) = \frac{M_s}{V} \quad (3.1)$$

Em que:

$DA (kgm^3)$ corresponde à densidade aparente do sedimento;

$M_s (kg)$ é a massa seca da amostra;

$V (m^3)$ representa o volume do amostrador.

Figura 18. Seringa utilizada para calcular a densidade.



Fonte: Autora, 2026.

No Laboratório de Recuperação de Áreas Degradadas (LABRAD), as amostras de sedimento foram submetidas ao pré-tratamento físico conforme procedimentos consolidados para análises físico-químicas de solos e sedimentos descritos na literatura técnica (EMBRAPA, 2011; ISO, 2006). Inicialmente, realizou-se a secagem ao ar, em temperatura ambiente.

Figura 19. Secagem ao ar, em temperatura ambiente.



Fonte: Autora, 2026

Em seguida, procedeu-se ao destorroamento manual das amostras, com o objetivo de desagregar os torrões e obter uma amostra mais homogênea do material (EMBRAPA, 2011), conforme apresentado na Figura 20.

Figura 20. Destorroamento manual do sedimento seco.



Fonte: Autora, 2026.

Posteriormente, as amostras foram peneiradas em malhas de aço, com abertura de 3 mm, visando remover fragmentos maiores e padronizar a granulometria do sedimento para as análises posteriores, o peneiramento visa remover fragmentos grosseiros, raízes e detritos, além de padronizar a granulometria do material utilizado nas análises químicas subsequentes (ISO, 2006; EMBRAPA, 2011), conforme ilustrado nas Figura 21 acondicionadas em sacos plásticos, devidamente identificados.

Figura 21. Peneiramento e material peneirado..



Fonte: Autora, 2026

Por fim, o material peneirado foi homogeneizado e acondicionado em recipientes devidamente identificados, como consta na Figura 22, permanecendo armazenado até a realização das análises laboratoriais.

Figura 22. Amostras armazenadas para análise.



Fonte: Autora, 2026

3.3 Determinação do Carbono Orgânico do Solo

As análises de carbono orgânico do solo e sedimento foram realizadas pelo Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS), utilizando o método sulfocrômico via úmida, amplamente empregado em análises de solos e sedimentos. Esse método deriva da adaptação do procedimento originalmente proposto por WALKLEY; BLACK, 1934, sendo recomendado para a quantificação do carbono orgânico oxidável em matrizes ambientais.

Para a realização das análises, as amostras de sedimento foram previamente secas, homogeneizadas e peneiradas, garantindo maior uniformidade do material analisado. Em seguida, foi pesada uma alíquota de aproximadamente 0,5 g, sendo utilizada massa inferior em amostras com maior teor de matéria orgânica. O material foi transferido para erlenmeyer, ao qual se adicionou volume conhecido de solução de dicromato de potássio. O sistema foi submetido a aquecimento controlado em chapa aquecedora, utilizando dispositivo condensador, de modo a assegurar a eficiência da reação de oxidação sem perdas por volatilização.

Após o resfriamento da mistura reacional, procedeu-se à diluição com água destilada e à adição de ácido ortofosfórico, com o objetivo de minimizar interferências causadas por íons metálicos, especialmente ferro. Em seguida, adicionou-se o indicador apropriado, realizando-se a titulação do excesso de dicromato com solução padronizada de sulfato ferroso amoniacal

até a observação do ponto final da reação. Paralelamente, foi conduzida uma prova em branco, submetida às mesmas condições analíticas, permitindo a correção dos volumes utilizados.

O teor de carbono orgânico foi calculado a partir da diferença entre os volumes gastos na titulação da amostra e do branco, considerando a massa seca do material analisado e os fatores estequiométricos da reação de oxirredução. Os resultados foram expressos em g kg^{-1} de carbono orgânico.

Como etapa complementar, foi empregado o método colorimétrico, conforme procedimento descrito nos protocolos analíticos do ITPS, com o objetivo de calibração e verificação dos resultados obtidos pelo método volumétrico. Inicialmente, foram selecionadas entre 12 e 15 amostras de solo previamente analisadas pelo método volumétrico, abrangendo ampla faixa de teores de matéria orgânica, distribuídos, em geral, entre 0 e 200 g dm^{-3} , de modo a garantir representatividade para a construção da curva analítica.

Para cada determinação, transferiu-se 1 cm^3 de sedimento seco ao ar para cubas cilíndricas de 100 mL, sendo realizada simultaneamente uma prova em branco, sem adição de solo. As análises foram conduzidas em duplicata. Em seguida, adicionou-se 10 mL da solução de dicromato em meio ácido sulfúrico, promovendo-se a agitação da mistura por aproximadamente 10 minutos em mesa agitadora horizontal, em velocidade mínima de 180 rpm. Após um período de repouso de uma hora, adicionaram-se 50 mL de água destilada, utilizando jato forte para garantir a homogeneização da solução. As cubas foram então cobertas com material plástico e mantidas em repouso por, no mínimo, 12 horas, permitindo a completa decantação do material sólido.

No dia seguinte, procedeu-se à leitura das amostras em espectrofotômetro, utilizando cubetacom caminho óptico de 1 cm e comprimento de onda de 650 nm. Os valores de absorbância obtidos foram registrados e utilizados para a calibração do método colorimétrico, por meio da construção de curva relacionando os valores de absorbância aos teores de matéria orgânica previamente determinados pelo método volumétrico. Dessa forma, o método colorimétrico foi ajustado e validado em relação aos resultados do método sulfocrômico via úmida, garantindo maior confiabilidade e reprodutibilidade dos dados analíticos.

3.4 Determinação de Metais em Sedimento

As análises de metais em sedimento foram realizadas pelo Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS), após digestão ácida assistida por micro-ondas, com posterior determinação das concentrações por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado (ICP-OES). Esse procedimento é amplamente utilizado em estudos ambientais por sua eficiência na solubilização de metais e elevada sensibilidade analítica.

As amostras foram previamente secas, destorroadas, homogeneizadas e peneiradas,

sendo pesada uma alíquota variando entre 0,25 e 0,50 g, conforme as características da matriz. O material foi transferido para frascos específicos para digestão em sistema fechado, aos quais se adicionou ácido nítrico concentrado, podendo ser utilizado isoladamente ou em combinação com outros ácidos minerais, de acordo com o tipo de amostra analisada.

A digestão foi conduzida em forno de micro-ondas, sob condições controladas de temperatura e pressão, permitindo a decomposição eficiente da matriz sólida e a solubilização dos metais associados às frações trocáveis, carbonáticas, óxidos e parte da fração residual do solo ou sedimento. Após o resfriamento, os extratos obtidos foram transferidos para balões volumétricos e tiveram seus volumes ajustados com água ultrapura.

A quantificação dos elementos foi realizada por ICP-OES, técnica multielementar baseada na excitação de átomos e íons metálicos em plasma de argônio, possibilitando a determinação simultânea de diversos metais, como As, Pb, Co, Cu, Cr, Ni, Zn e Ag. As concentrações foram expressas em mg kg⁻¹, considerando a massa seca da amostra.

Para a obtenção de um valor representativo de cada elemento analisado, assim como da matéria orgânica, foi calculada a média aritmética das quatro amostras coletadas em cada local, considerando-se separadamente cada intervalo de profundidade avaliado. Esse procedimento permitiu reduzir a influência de variações pontuais e representar de forma mais adequada as condições médias do sedimento em cada área de estudo, garantindo maior consistência e comparabilidade dos resultados entre os diferentes locais e camadas analisadas.

3.5 Estimativa do estoque de carbono orgânico no sedimento

O estoque de carbono orgânico no sedimento foi estimado a partir da integração entre a densidade aparente, o teor de carbono orgânico e a espessura das camadas analisadas, procedimento amplamente empregado em estudos de carbono azul em ecossistemas de manguezal (DONATO et al., 2011; EMBRAPA, 2011; HOWARD et al., 2014).

A densidade aparente do sedimento foi determinada pela razão entre a massa seca da amostra, obtida após secagem em estufa até peso constante, e o volume previamente conhecido do amostrador, conforme procedimentos descritos no Manual de Métodos de Análise de Solo da EMBRAPA (EMBRAPA, 2011), sendo calculada de acordo com a Equação:

$$DA(kgm^{-3}) = \frac{M_s}{V}$$

Em que:

DA (kgm^{-3}) corresponde à densidade aparente do sedimento;

M_s (kg) é a massa seca da amostra;

V (m^3) representa o volume do amostrador.

O teor de carbono orgânico foi quantificado por método químico de oxidação, sendo expresso em porcentagem, de forma a representar a fração de carbono orgânico presente no material analisado. Para cada intervalo de profundidade, o estoque de carbono foi inicialmente calculado em unidades de massa por área ($kg\ C\ m^{-2}$), conforme a Equação:

$$E = \frac{DA \times z \times C}{100}$$

Em que:

E = estoque de carbono por unidade de área ($kg\ C\ m^{-2}$);

DA = densidade aparente do sedimento ($kg\ m^{-3}$);

z = espessura da camada analisada (m); C = teor de carbono orgânico (%).

Em seguida, os valores foram convertidos para $Mg\ C\ ha^{-1}$ por meio da Equação:

$$E(MgCha^{-1}) = E(kgm^{-2}) \times 10$$

Em que:

E ($Mg\ ha^{-1}$) = Estoque de carbono em $Mg\ C$

ha^{-1} ; E = Estoque de carbono em $Kg\ C\ m^{-2}$.

3.6 Valoração do custo social do carbono

A valoração econômica do carbono orgânico estocado no sedimento foi realizada a partir da conversão do estoque de carbono ($Mg\ C\ ha^{-1}$) em dióxido de carbono equivalente ($Mg\ CO_2e\ ha^{-1}$), considerando-se a razão entre a massa molecular do dióxido de carbono e a massa do carbono. Essa conversão baseia-se no fator 44/12, amplamente adotado em estudos climáticos e de carbono azul, permitindo expressar o carbono estocado em termos de potencial de mitigação de emissões de gases de efeito estufa (DONATO et al., 2011; HOWARD et al., 2014).

Após a conversão, o valor obtido foi multiplicado pelo custo social do carbono (Social Cost of Carbon – SCC), que representa a estimativa monetária dos danos econômicos

associados à emissão de uma tonelada de dióxido de carbono na atmosfera, incluindo danos adversos ao meio ambiente (United States Environmental Protection Agency, 2023).

O cálculo da valoração do carbono foi realizado conforme a Equação:

$$VSC = E \times \frac{44}{12} \times SCC$$

Em que:

VSC = valor social do carbono estocado (US\$,ha⁻¹ ou R\$,ha⁻¹); E = estoque de carbono orgânico no sedimento (Mg C ha⁻¹);

44/12 = fator de conversão de carbono para dióxido de carbono equivalente;

SCC = custo social do carbono (US\$ t CO₂⁻¹ ou R\$t CO₂⁻¹).

A aplicação dessa abordagem possibilita atribuir um valor econômico ao carbono armazenado nos sedimentos de manguezais, reforçando a importância desses ecossistemas como reservatórios naturais de carbono. Além disso, evidencia seu papel estratégico no enfrentamento das mudanças climáticas, principalmente em áreas costeiras que sofrem intensa pressão das atividades humanas (ALONGI, 2014).

3.7 Análise Estatística

A análise estatística dos dados foi realizada inicialmente, os dados foram organizados em planilhas eletrônicas e submetidos à estatística descritiva, incluindo cálculo de média, desvio padrão, valores mínimos e máximos.

Posteriormente, foi realizada a Análise de Variância (ANOVA) a 5% de significância para verificar a existência de diferenças estatisticamente significativas entre as áreas e profundidades avaliadas. Quando identificadas diferenças significativas, as médias foram comparadas por meio do teste de Tukey ($p \leq 0,05$), permitindo a identificação dos grupos que diferiram entre si.

Também foi realizada análise multivariada por meio da Análise de Componentes Principais (PCA), utilizada para avaliar a associação entre os elementos químicos, matéria orgânica e as áreas amostradas, permitindo identificar padrões de similaridade, possíveis fontes de contaminação e relações geoquímicas entre as variáveis analisadas.

Além disso, foi elaborado um mapa de calor (heatmap) para visualização da distribuição e intensidade das concentrações dos elementos químicos e da matéria orgânica nas diferentes áreas e profundidades estudadas. A padronização dos dados permitiu melhor comparação entre as variáveis, evidenciando tendências de agrupamento e comportamento geoquímico dos sedimentos.

As análises estatísticas e a elaboração dos gráficos foram realizadas em software estatístico apropriado, adotando-se nível de significância de 5% para todos os testes inferenciais.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análises química dos sedimentos

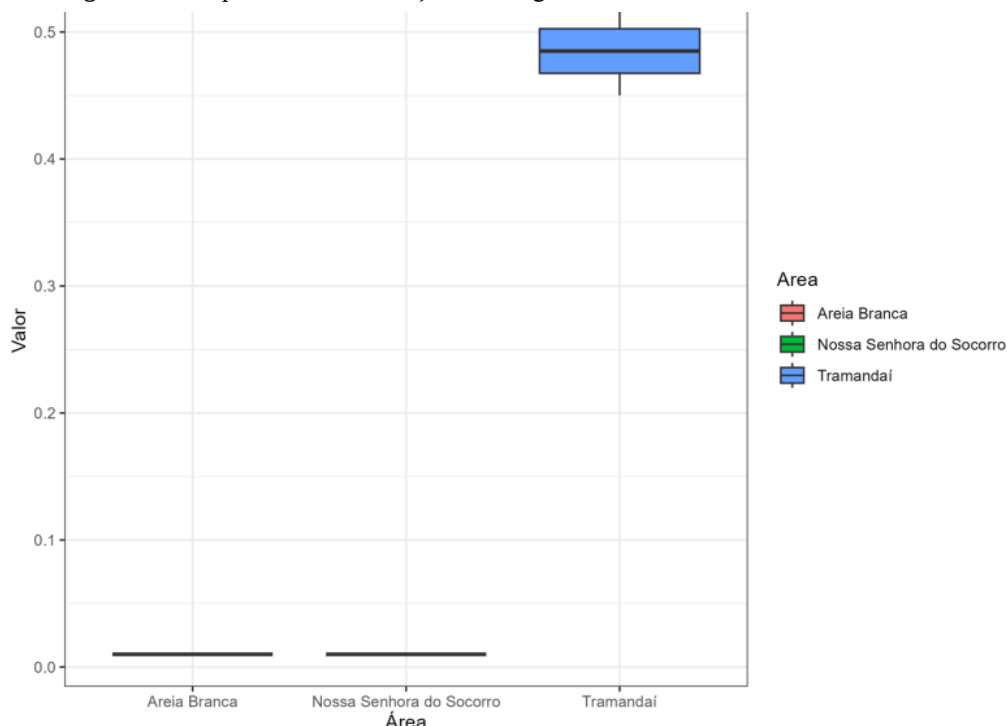
Os resultados encontrados corroboram com estudos desenvolvidos em manguezais urbanizados brasileiros, especialmente Nordeste, que possui uma concentração significativa de metais em manguezais que se encontram em áreas com lançamento de efluentes, onde a influência antrópica está associada a concentrações mais elevadas de metais em sedimentos de manguezais, que apresentam acúmulo de matéria orgânica e baixa renovação hídrica, o que ocasiona maior retenção de elementos potencialmente tóxicos (SILVA et al., 2018; SOUZA et al., 2020).

Os manguezais, por possuírem uma lenta decomposição da matéria orgânica, especialmente em condições anaeróbicas, são considerados um dos ecossistemas mais eficientes do planeta no que tange ao armazenamento e retenção de carbono, por serem importantes reservatórios bioquímicos, podem manter os metais-traço absorvidos por longos períodos no sedimento dos manguezais, o que significa um risco em potencial para o meio ambiente e a saúde humana, devido a bioacumulação em organismos bentônicos e mariscos (MARCHAND et al., 2011; RAHMAN et al., 2012; ALONGI, 2014).

O processo de bioacumulação de metais-traço presentes no sedimento pode ser incorporado por meio de moluscos e crustáceos estuarinos, proporcionando sua propagação ao longo da cadeia alimentar, o que representa um risco ambiental e à saúde humana (RAINBOW, 2002; TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006).

O boxplot referente às concentrações de Ag, como consta na figura 23, evidencia que Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro apresentaram concentrações muito baixas e praticamente constantes, próximas de $0,01 \text{ mg kg}^{-1}$, Tramandaí apresentou valores significativamente superiores, indicando um padrão relativamente homogêneo de ocorrência do elemento na área.

Figura 23. Boxplot das concentrações de “Ag” nas áreas estudadas.



Apesar de os valores permanecerem abaixo do limite de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Ag, os resultados sugerem enriquecimento significativo desse elemento no Tramandaí quando comparado às demais áreas analisadas. Esse comportamento indica possível influência antrópica localizada, especialmente relacionada ao aporte de efluentes urbanos, resíduos sólidos, drenagens contaminadas ou alterações hidrossedimentológicas do ambiente (ALONGI, 2014).

O manguezal do Parque Tramandaí, um dos principais remanescentes de manguezal urbano de Aracaju, vem sofrendo os efeitos da intensa ocupação urbana de seu entorno. Estudos realizados na área apontam a ocorrência de lançamento de efluentes domésticos, descarte inadequado de resíduos sólidos, assoreamento dos canais e alterações na dinâmica hídrica, fatores que contribuem para a degradação ambiental do ecossistema. Essas condições favorecem o aporte e a retenção de contaminantes nos sedimentos, uma vez que os manguezais funcionam como importantes áreas de acumulação de matéria orgânica, partículas finas e elementos químicos provenientes das atividades antrópicas (SANTOS; DALTRO FILHO; MENDONÇA, 2011; PRADO, 2018; LIMA; RAFAEL, 2024).

A elevada concentração relativa de Ag no Tramandaí acompanha o padrão observado para outros metais potencialmente tóxicos identificados na área, como Cu, Zn e Cr, sugerindo possível associação geoquímica entre esses elementos. O que corrobora com a análise multivariada (PCA), na qual Ag apresentou comportamento semelhante a Cu, Zn e Pb, indicando provável origem comum ou processos geoquímicos correlacionados.

Manguezais urbanos e costeiros, por possuírem predominância de sedimentos finos e alta concentração de matéria orgânica, apresentam elevada capacidade de retenção de metais-

traço, o que favorece a processos de absorção e acúmulo sedimentar de contaminantes metálicos ao longo do tempo, devido à baixa dinâmica hidrossedimentológica desses ambientes. Em manguezais impactados por atividades industriais (HARBISON, 1986; MARCHAND et al., 2011).

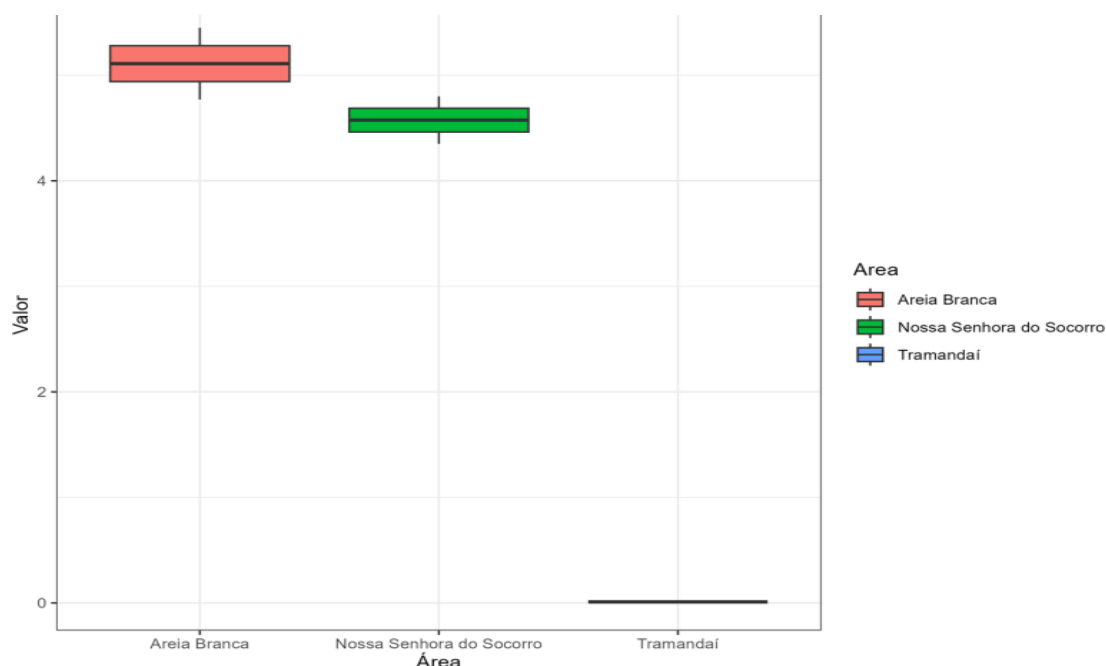
Em manguezais costeiros de Hong Kong, submetidos a intensos processos de urbanização, verificaram-se concentrações mais elevadas de elementos como Ag, Pb, Zn e Cu em áreas sob maior influência antrópica, especialmente em regiões portuárias. De forma semelhante, pesquisas desenvolvidas na América do Sul identificaram maiores concentrações de Ag associadas a ambientes estuarinos e industrializados, frequentemente correlacionadas à presença de Pb, Zn e Cu, indicando relação direta com o aporte contínuo de efluentes urbanos e industriais nos ecossistemas costeiros (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006).

A baixa dispersão observada no Tramandaí sugere que o aporte de Ag ocorre de forma relativamente contínua no ambiente, indicando a possível existência de uma fonte persistente de contaminação. Em contraste, Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro apresentaram comportamento semelhante entre si, evidenciando menor disponibilidade geoquímica do elemento ou reduzida influência de fontes antrópicas associadas à prata.

Estudos internacionais realizados em manguezais da América do Sul demonstraram que a exposição prolongada a altas concentrações de “Ag”, pode provocar efeitos tóxicos e riscos à saúde humana, como alterações celulares, distúrbios metabólicos e impactos ao sistema nervoso e hepático e geralmente estão associadas a áreas industrializadas (WANG E FISHER, 1999; MARCHAND et al., 2006; TAM; WONG, 2000; RAINBOW, 2002;).

O boxplot referente às concentrações de As, como consta na figura 24, evidencia que a Areia Branca apresentou os maiores valores, seguida por Nossa Senhora do Socorro, enquanto Tramandaí apresentou concentrações extremamente reduzidas, próximas de zero. A distribuição relativamente homogênea observada em Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro indica baixa variabilidade interna entre as amostras, sugerindo estabilidade geoquímica na ocorrência do elemento nesses ambientes.

Figura 24. Boxplot das concentrações de “As” nas áreas estudadas.



Nossa Senhora do Socorro apresentou concentrações entre 4,35 e 4,80 mg kg⁻¹. Já Tramandaí apresentou valores de aproximadamente 0,01 mg kg⁻¹ em ambas as profundidades analisadas. Todos os resultados permaneceram abaixo do valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para arsênio em sedimentos, indicando ausência de contaminação crítica segundo os parâmetros legais brasileiros.

O padrão observado em Nossa Senhora do Socorro pode estar relacionado às características de regeneração ambiental e transição ecológica, por ser uma antiga área de carcinicultura, já que manguezais em processo de regeneração tendem a apresentar maior deposição de sedimentos finos e acúmulo de matéria orgânica, fatores que favorecem a retenção de determinados elementos químicos, incluindo o As. Além disso, o comportamento geoquímico do arsênio é fortemente influenciado pela presença de matéria orgânica e de óxidos metálicos, sendo frequente sua acumulação em ambientes estuarinos e ecossistemas de manguezal (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002).

Em contrapartida, Tramandaí apresentou concentrações extremamente reduzidas de As, diferindo do comportamento observado para outros metais, como Cu, Zn e Ag, que demonstraram enriquecimento significativo na área. Esse resultado indica que o arsênio pode apresentar dinâmica geoquímica distinta no ambiente estudado, possivelmente associada à composição sedimentar local, às diferenças mineralógicas ou à menor disponibilidade natural do elemento nos sedimentos analisados. (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002).

Pesquisas desenvolvidas em manguezais da Baía de Todos os Santos, na Bahia, também registraram concentrações moderadas de As em sedimentos com elevado teor de matéria orgânica, indicando a influência das características geoquímicas desses ambientes na retenção do elemento. Em estudos realizados em manguezais urbanos de Hong Kong, constatou-se a

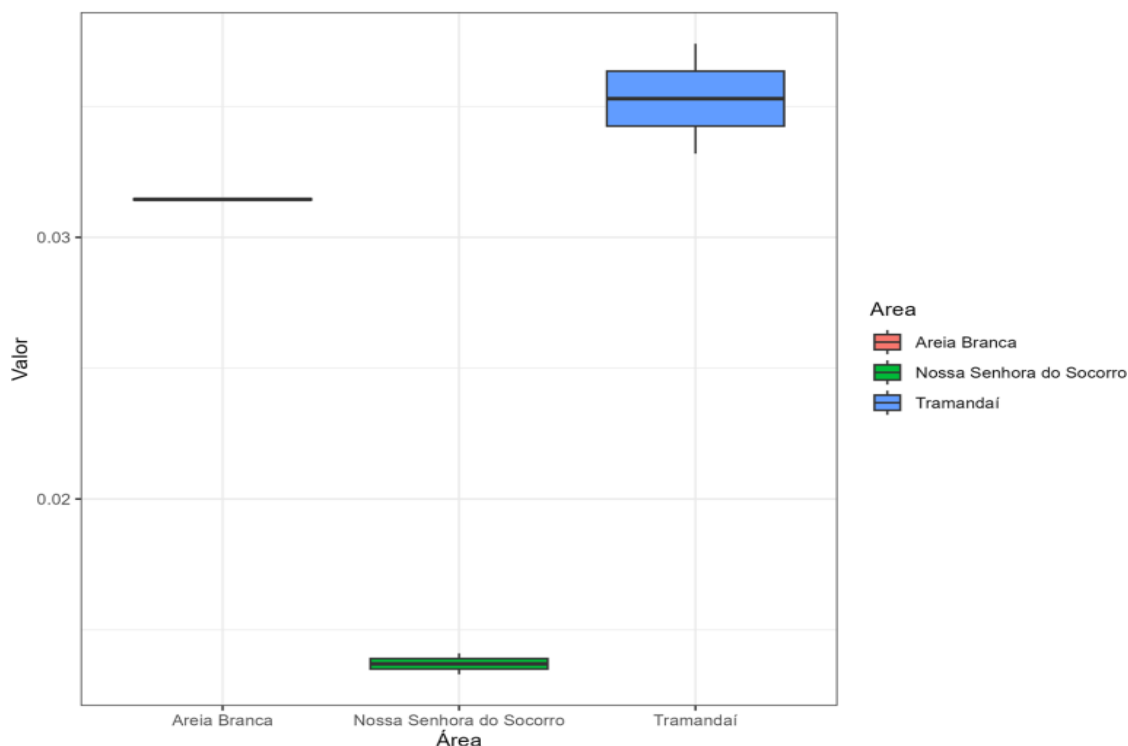
presença de concentrações moderadas de arsênio em sedimentos estuarinos ricos em matéria orgânica, relacionando esse comportamento às condições redutoras características dos ecossistemas de manguezal, que favorecem a retenção e a dinâmica do elemento nos sedimentos. (FERREIRA et al., 2007; TAM; WONG, 2000).

Estudos realizados em manguezais brasileiros demonstram comportamento semelhante às áreas estudadas em Sergipe e que o “As” pode está associado a características geoquímicas naturais do sedimento, bem como ao aporte de matéria orgânica, partículas finas ou a ações humanas e tende a se acumular em sedimentos ricos em matéria orgânica, devido a condições anaeróbicas, o que favorece processo de retenção geoquímica. Na Baía de Todos os Santos, observou-se concentrações elevadas de “As” em áreas estuarinas associadas à deposição de sedimentos finos e influência antrópica, (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; Ferreira et al., 2007; MARCHAND et al., 2011).

Em manguezais asiáticos e sul- americanos foram encontradas maiores concentrações de “As” em áreas próximas a zonas urbanas e portuárias, o que representa um associação com o lançamento de efluentes domésticos, resíduos industriais e dinâmica sedimentar estuarina. O que demanda uma atenção especial, já que o “As” possui potencial tóxico e possibilidade de bioacumulação em organismos aquáticos, como moluscos, crustáceos e peixes, representando não apenas um risco ecológico, mas também associado à saúde humana (TAM; WONG, 2000; RAHMAN et al., 2012).

No boxplot referente ao carbono orgânico C, como consta na figura 25, constata-se que o Tramandaí apresentou os maiores teores de carbono, seguido por Areia Branca, enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores.

Figura 25. Boxplot das concentrações de “C” nas áreas estudadas.



No Tramandaí as concentrações de carbono variaram entre 3,32% e 3,74%, enquanto na Areia Branca os valores foram 3,14% a 3,15%, já Nossa Senhora do Socorro que apresentou as menores concentrações, variando em torno de 1,33% a 1,41%.

As maiores concentrações observadas no Tramandaí sugerem maior acúmulo de matéria orgânica no sedimento, fator frequentemente associado à baixa hidrodinâmica, elevada deposição sedimentar e maior retenção de resíduos orgânicos em manguezais degradados ou urbanizados.

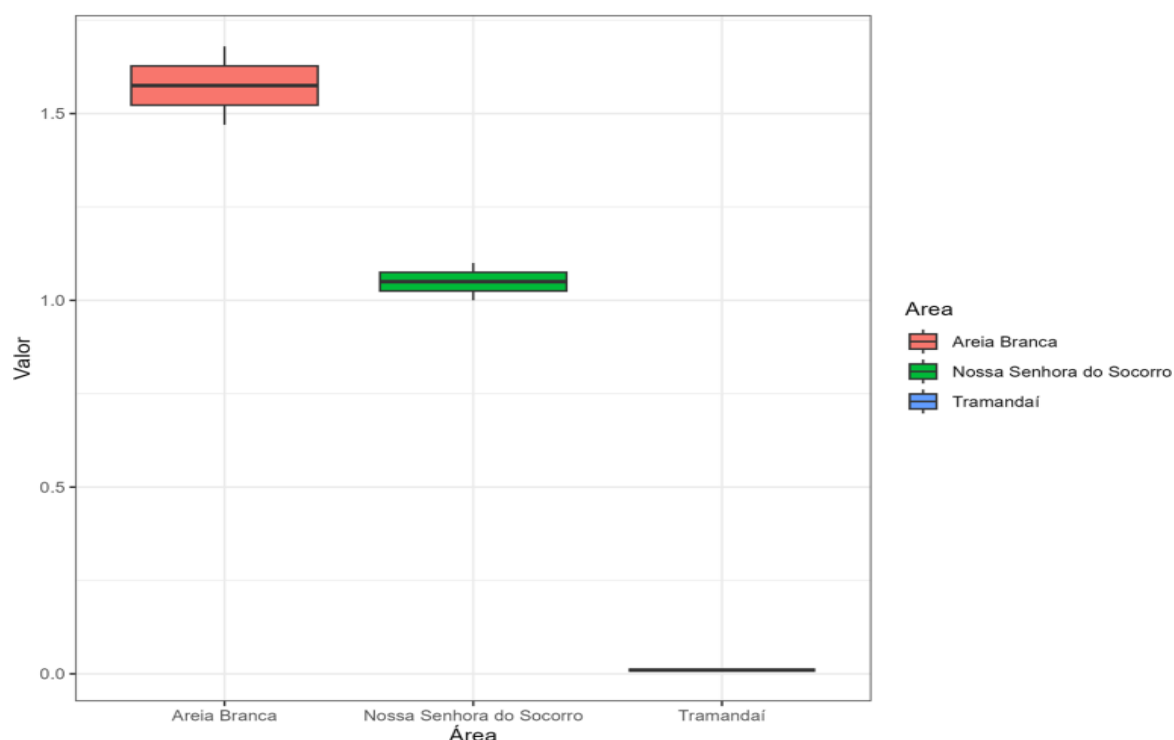
O padrão encontrado no Tramandaí também pode estar relacionado à elevada presença de sedimentos finos e ao acúmulo de matéria orgânica decorrente da influência antrópica, incluindo lançamento de efluentes e deposição de resíduos orgânicos, o que pode apresentar elevada capacidade de adsorção de metais e metaloides, favorecendo a retenção geoquímica desses elementos por longos períodos. Esse comportamento é coerente com os elevados teores de MO observados na área e com o enriquecimento simultâneo de metais como Cu, Zn e Ag, indicando possível associação geoquímica entre matéria orgânica e retenção de metais. (MARCHAND et al., 2011).

Os menores valores observados em Nossa Senhora do Socorro podem estar associados às características ecológicas da área, por se tratar de um ambiente em regeneração anteriormente impactado por ações antrópicas, por meio de atividades de carcinicultura. Resultados semelhantes indicam que manguezais mais desenvolvidos estruturalmente apresentam maiores estoques de carbono, enquanto áreas degradadas ou em regeneração tendem a possuir menores concentrações de carbono sedimentar (BERNINI; REZENDE, 2010; DONATO et al., 2011).

Além da relevância ecológica, os elevados teores de carbono encontrados nos manguezais reforçam a importância desses ecossistemas no contexto das mudanças climáticas, uma vez que os sedimentos manguezais funcionam como importantes reservatórios de carbono azul e possuem elevada capacidade de sequestro de carbono atmosférico, desempenhando papel fundamental na mitigação das mudanças climáticas globais (MCLEOD et al., 2011).

O boxplot referente às concentrações de Co, como consta na figura 26, demonstra que a Areia Branca apresentou os maiores valores de Co, seguida por Nossa Senhora do Socorro, enquanto Tramandaí apresentou concentrações extremamente reduzidas, próximas de 0,01 mg kg⁻¹. A distribuição dos dados indica baixa variabilidade intra-área, sugerindo relativa estabilidade geoquímica do elemento nos sedimentos avaliados.

Figura 26. Boxplot das concentrações de Co nas áreas estudadas.



Os valores observados em Areia Branca variaram aproximadamente entre 1,47 e 1,68 mg kg^{-1} , enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou concentrações entre 1,0 e 1,1 mg kg^{-1} . Já Tramandaí apresentou concentrações praticamente nulas nas duas profundidades analisadas. Todos os valores permaneceram muito abaixo do valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Co, indicando ausência de contaminação crítica segundo os parâmetros legais brasileiros.

As maiores concentrações registradas na Areia Branca sugerem que pode haver maior disponibilidade geoquímica natural de Co nos sedimentos locais, possivelmente relacionada à composição mineralógica, presença de matéria orgânica e maior capacidade de retenção sedimentar ou está relacionado às características ambientais mais conservadas da área, o que representa maior estabilidade sedimentar e melhores condições de retenção natural de elementos-traço. Uma vez que o cobalto apresenta comportamento geoquímico fortemente associado a minerais de ferro e manganês, além de possuir afinidade por sedimentos finos ricos em matéria orgânica (ALLOWAY, 2013; SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; ALONGI, 2014).

Em Nossa Senhora do Socorro, os valores intermediários podem refletir características transicionais da área, especialmente por se tratar de um ambiente em regeneração. Manguezais em recuperação ecológica frequentemente apresentam reorganização sedimentar e alterações na dinâmica biogeoquímica dos elementos químicos presentes no sedimento, influenciando a distribuição e retenção desses elementos ao longo do processo sucessional (ALONGI, 2014; KAUFFMAN et al., 2018).

Por outro lado, Tramandaí apresentou concentrações extremamente baixas de Co, diferindo significativamente do comportamento observado para outros metais, como Cu, Zn e

Ag, que apresentaram enriquecimento expressivo na área. Esse padrão sugere que o Co não acompanha os mesmos processos geoquímicos associados à influência antrópica observada no Tramandaí, indicando possível controle litológico ou mineralógico distinto, uma vez que a distribuição do cobalto em sedimentos estuarinos pode estar mais relacionada à composição natural do substrato e às características mineralógicas locais do que ao aporte antrópico direto (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; ALONGI, 2014).

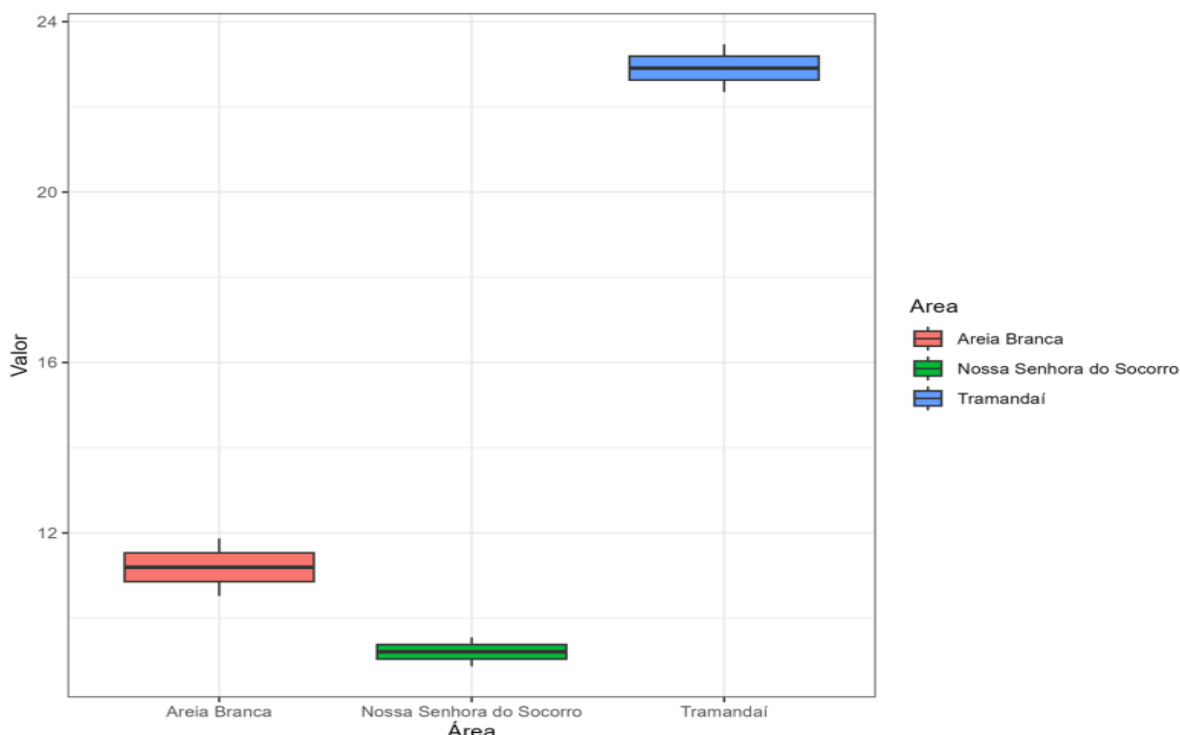
Também foi identificada associação entre Co e As, que apresentaram vetores próximos na análise multivariada (PCA), o que sugere correlação positiva e indica origem geoquímica comum, semelhante entre esses elementos nas áreas analisadas. Segundo os resultados do PCA, Co e As apresentaram vetores próximos.

Estudos realizados em manguezais tropicais demonstram que o Co geralmente ocorre em baixas concentrações naturais nos sedimentos, sendo fortemente influenciado pelas características geológicas locais. Destaca-se ainda que a dinâmica geoquímica de metais-traço em manguezais depende da interação entre matéria orgânica, granulometria sedimentar e condições redox do ambiente (MARCHAND et al., 2011).

Estudos realizados em manguezais costeiros urbanizados em Hong Kong, observaram que o Co frequentemente apresenta menor enriquecimento antrópico quando comparado a metais como Cu, Zn e Pb, sendo sua distribuição mais relacionada aos processos naturais de sedimentação e mineralogia local. Além de possuir importante papel biogeoquímico, mas em concentrações elevadas pode representar risco ecológico devido ao potencial de toxicidade para organismos aquáticos e bioacumulação em cadeias tróficas estuarinas. (TAM; WONG, 2000; KABATA; , 2001).

O boxplot referente às concentrações de Cr, como consta na figura 27, demonstra que o Tramandaí apresenta os maiores valores, seguido por Areia Branca e, por fim, Nossa Senhora do Socorro. A distribuição relativamente homogênea dentro de cada área indica baixa variabilidade interna das amostras, sugerindo estabilidade no padrão de ocorrência do elemento nos sedimentos avaliados.

Figura 27. Boxplot das concentrações de Cr nas áreas estudadas.



Os valores observados para Tramandaí variaram aproximadamente entre 22,35 e 23,47 mg kg^{-1} , enquanto Areia Branca apresentou concentrações entre 10,52 e 11,87 mg kg^{-1} . Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores, variando entre 8,87 e 9,55 mg kg^{-1} . Todos os resultados permaneceram abaixo do valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Cr (75 mg kg^{-1}), indicando ausência de contaminação crítica segundo os parâmetros legais brasileiros.

As concentrações significativamente mais elevadas observadas no Tramandaí sugerem maior influência antrópica sobre o ambiente, possivelmente relacionada ao lançamento de efluentes urbanos, atividades industriais, deposição de resíduos sólidos e sedimentos e aporte de sedimentos contaminados. A associação entre Cr, matéria orgânica (MO) e outros metais também foi evidenciada na análise multivariada (PCA), na qual Cr apresentou comportamento próximo a Zn, Pb, Cu, Ag e Ni, sugerindo possível origem geoquímica semelhante e influência de processos ambientais correlacionados. (MARCHAND et al., 2011).

Estudos realizados em manguezais urbanos de Hong Kong demonstram comportamento semelhante ao encontrado no Tramandaí ao analisar sedimentos de manguezais, observou-se enriquecimento de Cr em áreas submetidas à intensa urbanização e influência portuária, associando o aumento das concentrações ao aporte contínuo de efluentes urbanos e industriais. Da mesma forma, verificou concentrações elevadas de Cr em manguezais impactados por atividades antrópicas na Austrália, destacando que ambientes estuarinos apresentam elevada capacidade de acumular metais potencialmente tóxicos devido à baixa hidrodinâmica e elevada deposição sedimentar. (HARBISON, 1986; TAM; WONG, 2000).

Os valores intermediários registrados em Areia Branca podem está relacionado ao fato de que manguezais mais preservados frequentemente apresentam concentrações naturais de Cr

associadas à composição mineralógica do sedimento e à presença de óxidos de ferro e argilominerais (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; ALONGI, 2014).

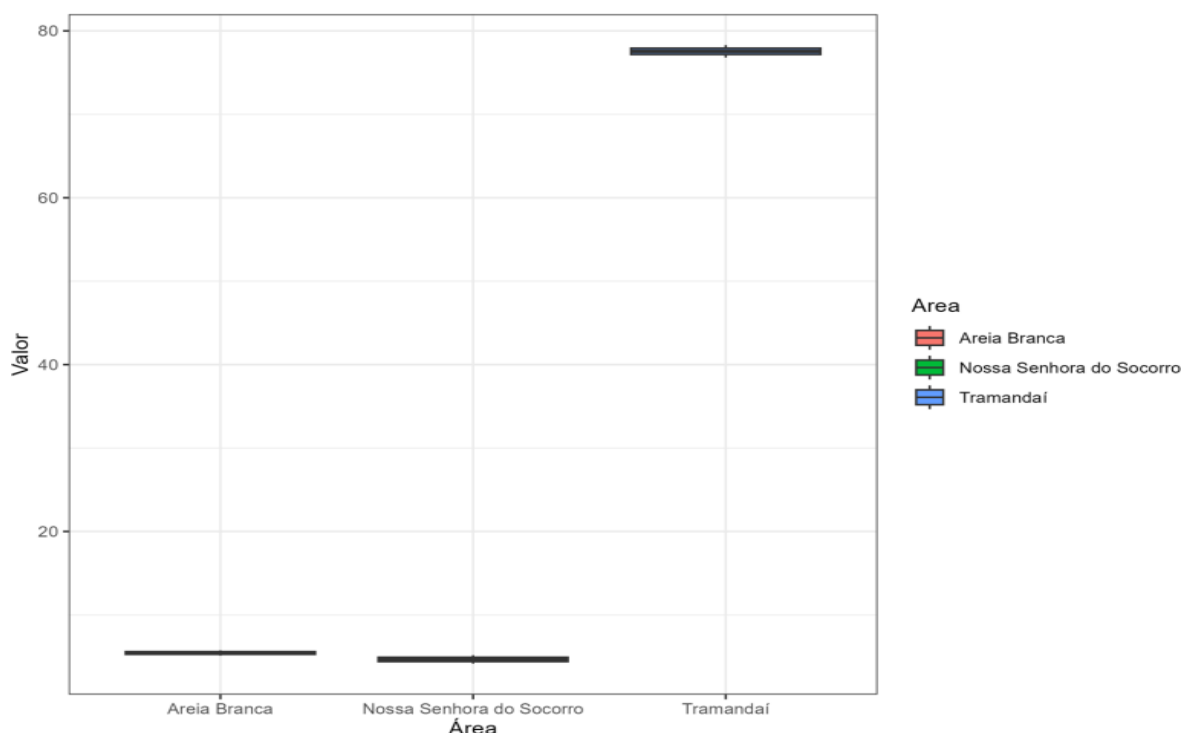
Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores entre as áreas analisadas, possivelmente relacionados às características de regeneração ecológica da área e à menor influência de fontes antrópicas associadas ao Cr. O que pode estar relacionado ao fato de que manguezais em regeneração podem apresentar menor retenção de metais dependendo da dinâmica sedimentar e da composição granulométrica local (ALONGI, 2014; KAUFFMAN et al., 2018).

Além da importância geoquímica, o Cr, que pode bioacumular em organismos aquáticos e representar risco ecológico em ambientes estuarinos contaminados, merece atenção devido ao seu potencial tóxico, especialmente em sua forma hexavalente (Cr^{6+}), considerada altamente tóxica e carcinogênica (KABATA; , 2001).

Manguezais da América do Sul também demonstram associação entre Cr e áreas urbanizadas. Ao avaliar sedimentos de manguezais da Guiana Francesa, observou-se enriquecimento de Cr em regiões submetidas à influência antrópica, correlacionando o elemento à presença de matéria orgânica e sedimentos finos (MARCHAND et al., 2006).

O boxplot referente às concentrações de Cu, como consta na figura 28, evidencia uma diferença extremamente expressiva entre as áreas analisadas, com Tramandaí apresentando valores muito superiores aos registrados em Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro. A distribuição dos dados demonstra baixa variabilidade intra-área, indicando relativa homogeneidade das concentrações dentro de cada ambiente.

Figura 28. Boxplot das concentrações de Cu nas áreas estudadas.



Os valores observados no Tramandaí variaram aproximadamente entre 76,8 e 78,3 mg kg⁻¹, enquanto Areia Branca apresentou concentrações próximas de 5,12 a 5,75 mg kg⁻¹. Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores, variando entre 4,15 e 5,17 mg kg⁻¹.

Os resultados indicam que Tramandaí ultrapassou o valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Cu (60 mg kg⁻¹), sugerindo potencial enriquecimento antrópico do elemento nos sedimentos da área. Em contrapartida, Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro apresentaram concentrações significativamente inferiores ao limite legal, indicando menor influência de fontes contaminantes associadas ao cobre.

O enriquecimento observado no Tramandaí sugere forte influência antrópica sobre o ambiente, possivelmente associada ao lançamento de efluentes urbanos, resíduos sólidos, esgoto doméstico, aporte industrial difuso e deposição sedimentar contaminada. Uma vez que, o Cu é um dos metais mais frequentemente enriquecidos em manguezais urbanos devido à intensa interação entre matéria orgânica, sedimentos finos e contaminantes oriundos das atividades humanas, às condições anaeróbicas e elevada capacidade de absorção sedimentar (TAM; WANG, 2000; MARCHAND et al., 2011).

A forte associação entre Cu, Zn, Pb, Ag, Cr e matéria orgânica também foi evidenciada na análise de componentes principais (PCA), indicando possível origem geoquímica comum e comportamento ambiental semelhante desses elementos em Tramandaí. Esse padrão sugere que o enriquecimento metálico observado na área pode estar relacionado à influência contínua de processos antrópicos e deposição sedimentar contaminada (BURUAEM et al., 2012).

Na América do Sul, os manguezais apresentaram resultados semelhantes aos observados no Tramandaí. Na avaliação dos sedimentos de manguezais da Guiana Francesa, observou-se concentrações elevadas de Cu em áreas sujeitas à influência urbana e estuarina, associando o comportamento do elemento à retenção em sedimentos ricos em matéria orgânica. No Brasil, os manguezais da Baía de Todos os Santos (BA), apresentaram enriquecimento de Cu em áreas impactadas por atividades urbanas e industriais, destacando que o metal apresenta elevada afinidade por sedimentos finos e ambientes redutores típicos de manguezais. (MARCHAND et al., 2006; FERREIRA et al., 2007).

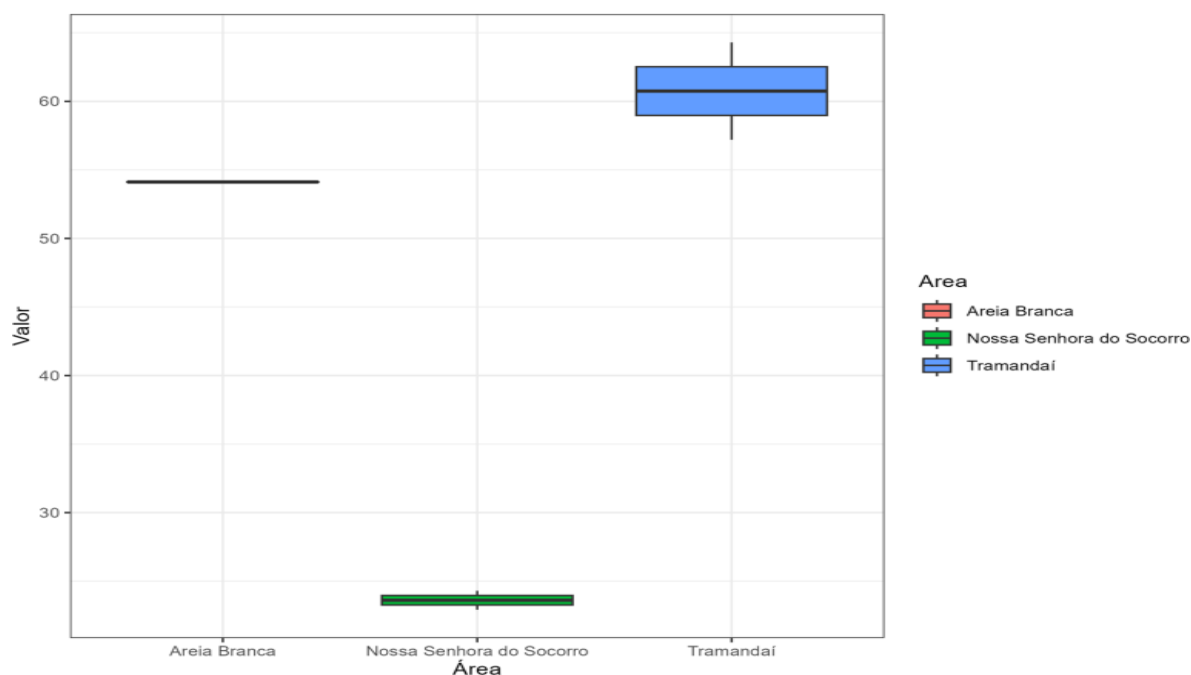
Os baixos valores registrados na Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro sugerem menor influência antrópica associada ao Cu nessas áreas. Em ambientes menos impactados, o cobre geralmente ocorre em concentrações naturais relacionadas à composição mineralógica do sedimento e aos processos geoquímicos naturais (ALLOWAY, 2013; ALONGI, 2014).

Do ponto de vista ecológico, o Cu merece atenção devido ao seu potencial tóxico para organismos aquáticos, podendo afetar processos metabólicos, fisiológicos e reprodutivos da biota bentônica. Além disso, o cobre pode ser bioacumulado por moluscos, crustáceos e outros organismos filtradores, favorecendo sua transferência ao longo da cadeia trófica e ampliando

os riscos ecológicos em ambientes costeiros submetidos à contaminação crônica por metais-traço (KABATA-; , 2001; RAINBOW, 2002; ALLOWAY, 2013).

O boxplot referente aos teores de MO, como consta na figura 29, evidencia que a área do Tramandaí apresenta os maiores valores, seguido por Areia Branca, enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores teores. A distribuição relativamente homogênea das amostras dentro de cada área indica baixa variabilidade interna e sugere estabilidade nos processos de deposição e retenção de matéria orgânica nos sedimentos analisados.

Figura 29. Boxplot das concentrações de MO nas áreas estudadas.



Os valores observados no Tramandaí variaram aproximadamente entre 57,2% e 64,3%, representando os maiores teores de MO entre todas as áreas estudadas. Areia Branca apresentou valores intermediários, entre 54,07% a 54,3%, enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores teores, variando entre 22,92% e 24,3%.

Os elevados teores de matéria orgânica observados no Tramandaí sugerem forte acúmulo sedimentar de material orgânico, característica frequentemente associada a ambientes de baixa hidrodinâmica, elevada deposição de sedimentos finos e maior influência antrópica. Em manguezais urbanos ou degradados, o aporte de efluentes domésticos, resíduos orgânicos e material particulado favorece o enriquecimento orgânico do sedimento (ALONGI, 2014; MARCHAND et al., 2006; TAM; WONG, 2000).

A associação entre MO e metais-traço também foi observada na análise multivariada (PCA), na qual MO apresentou comportamento próximo a Ni, Cu, Zn, Pb e Ag, sugerindo forte interação geoquímica entre matéria orgânica e retenção de metais nos sedimentos. Segundo Marchand et al. (2011), a matéria orgânica exerce papel fundamental na adsorção e imobilização de metais-traço em ambientes manguezais, funcionando como importante controlador geoquímico da mobilidade desses elementos.

Os elevados teores de MO registrados no Tramandaí podem, portanto, explicar parcialmente o enriquecimento simultâneo observado para Cu, Zn, Cr e Ag na área. Ambientes ricos em matéria orgânica apresentam maior capacidade de retenção de contaminantes devido à formação de complexos organometálicos e à adsorção em partículas finas sedimentares (MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013; ALONGI, 2014).

A Areia Branca apresentou os maiores teores de matéria orgânica, o que pode estar relacionado às características naturais do manguezal, especialmente maior densidade vegetal, elevada deposição de serapilheira e boa conservação ecológica. Considerando que manguezais estruturalmente desenvolvidos frequentemente apresentam altos teores de MO devido à intensa produção primária e acúmulo de biomassa vegetal (ALONGI, 2014; DONATO et al., 2011; KAUFFMAN et al., 2018).

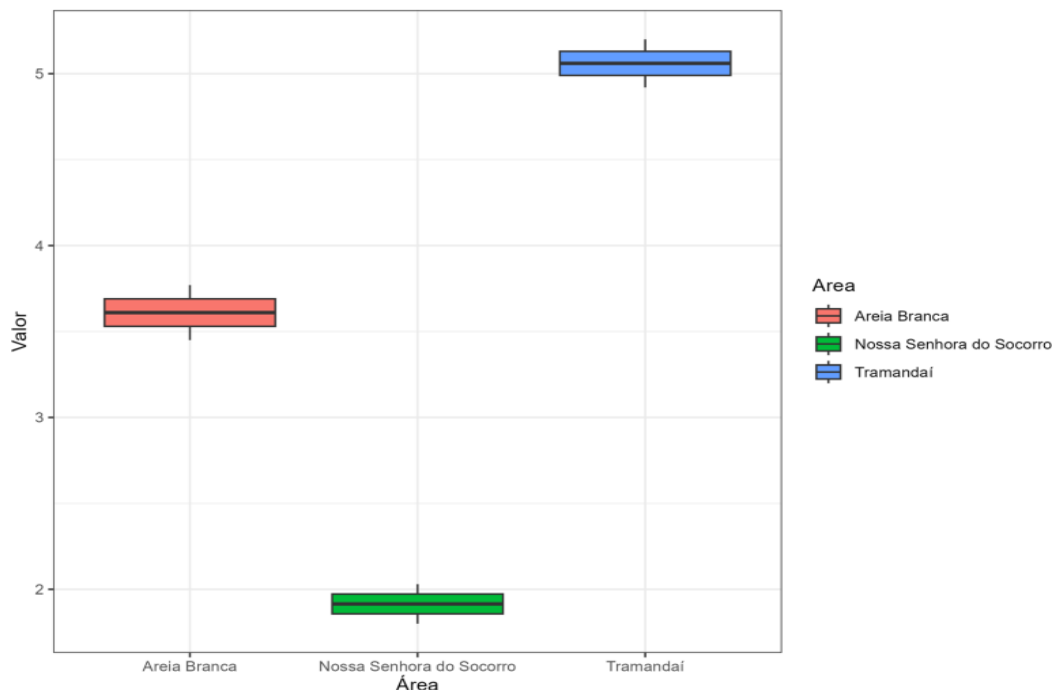
Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores de MO entre as áreas analisadas, possivelmente refletindo características de regeneração ecológica e menor estabilidade sedimentar. Áreas em regeneração geralmente apresentam menor densidade vegetal e menor produção de material orgânico, o que reduz os estoques sedimentares de MO (DONATO et al., 2011; KAUFFMAN et al., 2018; ALONGI, 2014).

O que também foi constatado em estudos que identificaram estoques de carbono maiores em manguezais mais conservados, maduros e estruturalmente desenvolvidos, enquanto em áreas degradadas ou em processo de regeneração foram apresentados menores teores de carbono orgânico e de matéria orgânica. Além da relação entre o acúmulo da matéria orgânica, a densidade da vegetação e a capacidade de retenção de sedimentos, o que reforça o papel dos manguezais como estratégicos frente às mudanças climáticas e como sumidouros de carbono azul. (DONATO et al., 2011; BERNINI; REZENDE, 2010).

A elevada capacidade de retenção de carbono por parte dos manguezais, está associada à lenta decomposição da matéria orgânica em sedimentos anóxicos e às altas taxas de deposição sedimentar típicas desses ambientes costeiros (MCLEOD et al., 2011; DONATO et al., 2011; ALONGI, 2014).

O boxplot referente às concentrações de Ni, como consta na figura 30, demonstra que a área do Tramandaí apresenta os maiores valores, seguido por Areia Branca, enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou as menores concentrações.

Figura 3032. Boxplot das concentrações de Ni nas áreas estudadas.



Os valores registrados em Tramandaí variaram aproximadamente entre 4,92 e 5,2 mg kg⁻¹, enquanto Areia Branca apresentou concentrações próximas de 3,45 a 3,77 mg kg⁻¹. Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores, variando entre 1,8 e 2,03 mg kg⁻¹. Todos os resultados permaneceram muito abaixo do valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA n° 420/2009 para Ni (30 mg kg⁻¹), indicando ausência de contaminação crítica segundo os parâmetros legais brasileiros.

As maiores concentrações observadas no Tramandaí sugerem maior influência de processos antrópicos e maior capacidade de retenção sedimentar na área. O níquel é frequentemente associado a ambientes estuarinos impactados, podendo estar relacionado ao aporte de efluentes urbanos, resíduos sólidos, combustíveis, deposição atmosférica e partículas finas transportadas pela drenagem urbana (MARCHAND et al., 2006; TAM; WONG, 2000; ALLOWAY, 2013).

A associação entre Ni e matéria orgânica também foi observada na análise multivariada (PCA), na qual o elemento apresentou proximidade geoquímica com MO, Cu, Zn, Pb e Ag. Esse comportamento sugere que a retenção de Ni no Tramandaí pode estar diretamente relacionada ao elevado teor de matéria orgânica encontrado na área, favorecendo a formação de complexos organometálicos e o acúmulo sedimentar do elemento (MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013; ALONGI, 2014).

Estudos realizados em manguezais urbanos apresentam comportamento semelhante ao encontrado no Tramandaí em Hong Kong, avaliando sedimentos de manguezais, observaram

enriquecimento de Ni em áreas submetidas à urbanização intensa e influência portuária, associando o comportamento do elemento à deposição de sedimentos finos ricos em matéria orgânica. Verificou-se concentrações elevadas de Ni em manguezais da Guiana Francesa sujeitos à influência estuarina e aporte antrópico, destacando forte associação entre o elemento e sedimentos orgânicos finos (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006).

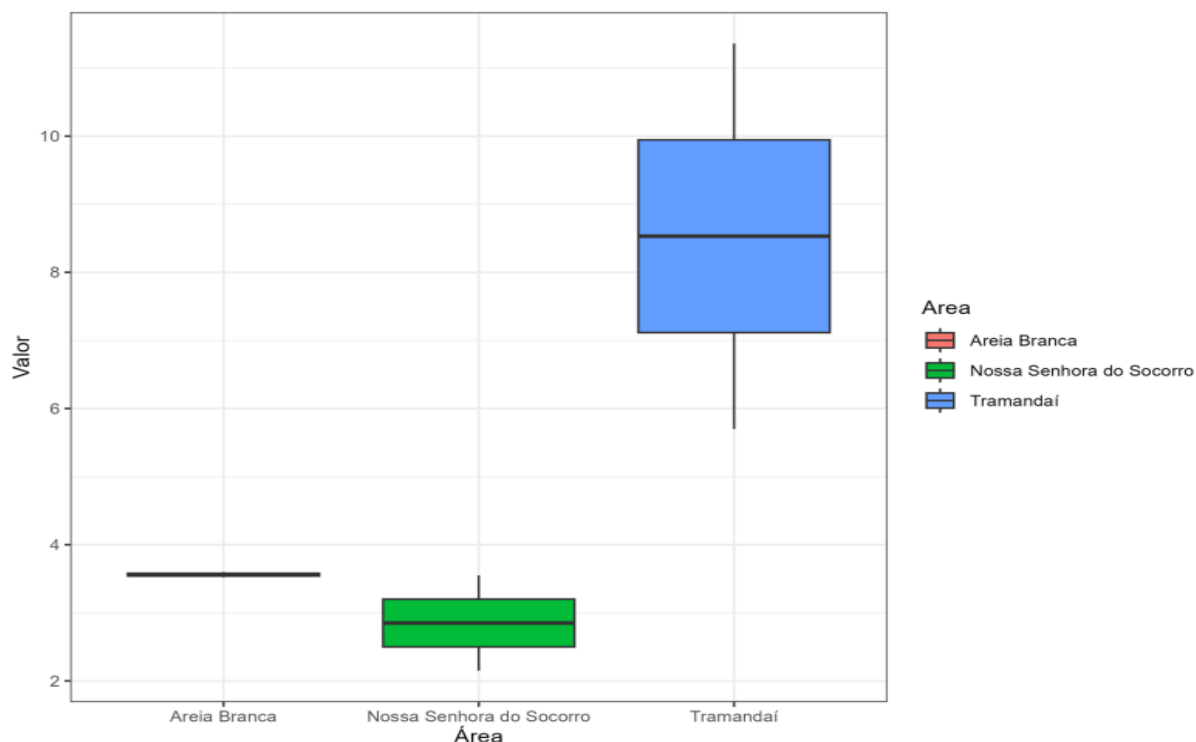
Os valores intermediários observados na Areia Branca podem refletir contribuição geoquímica natural do substrato sedimentar, além da capacidade natural do manguezal em reter metais-traço associados à matéria orgânica. Manguezais mais conservados frequentemente apresentam concentrações moderadas de Ni relacionadas à mineralogia local e aos processos naturais de sedimentação (ALLOWAY, 2013; ALONGI, 2014; SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002).

Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores de Ni, possivelmente refletindo características sedimentares distintas e menor capacidade de retenção orgânica do ambiente. Por se tratar de uma área em regeneração, a menor densidade vegetal e menor acúmulo de matéria orgânica podem contribuir para concentrações reduzidas do elemento (DONATO et al., 2011; KAUFFMAN et al., 2018; ALONGI, 2014).

O Ni é fortemente influenciado pelo pH e pelo teor de matéria orgânica dos sedimentos. Em concentrações elevadas, pode ser tóxico para organismos aquáticos, interferindo em processos metabólicos e fisiológicos. Além disso, o níquel pode ser bioacumulado por organismos bentônicos e mariscos, favorecendo sua transferência ao longo da cadeia trófica e representando potencial risco ecológico em ambientes costeiros submetidos à contaminação contínua (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; RAINBOW, 2002).

O boxplot referente às concentrações de Pb, como consta na figura 31, demonstra que o Tramandaí apresentando os maiores valores e maior amplitude de variação, seguido por Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro. A distribuição dos dados evidencia maior heterogeneidade no Tramandaí, sugerindo influência de múltiplas fontes de aporte sedimentar ou contaminação antrópica mais intensa na área.

Figura 31. Boxplot das concentrações de Pb nas áreas estudadas.



Os valores observados no Tramandaí variaram aproximadamente entre 5,7 e 11,36 mg kg⁻¹. A Areia Branca apresentou valores relativamente homogêneos em torno de 3,52 a 3,6 mg kg⁻¹, enquanto Nossa Senhora do Socorro apresentou concentrações entre 2,15 e 3,55 mg kg⁻¹. Todos os valores permaneceram abaixo do valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Pb, indicando ausência de contaminação crítica segundo os parâmetros legais brasileiros.

As concentrações mais elevadas observadas no Tramandaí sugerem maior influência antrópica sobre o ambiente, possivelmente relacionada ao lançamento de efluentes urbanos, resíduos sólidos, combustíveis, deposição atmosférica e aporte sedimentar oriundo da drenagem urbana. O Pb é amplamente reconhecido como um dos metais-traço mais associados à urbanização e às atividades humanas em ambientes costeiros (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013).

Devido a resíduos industriais, deposição de partículas atmosféricas e contaminação do escoamento superficial, o chumbo é frequentemente encontrado em manguezais urbanos, principalmente em sedimentos ricos em matéria orgânica, que favorecem a retenção prolongada do Pb nos ambientes estuarinos (TAM; WONG, 2000).

A análise multivariada (PCA) também demonstrou associação entre Pb, Zn, Cu, Ag e MO, sugerindo comportamento geoquímico semelhante e possível origem antrópica comum desses elementos em Tramandaí. Essa associação reforça a hipótese de que o enriquecimento de Pb esteja relacionado ao acúmulo de matéria orgânica e sedimentos finos contaminados (MARCHAND et al., 2006; ALONGI, 2014; ALLOWAY, 2013).

Na América do Sul, os manguezais apresentam comportamento semelhante ao

observado no Tramandaí. Marchand et al. (2006), avaliando sedimentos de manguezais da Guiana Francesa, observaram concentrações elevadas de Pb associadas a áreas estuarinas sob influência urbana e deposição sedimentar rica em matéria orgânica.

Na Baía de Todos os Santos (BA), também identificaram enriquecimento de Pb em áreas submetidas à influência industrial e urbana, destacando a forte interação do elemento com sedimentos argilosos e matéria orgânica (FERREIRA et al., 2007),.

A maior variabilidade observada no Tramandaí pode indicar diferentes fontes de aporte de Pb ou oscilações nos processos sedimentares da área. Ambientes urbanos frequentemente apresentam comportamento heterogêneo para o Pb devido à influência de múltiplas atividades antrópicas ao longo do tempo (TAM; WONG, 2000; BURUAEM et al., 2012; MARCHAND et al., 2006).

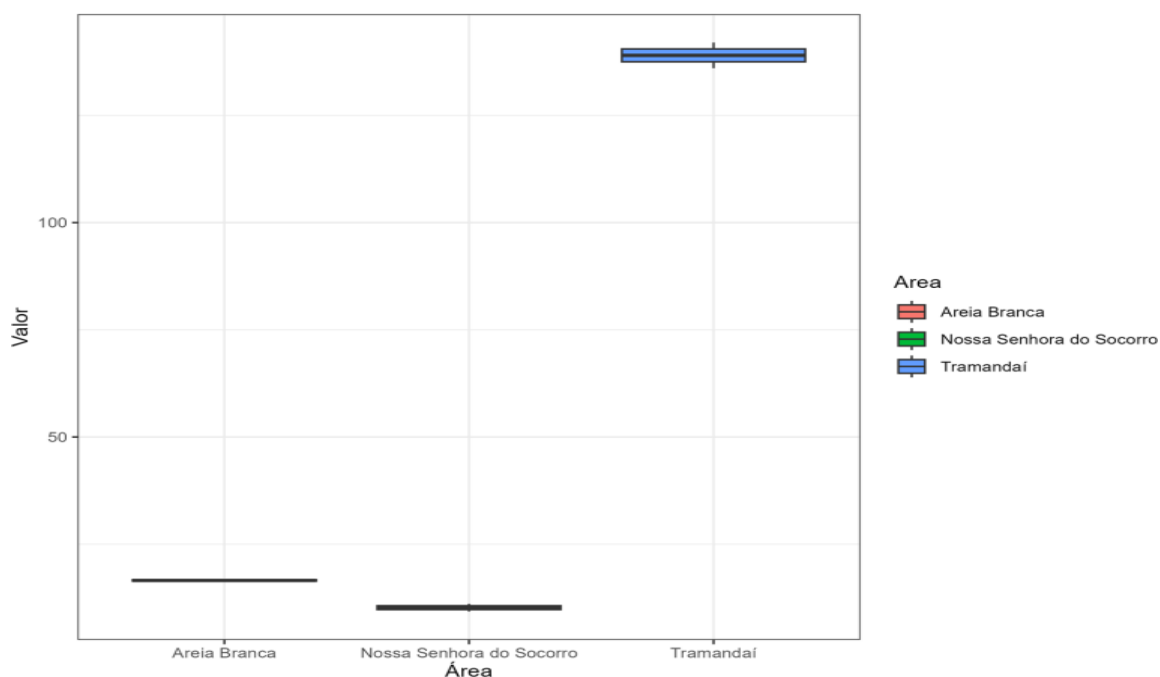
Areia Branca apresentou concentrações intermediárias e relativamente homogêneas, sugerindo contribuição predominantemente natural ou baixa influência antrópica associada ao chumbo. Em manguezais mais preservados, o Pb geralmente ocorre em menores concentrações e associado aos minerais naturais do sedimento (ALLOWAY, 2013; ALONGI, 2014; SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002).

Nossa Senhora do Socorro apresentou os menores valores médios entre as áreas analisadas, possivelmente refletindo menor influência de fontes antrópicas relacionadas ao Pb e menor retenção sedimentar associada à matéria orgânica.

A presença do Pb em manguezais, representam um risco do ponto de vista ecológico, devido ao elevado potencial tóxico e à capacidade de bioacumulação em organismos aquáticos. Mesmo em baixas concentrações, o chumbo pode interferir em processos metabólicos, fisiológicos e reprodutivos da biota aquática, além de ser incorporado por organismos bentônicos, moluscos e crustáceos estuarinos, favorecendo sua transferência ao longo da cadeia trófica. Em ambientes costeiros contaminados, esse processo pode representar riscos ecológicos e potencial ameaça à saúde humana, especialmente em comunidades que dependem da pesca e coleta de mariscos (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; RAINBOW, 2002).

O boxplot referente às concentrações de Zn, como consta na figura 32, demonstra que o Tramandaí apresenta concentrações muito superiores às registradas em Areia Branca e Nossa Senhora do Socorro. A distribuição dos dados evidencia baixa variabilidade interna nas três áreas, indicando relativa homogeneidade das concentrações sedimentares do elemento.

Figura 32. Boxplot das concentrações de Zn nas áreas estudadas.



Os valores observados no Tramandaí variaram aproximadamente entre 136 e 142 mg kg⁻¹, apresentando concentrações muito superiores às observadas em Areia Branca, que variaram entre 16,2 e 16,9 mg kg⁻¹, e em Nossa Senhora do Socorro, com valores entre 9,3 e 11,1 mg kg⁻¹.

Os resultados indicam que Tramandaí não ultrapassou o valor de prevenção estabelecido pela Resolução CONAMA nº 420/2009 para Zn, porém os valores são muito superiores às demais áreas. Apesar de permanecer abaixo do limite legal brasileiro, o enriquecimento observado no Tramandaí sugere forte influência antrópica sobre o ambiente sedimentar.

O Zn é um dos metais-traço mais frequentemente associados à urbanização, lançamento de efluentes domésticos, resíduos sólidos, combustíveis, desgaste de materiais metálicos e deposição atmosférica em ambientes costeiros. Segundo Tam e Wong (2000), manguezais urbanos frequentemente apresentam enriquecimento significativo de Zn devido à elevada capacidade de retenção sedimentar promovida pela matéria orgânica e partículas finas (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013).

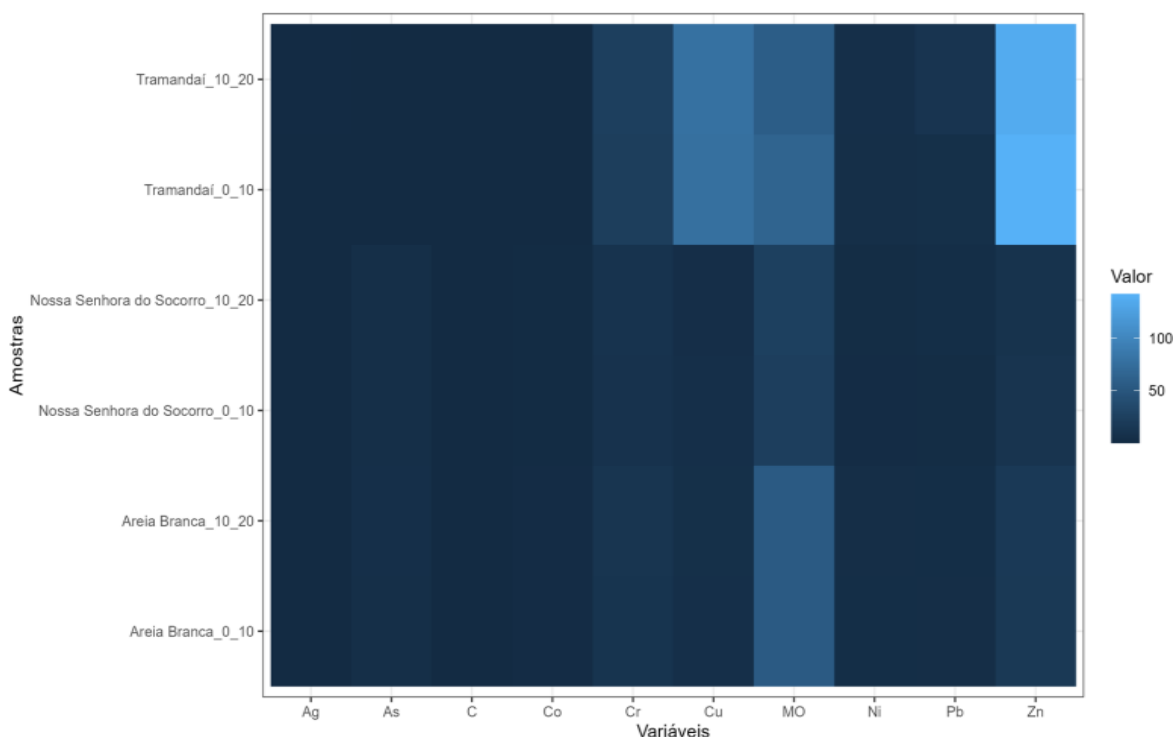
A forte associação entre Zn, Cu, Pb, Ag, Cr e matéria orgânica também foi evidenciada na análise multivariada (PCA), sugerindo comportamento geoquímico semelhante e possível origem antrópica comum desses elementos no Tramandaí. Essa relação reforça a hipótese de que os elevados teores de Zn estejam diretamente associados à influência urbana e ao acúmulo de sedimentos ricos em matéria orgânica (MARCHAND et al., 2006; TAM; WONG, 2000; ALONGI, 2014).

Os manguezais atuam como importantes reservatórios geoquímicos de metais-traço devido às condições anaeróbias dos sedimentos, elevada deposição orgânica e baixa hidrodinâmica. Esses fatores favorecem a retenção prolongada de Zn no sedimento e reduzem

Os baixos valores registrados em Nossa Senhora do Socorro sugerem menor influência antrópica associada ao Zn e menor capacidade de retenção sedimentar quando comparado às demais áreas. Em ambientes em regeneração ecológica, a menor densidade vegetal e menor acúmulo de matéria orgânica frequentemente reduzem a retenção de metais-traço nos sedimentos (DONATO et al., 2011; KAUFFMAN et al., 2014; ALONGI, 2014).

O Zn em concentrações elevadas no ambiente aquático pode comprometer processos fisiológicos essenciais da biota, afetando crescimento, metabolismo celular e reprodução de organismos aquáticos. Além disso, o zinco apresenta elevada capacidade de bioacumulação em moluscos, crustáceos e organismos bentônicos, favorecendo sua transferência ao longo da cadeia trófica e ampliando os riscos ecológicos em ambientes estuarinos submetidos à contaminação contínua por metais-traço (KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001; RAINBOW, 2002; ALLOWAY, 2013).

Figura 3337. Mapa de calor das concentrações dos elementos químicos nas diferentes áreas e profundidades analisadas.



De maneira geral, observa-se que Tramandaí apresentou as maiores intensidades de cor para Cu, Zn, MO e, em menor proporção, Cr e Ag, indicando enriquecimento significativo desses elementos na área, independentemente da profundidade analisada. Esse padrão sugere forte influência antrópica e maior capacidade de retenção sedimentar de contaminantes no ambiente.

As amostras de Tramandaí, principalmente nas profundidades de 0–10 cm e 10–20 cm, destacaram-se pelo elevado enriquecimento de Zn e Cu, evidenciado pelas tonalidades mais intensas no mapa de calor. Esse comportamento está em consonância com os resultados observados nos boxplots e na análise de componentes principais (PCA), indicando associação geoquímica entre Cu, Zn, Pb, Ag e matéria orgânica.

Os manguezais ricos em matéria orgânica e sedimentos finos apresentam elevada capacidade de retenção de metais-traço, favorecendo a acumulação desses elementos em áreas sob influência urbana e estuarina. O elevado teor de MO observado em Tramandaí provavelmente contribui diretamente para o enriquecimento metálico identificado na área. Além disso, manguezais submetidos à urbanização intensa frequentemente apresentam enriquecimento simultâneo de Zn, Cu, Pb e Ag devido ao lançamento contínuo de efluentes domésticos, resíduos sólidos e aporte sedimentar contaminado. (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2011).

O mapa também evidencia que Areia Branca apresentou valores intermediários para a maioria dos elementos, destacando-se principalmente para As e Co. Esse comportamento sugere maior influência de fatores geoquímicos naturais, associados à composição sedimentar local e à dinâmica natural do manguezal. A relativa homogeneidade visual das amostras de Areia Branca indica estabilidade geoquímica e menor influência antrópica quando comparada a Tramandaí (ALONGI, 2014; SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; ALLOWAY, 2013).

Elementos como As e Co frequentemente apresentam comportamento associado às condições naturais dos sedimentos, especialmente em ambientes ricos em matéria orgânica e óxidos metálicos. A associação observada entre As e Co no PCA reforça a hipótese de comportamento geoquímico semelhante e provável controle natural desses elementos (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002).

Nossa Senhora do Socorro apresentou, de maneira geral, menores intensidades para a maioria dos metais analisados, especialmente Zn, Cu e Ni. Esse padrão pode estar relacionado às características ecológicas e sucessionais da área, uma vez que manguezais em regeneração frequentemente apresentam menor retenção de matéria orgânica e menor acúmulo sedimentar de metais-traço (DONATO et al., 2011; KAUFFMAN et al., 2018; ALONGI, 2014).

A análise visual do mapa de calor também demonstra relativa semelhança entre as profundidades 0–10 cm e 10–20 cm dentro de cada área, indicando que os processos de deposição sedimentar e retenção geoquímica dos elementos apresentam relativa estabilidade

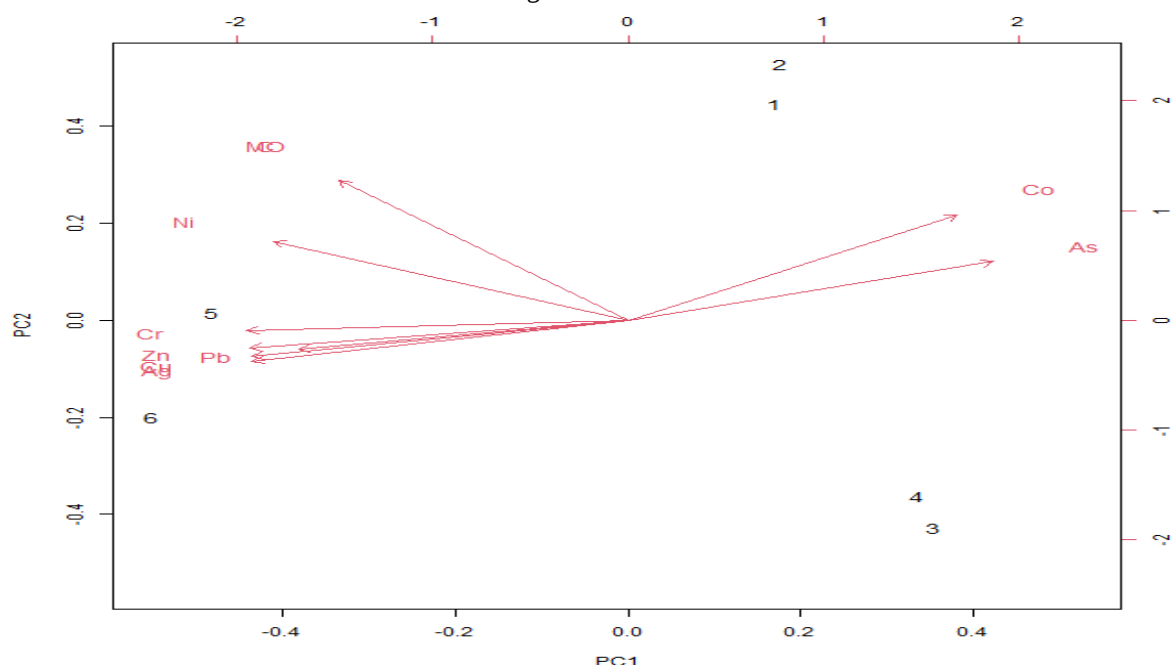
vertical no perfil sedimentar analisado (MARCHAND et al., 2006; ALONGI, 2014; TAM; WONG, 2000).

A forte associação entre MO, Zn, Cu, Pb e Ag observada no Tramandaí sugere influência conjunta de processos antrópicos e sedimentares, indicando possível enriquecimento geoquímico associado ao aporte urbano. Em contrapartida, Areia Branca apresentou padrão mais associado a As e Co, enquanto Nossa Senhora do Socorro demonstrou menores concentrações gerais dos elementos analisados.

Do ponto de vista ambiental, o mapa de calor evidencia clara diferenciação geoquímica entre as áreas estudadas, indicando que Tramandaí apresenta maior grau de alteração ambiental e maior potencial de retenção de contaminantes metálicos quando comparada às demais áreas analisadas. Esse comportamento está relacionado à elevada presença de matéria orgânica, deposição de sedimentos finos e maior influência antrópica, fatores que favorecem o acúmulo de metais-traço em ambientes estuarinos e manguezais urbanos (MARCHAND et al., 2006; TAM; WONG, 2000; ALONGI, 2014).

O Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA), como consta na figura 34, evidencia uma clara diferenciação geoquímica entre as áreas de manguezal analisadas, demonstrando que os elementos químicos apresentam padrões distintos de associação ambiental e sedimentar entre os ambientes estudados.

Figura 34. Biplot da Análise de Componentes Principais (PCA) dos elementos químicos nas áreas de manguezal estudadas



As amostras 1 e 2, correspondentes a Tramandaí nas profundidades de 0–10 cm e 10–20 cm, posicionaram-se no quadrante superior direito do gráfico, apresentando forte associação com As e Co. A proximidade dessas amostras indica elevada similaridade geoquímica entre as profundidades analisadas, sugerindo relativa estabilidade vertical dos elementos no perfil sedimentar.

A associação positiva entre As e Co é evidenciada indica possível origem geoquímica comum ou comportamento ambiental semelhante. O As frequentemente apresenta forte relação com sedimentos ricos em óxidos metálicos e matéria orgânica, sendo influenciado pelas condições do ambiente. De forma semelhante, o Co possui comportamento associado aos processos geoquímicos naturais do sedimento, especialmente à mineralogia local e à presença de óxidos de ferro e manganês, fatores que influenciam sua retenção e distribuição em ambientes estuarinos e manguezais (SMEDLEY; KINNIBURGH, 2002; KABATA-PENDIAS; PENDIAS, 2001).

As amostras 3 e 4, referentes a Areia Branca nas profundidades de 0–10 cm e 10–20 cm, posicionaram-se no quadrante inferior direito, indicando comportamento geoquímico intermediário. Embora apresentem alguma associação com As e Co, essas amostras demonstram menor intensidade de enriquecimento quando comparadas a Tramandaí.

As amostras 5 e 6, correspondentes a Nossa Senhora do Socorro nas duas profundidades analisadas, posicionaram-se no lado esquerdo do gráfico, associando-se principalmente a Cr, Zn, Pb, Cu, Ag, Ni e MO.

A associação entre metais-traço e matéria orgânica em manguezais está relacionada à elevada capacidade de adsorção promovida pelos sedimentos finos e pelas condições anaeróbias típicas desses ecossistemas. A matéria orgânica desempenha papel fundamental na retenção geoquímica de metais, favorecendo o acúmulo sedimentar de elementos potencialmente tóxicos (MARCHAND et al., 2011).

Os vetores de Zn, Pb, Cu e Ag apresentaram orientação muito próxima, indicando forte correlação geoquímica entre esses elementos. Esse padrão sugere possível influência antrópica comum, frequentemente associada ao lançamento de efluentes urbanos, resíduos sólidos, deposição atmosférica e drenagem superficial contaminada (TAM; WONG, 2000; MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013).

Manguezais urbanos frequentemente apresentam enriquecimento simultâneo de Zn, Pb, Cu e Ag devido à influência de atividades humanas e à elevada capacidade de retenção sedimentar característica desses ambientes estuarinos (TAM; WONG, 2000).

Os vetores mais longos observados para MO, Ni, As e Co indicam que esses elementos exerceram maior influência na separação das amostras no espaço multivariado, representando importantes variáveis discriminantes no PCA.

O PC1 representou principalmente um gradiente geoquímico relacionado à oposição

entre As/Co e os metais associados à matéria orgânica, como Zn, Cu, Pb, Ag e Ni. Já o PC2 evidenciou a separação entre áreas enriquecidas em MO/Ni/Co e áreas associadas principalmente a Zn, Pb, Cu e Ag.

A organização espacial das amostras no biplot demonstra que as áreas analisadas apresentam assinaturas geoquímicas distintas, refletindo diferenças na dinâmica sedimentar, influência antrópica, composição mineralógica e acúmulo de matéria orgânica (ALONGI, 2014; MARCHAND et al., 2006; ALLOWAY, 2013).

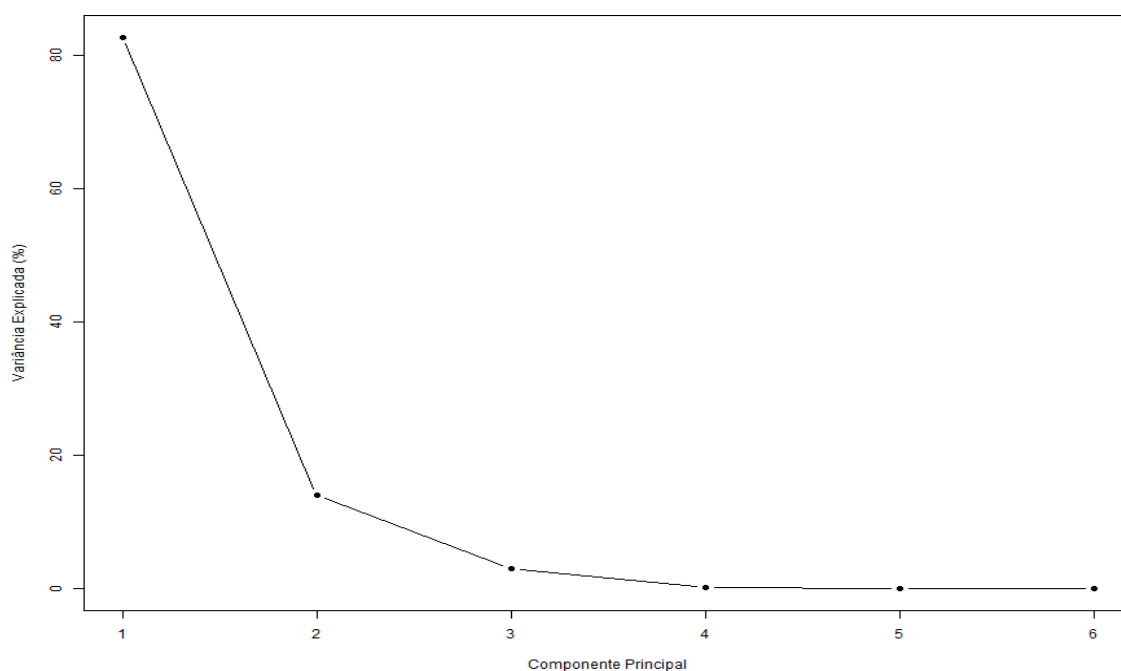
Do ponto de vista ambiental, o PCA evidencia que:

- Tramandaí apresenta maior enriquecimento associado a As e Co;
- Nossa Senhora do Socorro apresenta maior associação com Zn, Pb, Cu, Ag, Cr e MO;
- Areia Branca apresenta comportamento intermediário e mais próximo das condições naturais do sedimento.

Esses resultados demonstram que os manguezais estudados apresentam diferentes padrões geoquímicos e distintos níveis de influência ambiental, refletindo a interação entre processos naturais e pressões antrópicas sobre os ecossistemas analisados.

O gráfico de variância explicada da Análise de Componentes Principais (PCA), como consta na figura 35, demonstra que os dois primeiros componentes principais concentram praticamente toda a variabilidade dos dados geoquímicos analisados, indicando elevada eficiência da PCA na representação dos padrões ambientais observados nos sedimentos manguezais.

Figura 3542. Percentual de variância explicada pelos componentes principais obtidos na análise PCA.



Juntos, PC1 e PC2 foram responsáveis por aproximadamente 96% da variabilidade total do conjunto de dados, evidenciando que os padrões geoquímicos das áreas analisadas podem ser adequadamente interpretados a partir desses dois eixos principais.

A elevada porcentagem explicada pelo PC1 indica que existe um forte gradiente geoquímico dominante controlando a distribuição dos elementos químicos nos sedimentos. Segundo Hair et al. (2009), componentes principais com elevada capacidade explicativa representam os principais processos ambientais responsáveis pela variabilidade dos dados multivariados.

No presente estudo, o PC1 esteve associado principalmente à separação entre elementos como As e Co em oposição aos metais relacionados à matéria orgânica, como Zn, Cu, Pb, Ag e Ni.

O PC2, embora explique percentual menor da variabilidade, contribuiu para refinar a separação entre as áreas e demonstrar diferenças relacionadas principalmente à associação entre matéria orgânica (MO), Ni e Co em contraste com Zn, Pb, Cu e Ag.

Os componentes PC3, PC4, PC5 e PC6 apresentaram contribuições muito reduzidas para a variabilidade total, indicando que esses eixos representam apenas pequenas oscilações residuais dos dados e não exercem influência relevante na interpretação ambiental do sistema estudado.

A elevada concentração da variância nos dois primeiros componentes demonstra forte correlação entre os elementos analisados e evidencia que os processos geoquímicos responsáveis pela distribuição dos metais nos manguezais apresentam comportamento relativamente organizado e consistente entre as áreas estudadas

4.2 Custo social do carbono

O estoque total de carbono orgânico no sedimento até a profundidade de 20 cm foi obtido pelo somatório dos estoques das camadas de 0–10 cm e 10–20 cm, conforme abordagem metodológica consolidada em estudos de carbono azul em ecossistemas de manguezal (DONATO et al., 2011; KAUFFMAN; DONATO, 2012; HOWARD et al., 2014).

A valoração do custo social do carbono estocado no sedimento foi realizada a partir da conversão do estoque de carbono ($Mg\ C\ ha^{-1}$) em dióxido de carbono equivalente ($t\ CO_2e\ ha^{-1}$), utilizando-se o fator 44/12, e posterior multiplicação pelo custo social do carbono.

Neste estudo, foi adotado o custo social do carbono conforme estimado por Ricke et al., 2018, considerando os valores de US\$15,5 (mínimo), US\$27,01 (médio) e US\$47,96 (máximo) por tonelada de CO_2 equivalente, abordagem posteriormente aplicada ao contexto brasileiro por Fernandes et al. (2021). Para conversão monetária em moeda nacional, utilizou-se a taxa de câmbio de R\$5,2455 por US\$1,00.

A Tabela 4 apresenta a estimativa do custo social do carbono (CSC) para a camada sup

erficial do sedimento (0–10 cm), evidenciando diferenças importantes entre as áreas analisadas.

Tabela 4. Estimativa do Custo Social do Carbono na camada de 0–10 cm.

Local	CO ₂	US\$ (mín)	US\$ (méd)	US\$ (máx)
Areia Branca	120,12	1.861,86	3.244,44	5.761,35
Nossa Senhora do Socorro	68,75	1.065,63	1.856,94	3.297,25
Tramandaí	115,21	1.785,76	3.111,82	5.524,67

Fonte: Elaboração própria, com base em Ricke et al. (2018) e Fernandes et al. (2021).

Na camada de 0 a 10 cm, os valores variam para a Areia Branca, entre US\$1.861,86 e US\$5.761,35 ha^{-1} , enquanto que em Nossa Senhora do Socorro apresentou valores entre US\$1.065,63 e US\$3.297,25 ha^{-1} . Já a área do Tramandaí variou entre US\$1.785,76 e US\$5.524,67 ha^{-1} .

A Areia Branca apresentou o maior valor de carbono estocado com 120,12 CO₂e t ha^{-1} e um custo social estimado entre US\$ 1.861,86/ha e US\$ 5.761,35/ha. O Parque Ecológico Tramandaí também apresentou valores expressivos, com um custo social estimado de US\$ 1.785,76/ha e US\$ 5.524,67/ha, aproximando-se dos valores observados na Areia Branca. Por outro lado, Nossa Senhora do Socorro apresenta os menores valores entre as áreas avaliadas, com US\$ 1.065,63/ha e US\$ 3.297,25/ha.

A Tabela 5 apresenta a estimativa do custo social do carbono (CSC) para a camada mais profunda do sedimento (10–20 cm), permitindo uma análise complementar em relação à camada superficial e evidenciando a contribuição vertical do estoque de carbono nos manguezais.

Tabela 5. Estimativa do Custo Social do Carbono na camada de 10–20 cm.

Local	CO ₂ e	US\$ (mín)	US\$ (méd)	US\$ (máx)
Areia Branca	122,03	1.891,47	3.296,05	5.852,56
Nossa Senhora do Socorro	69,26	1.073,53	1.870,73	3.321,71
Tramandaí	97,39	1.509,55	2.630,56	4.670,42

Fonte: Elaboração própria, com base em Ricke et al. (2018) e Fernandes et al. (2021)

Os resultados referentes a camada de 10 a 20 cm, indicam que a Areia Branca mantém o maior valor entre as áreas analisadas, com variação entre US\$ 1.891,47/ha a US\$ 5.852,56, reforçando sua elevada capacidade de estocagem de carbono também em camadas mais profundas, o que sugere maior acúmulo histórico.

O Parque Ecológico Tramandaí apresenta valores intermediários, com US\$ 1.509,55 a

4.670,42/ha, indicando que, apesar de possíveis pressões ambientais, ainda conserva um estoque significativo de carbono em profundidade. Já em Nossa Senhora do Socorro novamente apresenta os menores valores, com US\$ 1.072,53/ha a US\$ 3.321,71.

A análise da Tabela 6 , que considera a soma das camadas de 0 a 20 cm, evidencia diferenças significativas no custo social do carbono entre as áreas avaliadas, destacando a Areia Branca variando entre US\$3.753,33/ha e US\$11.613,51, o Parque Ecológico Tramandaí apresenta valores também elevados variando entre US\$ 3.295,14/ha a US\$10.195,82, revelando potencial relevante de retenção de carbono, enquanto Nossa Senhora do Socorro registra os menores valores entre US\$ 2.139,15/ha a US\$ 6.618,96. Nossa Senhora do Socorro apresenta uma redução significativa no custo social do carbono em comparação às demais áreas.

Tabela 6. Estimativa do Custo Social do Carbono na soma das camadas de 0–10 cm e de 10 - 20 cm.

Local	CO₂e	US\$ (mín)	US\$ (méd)	US\$ (máx)
Areia Branca	242,15	3.753,33	6.540,47	11.613,51
Nossa Senhora do Socorro	138,01	2.139,15	3.727,65	6.618,96
Tramandaí	212,59	3.295,14	5.742,06	10.195,82

Fonte: Elaboração própria, com base em Ricke et al. (2018) e Fernandes et al. (2021).

5. CONCLUSÃO

Os resultados demonstraram que os manguezais estudados em Sergipe apresentam concentrações de metais potencialmente tóxicos abaixo dos valores orientadores da legislação brasileira e de referências internacionais. As análises geoquímicas evidenciaram diferenças significativas entre as áreas avaliadas, com maior enriquecimento de matéria orgânica e metais-traço no Tramandaí, comportamento intermediário na Areia Branca e menores concentrações em Nossa Senhora do Socorro, refletindo a influência conjunta de fatores naturais, estágio sucessional e pressões antrópicas.

Em relação ao carbono orgânico, verificou-se que os estoques variam entre as áreas em função das características ambientais, da densidade aparente dos sedimentos e do histórico de uso e ocupação. Areia Branca apresentou maior capacidade de armazenamento de carbono, enquanto Nossa Senhora do Socorro registrou os menores valores, possivelmente em decorrência das alterações associadas à antiga atividade de carcinicultura. Os resultados demonstram que a degradação e as alterações hidrológicas podem comprometer a capacidade de sequestro de carbono dos manguezais, embora áreas visualmente degradadas, como o Tramandaí, ainda mantenham estoques expressivos de carbono azul.

Dessa forma, o estudo reforça a importância dos manguezais como sumidouros de carbono azul e reservatórios geoquímicos, fundamentais para a mitigação das mudanças climáticas e para a manutenção dos serviços ecossistêmicos. A valoração econômica baseada no custo social do carbono evidencia que a conservação desses ambientes pode gerar benefícios ambientais e econômicos relevantes, fornecendo subsídios para políticas públicas, planejamento costeiro, gestão ambiental e futuras iniciativas relacionadas ao mercado de carbono e ao pagamento por serviços ambientais

REFERÊNCIAS

- ALLOWAY, B. J. *Heavy metals in soils: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability*. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.
- ALONGI, D. M. Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, v. 29, p. 331–349, 2002.
- ALONGI, D. M. Carbon sequestration in mangrove forests. *Carbon Management*, v. 3, n. 3, p. 313–322, 2012.
- ALONGI, D. M. Carbon cycling and storage in mangrove forests. *Annual Review of Marine Science*, v. 6, p. 195–219, 2014.
- AES, F. P. G. *Potencial de macrófitas para remoção de arsênio e atrazina em solução aquosa*. 2006. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2006.
- BARBIER, E. B. et al. Coastal ecosystem services. *Ecological Economics*, v. 68, p. 643–651, 2008.
- BARBIER, E. B. et al. The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, v. 81, n. 2, p. 169–193, 2011.
- BERNINI, E.; REZENDE, C. E. Estrutura da vegetação em florestas de mangue do estuário do rio Paraíba do Sul. *Acta Botanica Brasilica*, v. 24, n. 2, p. 491–497, 2010.
- BOUILLON, S. et al. Mangrove production and carbon sinks: a revision of global budget estimates. *Global Biogeochemical Cycles*, v. 22, n. 2, 2008.
- BRASIL. Decreto nº 7.390, de 9 de dezembro de 2010. Regulamenta a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2010.
- BRASIL. Decreto nº 10.828, de 1º de outubro de 2021. Regulamenta a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2021.
- BRASIL. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009. Institui a Política Nacional sobre Mudança do Clima. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2009.
- BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2012.
- BRASIL. Lei nº 14.119, de 13 de janeiro de 2021. Institui a Política Nacional de Pagamento por Serviços Ambientais. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2021.
- BRASIL. Lei nº 15.042, de 11 de dezembro de 2024. Institui o Sistema Brasileiro de Comércio de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2024.

BURUAEM, L. M. 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.

CANTARELLA, H. et al. *Métodos de análise química de solos*. Campinas: Instituto Agrônômico de Campinas, 1992.

CINTRÓN, G.; SCHAEFFER-NOVELLI, Y. *Introducción a la ecología del manglar*. Paris: UNESCO, 1983.

CONAMA. Resolução nº 303, de 20 de março de 2002. Dispõe sobre parâmetros, definições e limites de Áreas de Preservação Permanente. Diário Oficial da União: Brasília, DF, 2002.

COSTANZA, R. et al. Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, v. 26, p. 152–158, 2014.

DIEGUES, A. C. *O mito moderno da natureza intocada*. São Paulo: Hucitec, 1998.

DIEGUES, A. C. *Etnoconservação: novos rumos para a proteção da natureza nos trópicos*. São Paulo: Hucitec, 2000.

DONATO, D. C. et al. Mangroves among the most carbon-rich forests in the tropics. *Nature Geoscience*, v. 4, n. 5, p. 293–297, 2011.

DUARTE, C. M.; MIDDELBURG, J. J. Major role of marine vegetation on the oceanic carbon cycle. *Biogeosciences*, v. 2, p. 1–8, 2005.

EMBRAPA. *Manual de métodos de análise de solo*. 2. ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011.

FERREIRA, T. O. et al. Chemical and mineralogical characteristics of soils and sediments of the mangrove areas from the Todos os Santos Bay, Bahia, Brazil. *Marine Pollution Bulletin*, v. 54, n. 9, p. 143–150, 2007.

GODOY, S. G. M.; SAES, M. S. M. Cap-and-trade and project-based framework: how do carbon markets work for greenhouse emissions reduction? *Ambiente & Sociedade*, v. 18, n. 1, p. 135–154, 2015.

HAIR, J. F. et al. *Análise multivariada de dados*. 6. ed. Porto Alegre: Bookman, 2009.

HARBISON, P. Heavy metal pollution and ecological effects in mangrove areas of the Embley River estuary, North Queensland, Australia. *Marine Ecology Progress Series*, v. 33, p. 45–52, 1986.

HOWARD, J. et al. *Coastal blue carbon: methods for assessing carbon stocks and emissions factors in mangroves, tidal salt marshes, and seagrass meadows*. Arlington: Conservation International, 2014.

IPCC. 2019 refinement to the 2006 IPCC guidelines for national greenhouse gas inventories. Geneva: IPCC, 2019.

ISO. ISO 11464: Soil quality — Pretreatment of samples for physico-chemical analysis. Geneva: International Organization for Standardization, 2006.

JOLLIFFE, I. T. *Principal component analysis*. 2. ed. New York: Springer, 2002.

KABATA-PENDIAS, A.; PENDIAS, H. *Trace elements in soils and plants*. 3. ed. Boca Raton: CRC Press, 2001.

KAUFFMAN, J. B.; DONATO, D. C. *Protocols for the measurement, monitoring and reporting of structure, biomass and carbon stocks in mangrove forests*. Bogor: CIFOR, 2012.

KAUFFMAN, J. B. et al. Carbon stocks of intact mangroves and carbon emissions arising from their conversion in the Dominican Republic. *Ecological Applications*, v. 24, n. 3, p. 518–527, 2014.

LIMA, A.; RAFAEL, M. *Avaliação ambiental da paisagem de mangue no Parque Ecológico do Tramandaí*. Anais de Evento Científico, 2024.

LOVELOCK, C. E.; REEF, R. The vulnerability of mangroves and tidal wetlands to climate change. *Annual Review of Environment and Resources*, v. 45, p. 257–281, 2020.

MACREADIE, P. I.; ANTON, A.; RAVEN, J. A. The future of blue carbon science. *Nature Communications*, v. 10, n. 3998, 2019.

MARCHAND, C. et al. Heavy metals distribution in mangrove sediments along the mobile coastline of French Guiana. *Marine Chemistry*, v. 98, n. 1, p. 1–17, 2006.

MARCHAND, C. et al. Mangrove sedimentary geochemistry: an overview. *Aquatic Geochemistry*, v. 17, p. 641–661, 2011.

MCLEOD, E. et al. A blueprint for blue carbon: toward an improved understanding of the role of vegetated coastal habitats in sequestering CO₂. *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 9, n. 10, p. 552–560, 2011.

MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: UFMG, 2005.

PENDLETON, L. et al. Estimating global blue carbon emissions from conversion and degradation of vegetated coastal ecosystems. *PLoS ONE*, v. 7, n. 9, e43542, 2012.

PRADO, Moana Marina Fontes. *Proposta de intervenção paisagística e ambiental para o Parque Ecológico do Tramandaí*. 2018. Monografia (Graduação em Arquitetura e Urbanismo) – Universidade Federal de Sergipe, Laranjeiras, 2018.

RAINBOW, P. S. Trace metal concentrations in aquatic invertebrates: why and so what? *Environmental Pollution*, v. 120, n. 3, p. 497–507, 2002.

- RAMSAR. *Convention on Wetlands of International Importance*. Ramsar, 1971.
- RICKE, K. et al. Country-level social cost of carbon. *Nature Climate Change*, v. 8, n. 10, p. 895–900, 2018.
- SAENGER, P.; HEGERL, E. J.; DAVIE, J. D. S. *Global status of mangrove ecosystems*. Gland: IUCN, 1983.
- SANTOS, M. C. J.; DALTRO FILHO, J.; MENDONÇA, L. C. *Dinâmica da ocupação urbana no bairro Jardins e sua relação com tensores ambientais no manguezal do Tramandaí em Aracaju-SE*. *GeoNordeste*, v. 22, n. 1, p. 73-94, 2011.
- SCHAEFFER-NOVELLI, Y. Manguezal: ecossistema entre a terra e o mar. *Caribbean Journal of Science*, v. 31, p. 7–15, 1995.
- SMEDLEY, P. L.; KINNIBURGH, D. G. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, v. 17, n. 5, p. 517–568, 2002.
- SOARES, M. L. G. et al. Mangrove dynamics in Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 219, p. 1–9, 2019.
- TAM, N. F. Y.; WONG, Y. S. Spatial variation of heavy metals in surface sediments of Hong Kong mangrove swamps. *Environmental Pollution*, v. 110, n. 2, p. 195–205, 2000.
- THORHAUG, A. et al. Blue carbon ecosystems: carbon storage and sequestration. *Journal of Coastal Research*, v. 95, p. 123–135, 2020.
- TOMLINSON, P. B. *The botany of mangroves*. Cambridge: Cambridge University Press, 1986.
- TWILLEY, R. R. et al. The role of mangroves in global carbon cycling. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 34, n. 5, p. 449–460, 1992.
- UNFCCC. *United Nations Framework Convention on Climate Change*. New York: United Nations, 1992.
- UNFCCC. *Kyoto Protocol Reference Manual*. Bonn: United Nations, 2008.
- UNFCCC. *Paris Agreement*. Paris: United Nations, 2015.
- VANNUCCI, M. *Os manguezais e nós*. São Paulo: EdUSP, 1999.