



UNIVERSIDADE FEDERAL DO MARANHÃO
DEPARTAMENTO DE OCEANOGRAFIA E LIMNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO
DESENVOLVIMENTO E MEIO AMBIENTE
MESTRADO



CHRISTIANO TEIXEIRA DE FREITAS

ASPECTOS HIDROBIOGEOQUÍMICOS E AMBIENTAIS DO SISTEMA
ESTUARINO DE RAPOSA, MA

São Luís/MA

2024

CHRISTIANO TEIXEIRA DE FREITAS

**ASPECTOS HIDROBIOGEOQUÍMICOS E AMBIENTAIS DO SISTEMA
ESTUARINO DE RAPOSA, MA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA) da Universidade Federal do Maranhão como requisito para obtenção do grau de Mestre em Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Orientador(a): Prof.(a) Dr.(a)
Samara Aranha Eschrique

São Luís/MA

2024

Ficha gerada por meio do SIGAA/Biblioteca com dados fornecidos pelo(a) autor(a).
Diretoria Integrada de Bibliotecas/UFMA

Teixeira de Freitas, Christiano.

Aspectos Hidrobiogeoquímicos e Ambientais do Sistema
Estuarino de Raposa, Ma / Christiano Teixeira de Freitas.
- 2024.

41 f.

Orientador(a): Samara Aranha Eschrique.

Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do
Maranhão, São Luís, Maranhão, 2024.

1. Estuário. 2. Sazonalidade. 3. Tropical. 4.
Nutrientes. 5. . I. Aranha Eschrique, Samara. II.
Titulo.

CHRISTIANO TEIXEIRA DE FREITAS

**HIDROBIOGEOQUÍMICA DE UMA ZONA ESTUARINA DO MUNICÍPIO DE
RAPOSA (MA)**

Dissertação apresentada ao Programa
de Pós-Graduação em
Desenvolvimento e Meio Ambiente
(PRODEMA) da Universidade
Federal do Maranhão como requisito
para obtenção do grau de Mestre em
Desenvolvimento e Meio Ambiente.

Aprovada em _____ de _____ de _____.

BANCA EXAMINADORA

Dra. Samara Aranha Eschrique (Orientadora)
Universidade Federal do Maranhão

Dr. Leonardo Gonçalves de Lima
Universidade Federal do Maranhão

Dra. Elisabete de Santis Braga
Universidade de São Paulo

AGRADECIMENTOS

A Deus, que me presenteou com o dom da vida, e renova minhas forças e energias sempre que parece que a fraqueza é maior que tudo e a guerra será vencida.

A minha mãe e minha irmã, que me dão forças diárias e são meu sustento para seguir na minha caminhada.

Ao meu noivo, que sempre me apoia e está comigo nos momentos difíceis e nos momentos de felicidade

Aos meus amigos de infância, que me acompanham desde o ensino fundamental, e apesar da distância e da escassez de encontros devido a rotina, ainda permanecem em minha vida em todos os momentos, principalmente os que eu mais necessito.

Aos meus amigos e irmãos que tive a oportunidade de fazer no escoteiro, e que alegam minha vida infinitamente.

Aos amigos que fiz durante o ensino médio, que tenho prazer de ainda compartilhar da amizade.

Aos meus queridos amigos da turma do PRODEMA, que tornaram a caminhada mais prazerosa e foram o ponto alto dessa experiência acadêmica.

À minha querida orientadora e mãe científica, que me acolheu como um filho me ajudando no meu desenvolvimento como cientista.

Aos companheiros do LABICLOS, que tornaram essa caminhada mais leve quando eu achei que não poderia mais me sentir bem em lugar nenhum.

Aos amigos que fiz na UFMA, especialmente os que compõe o grupo Fadas e o Grupo Nhá, que fizeram essa caminhada junto comigo, me dando forças pra continuar.

Aos demais membros da minha família que sempre me apoiaram quando se tratou e me deram condições para ter uma boa educação.

A todos os funcionários e professores do DEOLI, que contribuíram para a minha formação.

E a todos que um de alguma forma contribuíram para que eu chegasse até aqui com vida.

RESUMO

O estudo visa avaliar a dinâmica das variáveis hidrobioquímicas da água estuarina, observando a influência sazonal e a contribuição das atividades humanas. A pesquisa se concentra em parâmetros como salinidade, pH, transparência, nitrito, nitrato, oxigênio dissolvido e nutrientes. Foram realizadas coletas de dados em diferentes períodos sazonais (chuvoso e seco) e em várias áreas do estuário (Eólica, Mangue e Baía). A análise envolveu técnicas de medição de parâmetros físicos e químicos da água, além da utilização de modelos estatísticos para interpretar os resultados. A salinidade, o pH, a transparência, o nitrito e o nitrato apresentam uma relação negativa com o período chuvoso, devido ao maior aporte de água doce. O oxigênio dissolvido e os nutrientes mostraram correlação positiva com a precipitação, sugerindo que a maior pluviosidade favorece a produtividade primária. Durante a estação chuvosa, houve um aumento na temperatura da água, no oxigênio dissolvido e nos nutrientes, indicando uma intensificação da dinâmica bioquímica e da produtividade primária. O estudo conclui que a sazonalidade afeta significativamente a qualidade da água e a disponibilidade de nutrientes no estuário. Destaca-se a importância de monitoramentos contínuos e estudos integrados para o desenvolvimento de modelos preditivos que apoiem a tomada de decisão e a implementação de práticas de gestão sustentável. Este trabalho fornece subsídios valiosos para a conservação da biodiversidade e a integridade ecossistêmica do estuário de Raposa. A pesquisa é essencial para compreender os impactos das atividades humanas sobre os ecossistemas estuarinos e para desenvolver estratégias de mitigação e gestão sustentável desses ambientes cruciais.

Palavras-chave: Estuário, Sazonalidade, Nutrientes, Tropical.

ABSTRACT

The study aims to evaluate the dynamics of hydrobiochemical variables in estuarine water, observing the seasonal influence and the contribution of human activities. The research focuses on parameters such as salinity, pH, transparency, nitrite, nitrate, dissolved oxygen, and nutrients. Data collection was conducted during different seasonal periods (rainy and dry) and in various areas of the estuary (Eólica, Mangue, and Baía). The analysis involved techniques for measuring the physical and chemical parameters of the water, as well as the use of statistical models to interpret the results. Salinity, pH, transparency, nitrite, and nitrate showed a negative relationship with the rainy period due to the greater influx of freshwater. Dissolved oxygen and nutrients showed a positive correlation with precipitation, suggesting that increased rainfall favors primary productivity. During the rainy season, there was an increase in water temperature, dissolved oxygen, and nutrients, indicating an intensification of biochemical dynamics and primary productivity. The study concludes that seasonality significantly affects water quality and nutrient availability in the estuary. It highlights the importance of continuous monitoring and integrated studies for the development of predictive models that support decision-making and the implementation of sustainable management practices. This work provides valuable insights for the conservation of biodiversity and the ecosystem integrity of the Raposa estuary. The research is essential for understanding the impacts of human activities on estuarine ecosystems and for developing mitigation and sustainable management strategies for these crucial environments.

Keywords: Estuary; Seasonality; Nutrients; Tropical.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Localização da Área de Estudo no município de Raposa-MA.	13
Figura 1: Localização dos pontos de coleta do Sistema Estuarino de Raposa-MA. ...	20
Figura 2: Modelo de Escalonamento Multidimensional não - Métrico para o Sistema Estuarino de Raposa, MA. Cores: Azul = Chuvoso; Vermelho = Estiagem; Símbolos: + = Eólico; □ = Mangue; ○ = Baía.	27
Figura 3. Análise de Componentes Principais para o Sistema Estuarino de Raposa-MA. Cores: Azul = Chuvoso; Vermelho = Estiagem; Símbolos: + = Eólico; □ = Mangue; ○ = Baía.....	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Tensores antrópicos e as consequências geradas na Bacia do Rio Paciência-MA.....	15
Tabela 1: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros físicos e químicos, distribuídos sazonalmente e espacialmente. Letras diferentes indicam diferenças estatística, sazonal ou espacial, para cada variável	27

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

%OD - Porcentual de Saturação em Oxigênio Dissolvido.

APHA - *American Public Health Association*.

CL-*a* - Clorofila *a*

CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente.

DEOLI – Departamento de Oceanografia e Limnologia.

DHN - Diretoria de Hidrografia e Navegação.

DOL - Distúrbios Ondulatórios de Leste.

et al. – e colaboradores.

Feo - Feopigmento

Fig. – Figura.

g kg⁻¹ - Gramas por Quilogramas.

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.

INMET- Instituto Nacional de Meteorologia.

INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais

LABCICLOS - Laboratório de Biogeoquímica dos Constituintes Químicos da Água

LD - Limite de Detecção do Método

m - Metros.

MA - Maranhão.

mg L⁻¹ - Miligramas por Litro.

mL - Mililitro.

mg m⁻³ – Miligrama por metro cúbico

MÉD. - Média

MOS - Matéria Orgânica em Suspensão.

NMDS - Modelo de Escalonamento Multidimensional não - Métrico

°C – Graus *Celsius*.

OD - Oxigênio Dissolvido

PCA - Análise dos Componentes Principais.

pH - Potencial Hidrogeniônico.

Prof. – Profundidade

TSS - Sólidos Totais em Suspensão.

Temp. – Temperatura

Transpar. – Transparência

$\mu\text{mol L}^{-1}$ – Micromol por litro

UFMA - Universidade Federal do Maranhão.

SUMÁRIO

I.	CONSIDERAÇÕES INICIAIS	12
II.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	13
1.	O MUNICÍPIO DE RAPOSA.....	13
2.	TENSORES ANTRÓPICOS OBSERVADOS NA ÁREA DE ESTUDO	14
III.	HIDROBIOQUÍMICA AMBIENTAL DE UM SISTEMA ESTUARINO DA MARGEM EQUATORIAL, MARANHÃO-BRASIL	17
	RESUMO.....	17
	ABSTRACT	18
1.	INTRODUÇÃO	18
2.	MATERIAL E MÉTODO	19
2.1.	ÁREA DE ESTUDO	19
2.2.	COLETA E ANÁLISE DE DADOS	21
3.	RESULTADOS.....	23
4.	DISCUSSÃO	28
5.	CONCLUSÃO.....	31
	AGRADECIMENTOS	32
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	32
IV.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	37
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38

I. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O documento de Dissertação foi elaborado na forma de Artigo Científico, o qual foi submetido à Revista Brasileira de Ciências Ambientais (Qualis Capes A3 para área de Ciências Ambientais).

Este estudo faz parte do Projeto de Cooperação Acadêmica FAPEMA-FAPESP, através do Projeto de Pesquisa intitulado: “ESTUDO BIOGEOQUÍMICO E SOCIOAMBIENTAL DE ECOSSISTEMAS COSTEIROS - Contribuição para avaliação de sustentabilidade e impacto ambiental - BIOGEOQUIS-ECOS.

O objeto de estudo deste projeto são dois ambientes estuarinos, o sistema estuarino-lagunar de Cananéia-Iguape, localizado na região Sudeste, no estado de São Paulo, e o sistema estuarino de Raposa, localizado na região Nordeste, no estado do Maranhão com influência de macromarés, sendo esse o ambiente escolhido para desenvolvimento desta dissertação.

Este trabalho considera que o processo de renovação de água neste sistema estuarino de Raposa, que é regido pela dinâmica de macromarés, pode influenciar na detecção de mudança na qualidade da água deste ambiente, uma vez que as transformações são muito rápidas e dinâmicas, sendo de difícil detecção. E, que no compartimento sedimentar as mudanças ocorrem de maneira mais lenta, preservando as suas características hidrogeoquímicas, podendo gerar respostas mais completas sobre a atual condição ambiental do estuário.

Deste modo as informações de qualidade ambiental obtidas na água e sedimento, podem ser utilizadas como ferramenta para identificar influências naturais e antrópicas, provenientes do crescimento desordenado e irregular e do despejo de efluentes domésticos no entorno do estuário, e gerar subsídios para manutenção da saúde do ambiente.

Somada a essas **I. Considerações Iniciais**, este documento segue com o **II. Fundamentação Teórica**, seguido por **III. CAPÍTULO 1**, constando, na íntegra, o artigo científico, seguido das **IV. Considerações Finais**, e as **Referências e Anexos** (Normas da Revista).

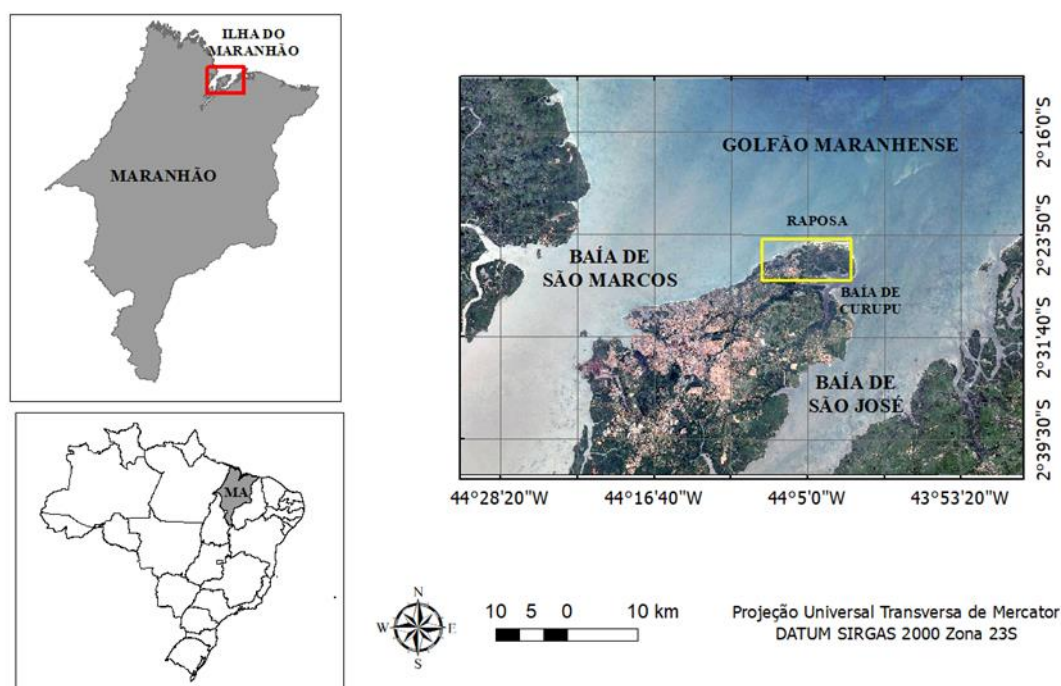
I. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

1. O MUNICÍPIO DE RAPOSA

O município de Raposa (Figura 1) está localizado numa região litorânea banhada pelo Oceano Atlântico, situada na Ilha de São Luís, no estado do Maranhão, e se insere entre as coordenadas de 02°25'22" S e 44°05'21" W, possuindo 31.586 habitantes e 79,823 km² de extensão territorial (IBGE, 2021).

As principais fontes de renda e subsistência da população local são a pesca e o extrativismo de moluscos (sarnambi, ostra e sururu), crustáceos (caranguejo e siri) (Fialho, 2002). Segundo Feitosa & Trovão (2006), o município possui uma das maiores colônias de pescadores do estado do Maranhão, atingindo uma renda anual de 7,1 milhões de reais, correspondendo a quase 10% do faturamento total do estado, quando se trata desse ramo da economia.

Figura 1: Localização da Área de Estudo no município de Raposa-MA.



O município apresenta clima úmido, classificado em tropical equatorial, precipitação pluviométrica anual de 2.100 mm, dividido em dois períodos (período estiagem e período chuvoso), com temperatura média anual superior a 26°C segundo o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) evidenciado nos trabalhos dos autores Monteles *et al.* (2008) e Santos *et al.* (2011).

A região estuarina de Raposa em conjunto com outros ambientes estuarinos, como as Baías de São Marcos, São José e Curupu, compõe o Sistema Estuarino de Raposa, que está inserido no Golfão Maranhense, uma das principais unidades geomorfológicas do nordeste localizado ao norte e compreendendo uma extensa área do estado do Maranhão.

Segundo Davies (1964), na região, as escalas temporal e espacial das variações do nível do mar fazem com que os estuários sejam forçados por marés, classificadas como macromarés, com altura máxima superior a 6 metros.

O sistema estuarino do município de Raposa tem como principal contribuição de aporte de água doce o Rio Paciência, cuja sua bacia hidrográfica tem uma área total de 143,7 km² e extensão de 27,3 km. Sua nascente localiza-se na Chapada do Tirirical e sua foz nas proximidades da Ilha de Curupu, e, atravessa os quatro municípios da Ilha de São Luís: São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa (FSADU, 2007). Seus principais afluentes são os rios Itapiracó e Miritiua, que são dependentes das precipitações sazonais (Santos; Terceiro; Yauri, 2014).

De acordo com Rebelo-Mochel (1996), na periferia da Ilha de São Luís, a qual o município de Raposa se encontra inserido, há cerca de 16.000 ha de manguezais, distribuídos sobre a costa como franjas, atrás das praias, dos cordões litorâneos, das dunas arenosas ou margeando rios e igarapés.

No turismo, o município é destino alternativo à visitação na capital São Luís do Maranhão, tendo como principais atrativos os passeios nas praias e dunas da região, vasto manguezal preservado e apreciação da gastronomia por meio de pratos típicos baseados em frutos do mar, sendo uma atividade que complementa a economia do município. Como potencial atrativo de turismo cultural (ou de base comunitária), o município de Raposa apresenta *modus vivendi* de pescadores e artesanato variado (Camara Municipal De Raposa, 2022). Para Silva (2008), a falta de investimento do governo e de infraestrutura da cidade compromete essa atividade. Outro problema relatado pelo autor, encontra-se relacionada à falta de fiscalização do viés turístico nas dunas e praias presentes na região, o que pode acarretar a degradação do patrimônio ambiental.

2. TENSORES ANTRÓPICOS OBSERVADOS NA ÁREA DE ESTUDO

Para Ferreira *et al* (2014), a emancipação do povoado de Raposa como município acarretou um crescimento horizontal da área urbana e rural, levando a uma

ocupação desordenada e aumento significativo da população, trazendo uma série de problemas de caráter socioeconômicos e ambientais. Segundo o autor, a problemática ambiental mais significativa no município é a degradação e o aterro do manguezal, levando a veiculação de doenças que se tornam endêmicas, como verminoses, diarreia, calazar, dentre outras.

Segundo Santos (2018), é comum que no Estado do Maranhão, as cidades cresçam sem nenhum planejamento prévio, o que leva a uma série de aspectos de caráter negativo como: falta de saneamento básico, baixos indicadores sociais, violência urbana, dentre outros problemas que comprometem diretamente ou indiretamente a qualidade de vida dos moradores, e que devem ser monitorados a partir de indicadores socioambientais.

Os aportes naturais e antrópicos que mais vão contribuir para sistema estuarino de Raposa são os dos municípios de Paço do Lumiar e Raposa, que apresentem elevada taxa de urbanização, que faz com que se tenham diversas degradações ambientais (Tabela 1), que, em sua maioria, estão relacionadas ao despejo de resíduos sólidos em áreas inapropriadas, ao lançamento de efluentes domésticos e industriais, que são lançados sem tratamento no ambiente aquático, ao extrativismo de áreas de manguezais para a construção civil, aumentando o desmatamento, além de atividades portuárias e ao despejo de efluentes agrícolas, advindos da aquicultura local (Silva, 2008).

Tabela 1: Tensores antrópicos e as consequências geradas na Bacia do Rio Paciência-MA.

Tensores	Consequências
Queimada / Desmatamento	O assoreamento das margens por atividades antropogênicas pode causar inundações e consequentemente o estreitamento da bacia, principalmente nas cheias (Castro & Pereira, 2016).
Esgoto doméstico	Contaminação e eutrofização do corpo hídrico, perda da biodiversidade, risco público de saúde e degradação da paisagem (Castro & Pereira, 2016).
Aquicultura	Obstrução dos fluxos de água, aumentando as taxas de hipernutrição bem como a eutrofização, a descarga dos efluentes de viveiros e a poluição por resíduos químicos durante as diferentes fases do cultivo e ainda o desmatamento das áreas de manguezais (Ribeiro <i>et al.</i> , 2014.; Franco <i>et al.</i> , 2018).

Atividades Portuárias (Dragagem)	Atividades socioeconômicas introduzem contaminantes aos estuários como a erosão e o assoreamento, que podem gerar substâncias químicas nocivas e perigosas; causar distúrbio ecológico com derramamento de óleo, além das emissões de gases e ainda poeira e material particulado etc. (RMS, 2012).
Lixão e Cemitérios	Risco de contaminação da água de escoamento superficial e subterrânea, que afeta diretamente a população residente na Bacia do Rio Paciência (Castro & Pereira, 2016).
Turismo	Risco de ultrapassar o limite de capacidade do ambiente gerando impactos ambientais negativos, como poluição da água por resíduos sólidos (Rabelo 2022)

II. CAPÍTULO 1

HIDROBIOQUÍMICA AMBIENTAL DE UM SISTEMA ESTUARINO DA MARGEM EQUATORIAL, MARANHÃO-BRASIL

Christiano Teixeira de Freitas¹; Samara Aranha Eschrique¹; Leonardo Gonçalves de Lima¹; Elisabete de Santis Braga²; James Werllen de Jesus Azevedo¹; Suzyeth Monteiro Melo¹; Vitor Gonsalez Chiozzini²

1 Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Maranhão, Av. dos Portugueses, 1966, Vila Bacanga. CEP: 65.080-805, São Luís (MA) - Brasil. christianotfreitas@gmail.com

2 Programa de Pós-Graduação em Oceanografia, Universidade de São Paulo, Praça do Oceanográfico, 191, Cidade Universitária. CEP 05.508-120 - São Paulo (SP) - Brasil.

RESUMO

Os estuários são importantes ecossistemas que prestam serviços ambientais, e que ao longo das décadas têm sido impactados pelo desenvolvimento das cidades em seu entorno, gerando a necessidade de estudos que avaliem a interferência das atividades antrópicas nesse ambiente. O estudo investiga o sistema estuarino de Raposa, Maranhão, Brasil, analisando a dinâmica das variáveis hidrobioquímicas da água. A pesquisa revela que parâmetros como salinidade, pH, transparência, nitrito e nitrato têm uma relação negativa com o período chuvoso, enquanto oxigênio dissolvido e nutrientes apresentam correlação positiva com a precipitação. A sazonalidade, afeta significativamente a qualidade da água e a disponibilidade de nutrientes no estuário. Durante a estação chuvosa, houve um aumento na temperatura da água, oxigênio dissolvido e nutrientes, indicando que a maior precipitação favorece a produtividade primária e a dinâmica bioquímica. Destaca-se a importância de monitoramentos contínuos e estudos integrados para desenvolvimento de modelos preditivos que possam apoiar a tomada de decisão e a implementação de práticas de gestão sustentável.

Palavras-chave: Estuário; Sazonalidade; Nutrientes; Tropical.

ABSTRACT

Estuaries are important ecosystems that provide environmental services and have been impacted over the decades by urban development in their surroundings, creating a need for studies that evaluate the interference of anthropogenic activities in this environment. The study investigates the estuarine system of Raposa, Maranhão, Brazil, analyzing the dynamics of the hydrobiochemical variables of the water. The research reveals that parameters such as salinity, pH, transparency, nitrite, and nitrate have a negative relationship with the rainy season, while dissolved oxygen and nutrients show a positive correlation with precipitation. Seasonality significantly affects water quality and nutrient availability in the estuary. During the rainy season, there was an increase in water temperature, dissolved oxygen, and nutrients, indicating that higher precipitation favors primary productivity and biochemical dynamics. The importance of continuous monitoring and integrated studies is highlighted to develop predictive models that can support decision-making and the implementation of sustainable management practices.

Keywords: Estuary; Seasonality; Nutrients; Tropical.

1. INTRODUÇÃO

A zona costeira representa uma região de transição ecológica, onde exerce importante função de conexão entre ambientes marinhos e terrestres, abrigando uma combinação de ecossistemas que possuem alta relevância ambiental (Yu et al., 2024).

Dentre estes ecossistemas se encontra inserido os estuários, ambientes costeiros semifechados que apresentam uma conexão com o mar aberto e gradiente de salinidade e densidade, provenientes da mistura progressiva das águas fluviais e marinhas (Pritchard, 1967; Elliott & Whitfield, 2011; Lonsdale et al., 2022).

Conhecidos por seu elevado dinamismo e interações entre suas interfaces, áreas estuarinas recebem grandes aportes de material continental, tornando-os importantes receptores de nutrientes e contaminantes orgânicos e inorgânicos, atuando também como filtro dos aportes, estimulando a produção primária, o que em geral torna suas águas mais produtivas quando comparadas aos rios e oceanos, e em razão disso, importantes berçários para a fauna marinha, estuarina e fluvial (Amritha Priya et al., 2023; Real et al., 2024).

Já é de senso comum pela comunidade científica que para obter êxito nos estudos e manejo de um estuário, que estão entre os ambientes mais impactados pelas atividades antropogênicas, faz-se necessário a utilização de vários indicadores que são derivados de uma abordagem multi e interdisciplinar (Birch et al, 2015).

A detecção da mudança da qualidade da água de um estuário pode ser difícil, dado ao seu alto dinamismo, principalmente em estuários regidos por macromarés, onde há intenso processo de renovação das águas, e por sofrerem constantes modificações, tanto naturais como antrópicas. Portanto, o uso de indicadores se torna essencial para o estudo mais detalhado desses ambientes, podendo ser eles bioindicadores, a exemplo dos fitoplânctons (Cavalcanti et al, 2020) ou parâmetros físicos e químicos da água (Li et al, 2017), que fornecem bases para conservação e uso sustentável desses ambientes (Dzwonkowski et al., 2023).

Nesse contexto, conhecer as características bioquímicas presentes no ambiente estuarino e todos os fatores antrópicos que são agentes modificadores de suas águas, torna-se essencial para compreensão dos processos e forçantes que atuam nesse sistema, além de gerar subsídios para uma boa gestão e uso sustentável, a fim de se evitar danos ambientais, ou mitigar processos de degradação do ambiente (Sahoo et al., 2024).

O presente estudo tem como objetivo avaliar a distribuição temporal e sazonal de variáveis hidrobioquímicas superficiais de um sistema estuarino da margem equatorial, abrangendo o município de Raposa-MA, de modo a identificar possíveis contribuições antropogênicas nesse ambiente, visando o uso sustentável dos recursos naturais e a conservação da biodiversidade e integridade ecossistêmica local.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. ÁREA DE ESTUDO

A região estuarina desse estudo compreende o município de Raposa-MA e integra a Bacia Hidrográfica do Rio Paciência, que constitui um dos principais mananciais da Ilha de São Luís, tendo importante contribuição socioeconômica para os quatro municípios que a compõe (São Luís, São José de Ribamar, Paço do Lumiar e Raposa), bem como para o sistema de abastecimento hídrico da capital (Castro, 2001).

A bacia do Rio Paciência sofre vários tipos de pressões antrópicas, recebe cargas acentuadas de efluentes domésticos ao longo do seu curso, comprometendo a qualidade

de suas águas, o que pode vir a inviabilizar o potencial de usos múltiplos (Oliveira et al, 2012). A situação ambiental desta bacia se caracteriza também pelo uso como fonte de lazer, presença do lixão do município de Paço do Lumiar, exploração mineral, como a retirada de argila, e pela pesca de subsistência e comercial, tendo como consequência de sua ocupação, o assoreamento do leito do rio (IMESC 2011; Carvalho, 2014).

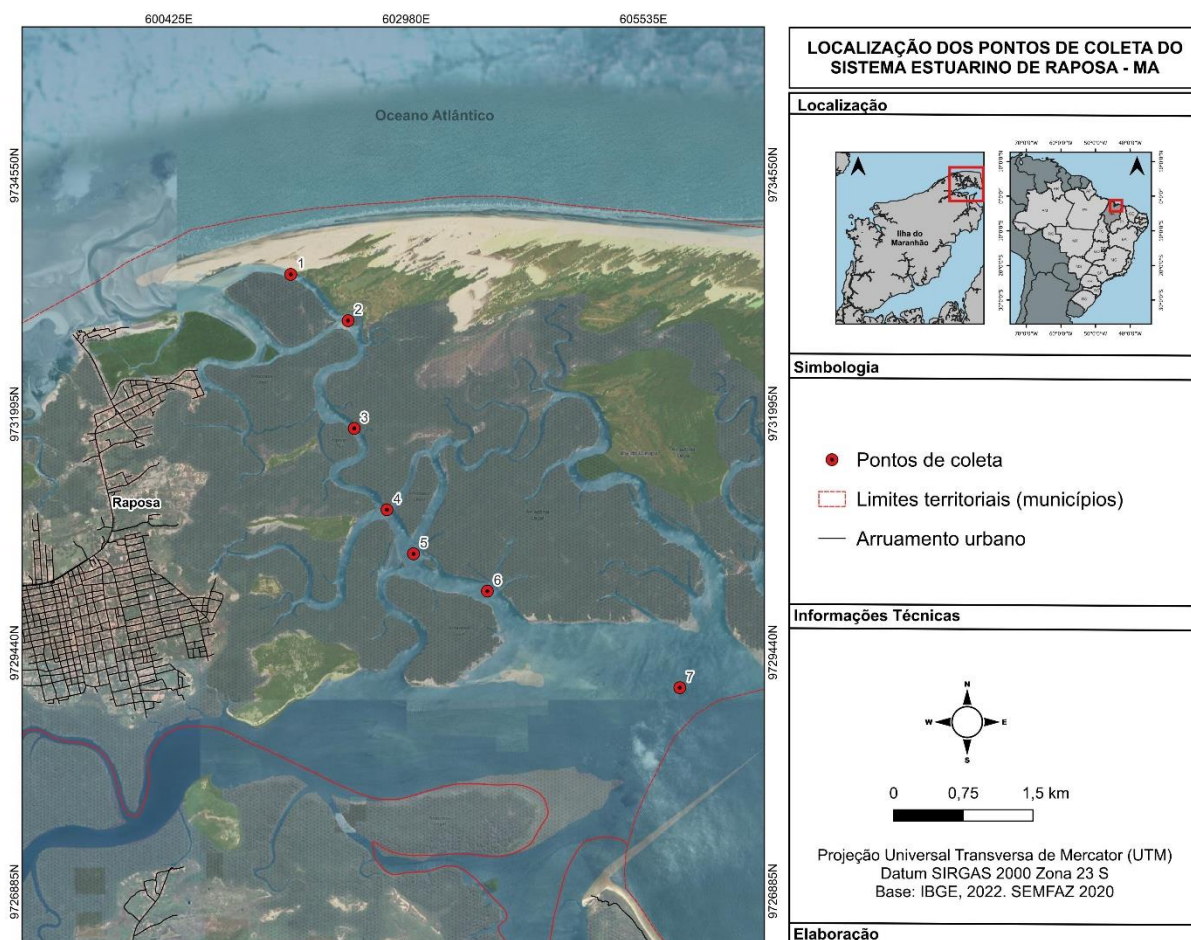


Figura 1. Localização dos pontos de coleta do Sistema Estuarino de Raposa – MA.

O sistema estuarino de Raposa está inserido no Golfão Maranhense e sofre influência das Baías de São Marcos e São José, é regido por um regime de macromarés semidiurna, com altura de maré maior que 6,0 m, e possui clima tropical úmido, com duas estações distintas bem definidas, o período chuvoso que se estende de março a maio, e o período de estiagem que ocorre de setembro a novembro (Cavalcanti *et al.*, 2018).

2.2. COLETA E ANÁLISE DE DADOS

As amostragens de água superficial foram realizadas em 7 pontos de coleta contemplando o sistema estuarino de Raposa (Figura 1), abrangendo três áreas distintas, os pontos 1 e 2 em área de influência eólica, próximos as Fronhas Maranhenses e dos aportes da Baía de São Marcos, os pontos 4, 5 e 6 na região mais central do estuário, com influência da área de drenagem do manguezal do entorno, e os pontos 6 e 7, localizados na área mais externa, influenciados diretamente pela Baía de São José.

As coletas foram realizadas no ano de 2022, em dois períodos sazonais distintos, no mês de maio, abrangendo o período chuvoso, e no mês de setembro, abrangendo o período de estiagem. Medidas de salinidade, temperatura e profundidade local foram realizadas in situ com o auxílio de um equipamento CTD (Conductivity, Temperature and Depth) da marca YSI CastAway®. O pH foi medido com um pHmetro HI 8424 da marca HANNA, previamente calibrado. A profundidade de desaparecimento do Secchi foi medida utilizando um disco de Secchi, para posterior cálculo de transparência da água, segundo a metodologia de Poole & Atkins (1929).

Para a amostragem de água, foram realizadas coletas por meio do lançamento de garrafa hidrográfica tipo van Dorn. Para cada amostra, foram coletados dois frascos de polietileno com capacidade volumétrica de 0,5 litro para a análise dos sólidos totais em suspensão e dois para determinação de clorofila-a. As amostras foram armazenadas sob a refrigeração até o momento da filtração em laboratório.

Para determinação de Oxigênio Dissolvido (OD) as amostras de água foram armazenadas em frascos âmbar de DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio), enumerados e com volumes calibrados antes da coleta. A bordo da embarcação, as amostras foram fixadas imediatamente após a coleta, estocadas em ambiente escuro, para serem analisadas em laboratório pelo método de Winkler (1888), como descrito em Strickland & Parsons (1972). O método tem precisão de $0,35 \text{ mmol L}^{-1}$, o valor correto, para uma média de n determinações realizadas sob as condições próximas aquelas ideais, é de $\pm 0,0015/\sqrt{n} \text{ mmol L}^{-1}$.

Os cálculos de saturação de oxigênio dissolvido foram realizados com o auxílio das tabelas e fórmulas descritas em Aminot & Chaussepied (1983).

O total de sólidos em suspensão foram determinados segundo as metodologias descritas em Strickland & Parsons (1972) e APHA (2001), através da diferença entre o peso do filtro com resíduo e o peso do filtro seco. A matéria orgânica em suspensão foi determinada por técnica gravimétrica, após a calcinação da amostra em forno mufla a

450°C, como descrito em APHA (2001). O valor é obtido a partir da diferença entre o peso do filtro antes da ignição e o peso do filtro após a ignição.

Os nutrientes, fosfato e silicato, foram medidos por espectrofotometria com base na colorimetria como descrito por Grasshoff *et al.* (1983), com precisão de fosfato de $\pm 0,01 \mu\text{mol L}^{-1}$ e de silicato de $\pm 0,02 \mu\text{mol L}^{-1}$.

O N-Amoniacal foi medido segundo método de Tréguer & Le Corre (1975), com adaptação de Solózano (1969), com precisão de $\pm 0,05 \mu\text{mol L}^{-1}$ de N-amoniaco (N-NH₃ + N-NH₄).

A determinação de Nitrito e Nitrato seguiu o método colorimétrico, com redução de nitrato para nitrito através de coluna de cádmio cuperizado, conforme descrito em Wood *et al.* (1967). O valor de nitrito total (nitrito + nitrato reduzido) menos o valor de nitrito inicial fornece o valor de nitrato. A precisão de determinação do método para nitrito é de $\pm 0,01 \mu\text{mol L}^{-1}$ e para nitrato de $\pm 0,02 \mu\text{mol L}^{-1}$. As análises foram realizadas seguindo as recomendações de Grasshoff *et al.* (1999), Tréguer & Le Corre (1975), e Braga (1997 a 1997b).

A clorofila-a (Cl-a) da água foi estimada por espectrofotometria na faixa de luz visível, segundo a metodologia sugerida por Jeffrey & Humphrey (1975) para fitoplâncton misto (água estuarina). O feopigmento foi determinado segundo a metodologia sugerida por Strickland & Parsons (1972).

Os dados pluviométricos foram adquiridos através do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), utilizando a estação meteorológica do município de São Luís, localizada nas coordenadas 2°31,6' S – 44°18,7' W, à altitude de 50 m (INMET, 2022)

Os dados de maré, referentes às campanhas de coleta foram retirados da tábua de maré do Diretório de Hidrografia e Navegação (DHN) da Marinha do Brasil (DHN, 2022).

Os dados obtidos foram organizados em planilhas, onde foram confeccionados gráficos para melhor visualização dos resultados de maneira espacial e sazonal. Para verificar a similaridade sazonal e espacial entre as variáveis físicas e químicas, utilizou-se a técnica de ordenação representada pelo Modelo de Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (NMDS). Na sequência foi aplicada a Análise de Similaridade (ANOSIM) bidirecional (two-way ANOSIM), para avaliar a significância das diferenças entre os grupos sazonais e espaciais, analisando os valores de “p” para determinar a significância das diferenças observadas (Clarke & Warwick, 2001).

Para correlacionar as variáveis físicas e químicas com a sazonalidade local e as diferentes características dos locais de amostragem, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA). Em seguida, para avaliar as diferenças sazonais e espaciais dos parâmetros físicos e químicos, foi aplicado o teste de PERMANOVA bidirecional (two-way PERMANOVA) (Anderson, 2001; Legendre & Legendre, 2012).

Todas as análises estatísticas foram efetuadas utilizando-se o software livre PAST 4.03. (Hammer et al. 2003), adotando-se um nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

Os dados de precipitação pluviométrica acumulada mensalmente referente ao ano de 2022 variaram de 0 mm em outubro e máximo de 664,1 mm em março, sendo o valor total acumulado no ano de 2452 mm.

O mês de maio, correspondente ao período chuvoso na região, apresentou valor de precipitação acumulado mensal de 441 mm, ficando aproximadamente 43% acima da média histórica local (1961 a 2022 anos).

No mês de setembro, correspondente ao período de estiagem da região, foi registrado o valor de precipitação pluviométrica acumulada mensal de 1,6 mm, aproximadamente 85% abaixo da média histórica local.

No período chuvoso, a maré apresentou variação de altura de -0,2 m (mínimo) a 6,3 m (máximo), com coletas realizadas entre momentos de maré enchente e vazante, registrando valor máximo em torno de 5,0 m durante a coleta próximo às áreas de influência eólica, e mínimo de 1,0 m na área de influência da Baía de São José. Na estiagem, a variação de altura de maré foi de 0,2 m (mínimo) a 6,1 m (máximo). O valor mínimo ocorreu na área de mangue, próximo de 1,0 m, e máximo próximo de 6,0 m, na área de influência da Baía de São José.

A análise sazonal da profundidade local se manteve constante entre os períodos chuvoso e de estiagem, com uma média de $2,87 \pm 1,25$ m, sem diferenças estatísticas. Na análise espacial, a profundidade local variou significativamente entre as áreas estudadas. A área sob a influência Eólica apresentou uma profundidade média de $1,95 \pm 0,19$ m, a área de Mangue teve uma profundidade média de $2,42 \pm 0,68$ m, e a Baía apresentou a maior profundidade média de $4,48 \pm 0,69$ m, com diferenças estatísticas significativas (PERMANOVA Two-Way espacial; $df = 2$; $F = 12,00$; $p > 0,00$).

A transparência da água não variou significativamente na análise sazonal, com valores médios de $1,87 \pm 0,43$ m durante o período chuvoso e $3,38 \pm 1,03$ m no período

de estiagem, indicando uma maior clareza da água na ausência de. Espacialmente, a transparência da água também não mostrou variações significativas, com a área Eólica registrando uma média de $1,96 \pm 0,13$ m, a área de Mangue com $2,15 \pm 0,94$ m, e a Baía com a maior transparência média de $3,35 \pm 1,16$ m.

A temperatura da água apresentou uma leve variação, sendo ligeiramente mais alta no período chuvoso ($29,66 \pm 0,36$ °C) em comparação com o período de estiagem ($28,79 \pm 1,02$ °C), mas essa diferença não foi estatisticamente significativa. A temperatura da água foi relativamente consistente entre as áreas, sem diferenças estatísticas espacial (Tabela 1).

A salinidade apresentou diferenças significativas tanto sazonalmente quanto espacialmente. Durante o período chuvoso, a salinidade foi menor, devido ao maior aporte de água doce, enquanto no período de estiagem, a salinidade aumentou significativamente (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 5263,8$; $p > 0,00$). Espacialmente, a salinidade variou entre as áreas, com a Baía apresentando valores mais baixos em comparação com as áreas de Mangue e Eólico ((PERMANOVA Two-Way espacial; $df = 2$; $F = 6,61$; $p = 0,01$), refletindo a influência das águas marinhas e a dinâmica de mistura de águas no estuário.

Observou-se que o pH apresentou uma média de 7,93 durante o período chuvoso e 8,11 no período de estiagem, indicando uma variação sazonal significativa (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 10,97$; $p > 0,00$). O pH não mostrou diferenças espaciais significativas (Tabela 1).

O oxigênio dissolvido (OD) variou significativamente tanto sazonalmente quanto espacialmente. Durante o período chuvoso, o OD apresentou uma média de $5,58$ mg L⁻¹, enquanto no período de estiagem a média foi de $4,04$ mg L⁻¹ (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 241,3$; $p > 0,00$). Espacialmente, a área de Mangue apresentou os menores valores de OD, provavelmente devido à maior demanda para decomposição da matéria orgânica, enquanto a Baía apresentou valores mais altos, refletindo uma maior oxigenação da água (PERMANOVA Two-Way espacial; $df = 2$; $F = 5,69$; $p = 0,01$).

Os sólidos suspensos totais (TSS) também variaram sazonalmente, com maiores concentrações durante o período (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 5,39$; $p = 0,03$), devido à ressuspensão de sedimentos e ao aporte de material particulado pelas chuvas. Espacialmente, a área de Mangue e Eólica apresentaram as maiores concentrações de TSS (Tabela 1), refletindo a maior quantidade de matéria orgânica e sedimentos em suspensão, porém sem diferença significativa.

A matéria orgânica em suspensão (MOS) representou em média cerca de 30% do material particulado em suspensão, influenciada pela drenagem das águas da chuva e pela dinâmica de maré, entretanto sem apresentar diferenças significativas sazonais e espaciais (Tabela 1).

Os níveis de fosfato variaram sazonalmente, com valores médio de $0,50 \mu\text{mol L}^{-1}$ na estação chuvosa, e $0,30 \mu\text{mol L}^{-1}$ na estiagem (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 11,89$; $p > 0,00$), refletindo a lixiviação de nutrientes do continente durante as chuvas. O fosfato não teve diferenças espaciais significativas (Tabela 1).

Tabela 1: Valores médios e desvio padrão dos parâmetros físicos e químicos, distribuídos sazonalmente e espacialmente. Letras diferentes indicam diferenças estatística, sazonal ou espacial, para cada variável.

Parâmetro	Unidade	Chuva (maio)	Estiagem	Eólico	Mangue	Baía
		(n=7)	(setembro)			
		méd. (\pm SD)	méd. (\pm SD)	méd. (\pm SD)	méd. (\pm SD)	méd. (\pm SD)
Profundidade Local	m	2,87 (\pm 1,25) ^A	2,87 (\pm 1,25) ^A	1,95 (\pm 0,19) ^A	2,42 (\pm 0,68) ^A	4,48 (\pm 0,69) ^B
Transparência	m	1,87 (\pm 0,43) ^A	3,38 (\pm 1,03) ^A	1,96 (\pm 0,13) ^A	2,15 (\pm 0,94) ^A	3,35 (\pm 1,16) ^A
Temperatura	°C	29,66 (\pm 0,36) ^A	28,79 (\pm 1,02) ^A	28,79 (\pm 0,73) ^A	29,51 (\pm 0,96) ^A	29,22 (\pm 0,87) ^A
Salinidade	g kg ⁻¹	22,18 (\pm 0,61) ^A	33,77 (\pm 0,41) ^B	28,33 (\pm 6,92) ^A	28,02 (\pm 5,96) ^A	27,56 (\pm 7,10) ^B
pH	-	7,93 (\pm 0,09) ^A	8,11 (\pm 0,12) ^B	8,10 (\pm 0,15) ^A	7,94 (\pm 0,11) ^A	8,07 (\pm 0,14) ^A
O.D	mg L ⁻¹	5,58 (\pm 0,29) ^A	4,04 (\pm 0,18) ^B	4,80 (\pm 0,78) ^A	4,65 (\pm 0,86) ^A	5,05 (\pm 1,00) ^B
	%	133 (\pm 10) ^A	91 (\pm 4) ^B	110,38 (\pm 21,44) ^A	109,57 (\pm 24,15) ^A	117,73 (\pm 29,46) ^B
TSS	mg L ⁻¹	82,20 (\pm 34,56) ^A	55,31 (\pm 8,05) ^B	77,34 (\pm 22,46) ^A	76,50 (\pm 34,59) ^A	48,56 (\pm 10,09) ^A
MOS	mg L ⁻¹	27,04 (\pm 17,10) ^A	18,79 (\pm 8,46) ^A	26,22 (\pm 18,93) ^A	27,89 (\pm 11,65) ^A	12,15 (\pm 1,97) ^A
	%	31 (\pm 9) ^A	35 (\pm 18) ^A	31 (\pm 12) ^A	39 (\pm 17) ^A	25 (\pm 3) ^A
Fosfato	$\mu\text{mol L}^{-1}$	0,50 (\pm 0,12) ^A	0,30 (\pm 0,08) ^B	0,33 (\pm 0,08) ^A	0,47 (\pm 0,16) ^A	0,35 (\pm 0,14) ^A
Silicato	$\mu\text{mol L}^{-1}$	11,47 (\pm 3,56) ^A	10,26 (\pm 6,03) ^A	8,15 (\pm 1,56) ^A	12,05 (\pm 4,54) ^A	11,81 (\pm 7,01) ^A
Nitrito	$\mu\text{mol L}^{-1}$	0,12 (\pm 0,05) ^A	0,17 (\pm 0,11) ^A	0,08 (\pm 0,01) ^A	0,20 (\pm 0,09) ^B	0,13 (\pm 0,04) ^A
Nitrato	$\mu\text{mol L}^{-1}$	0,17 (\pm 0,11) ^A	0,70 (\pm 1,44) ^A	0,13 (\pm 0,12) ^A	0,82 (\pm 1,54) ^A	0,17 (\pm 0,08) ^A
N-Amoniacal	$\mu\text{mol L}^{-1}$	0,53 (\pm 0,26) ^A	0,47 (\pm 0,33) ^A	0,24 (\pm 0,15) ^A	0,65 (\pm 0,31) ^A	0,54 (\pm 0,20) ^A
Cl-a	mg m ⁻³	17,72 (\pm 4,51) ^A	4,89 (\pm 1,55) ^B	10,81 (\pm 8,82) ^A	13,05 (\pm 8,02) ^A	9,18 (\pm 6,34) ^A
Feo	mg m ⁻³	17,76 (\pm 7,05) ^A	1,90 (\pm 1,12) ^B	8,73 (\pm 11,03) ^A	10,76 (\pm 9,15) ^A	8,47 (\pm 8,24) ^A

Os valores médios de silicato durante o período chuvoso foram de $11,47 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 0,05), enquanto no período de estiagem foram de $10,26 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 0,11). Não houve diferença estatística significativa entre os períodos sazonais e nem entre as áreas (Tabela 1).

Os valores médios de nitrito durante o período chuvoso foram de $0,12 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 0,11), enquanto no período de estiagem foram de $0,17 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 1,44), mas não houve diferença estatística entre os períodos sazonais. Espacialmente, os valores médios de nitrito foram de $0,13 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 0,12) na área eólica, $0,82 \mu\text{mol L}^{-1}$ (\pm 1,54) no mangue

e $0,17 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\pm 0,08$) na baía. Os resultados indicaram diferenças estatísticas entre as áreas PERMANOVA Two-Way espacial; $df = 2$; $F = 4,58$; $p = 0,03$), com maior concentração na área de mangue.

Os valores médios de nitrato durante o período chuvoso foram de $0,17 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\pm 0,11$), enquanto no período de estiagem foram de $0,70 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\pm 1,44$). A análise não indicou diferença estatística entre os períodos sazonais e nem espacial (Tabela 1).

Os valores médios de N-amoniaco durante o período chuvoso foram de $0,53 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\pm 0,26$), enquanto no período de estiagem foram de $0,47 \mu\text{mol L}^{-1}$ ($\pm 0,33$). Não houve diferença estatística entre os períodos sazonais e nem entre as áreas (Tabela 1).

Os valores médios de clorofila-a durante o período chuvoso foram de $17,72 \text{ mg m}^{-3}$ ($\pm 4,51$), enquanto na estiagem foram de $4,89 \text{ mg m}^{-3}$ ($\pm 1,55$). Houve diferença estatística entre os períodos sazonais (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 39,92$; $p < 0,00$). Espacialmente, os valores médios de clorofila-a foram de $10,81 \text{ mg m}^{-3}$ ($\pm 8,82$) na área eólica, $13,05 \text{ mg m}^{-3}$ ($\pm 8,02$) no mangue e $9,18 \text{ mg m}^{-3}$ ($\pm 6,34$) na baía. A análise não detectou diferença estatística entre as, com maior concentração na área de mangue.

O feopigmento apresentou uma média de $1,23 \text{ mg m}^{-3}$ durante o período chuvoso e $0,87 \text{ mg m}^{-3}$ durante o período de estiagem, sinalizando diferenças significativas (PERMANOVA Two-Way sazonal; $df = 1$; $F = 28,10$; $p < 0,00$), não sendo observado variações significativas no aspecto espacial (Tabela 1).

A partir do modelo NMDS é possível observar a formação de grupos em função dos fatores sazonais e espaciais (Figura 2). Ao mesmo tempo percebe-se uma maior similaridade entre os ambientes de Baía e Mangue, sobretudo no período de estiagem. No período chuvoso a área de estudo tende a se apresentar mais homogênea, ao longo dos três ambientes, o que pode ser observado pelo agrupamento dos pontos que os representam. De forma geral, a área sob a influência da região eólica parece apresentar a maior diferença entre os demais trechos, o que pode ser observado pela posição mais extrema dos pontos que representam essa área, tanto no período chuvoso como na estiagem. As diferenças sazonais e espaciais foram confirmadas pela Análise de Similaridade (ANOSIM Two-Way espacial; $R = 0,033$ $p = 0,036$) e sazonal (ANOSIM Two-Way sazonal $R = 0,90$ $p = 0,011$).

A Análise de Componentes Principais (Figura 3) revelou que os dois primeiros componentes explicaram 63,2% da variância total dos dados (Componente 1: 44,4%, Componente 2: 18,8%).

Na primeira componente é possível observar dois períodos sazonais bem distintos. Os parâmetros temperatura da água (Temp.), oxigênio dissolvido (OD), fosfato, silicato, N-amoniaco, totais de sólidos em suspensão (TSS), matéria orgânica em suspensão (MOS), clorofila-a (Cl-a) e feopigmento (feo) apresentaram relação positiva com o período chuvoso, sugerindo que esses parâmetros são diretamente influenciados pelo aumento do aporte de água doce no sistema nesse período. A salinidade (Sal.), pH, transparência (transpar), nitrito e nitrato apresentaram uma relação negativa com o período chuvoso, indicando que a diminuição do aporte de água doce que ocorre no período de estiagem influencia diretamente no aumento dos valores desses parâmetros.

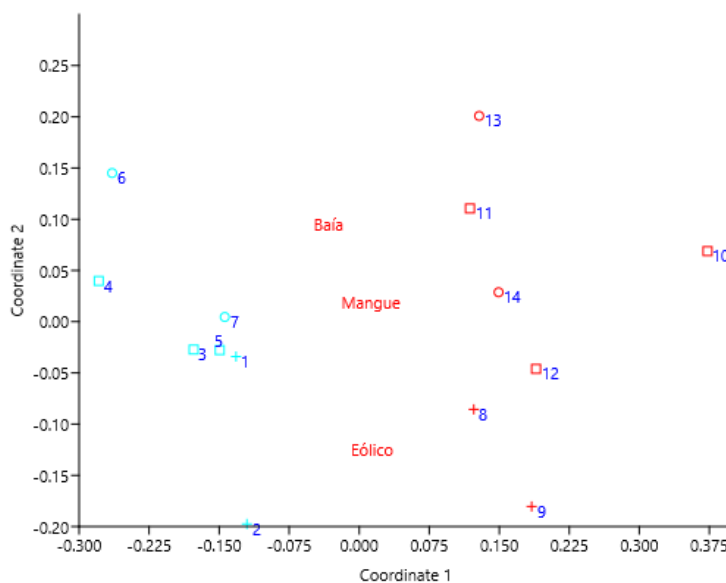


Figura 2: Modelo de Escalonamento Multidimensional não - Métrico para o Sistema Estuarino de Raposa, MA. Cores: Azul = Chuvoso; Vermelho = Estiagem; Símbolos: + = Eólico; □ = Mangue; ○ = Baía.

Na segunda componente é possível observar uma correlação positiva entre os parâmetros Cl-a, feo, oxigênio dissolvido e pH, indicando que esses parâmetros se influenciam de forma proporcionalmente direta. Em contrapartida, evidencia-se uma correlação negativa desses parâmetros com os nutrientes, indicando que as condições mais oxigenadas da água e o maior aporte de água marinha, favorecem os processos que tendem a promover diminuição do aporte nutricional do ambiente.

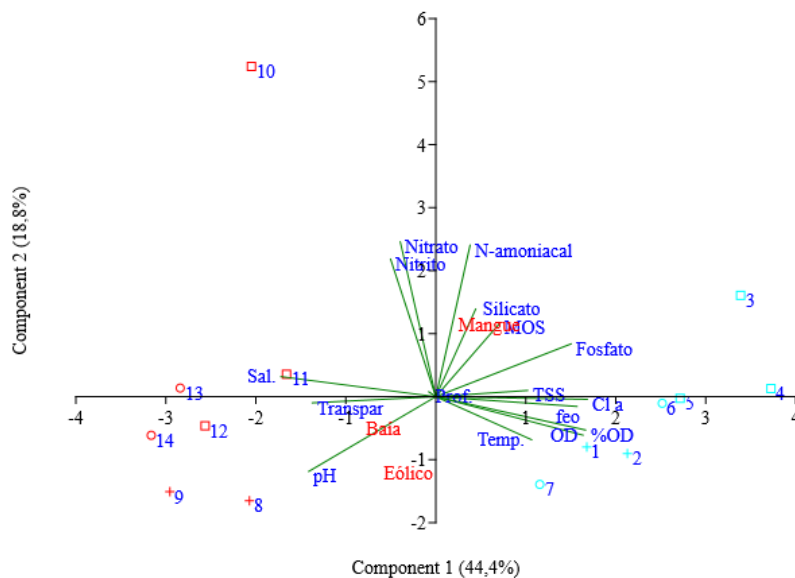


Figura 3. Análise de Componentes Principais para o Sistema Estuarino de Raposa, MA. Cores: Azul = Chuvoso; Vermelho = Estiagem; Símbolos: + = Eólico; □ = Mangue; ○ = Baía.

4. DISCUSSÃO

Os resultados deste estudo evidenciam a forte influência da sazonalidade nos parâmetros físicos e químicos do sistema estuarino de Raposa, MA. De acordo com o Prognóstico Climático CPTEC/INMET/FUNCEME, foram registradas para o mês de maio, anomalias TSM (Temperatura da Superfície do Mar) negativas, indicando a persistência de um fenômeno de La Niña, associada a Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL), que influenciaram na precipitação das regiões norte e nordeste do país, com registro de chuvas acima da média histórica. Já o baixo índice de precipitação observado em outubro condiz com o período de estiagem, onde há uma diminuição das precipitações pluviométricas (INMET, 2023).

Durante o período chuvoso, observou-se um aumento nos valores de temperatura da água, oxigênio dissolvido, fosfato, silicato, totais de sólidos em suspensão, matéria orgânica em suspensão, clorofila-a e feopigmento. Esses achados são consistentes com estudos recentes que destacam a influência do aporte de água doce e nutrientes durante a estação chuvosa em sistemas estuarinos tropicais (Day et al., 1989; Bianchi, 2007).

A relação positiva desses parâmetros com o período chuvoso sugere que o aumento da precipitação e o consequente aporte de água doce promovem uma maior

disponibilidade de nutrientes e matéria orgânica, favorecendo a produtividade primária e a dinâmica biogeoquímica do estuário (Marín-Vindas et al., 2023). Esses resultados corroboram com os achados de Dittmar e Lara (2001), que observaram um comportamento similar em estuários do norte do Brasil.

Além disso, estudos como o de Nunes et al. (2023) e destacam que a sazonalidade pode influenciar significativamente a composição e a abundância de fitoplâncton, o que, por sua vez, afeta a qualidade da água e a disponibilidade de oxigênio dissolvido. Twilley et al. (1992) também relataram que a variabilidade sazonal pode impactar a distribuição de nutrientes, como fosfato e silicato, em estuários tropicais.

Durante o período de estiagem, os parâmetros salinidade, pH, transparência, nitrito e nitrato apresentaram uma relação negativa com o período chuvoso, indicando um aumento desses valores devido à diminuição do aporte de água doce. Esse comportamento é esperado, uma vez que a redução da entrada de água doce leva a uma maior concentração de sais e nutrientes na água estuarina (Bianchi, 2007).

A estabilidade relativa observada nos parâmetros de salinidade e transparência durante a estiagem sugere uma menor influência das variações hidrológicas, destacando a importância da dinâmica da maré e da evaporação na manutenção das condições ambientais (Kennish, 2002). Esses resultados são consistentes com estudos realizados em outros estuários tropicais, que também relataram uma maior estabilidade dos parâmetros físicos e químicos durante a estação de estiagem (Day et al., 1989).

Estudos adicionais, como o de Barbier et al. (2019), indicam que a estiagem pode levar a uma maior concentração de nutrientes e matéria orgânica devido à evaporação e à menor diluição, o que pode afetar a qualidade da água e a saúde dos ecossistemas aquáticos. Wolanski e Elliott (2015) também observaram que a redução do aporte de água doce durante a estiagem pode aumentar a salinidade e alterar a composição química e biológica da água em estuários tropicais.

A análise espacial revelou que os diferentes ambientes do estuário (eólico, mangue e baía) apresentam variações significativas nas suas condições ambientais. A área de mangue mostrou uma menor variação nos parâmetros físicos e químicos, indicando uma maior resiliência e estabilidade ambiental. Esse comportamento pode ser atribuído à capacidade dos manguezais de atuar como filtros biológicos, regulando a entrada de nutrientes e matéria orgânica (Taillardat et al., 2020).

Por outro lado, as áreas de baía e eólica apresentaram uma maior variação nos parâmetros, especialmente durante o período de estiagem. Isso pode ser explicado pela

maior exposição dessas áreas às influências hidrodinâmicas e atmosféricas, como a ação dos ventos, marés e a evaporação (Wolanski & Elliott, 2015). Esses resultados destacam a importância de considerar as características específicas de cada ambiente ao estudar a dinâmica estuarina.

Estudos como o de Lee et al. (2014) demonstram que os manguezais desempenham um papel crucial na estabilização dos parâmetros físicos e químicos, atuando como zonas tampão que mitigam as variações ambientais. Barbier et al. (2019) também enfatizam a importância dos manguezais na filtragem de nutrientes e na proteção contra a erosão, contribuindo para a resiliência dos ecossistemas estuarinos.

Comparando os resultados deste estudo com outros realizados em estuários tropicais, observa-se uma consistência nos padrões sazonais e espaciais dos parâmetros físicos e químicos. Estudos realizados por Day et al. (1989) e Bianchi (2007) em estuários da América do Sul relataram padrões semelhantes de variação sazonal e espacial, reforçando a importância dos fatores hidrológicos e climáticos na dinâmica estuarina.

Também pode-se acrescentar que os achados deste estudo são consistentes com os resultados de Dittmar e Lara (2001), que destacaram a influência da sazonalidade e das características ambientais locais na variabilidade dos parâmetros hidroquímicos em estuários tropicais. Esses estudos ressaltam a necessidade de uma abordagem integrada e multiescalar para a gestão e conservação dos ecossistemas estuarinos.

Estudos adicionais, como o de Lee et al. (2014), corroboram a importância da sazonalidade e das características espaciais na dinâmica dos estuários, destacando a necessidade de estratégias de gestão adaptativas que considerem essas variáveis. Barbier et al. (2019) também enfatizam a importância de uma abordagem integrada para a gestão dos estuários, considerando as interações entre fatores hidrológicos, climáticos e biológicos.

Os resultados deste estudo têm importantes implicações para a gestão e conservação do sistema estuarino de Raposa, MA. A forte influência da sazonalidade e das características espaciais nas condições ambientais destaca a necessidade de estratégias de gestão adaptativas que considerem as variações temporais e espaciais dos parâmetros físicos e químicos. A resiliência dos manguezais e a maior vulnerabilidade das áreas de baía e eólica sugerem que diferentes abordagens de gestão podem ser necessárias para cada ambiente específico. Além disso, a compreensão das interações entre os fatores hidrológicos, climáticos e biológicos é essencial para a conservação da

biodiversidade e a manutenção dos serviços ecossistêmicos fornecidos pelos estuários. Estudos futuros devem focar na integração de dados ambientais e biológicos para desenvolver modelos preditivos que possam apoiar a tomada de decisão e a implementação de práticas de gestão sustentável.

Estudos como o de Barbier et al. (2019) destacam a importância de políticas públicas que integrem a gestão dos recursos hídricos com a conservação dos ecossistemas estuarinos. Wolanski e Elliott (2015) também sugerem a implementação de programas de monitoramento contínuo para avaliar as mudanças nos parâmetros físicos e químicos e biológicos, permitindo uma resposta rápida e eficaz às variações ambientais.

5. CONCLUSÃO

O maior aporte de água neste sistema através das precipitações pluviométricas, como um dos principais impulsionadores das variações na qualidade da água, demonstrou ter um impacto significativo nos parâmetros estudados. Durante o período chuvoso, observou-se um aumento na contribuição de água doce para o estuário, afetando diretamente a salinidade, transparência, oxigênio dissolvido e nutrientes como fosfato e silicato.

Em contrapartida, o período de estiagem caracterizado pela diminuição das chuvas e conseqüentemente menor aporte de água doce, influenciou de maneira distinta os parâmetros da água. Durante esse período, observou-se uma maior estabilidade na salinidade, transparência e concentrações de nutrientes, enquanto o oxigênio dissolvido mostrou-se influenciado pela dinâmica da maré e pela produtividade primária local.

A análise estatística dos dados revelou diferenças sazonais significativas em quase todos os parâmetros avaliados, e diferença espacial apenas para um terço das variáveis. A Análise de Componentes Principais destacou a importância da sazonalidade e da dinâmica da maré na variabilidade dos parâmetros na água. A distribuição espacial dos parâmetros, por sua vez, refletiu a interação entre os diferentes ambientes do estuário, como manguezais, áreas de baía e zonas eólicas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimentos à CAPES pelo suporte através de bolsa de estudo concedida à Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente da UFMA.

Agradecimentos também à FAPEMA e FAPESP pelo financiamento do Projeto de Cooperação Acadêmica FAPEMA-FAPESP, através do Projeto de Pesquisa intitulado: “ESTUDO BIOGEOQUÍMICO E SOCIOAMBIENTAL DE ECOSISTEMAS COSTEIROS - Contribuição para avaliação de sustentabilidade e impacto ambiental - BIOGEOQUIS-ECOS. EDITAL FAPEMA/FAPESP N°14/2020-Cooperação Acadêmica Maranhão-São Paulo; FAPEMA CACD N° 02949/20; FAPESP N° 2020/16485-7.

Agradecimentos ao Laboratório de Biogeoquímica dos Constituintes Químicos da Água (LABCICLOS) da UFMA, ao Laboratório de Estudos em Oceanografia Geológica (LEOG) da UFMA, e ao Laboratório de Biogeoquímica de Nutrientes, Micronutrientes, e Traços nos Oceanos (LABNUT) da USP, pelo apoio na obtenção das amostras e nas análises.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alongi, D. M. (2002). Present state and future of the world's mangrove forests. *Environmental Conservation*, 29(3), 331-349.
- Aminot, A.; Chaussepied, M. *Manuel des analyses chimiques en milieu marin*. CNEXO, Paris, p. 395. 1983.
- Amritha Priya et al. Delineating the fish-based ecosystem services of a small tropical Indian estuary: Identification, evaluation and management. *Estuarine, coastal and shelf science*, v. 293, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108506>.
- APHA. American Public Health Association. *Standard methods for examination of water and wastewater*. 20th ed. Washington, Port City Press. p. 34-38. 2001.
- Barbier, E. B., et al. (2011). The value of estuarine and coastal ecosystem services. *Ecological Monographs*, 81(2), 169-193.
- Barbier, E. B., et al. (2019). The protective service of mangrove ecosystems: A review of valuation methods. *Marine Pollution Bulletin*.

BOLETIM DE PROGNÓSTICO CLIMÁTICO. Instituto Nacional de Meteorologia - INMET. Disponível em: <<https://portal.inmet.gov.br/boletinsprog#>>. Acesso em: 8 jun. 2023.

Braga, E.S. Determinação automática de nitrato. In: WAGENER, A.R.L. & CARREIRA, R. Métodos analíticos de referência em Oceanografia Química. Rio de Janeiro, MMA/SMA. Cap. 6, p. 27-29. 1997a.

Braga, E.S. Determinação automática de nitrito. In: WAGENER, A.R.L. & CARREIRA, R. Métodos analíticos de referência em Oceanografia Química. Rio de Janeiro, MMA/SMA. Cap. 7, p. 31-35. 1997b.

Braga, E.S. Nutrientes dissolvidos e produção primária do fitoplâncton em dois sistemas costeiros do estado de São Paulo. Tese (Doutorado). Instituto Oceanográfico, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP. 2 v. 1995.

Brasil. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n° 357/05 de 17 de março de 2005. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br>>. Acesso em 01 de jun 2023.

Bianchi, T. S. (2007). Biogeochemistry of Estuaries. Oxford University Press.

Birch, G. F.; Gunns, T. J.; Olmos, M. Sediment-bound metals as indicators of anthropogenic change in estuarine environments. Marine Pollution Bulletin, v. 101, n. 1, p. 243–257, dez. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2015.09.056>

Carvalho, Lisandra Maria Da Silva. The Metal Biogeochemistry In Mangrove Sediment In Island Of Maranhão. 2014. 84 f. Dissertação (Mestrado em QUIMICA) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís, 2014.

Castro, A.C.L. 2001. Diversidade da assembleia de peixes em igarapés do estuário do rio Paciência (MA – Brasil). Atlân., 23: 39-46.

Cavalcanti et al. Structure of microphytoplankton community and environmental variables in a macrotidal estuarine complex, São Marcos Bay, Maranhão - Brazil. Brazilian Journal of Oceanography, v. 66, n. 3, p. 283–300, 1 set. 2018. <https://doi.org/10.1590/S1679-87592018021906603>.

Cavalcanti, L. F. et al. Patterns of phytoplankton structure in response to environmental gradients in a macrotidal estuary of the Equatorial Margin (Atlantic coast, Brazil). Estuarine, Coastal and Shelf Science, v. 245, p. 106969, out. 2020.

Day Jr, J. W. et al. Estuarine Ecology. New York: J. Willey.1989. 556 p

- Dittmar, T., & Lara, R. J. (2001). Driving forces behind nutrient and organic matter dynamics in a mangrove tidal creek in North Brazil. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 52(2), 249-259.
- Dzwonkowski, B. et al. Mixing and transport in estuaries and coastal waters a special issue in *Estuarine Coastal and Shelf Science*. *Estuarine, coastal and shelf science*, v. 288, p. 108370–108370, 1 ago. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2023.108370>.
- Elliott, Michael; Whitfield, Alan K. Challenging paradigms in estuarine ecology and management. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, v. 94, n. 4, p. 306-314, 2011.
- Grasshoff, K.; Kremling, K. & Ehrhardt, M. *Methods of Seawater Analysis*. 3 rd ed. Florida: Verlage Chemie: 417 p. 1999.
- Hammer, Ø.; Harper, D. A. T.; Ryan, P. D. Past: Palaeontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaentologia Electronica* 4(1): 9p. 2003.
- IMESC. INSTITUTO MARANHENSE DE ESTUDOS SOCIOECONÔMICOS E CARTOGRÁFICOS: Situação Ambiental da Ilha do Maranhão, São Luís, p 57, 2011.
- Jefery, G. H.; Basset, J.; Mendham, J.; Denney, R. C.; Vogel: *Química analítica quantitativa*. 5 ed. Tradução de Horácio Macedo. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 712 p. 1992
- Jeffrey, S. W. & Humphrey, G. F. New spectrophotometric equations for determining chlorophylls a, b, c1 and c2 in higher plants, algae and natural phytoplankton. *Biochem. Physiol. Pflanz.* n. 2, v. 167, p. 191-194. 1975
- Kennish, M. J. (2002). Environmental threats and environmental future of estuaries. *Environmental Conservation*, 29(1), 78-107.
- Lee, S. Y., et al. (2014). Ecological role and services of tropical mangrove ecosystems: a reassessment. *Global Ecology and Biogeography*, 23(7), 726-743.
- Li, H. et al. Assessment of nutrient and heavy metal contamination in the seawater and sediment of Yalujiang Estuary. *Marine Pollution Bulletin*, v. 117, n. 1-2, p. 499–506, abr. 2017.
- Liu, Guangping et al. Seasonal Variation of Dissolved Oxygen in the Southeast of the Pearl River Estuary. *Water*, [S.l.], v. 12, n. 9, art. 2475, set. 2020. DOI: 10.3390/w12092475. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/w12092475>. Acesso em: 24 maio 2024.
- Lonsdale, J.-A. et al. Managing estuaries under a changing climate: A case study of the Humber Estuary, UK. *Environmental Science & Policy*, v. 134, p. 75–84, 1 ago. 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.04.001>.

- Marín-Vindas, C. et al. Shifts in bacterioplankton community structure between dry and wet seasons in a tropical estuary strongly affected by riverine discharge. *Science of the total environment*, v. 903, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.166104>.
- Nunes, S. et al. Spatio-temporal variation of dinoflagellates in a tropical anthropized estuary in northeastern Brazil. *Regional studies in marine science*, v. 65, p. 103090–103090, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2023.103090>.
- Oliveira, D. R. P. et al. Avaliação do grau de contaminação microbiológica do estuário do Rio Paciência, Estado do Maranhão. *Arquivos de Ciências do Mar, Fortaleza*, v. 45, n. 1, p. 56-61, 2012.
- Pritchard, D. W. What is an estuary, Physical View Point. In: Lauf, G. H. (Ed.) *Estuaries*, American Association for the Advancement of Science. Washington D.C., n. 83, p. 3-5, 1967
- Real, H. et al. Pollution status and ecological risks of metals in surface water of a coastal estuary and health risk assessment for recreational users. *Chemosphere*, v. 348, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2023.140768>.
- Sahoo, S. et al. Assessment of water quality of Netravathi-Gurupur estuary, India through chemometric approach for fisheries sustainability. *Marine pollution bulletin*, v. 200, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2024.116043>.
- Solórzano, L. Determination of ammonia in natural waters by the phenylhypochlorite method. *Limnol. Oceanogr.* n.5, v. 14, p. 799-801. 1969.
- Strickland, J.D.H. & Parsons, T.R. A practical handbook of seawater analysis. *Bull. Fish. Res. Bd Can.* v.169, p. 1-311. 1968.
- Taillardat, P. et al. Respective contribution of urban wastewater and mangroves on nutrient dynamics in a tropical estuary during the monsoon season. *Marine Pollution Bulletin*, v. 160, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111652>.
- Tréguer, P. & Le Corre, P. Manuel d'analyse des sels nutritifs dans l'eau de mer. 2ème éd. Brest, Université de Bretagne Occidentale. 110 p. 1975.
- Twilley, R. R., et al. (1992). The role of mangroves in the carbon and nutrient dynamics of the coastal zone. In: *Coastal and Estuarine Studies* (Vol. 41, pp. 361-369).
- Winkler, L. W. Die Bestimmung des in Wasser gelösten Sauerstoffes. *Berichte der Deutschen Chemischen Gesellschaft*, v. 21, p. 2843–2855. 1888.
- Wolanski, E., & Elliott, M. (2015). *Estuarine Ecohydrology: An Introduction*. Elsevier
- Wood, E.D.; Armstrong, F.A.; Richards, F.A. Determination of nitrate in seawater by cadmium-cooper reduction nitrite. *Jour. Mar. Biol. Ass. U. K.*, v. 47, p. 23-31. 1967.

Yu, G. et al. Evaluation of coastal zone development and utilization considering natural ontology, a case study in Liaoning Province, China. *Ocean & coastal management*, v. 250, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.ocecoaman.2024.107027>.

III. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Além do artigo apresentado, esse estudo tem como objetivo a produção de mais trabalhos, com o objetivo de avaliar a matriz sedimentar desse ambiente, a interação entre a matriz aquática e a matriz sedimentar, bem como suas interações com a biota, além da comparação temporal com trabalhos pretéritos já realizados.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- CASTRO, R M.S.; PEREIRA, E.D. Análise geoambiental da porção superior da Bacia do Rio Paciência: subsídio para o planejamento ambiental. São Luís-MA. XVIII Encontro Nacional de Geógrafos. Departamento de Geociências/Universidade Federal do Maranhão p, 7-10, Disponível em: <http://www.eng2016.agb.org.br/resources/anais/7/1468878227_ARQUIVO_TRABALHO_OENG_SLZRENATAC.pdf>. Acesso em 19 jun, 2022.
- FEITOSA, A. C.; TROVÃO, J. R. **Atlas Escolar do Maranhão: espaço geo-histórico e cultural**. João Pessoa, Grafset, 2006.
- FIALHO, L.C.V. 2002. **Diagnóstico da pesca na praia da Raposa**. São Luís. Monografia do curso de Ciências Biológicas da Universidade Federal do Maranhão. 43p
- FERREIRA, I. S. et al. O Município de Raposa–MA: do abandono ambiental as perspectivas de crescimento econômico e turístico. In: **VII Congresso Brasileiro de Geógrafos**, Vitória/ES. 2014.
- FRANCO, I.; ARAÚJO, A.R.; FRANKE, C.R. Aspectos Socioambientais da Aquicultura na Região do Baixo São Francisco, Sergipe, Brasil. *Revista Meio Ambiente e Sustentabilidade*, Paraná-PR. Volume 14, número 7, p. 1-20, jan/jun - 2018. Disponível em: <<file:///C:/Users/Cliente/Downloads/824-Texto%20do%20artigo-2370-2-10-20190801.pdf>> Acesso em: 19. Jun, 2022.
- FSADU – Fundação Sôsândrade de Apoio ao Desenvolvimento da UFMA, 2007. Subsídio para o planejamento e manejo da Bacia do Rio Paciência, Ilha de São Luís-MA. Relatório Técnico Final.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ma/raposa/panorama>>. Acesso em: 25 jul. 2022.
- RABELO, Thiara Oliveira. Geoconservação e risco de degradação em ambientes costeiros: uma proposta de avaliação do geopatrimônio costeiro dos municípios de Raposa-MA e Galinhos-RN, Brasil. Orientador: Zuleide Maria Carvalho Lima. 2022. 236f. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022.
- REBELO-MOCHEL, F. Relatório Técnico. **Programa integrado dos manguezais maranhenses**. Sub-projeto mapeamento temático. São Luís. 1996.
- RIBEIRO, L. F.; SOUZA, M. M.; BARROS, F.; HATJE, V. Desafios da carcinicultura: aspectos legais, impactos ambientais e alternativas mitigadoras. *Revista de Gestão Costeira Integrada*, v.14, n.3, p.365-383, 2014.
- RMS – Revista Metropolitana de Sustentabilidade Volume 2, número 2 – 2012 ISSN: 2318-3233 Editor Científico: Angelo Palmisano Avaliação: Melhores práticas editoriais da ANPAD Endereço: <http://www.revistaseletronicas.fmu.br/> Acesso em 19. Jun, 2022.
- SANTOS, J. J. S.; TERCEIRO, A. M.; YAURI, W. L. M. Dinâmica da População de Anomalocardia brasiliana (Mollusca, Bivalvia, Veneridae) no Estuário do Rio Paciência, no Município da Raposa, Estado do Maranhão. **Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ**, v. 37_1, n. 1, p. 61–69, 9 abr. 2014.
- SANTOS, Nágela Gardênia Rodrigues dos. A comunidade fitoplanctônica como bioindicadora da qualidade da água para a saúde pública e ambiental: o caso da Costa Norte do Município de Raposa - Maranhão. 2018. 113f. Dissertação (Programa de Pós-Graduação em Saúde e Ambiente/CCBS) - Universidade Federal do Maranhão, São Luís.
- SANTOS, P. V. C. J., et al. Perfil socioeconômico de pescadores do município da Raposa, estado do Maranhão. **Revista Brasileira de Engenharia de Pesca** 6(1): I-XIV, 2011.

SILVA, Luciney de Jesus Costa da. THE STATE AS ENVIRONMENTAL INDICATOR IN QUALITY OF LIFE POPULATION: an analysis of the health and environment in the urban center of municipality of Raposa, Maranhão, Brazil. 2008. 169 f. Dissertação (Mestrado em SAÚDE E MEIO AMBIENTE) - Universidade Federal do Maranhão, São Luis, 2008.

SILVA JUNIOR, M. G. et al. **Caracterização da ictiofauna em três canais de maré do estuário do Rio Paciência, Ilha de São Luís, Estado do Maranhão.** Arquivos de Ciências do Mar. Fortaleza, v. 46, n. 1, p. 5-21, 2013.

APÊNDICES

Artigo 1: HIDROBIOQUÍMICA AMBIENTAL DE UM SISTEMA ESTUARINO DA MARGEM EQUATORIAL, MARANHÃO-BRASIL	
Revista	Revista Brasileira de Ciências Ambientais
ISSN	2176-9478
DOI	10.5327
Fator de impacto	3.229
Meio de divulgação	Online
Periodicidade	Fluxo contínuo, com um único volume anual
Site	Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)
Diretrizes para autores	Informação para Autores Revista Brasileira de Ciências Ambientais (RBCIAMB)
Qualis CAPES 2014	A3 na área de Ciências Ambientais
Indexadores	Web of Science, Google Acadêmico, Qualis, DOAJ, ERIHPLUS, Norwegian Register, NPI, Sherpa Romeo, REDIB, Latindex, Miar, LatinREV, Sumarios.org