



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº xxx

**Avaliação das influências espaço-temporais e de maré nas
concentrações de metais em água e sedimentos estuarinos no
entorno de um polo industrial amazônico**

Dissertação apresentada por:

JOHNATA AZEVEDO FERREIRA

ORIENTADO POR: Prof^a. Dr^a. Lílian Lund Amado

**BELÉM – PARÁ
2025**



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM OCEANOGRAFIA**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO Nº xxx

**Avaliação das influências espaço-temporais e de maré nas
concentrações de metais em água e sedimentos estuarinos no
entorno de um polo industrial amazônico**

Dissertação apresentada por:

JOHNATA AZEVEDO FERREIRA

ORIENTADO POR: Prof^a. Dr^a. Lílian Lund Amado

**BELÉM – PARÁ
2025**

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP) de acordo com ISBD
Sistema de Bibliotecas da Universidade Federal do Pará
Gerada automaticamente pelo módulo Ficat, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F383a Ferreira, Johnata Azevedo.
Avaliação das influências espaço-temporais e de maré nas
concentrações de metais em água e sedimentos estuarinos no
entorno de um polo industrial amazônico / Johnata Azevedo
Ferreira, . — 2025.
xxii,100 f. : il. color.

Orientador(a): Prof^ª. Dra. Lílian Lund Amado
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Pará,
Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Ambientais, Belém, 2025.

1. Poluição urbana e industrial. 2. Compartimentos
abióticos. 3. Formação Barreiras. 4. Amazônia. I. Título.

CDD 551.908115



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
OCEANOGRAFIA

**Avaliação das influências espaço-temporais e de maré nas
concentrações de metais em água e sedimentos estuarinos no
entorno de um polo industrial amazônico**

Dissertação apresentada por

JOHNATA AZEVEDO FERREIRA

Como requisito parcial à obtenção do Grau de Mestre em Oceanografia na Área de
SISTEMAS COSTEIROS E OCEÂNICOS e Linha de pesquisa AVALIAÇÃO E
GESTÃO DE RECURSOS HIDRICOS

Data de Aprovação: 25 / 04 / 2025

Banca Examinadora:

Documento assinado digitalmente
gov.br LILIAN LUND AMADO
Data: 23/06/2025 17:49:43-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr.^a Lílian Lund Amado
(Orientador – UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEANDRO MACHADO DE CARVALHO
Data: 23/06/2025 15:26:58-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Leandro Machado De Carvalho
(Membro - UFSM)

Documento assinado digitalmente
gov.br SILVIA KEIKO KAWAKAMI
Data: 23/06/2025 13:07:52-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Silvia Keiko Kawakami
(Membro - PPGOC/UFPA)

Documento assinado digitalmente
gov.br LEILANHE ALMEIDA RANIERI
Data: 23/06/2025 12:53:24-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Dra. Leilanhe Almeida Ranieri
(Membro - PPGOC/UFPA)

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, a Deus, por todas as conquistas que Ele tem me proporcionado ao longo dessa jornada.

À minha família, meu mais sincero agradecimento — especialmente à minha mãe, Estela, ao meu pai, Valdenor, e ao meu irmão, Paulo Victor — pelo apoio incondicional durante todo o período do curso.

Sou profundamente grato ao Rafael Anaice e à Carol Montes, pela valiosa contribuição na interpretação e análise dos dados.

À minha orientadora, Profa. Lilian Lund, agradeço por me acolher em seu grupo de pesquisa (BIOPAQ) e por todo o suporte e parceria ao longo desses 12 anos de trabalho. Sou especialmente grato pelos ensinamentos, conselhos firmes e pela imensa paciência que sempre demonstrou. Estendo meus agradecimentos a todo o grupo — Carla, Sarita, Mara, Ruy, Letícia e Pedro — pelo apoio durante a preparação para a defesa.

Aos colegas da turma de 2023 do Programa de Pós-Graduação, meu muito obrigado pela convivência e troca de experiências.

Ao Prof. Leandro Machado, agradeço pela realização das análises de metais, fundamentais para este trabalho.

À equipe do Laboratório de Oceanografia Física e ao LAPMAR, registro minha gratidão pela assistência nas coletas, na análise dos dados físicos e pelo suporte contínuo durante as atividades de campo.

Por fim, agradeço aos professores e ao PPGOC, pelo comprometimento e dedicação ao desenvolvimento da ciência na Amazônia. Sou privilegiado por ter feito parte dessa trajetória.

RESUMO

O estuário do rio Pará é formado pelo rio Tocantins e afluentes de pequenas contribuições como os rios Guamá e Capim. O estuário é um importante ecossistema por servir de abrigo e reprodução para diversas espécies de peixes além de ser responsável pela reciclagem de nutrientes para o meio aquático. Entretanto, esse ambiente sofre constantemente descargas de efluentes de origem doméstica e industrial. O município de Barcarena, região estuarina do estado do Pará, localizado a 40 km de distância da capital (Belém) é um local de grande importância econômica para o estado, possuindo um polo industrial no setor de alumínio, caulim e siderurgia. O presente estudo tem por objetivo a caracterização da variação espaço-temporal de metais e metaloide em água superficial (frações total, dissolvida e particulada) e sedimento superficial (fração total) em pontos sob distintos níveis de influência urbano-industrial no município de Barcarena, PA. Foram coletadas amostras de água e sedimento no estuário do rio Pará em diferentes períodos sazonais nos anos de 2023 períodos (I- Transicional, II – Chuvoso, III – transicional, IV - Estiagem) e 2024 (V – Chuvoso, e VI – Estiagem). Durante o período de coleta, foram observados diferentes fenômenos climáticos relacionados ao El Niño-Southern Oscillation (ENSO). O ano de 2023 foi marcado pela ocorrência do La Niña, enquanto em 2024 ocorreu o El Niño. As coletas para obtenção de dados químicos de águas e sedimentos foram realizadas em triplicata, na maré enchente e na vazante em pontos com diferentes proximidades do polo urbano-industrial de Barcarena. Foram analisadas as concentrações de 10 metais (Al, Ba, Cd, Fe, Pb, Mn, Ni, Cr, As e Hg), na água (fração total, particulada e dissolvida) e em sedimentos (fração total) através da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica com atomização em Chama, Forno de Grafite, Vapor Frio de Mercúrio e Geração de Hidretos. Os resultados obtidos demonstraram ausência de diferenças significativas nas concentrações dos metais entre as marés (enchente e vazante) nos pontos amostrados. Em relação às concentrações de metais nas matrizes ambientais (água e sedimento) em todos os pontos analisados, os metais Al, Fe, Mn e Ba apresentaram as maiores concentrações. Esse resultado já era esperado, pois esses elementos possuem altas concentrações na formação geológica da região (Formação Barreiras). Apesar de a região de Barcarena apresentar grandes concentrações de metais, esse padrão reflete fortemente geologia local. No entanto, fatores de natureza antropogênica também podem estar contribuindo para o aporte de metais potencialmente tóxicos na região. Esse fato pode ser observado nos pontos do Rio Murucupi (RM) e porto de Vila do Conde (VC). Ambas as localidades apresentam baixo

saneamento básico, recebendo efluentes de origem doméstica e lixões. Esses resíduos acabam liberando metais e metaloides, como Pb, Hg e As, para a água e o sedimento. Esses elementos são frequentemente associados a efluentes de origem doméstica, descarte inadequado de resíduos sólidos e lixões. Nossos resultados também demonstram importantes conclusões sobre a influência do ENSO (El Niño e La Niña) na distribuição e no comportamento dos metais na região amazônica de estudo. As maiores concentrações de metais, tanto na água quanto no sedimento, foram encontradas durante o período de El Niño em comparação com La Niña. Assim, concluímos que estudos de avaliação ambiental na Amazônia, especialmente os que envolvem o monitoramento de metais em distintos compartimentos ambientais, devem levar em consideração o aporte natural destes elementos nos compartimentos abióticos para que se possa pontuar os potenciais contaminações advindas de atividades antrópicas como urbanização e industrialização.

Palavras-chave: poluição urbana e industrial; compartimentos abióticos; Formação Barreiras; Amazônia.

ABASTRAT

Formed by the Tocantins River and smaller tributaries such as the Guamá and Capim rivers, the Pará River Estuary is an important ecosystem, serving as a shelter and reproduction site for many fish species and contributing to nutrient recycling in the aquatic environment. However, this area suffers from constant discharges of domestic and industrial effluents. The town of Barcarena, located in Pará and approximately 40 km from the state capital (Belém), plays a significant role in the state's economy by hosting an industrial hub focused on the aluminum, kaolin, and steel industries. This study aims to characterize the temporal and spatial variation in the presence of metals and metalloids in both surface water (total, dissolved, and particulate fractions) and sediment across various points with differing levels of urban and industrial influence in Barcarena, PA. Water and sediment samples were collected during different seasonal periods throughout 2023 and 2024. During the sampling period, several phenomena were observed, particularly those related to the El Niño–Southern Oscillation (ENSO). The year 2023 was marked by the occurrence of La Niña, while 2024 was characterized by El Niño conditions. Sampling was performed in triplicate during both low and high tides at each site. Ten different metals (Al, Ba, Cd, Fe, Pb, Mn, Ni, Cr, As, and Hg) were analyzed in both water and sediment samples using Atomic Absorption Spectrometry with Flame Atomization, Graphite Furnace, Cold Vapor Mercury, and Hydride Generation techniques. The results showed no statistically significant differences between the different tidal conditions (high and low tide). Overall, the metals that exhibited higher concentrations across the sites were Al, Fe, Mn, and Ba, in both environmental matrices. This outcome was expected, as these elements naturally occur at high concentrations in the area's geological formation (Barreiras Formation). Although the region presented high metal concentrations, this pattern is most likely related to the local geology. However, anthropogenic factors may also contribute to elevated metal levels, as observed at certain highly impacted sites characterized by poor basic sanitation and direct discharge of domestic effluents and contamination from open-air dumps. These residues ultimately become sources of metal and metalloid input into the environment, especially for elements such as Pb, Hg, and As, in both water and sediment. These elements are often associated with domestic sewage, improper solid waste disposal, and open dumpsites. Our results also highlight important conclusions regarding the influence of ENSO on

metal distribution in water and sediment in the Amazon region. Higher metal concentrations in both water and sediment were observed during the El Niño period compared to the La Niña period. Therefore, we conclude that environmental assessments in the Amazon region especially those involving metal monitoring in environmental matrices, should carefully consider the natural background input of these elements into abiotic compartments in order to accurately identify potential contamination arising from anthropogenic activities such as urbanization and industrialization.

Keywords: urban and industrial pollution; abiotic compartments; Barreiras Formation, Amazon.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 1 - Processo Bayer usado para a extração da alumina (Al_2O_3) matéria-prima para obtenção do alumínio (Al). Fonte: Silva Filho *et al.* (2007). 25
- Figura 2 - Processo de extração e beneficiamento do caulim. fonte: Luz *et al.* (2008). 27
- Figura 3 - Localização dos pontos de coleta no município de Barcarena - PA. Foram realizadas coletas em 10 pontos: rio Arienga (AR1- ponto a jusante e AR2 – ponto a montante); Vila do Conde (VC); rio Murucupi (RM1 – ponto de área de comunidade; RM2 – ponto dentro do complexo industrial), rio Barcarena (RB1- ponto a jusante e RB2 – ponto a montante); rio Itaporanga (RI1- ponto a jusante e RI2 – ponto a montante) e Igarapé Tauá (IT) 34
- Figura 4 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de alumínio (Al) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 43
- Figura 5 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de ferro (Fe) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem ,La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem ,El Niño), expressa em porcentagem, Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 46
- Figura 6 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de manganês (Mn) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional,La Niña; II – Chuvoso,La Niña; III – transicional,La Niña; IV – Estiagem ,La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem ,El Niño),expressa em porcentagem, Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 49

- Figura 7 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de bário (Ba) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem..... 51
- Figura 8 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de níquel (Ni) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem..... 52
- Figura 9 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de chumbo (Pb) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional,La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem..... 54
- Figura 10 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de cromo (Cr) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem..... 56
- Figura 11 – “ Donut pie chart” apresenta a concentração de cádmio (Cd) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional (La Niña); II – Chuvoso (La Niña); III – transicional (La Niña); IV – Seco (La Niña); V – Chuvoso (El Niño) a VI – Seco (El Niño)), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem..... 58

- Figura 12 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de mercúrio (Hg) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 60
- Figura 13 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de arsênio (As) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 62
- Figura 14 - Análise de componentes principais (PCA) de metais presentes no sedimento. A análise revelou duas componentes principais que explicam mais de 70% da variância acumulada, fornecendo insights valiosos sobre as relações entre os metais e seus impactos ao longo de diferentes períodos..... 64
- Figura 15 - Gráfico de ordenação de análise de redundância (RDA) ilustrando os principais fatores determinantes (após a eliminação de variáveis menos importantes) nos diferentes períodos de coleta. O modelo RDA caracterizou as diferenças dos clusters periódicos, revelando detalhes das concentrações dos diferentes metais em sedimento nos diferentes pontos. O teste de Monte Carlo dos eixos gerados da RDA foi significativo ($p = 0,005$). 65
- Figura 16 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Al na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 68

- Figura 17 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Fe na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 70
- Figura 18 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Mn na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 73
- Figura 19 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Ba na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 75
- Figura 20 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Pb na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 77

- Figura 21 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Cd na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 79
- Figura 22 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Cr na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional,La Niña; II – Chuvoso,La Niña; III – transicional,La Niña; IV – Estiagem ,La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem ,El Niño), expressa em porcentagem, Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem. 81
- Figura 23 - Análise de componentes principais (PCA) de metais presentes na água: fração total (A), dissolvida (B) e particulada (C) . A análise revelou duas componentes principais que explicam mais de 70% da variância acumulada, fornecendo insights valiosos sobre as relações entre os metais e seus impactos ao longo de diferentes períodos. 83

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1 – Valor da produção mineral comercializadas dos estados brasileiros..... 5
- Tabela 2 - Valores de Transporte residual ($m^3 \cdot s^{-1}$) obtidos para todos os períodos de aquisição de dados de corrente e fluxo de volume. períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño)..... 23
- Tabela 3 - Valores de Transporte residual de massa ($kg \cdot s^{-1}$) obtidos para todos os períodos de aquisição de dados de corrente e MPS. Locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). 23
- Tabela 4 - Concentração alumínio (Al) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 25
- Tabela 5 - Concentração ferro (Fe) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 28
- Tabela 6 - Concentração manganês (Mn) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 31
- Tabela 7 - Concentração bário (Ba) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio

padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 33

Tabela 8 - Concentração níquel (Ni) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 34

Tabela 9 - Concentração chumbo (Pb) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam ‘*’ somente uma réplica apresentou acima do limite de detecção. 36

Tabela 10 - Concentração cromo (Cr) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 38

Tabela 11 - Concentração cádmio (Cd) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 39

Tabela 12 - Concentração mercúrio (Hg) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 40

- Tabela 13 - Concentração arsênio (As) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 42
- Tabela 14 - Concentração de alumínio (Al) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 48
- Tabela 15 - Concentração de ferro (Fe) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 50
- Tabela 16 - Concentração de manganês (Mn) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 53
- Tabela 17 - Concentração de bário (Ba) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 55

- Tabela 18 - Concentração de chumbo (Pb) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 57
- Tabela 19 - Concentração de cádmio (Cd) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 59
- Tabela 20 - Concentração de cromo (Cr) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção. 60
- Tabela 21 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período I. Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Condut (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado... 95
- Tabela 22 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período II (abril/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Condut (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado. 96
- Tabela 23 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período III (julho/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade

- (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado. 96
- Tabela 24 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período IV (outubro/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniônico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado. 97
- Tabela 25 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período V. Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniônico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado... 97
- Tabela 26 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período transicional II (julho 2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniônico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado. 98

LISTA DE ABREVIATURAS

ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental

Al - Alumínio

ALBRÁS - Alumínio Brasileiro S/A

As - Arsênio

Ba - Bário

Ca - Cálcio

Cd - Cádmio

Cr - Cromo

Cu - Cobre

Fe - Ferro

IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

IBRAM - Instituto Brasileiro de Mineração

K - Potássio

Mg - Magnésio

Na - Sódio

Nd - Neodímio

Ni - Níquel

Pb - Chumbo

Ph - Potencial hidrogeniônico

ppb - Partes por bilhão

ppm - Partes por milhão

Si - Silício

SIMINERAL - Sindicato das Indústrias Mineraias do Estado do Pará

Sr - Estrôncio

Th - Tório

Ti - Titânio

U - Urânio

V - Vanádio

Zn - Zinco

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS	iv
RESUMO	v
ABASTRAT	vii
LISTA DE ILUSTRAÇÕES	ix
LISTA DE TABELAS	xiv
LISTA DE ABREVIATURAS	xix
1 INTRODUÇÃO	2
2 REFERENCIAL TEÓRICO	3
2.1 A PRESENÇA DE METAIS NO AMBIENTE AQUÁTICO: AÇÃO ANTRÓPICA E GEOLÓGICOS	3
2.2 Atividade industrial no Pará: a importância da mineração	4
2.3 Exploração de alumínio na região amazônica	7
2.4 Exploração de caulim na região amazônica.....	9
2.5 O saneamento básico no município do polo industrial amazônico.....	11
3 HIPÓTESES	14
4 OBJETIVOS	16
4.1 OBJETOS GERAIS	16
4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	16
5 MATERIAL E MÉTODOS	17
5.1 ÁREA DE ESTUDO.....	17
5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS.....	18
5.2.1 Rio Barcarena (RB1 -48.657000 -1.530000; RB2 -48.682179 -1.571834)	18
5.2.2 Igarapé Tauá (-48.685397 -1.558208).....	18
5.2.3 Rio Itaporanga (RI1 -48.643005 -1.555008; RI2 -48.627723 -1.608508)	18
5.2.4 Rio Arienga (AR1 -48.782626 -1.602266; AR2 -48.779724 -1.605223) 18	

5.2.5 Rio Murucupi (RM1 -48.670361 -1.511849; RM2 -48.724774 -1.541550;)	18
.....	18
5.2.6 Vila do Conde (-48.764000 -1.572000).....	18
5.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS	18
5.4 CAMPO DE VELOCIDADE DAS CORRENTES	18
5.5 COLETA DE DADOS QUÍMICOS	20
5.6 ANÁLISE DE METAIS	21
5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS	21
5.7.1 Análise das componentes principais (PCA)	21
5.7.2 Análises de redundância (RDA)	22
5.7.3 Análise Donut pie chart	22
6 RESULTADOS	23
6.1 TRANSPORTE RESIDUAL ($M^3.S^{-1}$).....	23
6.2 INFLUÊNCIA DAS MARÉS (ENCHENTE/VAZANTE) NA CONCENTRAÇÃO DE METAIS NOS SEDIMENTOS SUPERFICIAIS	24
6.3 SEDIMENTO SUPERFICIAL	24
6.3.1 Variação espaço-temporal dos metais nos sedimentos superficiais	24
<i>6.3.1.1 Alumínio (Al)</i>	24
<i>6.3.1.2 Ferro (Fe)</i>	27
<i>6.3.1.3 Manganês (Mn)</i>	30
<i>6.3.1.4 Bário (Ba)</i>	32
<i>6.3.1.5 Níquel (Ni)</i>	34
<i>6.3.1.6 Chumbo (Pb)</i>	36
<i>6.3.1.7 Cromo (Cr)</i>	37
<i>6.3.1.8 Cádmio (Cd)</i>	39
<i>6.3.1.9 Mercúrio (Hg)</i>	40
<i>6.3.1.10 Arsênio (As)</i>	42

6.3.1.11 <i>Análise das componentes principais (PCA)</i>	44
6.3.1.12 <i>Análises de redundância (RDA)</i>	45
6.4 ÁGUA SUPERFICIAL	47
6.4.1 Variação espaço-temporal dos metais nas águas superficiais	47
6.4.1.1 <i>Alumínio (Al)</i>	47
6.4.1.2 <i>Ferro (Fe)</i>	49
6.4.1.3 <i>Manganês (Mn)</i>	51
6.4.1.4 <i>Bário (Ba)</i>	54
6.4.1.5 <i>Chumbo (Pb)</i>	57
6.4.1.6 <i>Cádmio (Cd)</i>	58
6.4.1.7 <i>Cromo (Cr)</i>	60
6.4.1.8 <i>Análise das componentes principais (PCA)</i>	62
7 DISCUSSÃO	67
7.1 MARÉ X SAZONALIDADE	67
7.2 SEDIMENTO SUPERFICIAL	69
7.3 ÁGUA SUPERFICIAL	74
7.4 DINÂMICA DOS METAIS (ÁGUA, SEDIMENTO E A BIODISPONIBILIDADE)	77
8 CONCLUSÃO	79
REFERÊNCIAS	81
APÊNDICE A ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONCENTRAÇÕES DE METAIS DURANTE A ENCHENTE E VAZANTE	93
APÊNDICE B - PARÂMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS	95

1 INTRODUÇÃO

A Zona Costeira Brasileira (ZCB) abrange uma extensão de aproximadamente 8.500 km, estendendo-se por 17 estados e mais de 400 municípios (Meira, 2016). A ZCB é subdividida em quatro macrozonas: Norte, Nordeste, Sudeste e Sul (Brasil 2024). A zona costeira amazônica, situada na região Norte, representa cerca de 35% da extensão total da ZCB (Szlafsztein 2012). Esta região abriga uma diversidade de ecossistemas de alta relevância ambiental, incluindo praias, planícies de maré, pântanos salinos e de água doce, e estuários (Pereira *et al.* 2009).

Estuários são definidos como corpos d'água costeiros, semi-confinados, com conexão livre ao oceano (Pritchard 1967). O estuário do rio Pará, um sistema hídrico de significativa importância na zona costeira amazônica, é formado pela confluência do rio Tocantins e afluentes de menor porte, como os rios Guamá e Capim (Rosário *et al.* 2016). Além dos rios, a região estuarina amazônica é caracterizada pela presença de igarapés em sua porção continental interna. Igarapés são cursos d'água de menor ordem, com leito bem definido, correnteza de velocidade moderada e baixa temperatura (Corrêa *et al.* 2012). A porção média e superior desses cursos d'água são tipicamente cobertas por florestas ripárias, e o leito apresenta acúmulo de material lenhoso, como troncos e galhos (Corrêa *et al.* 2012).

O ambiente estuarino tem grande importância ecológica, por servir de abrigo para a reprodução e crescimento de muitos organismos de interesse comercial e para a reciclagem de nutrientes além de ser local de produção e reciclagem da matéria orgânica possibilitando um solo mais fértil (Bianchi 2007). Além disso, tem relevância social por ser um ambiente muito valorizados na prática de esportes, recreação, educação, pesquisas acadêmicas (Harris *et al.* 2016) e subsistência de comunidades tradicionais que vivem de pesca, artesanato, agricultura (Sassi & Costa 2005, Gomes *et al.* 2020). Os estuários também são alvos de grande interesse econômico por serem locais de considerável importância entre o continente e o oceano, servindo de acesso para o interior da região continental, e oferecendo locais adequados para instalação de portos voltados ao escoamento da produção agrícola, portuária e da mineração (Harris *et al.* 2016).

A complexidade dos estuários vai além dos aspectos ecológicos, sociais e econômicos, sendo também profundamente influenciada pelas características geológicas

da região. A composição dos sedimentos e a dinâmica dos solos desempenham um papel essencial na estabilidade desses ecossistemas, afetando sua composição e, com isso, a biodiversidade. Nesse contexto, a formação geológica Barreiras se destaca como um dos principais depósitos sedimentares da zona costeira brasileira.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 A PRESENÇA DE METAIS NO AMBIENTE AQUÁTICO: AÇÃO ANTRÓPICA E GEOLÓGICOS

A Formação Barreiras é um depósito sedimentar (do terciário superior) que ocorre ao longo da região costeira do país se estendendo desde a região amazônica até o estado do Rio de Janeiro (de Araújo *et al.* 2006, Nunes *et al.* 2011). A Formação Barreiras apresenta grandes concentrações de SiO_2 e Al_2O_3 , em comparação com Fe_2O_3 . A presença desses compostos reflete as características típicas dos solos que compõem essa formação, onde os minerais goethita e caulinita são frequentemente encontrados. A fração arenosa é predominantemente composta por quartzo. O município de Barcarena tem como formação dominante o Barreiras. A formação barreiras é constituído por arenito, siltitos e argilitos (Castro *et al.* 2014). Já a Formação Pirabas (Mioceno Inferior) está localizada na região litorânea dos estados do Pará, Maranhão e Piauí, onde ocorre na faixa litorânea, porém não se estende continuamente sendo composta predominantemente por rochas carbonáticas (Neto & Alvares 2010). Na região de Barcarena, não há registro de ocorrência da Formação Pirabas até profundidades superiores a 150 m (Castro *et al.* 2014).

A presença de metais no ambiente estuarino ocorre de forma natural e os metais naturalmente encontrados são ditados pela formação geológica local. Neste contexto, a lixiviação e a erosão do solo podem ser consideradas como fontes naturais de metais para o ambiente aquático (Perina *et al.* 2020). Embora a presença de metais no ambiente estuarino possa ocorrer naturalmente devido à formação geológica e aos processos de lixiviação e erosão, a influência antrópica tem intensificado significativamente a introdução e/ou mobilização desses elementos nos ecossistemas aquáticos. O sistema aquático também sofre com grande influência da atividade antrópica produzida em seu entorno e/ou vizinhança (Buss *et al.* 2002), recebendo constantemente efluentes de origem industrial e doméstica (Chapman 2001; Akaishi *et al.* 2007), deposição atmosférica, rejeitos agrícolas (pesticidas) e de atividades de mineração (Thrush *et al.* 2013).

Na região amazônica, durante o período de maior pluviosidade, ocorre o retrabalhamento dos sedimentos de fundo e a lixiviação de áreas em torno, o que acaba

liberando contaminantes (Brinkmann *et al.* 2013; Zheng *et al.* 2012), alterando a concentrações dos metais presentes na água e no sedimento. As flutuações de parâmetros físico-químicos juntamente com processos físicos como ressuspensão do sedimento de fundo, são fatores muito importantes, que podem afetar diretamente a concentração de contaminantes na água e no sedimento (Perina *et al.* 2020).

Em estudos recentes na região de Barcarena, esta pesquisa foi pioneira na avaliação ecotoxicológica envolvendo abordagem em 3 matrizes interligadas: avaliação meio abiótico (água e sedimento), avaliação da contaminação por metais no meio biótico (invertebrados, animais e plantas) e efeitos adversos primários (análise de biomarcadores bioquímicos). Com base nos resultados obtidos, foi possível determinar, que os metais (água e sedimento) demonstraram comportamento de distribuição e variações de suas concentrações de maneira semelhante em todos os pontos, durante diferentes estações do ano. E, apesar da região de Barcarena possuir muitas indústrias, as contribuições de metais de origem natural têm maior força do que a atividade do polo industrial, o que foi demonstrado pela ausência de diferenças estatísticas nas concentrações de metais em locais com distintos níveis de influência antrópica. Em relação as análises de biomarcadores em conjunto com as análises de metais, foi observado baixa concentração de metais nos tecidos dos organismos, acompanhando por um baixo efeito em nível molecular.

2.2 ATIVIDADE INDUSTRIAL NO PARÁ: A IMPORTÂNCIA DA MINERAÇÃO

O estado do Pará é detentor de grandes reservas minerais, sendo responsável por mais de 46% da produção mineral em todo o país (Tabela 1). O Pará é considerado o principal produtor e beneficiador de minérios. O estado possui grandes reservas de minérios de ferro, bauxita, cobre e caulim, além de ser grande explorador de manganês, níquel, calcário, ouro, gemas e minérios para uso na construção civil (Pará, 2020). Os principais municípios exploradores são Parauapebas e Canaã dos Carajás apresentando uma maior arrecadação da Compensação Financeira pela exploração de Recursos Minerais (CFEM) em todo o Brasil (Pará, 2020). O CFEM é uma receita paga pelas empresas mineradoras à União, aos Estados, Distrito Federal e Municípios pela utilização dos recursos minerais presentes nos seus respectivos territórios (Silva & Silvia, 2010). O motivo primordial, que torna o estado do Pará um grande produtor mineral está relacionado a sua unidade geológica conhecida como Barreiras.

Tabela 1 – Valor da produção mineral comercializadas dos estados brasileiros.

Unidade da Federação	Valor (R\$)	Participação (%)
Brasil	312.916.142.439	
Pará	145.957.483.760	46,64
Minas Gerais	129.776.411.960	41,47
Espírito Santo	9.030.644.539	2,89
Goiás	8.590.761.465	2,74
Bahia	7.376.658.607	2,36
Mato Grosso	5.121.891.325	1,64
Mato Grosso do Sul	2.398.660.303	0,76
Rondônia	1.513.591.856	0,48
Maranhão	1.279.169.450	0,41
Amapá	943.042.688	0,31
Amazonas	511.126.633	0,16
Tocantins	134.797.004	0,04
Alagoas	104.392.866	0,03
Paraná	98.435.566	0,03
São Paulo	49.631.963	0,02
Ceará	29.474.882	0,02

Fonte: Anuário Mineral Brasileiro (2021).

O processo de instalação de grandes empresas de mineração no Pará começou por volta da década de 60 com a descoberta da maior reserva de ferro do mundo, conhecida como Província Mineral de Carajás (Monteiro 2005). Essa descoberta impulsionou o processo de ocupação da região amazônica durante o governo militar, com a criação do Programa Grande Carajás (PGC), que iniciou na década de 70 com o objetivo de promover o crescimento econômico e social da região através da exploração dos recursos minerais (Monteiro 2005). Entretanto, o PGC não passou de uma tentativa de coordenar e concentrar recursos minerais para o Estado, com os projetos já existentes na região amazônica (Ferro Carajás, a Albras, a Alunorte, a Alumar e a Usina de Tucuruí), pois a região amazônica era vista como área estratégica pelo governo militar devido a sua grande reserva mineral (Monteiro 2005). Um dos principais objetivos do PGC foi a implementação de empresas voltadas para a exploração e beneficiamento de Alumínio e Alumina (Monteiro 2005).

Em 1985, iniciou-se operação no município de Barcarena da Alumínio Brasileiro S.A (ALBRAS) (Monteiro 2005), empresa de capital misto fundada pela antiga

Companhia Vale do Rio Doce (atualmente Vale) com a Nippon Amazon Aluminium. Em 2011, a Hydro comprou a participação acionária da Vale tomando o controle acionário e a propriedade da Albras, controlado 51% da empresa (Malheiro 2010). Antes da Albras, Barcarena dependia exclusivamente da pesca, agricultura e de uma economia familiar de subsistência (Barros 2007, Nahum, 2006). Após a instalação, a Albras trouxe um grande avanço econômico para cidade de Barcarena impulsionado o comércio da região e outros setores, como o siderúrgico, e estimulando a implementação de outros grandes projetos na região. Consequentemente, houve aumento da oferta de emprego, estimulando serviços, comércio e infraestrutura e beneficiando tanto a comunidade residente como a empresa.

Assim, Barcarena passou a ser um município conhecido pelo seu grande polo industrial.

A sua localização estratégica e privilegiada serve como entrada e escoamento de muitos produtos e/ou matéria primas como: grãos, mineiros, alumínio, Caulim, fertilizantes, entre outros produtos. O município não é somente conhecido pela sua grande produção de Alumina e Alumínio, mas também pela sua grande capacidade no beneficiamento de caulim. O processo de beneficiamento do caulim é realizado pela indústria Imerys que recebe o minério de caulim (explorado em Ipixuna do Pará). A Imerys fornece esse material principalmente para o mercado externo, sendo utilizado na indústria de papel, tintas, cerâmica, entre outros (Imerys 2023). O Caulim está associado a diversas impurezas e o seu processo de beneficiamento gera rejeitos líquido contendo altas concentrações de metais como ferro (Fe), alumínio (Al), zinco (Zn) e cádmio (Cd) (Silva *et al.* 2001).

Atividades de mineração têm grande importância para desenvolvimento econômico do estado do Pará. Porém, a mineração tem um potencial enorme de causar não apenas danos ambientais como sociais (conflitos de terra, desapropriação, entre outros). A implementação do complexo industrial em Barcarena provocou alterações de processos ambientais e sociais. Entre as mudanças sociais podemos observar: a expansão da habitação em áreas ambientais frágeis e a segregação socioespacial, com a criação da Vila dos Cabanos que ocasionou a geração de novos impactos e conflitos envolvendo populações tradicionais, instituições, empresas e diversos outros grupos sociais (Nascimento & Hazeu 2015). Já com relação as alterações ambientais, os processos industriais têm o potencial de interferir na qualidade do ecossistema aquático adjacente,

o que pode levar a efeitos prejudiciais aos organismos residentes nestes locais (Akpor *et al.* 2014).

As atividades de mineração e processamento de minério provocam a mobilização e liberação de metais potencialmente tóxicos que podem atingir o ambiente aquático (Reza & Singh 2010). Ao chegar no meio ambientes esses metais podem sofrer transformações passando por um processo de alteração de sua espécie química, podendo assim ser mais facilmente absorvidos de organismos e/ou acumular nos compartimentos abióticos. Portanto, é necessária uma maior interação entre o governo, empresas e a comunidade (residente em torno das áreas de interesse) para minimizar possíveis conflitos podendo assim promover um crescimento mais sustentável.

2.3 EXPLORAÇÃO DE ALUMÍNIO NA REGIÃO AMAZÔNICA

O alumínio (Al) é o terceiro elemento mais abundante no planeta Terra, sendo de grande importância para a economia mundial. É amplamente utilizado em diversos setores industriais como parte de componentes de aeronaves, automóveis, eletrônicos, entre outros (Antunes *et al.* 2011). O alumínio é obtido através do minério conhecido como bauxita. Tal mineral é constituído por hidróxidos de alumínio e impurezas como silício e ferro (Barbato *et al.* 2013). No Pará, a bauxita é extraída na área de mineração da Hydro Paragominas e transportada via mineroduto para Hydro Alunorte, em Barcarena, percorrendo uma distância de cerca de 244 km. Para extração do alumínio é necessária a separação das impurezas, para isso é utilizado pela Hydro Alunorte o método conhecido como Bayer (<https://www.hydro.com/pt-BR/aluminium/products/bauxita-e-alumina/alumina/>). O processo Bayer (Figura 1) é dividido em 4 etapas: digestão da bauxita, sendo seguida pela clarificação e precipitação da gipsita ($\text{Al}(\text{OH})_3$) (mineral que possui um alto teor de alumínio) e pôr fim a calcinação da gipsita (Silva Filho *et al.* 2007). Após todas essas etapas, é extraída a Alumina (matéria-prima para obtenção do Alumínio) (Carlo *et al.* 2010).

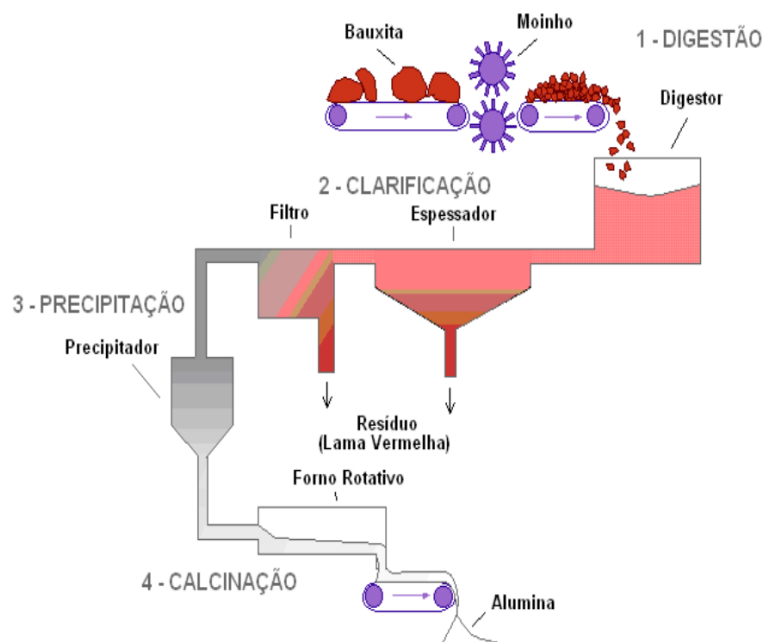


Figura 1 - Processo Bayer usado para a extração da alumina (Al_2O_3) matéria-prima para obtenção do alumínio (Al). Fonte: Silva Filho *et al.* (2007).

Durante o processo de beneficiamento da bauxita, via processo Bayer, ocorre a formação de um subproduto (resíduos contendo impurezas) conhecido como lama vermelha (Xue *et al.* 2016). Esses rejeitos, oriundos do beneficiamento da bauxita, possuem altas concentrações de metais (Singh *et al.* 2022) e ions radiotivos (Chen *et al.* 2023), além de possuir uma alcalinidade muito elevada, com pH variando entre 10 e 12 (Chen *et al.* 2022, Milačič *et al.* 2012, Samouhos *et al.* 2013). A lama vermelha é constituída normalmente por minerais como: Fe_2O_3 (hematita), $\text{AlO}(\text{OH})$ (diásporo, boemita), $\text{Al}(\text{OH})_3$ (gibbsita), CaCO_3 (calcita), TiO_2 (rutilo, anatase), SiO_2 (quartzo) (Brunori *et al.* 2005, Wang *et al.* 2008, Samouhos *et al.* 2013), além de apresentar concentrações consideráveis de diversos minerais contendo Ba, Ca, Cd, Cr, Fe, Hf, K, Mg, Na, Ni, Pb, Si, Sr, Nd, Th, U, V e Zn (Wang *et al.* 2008, Samouhos *et al.* 2013). Tal resíduo, já é reconhecido como potencialmente tóxico em vários estudos ecotoxicológicos realizados em áreas afetadas e/ou com os próprios efluentes de plantas de beneficiamento do minério de bauxita (Dauvin 2010).

A mineração, como a exploração de bauxita e o seu beneficiamento, produz resíduos com altas concentrações de metais potencialmente tóxicos para o ecossistema (Remeteiová *et al.* 2023). A lama vermelha possui efeito tóxico conhecido e o seu armazenamento inadequado, pode alcançar o meio ambiente alterando a fertilidade dos

solos, germinação de sementes (Carlo *et al.* 2010), modificando a qualidade físico-química da água e podendo gerar espécies químicas que possuem potencial de acumulação nos compartimentos bióticos e abióticos (Shil & Singh, 2019). Atividades antrópicas como mineração e beneficiamento de minérios possuem uma grande capacidade de provocar desequilíbrio nos ecossistemas alterando assim a qualidade do meio ambiente (Reza & Singh, 2010).

No ano de 2022 foram gerados cerca de 390 milhões de toneladas de alumina no mundo, onde o Brasil contribuiu com cerca de 8% gerando 32 milhões de toneladas de alumina (<https://pubs.usgs.gov/periodicals/mcs2022/mcs2022-bauxite-alumina.pdf>). Durante o processo de beneficiamento a quantidade de lama vermelha gerada segue à seguinte proporção: 1 tonelada de alumina produz cerca de 0,9 a 1,5 toneladas de resíduo, com variações ocorrendo conforme a composição da bauxita (Cardenia *et al.* 2019). Logo, somente no ano de 2022 foram gerados de 28,8 a 48 milhões de toneladas de lama vermelha. Devido à grande produção da alumina, vem sendo estudada a reutilização desse subproduto. Diversos estudos têm demonstrado que a lama vermelha possui um grande potencial para ser utilizada na construção civil, como parte da composição de tijolos, concretos e cimento, cerâmica, pavimentação de vias (Wang *et al.* 2008) e no tratamento de água como agente absorvente de fluoretos, nitratos, elementos traços e substâncias orgânicas (Bhatnaga *et al.* 2011, Wang *et al.* 2008). Uma outra utilização da lama vermelha é para extração de metais de importância comercial como Ferro e Dióxido de Titânio (Cardenia *et al.* 2019.).

2.4 EXPLORAÇÃO DE CAULIM NA REGIÃO AMAZÔNICA

O caulim é um mineral que possui diversas aplicações, sendo utilizado para pigmentação de papel, medicamentos, cerâmicas, entre outros (Santos, 2014), com a indústria de papel sendo a maior consumidora. As reservas de caulim são muito abundantes no planeta, com cerca de 95% de toda a reserva mundial concentrada em quatro países: Estados Unidos (53%), Brasil (28%), Ucrânia (7%) e Índia (7%), que juntos possuem cerca de 15 bilhões de toneladas de caulim em seus territórios (Bombazaro & Bernardin, 2021, Silva, 2001). No Brasil, o estado do Pará possui as maiores reservas de caulim, com 56%, seguidos pelos estados do Amazonas (41%) e Amapá (2%) (Mártires, 2009).

Na natureza, o caulim é frequentemente encontrado associado a diversas impurezas que prejudicam sua coloração branca (Luz *et al.* 2008, Saikia *et al.* 2003). Por essa razão, o processo de beneficiamento do caulim pode ser realizado de duas formas — a seco ou a úmido — sendo que as características do material e o uso final previsto são determinantes para a escolha do tipo de beneficiamento (Luz *et al.* 2008). A escolha do método está diretamente relacionada à aplicação final do caulim no mercado (Saikia *et al.* 2003). No estado do Pará, o caulim é extraído no município de Ipixuna do Pará e transportado por um mineroduto de 158 km até o município de Barcarena, onde é beneficiado pela empresa Imerys.

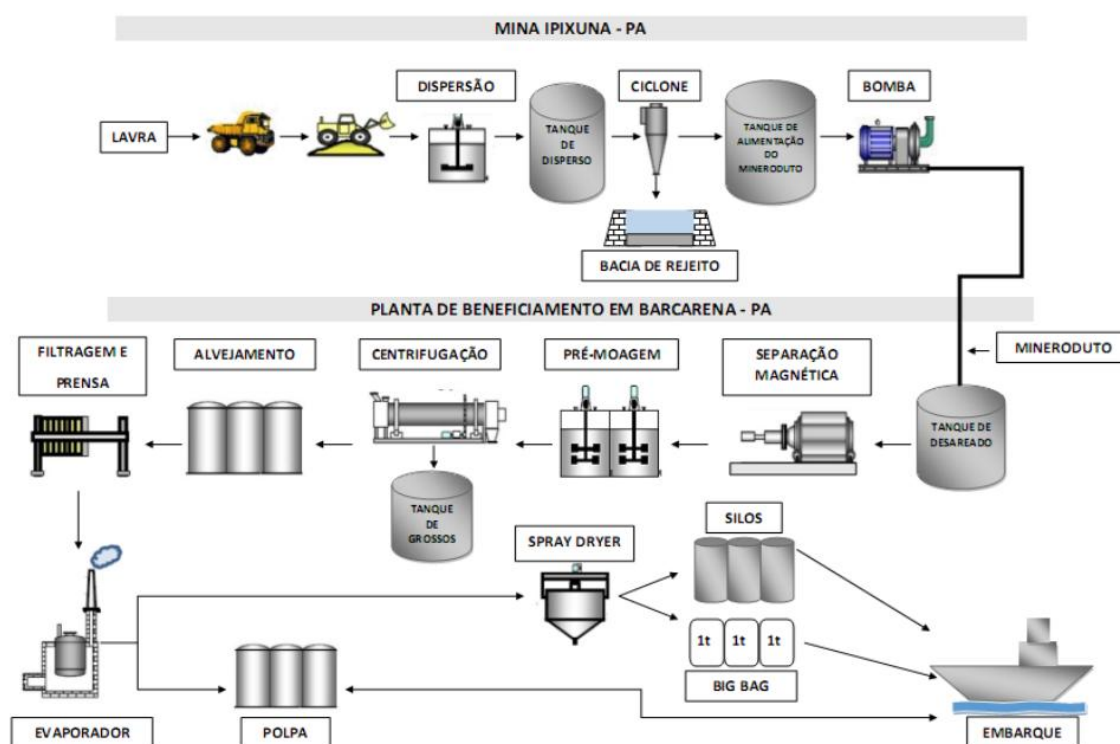


Figura 2 – Processo de extração e beneficiamento do caulim. fonte: Luz *et al.* (2008).

Na planta da Imerys, o caulim recém-chegado passa pelo processo úmido, que consiste nas seguintes etapas para a remoção de impurezas: dispersão, hidrociclonação, centrifugação, separação magnética, branqueamento químico, filtração, redispersão e secagem (Luz *et al.* 2008.). O beneficiamento úmido é utilizado para alcançar maior pureza do caulim, especialmente na obtenção de sua coloração branca. Esse produto é de grande interesse para os fabricantes de papel, nos quais o caulim é utilizado para conferir a coloração branca ao papel. Por outro lado, o beneficiamento a seco envolve as etapas

de britagem, secagem, pulverização e classificação pneumática. Esse processo é amplamente empregado para preservar as propriedades químicas do caulim, sendo o material resultante destinado principalmente às indústrias de cosméticos, plásticos, borrachas e outros segmentos (Luz *et al.* 2008).

Durante o processo de beneficiamento do caulim, ocorre a geração de resíduos ricos em metais potencialmente tóxicos, que são frequentemente armazenados a céu aberto (Silva *et al.* 2001). Esses metais podem causar alterações na qualidade ambiental dos ecossistemas próximos à planta industrial, além de impactar negativamente as comunidades do entorno. Contudo, já existem estudos que indicam formas de reaproveitamento desses rejeitos. Entre as aplicações estão a produção de argamassas de cal para restauração (Azeredo *et al.* 2014), tijolos de solo-cimento (Mendonça *et al.* 2021) e a fabricação de blocos e telhas cerâmicos (Menezes *et al.* 2007).

2.5 O SANEAMENTO BÁSICO NO MUNICÍPIO DO POLO INDUSTRIAL AMAZÔNICO

Um outro fator que pode influenciar a qualidade de distintos compartimentos ambientais em Barcarena é o baixo saneamento básico, recolhimento de resíduos sólidos e/ou industriais precários, falta de coleta seletiva de lixo, tratamento de esgoto inadequado e ocupação desordenada (Brasil 2017). Um estudo realizado em 2019 revelou que o município de Barcarena está em último lugar no ranking das piores cidades com saneamento básico, sendo considerada uma das piores cidades por não apresentar tratamento de esgoto (ABES 2019). A maior parte dos residentes não possuem acesso a um sistema de tratamento de esgotos, fazendo de uso de fossas rudimentares, valas, rios e outros meios para eliminação dos efluentes domésticos (Brasil 2018).

A população de Barcarena, durante esses mais de 30 anos de implantação de grandes projetos na região, vem sofrendo com uma série de acidentes e crimes ambientais. A própria população relata (em visita para coleta de dados) alteração na coloração, gosto e um cheiro estranho na água no rio que passa pela Vila do Conde. O carreamento de efluentes de origem industrial e doméstica para o ambiente aquático pode provocar alterações na qualidade da água afetando os organismos aquáticos e a população (Montagner *et al.* 2017). Em 2018, os residentes da comunidade de Bom Futuro relataram sintomas como fortes dores abdominais, cafelais e náuseas, supostamente devido à ingestão de água contamina com resíduos de origem industrial. Entretanto, a comunidade

está localizada em uma área próxima à lixões. A população que reside nas proximidades de lixões está sujeita a efeitos nocivos e doenças (Brasil 2011). Em Barcarena, a população possui um sistema de abastecimento de água precário, utilizando para consumo humano água de poços freáticos superficiais de até 10 metros sem nenhum estudo sobre a qualidade da bioquímica da água. Aumentando assim o risco de doenças causa pela ingestão de água sem tratamento para consumo humano.

Os impactos ambientais causados pelo carreamento de efluentes não afetam apenas os ecossistemas aquáticos, mas também trazem consequências diretas para a população local. Diante desse cenário, a precariedade do sistema de abastecimento de água, que depende de poços superficiais sem estudos adequados sobre a qualidade da água, aumenta o risco de doenças de veiculação hídrica. Em resposta a essa crise, a gestão municipal de Barcarena está empenhada em proporcionar uma melhoria no saneamento básico da região com a implementação de duas novas estações de tratamento de água (no rio Murucupi) com benefício direto para 4,4 mil moradores e futuramente alcançará cerca de 14 mil moradores. Porém, somente essa medida não é suficiente para preencher a lacuna de falta de infraestrutura na cidade. É necessária uma maior ação do governo em conjunto com as empresas para que ocorra um retorno em infraestrutura e saneamento básico para as comunidades.

Desta forma, é de extrema importância o estudo das concentrações de metais no município de Barcarena, devido ao seu grande complexo industrial aliado à baixa infraestrutura e saneamento básico, o que pode influenciar no aporte de metais potencialmente tóxicos para a região estuarina, interferindo nas concentrações naturais de metais no ambiente. As alterações do regime de chuvas, podem aportar metais do solo para o ambiente aquático devido à intensificação do escoamento superficial e à lixiviação da área de entorno durante o período de maior pluviosidade. Já no período de estiagem, devido à diminuição da diluição, os metais tornam-se mais concentrados na coluna de água. Além disso, o ambiente estuarino é caracterizado por grandes flutuações ambientais devido à sua intensa hidrodinâmica, contribui para alterações nos parâmetros físico-químicos, complexação e adsorção dos metais. Essas variações podem tornar os metais mais ou menos biodisponíveis na coluna de água, influenciando os mecanismos de ligação entre eles e, conseqüentemente, seus impactos sobre os organismos aquáticos e a qualidade ambiental da região. A região do estuário do rio Pará é influenciada por regimes

de macromarés, que podem provocar a ressuspensão do sedimento de fundo, alterando a disponibilidade dos metais, que podem ser transportados pela ação das correntes, sofrendo dispersão para outras localidades.

3 HIPÓTESES

1. Há uma maior variação sazonal do que espacial para os metais analisados em água e sedimento, sendo os períodos chuvoso e transicional chuvoso-estiagem os que apresentam maiores teores de metais nos compartimentos ambientais analisados.

2. Há diferenças nos predomínios de metais em fração particulada e dissolvida, que dependem do metal analisado.

3. Existem diferenças nas concentrações de metais em amostras coletadas no pico da maré enchente e no pico da maré vazante, com padrões específicos para cada metal analisado.

As hipóteses acima são baseadas nas seguintes premissas:

O município de Barcarena possui um grande complexo industrial que pode influenciar as concentrações de metais nos compartimentos abióticos, na região entorno da área industrial. Contudo, a composição geológica natural (Formação Barreiras) da região influencia em muito a concentrações de metais, por ser uma área rica em metais como alumínio, óxidos de ferro, manganês (Nunes *et al.* 2011) Mg, Si, Al, Ti, Fe, Cr, As e B (Behling & Costa, 2004) entre outros na sua composição. Durante os períodos de maiores pluviosidade: chuvoso e transição chuvoso-estiagem, há um aumento da hidrodinâmica dos corpos d'água, com isso aumentando a contribuição e mobilização de metais para os corpos hídricos, devido ao aumento de processo de lixiviação, erosão, drenagem dos canais (Rosa-Filho *et al.* 2011) e o retrabalhamento do sedimento de fundo (Brinkmann *et al.* 2013).

Os estuários são um ambiente caracterizado por sofrer grandes flutuações ambientais (ciclo das marés, salinidade, temperatura). As alterações na coluna d'água influenciam os mecanismos de ligação dos metais em suas distintas formas (particulares e dissolvidas) (Souza 2013). As espécies químicas particulada e dissolvida podem sofrer alterações devido a vários processos físicos, químicos e biológicos (Templeton *et al.* 2000). Na região amazônica, devido ao pH mais baixo das águas, há um predomínio da fração dissolvida devido ao aumento da solubilidade do Al (Igbokwe *et al.* 2019), porém quando analisamos outros metais, como por exemplo, Fe e Mn, regiões com pH mais alto favorece a predominância da fração particulada, ou seja, esse fracionamento entre particulado e dissolvido vai depender de fatores como: pH, salinidade, temperatura entre outros (Hatje *et al.* 2003).

A região amazônica é influenciada por um regime de maré de meso e macromaré (Ranieri & El-Robrini, 2020), tais regimes podem alterar a quantidade de metais presentes nos comportamentos abióticos. Moskalski (2013), demonstrou em seu estudo que eventos pluviométricos em situações de maré baixa são responsáveis por mobilizar sedimentos adsorvidos a metais, aumentando a quantidade desses componentes na água. Logo, as interações entre as componentes naturais (água, sedimento e geologia) podem afetar o funcionamento e composição dos solos e corpos hídricos (Ferreira *et al.* 2022).

4 OBJETIVOS

4.1 OBJETOS GERAIS

Monitorar e quantificar sazonalmente as concentrações de metais em igarapés sob distintos níveis de influência espaço-temporal no complexo urbano-industrial de Barcarena, nos picos de maré enchente e vazante

4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar a concentração desses 10 elementos (Al, Ba, Cd, Cr, Fe, Pb, Mn, Ni, As e Hg) na água superficial (fração total, particulada e dissolvida) em amostras coletadas nos picos (sizígia) das marés enchente e vazante em igarapés localizados em distintas distâncias do polo industrial nos períodos chuvoso, transicionais e de estiagem.
- Analisar a concentração de metais (Al, Ba, Cd, Cr, Fe, Pb, Mn, Ni, As e Hg) no sedimento (fração total) em amostras coletadas nos picos das marés enchente e vazante em igarapés localizados em distintas distâncias do polo industrial nos períodos chuvoso, transicionais e de estiagem
- Analisar a variação espacial, sazonal e influência da maré nas concentrações de metais na água e no sedimento em diferentes rios, sobre a influência do complexo urbano-industrial da região de Barcarena.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 ÁREA DE ESTUDO

O município de Barcarena, estado do Pará, localizado a 40 km de distância da capital (Belém) está situado na mesorregião metropolitana de Belém, com uma população de 126.650 mil habitantes (IBGE, 2022). Barcarena é uma cidade de grande importância econômica para o estado do Pará, possuindo um polo industrial no setor de alumina, caulim e siderurgia, sendo seguido com atividades no setor de agropecuária, extrativismo (principalmente do Açaí) e o turismo (devido grande região litorânea e seus igarapés) (Barcarena, 2016).

As coletas foram realizadas em 10 pontos (**Erro! Fonte de referência não encontrada.**): rio Arienga (AR1- ponto a jusante e AR2 – ponto a montante); Vila do Conde (VC); rio Murucupi (RM1 – ponto de área de comunidade; RM2 – ponto dentro do complexo industrial); rio Barcarena (RB1- ponto a jusante e RB2 – ponto a montante); rio Itaporanga (RI1- ponto a jusante e RI2 – ponto a montante) e Igarapé Tauá (IT).

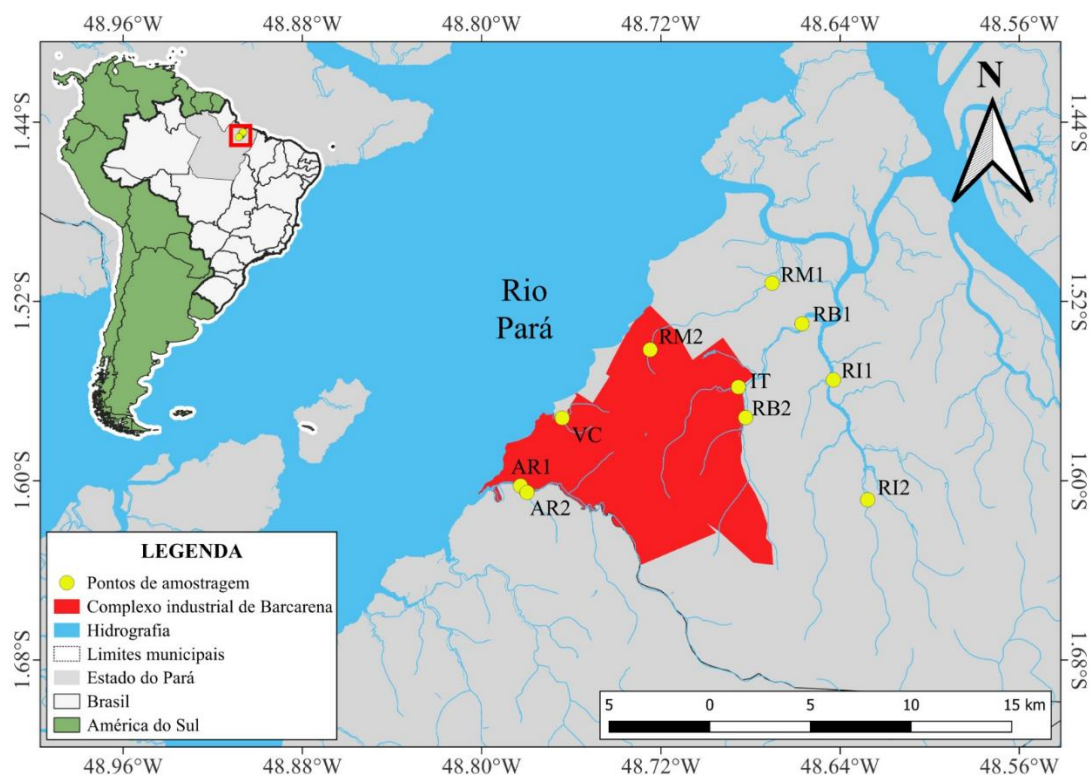


Figura 3 - Localização dos pontos de coleta no município de Barcarena - PA. Foram realizadas coletas em 10 pontos: rio Arienga (AR1- ponto a jusante e AR2 – ponto a montante); Vila do Conde (VC); rio Murucupi (RM1 – ponto de área de comunidade; RM2 – ponto dentro do complexo industrial), rio Barcarena (RB1- ponto a jusante e RB2 – ponto a montante); rio Itaporanga (RI1- ponto a jusante e RI2 – ponto a montante) e Igarapé Tauá (IT)

5.2 CARACTERIZAÇÃO DOS PONTOS

5.2.1 Rio Barcarena (RB1 -48.657000 -1.530000; RB2 -48.682179 -1.571834)

O rio Barcarena está localizado na região do complexo industrial do município de mesmo nome, estando sujeito às suas interferências.

5.2.2 Igarapé Tauá (-48.685397 -1.558208)

O Igarapé Tauá (IT) é um afluente do rio Barcarena, apresenta efeitos de maré na sua desembocadura e florestas de várzea no seu baixo curso. O Igarapé Tauá fica próximo ao polo industrial de Barcarena, assim recebendo as águas pluviais que drenam essa região.

5.2.3 Rio Itaporanga (RI1 -48.643005 -1.555008; RI2 -48.627723 -1.608508)

O Rio Itaporanga é considerado nosso ambiente referência, por ser o mais distante do polo industrial.

5.2.4 Rio Arienga (AR1 -48.782626 -1.602266; AR2 -48.779724 -1.605223)

Rio Arienga está relativamente distante do grande polo industrial de Barcarena, está localizando próximo a uma usina siderúrgica que trabalha com o processamento e beneficiamento de ferro (USIPAR) e possui baixa ocupação de moradias. O Rio Arienga serve como limite entre o município de Barcarena e Abaetetuba.

5.2.5 Rio Murucupi (RM1 -48.670361 -1.511849; RM2 -48.724774 -1.541550;)

O rio Murucupi é considerado como antropizado, pois, é um dos corpos d'água que corta a parte do município de Barcarena, passando por diversos locais bem populosos como Vila dos Cabanos, Bom Futuro (bairro onde está localizado o lixão municipal), Laranjal e Itupanema. Além disso, tal rio também recebe efluentes domésticos não tratados proveniente das comunidades

5.2.6 Vila do Conde (-48.764000 -1.572000)

O ponto em Vila do Conde é considerado uma localidade com grande influência antrópica. Isso se dá por conta não só da proximidade com o polo de beneficiamento mineral, como também pelo agrupamento urbano na região e por questões ligadas ao saneamento básico e atividades portuárias.

5.3 PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS

Dados de temperatura, pH, potencial redox, turbidez, condutividade, salinidade e oxigênio dissolvido foram obtidos a partir de uma sonda multiparâmetro(HORIBA). A sonda foi calibrada 15 minutos antes da coleta em cada ponto amostrado.

5.4 CAMPO DE VELOCIDADE DAS CORRENTES

As análises do campo de velocidade têm como objetivo avaliar o transporte residual, permitindo determinar a direção do fluxo das correntes e sua influência na deposição e redistribuição de poluentes e nutrientes. O transporte residual é o deslocamento das massas de água e dos sedimentos ao longo do tempo, resultante da interação de fatores como correntes, marés e outros processos hidrodinâmicos. Já o transporte de massa do material particulado em suspensão (MPS) representa o transporte total de partículas presentes na coluna d'água.

As amostragens foram realizadas através de transectos ou fundeio (ponto fixo no canal), ao longo de um ciclo de maré (13 h). Um transecto representa uma leitura/registro realizado durante a travessia na seção de uma margem a outra e de forma contínua. No caso do fundeio foram registrados em um arquivo a cada 30 minutos. A leitura de dados é controlada em tempo real com o uso do software *WinRiver II* e é salvo em arquivo individual.

As leituras da corrente *in situ* foram realizadas a partir da utilização de um perfilador acústico de corrente ADCP - *Acoustic Doppler Current Profiler*, modelo WorkHorse Sentinel de 600 khz, acoplado em embarcação. O equipamento opera a uma frequência amostral de 2 hz (0,5 s), a cada 25 cm de profundidade e em modo *Bottom Track* - orientado para baixo.

Em laboratório, o processamento dos dados foi a partir da geração de arquivos em formato *ASCII*, para leitura de dados em linguagem de programação (Matlab), correção da direção segundo a declinação magnética local e cálculo do campo de velocidade e direção de corrente, proposto por Miranda *et al.* (2002). A corrente foi coletada ao longo de um ciclo de maré (~13 h) em 10 pontos. O método de Miranda *et al.* (2002) é adotado para o cálculo do transporte residual, onde é utilizada as médias no tempo ($\langle P \rangle$) das propriedades escalares para calcular a média de uma determinada propriedade (neste caso, a velocidade) em profundidade e/ou distância, obtendo-se um único valor durante o período da maré, dado por:

$$P = \frac{1}{n} \left(\frac{P(Z_j, t_0)}{2} + \sum_k P(Z_j, t_k) + \frac{P(Z_j, t_n)}{2} \right);$$

Nesta equação, os valores das propriedades são ponderados nos instantes iniciais (t_0) e final (t_n) pelo fator $\frac{1}{2}$, pois assume-se, por hipótese, que cada um desses valores é representativo somente para intervalos de tempo $(1/2) \Delta t$.

Os valores positivos e negativos obtidos no cálculo do **transporte residual** indicam a direção do fluxo:

- **Valores positivos** representam transporte na direção predominante do fluxo.
- **Valores negativos** indicam transporte na direção oposta.

Os valores positivos e negativos no cálculo do **transporte de material particulado (TMP)** indicam a direção do fluxo:

- **Valores positivos** fluxo no sentido de saída (exportação).
- **Valores negativos** fluxo no sentido de entrada (importação).

5.5 COLETA DE DADOS QUÍMICOS

As amostras de água e sedimento foram coletadas em 3 réplicas no pico da maré enchente e 3 réplicas no pico da maré vazante em cada ponto e em cada período sazonal, sempre na maré de sizígia. No laboratório, cada réplica foi analisada em duplicata para realizar a análise estatística da distribuição dos contaminantes inorgânicos no ambiente. As amostragens para sedimento superficial foram realizadas utilizando uma draga do tipo *Van-Veen* e para coletas de água superficial foram realizadas utilizando frascos estéreis de 500 ml coletados a 30 cm da coluna d'água. Foram realizadas 6 campanhas no estuário do rio Pará em diferentes períodos sazonais nos anos de 2023 períodos: I- Transicional (janeiro), II – Chuvoso (abril), III – transicional (junho), IV – estiagem (outubro). e 2024 V – chuvoso (abril), e VI – estiagem (outubro). Foram coletadas amostras em 10 pontos, com 3 réplicas de água e 3 de sedimento em cada um deles, ao longo de 6 períodos de amostragem. Dessa forma, um total de 60 amostras de cada compartimento (água e sedimento) foram obtidas por período, resultando em um total de 360 amostras de cada compartimento ao longo do estudo. Após as coletas as amostras foram enviadas para a universidade federal de santa maria (UFMS), para cada onde foram feitas as análises químicas seguindo protocolo para cada metais e cada matrix analisada.

5.6 ANÁLISE DE METAIS

As análises químicas realizadas envolveram a determinação das concentrações dos elementos Al, Ba, Mn, Cr, Ni, Pb, As, Cd, Fe e Hg em água (fração total, fração particulada e fração dissolvida) e em sedimento (fração total). Os metais/metaloide foram determinados por Espectrometria de Absorção Atômica (AAS) com atomização em Chama (F-AAS), Forno de Grafite (GF-AAS), Vapor Frio de Mercúrio (CV-AAS) e Geração de Hidretos (HG-AAS). As amostras de águas (acidificadas) foram analisadas após filtração em membrana de 0,22 μm (fração solúvel) e sem pré-tratamento prévio (fração total e particulada). As amostras de sedimentos foram analisadas após a digestão total da amostra em Forno de Microondas (MW). As amostras de sedimento foram inicialmente processadas por digestão ácida empregando a mistura oxidante $\text{HNO}_3 + \text{H}_2\text{O}_2$ de acordo com o método de referência EPA3050B descrito pela EPA (Método 3050B: Digestão Ácida de Sedimentos, Lodos e Solos, Revisão 2). Após a digestão total, as amostras foram diluídas em água ultrapura (Milli-Q) e analisadas de acordo com as metodologias validadas para cada elemento.

Todas as análises foram comparadas com resultados de amostras certificadas internacionalmente pelo NIST (National Institute of Standards and Technology – USA) para a expressão da Exatidão final dos resultados em todas as amostras analisadas. Os seguintes padrões de referência foram utilizados nos ensaios para a garantia da exatidão dos resultados: 1) Standard Reference Material 1640a (NIST): Trace Elements in Natural Water ; 2) Standard Reference Material 1646a (NIST): Estuarine Sediment

5.7 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

5.7.1 Análise das componentes principais (PCA)

Antes de realizar a análise, os dados foram submetidos a um pré-processamento. Isso incluiu a verificação de erros e valores ausentes, a normalização dos dados, e a transformação de variáveis, a fim de cumprir as suposições necessárias para a análise estatística. Para determinar se existem diferenças significativas entre os grupos de amostras, utilizamos o teste estatístico PERMANOVA. Além disso, os dados foram analisados por meio de testes multivariados PCA-biplot utilizando o software RStudio. O heatmap considera a correlação de Pearson. Os dados de PCA-biplot consideraram as componentes 1 e 2, pois explicam mais de 50% de variância dos dados.

5.7.2 ANÁLISES DE REDUNDÂNCIA (RDA)

Para identificar quais variáveis poderiam explicar as concentrações de metais, utilizou-se uma análise de Redundância (pRDA). A significância estatística da RDA foi avaliada pelo teste de Permutação de Monte Carlo ($p < 0,05$). A partir do método de “forward selection”, as variáveis que foram significativas ($p < 0,05$) foram utilizadas para fazer a análise de Redundância (RDA) final. Paralelamente testou-se o efeito de multicolinearidade. As análises multivariadas foram realizadas com auxílio do programa R versão 4.4.2, utilizando o pacote *vegan*.

5.7.3 ANÁLISE DONUT PIE CHART

O gráfico donut pie permite visualizar facilmente como os períodos se relacionam com o todo. É útil para mostrar proporções ou distribuições de categorias em relação ao total. Dessa forma, os tamanhos relativos das fatias são facilmente perceptíveis, tornando mais simples a identificação das categorias maiores e menores. Isso é particularmente útil para destacar o período e o ponto que apresentam a maior concentração de um determinado metal traço.

6 RESULTADOS

6.1 TRANSPORTE RESIDUAL ($M^3.S^{-1}$)

Na Tabela 2, podemos observar que os rios, de maneira geral, apresentaram um padrão de exportações, ou seja, os elementos são mais facilmente transportados para o rio Pará. A exceção é o Rio Murucupi que apresenta a característica de ser mais importador, ou seja, de provisão de água nesse ambiente, podendo assim possuir uma tendência em aumentar as concentrações de metais nesse compor hídrico.

Tabela 2 - Valores de Transporte residual ($m^3.s^{-1}$) obtidos para todos os períodos de aquisição de dados de corrente e fluxo de volume. períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño)

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
Rio Barcarena I	1,83	15,57	4,54	-3,27	10,90	0,77
Rio Barcarena II	0,13	6,36	-5,28	3,26	2,16	-2,52
Igarapé Tauá	2,73	5,39	3,01	1,64	3,35	1,43
Rio Itaporanga	9,30	21,93	29,02	10,40	21,81	-13,13
Rio Arienga	6,18	3,62	10,66	12,81	15,08	9,27
Rio Murucupi	-1,51	-2,89	-1,34	-0,10	-5,92	-3,56

Em relação ao fluxo de transporte de material particulado (TMP), os rios (Tabela 3) apresentam uma tendência na importação de material particulado em suspensão (MPS), com exceção do período II, onde predominou a exportação. Murucupi, não apresentou variações do fluxo de transporte, mantendo-se estáveis durante as estações. Contudo, no rio Arienga houve uma alteração no fluxo de massa durante o período II, apresentando um comportamento de exportação. Para os demais rios, não foi possível estabelecer um padrão específico, onde algumas seções registraram oscilações nos transportes – tanto para as análises trimestrais quanto sazonais.

Quando analisamos as campanhas do período seco I e II, alguns rios apresentam uma inversão do fluxo residual e um aumento na concentração de MPS.

Tabela 3 - Valores de Transporte residual de massa ($kg.s^{-1}$) obtidos para todos os períodos de aquisição de dados de corrente e MPS. Locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño).

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
Rio Barcarena I	1,83	0,00	-0,17	0,15	0,22	2,15
Rio Barcarena II	-0,03	0,00	-0,03	0,05	0,01	-0,48
Igarapé Tauá	0,02	0,07	0,09	0,00	-0,06	0,13
Rio Itaporanga	-1,31	-1,20	-0,04	-0,03	0,002	-0,96

Rio Arienga	0,12	-0,17	0,23	0,33	0,16	2,96
Rio Murucupi	-0,51	-0,10	-0,22	-0,12	-0,353	-1,07

6.2 INFLUÊNCIA DAS MARÉS (ENCHENTE/VAZANTE) NA CONCENTRAÇÃO DE METAIS NOS SEDIMENTOS SUPERFICIAIS

Nas análises estatísticas de comparação entre as marés, foi possível verificar que, no geral, essa variável física não influencia as concentrações dos metais, ou seja, não há diferença significativa na concentração de metais entre as marés (enchente ou vazante). Esse resultado de ausência de influência da maré na concentração de metais analisados é válido tanto para o sedimento quanto para a água. Os dados dessas análises estão incluídos no final deste documento, no tópico Material Suplementar

6.3 SEDIMENTO SUPERFICIAL

6.3.1 Variação espaço-temporal dos metais nos sedimentos superficiais

6.3.1.1 Alumínio (Al)

A Tabela 4 apresenta os valores médios de Al nos sedimentos superficiais, por corpo hídrico e período amostrado. Observou-se que os valores de Al se mantiveram estáveis ao longo dos períodos analisados. As concentrações de alumínio no período I apresentaram valores similares ao longo dos pontos, com destaque para RM1 e RM2, que registraram as maiores concentrações ($14.152,28 \pm 4,699,45$ mg/kg e $13.955,10 \pm 4.410,94$ mg/kg, respectivamente). Durante a estação chuvosa (período II), houve uma redução nos valores em todos os pontos amostrados. Já na estação III, observou-se um aumento generalizado das concentrações devido à diminuição da incidência de chuvas e do processo de lixiviação, com os pontos AR1 e AR2 apresentando os maiores valores ($13.355,73 \pm 3.491,40$ mg/kg e $12.876,10 \pm 7.544,02$ mg/kg, respectivamente). Esses altos valores nos pontos do rio Arienga também foram observados nas estações IV, com $22.271,77 \pm 3.697,79$ mg/kg (AR2), e $21.836,07 \pm 4.268,32$ mg/kg (AR1). No período chuvoso V, os maiores valores foram registrados nos pontos RM1 ($56.364,91 \pm 27.841,24$ mg/kg) e VC ($31.872,39 \pm 9.078,94$ mg/kg).

Tabela 4 - Concentração alumínio (Al) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	6919,28 \pm 2512,82	1572,74 \pm 1229,54	2729,13 \pm 1213,59	11139,70 \pm 2425,94	541,72 \pm 218,52	48192,28 \pm 7721,10
RB2	7858,53 \pm 2388,03	630,72 \pm 624,13	1235,18 \pm 1276,77	18597,09 \pm 10178,98	11298,78 \pm 2309,02	50748,01 \pm 5901,21
IT	9408,88 \pm 1390,70	688,61 \pm 783,26	911,15 \pm 611,74	11706,41 \pm 8743,43	34430,66 \pm 28708,08	50816,80 \pm 5896,41
RI1	10174,05 \pm 1806,27	1028,11 \pm 857,38	3704,59 \pm 636,78	11462,11 \pm 2988,14	25625,39 \pm 13678,43	46916,43 \pm 6633,77
RI2	4378,80 \pm 3237,37	634,74 \pm 226,48	1499,91 \pm 585,10	5627,20 \pm 2041,78	4728,67 \pm 1742,25	20543,74 \pm 16449,08
AR1	8703,06 \pm 951,43	6831,25 \pm 2349,82	13355,73 \pm 3491,40	21836,07 \pm 4268,32	31638,90 \pm 1986,09	15135,30 \pm 17237,58
AR2	1012,99 \pm 921,89	397,92 \pm 186,73	12876,10 \pm 7544,02	22271,77 \pm 3697,79	28876,47 \pm 2621,76	28876,47 \pm 2621,74
RM1	14152,28 \pm 4699,45	2764,00 \pm 1124,52	8203,78 \pm 1953,21	16590,35 \pm 5254,25	56364,91 \pm 27841,24	36,90 \pm 10,34
RM2	13955,10 \pm 4410,94	2633,11 \pm 1121,29	11234,59 \pm 1675,32	5043,19 \pm 2691,20	11941,53 \pm 3589,51	3914,97 \pm 2100,38
VC	7878,49 \pm 1581,90	5288,48 \pm 1875,71	3987,88 \pm 1448,79	11016,52 \pm 1143,40	31872,39 \pm 9078,94	67,20 \pm 12,72

Para o Al (Figura 4) é notável uma diminuição da sua concentração nos sedimentos entre os períodos transicional I (I, 12,8%) e chuvoso 1 (II, 3,8%), entre os quais há diferença no volume de chuvas. Os períodos VI, IV e V, apresentaram as maiores concentrações de Al com 34,2% 17,2% e 24,6%, respectivamente. No período IV, os pontos AR1 e AR2 apresenta maiores valores de 3,9% e 4%, respectivamente. Os pontos que fogem a esse padrão são RM1 (10%), IT (6%) e VC (5,6%) durante o período V. As maiores concentrações de Al foram observadas no período VI, com destaque para os pontos RB2 (19,4) e IT (19%).

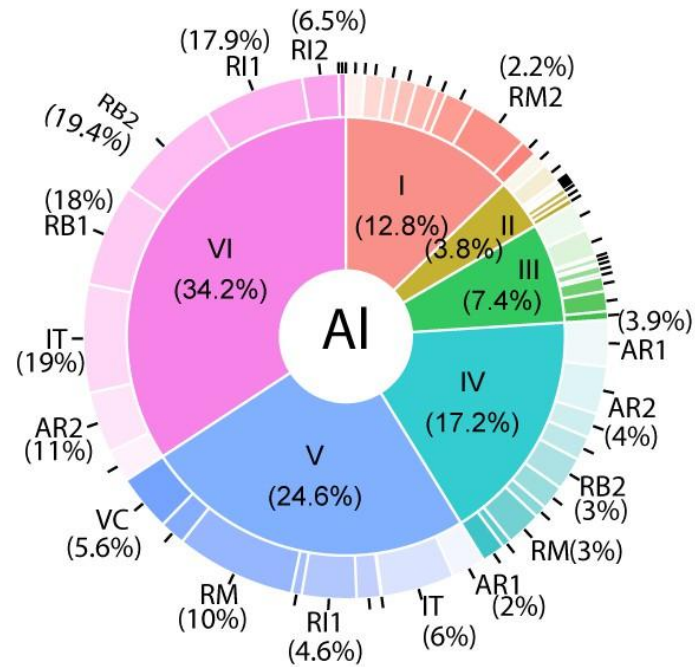


Figura 4 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de alumínio (Al) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.2 Ferro (Fe)

A Tabela 5, apresenta os valores médios de Fe nos sedimentos superficiais, por corpo hídrico e período amostrado. O Fe mostrou variações ao longo dos períodos amostrados. Do período I ao II, houve, de maneira geral, uma diminuição de suas concentrações na maioria dos pontos, acompanhando o aumento da precipitação. No período III, durante a transição entre o período chuvoso e o seco, observou-se um aumento nas concentrações, com destaque para o ponto VC ($47.112,25 \pm 30.341,98$ mg/kg), seguido pelos pontos RI1 ($20.510,43 \pm 3.108,74$ mg/kg), RB1 ($16.668,05 \pm 6.250,91$ mg/kg), AR1 ($14.910,84 \pm 9.148,60$ mg/kg) e AR2 ($13.857,17 \pm 4.394,92$ mg/kg). Com a diminuição das chuvas, observou-se um aumento na concentração de Fe no sedimento durante o período IV, onde os pontos AR1 ($99.553,80 \pm 18.999,99$ mg/kg) e AR2 ($65.935,56 \pm 17.155,54$ mg/kg) apresentaram os maiores valores. Já no período seguinte, os valores de Fe em todos os pontos amostrados apresentaram uma diminuição nas concentrações devido ao aumento da precipitação, com destaque para os pontos RB2 ($22.708,05 \pm 5.908,09$ mg/kg), RI1 ($20.887,43 \pm 5.908,65$ mg/kg) e VC ($14.020,60 \pm 8.051,98$ mg/kg).

Tabela 5 - Concentração ferro (Fe) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	2223,94 \pm 1237,66	1441,65 \pm 348,88	16668,05 \pm 6250,91	22194,02 \pm 3689,69	2040,11 \pm 302,59	23102,35 \pm 9605,99
RB2	4779,15 \pm 1355,72	470,55 \pm 192,10	7493,87 \pm 4437,69	17794,13 \pm 11161,65	22708,05 \pm 5908,09	31405,59 \pm 3213,45
IT	4871,87 \pm 976,54	987,38 \pm 951,58	1977,68 \pm 1651,61	34094,44 \pm 28204,64	16936,27 \pm 6177,94	31703,25 \pm 8987,15
RI1	6346,34 \pm 838,71	846,26 \pm 340,91	20510,43 \pm 3108,74	23843,61 \pm 4276,54	20887,43 \pm 5908,65	25604,15 \pm 3739,09
RI2	5980,07 \pm 6448,30	60,93 \pm 38,42	5457,82 \pm 1204,47	11580,57 \pm 11773,10	2784,84 \pm 2689,24	2060,30 \pm 491,61
AR1	9962,07 \pm 2500,08	6996,15 \pm 3082,75	14910,84 \pm 9148,60	99553,80 \pm 18999,99	21866,94 \pm 6800,22	38428,47 \pm 3321,83
AR2	546,25 \pm 600,53	3948,29 \pm 1648,23	13857,17 \pm 4394,92	65935,56 \pm 17155,54	1656,34 \pm 1017,43	29217,38 \pm 4207,18
RM1	1755,76 \pm 1920,42	393,46 \pm 188,36	7603,40 \pm 2284,48	17229,90 \pm 5308,87	5235,40 \pm 2408,17	44,97 \pm 8,39
RM2	3260,71 \pm 2565,81	3308,25 \pm 810,29	8043,86 \pm 5762,02	4952,58 \pm 1638,81	1656,37 \pm 1017,44	3962,69 \pm 1777,30
VC	8662,58 \pm 1482,72	1472,78 \pm 720,82	47112,25 \pm 30341,98	25532,76 \pm 2459,56	14020,60 \pm 8051,98	411,23 \pm 90,38

O ferro (Fe) apresentou o mesmo comportamento do Al com uma diminuição dos seus valores do período I (7%) para o II (3%) (Figura 5). Durante a estação III, que registrou 22% do total de Fe quantificado ao longo dos períodos amostrados. Vila do Conde registrou as maiores concentrações contribuindo com 7% sendo seguido pelos pontos RI1(3%). RB1(2,5%), AR2(2%) e AR1(2%). Os maiores valores de Fe foram observados nos períodos III (22%) e IV (49%). Na estação IV, os pontos com maiores teores de Fe nos sedimentos superficiais foram ARI1 e ARI2 que contribuíram com 15% e 10%, respectivamente, do total registrado no período. No período V, maiores valores de ferro nos pontos RB2(3%), RI1(3%) e VC (2,2%).

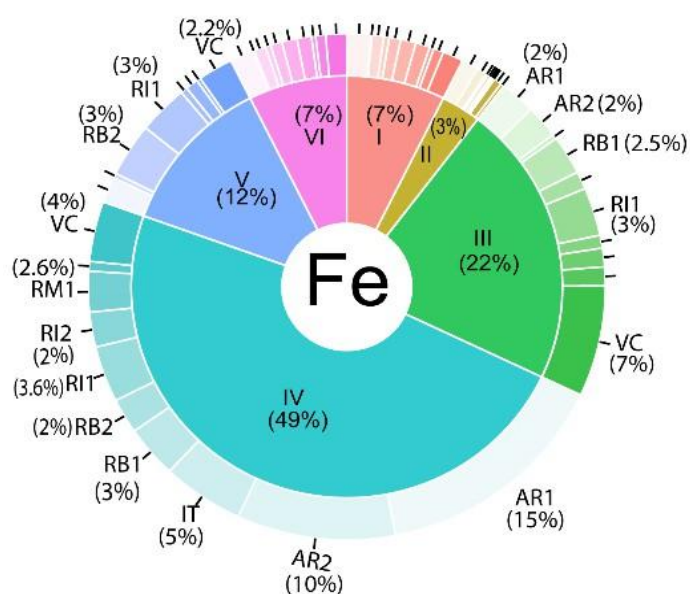


Figura 5 - Donut pie chart” apresenta a concentração de ferro (Fe) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem ,La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem ,El Niño), expressa em porcentagem, Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.3 Manganês (Mn)

As concentrações de Mn (Tabela 6) foram moderadas no período I nos pontos que apresentaram os maiores valores: RB1 ($420,65 \pm 27,34$ mg/kg), RB2 ($524,33 \pm 21,20$ mg/kg), RI1 ($497,99 \pm 19,45$ mg/kg) e IT ($484,66 \pm 36,06$ mg/kg). Essa situação mudou drasticamente no período II com o início das chuvas, resultando em uma diminuição generalizada em todos os pontos, com exceção do ponto RM2 ($276,03 \pm 108,94$ mg/kg), que apresentou um expressivo aumento. No período III, ocorreu um aumento nos pontos com os maiores valores, destacando-se AR2 ($276,87 \pm 80,5$ mg/kg) e RB1 ($209,75 \pm 73,86$ mg/kg). Já no período IV, observou-se um aumento mais pronunciado, especialmente nos pontos AR1 ($540,01 \pm 361,54$ mg/kg), AR2 ($375,58 \pm 254,50$ mg/kg), VC ($246,83 \pm 154,00$ mg/kg), RB1 ($182,05 \pm 62,54$ mg/kg) e RI1 ($274,14 \pm 257,99$ mg/kg). No período V, os pontos VC ($398,55 \pm 490,47$ mg/kg) e IT ($276,60 \pm 105,47$ mg/kg) apresentaram níveis semelhantes em relação ao período anterior. O ponto AR1 ($462,03 \pm 79,24$ mg/kg) teve uma leve queda em seus valores, contudo, ainda manteve as maiores concentrações em comparação com os demais pontos. Já no período VI, os pontos que apresentaram os maiores valores foram RB2 ($376,01 \pm 174,71$ mg/kg) e IT ($338,62 \pm 150,25$ mg/kg) e AR2 ($540,67 \pm 153,01$ mg/kg).

Tabela 6 -Concentração manganês (Mn) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	420,65 \pm 27,34	55,65 \pm 46,03	209,75 \pm 73,86	182,05 \pm 62,54	94,78 \pm 10,29	75,72 \pm 18,47
RB2	524,33 \pm 21,20	ND	97,86 \pm 41,85	134,88 \pm 109,82	368,20 \pm 83,42	376,01 \pm 174,71
IT	484,66 \pm 36,06	3,30 \pm 6,03	33,94 \pm 16,66	57,27 \pm 45,98	185,30 \pm 66,16	338,62 \pm 150,25
RI1	497,99 \pm 19,45	19,25 \pm 10,30	167,60 \pm 12,27	274,14 \pm 257,99	276,60 \pm 105,47	143,65 \pm 19,77
RI2	3,14 \pm 4,85	ND	82,88 \pm 7,77	00,41 \pm 0,001	90,23 \pm 5,93	6,90 \pm 3,89
AR1	166,94 \pm 66,91	ND	140,77 \pm 69,95	540,01 \pm 361,54	462,03 \pm 79,24	488,13 \pm 142,25
AR2	0,76 \pm 0,62	ND	276,87 \pm 80,53	375,58 \pm 254,50	ND	540,67 \pm 153,01
RM1	25,18 \pm 11,54	19,18 \pm 17,01	103,01 \pm 12,42	92,30 \pm 46,19	75,03 \pm 62,75	4,58 \pm 1,49
RM2	4,78 \pm 2,73	276,03 \pm 108,94	19,81 \pm 1,24	31,02 \pm 56,16	81,94 \pm 10,39	46,23 \pm 7,39
VC	150,52 \pm 52,55	18,01 \pm 7,48	140,53 \pm 68,33	246,83 \pm 154,00	398,55 \pm 490,47	6,18 \pm 1,98

O Mn, apresentou concentrações semelhantes na maioria dos períodos, exceto nos períodos II (4%) e III (13%), enquanto nos demais os valores variaram entre 17% a 23% (Figura 6). No período I, destacaram-se os pontos RB2 (5,2%) e RI1 (5%). Com a chegada do período II, observou-se uma redução nas concentrações de Mn no sedimento em comparação ao período I. No período V, os maiores teores foram registrados nos pontos VC (3,7%), AR1 (3,6%), RB2 (3,7%) e RI (2,8%). Já no período VI, os pontos com as maiores concentrações foram RB2 (5,2%), RI1 (5%), IT (4,8%) e AR2 (4,2%).

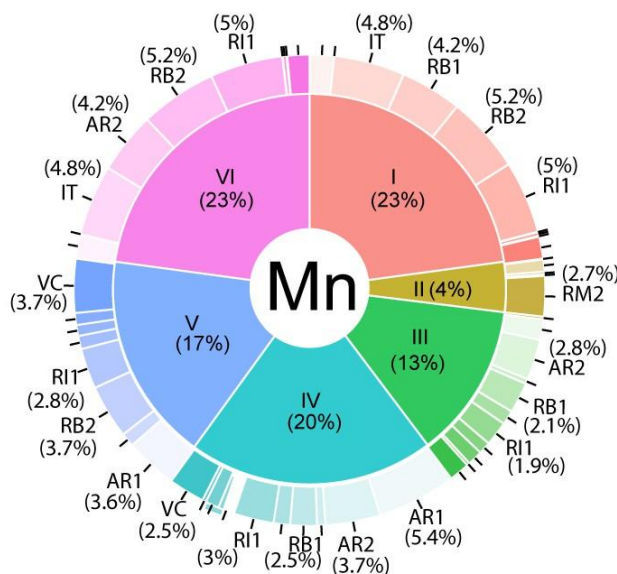


Figura 6 - Donut pie chart” apresenta a concentração de manganês (Mn) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional,La Niña; II – Chuvoso,La Niña; III – transicional,La Niña; IV – Estiagem ,La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem ,El Niño),expressa em porcentagem, Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.4 Bário (Ba)

Na Tabela 7 abaixo, são apresentados os valores de Ba em sedimentos superficiais ao longo dos períodos amostrados. O comportamento do Ba foi semelhante ao do Fe, com uma diminuição nos valores durante o período II e um aumento significativo das concentrações no período IV. No período IV, observam-se os maiores valores de Ba, com as maiores concentrações em relação aos demais períodos, exceto nos pontos RB2 ($44,01 \pm 18,70$ mg/kg) e RM2 ($25,93 \pm 5,19$ mg/kg). As localidades que apresentaram os maiores valores foram RM1 ($606,58 \pm 105,47$ mg/kg), AR2 ($437,57 \pm 85,20$ mg/kg), VC ($397,86 \pm 593,61$ mg/kg) e IT ($356,13 \pm 50,97$ mg/kg).

Tabela 7 - Concentração bário (Ba) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um “*” indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	21,65 \pm 18,44	5,25 \pm 01,34	32,32 \pm 19,35	181,12 \pm 144,93	0,49 \pm 0,28	59,34 \pm 18,35
RB2	54,36 \pm 24,80	0,53 \pm 0,50	17,95 \pm 24,24	44,01 \pm 18,70	25,88 \pm 24,87	81,61 \pm 5,81
IT	42,91 \pm 13,81	15,50 \pm 15,06	0,49 \pm 0,23	356,13 \pm 50,97	25,12 \pm 6,90	59,94 \pm 7,12
RI1	48,80 \pm 08,60	3,07 \pm 0,40	138,91 \pm 14,19	221,21 \pm 42,88	49,84 \pm 9,75	76,23 \pm 12,26
RI2	19,44 \pm 23,70	0,38 \pm 0,09	12,59 \pm 10,31	363,66 \pm 104,69	1,58 \pm 1,81	7,82 \pm 7,60
AR1	91,66 \pm 44,18	57,50 \pm 61,67	63,32 \pm 17,82	226,36 \pm 73,46	53,41 \pm 17,55	134,84 \pm 31,32
AR2	29,52 \pm 37,95	23,98 \pm 15,75	80,90 \pm 18,49	437,57 \pm 85,20	110,34 \pm 9,24	110,34 \pm 9,25
RM1	12,81 \pm 07,36	05,31 \pm 2,54	33,52 \pm 15,62	606,58 \pm 105,47	6,99 \pm 8,87	ND
RM2	7,70 \pm 02,56	81,15 \pm 17,93	6,53 \pm 2,41	25,93 \pm 5,19	3,24 \pm 3,41	13,64 \pm 7,25
VC	65,87 \pm 11,57	6,53 \pm 2,41	56,37 \pm 10,26	397,86 \pm 593,61	20,17 \pm 20,11	ND

Para o Ba (Figura 7), as maiores concentrações foram observadas no período IV (62%), com os pontos AR2, RM1, IT e VC apresentando os maiores valores de 10%, 14,8%, 8,7% e 9,7%, respectivamente.

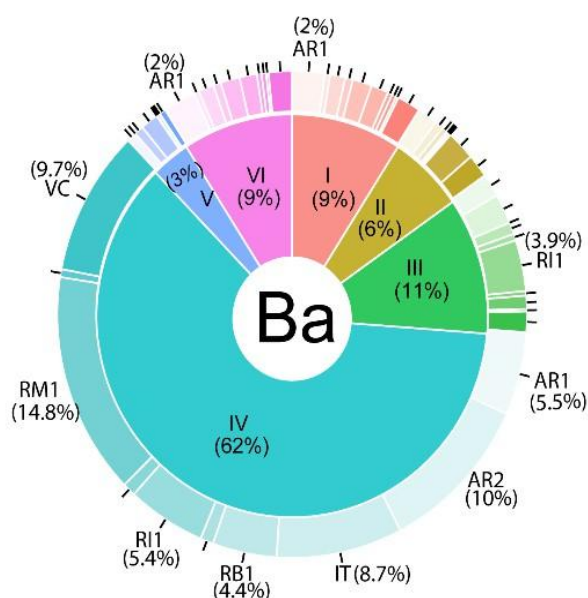


Figura 7 - Donut pie chart” apresenta a concentração de bário (Ba) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.5 Níquel (Ni)

Na Tabela 8 apresenta os valores médios de Ni nos sedimentos superficiais, organizados por corpo hídrico e período amostrado, evidenciando variações ao longo dos diferentes períodos. O Ni demonstrou uma variação diferenciada em cada ponto, não sendo evidente um padrão geral, como foi detectado para os demais metais.

Tabela 8 - Concentração níquel (Ni) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam “*” indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	4,28±2,99	7,26±0,82	7,82±0,68	6,67±1,49	1,16±0,99	5,98±2,50
RB2	7,47±3,16	2,79±0,73	3,90±4,20	8,63±4,99	9,57±0,41	9,08±2,21
IT	7,83±1,68	2,91±0,15	ND	0,82±0,51	5,47±0,78	9,91±2,67
RI1	9,45±1,40	6,80±1,84	6,81±0,84	7,60±0,83	7,77±0,29	7,59±2,37
RI2	1,39±1,20	1,09±0,30	0,33±0,08	0,34±0,34	1,72±0,44	0,91±1,01
AR1	9,41±0,62	10,46±2,20	9,16±0,99	8,39±5,10	4,25±2,09	9,93±2,92
AR2	2,88±4,11	11,99±1,24	9,46±1,23	7,40±2,87	3,33±0,32	6,62±1,20
RM1	2,06±1,55	4,82±1,80	11,09±20,90	7,94±2,12	0,36±0,31	ND
RM2	2,11±0,77	8,63±2,48	1,49±0,46	1,87±1,17	3,34±0,81	0,91±0,32
VC	4,35±1,56	5,52±2,92	9,45±3,28	4,73±0,89	1,62±0,69	0,59±0,16

Como observado na (Figura 8), o Ni apresentou porcentagens de ocorrência muito semelhantes entre os períodos amostrados: I (15,6%), II (18,8%), III (17%), IV (21%) e VI (15,6%). Os menores teores de Ni foram observados no período V (12%). As concentrações de Ni entre os pontos e no decorrer dos períodos amostrados, não apresentaram grandes variações, sendo observados valores entre 2% a 3%, sem variabilidade expressiva.

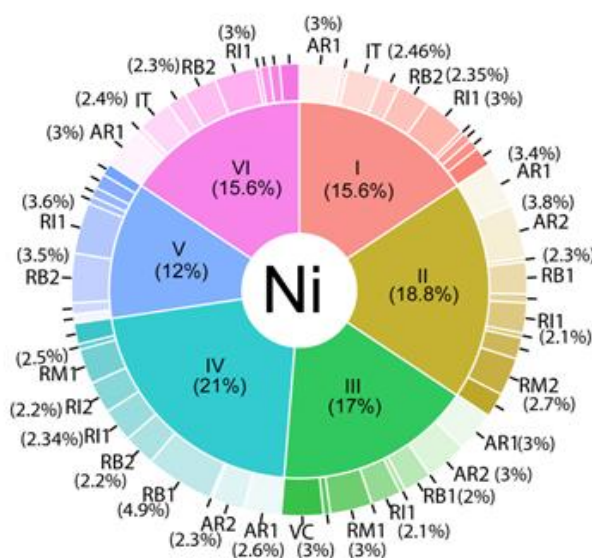


Figura 8 - Donut pie chart” apresenta a concentração de níquel (Ni) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.6 Chumbo (Pb)

A Tabela 9 apresenta os valores médios de Pb nos sedimentos superficiais, organizados por corpo hídrico e período amostrado, evidenciando variações ao longo dos diferentes períodos. No período I, o ponto que apresentou os maiores valores foi o RM2 ($17,85 \pm 5,11$ mg/kg), seguido por RM1 ($10,97 \pm 4,18$ mg/kg) e VC ($8,52 \pm 0,40$ mg/kg). O Pb apresentou queda em todos os pontos no período chuvoso, com variações menos expressivas quando comparados os períodos I, III, IV e V. No período III, as maiores concentrações foram observadas nos pontos VC ($11,88 \pm 1,24$ mg/kg) e RM2 ($18,95 \pm 6,26$ mg/kg), seguidos por outros pontos. Como observado anteriormente, houve uma diminuição nas concentrações de Pb na maioria dos pontos, com exceção de RB2, IT e RB1, que apresentaram aumento com a chegada do período chuvoso. Por outro lado, os pontos VC e RM2 mantiveram níveis semelhantes aos do período anterior. No período IV, os pontos que apresentaram maiores valores foram RM1 ($18,95 \pm 6,26$ mg/kg), seguido por RI1 ($12,70 \pm 1,89$ mg/kg) e RB1 ($11,77 \pm 1,13$ mg/kg). Já no período V, os maiores valores foram novamente observados nos pontos RM1 ($18,95 \pm 6,26$ mg/kg), RI1 ($12,70 \pm 1,89$ mg/kg) e RB2 ($11,77 \pm 1,13$ mg/kg).

Tabela 9 - Concentração chumbo (Pb) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam “*” somente uma réplica apresentou acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	0,01 \pm 0,001	11,34 \pm 1,09	11,77 \pm 1,13	1,07 \pm 0,18	2,80 \pm 0,47
RB2	1,79 \pm 0,26	0,01 \pm 0,002	4,32 \pm 4,82	9,09 \pm 3,84	13,20 \pm 1,53	2,25 \pm 0,15
IT	3,45 \pm 2,36	0,01 \pm 0,004	ND	3,57 \pm 2,97	11,65 \pm 1,47	2,97 \pm 0,44
RI1	2,12 \pm 0,39	0,01 \pm 0,001	10,30 \pm 0,80	12,70 \pm 1,89	13,77 \pm 1,76	2,37 \pm 0,53
RI2	2,77 \pm 2,39	ND	2,76 \pm 1,50	3,60 \pm 1,45	3,85 \pm 1,18	2,74 \pm 1,97
AR1	6,51 \pm 2,52	0,01 \pm 0,001	10,70 \pm 0,90	5,56 \pm 1,03	5,87 \pm 1,56	7,37 \pm 0,85
AR2	1,21 \pm 2,25	0,02 \pm 0,001	14,99 \pm 2,00	6,65 \pm 0,62	ND	6,06 \pm 0,40
RM1	10,97 \pm 4,18	0,02 \pm 0,01	11,52 \pm 1,71	18,95 \pm 6,26	12,49 \pm 7,87	ND
RM2	17,85 \pm 5,11	0,01 \pm 0,0001	20,76 \pm 8,66	2,89 \pm 1,90	10,27 \pm 7,02	1,24 \pm 0,23
VC	8,52 \pm 0,40	0,03 \pm 0,04	22,03 \pm 18,40	11,88 \pm 1,24	11,48 \pm 9,61	ND

O Pb (Figura 9), apresentou suas maiores concentrações nos períodos III (29%) e IV (24%), seguidos pelo V (19%), VI (14%) e VI (14%). Não foram observadas concentrações de chumbo nos sedimentos no período II. Os valores mais altos foram

encontrados nos pontos RM2 (5,5%) e VC (6%) no período III. No período IV, o ponto RM contribuiu com 5,2% sendo seguido pelos pontos RI (3,5%), RB1 (3,2%) e VC (3%). Já no período V os maiores valores foram nos pontos RM1(3,8%), RI1(3,4%) e RB2 (3,6%). De maneira geral os pontos dos períodos VI, o Pb apresentou valores muito semelhantes.

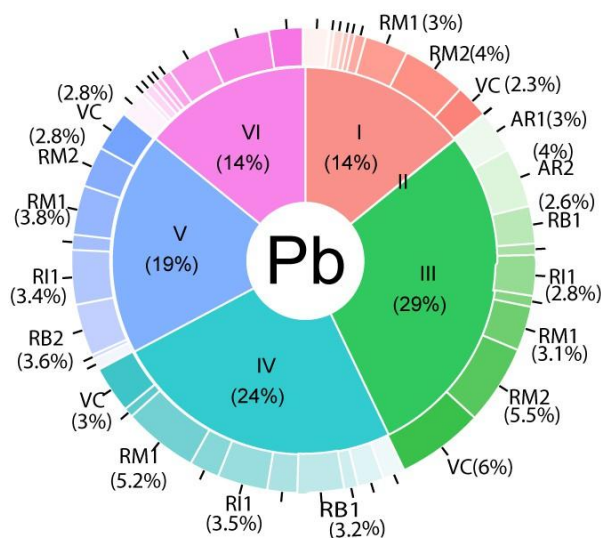


Figura 9 - Donut pie chart” apresenta a concentração de chumbo (Pb) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.7 Cromo (Cr)

Na Tabela 10, são apresentados os valores médios de Cr em sedimentos superficiais, onde as maiores concentrações foram encontradas no período III. Durante o período I, as maiores concentrações de Cr foram observadas nos pontos AR1 ($16,68 \pm 6,93$ mg/kg) e RM2 ($15,83 \pm 11,97$ mg/kg). Já na estação II, o ponto AR1 ($99,51 \pm 148,79$ mg/kg) apresentou os valores mais altos em comparação com os demais pontos analisados. O Cr atingiu suas maiores concentrações no período III, com destaque para os pontos VC ($33,11 \pm 13,18$ mg/kg), RM2 ($23,75 \pm 16,49$ mg/kg) e AR1 ($17,39 \pm 2,34$ mg/kg). Observou-se um aumento dos valores da estação III para a IV na maioria dos pontos analisados, sendo os maiores valores registrados nos pontos VC ($32,63 \pm 12,14$ mg/kg) e RM1 ($29,45 \pm 2,25$), sendo seguido pelo AR2 ($21,74 \pm 5,41$ mg/kg) RI1 ($22,91 \pm 4,02$ mg/kg) e RB1 ($22,65 \pm 2,69$ mg/kg). O período VI apresentou valores

muito semelhantes em relação ao IV, com exceção dos pontos RM1, RM2 e VC, que apresentaram uma diminuição em suas concentrações.

Tabela 10 - Concentração cromo (Cr) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	5,06 \pm 2,86	ND	9,36 \pm 4,68	22,65 \pm 2,69	9,04 \pm 10,29	26,91 \pm 6,56
RB2	6,28 \pm 1,20	ND	2,82 \pm 4,06	15,90 \pm 10,52	22,72 \pm 3,58	28,24 \pm 3,11
IT	6,15 \pm 0,92	ND	0,32 \pm 0,18	22,39 \pm 4,51	25,82 \pm 6,21	33,98 \pm 3,24
RI1	9,84 \pm 3,41	ND	10,85 \pm 1,13	22,91 \pm 4,02	19,60 \pm 4,74	28,61 \pm 4,31
RI2	12,05 \pm 11,46	ND	1,98 \pm 1,85	20,50 \pm 17,01	12,30 \pm 5,38	13,20 \pm 9,57
AR1	16,68 \pm 6,93	99,51 \pm 148,79	17,39 \pm 2,34	14,99 \pm 4,18	16,30 \pm 14,13	31,22 \pm 9,60
AR2	2,82 \pm 0,83	10,19 \pm 2,19	14,68 \pm 3,49	21,74 \pm 5,41	23,53 \pm 2,27	23,53 \pm 5,58
RM1	13,24 \pm 4,79	0,22 \pm 0,52	14,35 \pm 2,51	29,45 \pm 2,25	14,84 \pm 8,18	8,19 \pm 3,75
RM2	15,83 \pm 11,97	1,82 \pm 1,39	23,75 \pm 16,49	14,08 \pm 12,23	16,57 \pm 4,65	4,71 \pm 1,38
VC	7,83 \pm 3,40	3,66 \pm 2,09	33,11 \pm 13,18	32,63 \pm 12,14	14,11 \pm 5,24	4,90 \pm 3,72

Com mostrado na (Figura 10) Cr apresentou pouca variação entre os períodos, com as maiores concentrações registradas nos períodos III (17,1%) e IV (26,1%), seguidos pelos períodos V (15,4%), II (15,2%), I (13,1%) e VI (13,1%). No período II (15,2%), observam-se valores elevados de Cr no ponto AR1, representando 13% em comparação com os demais pontos. As maiores concentrações de Cr ocorreram no período III, com destaque para os pontos VC (4,4%), RM2 (2,3%) e AR1 (3,3%). Já no período IV, observou-se um aumento dos valores em relação à estação III na maioria dos pontos analisados, com destaque para os pontos VC (4,4%) e RM1 (4%). O período VI apresentou valores muito semelhantes ao IV, com exceção dos pontos RM1, RM2 e VC, que apresentaram uma diminuição em suas concentrações.

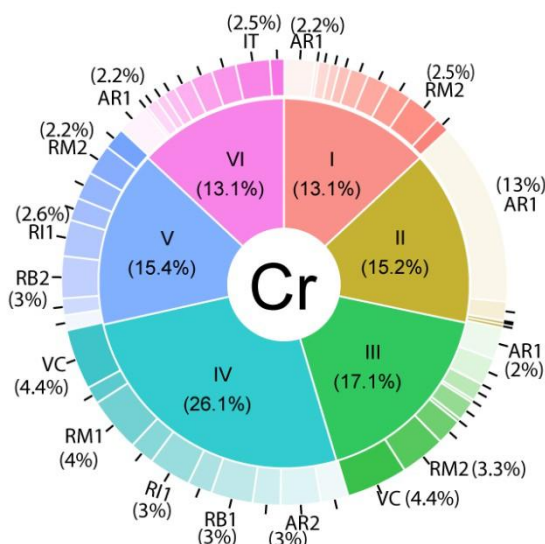


Figura 10 - Donut pie chart” apresenta a concentração de cromo (Cr) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.8 Cádmio (Cd)

Na Tabela 11, são apresentados os valores médios de Cd em sedimentos superficiais. Com exceção dos pontos que mantiveram estáveis as concentrações de Cd no sedimento superficial ao longo de todas as campanhas de amostragem, os demais apresentaram um pico marcante na primeira campanha de coleta (transição seco-chuvoso), seguido por uma intensa queda que se manteve ao longo das campanhas subsequentes (II, III, IV e V).

No período I, os pontos VC ($0,13 \pm 0,05$ mg/kg) e AR1 ($0,11 \pm 0,02$ mg/kg) apresentaram os maiores valores. Já no período VI, o Cd atingiu suas maiores concentrações nos pontos VC ($41,08 \pm 3,53$ mg/kg) e AR1 ($27,45 \pm 8,28$ mg/kg).

Tabela 11 - Concentração cádmio (Cd) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IT	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	0,08 \pm 0,07	ND	ND	ND	ND	ND

RI2	0,04±0,01	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	0,11±0,02	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	0,05±0,05	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	0,04±0,01	ND	ND	ND	ND	ND
RM2	0,07±0,01	ND	ND	ND	ND	ND
VC	0,13±0,05	ND	ND	ND	ND	ND

As concentrações de Cd (Figura 11), sua ocorrência no sedimento superficial foi observada apenas nos períodos I. A maioria dos pontos contribuiu de forma semelhante na porcentagem global de Cd, sendo os de maior destaque os pontos VC (28,9%) e AR1 (24,9%), nos dois períodos amostrados.

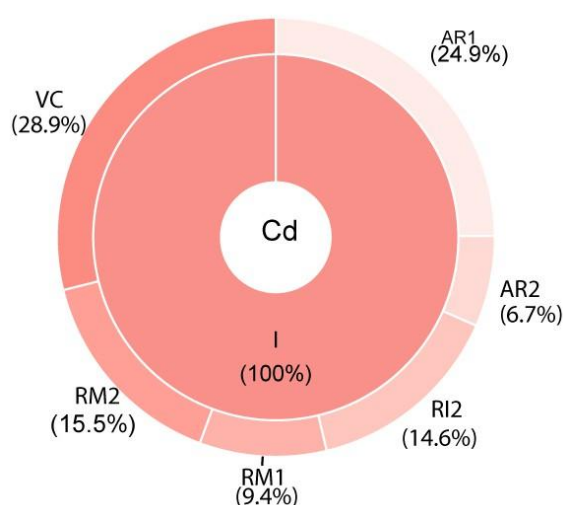


Figura 11 - Donut pie chart” apresenta a concentração de cádmio (Cd) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional (La Niña); II – Chuvoso (La Niña); III – transicional (La Niña); IV – Seco (La Niña); V – Chuvoso (El Niño) a VI – Seco (El Niño)), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.9 Mercúrio (Hg)

Na Tabela 12, são apresentados os valores médios de Hg, onde as maiores concentrações foram encontradas no período III. Não houve ocorrência de Hg nos períodos II e IV. Já na estação III, observam-se os maiores valores de Hg no ponto VC ($1,98 \pm 1,01$ mg/kg), seguido pelos pontos AR1 ($1,88 \pm 0,84$ mg/kg), AR2 ($1,21 \pm 0,98$ mg/kg) e RB1 ($1,17 \pm 0,58$ mg/kg). No período V, os pontos RI1 ($1,93 \pm 0,33$ mg/kg) e RI2 ($0,86 \pm 0,64$ mg/kg) apresentaram as maiores concentrações. Já na estação VI, os pontos AR1 ($0,82 \pm 0,48$ mg/kg) e It ($0,95 \pm 0,69$ mg/kg) apresentaram os maiores valores.

Tabela 12 - Concentração mercúrio (Hg) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III –

Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño. Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,09 \pm 0,04	ND	1,17 \pm 0,58	ND	ND	ND
RB2	0,11 \pm 0,04	ND	1,13 \pm 1,00	ND	ND	ND
IT	0,11 \pm 0,02	ND	ND	ND	ND	0,95 \pm 0,69
RI1	0,10 \pm 0,04	ND	0,47 \pm 0,18	ND	1,93 \pm 0,33	ND
RI2	0,04 \pm 0,03	ND	ND	ND	0,86 \pm 0,64	0,00 \pm 0,00
AR1	0,64 \pm 0,44	ND	1,88 \pm 0,84	ND	0,29 \pm 0,25	0,82 \pm 0,48
AR2	0,22 \pm 0,44	ND	1,21 \pm 0,98	ND	ND	0,25 \pm 0,016
RM1	0,11 \pm 0,05	ND	ND	ND	ND	ND
RM2	0,23 \pm 0,09	ND	0,32 \pm 0,07	ND	ND	0,24 \pm 0,08
VC	0,08 \pm 0,04	ND	1,98 \pm 1,01	ND	ND	ND

O Hg apresentou (Figura 12), as maiores concentrações no período III (59%) sendo seguido pelo VI (14%), I (14%) e V (13,1%), não havendo ocorrência de Hg nos períodos II e IV, Durante a estação I, o Hg foi encontrado em maiores concentrações no AR1, que contribuiu com 5,5% do total de Hg observado neste período, Os maiores valores de Hg foram encontrados no período III nos pontos AR1 (16%), VC (14%), AR2 (10%) e RB1 (7%), Enquanto no período VI, o ponto AR1 contribuiu com 5% e It com 5,5%,

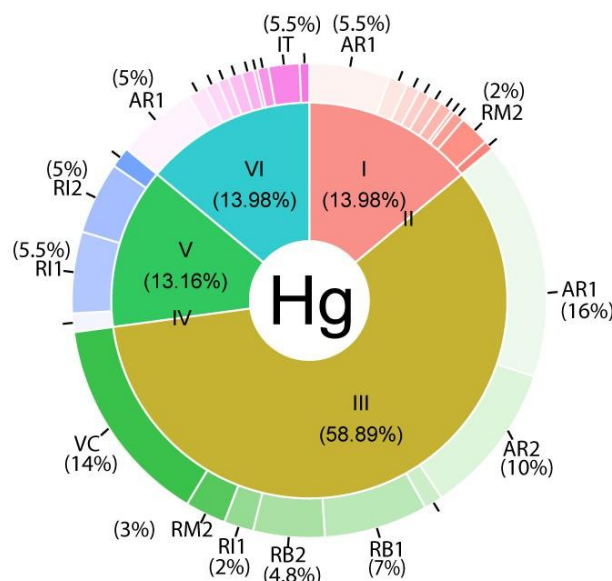


Figura 12 – “Donut pie chart” apresenta a concentração de mercúrio (Hg) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.10 Arsênio (As)

A Tabela 13 apresenta os valores médios de As nos sedimentos superficiais, por corpo hídrico e período amostrado. Os dados mostram um aumento nas concentrações de As do período Transicional I até o período III onde esse último apresentou os maiores valores nos pontos RM1 ($6,55 \pm 1,70$ mg/kg), RM2 ($5,61 \pm 3,73$ mg/kg) e VC ($4,53 \pm 2,26$ mg/kg). Durante a estação II os pontos VC ($7,67 \pm 4,28$ mg/kg) e RB2 ($5,00 \pm 10,14$ mg/kg), apresentaram as maiores concentrações. No período V, não houve ocorrência detectável desse metaloide. Com a diminuição da precipitação na estação VI, foi observado um aumento dos valores na maioria dos pontos, com exceção do rio RI II e VC não apresentando grandes variação com maiores valores encontrados. No período IV, os pontos apresentaram contribuições muito semelhante para a porcentagem global, sendo RM1 ($6,55 \pm 1,70$ mg/kg), RM2 ($5,61 \pm 3$ mg/kg,73) e VC ($4,53 \pm 2,26$ mg/kg) que apresentaram maior porcentagem de contribuição.

Tabela 13 -Concentração arsênio (As) no sedimento (mg/kg) coletado em distintos locais ao longo de diferentes períodos (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño.

Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	2,42 \pm 0,17	1,93 \pm 0,97	3,70 \pm 0,86	ND	0,23 \pm 0,03
RB2	ND	1,25 \pm 0,47	5,00 \pm 10,14	4,34 \pm 1,84	ND	0,48 \pm 0,08
IT	3,36*	0,94 \pm 0,57	0,23 \pm 0,16	2,74 \pm 1,97	ND	0,44 \pm 0,19
RI1	3,31 \pm 4,68	1,52 \pm 0,27	2,87 \pm 1,44	3,66 \pm 0,49	ND	0,40 \pm 0,08
RI2	1,26 \pm 1,23	0,48 \pm 0,22	0,69 \pm 0,38	2,60 \pm 2,25	ND	ND
AR1	1,42 \pm 0,64	2,29 \pm 0,54	2,42 \pm 1,35	3,75 \pm 1,75	ND	0,71 \pm 0,30
AR2	0,12 \pm 0,09	2,80 \pm 0,49	3,49 \pm 0,82	3,81 \pm 1,06	ND	0,58 \pm 0,07
RM1	1,28 \pm 0,95	1,86 \pm 2,07	0,57 \pm 0,19	6,55 \pm 1,70	ND	ND
RM2	2,22 \pm 2,03	2,89 \pm 0,53	0,48 \pm 0,36	5,61 \pm 3,73	ND	0,19 \pm 0,03
VC	1,20 \pm 0,48	3,50 \pm 1,76	7,67 \pm 4,28	4,53 \pm 2,26	ND	ND

O As (Figura 13) apresentou maiores valores no período IV (40,5%), seguido pelo período III (24%) e II (19,5%) então havendo registro de as no período V. Na estação III o ponto que apresentou maior concentração foi VC com 7 % de contribuição para o valor total do período, os demais pontos apresentaram teores semelhantes, No período IV, os pontos apresentaram contribuições muito semelhante para a porcentagem global, sendo RM1 (6,5%), RM2 (4,6%) e VC (4,5%) que apresentaram maior porcentagem de contribuição.

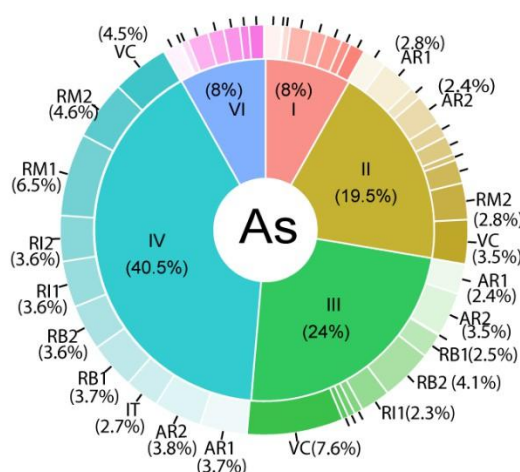


Figura 13 - Donut pie chart” apresenta a concentração de arsênio (As) em sedimento nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.3.1.11 *Análise das componentes principais (PCA)*

A análise da PCA biplot mostra as pontuações PCA das variáveis explicativas como vetores, em cores dependentes da contribuição, representando os metais. Dados do mesmo lado de uma determinada variável devem ser interpretados como tendo uma alta contribuição para ela. A magnitude dos vetores (linhas) mostra a força de sua contribuição para cada PC. Vetores apontando em direções semelhantes indicam variáveis positivamente correlacionadas, vetores apontando em direções opostas indicam variáveis negativamente correlacionadas e vetores em ângulos aproximadamente retos indicam baixa ou nenhuma correlação.

O Componente Principal 1 (CP1) está associado principalmente aos metais Mn e Al. A alta carga positiva desses metais em CP1 indica que eles covariam positivamente, ou seja, tendem a aumentar ou diminuir juntos. Essa covariação pode ser explicada por processos geoquímicos semelhantes ou por fontes comuns de contaminação. A análise da figura 14 revela que o período V se destaca dos demais, posicionando-se distante no espaço bidimensional definido pelas CP1 e CP2. Essa distinção indica que o período IV apresenta um perfil de metais significativamente diferente dos outros períodos. No que se refere à contribuição dos metais na variabilidade dos dados, observamos que no período III, o bário (Ba), ferro (Fe), níquel (Ni) e chumbo (Pb), apresentam alta contribuição. Em seguida, temos Arsênio (As) no período II. Por outro lado, mercúrio (Hg) e cádmio (Cd) demonstram baixa contribuição, provavelmente devido à sua presença em um período específico.

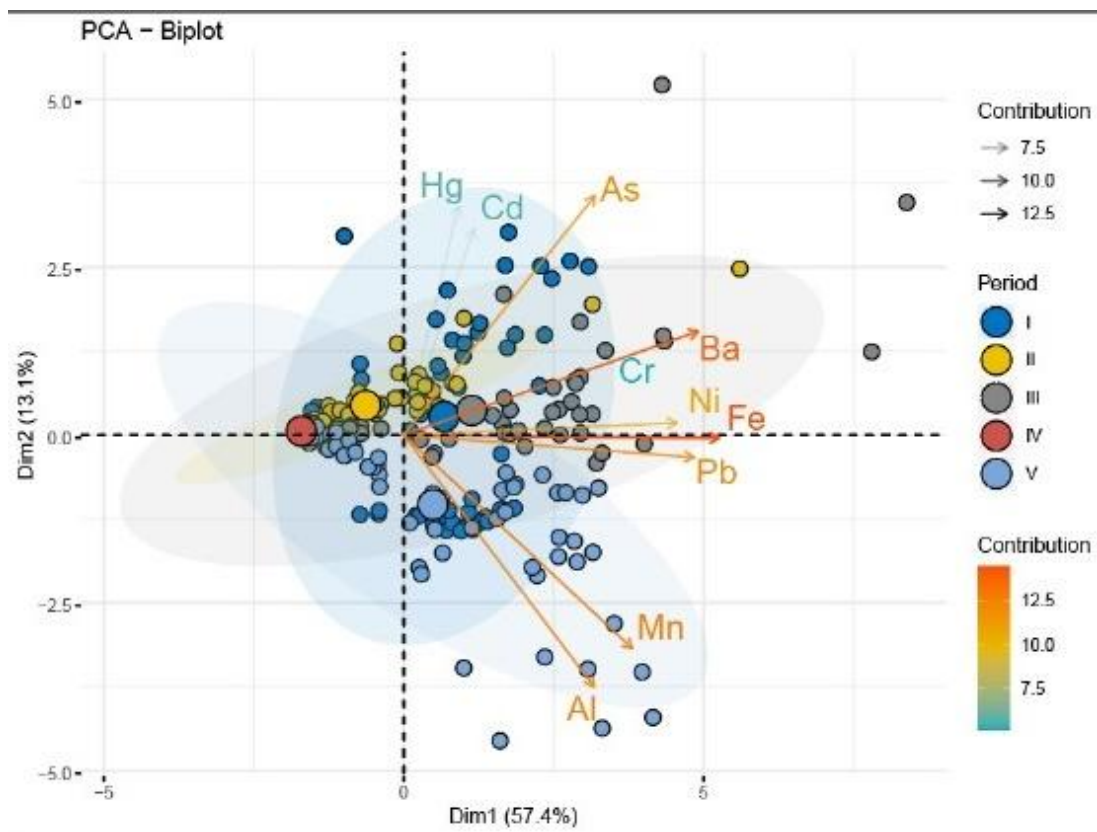


Figura 14 - Análise de componentes principais (PCA) de metais presentes no sedimento. A análise revelou duas componentes principais que explicam mais de 70% da variância acumulada, fornecendo insights valiosos sobre as relações entre os metais e seus impactos ao longo de diferentes períodos.

6.3.1.12 Análises de redundância (RDA)

Os eixos 1 e 2 explicam 71,86 e 28,13 % da variação total, respectivamente (Figura 15). Os resultados provenientes da seleção de variáveis (*forward selection*) e das permutações de Monte Carlo indicam correlação significativa entre as variáveis período ($F=31,25$; $p<0,001$) e pontos de coleta ($F=6,38$; $p<0,001$) e as concentrações de metais, sendo que estas duas variáveis respondem 39% de toda a variação,

Analisando a dispersão dos dados, destacamos a concentração de Fe no ponto VC encontrada no período III sendo diferente dos demais pontos de coleta. Do mesmo modo, concentração de Al no ponto RM1 encontrada no período V sendo diferente dos demais pontos de coleta.

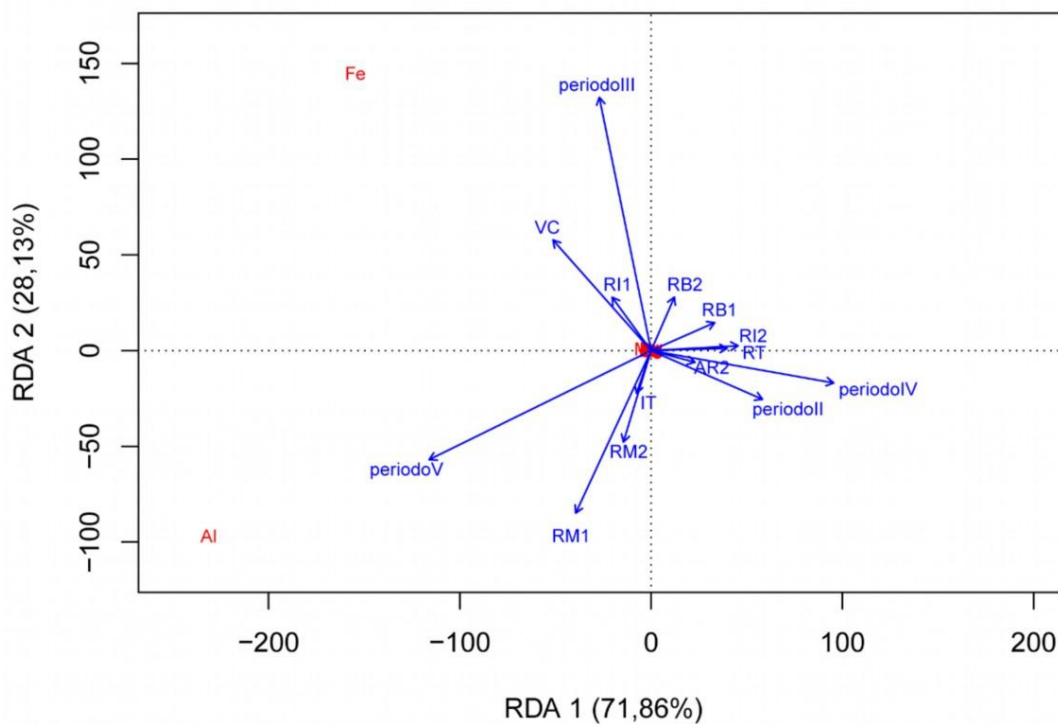


Figura 15 - Gráfico de ordenação de análise de redundância (RDA) ilustrando os principais fatores determinantes (após a eliminação de variáveis menos importantes) nos diferentes períodos de coleta. O modelo RDA caracterizou as diferenças dos clusters periódicos, revelando detalhes das concentrações dos diferentes metais em sedimento nos diferentes pontos. O teste de Monte Carlo dos eixos gerados da RDA foi significativo ($p = 0,005$).

6.4 ÁGUA SUPERFICIAL

6.4.1 Variação espaço-temporal dos metais nas águas superficiais

6.4.1.1 Alumínio (Al)

O Al predominou na fração dissolvida (na grande maioria dos períodos e pontos analisados). Os períodos chuvosos (II e V) apresentaram as menores concentrações (Tabela 14). No entanto, algumas exceções foram observadas: os pontos VC ($2,93 \pm 3,42$ mg/L) e RM2 ($13,52 \pm 0,87$ mg/L) apresentaram picos de Al na fração particulada no período II, comportamento oposto ao dos demais períodos para esses pontos. Os pontos RI2, RB1 e RB2 também mostraram maior presença de Al particulado durante o período chuvoso II em comparação aos demais, embora com valores inferiores aos registrados nos pontos VC e RM2. No período III, o ponto RM2 ($1,24 \pm 1,39$ mg/L), seguido por VC ($0,33 \pm 0,34$ mg/L), apresentou as maiores concentrações de Al na fração dissolvida. Esses mesmos pontos também mostraram valores relevantes de alumínio dissolvido nos períodos IV (VC – $0,39 \pm 0,45$ mg/L; RM2 – $0,29 \pm 0,01$ mg/L) e V (VC – $0,30 \pm 0,24$ mg/L; RM2 – $0,28 \pm 0,0001$ mg/L). Já na estação VI, os maiores valores foram observados nos pontos VC ($0,49 \pm 0,02$ mg/L), RI1 ($0,22 \pm 0,0001$ mg/L) e RB2 ($0,49 \pm 0,28$ mg/L).

Tabela 14 - Concentração de alumínio (Al) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um “*” indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,41 \pm 0,36	0,65 \pm 0,32	0,11 \pm 0,03	0,09 \pm 0,03	0,10 \pm 0,01	0,10 \pm 0,06
RB2	0,16 \pm 0,12	0,70 \pm 0,39	0,09 \pm 0,05	0,09 \pm 0,02	0,11 \pm 0,03	0,15 \pm 0,12
IT	0,22 \pm 0,12	0,47 \pm 0,29	0,35 \pm 0,72	0,09 \pm 0,02	0,47 \pm 0,29	0,08 \pm 0,04
RI1	1,57 \pm 0,69	0,69 \pm 0,43	0,06 \pm 0,01	0,09 \pm 0,02	0,07 \pm 0,01	0,08 \pm 0,06
RI2	0,96 \pm 0,83	1,66 \pm 0,78	0,08 \pm 0,02	0,05 \pm 0,01	0,07 \pm 0,02	0,08 \pm 0,03
AR1	0,52 \pm 0,37	0,42 \pm 0,29	0,36 \pm 0,61	0,13 \pm 0,03	0,13 \pm 0,05	0,12 \pm 0,03
AR2	0,76 \pm 0,31	0,38 \pm 0,25	0,10 \pm 0,06	0,09 \pm 0,03	0,13 \pm 0,02	0,17 \pm 0,03
RM1	0,99 \pm 0,85	0,23 \pm 0,09	0,13 \pm 0,03	0,15 \pm 0,03	0,13 \pm 0,02	0,22 \pm 0,07
RM2	1,11 \pm 0,74	13,63 \pm 07,42	0,95 \pm 0,75	0,85 \pm 0,61	0,55 \pm 0,17	ND
VC	2,93 \pm 03,01	2,93 \pm 03,01	0,36 \pm 0,29	0,52 \pm 0,48	0,25 \pm 0,14	1,15 \pm 01,09
CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,37 \pm 0,04	ND	0,17 \pm 0,10	0,08 \pm 0,02	nd	0,25 \pm 0,16
RB2	0,12 \pm 0,16	ND	0,06 \pm 0,00	0,09 \pm 0,01	0,11 \pm 0,04	0,49 \pm 0,28
IT	0,28 \pm 0,08	0,22 \pm 0,01	0,11 \pm 0,01	0,10 \pm 0,03	0,12 \pm 0,05	0,22 \pm 0,0001
RI1	0,51 \pm 0,48	ND	0,05 \pm 0,01	0,07 \pm 0,01	0,06 \pm 0,02	0,15 \pm 0,09
RI2	0,30 \pm 0,09	ND	0,05 \pm 0,01	0,06 \pm 0,0001	0,12 \pm 0,08	0,11 \pm 0,04
AR1	0,19 \pm 0,01	0,05 \pm 0,02	0,12 \pm 0,06	0,12 \pm 0,02	0,13 \pm 0,05	0,28 \pm 0,04
AR2	0,29 \pm 0,17	0,05 \pm 0,01	0,11 \pm 0,04	0,11 \pm 0,02	0,26 \pm 0,05	0,25 \pm 0,02
RM1	0,32 \pm 0,16	ND	0,15 \pm 0,04	0,16 \pm 0,06	0,15 \pm 0,04	0,36 \pm 0,0001
RM2	0,29 \pm 0,03	0,11 \pm 0,15	1,24 \pm 01,39	0,29 \pm 0,01	0,28 \pm 0,0001	ND
VC	0,30 \pm 0,16	ND	0,33 \pm 0,34	0,39 \pm 0,45	0,30 \pm 0,24	0,49 \pm 0,02
CONCENTRAÇÃO DE ALUMÍNIO PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0.2454*	0.65 \pm 0.04	ND	0.02 \pm 0.01	0.06 \pm 0.06	ND
RB2	0.15*	0.70 \pm 0.09	0.03 \pm 0.03	0.006	0.01*	ND
IT	ND	0.25 \pm 0.009	0.54	0.005	0.03*	ND
RI1	1.06 \pm 01.05	0.69 \pm 0.44	0.01 \pm 0.01	0.02 \pm 0.002	0.02*	0.01 \pm 0.02
RI2	0.66 \pm 0.18	1.66 \pm 0.87	0.03 \pm 0.02	ND	0.01*	0.02*
AR1	0.33 \pm 0.06	0.36 \pm 0.27	0.54*	0.04*	ND	0.001*
AR2	0.49 \pm 0.07	0.34 \pm 0.06	0.001*	0.0079*	ND	ND
RM1	1.55*	0.23 \pm 0.11	ND	ND	ND	ND
RM2	0.83 \pm 0.91	13.52 \pm 07.87	0.22*	0.65 \pm 0.66	0.0005*	ND
VC	0.44*	2.93 \pm 03.42	0.03 \pm 0.03	0.13 \pm 0.17	ND	0.66 \pm 0.53

foram observados no ponto AR2, seguido por RM1 e VC. O rio Arienga apresentou os maiores valores de ferro dissolvido (AR1 – $1,12 \pm 0,06$ mg/L e AR2 – $1,10 \pm 0,60$ mg/L). Esperava-se que os valores fossem semelhantes aos encontrados no período II (chuvoso de 2022); no entanto, devido às diferentes condições climáticas — La Niña em 2022 e El Niño em 2023 — não houve um aumento expressivo na fração particulada.

Tabela 15 - Concentração de ferro (Fe) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE FERRO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,39 \pm 0,09	3,74 \pm 0,22	2,67 \pm 0,27	1,48 \pm 0,12	0,27 \pm 0,11	0,54 \pm 0,20
RB2	0,25 \pm 0,07	3,66 \pm 0,10	2,36 \pm 0,13	1,30 \pm 0,10	0,41 \pm 0,12	0,63 \pm 0,23
IT	0,26 \pm 0,07	3,32 \pm 0,06	1,77 \pm 0,87	1,10 \pm 0,22	0,32 \pm 0,06	0,29 \pm 0,13
RI1	0,26 \pm 0,13	3,78 \pm 0,15	2,40 \pm 0,04	0,96 \pm 0,50	0,23 \pm 0,03	0,42 \pm 0,13
RI2	0,20 \pm 0,09	3,84 \pm 0,16	2,39 \pm 0,06	0,50 \pm 0,02	0,17 \pm 0,06	0,29 \pm 0,18
AR1	0,16 \pm 0,07	1,33 \pm 0,21	0,54 \pm 0,02	1,05 \pm 0,21	0,58 \pm 0,19	0,50 \pm 0,06
AR2	0,23 \pm 0,02	1,47 \pm 0,18	0,61 \pm 0,20	1,07 \pm 0,09	0,64 \pm 0,17	0,51 \pm 0,04
RM1	0,83 \pm 0,76	4,66 \pm 0,19	3,29 \pm 0,26	1,77 \pm 0,59	0,88 \pm 0,16	0,11 \pm 0,84
RM2	0,10 \pm 0,02	3,22 \pm 0,38	1,68 \pm 0,03	0,59 \pm 0,08	0,20 \pm 0,06	0,00 \pm 0,00
VC	4,59 \pm 0,20	4,59 \pm 0,20	2,79 \pm 0,29	1,17 \pm 0,81	0,50 \pm 0,11	0,102 \pm 0,42
CONCENTRAÇÃO DE FERRO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,31 \pm 0,09	0,31 \pm 0,09	0,39 \pm 0,06	0,71 \pm 0,17	0,40 \pm 0,01	0,35 \pm 0,15
RB2	0,12 \pm 0,08	0,12 \pm 0,08	0,22 \pm 0,05	0,69 \pm 0,13	0,48 \pm 0,17	0,56 \pm 0,22
IT	0,30 \pm 0,00	0,30 \pm 0,00	0,24 \pm 0,17	0,63 \pm 0,31	0,61 \pm 0,40	0,37 \pm 0,09
RI1	0,20 \pm 0,09	0,22 \pm 0,09	0,42 \pm 0,46	0,51 \pm 0,06	0,21 \pm 0,04	0,25 \pm 0,16
RI2	0,22 \pm 0,03	0,22 \pm 0,03	0,217	0,41 \pm 0,03	0,33 \pm 0,02	0,22 \pm 0,20
AR1	0,20 \pm 0,04	0,20 \pm 0,04	0,86 \pm 0,34	0,74 \pm 0,24	0,52 \pm 0,16	0,98 \pm 0,15
AR2	0,30 \pm 0,00	0,30 \pm 0,00	0,53 \pm 0,11	0,74 \pm 0,01	0,97 \pm 0,07	0,12 \pm 0,06
RM1	0,44 \pm 0,36	0,44 \pm 0,36	0,33 \pm 0,32	0,56 \pm 0,84	1,59 \pm 0,21	0,110 \pm 0,60
RM2	0,11 \pm 0,00	0,11 \pm 0,00	0,13 \pm 0,06	0,34 \pm 0,03	0,29 \pm 0,03	ND
VC	0,18 \pm 0,12	0,18 \pm 0,12	0,28 \pm 0,17	0,109 \pm 0,109	0,61 \pm 0,40	0,81 \pm 0,06
CONCENTRAÇÃO DE FERRO PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,20*	0,237 \pm 0,09	0,228 \pm 0,41	0,77 \pm 0,02	ND	0,19 \pm 0,07
RB2	0,13 \pm 0,02	0,234 \pm 0,09	0,214 \pm 0,12	0,61 \pm 0,03	0,014151	0,07 \pm 0,04
IT	ND	2,08 \pm 0,05	1,86 \pm 0,06	0,47 \pm 0,11	ND	ND
RI1	0,129	2,42 \pm 0,08	1,98 \pm 0,50	0,45 \pm 0,58	ND	0,17 \pm 0,15
RI2	0,20	2,49 \pm 0,09	2,28 \pm 0,08	0,09 \pm 0,04	ND	0,07 \pm 0,02
AR1	ND	0,26 \pm 0,19	ND	0,27 \pm 0,03	0,06 \pm 0,08	ND

AR2	0,12*	0,42±0,18	0,22*	0,33±0,07	ND	ND
RM1	0,51±0,69	3,04±0,14	2,96±0,59	0,22±0,09	ND	0,10*
RM2	0,008±0,01	2,09±0,20	1,54±0,08	0,25±0,06	ND	ND
VC	0,05*	3,00±0,15	2,50±0,21	0,07±0,05	ND	0,21±0.02

O Fe (

Figura 17) no período I (transição estiagem -chuvoso), há uma maior concentração de Fe dissolvido (9,5%) em relação a forma particulada (2%). Nos períodos II (chuvoso de 2022) e III (transição chuvoso-estiagem) houve um aumento das concentrações de Fe particulado, apresentando maiores concentrações no período II, sem grandes alterações com a chegada do período III. No período IV, houve um aumento nos valores do Fe dissolvido acompanhado por uma queda na fração particulada, onde o ponto RM1 apresentou maior valor 6%. No período V (chuvoso de 2023), esperava-se valores semelhantes aos encontrados no período II (chuvoso de 2022), novamente o ponto RM1 apresentou maiores valores 6%. No entanto, devido a condições climáticas diferentes (La Niña em 2022 e El Niño em 2023), não houve um grande aumento na fração particulada,

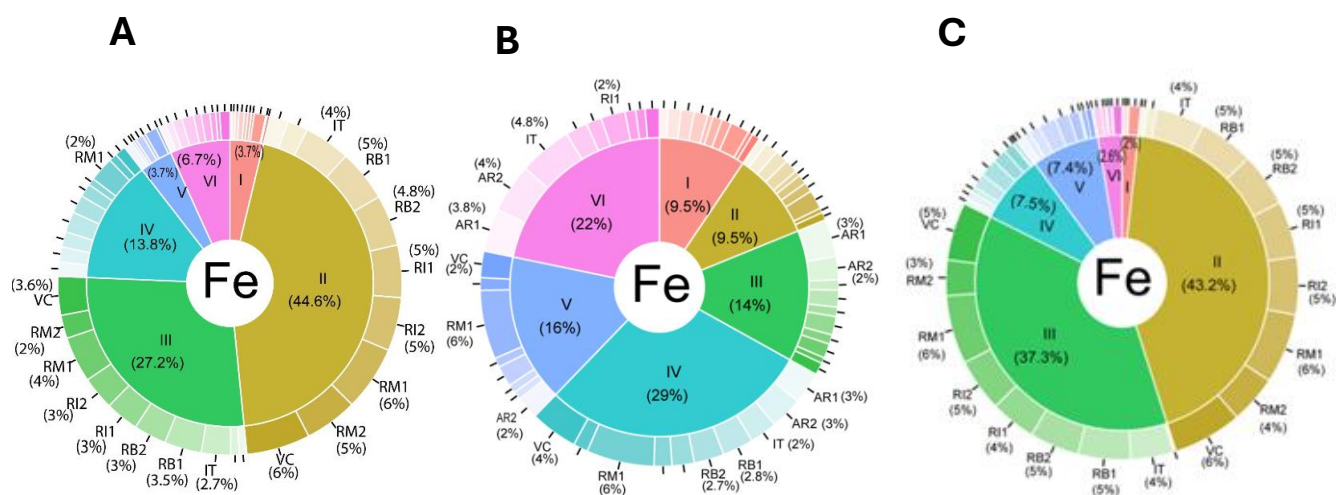


Figura 17 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Fe na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.3 Manganês (Mn)

O Mn (Tabela 17), de forma geral, manteve um equilíbrio entre as frações dissolvida e particulada ao longo dos períodos e nos diferentes pontos, com algumas

exceções. O ponto VC ($0,49 \pm 0,672$ mg/L) apresentou um pico de Mn na fração dissolvida no período III (transição seco–chuvoso), seguido por RM1 ($0,09 \pm 0,016$ mg/L).

No período VI (estação seca de 2023), VC ($0,13 \pm 0,006$ mg/L) apresentou concentrações mais elevadas na fração particulada. Já o ponto RM ($0,06 \pm 0,082$ mg/L) teve um pico de Mn particulado no período I (transição seco–chuvoso).

Na estação II, observou-se um aumento da fração particulada acompanhado por uma diminuição da fração dissolvida, com destaque para o ponto AR2 ($0,05 \pm 0,062$ mg/L), seguido por RB2 ($0,02 \pm 0,01$ mg/L).

Não houve ocorrência da fração particulada no período III. De maneira geral, as maiores concentrações de Mn na forma particulada foram registradas nos períodos mais chuvosos (II e V), provavelmente devido ao aumento dos processos de lixiviação e erosão.

Tabela 16 - Concentração de manganês (Mn) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média ± desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,02±0,004	0,04±0,006	0,05±0,017	0,04±0,007	0,03±0,009	0,04±0,009
RB2	0,03±0,006	0,02±0,008	0,02±0,014	0,03±0,008	0,03±0,012	0,07±0,015
IT	0,04±0,005	0,03±0,003	0,04±0,018	0,04±0,012	0,03±0,003	0,05±0,003
RI1	0,03±0,005	0,03±0,006	0,02±0,003	0,02±0,002	0,02±0,007	0,04±0,002
RI2	0,02±0,005	0,03±0,032	0,01±0,001	0,01±0,001	0,02±0,005	0,03±0,004
AR1	0,03±0,011	0,04±0,007	0,05±0,005	0,04±0,015	0,03±0,013	0,02±0,004
AR2	0,01±0,002	0,07±0,108	0,02±0,007	0,03±0,012	0,03±0,007	0,03±0,001
RM1	0,09±0,071	0,05±0,008	0,08±0,015	0,08±0,010	0,08±0,007	0,14±0,026
RM2	0,01±0,005	0,00±0,001	0,0005±0,0001	0,00±0,001	0,001±0,0004	0,0001±0,00001
VC	0,07±0,056	0,07±0,056	0,11±0,108	0,12±0,114	0,09±0,086	0,18±0,151
CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,02±0,006	0,03±0,004	0,05±0,024	0,02±0,001	0,04±0,018	0,03±0,012
RB2	0,03±0,007	0,02±0,002	0,02±0,020	0,02±0,007	0,03±0,020	0,05±0,006
IT	0,03±0,006	0,03±0,003	0,05±0,004	0,03±0,000	0,05±0,019	0,04±0,000
RI1	0,02±0,005	0,02±0,006	0,02±0,004	0,01±0,001	0,01±0,000	0,02±0,007
RI2	0,02±0,0004	0,01±0,008	0,01±0,001	0,01±0,0003	0,03±0,011	0,02±0,002
AR1	0,02±0,013	0,03±0,006	0,05±0,010	0,03±0,021	0,03±0,018	0,02±0,005
AR2	0,01±0,003	0,02±0,001	0,02±0,005	0,03±0,009	0,06±0,014	0,03±0,001
RM1	0,07±0,050	0,04±0,001	0,09±0,016	0,06±0,014	0,06±0,004	0,10±0,043
RM2	0,006±0,002	ND	0,0002±0,0003	0,0028±0,0001	0,0007±0,0001	ND
VC	0,06±0,043	ND	0,49±0,672	0,09±0,124	0,09±0,104	0,05±0,005
CONCENTRAÇÃO DE MANGANÊS PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,0005±0,001	0,01±0,003	ND	0,02±0,006	0,002*	0,01±0,003
RB2	0,0033±0,003	0,01±0,002	ND	0,0110±0,004	0,01*	0,02±0,009
IT	0,004±0,002	0,008±0,0005	ND	0,008±0,0009	ND	0,008±0,002
RI1	0,001±0,001	0,02±0,010	ND	0,02±0,022	0,005±0,004	0,017±0,008
RI2	0,002±0,002	0,01±0,004	ND	ND	0,0004*	0,01±0,003
AR1	0,0002±0,001	0,01±0,001	0,005*	0,001±0,0005	0,0008*	0,00025*
AR2	0,006*	0,05±0,062	0,001*	0,02±0,006	ND	ND
RM1	0,06±0,082	0,01±0,004	0,002*	0,02±0,022	0,02±0,008	0,04±0,048
RM2	0,0034±0,002	0,0008*	ND	0,0110±0,004	ND	ND
VC	0,01*	0,003*	ND	0,02±0,022	0,005±0,003	0,13±0,069

O Mn (Figura 18B) apresentou maiores concentrações (período I) das formas particulada (16%) em relação a dissolvida (13%), onde o ponto RM1 com valores maiores 11%. Durante o período II há um aumento da forma particulada acompanhando com uma queda da forma dissolvida, onde os pontos AR2 (9%) e RI2 (4,1%) apresentaram maiores valores. O Mn dissolvido demonstrou maiores concentrações no período III (37,5%) com destaque para os pontos VC 22,5% e RM 4,2%. No período IV era esperado uma manutenção da forma dissolvida, porém foi observado diminuição 37,5% para 14%, essa redução foi acompanhada com um aumento da forma particulada. No período V os pontos RM1(4,2%) e VC (4,1%) foram os que mais se destacaram Figura 18C), No período V e VI houve uma manutenção da forma particulada ambos com 21%, onde os pontos que mais se destacou foi o VC (7,4%) durante o período VI.

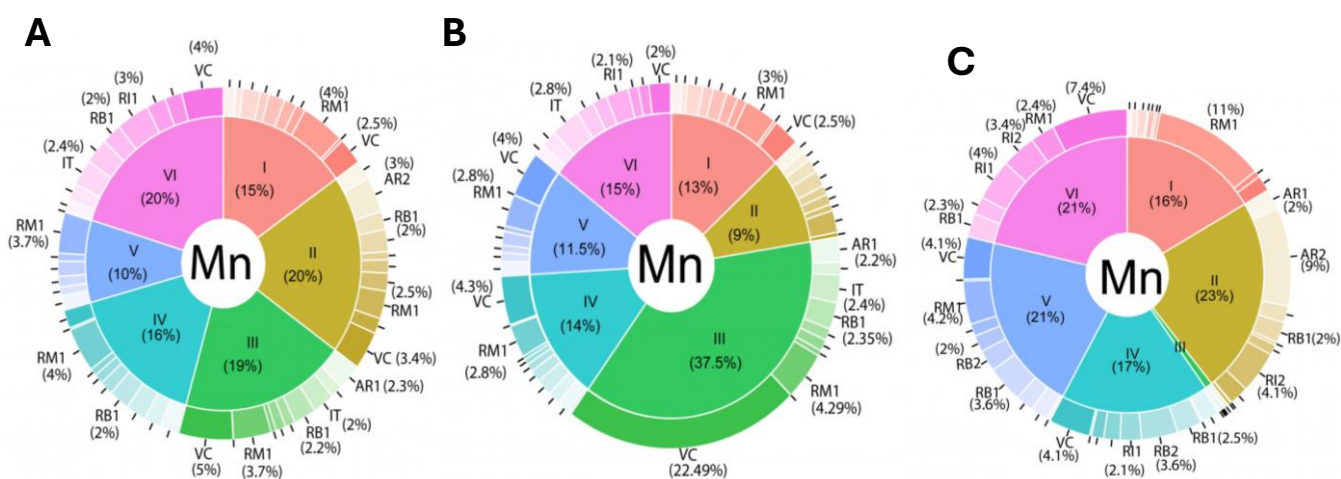


Figura 18 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Mn na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.4 Bário (Ba)

O Ba (Tabela 17) apresenta um comportamento diferente dos outros metais analisados, com maior concentração na fração particulada no período I com grande contribuição dos AR1(0.024±0.012 mg/l), sendo seguido por VC RB 2 (0.13±0.02 mg/l), e uma pequena ocorrência da fração dissolvida no período I. No entanto, com o início das

chuvas, houve um aumento na concentração dissolvida durante o período chuvoso, contrariando a expectativa de um menor valor de Ba dissolvido. Ao longo dos períodos, ocorreu um aumento na fração dissolvida, um comportamento bastante distinto dos outros metais analisados.

Tabela 17 - Concentração de bário (Ba) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE BÁRIO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,39 \pm 0,09	3,74 \pm 0,22	2,67 \pm 0,27	1,48 \pm 0,12	0,27 \pm 0,11	0,54 \pm 0,20
RB2	0,25 \pm 0,07	3,66 \pm 0,10	2,36 \pm 0,13	1,30 \pm 0,10	0,41 \pm 0,12	0,63 \pm 0,23
IT	0,26 \pm 0,07	3,32 \pm 0,06	1,77 \pm 0,87	1,10 \pm 0,22	3,32 \pm 0,06	0,29 \pm 0,13
RI1	0,26 \pm 0,13	3,78 \pm 0,15	2,40 \pm 0,04	0,96 \pm 0,50	0,23 \pm 0,03	0,42 \pm 0,13
RI2	0,20 \pm 0,09	3,84 \pm 0,16	2,39 \pm 0,06	0,50 \pm 0,02	0,17 \pm 0,06	0,29 \pm 0,18
AR1	0,16 \pm 0,07	1,33 \pm 0,21	0,54 \pm 0,02	1,05 \pm 0,21	0,58 \pm 0,19	0,50 \pm 0,06
AR2	0,23 \pm 0,02	1,47 \pm 0,18	0,61 \pm 0,20	1,07 \pm 0,09	0,64 \pm 0,17	0,51 \pm 0,04
RM1	0,83 \pm 0,76	4,66 \pm 0,19	03,29 \pm 0,26	1,77 \pm 0,59	0,88 \pm 0,16	1,11 \pm 0,84
RM2	0,10 \pm 0,02	3,22 \pm 0,38	01,68 \pm 0,03	0,59 \pm 0,08	0,20 \pm 0,06	0,00 \pm 0,00
VC	04,59 \pm 0,20	4,59 \pm 0,20	02,79 \pm 0,29	01,17 \pm 0,81	0,50 \pm 0,11	0,02 \pm 0,42
CONCENTRAÇÃO DE BÁRIO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,31 \pm 0,09	0,31 \pm 0,09	0,39 \pm 0,06	0,71 \pm 0,17	0,40 \pm 0,01	0,35 \pm 0,15
RB2	0,12 \pm 0,08	0,12 \pm 0,08	0,22 \pm 0,05	0,69 \pm 0,13	0,48 \pm 0,17	0,56 \pm 0,22
IT	0,30 \pm 0,00	0,30 \pm 0,00	0,24 \pm 0,17	0,63 \pm 0,31	0,61 \pm 0,40	0,37 \pm 0,09
RI1	0,20 \pm 0,09	0,22 \pm 0,09	0,42 \pm 0,46	0,51 \pm 0,06	0,21 \pm 0,04	0,25 \pm 0,16
RI2	0,22 \pm 0,03	0,22 \pm 0,03	0,217	0,41 \pm 0,03	0,33 \pm 0,02	0,22 \pm 0,20
AR1	0,20 \pm 0,04	0,20 \pm 0,04	0,86 \pm 0,34	0,74 \pm 0,24	0,52 \pm 0,16	0,98 \pm 0,15
AR2	0,30 \pm 0,00	0,30 \pm 0,00	0,53 \pm 0,11	0,74 \pm 0,01	0,97 \pm 0,07	1,12 \pm 0,06
RM1	0,44 \pm 0,36	0,44 \pm 0,36	0,33 \pm 0,32	01,56 \pm 0,84	0,33 \pm 0,02	1,10 \pm 0,60
RM2	0,11 \pm 0,00	0,11 \pm 0,00	0,13 \pm 0,06	0,34 \pm 0,03	0,29 \pm 0,03	ND
VC	0,18 \pm 0,12	0,18 \pm 0,12	0,28 \pm 0,17	01,09 \pm 01,09	0,61 \pm 0,40	0,81 \pm 0,06
CONCENTRAÇÃO DE BÁRIO PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,20*	2,37 \pm 0,09	2,28 \pm 0,41	ND	ND	0,001 \pm 0,0007
RB2	0,13 \pm 0,02	2,34 \pm 0,09	2,14 \pm 0,12	0,61 \pm 0,03	0,01*	0,07 \pm 0,04
IT	0,001 \pm 0,0001	ND	ND	ND	0,0004*	ND
RI1	0,12*	2,42 \pm 0,08	1,98 \pm 0,50	0,45 \pm 0,58	ND	0,17 \pm 0,15
RI2	ND	2,49 \pm 0,09	2,28 \pm 0,08	0,09 \pm 0,04	ND	0,07 \pm 0,02
AR1	0,024 \pm 0,012	0,26 \pm 0,19	ND	0,27 \pm 0,03	0,06 \pm 0,08	ND
AR2	0,007*	0,42 \pm 0,18	0,22*	0,33 \pm 0,07	ND	ND
RM1	0,51 \pm 0,69	3,04 \pm 0,14	2,96 \pm 0,59	0,22 \pm 0,09	ND	0,108068667
RM2	0,0002	2,09 \pm 0,20	1,54 \pm 0,08	0,25 \pm 0,06	ND	ND
VC	0,0358	3,00 \pm 0,15	2,50 \pm 0,21	0,07 \pm 0,05	ND	0,21 \pm 0,02

O Ba (Figura 19), na fração dissolvida, foi observado concentrações muito semelhantes nos períodos II, IV e VI, onde as menores concentração de bário dissolvido ocorre no período V, sendo seguido pelo III e I (Figura 19). Já quando analisamos a fração particulada há uma maior concentração no período I (62%) e III (19,9%), onde o primeiro os pontos AR1, VC, RB2, RM1 e IT apresentaram maiores concentrações variando entre 7 a 15 % e o segunda os pontos VC e RM1 apresentação valores de 6 % e 6,5 %, respectivamente.

No período V era esperado uma diminuição da forma dissolvida acompanhando pelo aumento da forma particulada. No entanto, devido a condições climáticas diferentes (La Niña em 2022 e El Niño em 2023). Não houve o aumento da forma particulada e sim uma pequena queda da dissolvida.

Nas estações IV (23,5%) e VI (25,6%), as concentrações da fração dissolvida muito homogêneas e sem grandes variações. Um dado muito importante, pois o ponto da vila do conde sempre apareceu como uns dos contribuidores principais da forma dissolvida em todos os períodos mesmo naqueles, onde a forma particulada se sobre sai sobre a dissolvida,

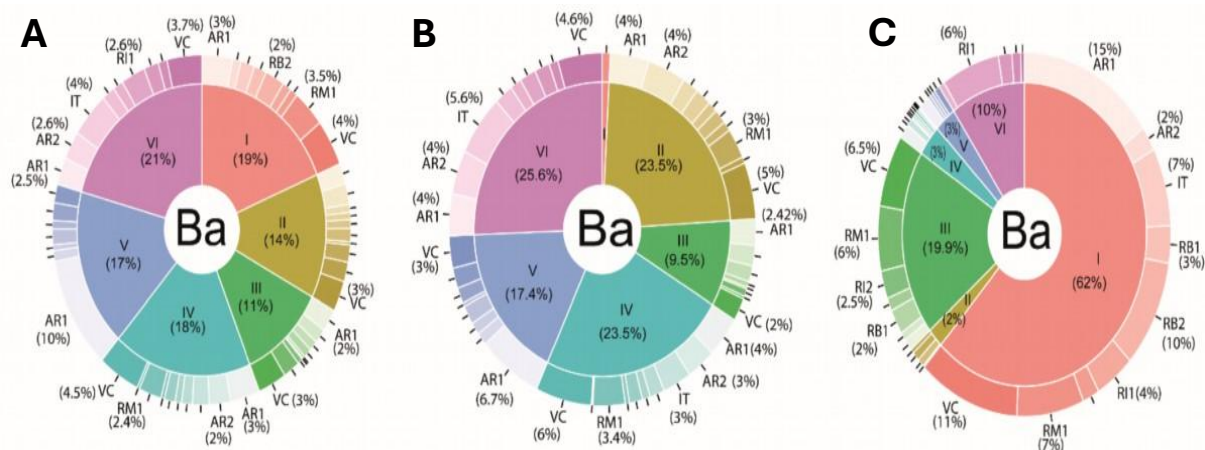


Figura 19 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Ba na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I- Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.5 Chumbo (Pb)

O Pb na fração total da água apresentou valores semelhantes (Tabela 18), porém ao analisar a fração particulada, são observadas maiores concentrações nos pontos RB1(0,022±0,008 mg/l) RB2(0,017±0,009 mg/l), IT (0,025±0,001 mg/l), RI1(0,022±0,008 mg/l), RI2 (0,018±0,007. Na fração dissolvida, na maioria dos pontos, não houve ocorrência de Pb no período I. Não havendo ocorrência de Pb nos períodos II e III. Esse mesmo comportamento foi observado no período VI, onde foram encontrados maiores valores de Pb total. No período V, houve uma menor concentração de Pb dissolvido devido ao aumento da precipitação, era esperado o mesmo comportamento da estação chuvosa passada (período II), com somente uma ocorrência de Pb (0,003229 mg/l). De maneira geral, o Pb é encontrado preferencialmente na fração particulada.

Tabela 18 - Concentração de chumbo (Pb) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média ± desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,029±0,009	ND	ND	ND	ND	0,04±0,009
RB2	0,017±0,008	ND	ND	ND	ND	0,07±0,015
IT	0,025±0,006	ND	ND	ND	ND	0,05±0,003
RI1	0,025±0,003	ND	ND	ND	ND	0,04±0,002
RI2	0,026±0,007	ND	ND	ND	ND	0,03±0,004
AR1	0,011±0,007	ND	ND	ND	ND	0,02±0,004
AR2	0,012±0,002	ND	ND	ND	ND	0,03±0,001
RM1	0,005±0,003	ND	ND	ND	ND	0,14±0,026
RM2	0,007±0,004	ND	ND	ND	0,003*	0,0007*
VC	0,006*	nd	nd	0,00001	nd	0,08*
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,013*	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IT	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI2	0,016*	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	0,008*	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	0,008*	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RM2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
VC	ND	ND	ND	ND	ND	ND
CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO PARTICULADO						

Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,022±0,008	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	0,017±0,009	ND	ND	ND	ND	ND
IT	0,02±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	0,025±0,001	ND	ND	ND	ND	0,0008±0,007
RI2	0,022±0,008	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	0,018±0,007	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	0,007±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	0,007±0,005	ND	ND	ND	ND	ND
RM2	0,0053*	ND	ND	ND	ND	ND
VC	0,005±0,003	ND	ND	ND	ND	ND

Como mostrado na Figura 20, o Pb apresentou maiores valores de no RB1 (41,3%), sendo seguido pelos pontos AR1(25,4%) e AR2 (25,4%) na forma dissolvida durante o período I (92%), Na fração particulada, o período I correspondeu a 98,97 % dos valores encontrados que apresentou grande concentração em relação à dissolvida, os pontos destacados nessa estação são IT e RI1, ambos como 18%, sendo seguidos por RB1, RI2 e RB2 com 16%, 13% e 12%, respectivamente, Em relação ao PB dissolvido na estação V, suas maiores concentrações foram observadas no ponto RM2 (7,9%),

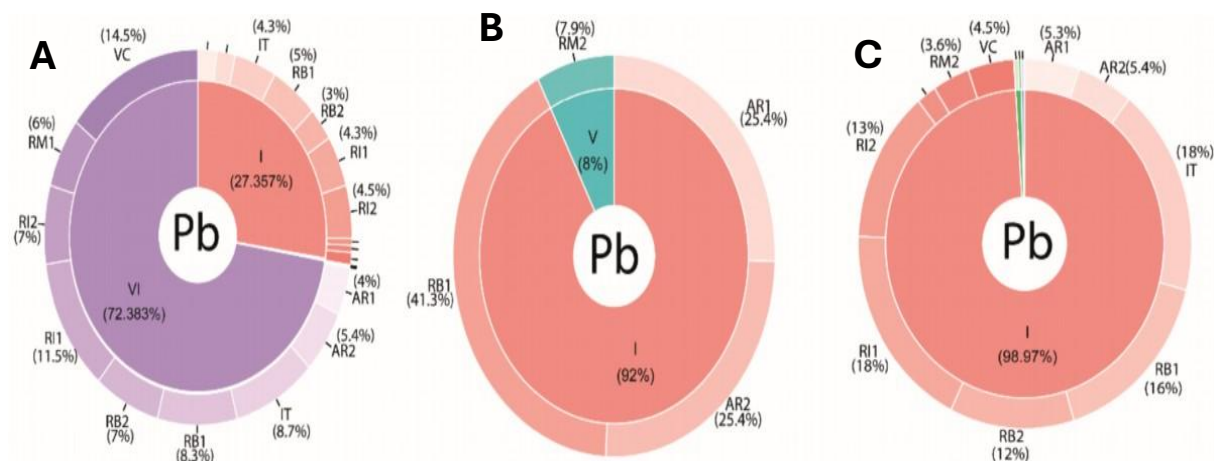


Figura 20 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Pb na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.6 Cádmio (Cd)

O Cd (Tabela 19) apresentou ocorrência somente no período I, onde são observadas maiores concentrações na fração particulada do que a dissolvida. As concentrações da

forma particulada são homogêneas, com valores muito semelhantes entre os pontos. Nas análises da forma química dissolvida, podemos observar um pico no ponto RM2(0,011±0,007 mg/l) e RM1(0,005±0,004 mg/l), IT (0,022±0,013 mg/l), rb2 (0,013±0,005 mg/l) e VC (0,00274 mg/l).

Tabela 19 - Concentração de cádmio (Cd) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño; VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média ± desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE CÁDMIO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,015±0,004	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	0,013±0,005	ND	ND	ND	ND	ND
IT	0,022±0,013	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	0,017±0,002	ND	ND	ND	ND	ND
RI2	0,017±0,002	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	0,014±0,007	0,001±0,001	ND	ND	ND	ND
AR2	0,007±0,004	0,0002±0,0003	ND	ND	ND	ND
RM1	0,009±0,008	Nd	ND	ND	ND	ND
RM2	0,015±0,006	0,0000235	ND	ND	ND	ND
VC	Nd	Nd	ND	ND	ND	ND
CONCENTRAÇÃO DE CÁDMIO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	0,001±0,0001	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	0,001±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
IT	0,002±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	0,001±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
RI2	0,001±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	0,001±0,001	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	0,0005±0,00044	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	0,005±0,004	ND	ND	ND	ND	ND
RM2	0,011±0,007	ND	ND	ND	ND	ND
VC	0,00274	ND	ND	ND	ND	ND
CONCENTRAÇÃO DE CÁDMIO PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
Pontos	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IT	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AR1	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	ND	ND	ND	ND	ND	ND

RM2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
VC	ND	ND	ND	ND	ND	ND

O Cd total foi observado nos períodos I e II (Figura 21), com os maiores valores ocorrendo no período I (99%), Na forma dissolvida, RM1 apresentou a maior concentração (20%), seguido por IT (9%), enquanto os demais pontos apresentaram valores semelhantes, variando entre 5% e 6%. Já em relação a forma particulada os pontos com maiores teores IT, RI1, RI2, RB1, AR 1 e RB1 com 17%, 13,6%, 13%, 12%, 10,6% e 9%, respectivamente,

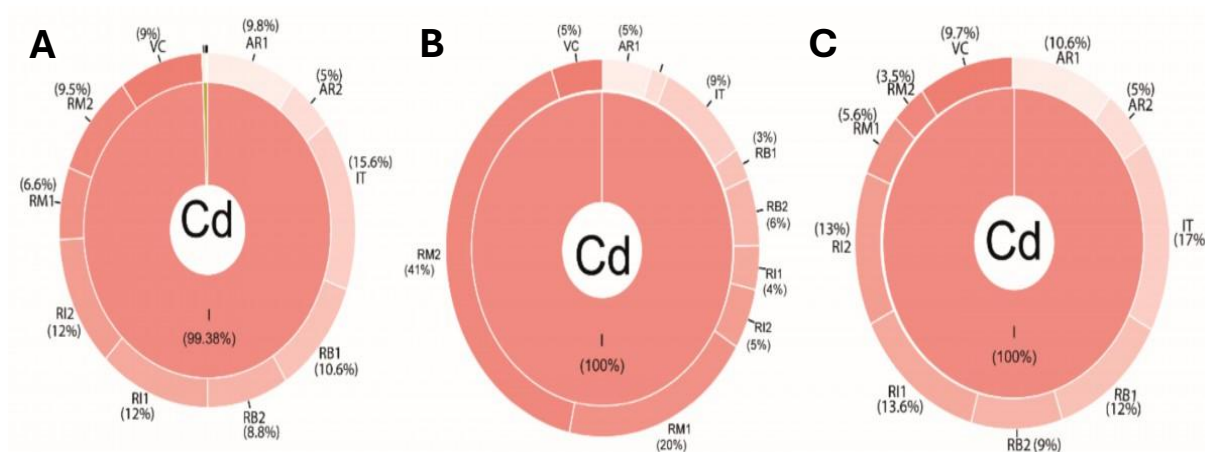


Figura 21 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Cd na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I-Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño a VI – Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.7 Cromo (Cr)

Já o Cr (Tabela 20) apresentou ocorrência nos períodos IV, V e VI, sendo esses os momentos em que os pontos analisados apresentaram as maiores concentrações de cromo total. O cromo é preferencialmente encontrado em sua forma biodisponível, com as maiores concentrações registradas no período IV (chuvoso II), nos pontos RB2 ($0,0057 \pm 0,0004$ mg/L), AR1 ($0,0030 \pm 0,0002$ mg/L) e RM2 ($0,0040 \pm 0,0004$ mg/L). Com a chegada do período V, observou-se uma pequena diminuição na concentração de cromo dissolvido na maioria dos pontos. Ainda assim, os maiores valores foram observados nos pontos RB2 ($0,0068 \pm 0,0058$ mg/L), IT ($0,0015 \pm 0,0005$ mg/L) e AR2 ($0,0026 \pm 0,0005$ mg/L).

Tabela 20 - Concentração de cromo (Cr) na água superficial (mg/L), nas frações total, dissolvida e particulada, em diferentes locais e períodos de coleta (I – Transicional, La Niña; II – Chuvoso, La Niña; III – Transicional, La Niña; IV – Estiagem, La Niña; V – Chuvoso, El Niño;

VI – Estiagem, El Niño). Os dados são expressos como média \pm desvio padrão. ND: não detectado. Valores que apresentam um ‘*’ indicam que apenas uma réplica apresentou resultado acima do limite de detecção.

CONCENTRAÇÃO DE CROMO TOTAL						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	ND	ND	ND	0,0036 \pm 0,0007	0,0011 \pm 0,0003
RB2	ND	ND	ND	ND	0,0056 \pm 0,0009	0,0040 \pm 0,0026
IT	ND	ND	ND	ND	ND	0,0011 \pm 0,0004
RI1	ND	ND	ND	ND	0,002 \pm 0,0001	0,0018 \pm 0,0002
RI2	ND	ND	ND	ND	0,0037 \pm 0,0050	0,0004 \pm 0,0005
AR1	ND	ND	ND	ND	0,0023 \pm 0,0003	0,0019 \pm 0,0003
AR2	ND	ND	ND	ND	0,001 \pm 0,0030	ND
RM1	ND	ND	ND	0,0043 \pm 0,0021	0,0028 \pm 0,0005	0,0011 \pm 0,0007
RM2	ND	ND	ND	0,01 \pm 0,0004	0,01 \pm 0,0006	ND
VC	ND	ND	ND	0,0043 \pm 0,0007	0,0019 \pm 0,0003	0,0016 \pm 0,0007
CONCENTRAÇÃO DE CROMO DISSOLVIDO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	ND	ND	ND	0,001 \pm 0,0014	0,001 \pm 0,003
RB2	ND	ND	ND	ND	0,0057 \pm 0,0004	0,0068 \pm 0,0058
IT	ND	ND	ND	ND	0,0032 \pm 0,0001	0,0015 \pm 0,0005
RI1	ND	ND	ND	ND	0,0017 \pm 0,0002	0,0007 \pm 0,0006
RI2	ND	ND	ND	ND	0,01 \pm 0,01	0,00019
AR1	ND	ND	ND	ND	0,0030 \pm 0,0002	0,0020 \pm 0,0012
AR2	ND	ND	ND	ND	0,008 \pm 0,006	0,0026 \pm 0,0005
RM1	ND	ND	ND	ND	0,0022 \pm 0,0005	0,0004 \pm 0,0003
RM2	ND	ND	ND	0,0054 \pm 0,0004	0,0040 \pm 0,0004	ND
VC	ND	ND	ND	ND	0,00162	0,0017 \pm 0,0015
CONCENTRAÇÃO DE CROMO PARTICULADO						
Pontos	I	II	III	IV	V	VI
RB1	ND	ND	ND	ND	ND	0,00031
RB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IT	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RI1	ND	ND	ND	ND	0,0005 \pm 0,0000	0,0012 \pm 0,00049
RI2	ND	ND	ND	ND	ND	0,00064
AR1	ND	ND	ND	0,0002 \pm 0,0001	0,0002 \pm 0,0001	0,00053
AR2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
RM1	ND	ND	ND	ND	0,0006 \pm 0,0003	0,0008 \pm 0,0006
RM2	ND	ND	ND	ND	ND	ND
VC	nd	nd	nd	nd	0,0003 \pm 0,0004	0,0006

O cromo total apresentou a maior concentração no período V (41%), enquanto os períodos IV (27,6%) e VI (31,4%) mostraram estabilidade (Figura 22). Em relação à forma química dissolvida, houve equilíbrio nos períodos V (45,6%) e VI (43,1%). No período IV (11,3%), observou-se que a maior valor de Cr dissolvido foi encontrado em RM2 (11,3%). A fração particulada contribuiu com 9%, destacando-se IT (5%) e RM2 (4%). Durante o período V, o Cr dissolvido apresentou concentrações de 45,6%, com maiores valores nos pontos RB2 (12%), RM2 (8,4%) e AR1 (6,2%). Na fração particulada, as concentrações foram de 29%, sendo o ponto RM2 14,6% com maior valor de Cr. Com a chegada do período VI (43,1%), a fração dissolvida teve RI1 como o ponto mais destacado, com 14%. Na fração particulada, houve um predomínio dessa forma química correspondendo a 62%, com o ponto RB1 apresentando as maiores concentrações (44%), seguido RI2 (7%).

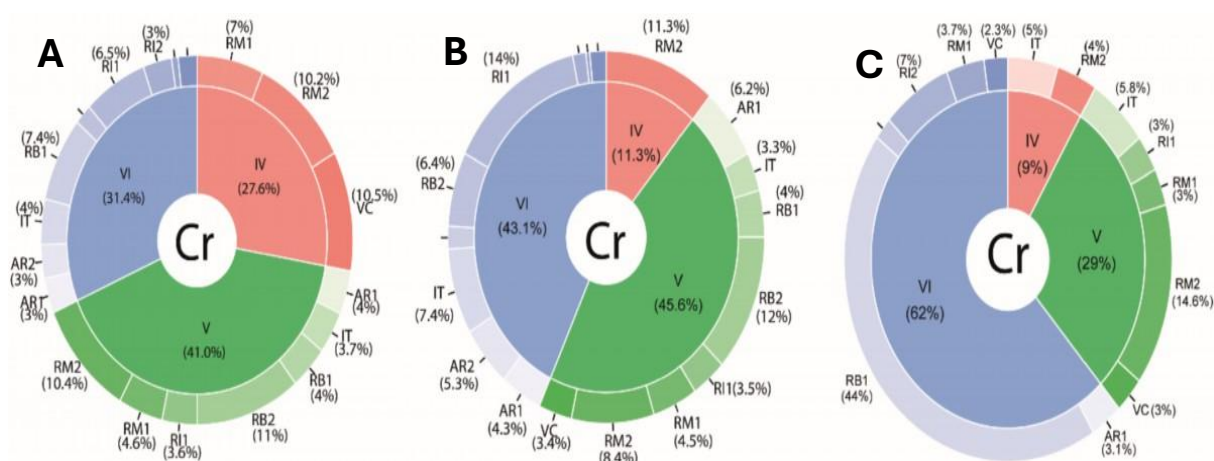


Figura 22 - “Donut pie chart” apresenta a concentração de Cr na água superficial: frações totais (A), dissolvida (B) e particulada (C), nos diferentes períodos (I - Transicional, La Niña; II - Chuvoso, La Niña; III - transicional, La Niña; IV - Estiagem, La Niña; V - Chuvoso, El Niño a VI - Estiagem, El Niño), expressa em porcentagem. Adicionalmente, a concentração de metal nos diferentes pontos de coleta de sedimento foi apresentada para cada período, também expressa em porcentagem.

6.4.1.8 Análise das componentes principais (PCA)

Na análise biplot de componentes principais (PCA) da concentração de metais (total, dissolvido e particulado) medidos em diferentes períodos sazonais (I a VI). O biplot mostra as pontuações PCA das variáveis explicativas como vetores, em cores dependentes da contribuição, representando os metais. Dados do mesmo lado de uma determinada variável devem ser interpretados como tendo uma alta contribuição para ela. A magnitude dos vetores (linhas) mostra a força de sua contribuição para cada PC. Vetores apontando em direções semelhantes indicam variáveis positivamente correlacionadas, vetores

apontando em direções opostas indicam variáveis negativamente correlacionadas e vetores em ângulos aproximadamente retos indicam baixa ou nenhuma correlação.

Podemos observar claramente uma disparidade nos valores dos metais presentes na fração total da água entre o período II e os demais períodos, com exceção do período III (Figura 23 A). É evidente que o período II é fortemente influenciado pelos metais, Hg, Al e, principalmente, Fe e As. Já o no período I a influência principal é exercida pelos elementos Pb, Ba e Cr. Já o período III é influenciado pelo Mn.

Na análise da fração dissolvida (Figura 23 B), podemos observar com destaque para o período I, onde há uma maior influência de Cd e Pb. No período III, há predominância do Al, enquanto nos períodos IV, V e VI são influenciados principalmente por Fe e Ba.

Na fração particulada (Figura 23 C), notamos um padrão semelhante ao da fração total, com o período I sendo mais influenciado por Pb, Cd e Ba, e o período II sendo influenciado pelo Fe. No entanto, o período I se destaca dos demais períodos devido à influência de Cd, Pb e Ba.

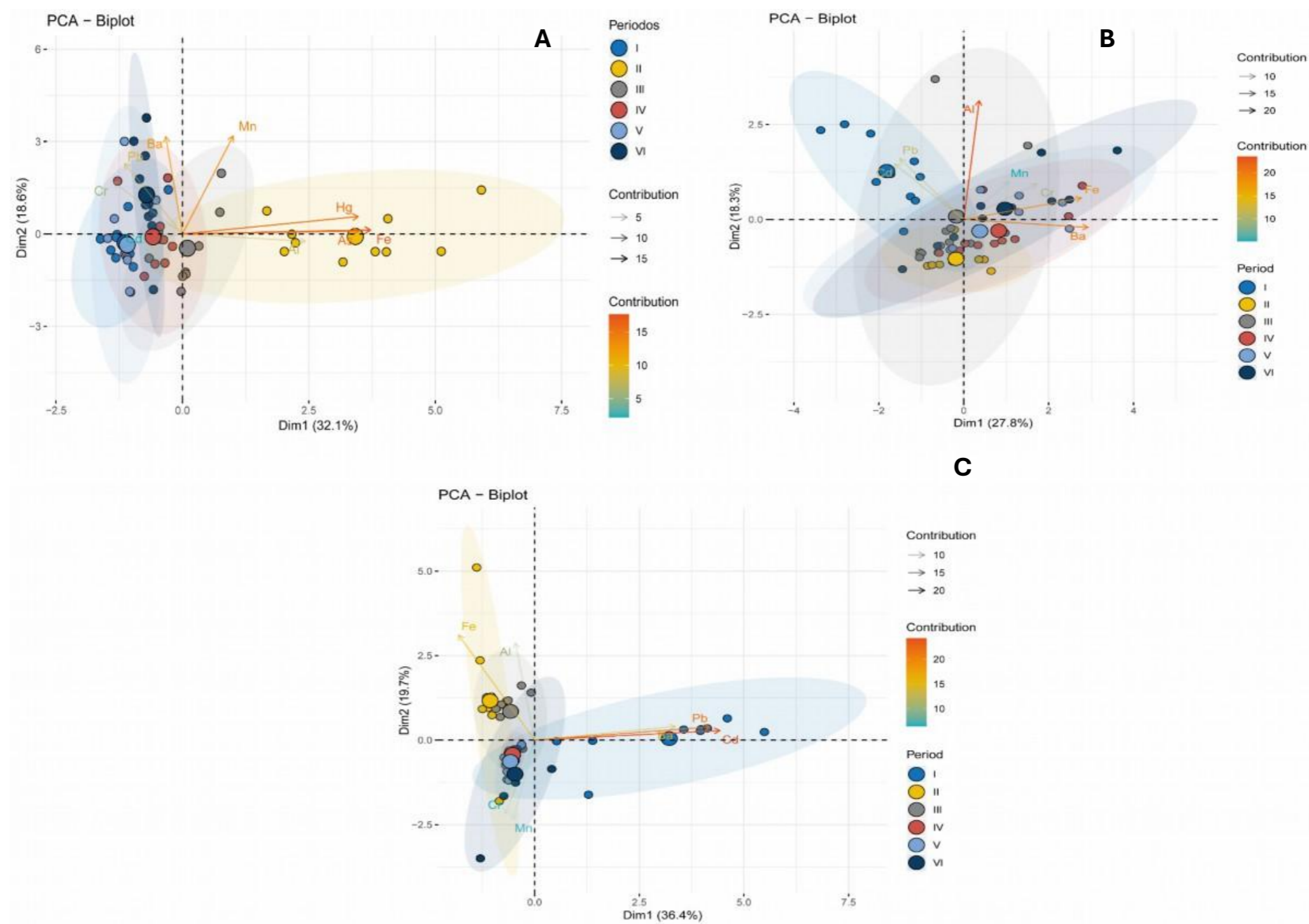


Figura 23 - Análise de componentes principais (PCA) de metais presentes na água: fração total (A), dissolvida (B) e particulada (C). A análise revelou duas componentes principais que explicam mais de 70% da variância acumulada, fornecendo insights valiosos sobre as relações entre os metais e seus impactos ao longo de diferentes períodos.

7 DISCUSSÃO

7.1 MARÉ X SAZONALIDADE

As regiões amazônicas possuem dinâmicas de sazonalidade com períodos chuvosos e de estiagem, que são caracterizados principalmente pela abundância ou escassez de chuvas (Marengo & Espinoza, 2016). No estado do Pará a precipitação anual pode variar entre 1,500 mm e 3,000 mm, dependendo do período sazonal (Pereira *et al.* 2009, Bastos & Pachêco 2005) e mesoregião. Somado a isso, as regiões amazônicas são influenciadas por um regime de meso e macromarés (Guimarães *et al.* 2023) que também podem alterar as características dos ecossistemas, incluindo a quantidade de metais presentes. Segundo Moskalski *et al.* (2013), situações de baixa maré podem influenciar na mobilização dos metais absorvidos nos sedimentos aumentando as concentrações de elementos metálicos na coluna d'água.

Assim, as interações entre elementos naturais, como o fluxo de água, características geológicas e a composição dos sedimentos, podem influenciar tanto o funcionamento quanto a composição química dos solos e dos recursos hídricos. Contudo, no presente estudo, as análises estatísticas realizadas demonstraram que os dois momentos de maré amostrados (enchente e vazante) não apresentaram diferenças nas concentrações dos metais. Embora não tenha sido possível observar as alterações durante todo um ciclo de maré. Tal fato pode ser confirmado ao analisarmos a direção do fluxo residual das massas de água (representa o transporte total de partículas presentes na coluna d'água), que reflete as características hidrodinâmicas específicas de cada rio analisado.

Observa-se que alguns rios apresentam tendência a serem mais "acumuladores", enquanto outros atuam como "transportadores". Essa dinâmica influencia diretamente a retenção ou a dispersão de metais nos sistemas aquáticos. Por exemplo, o rio Murucupi é fortemente influenciado pela maré de enchente, o que favorece a retenção de elementos nas áreas de sedimento, promovendo o acúmulo de metais ao longo do tempo. Nas análises de fluxo residual, observa-se uma constância de valores negativos no rio Murucupi, indicando um comportamento predominante de importação de massa de água. Isso revela um "desbalanceamento" entre os fluxos de enchente e vazante, ou seja, há uma maior entrada de massa de água do que saída. Consequentemente, esse padrão pode favorecer o acúmulo de poluentes durante o período de enchente, elevando suas concentrações no ambiente aquático.

Essa maior tendência de acumular metais está relacionada ao fato de que, ao longo dos anos, o rio Murucupi passou por intensas modificações antrópicas, devido ao crescimento populacional e industrial que a cidade de Barcarena enfrentou e continua enfrentando (Furtado *et al.* 2020). Tais alterações impactaram a dinâmica das marés (enchente e vazante), resultando em um maior influxo de águas do rio Pará para a região continental. Em contrapartida, o Arienga é influenciado mais pela maré vazante, logo os metais não têm tendência de ficarem acumulados, e sim serem exportado do continente para o rio Pará. Por se tratar de um ambiente menos antropizado (menor densidade populacional e industrial) na região em comparação ao rio Murucupi. As correntes são de grande importância para o deslocamento de metais no estuário que junto com o fluxo da maré (enchente e vazante) promovem a entrada e saída de partículas absorvidos aos metais para dentro ou fora do ambiente estuarino (Yin *et al.* 2016).

A alteração do fluxo residual observada nos períodos IV e V pode estar relacionado ao fato de que, no período I, ainda havia influência do fenômeno La Niña. Pois era esperado um maior fluxo de TMP durante o período IV, mas esse fenômeno resultou em uma maior pluviosidade, o que alterou a hidrodinâmica dos rios devido ao aumento do aporte de água para o ambiente aquático. Tal fato favorece processos como erosão e lixiviação do solo, contribuindo para um acréscimo na concentração de MPS (Shil *et al.* 2024). Contudo, o maior fluxo de massa foi observado durante o período V (estação influenciada por El Niño), esse achado pode estar relacionado a processos como: erosão fluvial, onde o próprio fluxo do rio provoca o desprendimento do solo (Sousa *et al.* 2020, Casado *et al.* 2002); ressuspensão e deslocamento do sedimento de fundo devido a variação de maré, com isso acabam transportando metais.

As variações no aumento e na diminuição de MPS influenciam diretamente a dinâmica do transporte de metais (Liu *et al.* 2024). Sabe-se que os metais apresentam afinidade com partículas finas, sedimentos argilosos e matéria orgânica em suspensão. Assim, era esperado que nos períodos chuvosos, observa-se um aumento no transporte de metais em comparação ao período estiagem, devido à maior hidrodinâmica dos rios. Pois com o aumento das chuvas ocorre o aumento do TMP para fora dos rios (Shil *et al.* 2024).

7.2 SEDIMENTO SUPERFICIAL

Nas coletas realizadas foi observado no sedimento que os metais Al, Fe, Mn e Ba apresentaram as maiores concentrações. A presença de metais no ambiente estuarino ocorre de forma natural e os metais naturalmente encontrados são ditados pela formação geológica local. O município de Barcarena está amplamente inserido na Formação Geológica Barreiras, um depósito sedimentar do Terciário Superior que ocorre ao longo da região costeira do Brasil, estendendo-se desde a Amazônia até o estado do Rio de Janeiro (Nunes *et al.* 2011). Essa formação é composta por sedimentos flúvio-lacustres terciários sobrepostos, além de sedimentos aluvionares quaternários e Pós-Barreira. A composição geológica natural da região influencia significativamente as concentrações de metais, devido à abundância de elementos como alumínio (Al), óxidos de ferro (Fe) e manganês (Mn) (Nunes *et al.* 2011). Os 4 elementos têm em comum o fato de serem componentes das rochas presentes no arcabouço geológico da formação Barreiras. Os principais componentes dessa formação apresentando uma composição bauxítica, ferro-aluminosa (Santos & Costa, 2021) e ferro e manganês (Cavalcante 2021). Embora a origem geológica seja um fator essencial, outros processos também desempenham um papel importante na distribuição e dinâmica dos metais no estuário. Processos como sedimentação, ressuspensão sedimentar, pH, salinidade e matéria orgânica podem afetar a biodisponibilidade e o comportamento dos metais no ambiente (Souza *et al.* 2014). Em um estudo realizado por (Gonçalves *et al.* 2022), foi observado que os metais Al, Fe, Ba e Mn apresentaram as maiores concentrações no sedimento em relação aos demais metais analisados. Esses resultados corroboram os valores encontrados durante a execução desse trabalho.

Dos quatro metais que apresentaram as maiores concentrações, o Fe e o Al se destacam como os elementos predominantes. O Fe é o quarto elemento mais abundante na crosta terrestre e é encontrado em uma variedade de ambientes, incluindo solo, rios, oceanos e rochas (Kamble *et al.* 2013, Duarte, 2019). Na natureza, a maior parte do Fe é encontrado na forma de óxidos e hidróxidos minerais (Codmge 2018, Duarte 2020).

O Al é o terceiro elemento mais abundante no planeta Terra, sendo de grande importância para a economia mundial, sendo amplamente utilizado em diversos setores industriais como parte de componentes de aeronaves, automóveis, eletrônicos entre outros (Antunes *et al.* 2011, Cetesb 2017). Esses valores elevados estão relacionados com as características do solo. A região de Barcarena é caracterizada por apresentar latossolo

vermelho-amarelado (Dos Santos et al. 2003, Barcarena 2016) e latossolo amarelo (Pará, et al. 2011), respectivamente. Latossolo vermelho-amarelado possui teores medianos de óxido de ferro pela presença de goethita (maior constituinte) e hematita (menor constituinte), além de apresentarem teores de alumínio normalmente alto (Ker 1997). Já o latossolo amarelo apresenta teores baixos de Fe_2O_3 (Freitas et al. 2019) e alta saturação por alumínio (Pereira et al. 2000). De maneira geral, os latossolos da região brasileira são constituídos principalmente de caulinita, goethita, hematita e gibbsita (Muggler et al. 2007, Schaefer et al. 2008). A caulinita, juntamente com o Fe e o Al, é encontrada principalmente na fração de argila dos Latossolos (Schaefer et al. 2008).

O Mn é um elemento de ocorrência natural encontrado em todo mundo em depósitos sedimentares e rochas sedimentares (Parrotti et al. 2023). O manganês é raramente na forma elementar, na região amazônica esse metal ocorre na forma de óxidos de manganês (MnO_2), estando presente em vários minérios como goethita (FeOOH) fazendo ligação com o Fe (Codmge, 2018). Além disso, o mineiro de Mn apresenta concentrações de metais tóxicos como bário (Ba), cobre (Cu), molibdênio (Mo), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) e Arsenio (Reis, 2020), tais metais são considerados impurezas do mineiro de manganês.

O Ba está presente em rochas sedimentares e ígneas em quantidades traços (Cetesb 2017). Ocorre na estrutura dos óxidos de Mn, Ti e Al, sendo formado em sedimentos argilosos em solos que estão abaixo da Formação Barreiras (Matos et al. 2023). Esse elemento é encontrado na Formação Barreiras na forma de barita (Lima 2008), sendo considerado o minério mais abundante de Ba, contendo cerca de 58,8 % de bário (Luz & Lins, 2005).

O As não é um elemento que se espere encontrar na Formação Barreiras. Segundo De Matos (2023), pode existir uma anomalia geológica que explique a sua ocorrência, como também pode ser derivado da intensa atividade industrial que há na região de estudo. No entanto, a literatura registra a ocorrência de As naturalmente em localidades próximas como em Mosqueiro (Behling 2004) e Amapá, onde esse elemento é encontrado associado ao Mn (Scarpelli 2008). Além disso, os elementos Al, Fe e Mn são os principais elementos que controlam o processo de adsorção e imobilização do As. Um outro fator que contribui para a imobilização desse metaloide é a presença de matéria orgânica e argila, visto que a região amazônica é conhecida por apresentar grandes quantidades de matéria orgânica em seus solos (Fernández-Martínez et al. 2024).

Entre os elementos analisados, o metal que apresentou maior estabilidade durante a coleta foi o Ni, não sofrendo alterações em suas concentrações ao longo dos períodos amostrados. Tal comportamento pode estar relacionado à forma química desse metal no ambiente, que pode dificultar sua mobilização durante os períodos de maior pluviosidade. Nossos achados sugerem que a forma química encontrada do Ni no ambiente de estudo é o hidróxido de níquel, devido a insolubilidade do mesmo em ambientes ácidos. Essa hipótese é reforçada pela ausência de Ni na água em todos os períodos amostrados.

Os metais Al, Fe, Mn, Pb, Hg e As, durante o período chuvoso de 2023 (campanha V), apresentaram uma menor diluição em relação ao período chuvoso anterior (campanha II). Esta menor diluição pode estar relacionada com as diferentes condições climáticas. O ano de 2022 foi um ano de La Niña. O El Niño ocorreu desde junho de 2023 até a metade do ano de 2024. Sabe-se que durante períodos de La Niña existe um aumento do regime de chuvas na região Norte do Brasil, podendo provocar cheias expressivas dos rios. Já durante o El Niño o efeito é o oposto. Ocorre diminuição dos regimes de chuvas na região Norte, aumentando a probabilidade de incêndios. O aumento do regime de chuvas ocasionado pelo fenômeno La Niña pode provocar uma remoção e mobilização de metais para o ambiente aquático através de processos de lixiviação (Wang *et al.* 2024) e erosão (Sthiannopkao *et al.* 2007). Durante o aumento das chuvas ocorre um incremento na infiltração da água no solo e uma diminuição da força iônica. Quanto maior a infiltração da água, maiores as concentrações de carbono orgânico dissolvido, tornando os metais mais solúveis e móveis, o que facilita a lixiviação (Zhao *et al.* 2007). Kraisitnitikul *et al.* (2024), demonstrou uma maior concentração de metais e carbono no ar durante o período de El Niño em comparação com a La Niña.

A análise da PCA revelou um aumento intrigante nas concentrações de metais no sedimento durante o período IV (estação seca de 2022), em comparação com os demais períodos analisados. A diminuição das chuvas durante a estação seca, desencadeia uma série de eventos que contribuem para o acúmulo de metais no sedimento. A lixiviação, processo natural de remoção e mobilização de metais mais solúveis do solo, é atenuada pela escassez de água. Consequentemente, esses metais permanecem retidos no solo, aumentando sua concentração (Gunes 2022). O gráfico de ordenação da análise de redundância (RDA) destaca o período III devido à grande influência do Fe, que se distancia dos demais pontos. Essa observação sugere que a concentração de Fe aumenta consideravelmente no período III, em comparação aos outros períodos. O estudo de Al-Saadi *et al.* (2002) oferece suporte adicional a essa conclusão, ao demonstrar um aumento

nas concentrações de metais nos sedimentos durante o verão, o que reforça a influência da estação seca nesse processo.

Quanto ao Al, a diminuição das chuvas associada ao fenômeno La Niña e a intensificação do El Niño durante o período V podem ter favorecido a manutenção dos valores observados entre os períodos IV e V. Esse comportamento é atribuído à redução das chuvas nesse intervalo.

Os sedimentos da localidade Vila do Conde (Donut pie) demonstraram uma grande contribuição durante o período III em relação aos demais pontos para 4 diferentes metais (Pb, Fe, Cr, Hg e As). A Vila do Conde possui um histórico de acidentes ambientais conhecido (Paz *et al.* 2011), que juntamente com o saneamento básico e infraestrutura precários (Brasil 2018). A comunidade da Vila do Conde não possui estação de coleta de esgotos nem coleta seletiva de resíduos sólidos, e os rejeitos são canalizados diretamente para o rio, sem nenhum tipo de tratamento. Esses fatores acabam contribuindo para o aporte de contaminantes nos sedimentos. Dentre os cinco metais que apresentaram as maiores concentrações, os elementos Pb, Hg e As estão relacionados com a presença de efluentes de origem doméstica e/ou industrial. Além disso, o Pb é um elemento frequentemente associado a inputs de áreas urbanizadas (Tao *et al.* 2014).

Em relação aos elementos Hg e As são frequentemente encontrados em locais com descarte inadequado de resíduos sólidos, sendo parte dos efluentes domésticos acabando assim alcançado o ambiente aquático. Metais são encontrados com mais frequência em áreas urbanas, sendo utilizados frequentemente em atividades industriais ou sendo constituinte de efluentes de origem doméstica e industrial sem o devido tratamento (Poletto & Martinez 2011, Pantoja *et al.* 2022).

O ponto AR1, localizados mais a jusante, apresentou maiores concentrações de Hg no período I e III; Mn no IV; Cr na estação II e Fe no período IV em relação ao ponto mais a montante AR2. Isso pode estar relacionado ao fato de que o ponto AR1 é um braço de rio Arienga, estando localizado mais internamente em relação ao rio principal, o que facilita a entrada e a deposição de sedimento. Desta forma, apresenta uma menor hidrodinâmica que favorece o acúmulo desse metal. A menor hidrodinâmica favorece a formação de bancos lamosos de sedimento finos (ricos de silte e argila) (Aviz *et al.* 2012). Além disso o AR1 é um braço de rio que passa no entorno de uma refinaria, o que possivelmente influencia esses maiores valores de metais nos sedimentos da região. Esse maior acúmulo também é observado quando analisamos o Cr que apresentou cerca de 12% de contribuição do AR1 nos períodos I e VI.

No rio Murupi (RM1), durante o período IV (Donut pie), foram observadas as maiores concentrações de Ba, Pb, Cr e As, possivelmente devido à grande influência antrópica na área circundante. O ponto RM recebe efluentes de origem doméstica e industrial que junto com o baixo saneamento básico do município de Barcarena contribuem para a mobilização e acúmulo de metais. O rio Murucupi percorre dois núcleos urbanos (Vila dos Cabanos e Bairro Laranjal). Ao longo desse percurso, esse corpo de água acaba recebendo a descarga de esgotos domésticos não tratados (Lopes, 2014), podendo assim contribuir para o aumento de metais nesse ambiente.

Segundo Farias (2023), apesar de uma pequena melhoria no saneamento básico da população em torno do rio Murucupi a região de Barcarena ainda enfrenta muito problemas com serviços urbanos básicos (saneamento, infraestrutura, segurança). Além disso, devido as intensas modificações que o rio Murucupi sofreu ao longo dos anos frente à urbanização de Barcarena, houve uma alteração na hidrodinâmica desse corpo hídrico (Furtado *et al.* 2020), facilitando um maior acúmulo de poluentes.

A maior concentração de Al no sedimento no ponto RM1 é observado no período V, esse elemento é de ocorrência natural, mas devido a localização do ponto RM1 pode existir uma contribuição proveniente dos lixões. Essa contribuição não foi observada no período chuvoso passado devido as intensas chuvas provocadas pelo La Niña que aumentou a diluição desse elemento. Essa maior concentração de alumínio no Murucupi também foi encontrada por Lopes (2014), onde o aumento da concentração de alumínio, onde esse elemento pode estar sendo inserido no ambiente através da lixiviação do solo. Os altos valores de Al encontrados no ambiente aquáticos amazônicos, podem estar relacionados a caulinita, principal fonte natural de alumínio para os rios da região amazônica (Pereira *et al.* 2011).

Segundo De Matos et al, (2023), ao longo de RM existem pontos focais de entrada de efluentes contendo As, Ba, Pb, Cr e Zn na comunidade de Bom futuro. Existe uma contribuição de Pb de origem antropogênica (efluentes domésticos) em detrimento da contaminação industrial (Oliveira *et al.* 2016). A falta de saneamento de Barcarena é um dos inputs de metais de origem doméstica para o meio ambiente. Segundo dados do censo de 2010 (IBGE,2010) somente 27,8% da população possuem esgotamento sanitário adequado um aumento de cerca de 14% em relação ao censo de 2000 (IBGE 2000). Atualmente, a Prefeitura de Barcarena, em parceria com a empresa de fornecimento de água, está desenvolvendo o projeto denominado “Tratar Bem Barcarena”, que tem como objetivo, até meados de 2025, levar água potável e oferecer esgotamento sanitário

adequado para cerca de 99% da população, tornando-se o primeiro município do estado do Pará a realizar tal feito.

7.3 ÁGUA SUPERFICIAL

Os metais Al, Fe, Mn e Ba apresentaram as maiores concentrações em todos os períodos analisados, como falado anteriormente esses elementos têm em comum o fato de serem componentes das rochas presentes no arcabouço geológico da formação Barreiras. Durante a análises dos resultados foi possível observar um padrão para esses 4 metais. Os metais Al e Fe apresentam comportamento semelhantes, onde ambos possuem uma tendência a estarem na forma dissolvida em relação a particulada.

As flutuações de parâmetros físico-químicos juntos com processos físicos como ressuspensão do sedimento de fundo, são fatores que podem afetar diretamente a concentração de contaminantes na água e no sedimento (Perina *et al.* 2020). Esse comportamento pode estar relacionado com valores de pHs mais ácidos encontrados durante os períodos I e IV e VI, A diminuição do pH aumenta solubilidade desses metais tornando-os mais solúveis. Pequenos desvios no pH da água podem afetar a solubilidade de alguns metais, como Fe e Cu (Kefeni *et al.* 2017, Anawar, 2015). Em pH mais baixo há um predomínio da fração dissolvida devido ao aumento da solubilidade do Al (Igbokwe *et al.* 2019, Kefeni *et al.* 2017, Anawar, 2015). Este mesmo comportamento é observado para o Fe (Anawar, 2015).

Durante os períodos chuvosos os metais, apresentaram menores concentrações no sedimento e, como consequência, ocorre um aumento das suas concentrações na fração particulada em relação à dissolvida (com exceção do Ba). O aumento das chuvas e da hidrodinâmica pode provocar a ressuspensão dos sedimentos de fundo e mobilizando os metais presente nos sedimentos para a água (Hu *et al.* 2022), aumentando a concentração da fração particulada na coluna d'água. Já em períodos de menor pluviosidade, há um aumento da forma dissolvida em relação a particulada. Parâmetros abiótico como pH, salinidade, temperatura, oxigênio dissolvido e alcalinidade (Banaee *et al.* 2024, Yao *et al.* 2014) em conjuntos com o aumento da pluviosidade e a ressuspensão dos sedimentos de fundo contribuem para alterações entre as formas particulada e dissolvida (Liu *et al.* 2023, Yao *et al.* 2014).

O Mn também faz parte da formação geológica da região e devido ao processo de dragagem do rio, grande quantidade desse mineral pode ser mobilizada para o ambiente aquático. O Mn apresentou, em todos os pontos e em todos os períodos, um predomínio da espécie química dissolvida em relação a particulada. Esse comportamento pode estar

relacionado às características físico-químicas das águas amazônicas que favorecem essa especiação química. A solubilidade do Mn é controlada principalmente pelo pH e pelo potencial de oxidação e redução (ORP) (Grygo-Szymanko et al, 2016, Cetesb 2022). A solubilidade deste elemento aumenta com pH mais baixos (Grygo-Szymanko et al, 2016, WHO 2022). Em relação ao potencial redox valores de ORP tanto negativos quanto positivos determinam as formas oxidadas dissolvidas de Mn (Rumsby *et al.* 2014).

Durante as coletas foram observados valores positivos de potencial redox, ou seja, uma maior capacidade de oxidação, favorecendo o predomínio da espécie química Mn^{+4} . Em locais com maior capacidade de oxidação ocorrer há a oxidação do óxido de manganês para Mn^{+4} (Rumsby *et al.* 2014). Esse elemento possui grande importância para organismos aquáticos (Olmedo *et al.* 2013, Hosseini *et al.* 2015) e para seres humano (Cetesb, 2022) e a sua ausência pode causar prejuízo aos seres vivos.

O Ba apresentou um comportamento de ser encontrado principalmente na fase dissolvida. O Ba não é um elemento essencial para as plantas e animais causando efeitos tóxicos (Lamb *et al.* 2013) a presença de Ba em plantas pode afetar o crescimento (Sleimi *et al.* 2021). A barita é considerada praticamente insolúvel em ácidos e água (BinMerdhah *et al.* 2010), mas a sua solubilidade aumenta com o aumento da temperatura, da força iônica e com a pressão (Al-Kaabi *et al.* 2023).

O Pb foi encontrado em todos os pontos no período I, IV e V na água, esse elemento foi encontrado principalmente na forma particulada, esse achado é de grande importância, pois a fração dissolvida é mais facilmente absorvido pela biota aquática (Banaee *et al.* 2024; de Paiva et la., 2015; García-Rico *et al.* 2011; Hallberg *et al.* 2007). O Pb é um metal que não possui nenhuma importância biológica e tem toxicidade conhecida (Mousavi *et al.* 2022, Ribeiro *et al.* 2014, Peakall & Burger, 2003). O estudo da forma particulada dos metais, é de grande importância, para poder determinar o transporte de elementos tóxicos, já que fração particulada tem afinidade por fazer ligação com material particulado em suspensão (Souza Viana *et al.* 2023), sedimentos finos e muito finos entre outros.

A análise PCA (fração total) durante o período II (chuvoso de 2022), observou - se um aporte de As, Hg, Fe e Al para o ambiente, podendo estar relacionado ao aumento da intensidade da chuva e da lixiviação e erosão do solo. Na região amazônica, durante o período de maior pluviosidade, ocorre o retrabalhamento dos sedimentos de fundo e a lixiviação de áreas em torno, o que acaba liberando contaminantes (Ribeiro *et al.* 2017, Zheng *et al.* 2012, Brinkmann *et al.* 2013), alterando a concentrações dos metais presentes

na água e no sedimento. Um outro fator que pode contribuir com o aporte desses elementos para a água é que na região de Barcarena, há um saneamento básico precário e reduzida infraestrutura, o que contribui para o aparecimento desses elementos durante os períodos de maior pluviosidade. As e Hg são frequentemente encontrados no meio ambiente devido às emissões provenientes de resíduos sólidos, aterros sanitários e efluentes domésticos (Ferronato & Torretta, 2019, Kemerich *et al.* 2014, Celere *et al.* 2007).

Em relação ao Al e Fe, esses elementos são constituintes da formação barreiras estão em grandes quantidades, e durante os períodos II esses metais são mobilizados através da lixiviação e erosão do solo.

Na análise de fração dissolvida, notou-se que existe uma predominância do Al, esse resultado e observado na análise do Donut pie, onde o Alumínio apresentou uma tendência em ser encontrado principalmente na forma dissolvida esse mesmo comportamento foi observado para o Fe e Ba. As características ácidas das águas dos rios amazônicos facilitam a especiação desse metal na forma dissolvida.

A PCA realizada com os dos dados de água superficial demonstra que, na fração particulada, o metal Fe é fortemente relacionado ao período II, enquanto Ba, Pb e Cd ao período I. Os dois primeiros, como já falando anteriormente, são metais constituintes e durante o período chuvoso, eles são mobilizados e removidos do solo para o ambiente aquático. Os demais metais analisados apresentaram durante o período I uma tendência de serem encontrados na sua forma particulada. A prevalência desses 3 metais na forma particulada pode estar relacionada às características dos parâmetros abióticos que favorecem a especiação na forma particulada.

7.4 DINÂMICA DOS METAIS (ÁGUA, SEDIMENTO E A BIODISPONIBILIDADE)

Durante os períodos (I, II e V), há um aumento da intensidade das chuvas, alterando a hidrodinâmica dos rios e favorecendo processos como a ressuspensão do sedimento de fundo, lixiviação, erosão e aumento da turbulência da água. Esses processos afetam a disponibilidade de elementos metálicos no ambiente aquático, promovendo o aporte de metais do solo para a água (por meio da lixiviação e erosão) e a liberação de metais complexados no sedimento (devido à ressuspensão do sedimento e à turbulência da água). Como consequência, há uma diminuição das concentrações de metais no sedimento e um aumento na coluna d'água. O aumento do regime de chuvas ocasionado pelo fenômeno La Niña pode intensificar esses processos, levando à remoção e mobilização de metais para o ambiente aquático por meio da lixiviação (Wang *et al.* 2024) e da erosão (Rocha *et al.* 2022, Sthiannopkao *et al.* 2007).

Durante a estação seca (III, IV e VI), devido à redução do aporte de água ao sistema aquático, ocorre um aumento na sedimentação das partículas finas, que se aglomeram por floculação e formam complexos com metais e matéria orgânica. Esses complexos resultam na formação de 'flocos' de material presente na coluna d'água, que são posteriormente depositados no sedimento de fundo dos rios. Durante o período de menor pluviosidade, ocorre um aumento da deposição sedimentar devido à intensificação do processo de floculação dos sedimentos suspensos, o que eleva a velocidade de sedimentação (Tao *et al.* 2014, Mikkelsen *et al.* 2004).

As variações sazonais das concentrações dos metais nas matrizes ambientais (água e sedimento) afetam a biodisponibilidade desses elementos. Durante a estação seca, os metais, em sua maioria, não são encontrados na forma biodisponível, pois formam complexos com matéria orgânica e/ou partículas finas, sendo depositados no sedimento de fundo, ou seja, no período estiagem, metais potencialmente tóxicos tendem a ser menos absorvidos pelos organismos aquáticos.

Um estudo realizado por Milazzo *et al.* (2014) mostrou que as maiores concentrações de metais biodisponíveis estão no período estiagem. Tal fato é ocasionado pela diminuição das chuvas, o que resulta na redução da diluição de metais, juntamente com variações de pH e Eh que favorecem o aumento das formas biodisponíveis. Contudo, com a chegada da estação chuvosa, o aumento da turbulência e da ressuspensão de sedimentos são fatores que podem influenciar a liberação de contaminantes, podendo assim provocar o aumento da biodisponibilidade dos metais. Entretanto, com o aumento

das chuvas, há uma maior diluição dos metais, tornando-os menos biodisponíveis e, conseqüentemente, mais facilmente absorvidos pelos organismos. Além disso, o aumento da precipitação e da vazão provoca uma elevação da hidrodinâmica dos rios, o que favorece a diluição dos poluentes (Milazzo *et al.* 2014).

De maneira geral, os metais apresentam um comportamento em que as formas mais biodisponíveis ocorrem na estação seca, enquanto as menos biodisponíveis predominam na estação chuvosa. No entanto, fatores físico-químicos, como pH, salinidade, oxigênio dissolvido, potencial redox, entre outros, podem influenciar esse comportamento. Isso foi evidenciado nos resultados obtidos durante as coletas, que indicam que diferentes fatores contribuem para a biodisponibilidade dos elementos. Por exemplo, ao analisarmos o alumínio (Al), observa-se que esse elemento apresenta maior concentração na forma biodisponível durante a estação seca em comparação à chuvosa. Como mencionado anteriormente, as características químicas das águas amazônicas, especialmente o pH ácido, favorecem a presença do Al na forma dissolvida (biodisponível). Entretanto, durante o período chuvoso, há uma maior diluição dos elementos e uma elevação do pH da água, tornando-a mais alcalina, o que favorece a especiação do Al na forma não biodisponível (particulada). Com a diminuição das chuvas e, conseqüentemente, a com a redução do pH, há um favorecimento da especiação do Al na forma biodisponível (dissolvida). Esse mesmo comportamento foi observado para os elementos ferro (Fe) e bário (Ba), evidenciando que, além da sazonalidade, as condições físico-químicas da água desempenham um papel fundamental na especiação e biodisponibilidade dos metais no ambiente.

8 CONCLUSÃO

No contexto urbano-industrial de Barcarena, evidenciou-se que a formação geológica local (Formação Barreiras) exerce influência significativa nas concentrações naturais de metais. As variações observadas ocorreram, predominantemente, em função da sazonalidade em relação as variações espaciais. No entanto, a precariedade da infraestrutura urbana e a ausência de saneamento básico adequado na região podem estar contribuindo para o incremento de metais no ambiente, ressaltando que fontes difusas — além das grandes indústrias instaladas — devem ser consideradas nas análises ambientais locais. Os metais analisados apresentaram um comportamento relacionado a sua especiação química. Os elementos Al, Fe e Mn principais constituintes da formação barreiras foram encontrados principalmente na forma dissolvida. Enquanto outros como Ba e Pb são encontrados principalmente na forma particulada. A especiação química desses elementos está relacionada às características físico-químicas da água dos rios amazônicos, que favorecem essa especiação.

No decorrer dos seis períodos amostrados, não foram constatadas alterações associadas ao regime de marés. Contudo, a ausência de diferenças entre as marés pode ser explicada pelo fato de não ter sido possível coletar amostras ao longo de todo o ciclo de maré (enchente e vazante). Ainda assim, são necessários mais estudos na região, com a coleta de amostras ao longo de todo o ciclo de maré 13 horas, em ambas as matrizes amostradas, para que assim possamos o real comportamento dos metais no ambiente

Outro achado relevante deste estudo foi a identificação, de forma pioneira na região amazônica, da influência dos eventos ENSO (El Niño e La Niña) sobre a distribuição e o comportamento geoquímico dos metais e metaloides. Tais eventos climáticos afetaram a especiação química dos elementos na água e alteraram suas concentrações nos sedimentos, promovendo aumento ou diminuição conforme a fase climática observada.

Conclui-se, portanto, que avaliações ambientais realizadas na Amazônia devem necessariamente considerar o aporte natural de metais nos compartimentos abióticos, a fim de diferenciar de forma mais precisa as possíveis contaminações antrópicas. Por fim, destaca-se a urgência na criação de limites legais específicos para a região amazônica,

contemplando suas características físico-químicas particulares e o seu elevado dinamismo ambiental.

REFERÊNCIAS

- Agência Nacional de Mineração – ANM. 2021. Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas. Brasília, DF.
- Afshan S., Ali S., Ameen U.S., Farid M., Bharwana S.A., Hannan F., Ahmad R. 2014. Effect of different heavy metal pollution on fish. *Research Journal of Chemical and Environmental Sciences*, **2**(1):74–79.
- Akpor O. 2014. Heavy metal pollutants in wastewater effluents: sources, effects and remediation. *Advances in Bioscience and Bioengineering*, **2**:37.
- Akaishi F.M., St-Jean S.D., Bishay F., Clarke J., Rabitto I.D.S., de Oliveira Ribeiro C.A. 2007. Immunological responses, histopathological findings and disease resistance of blue mussel (*Mytilus edulis*) exposed to treated and untreated municipal wastewater. *Aquatic Toxicology*, **82**(1):1-14.
- Anawar H.M. 2015. Sustainable rehabilitation of mining waste and acid mine drainage using geochemistry, mine type, mineralogy, texture, ore extraction and climate knowledge. *Journal of Environmental Management*, **158**:111-121.
- Al-Kaabi F.S., Hussein R.A., Abdulkareem M.A. 2023. Dissolution of barite using coordination chemistry: optimization and characterization. *Results in Chemistry*, **5**:100791.
- Al-Saadi H.A., Al-Lami A.A., Hassan F.A., Al-Dulyimi A.A. 2002. Heavy metals in water, suspended particles, sediments and aquatic plants of Habbaniya Lake, Iraq. *International Journal of Environmental Studies*, **59**(5):589-598.
- Aviz D., Carvalho I.L.R., Rosa Filho J.S. 2012. Spatial and temporal changes in macrobenthic communities in the Amazon coastal zone Guajará Estuary, Brazil caused by discharge of urban effluents. *Scientia Marina*, **76**:381-390.
- Antunes M.L.P., Conceição F.T., Navarro G.R.B. 2011. Caracterização da lama vermelha brasileira (resíduo do refino da bauxita) e avaliação de suas propriedades para futuras aplicações. In: 3º International Workshop Advances in Cleaner Production, Anais [...] São Paulo, Brasil.
- Araújo V.D., de Lima J.F., dos Santos R.A., Bezerra F.H.R., de Oliveira P.H. 2006. Fácies e sistema deposicional da Formação Barreiras na região da Barreira do Inferno, litoral oriental do Rio Grande do Norte. *Geologia USP. Série Científica*, **6**(2):43–49.
- Associação Brasileira de Engenharia – ABES. 2019. Ranking ABES da Universalização do Saneamento.
- Azeredo A.F.N., Carneiro A.M.P., Azeredo G.A., Sardela M. 2014. Hardened properties of lime-based mortars produced from kaolin waste. *Key Engineering Materials*, **600**:282–296.

Banaee M., Zeidi A., Mikušková N., Faggio C. 2024. Assessing metal toxicity on crustaceans in aquatic ecosystems: a comprehensive review. *Biological Trace Element Research*, **202**:5743–5761.

Barcarena. 2016. Plano Diretor de Desenvolvimento Urbano de Barcarena.

Barbato C.N., da Silva F.A., Sampaio J.A., Medeiros M.E., França S.C., Nele M., Garrido F. 2013. Avaliação estatística das variáveis que influenciam a viscosidade da polpa de bauxita do Pará com alto teor de SiO₂ reativa. *Matéria (Rio de Janeiro)*, **18**:1410-1424.

Barros M.J.B. 2007. Vila do Conde e a instalação dos projetos em Barcarena. In: Mathis A. (Org.). Poder local e mudanças socioambientais. Belém: NAEA/UFPA.

Bianchi T.S. 2007. Biogeochemistry of estuaries. Oxford, Oxford University Press Inc. 706 p.

Bastos T.X., Pachêco N.A. 2005. Frequências de chuva no Estado do Pará no plano microrregional. *Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento*, **50**:1-28. Disponível em: www.cpatu.embrapa.br. Acessado em: 02/05/2023.

Bombazaro J.L., Bernardin A.M. 2022. Improving plasticity of kaolins by high-energy milling for use in porcelain tile compositions. *Open Ceramics*, **10**:100256.

Buss D.F., Baptista D.F., Silveira M.P., Nessimian J.L., Dorvillé L.F. 2002. Influence of water chemistry and environmental degradation on macroinvertebrate assemblages in a river basin in south-east Brazil. *Hydrobiologia*, **481**:125–136.

Behling H., Da Costa M.L. 2004. Mineralogy, geochemistry, and palynology of modern and late Tertiary mangrove deposits in the Barreiras Formation of Mosqueiro Island, northeastern Pará state, eastern Amazonia. *Journal of South American Earth Sciences*, **17**(4):285–295.

Binmerdhah A.B., Yassin A.A.M., Muherei M.A. 2010. Laboratory and prediction of barium sulfate scaling at high-barium formation water. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, **70**:79–88.

Bhatnagar A., Vilar J., Botelho C.M., Boaventura R.A. 2011. A review of the use of red mud as adsorbent for the removal of toxic pollutants from water and wastewater. *Environmental Technology*, **32**(3):231–249.

Brasil. 2024. Ministério do Meio Ambiente. Zoneamento da Zona Costeira Brasileira: subdivisão macrozonal Norte, Nordeste, Sudeste e Sul. Disponível em: antigo.mma.gov.br. Acessado em: 22/07/2024.

Brasil A.de P.de M. dos. 2017. *Gestão de resíduos sólidos urbanos na Amazônia paraense: um estudo sobre o município de Barcarena (1897-2017)*. MS Dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 196p. Disponível em : <http://hdl.handle.net/11449/151931>. Acesso 05/02/2025

Brasil. Presidência da República. Casa Civil. 2018. Relatório de viagem aos municípios de Belém, Ananindeua e Barcarena, Estado do Pará, ocorrida entre os dias 26 e 27/04/2018. Brasília/DF.

Brinkmann M., Hudjetz S., Kammann U., Hennig U.M., Kuckelkorn J., Chinoraks M., Cofalla C., Wiseman S., Giesy J.P., Schäffer A., Hecker M., Wölz J., Schüttrumpf H., Hollert H. 2013. How flood events affect rainbow trout: evidence of a biomarker cascade in rainbow trout after exposure to PAH contaminated sediment suspensions. *Aquatic Toxicology*, **128–129**:13–24.

Brunori C., Cremisini C., Massanisso P., Pinto V., Torricelli L. 2005. Reuse of a treated red mud bauxite waste: studies on environmental compatibility. *Journal of Hazardous Materials*, **117**:55–63.

Cardenia C., Balomenos E., Panias D. 2019. Iron recovery from bauxite residue through reductive roasting and wet magnetic separation. *Journal of Sustainable Metallurgy*, **5**:9–19.

Casado A.P.B., Holanda F.S.R., Araújo Filho F.A.G., Yagui P. 2002. Bank erosion evolution in São Francisco River (Cotinguiba/Pindoba-SE) irrigated area. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **26**:231-239.

Castro J., Resque Júnior B., Pontes A., Morales G. 2014. Potabilidade das águas subterrâneas para o consumo humano na área do polo industrial de Barcarena-Pará. *Enciclopédia Biosfera*, **10(19)**:2921-2934.

Cavalcante A.M.S. 2021. Determinação de metais pesados (Fe, Mn, Cd, Cu, Co, Cr, Ni, Zn e Pb), matéria orgânica e carbono orgânico no sedimento de áreas de manguezal no município de Vigia de Nazaré, NE-PA. *Holos Environment*, **21(1)**:105-123.

Celere M.S., Oliveira A.D.S., Trevilato T.M.B., Segura-Muñoz S.I. 2007. Metais presentes no chorume coletado no aterro sanitário de Ribeirão Preto, São Paulo, Brasil, e sua relevância para saúde pública. *Cadernos de Saúde Pública*, **23(4)**:939-947.

Centro de Tecnologia Mineral – CETEM. 2024. Rochas e minerais industriais uso e especificação. Disponível em: <https://www.cetem.gov.br/antigo/images/publicacoes/livros/rmi/13-BARITA.pdf>. Acessado em: 15/03/2024.

Corrêa J.M., Gerhard P., Figueiredo R.O. 2012. Ictiofauna de igarapés de pequenas bacias de drenagem em área agrícola do Nordeste Paraense, Amazônia Oriental. *Revista Ambiente & Água*, **7**:214–230.

Companhia de Desenvolvimento de Minas Gerais – CODMGE. 2018. *Ferro* Disponível em: <http://recursomineralmg.codemge.com.br/wpcontent/uploads/2018/10/Ferro.pdf>. Acessado em: 05/03/2024.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2012. Manganês: Ficha de informação toxicológica. São Paulo. Disponível em:

<https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wpcontent/uploads/sites/24/2021/05/Mangane%CC%82s.pdf>. Acessado em: 25/03/2024.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2017. Alumínio: Ficha de informação toxicológica. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wp-content/uploads/sites/24/2013/11/Aluminio.pdf>. Acessado em: 25/03/2024.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2017. Bário: Ficha de informação toxicológica. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wpcontent/uploads/sites/24/2013/11/Bario.pdf>. Acessado em: 25/03/2024.

Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB. 2022. Manganês: Ficha de informação toxicológica. São Paulo. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/laboratorios/wpcontent/uploads/sites/24/2021/05/Mangane%CC%82s.pdf>. Acessado em: 25/03/2024.

Chapman W.W., Bridewell W., Hanbury P., Cooper G.F., Buchanan B.G. 2001. A simple algorithm for identifying negated findings and diseases in discharge summaries. *Journal of Biomedical Informatics*, **34**(5):301–310.

Chen W., Ding Y., Li B., Zhao M., Li C., Jiao Y. 2022. Pyrolysis characteristics and stage division of red mud waste from the alumina refining process for cyclic utilization. *Fuel*, **326**:125063.

Chen J., Wang Y., Liu Z. 2023. Red mud-based catalysts for the catalytic removal of typical air pollutants: a review. *Journal of Environmental Sciences*, **127**:628–640.

Dauvin J.C. 2010. Towards an impact assessment of bauxite red mud waste on the knowledge of the structure and functions of bathyal ecosystems: the example of the Cassidaigne canyon (north-western Mediterranean Sea). *Marine Pollution Bulletin*, **60**:197–206.

Carlo E., Boullemant A., Courtney R. 2020. Ecotoxicological risk assessment of revegetated bauxite residue: implications for future rehabilitation programmes. *Science of the Total Environment*, **698**:134344.

Santos P.H.C., da Costa M.L. 2021. Mineralogy, geochemistry and parent rock of Décio bauxite-bearing lateritic profile (Rondon do Pará, Eastern Amazon). *Brazilian Journal of Geology*, **51**(4).

Duarte H.A. 2019. Ferro: um elemento químico estratégico que permeia história, economia e sociedade. *Química Nova*, **42**(10):1146-1153.

Egler S.G., de Paiva Magalhães D., França S.C.A., Couto H.J.B., Barbosa R. 2019. Ecotoxicological assessment of bauxite residue (red mud) overflow treated by dissolved air flotation (DAF). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **185**:109708.

- Fernández-Martínez R., Corrochano N., Álvarez-Quintana J., Ordóñez A., Álvarez R., Rucandio I. 2024. Assessment of the ecological risk and mobility of arsenic and heavy metals in soils and mine tailings from the Carmina mine site (Asturias, NW Spain). *Environmental Geochemistry and Health*, **46**(3):90.
- Ferreira T.O., Queiroz H.M., Nóbrega G.N., de Souza Júnior V.S., Barcellos D., Ferreira A.D., Otero X.L. 2022. Litho-climatic characteristics and its control over mangrove soil geochemistry: a macro-scale approach. *Science of the Total Environment*, **811**:152152.
- Ferronato N., Torretta V. 2019. Waste mismanagement in developing countries: a review of global issues. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **16**(6):1060.
- Freitas C.M., Silva M.A.D. 2019. Acidentes de trabalho que se tornam desastres: os casos dos rompimentos em barragens de mineração no Brasil. *Revista Brasileira de Medicina do Trabalho*, **17**(1):21–29.
- Furtado L.G., Morales G.P., Silva D.F., Pontes A.N. 2020. Transformações do uso e cobertura da terra na bacia hidrográfica do rio Murucupi, Barcarena, Pará. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **13**(5):2340–2354.
- Grygo-Szymanko E., Tobiasz A., Walas S. 2016. Speciation analysis and fractionation of manganese: a review. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, **80**:112–124.
- Harris P., Muelbert J., Muniz P., Yin K., Ahmed K., Folorunsho R., Rice J. 2016. Estuaries and deltas. United Nations World Ocean Assessment.
- Hatje V., Payne T.E., Hill D.M., McOrist G., Birch G.F., Szymczak R.J.E.I. 2003. Kinetics of trace element uptake and release by particles in estuarine waters: effects of pH, salinity, and particle loading. *Environment International*, **29**(5):619–629.
- Hallberg M., Renman G., Lundbom T. 2007. Seasonal variations of ten metals in highway runoff and their partition between dissolved and particulate matter. *Water, Air, and Soil Pollution*, **181**(1–4):183–191.
- Hazeu M.T. 2015. O não-lugar do outro: sistemas migratórios e transformações sociais em Barcarena. Universidade Federal do Pará, Belém.
- García-Rico L., Jiménez-Illescas A.R., Ramos-López M.A., Ríos-Arana J.V., Alonso-Hernández C.M. 2011. Dissolved and particulate metals in water from Sonora Coast: a pristine zone of Gulf of California. *Environmental Monitoring and Assessment*, **176**(1–4):109–123.
- Gomes D.D.O., Brandão W.N.M.P., Madeira M.Z.D.A. 2020. Justiça racial e direitos humanos dos povos e comunidades tradicionais. *Revista Katálysis*, **23**(2):317–326.
- Guimarães D.K.M., El-Robrini M., Rosário R.P., Menezes R.A.A. 2023. Recent coastline trends on the east margin of the Middle Pará estuary. *Mercator (Fortaleza)*, **22**:e22019. <https://doi.org/10.4215/rm2023.e22019>

Hu X., Shi X., Su R., Jin Y., Ren S., Li X. 2022. Spatiotemporal patterns and influencing factors of dissolved heavy metals off the Yangtze River estuary, East China Sea. *Marine Pollution Bulletin*, **182**:113975.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2000. Censo Demográfico 2000. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/barcarena/panorama>. Acessado em: 05/05/2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2010. Censo Demográfico 2010. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/barcarena/panorama>. Acessado em: 05/05/2024.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística - IBGE. 2022. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/barcarena/panorama>. Acessado em: 05/05/2024.

Imerys. 2023. Imerys Brasil. Disponível em: <https://www.imerys.com/pt-br/brasil>. Acessado em: 05/05/2024.

Igbokwe I.O., Igwenagu E., Igbokwe N.A. 2019. Aluminium toxicosis: a review of toxic actions and effects. *Interdisciplinary Toxicology*, **12**(2):45–70.

Kamble R., Thakare M.G., Ingle A.B. 2013. Iron in the environment. *Indian Journal of Environmental Protection*, **33**:881–888.

Kefeni K.K., Msagati T.A., Mamba B.B. 2017. Acid mine drainage: prevention, treatment options, and resource recovery: a review. *Journal of Cleaner Production*, **151**:475–493.

Kemerich C.P.D., Silva L.B., Machado S.L.O., Duarte I.C.S. 2014. Indicativo de contaminação ambiental por metais pesados em aterro sanitário. *Revista Monografias Ambientais*, **37**:744–755. <http://dx.doi.org/10.5902/2236130814441>

Lima C.M. 2008. Ocorrência de barita no grupo Barreiras - litoral norte do estado da Bahia. Monografia, Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências, Salvador. 67 p.

Liu X., Li Y., Li H., Wang L., Liu J. 2024. Suspended particulate matter affects the distribution and migration of heavy metals in the Yellow River. *Science of The Total Environment*, **912**:169537.

Liu H., Liu X., Cui Z., Song X., Wang J. 2023. Dissolved and particulate heavy metal pollution status in seawater and sedimentary heavy metals of the Bohai Bay. *Marine Environmental Research*, **191**:106158.

Lopes I.D.S. 2014. Hidroquímica dos rios Arienga e Murucupí, município de Barcarena (PA). Dissertação (Mestrado em Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais/Ecologia Aquática e Manejo de Recursos Naturais) – Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém. 140 p. Disponível em: <http://repositorio.ufra.edu.br/jspui/handle/123456789/1869>. Acessado em: 24/06/2023

Luz A.B.D., Lins F.A.F. 2005. Rochas & Minerais Industriais: usos e especificações. 1st ed. CETEM/MCT, Rio de Janeiro. Cap. 31, pp. 655–676. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/674>. Acessado em: 27/12/2024.

Matos G.S.B., Brasil Neto A.B., Gama M.A.P., Gonçalves D.A.M., Cardoso D.F.S.R., Ramos H.M.N. 2023. Soil potentially toxic element contents in an area under different land uses in the Brazilian Amazon. *Heliyon*, **9**(6):e17108.

Marengo J.A., Espinoza J.C. 2016. Extreme seasonal droughts and floods in Amazonia: causes, trends and impacts. *International Journal of Climatology*, **36**(3):1033–1050.

Mártires R.A.C. 2009. Caulim. In: Brasil. Departamento Nacional de Produção Mineral. Economia Mineral do Brasil. DNPM, Brasília, pp. 442–451.

Malheiro B.C. 2020. Mineração e territorialização de exceção na Amazônia: a geografia em ruínas dos grandes projetos. *Boletim Goiano de Geografia*, **40**(1):1–24.

Meira S.A. 2016. De frente para o mar: Os geossítios costeiros do Brasil. *Revista de Geociências do Nordeste*, **2**:1179–1188.

Mendonça A.M.G., de Souza L.M.C., Lira Y.C., de Sousa Neto V.F., de Negreiros Duarte E.V., Nunes C.G.L., de Oliveira Silva D., de Medeiros Lima A., de Oliveira Silva R., Diniz M.I.L. 2021. Resíduo de caulim como material alternativo para produção de blocos de tijolos solo-cimento. *Brazilian Journal of Development*, **7**(5):44168–44178.

Menezes R.R., de Almeida R.R., Santana L.N.L., Ferreira H.S., Neves G.A., Ferreira H.C. 2007. Utilização do resíduo do beneficiamento do caulim na produção de blocos e telhas cerâmicos. *Matéria (Rio de Janeiro)*, **12**:226–236.

Mikkelsen O.A., Saetre R., Eriksen O.K., Pejrup M., Moller O.S. 2004. INSSECT—An instrumented platform for investigating floc properties close to the seabed. *Limnology and Oceanography: Methods*, **2**(7):226–236.

Milačić R., Zuliani T., Ščančar J. 2012. Environmental impact of toxic elements in red mud studied by fractionation and speciation procedures. *Science of The Total Environment*, **426**:359–365.

Monteiro M.A. 2005. Meio século de mineração industrial na Amazônia e suas implicações para o desenvolvimento regional. *Estudos Avançados*, **19**:187–207.

Moskalski S.M., Meckel T.A., MacVean L.J. 2013. Low-tide rainfall effects on metal content of suspended sediment in the Sacramento-San Joaquin Delta. *Continental Shelf Research*, **56**:39–55.

Mousavi S.M., Eslami H., Mohammadi M.J., Hossini H. 2022. Lead bioavailability in the environment: its exposure and effects. *Journal of Advances in Environmental Health Research*, **10**(1):1–14.

- Montagner C.C., Vidal C., Acayaba R.D. 2017. Contaminantes emergentes em matrizes aquáticas do Brasil: cenário atual e aspectos analíticos, ecotoxicológicos e regulatórios. *Química Nova*, **40**(9):1094–1110.
- Muggler C.C., Buurman P., van Doesburg J.D. 2007. Weathering trends and parent material characteristics of polygenetic oxisols from Minas Gerais, Brazil: I. mineralogy. *Geoderma*, **138**(1–2):39–48.
- Nascimento N.S.F., Hazeu M.T. 2015. Grandes empreendimentos e contradições sociais na Amazônia: a degradação da vida no município de Barcarena, Pará. *Argumentum*, **7**(2):288–301.
- Nahum J.S. 2006. O uso do território em Barcarena: modernização e ações políticas conservadoras. Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, 126 p.
- Nogueira Neto I.L.A. 2010. Biogeografia histórica da coralinofauna e briozoofauna do Mioceno do Pará e sua possível correlação com as rochas reservatórios carbonáticas das bacias costeiras do Norte brasileiro. Trabalho de Curso (Bacharelado em Geologia), Faculdade de Geologia, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 89 p. Disponível em: <http://bdm.ufpa.br/jspui/handle/prefix/1681>. Acessado em: 05/05/2024.
- Nunes F.C., Silva E.F., Vilas B. 2011. GS Grupo Barreiras—características, gênese e evidências de neotectonismo. Dados eletrônicos, Embrapa Solos, 31 p. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, Embrapa Solos, (194).
- Remeteiová D., Ružičková S., Heželová M., Pikna E. 2023. Utilization of extraction procedures for evaluating environmental risk from waste materials. *Toxics*, **11**(8):678.
- Reza R., Singh G. 2010. Heavy metal contamination and its indexing approach for river water. *International Journal of Environmental Science and Technology*, **7**:785–792.
- Rumsby P., Rockett L., Clegg H., Jonsson J., Benson V., Harman M., Warwick P. 2014. Speciation of manganese in drinking water. *Toxicology Letters*, **229**: S120.
- Oliveira D.C., Lafon J.M., de Oliveira Lima M. 2016. Distribution of trace metals and Pb isotopes in bottom sediments of the Murucupi River, North Brazil. *International Journal of Sediment Research*, **31**(3):226–236.
- Oral R., et al. 2019. Soil pollution and toxicity in an area affected by emissions from a bauxite processing plant and a power plant in Gardanne (southern France). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **170**:55–61.
- Pará. 2011. Estatística Municipal. Disponível em: <https://iah.iec.gov.br/iah/fulltext/georeferenciamento/abaetetuba.pdf>. Acessado em: 15/08/2024.
- Pará. Secretaria de Estado de Desenvolvimento Econômico, Mineração e Energia. 2020. Relatório de Gestão Geral 2020. Disponível em:

https://sedeme.pa.gov.br/sites/default/files/relatorio_de_gestao_geral_2020_-_final.pdf.
Acessado em: 15/08/2024.

Pantoja D.N.S.M., Ribeiro H.M.C., de Loiola R.D.S.P., Rocha R.M. 2024. Chemical and microbiological diversity detected in water bodies in the municipality of Barcarena/PA, Amazonia, Brazil. *Revista Políticas Públicas & Cidades*, **13**(2):e1245–e1245.

Parrotti D.D., da Conceição F.T., Navarro G.R.B. 2023. The mineralogy, geochemistry and origin of the supergene manganese occurrences in the southern Minas Gerais, Brazil. *Minerals*, **13**(9):1216. <https://doi.org/10.3390/min13091216>

Paiva Magalhães D., Costa Marques M.R., Baptista D.F., Buss D.F. 2015. Metal bioavailability and toxicity in freshwaters. *Environmental Chemistry Letters*, **13**(1):69–87.

Peakall D., Burger J. 2003. Methodologies for assessing exposure to metals: speciation, bioavailability of metals, and ecological host factors. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, **56**(1):110–121. [https://doi.org/10.1016/S0147-6513\(02\)00067-1](https://doi.org/10.1016/S0147-6513(02)00067-1)

Pereira L.C.C., Dias J.A., do Carmo J.A., Polette M. 2009. A zona costeira amazônica brasileira. *Revista de Gestão Costeira Integrada – Journal of Integrated Coastal Zone Management*, **9**(2):3–7.

Pereira S.F.P., Barbosa C.A., Monteiro R.C.A., Batista L.L.R. 2011. Distribuição de elementos tóxicos no estuário do Rio Amazonas. *Eclética Química*, **36**(1):46–63.

Perina F.C., Abessa D.M.S. 2020. Contamination and toxicity in a subtropical estuarine protected area influenced by former mining activities. *Ocean and Coastal Research*, **68**:e20106. <https://doi.org/10.1590/2675-282420201686>

Poleto C., Martinez L.L.G. 2011. Sedimentos urbanos: ambiente e água. *Holos Environment (Online)*, **11**:1–15.

Pritchard D.W. 1967. What is an estuary: physical viewpoint. In: Lauff G.H. (Ed.), *Estuaries*. American Association for the Advancement of Science, **83**, Washington D.C.

Ranieri L.A., El-Robrini M. 2020. Morfologia e sedimentação em praias oceânicas da Amazônia Oriental durante a variação anual de chuvas. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **13**(5):2086–2102.

Ribeiro A.M., Monteiro R.T.R., Pinheiro B.C., Lemos B.R.S., Almeida D.V. 2014. Lead accumulation and its effects on the branchial physiology of *Prochilodus lineatus*. *Fish Physiology and Biochemistry*, **40**(3):645–657. <https://doi.org/10.1007/s10695-013-9876-5>

Rosa-Filho J.S. 2011. Diagnóstico da qualidade ambiental da Baía do Guajará (Belém-PA) utilizando indicadores químicos e biológicos (QUALIGUAJARÁ). Relatório de pesquisa, CNPq – Edital CT Hidro 01/2003 – Processo 504308/2003-3.

Rosário R.P., Silva A.C., Silva R.C. 2016. Variability of salinity in Pará River estuary: 2D analysis with flexible mesh model. In: Vila-Concejo A., et al. (Eds.), *Proceedings of the 14th International Coastal Symposium* (Sydney, Australia). *Journal of Coastal Research, Special Issue*, **75**:128–132.

Sassi R., Costa C.F. 2005. Uma abordagem sócio-econômica e sócio-ambiental dos pescadores artesanais e outros usuários ribeirinhos do estuário do rio Paraíba do Norte, estado da Paraíba, Brasil. *Tropical Oceanography*, **33**(2):179–192.

Saikia N.J., Bharali D.J., Sengupta P., Bordoli D., Goswamee P.C., Saikia P.C., Borthakur P.C. 2003. Characterization, beneficiation and utilization of kaolinite clay from Assam, India. *Applied Clay Science*, **24**(1–2):93–103. [https://doi.org/10.1016/S0169-1317\(03\)00044-4](https://doi.org/10.1016/S0169-1317(03)00044-4)

Santos P.L., Rodrigues T., Silva J.M.L., Valente M. 2003. Caracterização e classificação dos solos do município de Barcarena, Estado do Pará. Belém, Embrapa Amazônia Oriental. Documentos, 154. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/408081/1/OrientalDoc154.PDF>. Acesso: 27/05/11.

Santos I.R.D., Farias D.S., Castro J.A., Medeiros R.S. 2014. Impacto da adição de caulim nas propriedades físico-mecânicas do papel formado por sequências ECF. *Cerne*, **20**:231–238.

Silva A.C., Vidal M., Pereira M.G. 2001. Impactos ambientais causados pela mineração e beneficiamento de caulim. *Rem: Revista Escola de Minas*, **54**(2):133–136.

Silva P.C., Silva P.C. 2010. CFEM: compensação financeira pela exploração de recursos minerais: natureza jurídica e questões correlatas. Quartier Latin.

Silva F.A.O. 2012. Por uma gestão das águas na Bacia Hidrográfica do Rio Murucupi-Barcarena-PA. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geografia, Instituto de Filosofia e Ciências Humanas, Universidade Federal do Pará, Belém. 175 f.

Singh U., Thawrani S.A., Agnihotri A. 2022. Rare earth elements recover from red mud. In: *Environmental technologies to treat rare earth element pollution: principles and engineering*. IWA Publishing, p. 131–150. https://doi.org/10.2166/9781789062236_0131

Souza M.D.C. de. 2013. Fracionamento de elementos traços no sistema de transposição do Rio Paraíba do Sul por ultrafiltração tangencial. Disponível em: <https://app.uff.br/riuff/handle/1/4822>. Acessado em: 25/07/2023.

Sousa K.C., Oliveira P.T.S., Silva M.A.S., Soares J.L. 2020. Caracterização dos processos de erosão fluvial e movimento de massa na falésia fluvial do Rio Negro, Amazonas. *Boletim Paulista de Geografia*, **1**(103):54–66.

Souza V.L., Lima V.L., Hazin C.A., Fonseca C.K., Santos S.O. 2015. Biodisponibilidade de metais-traço em sedimentos: uma revisão. *Brazilian Journal of Radiation Sciences*, **3**(1A Suppl.).

Silva Filho E.B., Alves M.C.M., da Motta M. 2007. Lama vermelha da indústria de beneficiamento de alumina: produção, características, disposição e aplicações alternativas. *Matéria (Rio de Janeiro)*, **12**:322–338.

Scarpelli W. 2006. Arsênio do minério de manganês de Serra do Navio. *Novos Cadernos NAEA*, **6**(1):101–133.

Schaefer C.E.G.R., Fabris J.D., Ker J.C. 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian latosols oxisols: a review. *Clay Minerals*, **43**:137–154. <https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.137>

Shil S., Singh U.K. 2019. Health risk assessment and spatial variations of dissolved heavy metals and metalloids in a tropical river basin system. *Ecological Indicators*, **106**:105519. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2019.105519>

Sleimi N., Smaoui A., Barkallah M., Haddad S., Jebali R. 2021. Barium effect on germination, plant growth, and antioxidant enzymes in *Cucumis sativus* L. plants. *Food Science & Nutrition*, **9**(4):2086–2094. <https://doi.org/10.1002/fsn3.2216>

Sthiannopkao S., Takizawa S., Homewong J., Wirojanagud W. 2007. Soil erosion and its impacts on water treatment in the northeastern provinces of Thailand. *Environment International*, **33**(5):706–711. <https://doi.org/10.1016/j.envint.2007.01.006>

Samouhos M., Taxiarchou M., Tsakiridis P.E., Potiriadis K. 2013. Greek “red mud” residue: a study of microwave reductive roasting followed by magnetic separation for a metallic iron recovery process. *Journal of Hazardous Materials*, **254**:193–205. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.03.005>

Szlafsztein C.F. 2012. The Brazilian Amazon coastal zone management: implementation and development obstacles. *Journal of Coastal Conservation*, **16**:335–343. <https://doi.org/10.1007/s11852-011-0177-z>

Tao J., Hill P.S., Mulligan R.P., Smith P.C. 2014. Seasonal variability of total suspended matter in Minas Basin, Bay of Fundy. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, **151**:169–180. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2014.09.015>

Templeton D.M., Ariese F., Cornelis R., Danielsson L.G., Muntau H., van Leeuwen H.P., Lobinski R. 2000. Guidelines for terms related to chemical speciation and fractionation of elements. Definitions, structural aspects, and methodological approaches (IUPAC Recommendations 2000). *Pure and Applied Chemistry*, **72**(8):1453–1470. <https://doi.org/10.1351/pac200072081453>

Thrush S.F., Hewitt J.E., Lohrer A.M., Chiaroni L.D. 2013. The many uses and values of estuarine ecosystems. In: Dymond J. (Ed.), *Ecosystem services in New Zealand – conditions and trends*. Manaaki Whenua Press, Lincoln, p. 226–237.

Wang S., Ang H.M., Tade M.O. 2008. Novel applications of red mud as coagulant, adsorbent and catalyst for environmentally benign processes. *Chemosphere*, **72**(11):1621–1635. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.04.016>

Xue S., Zhu F., Kong X., Wu C., Huang L., Huang N., Hartley W. 2016. A review of the characterization and revegetation of bauxite residues (red mud). *Environmental Science and Pollution Research International*, **23**:1120–1132. <https://doi.org/10.1007/s11356-015-5479-0>

Yao H., Zhang Y., Zhao H., Wang C., Liu H., Yu Z., Wang X. 2014. Seasonal and spatial variations of heavy metals in two typical Chinese rivers: concentrations, environmental risks, and possible sources. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **11**(11):11860–11878. <https://doi.org/10.3390/ijerph111111860>

Yin S., Xu J., Shen M., Ma S., Zhang L., Bai Z. 2016. Contribution of the upper river, the estuarine region, and the adjacent sea to the heavy metal pollution in the Yangtze estuary. *Chemosphere*, **155**:564–572. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2016.04.070>

Zheng Y., Liu H., Wang X., Wang H., Liu Y. 2012. Enrichment behavior and transport mechanism of soil-bound PAHs during rainfall-runoff events. *Environmental Pollution*, **171**:85–92. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2012.07.021>

APÊNDICE A - ANÁLISE COMPARATIVA DAS CONCENTRAÇÕES DE METAIS DURANTE A ENCHENTE E VAZANTE

Concentração de metais no sedimento por influência da maré											
Locais	Campanhas	Metais									
		Al	Ba	Cd	Cr	Pb	Fe	Mn	Ni	As	Hg
Arienga 1	Campanha 1	W = 35; p = 0,7984	W = 37; p = 0,1282	W = 40; p = 0,4418	W = 6; p = 0,7	W = 21; p = 0,4634	W = 24; p = 1	W = 23; p = 0,3823	W = 7; p = 0,4	W = 9; p = 0,1	W = 5; p = 1
	Campanha 2	W = 44; p = 0,2345	W = 35; p = 0,2086	nd	W = 4; p = 0,2	W = 4; p = 1	W = 26; p = 0,5737	nd	W = 6; p = 0,7	W = 9; p = 0,5476	nd
	Campanha 3	W = 23; p = 0,6126	W = 29; p = 0,9551	nd	W = 4; p = 1	W = 0; p = 0,1	W = 21; p = 0,7104	W = 17; p = 0,2319	W = 0; p = 0,1	W = 3; p = 1	W = 9; p = 0,1
	Campanha 4	W = 27; p = 0,7546	W = 31; p = 0,7789	nd	W = 3; p = 0,7	W = 4; p = 1	W = 27; p = 0,9551	W = 28; p = 1	W = 4; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd
	Campanha 5	di	di	di	di	di	di	di	di	di	di
	Campanha 6	t = -6,870; p = 0,002	t = 1,610; p = 0,1825	nd	t = 0,970; p = 0,386	t = -0,374; p = 0,727	t = 1,197; p = 0,297	W = 7; p = 0,4	t = 0,806; p = 0,465	t = 0,252; p = 0,812	t = 0,431; p = 0,688
Arienga 2	Campanha 1	W = 30; p = 0,8665	di	di	di	W = 18; p = 0,4908	W = 14; p = 0,5887	W = 2; p = 0,6667	di	W = 2; p = 0,8	W = 4; p = 0,3333
	Campanha 2	W = 31; p = 0,9591	W = 32; p = 0,3829	nd	W = 5; p = 1	W = 6; p = 0,7	W = 21; p = 0,2786	nd	W = 8; p = 0,2	W = 10; p = 0,6857	nd
	Campanha 3	W = 36; p = 0,3969	W = 32; p = 0,6943	nd	W = 6; p = 0,7	W = 7; p = 0,4	W = 37; p = 0,3357	W = 31; p = 0,7789	W = 3; p = 0,7	W = 1; p = 0,2	W = 4; p = 1
	Campanha 4	W = 29; p = 0,9538	W = 28; p = 1	nd	W = 4; p = 1	W = 13; p = 0,1429	W = 28; p = 0,7209	W = 21; p = 0,2786	W = 4; p = 1	W = 0; p = 0,1	nd
	Campanha 5	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 0,61574; p = 0,5714	W = -0,57961; p = 0,5933	nd	W = 8; p = 0,184	t = 1,9014; p = 0,13	t = 1,1532; p = 0,3131	t = -0,1924; p = 0,8568	= 0,81405; p = 0,461	t = -0,81654; p = 0,46	di
Rio Murucupi 2	Campanha 1	W = 109; p = 0,6823	W = 12; p = 0,6623	W = 126; p = 0,9549	W = 34; p = 0,008658	W = 58; p = 0,6505	W = 114; p = 0,951	W = 121,5; p = 0,9685	W = 30; p = 0,06494	W = 16; p = 0,9307	W = 11; p = 0,3095
	Campanha 2	W = 41; p = 0,152	W = 22; p = 0,8518	nd	W = 4; p = 0,8	W = 4; p = 1	W = 33; p = 0,9591	W = 6; p = 0,7857	W = 2; p = 0,4	W = 5; p = 0,4857	nd
	Campanha 3	W = 21; p = 0,7546	W = 9; p = 0,4	nd	W = 2; p = 0,8	W = 4; p = 0,8	W = 28; p = 1	W = 35; p = 0,1812	W = 1; p = 0,4	W = 4; p = 0,8	W = 3; p = 1
	Campanha 4	W = 29; p = 0,5728	W = 23; p = 0,9485	nd	W = 24; p = 1	W = 12; p = 0,5169	W = 34; p = 0,5358	W = 18; p = 0,4557	di	W = 6; p = 0,2	nd
	Campanha 5	W = 5; p = 1	W = 1; p = 1	nd	W = 4; p = 1	W = 5; p = 1	W = 6; p = 0,7	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	nd
	Campanha 6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ilg. Tauá	Campanha 1	W = 22; p = 0,8048	W = 19; p = 0,535	nd	W = 3; p = 0,7	di	W = 26; p = 0,9015	W = 38; p = 0,5737	W = 1; p = 0,2	di	W = 9; p = 0,1
	Campanha 2	W = 29; p = 0,62	W = 17; p = 0,9372	nd	nd	W = 4; p = 0,3333	W = 30; p = 0,535	di	di	W = 7; p = 0,4	nd
	Campanha 3	W = 25; p = 0,9497	di	nd	di	nd	W = 35; p = 0,4634	W = 12; p = 0,3939	di	di	di
	Campanha 4	W = 14; p = 0,1206	W = 26; p = 0,9015	nd	di	W = 1; p = 0,1143	W = 23; p = 0,3823	di	W = 1; p = 0,6667	W = 3; p = 0,7	nd
	Campanha 5	W = 0; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	W = 7; p = 0,4	W = 8; p = 0,2	W = 0; p = 0,1	W = 6; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	nd
	Campanha 6	t = -1,2574; p = 0,277	t = 4,5461; p = 0,0104	nd	t = 0,51867; p = 0,6314	t = -0,63163; p = 0,561	t = -5,932; p = 0,00404	t = -3,1558; p = 0,03432	W = 9; p = 0,1	t = -5,7391; p = 0,00456	di
Rio Barcarena 1	Campanha 1	W = 29; p = 0,9551	W = 25; p = 0,6282	nd	W = 9; p = 0,1	nd	W = 27; p = 0,9551	W = 25; p = 0,7789	W = 9; p = 0,1	nd	W = 9; p = 0,1
	Campanha 2	W = 22; p = 0,5887	W = 21; p = 0,6991	nd	nd	W = 4; p = 0,3333	W = 27; p = 0,8048	W = 28; p = 0,7104	W = 0; p = 0,3333	W = 1; p = 0,6667	nd
	Campanha 3	W = 21; p = 0,7104	W = 36; p = 0,7209	nd	W = 7; p = 0,4	W = 1; p = 0,4	W = 27; p = 0,6454	W = 21; p = 0,7012	W = 2; p = 0,8	W = 9; p = 0,1	di
	Campanha 4	W = 39; p = 0,5054	W = 31; p = 0,4557	nd	W = 5; p = 1	W = 5; p = 1	W = 38; p = 0,5737	W = 40; p = 0,4418	W = 3; p = 1	W = 4; p = 1	nd
	Campanha 5	W = 1; p = 0,2	W = 0; p = 0,3333	nd	W = 1; p = 0,2	W = 6; p = 0,7	W = 7; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	W = 2; p = 0,4	nd	nd
	Campanha 6	t = 1,8507; p = 0,1379	t = 4,2045; p = 0,01365	nd	t = 2,2434; p = 0,08829	t = 10,742; p = 0,00042	t = -1,6038; p = 0,184	W = 9; p = 0,1	t = 3,2756; p = 0,03065	di	nd
Rio Barcarena 2	Campanha 1	W = 22; p = 0,5358	W = 30; p = 0,535	nd	W = 1; p = 0,2	W = 29; p = 0,2833	W = 31; p = 0,9591	W = 29; p = 0,7984	W = 5; p = 1	nd	W = 3; p = 0,7
	Campanha 2	W = 21; p = 0,6991	di	nd	nd	W = 4; p = 0,3333	W = 31; p = 0,4557	nd	di	W = 6; p = 0,7	nd
	Campanha 3	W = 37; p = 0,6454	W = 0; p = 0,01667	nd	di	di	W = 40; p = 0,4418	W = 28; p = 0,7104	di	W = 3; p = 1	di
	Campanha 4	W = 27; p = 0,8048	W = 36; p = 0,3969	nd	W = 6; p = 0,2	W = 6; p = 0,2	W = 38; p = 0,281	di	W = 6; p = 0,2	W = 6; p = 0,2	nd
	Campanha 5	W = 9; p = 0,1	W = 3; p = 0,7	nd	W = 9; p = 0,1	W = 8; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	W = 8; p = 0,2	W = 7; p = 0,4	nd	nd
	Campanha 6	W = 0,69832; p = 0,523	W = 0,86651; p = 0,435	nd	t = -1,7936; p = 0,1473	t = 1,8433; p = 0,1391	t = 0,4065; p = 0,7052	t = 1,6494; p = 0,1744	t = 0,99805; p = 0,374	t = -0,65134; p = 0,5504	nd
Rio Itaporanga 1	Campanha 1	W = 23; p = 0,3823	W = 25; p = 1	nd	W = 7; p = 0,4	di	W = 32; p = 0,6943	W = 36; p = 0,7209	W = 8; p = 0,2	di	W = 6; p = 0,7
	Campanha 2	W = 24; p = 0,3939	W = 30; p = 0,535	nd	nd	W = 0; p = 0,3333	W = 26; p = 0,9015	W = 31; p = 0,4557	W = 0; p = 0,3333	W = 2; p = 0,4	nd
	Campanha 3	W = 24; p = 0,6943	W = 3; p = 0,25	nd	W = 6; p = 0,7	W = 6; p = 0,7	W = 41; p = 0,3823	W = 35; p = 0,2086	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,2	di
	Campanha 4	W = 39; p = 0,5054	W = 35; p = 0,7984	nd	W = 7; p = 0,4	W = 8; p = 0,2	W = 44; p = 0,2345	W = 38; p = 0,5737	W = 8; p = 0,2	W = 2; p = 0,4	nd
	Campanha 5	W = 9; p = 0,1	W = 2; p = 0,4	nd	W = 6; p = 0,7	W = 0; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	W = 5; p = 1	W = 0; p = 0,1	nd	di
	Campanha 6	t = 1,5112; p = 0,2053	t = 0,54772; p = 0,613	nd	t = 0,45582; p = 0,6722	t = 0,35197; p = 0,742	t = -0,5003; p = 0,643	W = 7; p = 0,4	W = 7; p = 0,4	t = -1,4615; p = 0,2177	nd
Rio Itaporanga 2	Campanha 1	W = 39; p = 0,5054	di	W = 27; p = 0,9551	W = 4; p = 1	W = 34; p = 0,5358	W = 24,5; p = 1	W = 30,5; p = 0,8168	di	W = 2; p = 0,4	W = 4; p = 0,3333
	Campanha 2	W = 29; p = 0,62	di	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 33; p = 0,9591	nd	W = 8; p = 0,2	W = 10; p = 0,6857	nd
	Campanha 3	W = 36; p = 0,7209	W = 20; p = 0,03333	nd	W = 8; p = 0,2	W = 7; p = 0,4	W = 29; p = 0,9551	W = 14; p = 0,2086	di	W = 1; p = 0,2	nd
	Campanha 4	W = 24; p = 1	W = 32; p = 1	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	W = 26; p = 0,5737	di	di	W = 0; p = 0,1	nd
	Campanha 5	W = 3; p = 0,7	W = 2; p = 0,4	nd	W = 4; p = 1	W = 3; p = 0,7	W = 0; p = 0,1	W = 2; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	nd	W = 4; p = 0,3333
	Campanha 6	t = 2,7151; p = 0,0532	W = 9; p = 0,1	nd	t = 2,2273; p = 0,08988	t = 1,5564; p = 0,1946	t = 0,38751; p = 0,718	t = 2,5938; p = 0,06044	di	nd	nd
Rio Murucupi 1	Campanha 1	W = 26; p = 0,8665	W = 27; p = 0,9551	W = 22; p = 0,8518	W = 5; p = 1	W = 7,5; p = 0,2558	W = 35; p = 0,4634	W = 26; p = 0,8518	W = 2; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	W = 3; p = 1
	Campanha 2	W = 31; p = 0,4428	W = 32; p = 0,3829	nd	di	W = 3; p = 0,7	W = 31; p = 0,9591	di	W = 9; p = 0,1	W = 13; p = 0,2	nd
	Campanha 3	W = 12; p = 0,2343	W = 26; p = 0,8665	nd	W = 0; p = 0,2	W = 0; p = 0,2	W = 20; p = 0,3969	W = 21; p = 0,7104	W = 0; p = 0,2	W = 2; p = 0,8	nd
	Campanha 4	W = 18; p = 0,281	W = 20; p = 0,62	nd	W = 20; p = 0,4286	W = 5; p = 1	W = 25; p = 0,5054	W = 30; p = 0,8785	W = 3; p = 0,7	W = 4; p = 1	nd
	Campanha 5	W = 2; p = 0,4	W = 6; p = 0,7	nd	W = 6; p = 0,7	W = 8; p = 0,2	W = 4; p = 1	W = 7; p = 0,4	W = 8; p = 0,2	nd	nd
	Campanha 6	t = -2,3571; p = 0,0779	t = -1,4962; p = 0,2089	nd	t = -2,2893; p = 0,08393	t = 0,31717; p = 0,767	t = 1,4632; p = 0,2172	t = -1,1098; p = 0,3293	t = -0,81785; p = 0,459	nd	nd
Vila do Conde	Campanha 1	W = 27; p = 0,9551	W = 20; p = 0,9452	W = 28,5; p = 1	W = 6; p = 0,7	W = 29; p = 0,62	W = 21; p = 0,4634	W = 13; p = 0,09386	W = 0; p = 0,1	W = 8; p = 0,2	W = 3; p = 0,7
	Campanha 2	W = 20; p = 0,62	W = 26; p = 0,9015	W = 1; p = 0,2	di	W = 6; p = 0,7	W = 22; p = 0,3282	W = 16; p = 0,345	W = 0; p = 0,1	W = 6; p = 0,6857	nd
	Campanha 3	W = 19; p = 0,1949	W = 33; p = 0,9591	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	W = 20; p = 0,2345	W = 12; p = 0,1282	W = 8; p = 0,2	W = 2; p = 0,4	W = 2; p = 0,8
	Campanha 4	W = 23; p = 0,3823	W = 15; p = 0,2593	nd	W = 18; p = 1	W = 14; p = 0,5887	W = 24; p = 0,4418	W = 18; p = 0,1605	W = 4; p = 1	W = 2; p = 0,4	nd
	Campanha 5	W = 8; p = 0,2	W = 7; p = 0,4	nd	W = 4; p = 0,8	W = 9; p = 0,1	W = 6; p = 0,7	W = 6; p = 0,7	W = 7; p = 0,4	nd	di
	Campanha 6	t = -4,7587; p = 0,00891	t = -2,2136; p = 0,0912	nd	t = -1,5894; p = 0,1872	t = 0,64499; p = 0,554	t = -0,95113; p = 0,395	t = -2,0407; p = 0,1108	t = -2,0745; p = 0,1067	di	nd

Concentração de metais na fração total de água por influência da maré											
Locais	Campanhas	Metais									
		Al	Ba	Cd	Cr	Pb	Fe	Mn	Ni	As	Hg
Arienga 1	Campanha 1	W = 5; p = 1	W = 9; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	W = 0; p = 0,1	W = 2; p = 0,4	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	di	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 1; p = 0,2	nd	W = 3; p = 1	W = 5; p = 1
	Campanha 3	W = 0; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 3; p = 0,7	W = 2; p = 0,4	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 1; p = 0,4	W = 6; p = 0,2	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,2	W = 0; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 8; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	nd	W = 7; p = 0,4	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	di	W = 9; p = 0,1	nd
	Campanha 6	W = 6; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
Arienga 2	Campanha 1	W = 5; p = 0,4	W = 0,5; p = 0,2361	W = 4; p = 0,8	nd	W = 4; p = 0,8	W = 3; p = 1	W = 0; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 2; p = 0,4	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	di	W = 4; p = 1
	Campanha 3	W = 5; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 4; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 8; p = 0,184	W = 9; p = 0,1	nd	nd	di	W = 1; p = 0,2	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	W = 9; p = 0,1	nd	W = 2; p = 0,4	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 8; p = 0,2	W = 3; p = 0,7	nd	W = 2; p = 0,4	W = 8; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	W = 8; p = 0,2	nd	nd	nd
Rio Murucupi 2	Campanha 1	W = 5; p = 0,04113	nd	W = 12; p = 0,3768	nd	W = 8; p = 0,6286	W = 27; p = 0,1797	W = 20; p = 0,8182	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 9; p = 0,1	W = 6; p = 0,2	di	nd	nd	W = 5; p = 1	di	nd	di	di
	Campanha 3	W = 3; p = 0,7	nd	nd	nd	nd	W = 1; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 6; p = 0,2	W = 2; p = 0,3758	nd	W = 4; p = 1	di	W = 9; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 4; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	W = 4; p = 1	di	W = 7; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	nd	nd	nd
	Campanha 6	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd	nd
Ilg. Tauá	Campanha 1	W = 3; p = 0,7	W = 3; p = 0,7	W = 7; p = 0,4	nd	W = 4; p = 1	W = 4; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 6; p = 0,7	W = 2; p = 0,4	nd	nd	nd	W = 8; p = 0,2	W = 2; p = 0,4	nd	di	W = 6; p = 0,7
	Campanha 3	W = 4; p = 0,8	W = 2; p = 0,8	nd	nd	nd	W = 6; p = 0,2	W = 0; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 1; p = 0,2	W = 8; p = 0,2	nd	nd	di	W = 0; p = 0,1	W = 1; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 2; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	nd	W = 3; p = 0,7	di	W = 4; p = 1	W = 6; p = 0,7	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	W = 4; p = 1	W = 8; p = 0,2	W = 3; p = 0,7	W = 8; p = 0,2	nd	nd	nd
Rio Barcarena 1	Campanha 1	W = 1; p = 0,2	W = 5; p = 1	W = 6; p = 0,7	nd	W = 5; p = 1	W = 8; p = 0,2	W = 5; p = 1	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 6; p = 0,7	W = 5; p = 1	nd	nd	nd	W = 6; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	nd	W = 3; p = 0,6667
	Campanha 3	W = 3; p = 0,7	W = 5; p = 1	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,07652	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 5; p = 1	W = 3; p = 0,7	nd	W = 3; p = 0,7	nd	W = 8; p = 0,2	W = 7; p = 0,4	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 3; p = 0,7	W = 6; p = 0,7	nd	W = 5; p = 1	W = 9; p = 0,1	W = 3; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
Rio Barcarena 2	Campanha 1	W = 6; p = 0,7	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	W = 9; p = 0,1	W = 1; p = 0,2	W = 3; p = 0,7	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 5; p = 1	W = 8; p = 0,2	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	di	W = 4; p = 0,3333
	Campanha 3	W = 7; p = 0,4	di	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 1; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 8; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	nd	W = 5; p = 1	nd	W = 7; p = 0,4	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	W = 9; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	W = 8; p = 0,2	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
Rio Itaporanga 1	Campanha 1	W = 1; p = 0,2	W = 3; p = 0,7	W = 8,5; p = 0,1212	nd	W = 6; p = 0,7	W = 4; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 9; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	nd	nd	W = 5; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	di	di
	Campanha 3	W = 7; p = 0,4	di	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 7; p = 0,4	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd	W = 9; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 7; p = 0,4	W = 9; p = 0,1	nd	W = 0; p = 0,1	nd	W = 5; p = 1	W = 9; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 1; p = 0,2	W = 5; p = 1	nd	W = 8; p = 0,2	W = 2; p = 0,4	W = 5; p = 1	W = 2; p = 0,4	nd	nd	nd
Rio Itaporanga 2	Campanha 1	W = 5; p = 1	W = 4; p = 1	W = 4; p = 1	nd	W = 2; p = 0,4	W = 3; p = 0,7	W = 8; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 6; p = 0,7	W = 4; p = 1	nd	nd	nd	W = 1; p = 0,2	W = 3; p = 0,7	nd	di	di
	Campanha 3	W = 7; p = 0,4	di	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 8; p = 0,2	W = 8; p = 0,2	nd	nd	nd	W = 3; p = 0,7	W = 1; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 4; p = 1	W = 5; p = 1	nd	W = 1; p = 0,2	nd	W = 4; p = 1	W = 6; p = 0,7	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 5; p = 1	W = 3; p = 0,7	nd	di	W = 0; p = 0,1	W = 9; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
Rio Murucupi 1	Campanha 1	W = 5; p = 1	W = 8; p = 0,2	W = 6; p = 0,2	nd	di	W = 4; p = 0,8	W = 6; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 9; p = 0,07652	W = 4; p = 1	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	di	di
	Campanha 3	W = 3; p = 0,7	W = 3; p = 0,7	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 4; p = 1	W = 3; p = 0,7	nd	W = 5; p = 0,4	nd	W = 0; p = 0,1	W = 2; p = 0,4	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 1; p = 0,2	W = 9; p = 0,1	nd	W = 3; p = 0,7	nd	W = 5; p = 1	W = 3; p = 0,7	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 3; p = 1	W = 4; p = 1	nd	W = 4,5; p = 1	W = 5; p = 1	W = 3; p = 0,7	W = 5; p = 1	nd	nd	nd
Vila do Conde	Campanha 1	W = 3; p = 0,7	W = 8; p = 0,2	W = 8,5; p = 0,1212	nd	W = 6; p = 0,7	W = 2; p = 0,4	W = 1; p = 0,2	nd	nd	nd
	Campanha 2	W = 0; p = 0,1	W = 2; p = 0,4	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	di	di
	Campanha 3	W = 0; p = 0,1	W = 7; p = 0,4	nd	nd	nd	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 4	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	W = 0; p = 0,1	W = 2; p = 1	W = 0; p = 0,1	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 5	W = 0; p = 0,1	W = 6; p = 0,7	nd	W = 9; p = 0,1	nd	W = 1; p = 0,2	W = 0; p = 0,1	nd	nd	nd
	Campanha 6	W = 4; p = 1	W = 4; p = 1	nd	W = 5; p = 1	W = 4; p = 1	W = 4; p = 1	W = 4; p = 1	nd	nd	nd

APÊNDICE B - PARÂMETROS FÍSICOS- QUÍMICOS

A Tabela 21, apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios interno de Barcarena amostrados no período de transição I (janeiro/2022), A temperatura variou entre 27,14 – 29,29 °C, O pH continuou levemente ácido para básico com valores entre 5,06 e 8,10, O potencial de oxirredução (OPR) os valores encontrados variaram entre 226 – 343 Mv. A condutividade elétrica apresentou valores entre 0,02-0,16 μ S/cm, enquanto a turbidez variou entre 0 – 31,65 NTU, O oxigênio dissolvido permaneceu na faixa de 0,44 -7,75 mg/L.

Tabela 21 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período I. Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Condut (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

Pontos	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	Condut (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	29,24	6,60	226	0,05	0	7,68	0
AR2	26,54	5,06	263,5	0,02	0	5,15	0
RM1	28,35	7,44	340,5	0,16	31,65	0,44	0
RM2	27,14	7,38	259,5	0,16	5,7	1,89	0
IT	28,01	5,45	306,5	0,03	0	3,84	0
RB1	28,9	6,15	312,5	0,03	9,55	7,75	0
RB2	27,65	5,19	310	0,02	0	5,32	0
RI1	28,79	6,05	305	0,03	5,35	3,30	0
RI2	27,92	8,10	343	0,08	9,70	2,92	0
VC	28,73	7,56	318,5	0,08	18,55	3,89	0

A Tabela 22, apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios interno de Barcarena amostrados no período II (abril/2022), A temperatura variou entre 26,14 – 28,52 °C, O pH continuou levemente ácido para básico com valores entre 5,93 - 9,22, O potencial de oxirredução (OPR) os valores encontrados variaram entre 254,5 – 357,50 Mv, A condutividade elétrica apresentou valores entre 0,04-0,17 μ S/cm, enquanto a turbidez variou entre 7,75 – 140,35 NTU, O oxigênio dissolvido permaneceu na faixa de 0,44 -7,75 mg/L,

Tabela 22 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período II (abril/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniônico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

Pontos	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	Conduct (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
AR2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
RM1	26,14	5,86	254,50	0,17	7,75	1,78	0
RM2	26,18	5,93	264,50	0,17	7,70	1,64	0
IT	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
RB1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
RB2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
RI1	27,93	9,22	322	0,09	21,35	3,76	0
RI2	28,87	7,41	346,50	0,04	140,35	5,06	0
VC	28,52	7,73	357,50	0,14	53,90	3,36	0

A Tabela 23, apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios internos de Barcarena, coletados durante o período III (junho/2022). A temperatura oscilou entre 24,81 e 29,11 °C, e o pH manteve-se levemente ácido, com valores variando de 4,99 a 8,03. O potencial de oxirredução (OPR) apresentou valores entre 300,5 e 362,50 mV. A condutividade elétrica registrou variações de 0,01 a 0,07 µS/cm, enquanto a turbidez apresentou valores entre 4,50 e 90,85 NTU. O oxigênio dissolvido manteve-se na faixa de 5,25 a 9,53 mg/L.

Tabela 23 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período III (julho/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogeniônico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

Pontos	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	Conduct (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	28,85	6,04	338,50	0,03	12,15	5,25	0
AR2	28,49	6,45	338,50	0,03	12,75	5,38	0
RM1	27,25	5,63	352,50	ND	ND	ND	0
RM2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
IT	27,47	4,99	391	0,03	10,05	6,10	0
RB1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	0
RB2	29,11	8,03	398	0,02	4,50	7,75	0
RI1	24,81	5,34	387	0,01	62,35	9,53	0

RI2	27,96	5,52	300,50	0,06	90,85	9,03	0
VC	27,95	5,23	362,50	0,07	80,20	8,86	0

A Tabela 24, apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios interno de Barcarena amostrados no período de IV (outubro/2022). A temperatura variou entre 27,31 – 29,49 °C, O pH continuou levemente ácido com valores entre 5,07 - 8,06. O potencial de oxirredução (OPR) os valores encontrados variaram entre 341 – 486,50 Mv, A condutividade elétrica apresentou valores entre 0,01-0,22 μ S/cm, enquanto a turbidez variou entre 0,15 –69,3 NTU, O oxigênio dissolvido permaneceu na faixa de 1,45 - 6,8 mg/L.

Tabela 24 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período IV (outubro/2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogenioico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Conduct (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

Pontos	Temp p (°C)	pH	ORP (mV)	Conduct (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	28,42	6,99	475	0,03	69,3	6,8	0
AR2	27,92	6,93	486,50	0,02	547	6,27	0
RM1	25,38	5,90	415,50	0,22	0,15	2,69	0
RM2	27,46	5,07	522	0,01	71	4,21	0
IT	29,49	7,56	472	0,02	64,4	4,36	0
RB1	27,31	5,26	515	0,02	39,15	4,23	0
RB2	29,28	6,98	478	0,02	60,15	3,95	0
RI1	28,01	8,06	341	0,02	14,3	4,97	0
RI2	28,63	6,58	375,50	0,10	16	1,45	0
VC	28,62	6,66	398,50	0,10	74,4	4,84	0

A Tabela 25, apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios interno de Barcarena amostrados no período V (abril/2023). A temperatura variou entre 27,21 – 29,71 °C, O pH continuou levemente ácido com valores entre 5,60 - 9,33. O potencial de oxirredução (OPR) os valores encontrados variaram entre 191,5 – 381 Mv, A condutividade elétrica apresentou valores entre 0,03-0,05 μ S/cm, enquanto a turbidez variou entre 4 –374 NTU, O oxigênio dissolvido permaneceu na faixa de 1,97 – 7,72 mg/L.

Tabela 25 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período V. Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogenioico (pH); potencial de oxirredução

(ORP (mV)); condutividade (Condut (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

Pontos	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	Condut (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	29,59	7,29	367,5	0,04	58,8	5,19	0
AR2	28,84	8,30	ND	ND	ND	7,72	0
RM1	26,48	6,82	305,5	0,05	4	1,97	0
RM2	29,71	9,33	361	0,05	0	7,26	0
IT	26,01	6,03	ND	ND	ND	5,20	0
RB1	26,73	5,60	ND	ND	ND	3,76	0
RB2	25,84	5,53	ND	ND	ND	5,54	0
RI1	27,21	6,98	381	0,03	0,85	2,90	0
RI2	28,89	7,69	317	0	374	7,38	0
VC	29,20	6,34	191,5	0,03	105,5	5,69	0

A Tabela 26 apresenta os parâmetros físico-químicos das águas dos rios interno de Barcarena amostrados no período de transicional II (junho/2022). A temperatura variou entre 27,05 – 30,53 °C. O pH continuou levemente ácido com valores entre 4,92 - 8,25. O potencial de oxirredução (OPR) os valores encontrados variaram entre 252 – 317 Mv, A condutividade elétrica apresentou valores entre 0 -0,0067 μ S/cm, enquanto a turbidez variou entre 10 –374 NTU, O oxigênio dissolvido permaneceu na faixa de 3,52 – 8,43 mg/L.

Tabela 26 - Parâmetros físico-químicos dos pontos amostrados no momento das coletas no período transicional II (julho 2022). Temperatura (Temp (°C)); potencial hidrogenioico (pH); potencial de oxirredução (ORP (mV)); condutividade (Condut (mS/cm)); oxigênio dissolvido (OD (mg/L)) e Salinidade (ppt). ND: não detectado.

PONTOS	Temp (°C)	pH	ORP (mV)	Condut (mS/cm)	Turb (NTU)	OD (mg/L)	Salinidade (ppt)
AR1	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
AR2	30,53	6,92	ND	NDA	42	8,43	ND
RM1	29,82	7,49	296	0	247,5	7,3	ND
RM2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
IT	27,05	5,46	ND	ND	ND	4,51	ND
RB1	28,92	4,92	ND	ND	10	4,97	ND
RB2	30,27	5,82	ND	ND	13,15	3,52	ND
RI1	28,89	7,69	317	ND	374	7,08	ND
RI2	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
VC	29,21	8,25	252,5	0,0067	253	6,47	0,005