



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ACRE  
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO MESTRADO EM GEOGRAFIA

LUDMILLA DA SILVA BRANDAO

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO LEITO  
DO RIO ACRE NA CIDADE DE RIO BRANCO, BRASIL**

Rio Branco – AC

2024

LUDMILLA DA SILVA BRANDAO

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO LEITO  
DO RIO ACRE NA CIDADE DE RIO BRANCO, BRASIL**

Dissertação de mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre, como requisito para obtenção do título de Mestre em Geografia.

Orientador: Waldemir Lima dos Santos

Rio Branco – AC

2024



Ludmilla da Silva Brandão

**CARACTERIZAÇÃO GEOQUÍMICA DOS SEDIMENTOS DE FUNDO DO LEITO DO  
RIO ACRE NA CIDADE DE RIO BRANCO, BRASIL**

BANCA EXAMINADORA:

**Prof. Dr. Waldemir Lima dos Santos**

Orientador e Presidente da Banca

Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre –  
PPGEO/UFAC

**Prof. Dr. Frederico Wagner de Azevedo Lopes**

Examinador Externo

Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais – IGC/UFMG

**Prof. Dr. Cleilton Sampaio de Farias**

Examinador Interno

Programa de Pós-Graduação em Geografia da Universidade Federal do Acre

Examinador Suplente

**Dedico**

À minha avó dona Nina

## **AGRADECIMENTOS**

À minha família, minha amada avó e irmãs.

Às instituições e pessoas que me ajudaram e apoiaram nessa jornada.

À minha querida Geórgia por iluminar meu caminho.

Aos meus amigos Hugo, Jardel, Marcos, Amanda e Lucas por todo carinho e apoio.

Ao meu orientador Waldemir Lima dos Santos por dedicar tempo a este trabalho e compartilhar conhecimentos e aprendizados comigo. Agradeço cada sugestão e orientação, contribuições fundamentais para a elaboração dessa dissertação.

Ao curso de Pós-graduação em Geografia, pela oportunidade de conhecer professores incríveis e me apresentar uma nova forma de gostar de Geografia.

Aos colegas de instituição e de vida que me inspiram e motivam todos os dias Rui, Osmar, Cydia, Maiko, Thais, Cassio e dona Josi.

À Universidade Federal do Acre, minha segunda casa.

Aos laboratórios Lageze e minha querida Uta!

Ao corpo de Bombeiros Militar do Acre

## RESUMO

Apesar da região norte abrigar grande parte da água superficial do país, enfrenta desafios significativos em relação à cobertura de saneamento básico. A falta de infraestrutura adequada resulta em baixos índices de coleta e tratamento de esgoto, e tem impacto direto na qualidade da água dos rios, a Bacia Hidrográfica do Rio Acre é um exemplo de vulnerabilidade ambiental de sistema aquífero amazônico, ao passo que é a principal fonte de abastecimento de água da cidade de Rio Branco, é também o principal coletor de todo efluente gerado na cidade. Os registros de estudos ambientais da água e sedimento do rio Acre são escassos e por isso esta pesquisa tem o objetivo de avaliar a presença de metais pesados no sedimento de fundo do rio Acre e a composição química da água em um trecho do rio Acre na cidade de Rio Branco a fim de contribuir com dados inéditos que podem ajudar a estabelecer valores de referência regional baseado nas taxas de concentração desses elementos químicos em comparação com outras literaturas amazônicas, e com isso, auxiliar na análise da vulnerabilidade do rio Acre quanto à contaminação química, principalmente por metais pesados e contaminantes orgânicos. As variações das concentrações encontradas foram 0,136 a 0,319 mg/kg de cádmio, 3,44 a 17,6 mg/kg de cromo, 0,864 a 4,196 mg/kg de cobre, 0,041 a 0,081 mg/kg de mercúrio, 2,079 a 10,175 mg/kg de níquel, 4,31 a 16,41 mg/kg de chumbo e 0,443 a 3,557 mg/kg de zinco. Não foram encontradas evidências de enriquecimento de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Z ao longo desses anos nos sedimentos e margens do rio Acre. Com exceção do Hg todos demonstraram comportamento diferente em relação a outros corpos d'água amazônicos, a baixa concentração desses metais no sedimento indica pouca inserção desses metais ao meio, ou pouca aderência desses metais às cargas presentes no sedimento analisado. Houve aumento de 100% no teor mínimo de Hg quantificado no sedimento do rio Acre de 1998 a 2022. A quantidade mínima quantificada também foi superior ao de rios impactados diretamente pela mineração, inclusive do garimpo ilegal de ouro. Além disso as concentrações máximas de todos os contaminantes foram maiores na foz do igarapé São Francisco e nas áreas rurais. As condições oxidativas da água foram evidenciadas pelas altas cargas quantificadas nas amostras de água e podem estar favorecendo a mobilização dos metais, principalmente próximo ao núcleo urbano. A vulnerabilidade do rio Acre foi evidenciada pela influência direta dos esgotos não tratados e das águas pluviais nas áreas urbanas ao longo do rio que aumentam a concentração de contaminantes orgânicos.

**Palavras-chave:** caracterização geoquímica; sedimentos; metais pesados.

## LISTA DE TABELAS

<b>TABELA 01:</b> PROPRIEDADES DOS ELEMENTOS .....	30
<b>TABELA 02:</b> LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DOS PONTOS DE COLETA .....	46
<b>TABELA 03:</b> METODOLOGIAS DE ANÁLISE APLICADAS.....	49
<b>TABELA 04:</b> ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS ELEMENTOS ANALISADOS NO SEDIMENTO DO RIO ACRE.....	53
<b>TABELA 05:</b> QUANTIDADES MÁXIMAS DE METAIS (MG/KG) ESPECIFICADAS EM LEIS BRASILEIRAS. ....	55
<b>TABELA 06:</b> TESTE DE NORMALIDADE DE SHAPIRO-WILK.....	77
<b>TABELA 07:</b> ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS PARÂMETROS ANALISADOS NA ÁGUA DO RIO ACRE.....	84

## LISTA DE QUADROS

<b>QUADRO 01:</b> CLASSIFICAÇÃO DA PAISAGEM POR BERTRAND.....	19
<b>QUADRO 02:</b> INSTRUMENTOS LEGAIS E RELATÓRIOS OFICIAIS ADOTADOS NA AVALIAÇÃO DE QUALIDADE DA ÁGUA NO BR .....	24
<b>QUADRO 03:</b> FUNÇÕES METABÓLICAS DOS METAIS ANALISADOS EM AMOSTRAS DE SEDIMENTO DO RIO ACRE.....	28
<b>QUADRO 04:</b> GEOLOGIA, GEOMORFOLOGIA E PEDOLOGIA DO ESTADO DO ACRE ..	36



## LISTA DE FIGURAS

<b>FIGURA 01:</b> MAPA GEOPOLÍTICO DO ESTADO DO ACRE -----	34
<b>FIGURA 02:</b> LOCALIZAÇÃO DA BH DO RIO ACRE. -----	35
<b>FIGURA 03:</b> EFETIVO DE REBANHOS NO ACRE, SÉRIE HISTÓRICA 1974-2019. -----	40
<b>FIGURA 04:</b> ENCHENTE DO RIO ACRE NA CIDADE DE RIO BRANCO EM 2024. -----	43
<b>FIGURA 05:</b> A) CENTRO DA CIDADE, PRÓXIMO À PASSARELA JOAQUIM MACEDO. B) MARGEM DIREITA DO RIO, NO CENTRO HISTÓRICO QUIXADÁ-----	45
<b>FIGURA 06:</b> PRINCIPAIS USOS DA TERRA NOS PONTOS DE COLETA-----	45
<b>FIGURA 07:</b> A) FOZ DO IGARAPÉ JUDIA. B) CAPTAÇÃO DE ÁGUA PARA ABASTECIMENTO PÚBLICO, ETA – 4ª PONTE. C) DRAGAGEM DE AREIA NO RIO ACRE. -----	47
<b>FIGURA 08:</b> MAPA DE LOCALIZAÇÃO DOS SETORES DE AMOSTRAGEM E PONTOS DE COLETA FONTE: ELABORAÇÃO AUTORA (2023), A PARTIR DO <i>GOOGLE EARTH</i> (2022). -----	48
<b>FIGURA 09:</b> FLUXOGRAMA DOS PROCEDIMENTOS ANALÍTICOS-----	49
<b>FIGURA 10:</b> GRÁFICO DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS (MG/KG) E MATÉRIA ORGÂNICA (%) NOS SEDIMENTOS AO LONGO DO RIO ACRE.-----	54
<b>FIGURA 11:</b> <i>BOXPLOT</i> DA CONCENTRAÇÃO DE METAIS (MG/KG) E MATÉRIA ORGÂNICA (%) NOS SEDIMENTOS DO RIO ACRE -----	54
<b>FIGURA 12:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE CÁDMIO E GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA. -----	57
<b>FIGURA 13:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CÁDMIO NO RIO ACRE. -----	57
<b>FIGURA 14:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE CROMO E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA-----	59
<b>FIGURA 15:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CROMO NO RIO ACRE. -----	60
<b>FIGURA 16:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE COBRE E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA-----	62
<b>FIGURA 17:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE COBRE NO RIO ACRE. -----	63
<b>FIGURA 18:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE MERCÚRIO E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA -----	65
<b>FIGURA 19:</b> CONCENTRAÇÃO DE HG NA BACIA DO RIO ACRE E RIO MADEIRA. -----	66
<b>FIGURA 20:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE MERCÚRIO NO RIO ACRE. -----	69
<b>FIGURA 21:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE NÍQUEL E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA-----	70
<b>FIGURA 22:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NÍQUEL NO RIO ACRE. -----	72
<b>FIGURA 23:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE CHUMBO E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA -----	73
<b>FIGURA 24:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE CHUMBO NO RIO ACRE. -----	74
<b>FIGURA 25:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> TEOR DE ZINCO E CONCENTRAÇÃO NOS PONTOS DE COLETA-----	75
<b>FIGURA 26:</b> MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE ZINCO NO RIO ACRE.-----	76
<b>FIGURA 27:</b> MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE <i>SPEARMAN</i> ENTRE AS VARIÁVEIS ANALISADAS NO SEDIMENTO DO RIO ACRE. -----	78
<b>FIGURA 28:</b> ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS DAS AMOSTRAS COLETADAS NO RIO ACRE. -----	81
<b>FIGURA 29:</b> DENDOGRAMA DOS PONTOS DE COLETA NO RIO ACRE (SEDIMENTOS) -----	82

<b>FIGURA 30:</b> REPRESENTAÇÃO DOS AGRUPAMENTOS DA ANÁLISE DE CLUSTER DOS PONTOS DE COLETA NO RIO ACRE.-----	83
<b>FIGURA 31:</b> GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE T, ALC , DURZ E PH EM ÁGUA -----	85
<b>FIGURA 32:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> DE T, ALC , DURZ E PH-----	85
<b>FIGURA 33:</b> CONCENTRAÇÃO DE PH NA BACIA DO RIO ACRE, DE 1992 A 2022. -----	86
<b>FIGURA 35:</b> GRÁFICO DE CONCENTRAÇÃO DE TURB, STD E CE NOS PONTOS DE COLETA.-----	88
<b>FIGURA 36:</b> TURBIDEZ NA BACIA DO RIO ACRE, DE 2005 A 2022.-----	89
<b>FIGURA 37:</b> GRÁFICO <i>BOXPLOT</i> DE TURBIDEZ, SÓLIDOS TOTAIS E CONDUTIVIDADE ELÉTRICA-----	90
<b>FIGURA 38:</b> SÓLIDOS TOTAIS NA BACIA DO RIO ACRE, DE 1998 A 2022. -----	90
<b>FIGURA 39:</b> CE NA BACIA DO RIO ACRE, DE 1992 A 2022. -----	91
<b>FIGURA 40:</b> GRÁFICOS DE CONCENTRAÇÃO DE SULFATO, FOSFATO, SÍLICA, CLORETO, BROMETO, AMÔNIA, PERÓXIDO, NITRITO E SULFETO.-----	93

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANA – Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico

BH – Bacia Hidrográfica

CNRH – Conselho Nacional de Recursos Hídricos

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

ICP/OES - *Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometry*

IQA – Índice de Qualidade de Água

MS – Ministério da Saúde

pH – Potencial Hidrogeniônico

RH – Região Hidrográfica

SINGREH – Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento

TFSA – Terra Fina Seca ao Ar

TGS – Teoria Geral dos Sistemas

UNESCO – Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura

WWAP – *World Water Assessment Programme*

## SUMÁRIO

INTRODUÇÃO.....	12
2   CAPÍTULO : REFERENCIAL TEÓRICO.....	16
2.1       A Adoção do Método Geossistêmico como Pressuposto Teórico-Metodológico em Estudos Ambientais .....	16
2.2       Qualidade ambiental da água.....	21
2.3       Sedimentos como estoque de elementos contaminantes .....	25
2.3.1       Metais em sedimentos.....	26
2.3.2       Toxicidade dos metais.....	27
2.3.3       Metais pesados .....	29
2.3.4       Caracterização hidroquímica e geoquímica do rio Acre .....	31
3   CAPÍTULO : MATERIAIS E MÉTODOS .....	34
3.1       Localização e Aspectos Fisiográficos .....	34
3.2       Ocupação histórica da BH do rio Acre .....	37
3.2.1       Os rios como vias de circulação .....	37
3.2.2       Rio Branco às margens do rio Acre .....	41
3.3       Procedimentos metodológicos.....	44
3.3.1       Amostragem .....	44
3.4       Tratamento estatístico .....	50
3.4.1       Estatística univariada.....	50
3.4.2       Estatística multivariada.....	51
4   CAPÍTULO : RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	53
4.1       Caracterização Geoquímica – Sedimentos.....	53
4.1.1       Análise estatística descritiva.....	53
4.1.2       Análises estatísticas multivariadas .....	77
4.2       Caracterização Hidroquímica – Água .....	84
4.2.1       pH, temperatura, alcalinidade, dureza, turbidez, condutividade e sólidos totais	85
4.2.2       Sulfato, sulfeto, fosfato, nitrito, amônia, brometo, cloreto, peróxidos e sílica ....	92
CONCLUSÃO .....	96
REFERÊNCIAS .....	98

## INTRODUÇÃO

No Acre as maiores concentrações populacionais estão localizadas às margens dos rios, historicamente essa ocupação se dá pelo exclusivo acesso fluvial à região amazônica, onde as cidades foram se estabelecendo. Em Rio Branco, capital do estado do Acre, a população de 364.756 habitantes (IBGE, 2022), está concentrada principalmente na área urbana, que por sua vez está situada às margens do rio Acre, subafluente da margem direita do rio Amazonas.

O rio Acre é um rio de grande importância para a região, sendo a principal fonte de abastecimento de água de oito municípios acreanos, incluindo a capital Rio Branco. A Bacia do Rio Acre se estende pelos territórios do Brasil, Bolívia e Peru, em território nacional nos estados do Acre e Amazonas. Essa bacia está inserida na chamada Região Hidrográfica Amazônica, região que contempla os seguintes estados: Acre, Amapá, Amazonas, Mato Grosso, Pará, Rondônia e Roraima.

Apesar da Bacia Hidrográfica Amazônica concentrar quase 80% de toda a água superficial disponível no país (ANA, 2015), a região norte apresenta os piores índices de cobertura de saneamento básico do Brasil, tendo apenas 14,7% de esgoto coletado de um total de 450 municípios (SNIS, 2022). No Acre cerca de 53% da população é atendida com rede de esgoto, e do total coletado apenas 10,53% recebem algum tratamento (SNIS, 2022). Significa dizer que grande parte do efluente gerado no estado é despejado direta ou indiretamente em rios e igarapés, principalmente na bacia do rio Acre, que drena a área mais povoada do estado.

Esses dados preocupam, pois, os corpos hídricos são os principais receptores de efluentes nos grandes centros urbanos, fato decorrente do crescimento desordenado desses centros e da elevada quantidade de efluentes gerados por dia, que não passam por tratamento adequado. A disposição dos efluentes, tanto sanitários como industriais, sem o devido tratamento, deteriora os corpos d'água receptores, inviabilizando seu uso para outros fins e coloca em risco a saúde da população, impactando negativamente os ecossistemas aquáticos (CALIJURI; CUNHA, 2013).

A vulnerabilidade, conceituada por Calijuri e Cunha (2013) como o grau de suscetibilidade e ao mesmo tempo a incapacidade de um sistema em lidar com efeitos adversos, no caso do rio Acre ocorre em função das formas de uso e ocupação do solo em suas margens, principalmente nos trechos urbanos, quando o rio corta

idades como Assis Brasil, Brasília, Porto Acre, Rio Branco e Xapuri recebendo influência dos esgotos *in natura* e da água drenada das chuvas. Exigindo que se atue monitorando os índices de qualidade das águas, visto que, há recebimento de contaminantes lançados diretamente ou escoados na área de drenagem da bacia.

Segundo a Secretaria de Meio Ambiente do Estado do Acre, existe demanda para que sejam realizadas também análises de metais pesados na água e nos sedimentos, destacando a importância de que se inclua no monitoramento de qualidade da água a análise de mercúrio e a investigação de outros metais pesados, tanto na água quanto nos sedimentos dos rios (ACRE, 2012). Essa demanda existe, pois, faltam estudos geoquímicos dos sedimentos da maioria dos rios presentes na região norte para que se expliquem a origem dos elementos químicos encontrados, podendo ser tanto de origem natural quanto decorrente de interferência humana na bacia.

Os sedimentos são os compartimentos de maior concentração de minerais e metais (ANDRADE et al., 2012), devido à estrutura de suas partículas formadoras que possuem em sua área superficial grande concentração de cargas negativas, com capacidade de adsorver espécies químicas, ou seja, atrair eletrostaticamente sólidos para sua superfície (BAIRD; CANN, 2011), principalmente as espécies iônicas e metálicas, inclusive metais pesados.

Alguns metais podem ser considerados problemas ambientais e de saúde, quando ingeridos, por não possuírem nenhuma função biológica, como os elementos-traço cádmio (Cd), chumbo (Pb) e mercúrio (Hg), ou por serem ingeridos em doses muito altas, mesmo que possuam considerável importância para o metabolismo de animais e plantas, como o cromo (Cr), ferro (Fe), níquel (Ni) e zinco (Zn) (BAIRD, CANN, 2011; CALIJURI, CUNHA, 2013; SILVA, 2020).

Dessa forma, caracterizar geoquimicamente os compartimentos sedimentológicos presentes no rio Acre é importante para determinar a concentração de metais nos sedimentos e disponibilização destes para a água, possibilitando avaliar os fatores de risco ambiental desse corpo d'água sujeito a contaminação por poluição, proveniente principalmente das atividades antrópicas desenvolvidas na bacia hidrográfica.

As formas de uso e cobertura da terra podem alterar química, física e biologicamente a composição das águas numa bacia hidrográfica (CALIJURI; CUNHA, 2013), e sendo o rio Acre a principal fonte de captação de água do sistema

de abastecimento público do município, onde, inclusive não é realizado monitoramento desses parâmetros os estudos hidrogeoquímicos e geoquímicos são de fundamental importância para a região.

No Acre, há poucos estudos sobre hidrogeoquímica das águas do rio Acre e seus afluentes (ABREU, MAIER, 1992; CARVALHO, 2006; FURTADO, 2005; NETO, 2014; SANTOS, 2013a; SOS AMAZONIA, 2011) e menos ainda sobre geoquímica dos sedimentos (BENCHIMOL, KRONBERG, 1992; MASCARENHAS et al., 2004; VIANA, 2005). Dessa maneira, o presente estudo subsidiará futuras investigações geoquímicas e ambientais na Bacia Hidrográfica do Rio Acre, através da análise de composição química da água e dos sedimentos do rio Acre.

A quantificação dessas espécies químicas, contribui com dados inéditos que podem ajudar a estabelecer valores de referência regional baseado nas taxas de concentração desses elementos químicos em comparação com trabalhos anteriormente realizados nesta bacia e rios amazônicos já estudados por outros autores, e com isso, auxiliar na análise da vulnerabilidade do rio Acre quanto à contaminação química, principalmente por metais pesados,

No rio Acre o processo de contaminação gradativa ocasionado pelo lançamento inadequado de esgotos sanitários e resíduos sólidos, mostra a necessidade de uma avaliação da qualidade ambiental do rio, para além da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos somente da água, mas também dos sedimentos de fundo. Conhecer a geoquímica desse ecossistema, possibilitará compreender a interferência de processos como desmatamento, ocupação do solo às margens do rio, aumento da concentração urbana, disposição inadequada de esgotos, bem como a falta de saneamento básico para a proposição de melhorias da qualidade ambiental com observância das leis ambientais, federais, estaduais e municipais.

## **Problema e Hipótese**

A falta de monitoramento por parte do poder público, da qualidade do sedimento do rio Acre e seus afluentes, que é a principal fonte de captação de água utilizada para abastecimento público do município de Rio Branco, e ao mesmo tempo principal destino do esgoto lançado *in natura*, é um problema ambiental emergente. A ausência de estudos aprofundados sobre sedimentos desse rio, reflete na falta de registros de processos geoquímicos da região, já que, a análise química das amostras de

sedimentos de fundo de rio pode indicar a distribuição regional das concentrações naturais ou antrópicas de certos elementos e nos sugere o seguinte questionamento: o rio Acre é um corpo d'água que apresenta vulnerabilidade à contaminação por metais pesados?

Deste questionamento se deriva a hipótese de que a caracterização química do sedimento de fundo do rio Acre, principalmente com relação à presença de metais pesados, pode revelar possíveis fontes de poluição e revelar quais são as condições ambientais reais desse corpo d'água.

### **Objetivo geral**

Avaliar a presença de metais pesados no sedimento de fundo do rio Acre e a composição química da água em um trecho do rio Acre na cidade de Rio Branco a fim de verificar a vulnerabilidade desse ecossistema quanto a potencial ação antrópica.

### **Objetivos específicos**

1. Analisar a composição química dos sedimentos de fundo do leito do rio Acre, quantificando a concentração de metais pesados (cádmio, chumbo, cromo, cobre, mercúrio, níquel e zinco) e matéria orgânica.
2. Analisar a composição físico-química (pH, temperatura, turbidez, condutividade elétrica, alcalinidade, dureza, sólidos totais dissolvidos, bromo, cloreto, fosfato, nitrito, sulfato, sílica, peróxido, amônia e sulfeto) em amostras de água coletadas em um trecho do rio Acre em Rio Branco;
3. Identificar a relação entre os parâmetros analisados e as formas de uso e cobertura da terra, buscando estabelecer as relações entre as concentrações de metais pesados e sua origem
4. Comparar os resultados obtidos das análises de água e sedimento com os índices orientativos das legislações brasileira e com estudos anteriores realizados na bacia do rio Acre e bacias semelhantes.



# **1 CAPÍTULO: REFERENCIAL TEÓRICO**

## **1.1 A Adoção do Método Geossistêmico como Pressuposto Teórico-Metodológico em Estudos Ambientais**

As paisagens terrestres são modificadas constantemente por fluxos de energia e matéria em movimento contínuo, sendo a água, o principal agente causador dessas modificações na paisagem em áreas continentais (SUGUIO, 2003). Nesse processo são incorporados à água diversos componentes, inclusive agentes contaminantes como resíduos químicos, agentes tóxicos, microrganismos patogênicos, entre outros (MEDEIROS, 2015; SPERLING, 2007).

É possível estudar as interações da água com a superfície terrestre através de uma abordagem sistêmica, entendendo-se que os corpos d'água, bem como as bacias hidrográficas são um recorte da superfície terrestre que compõem um sistema maior e que, por este motivo, possibilitam adotar a Teoria Geral dos Sistemas como pressuposto teórico metodológico. Já que a abordagem sistêmica permite conceber os fenômenos através do estudo das partes que o formam e as interações dessas partes, quando utilizada nos estudos geográficos, tem por objetivo interpretar a “complexidade que explica a organização de um sistema espacial segundo as interações que se processam entre os atributos formadores e que lhes confere caráter dinâmico e não-linear” (NETO, 2008, p. 69).

Assim, as Bacias Hidrográficas podem ser entendidas como sistemas de coleta das águas superficiais (também chamadas de bacias de drenagem). Segundo Christofolletti (1981), a definição de sistema pode ser entendida como a de um conjunto de elementos que mantêm relações entre si e entre os seus atributos, logo, são compostos por partes (unidades/elementos) que devem estar conectadas (serem dependentes) e dessa interação surgem os fluxos. A concepção da BH como um sistema integra uma visão conjunta do comportamento das condições naturais e das atividades humanas (FALCÃO, 2020), em que mudanças ocorridas no ambiente natural causam impactos em toda a bacia.

A BH coleta toda precipitação da superfície terrestre, seja por escoamento superficial ou por infiltração, e esse é o principal mecanismo de entrada de matéria nesse sistema. Outras propriedades do sistema vão conduzir a circulação da matéria dentro dele (CHRISTOFOLETTI, 1981). Se entendermos o rio (canal principal) como o

sistema total, essa circulação será dada pela vazão que pode ser mais ou menos alterada pela forma de escoamento nas vertentes, gradiente de declividade ao longo do curso fluvial, composição do solo onde será infiltrada com relação à porosidade, erosão das margens do rio, presença/ausência de intervenções (antrópicas ou naturais) no leito e margens que alterem a mobilidade da água e sedimentos (SPERLING, 2007).

Nas BH ocorre a drenagem da água e de sedimentos até um ponto em comum (como um rio, por exemplo) e durante esse trajeto há perdas e ganhos de matéria e de energia em uma dinâmica de autoajuste constante, de maneira que tudo que acontece na superfície e subsolo de bacia vai repercutir direta ou indiretamente nos rios (CHRISTOFOLETTI, 1981). A rede de drenagem de uma bacia pode indicar relações de causa-efeito, particularmente aquelas que envolvem o meio hídrico (SANTOS, 2013a).

A classificação dos sistemas mais consolidada na literatura, é a feita por Christofolletti (1981), que os separa em dois grupos: isolados e os não isolados. Os isolados não realizam troca de massa ou energia com a vizinhança e, teoricamente, só podem existir experimentalmente. Já os não isolados podem ser ainda: fechados, quando a entrada (massa) é impedida, mas não a saída (energia), e abertos, quando há troca de massa e energia com a vizinhança (CHRISTOFOLETTI, 1981; FALCÃO, 2020).

## **A Teoria Geral dos Sistemas**

Foi necessário que fossem estabelecidos alguns critérios para se individualizar os conjuntos e delimitar um sistema, pois “assim posto, qualquer conjunto de objetos que tenha propriedades comuns pode ser considerado sistema” (SALES, 2004, p. 127). Conforme define Christofolletti (1981), para organizar os conjuntos é preciso estabelecer relações entre os elementos que o compõe; um conjunto de elementos está inserido em um conjunto maior (universo), que é formado a partir de subsistemas, e assim por diante. E nesse sentido, a individualização dos conjuntos vai depender de cada área de estudo, pois cada uma vai considerar um tipo de fluxo de matéria e energia como importante para seu objeto de estudo, mas para as ciências de um modo geral, sistematizar é sempre uma tarefa prévia a ser realizada.

[...] O aparecimento de modelos representando os aspectos de interação entre as variáveis da natureza implicou a introdução de novas categorias no pensamento e na pesquisa científica. A resolução de problemas no campo das ciências que apresentavam múltiplas variáveis, tais como a Biologia, exigia novos instrumentos conceituais para tratar os problemas da complexidade organizada. Os modelos teóricos, de onde decorrem os instrumentos, tinham que ser interdisciplinares, pois transcendem os departamentos convencionais da ciência e se aplicam a fenômenos em diversos domínios (VALE, 2012, p. 90).

A Teoria Geral dos Sistemas (TGS) começa a ser incorporada ao arsenal teórico-metodológico de diversos ramos do conhecimento, inclusive a Geografia, a partir das últimas décadas do século XX (BERNARDINO *et al.*, 2018; NETO, 2008). Após explosões demográficas decorrentes dos avanços tecnológicos obtidos com a revolução industrial, que trazem à tona novos problemas a serem enfrentados pela sociedade moderna, e com isso, exige-se um novo modo de pensar essas problemáticas, principalmente as relacionadas à crescente demanda por matérias-primas e à falta de gerenciamento adequado dos resíduos gerados.

A adoção da abordagem sistêmica pela Geografia Física, com base na ecologia, permite entender o meio ambiente como um sistema, conceber a natureza de forma integrada, na qual vários campos de estudos podem ser complementados. A TGS desenvolve princípios unificadores que atravessem verticalmente o universo das ciências individuais (VALE, 2012).

Um dos primeiros autores a abordar a discussão sistêmica como possibilidade de estudo integrado dos fenômenos foi o biólogo Ludwing von Bertalanffy, em 1937, dando novos rumos às pesquisas das áreas naturais (BERNARDINO *et al.*, 2018). Posteriormente, há influência da Ecologia na Geografia presente nos trabalhos de Alexandre von Humboldt (considerado pai da Biogeografia), e outros autores também importantes para a ciência geográfica do século XIX: Ritter, Ratzel, Dokucháev e Voiéikov. A teoria nasce como uma preocupação dos campos de estudo das ciências biológicas, notadamente a ecologia, porém, não se limita apenas aos sistemas orgânicos, mas, também aos inorgânicos, de maneira que se estende para muitas outras áreas. (VALE, 2012).

Com a possibilidade de se aplicar a análise sistêmica às paisagens naturais, estas passaram a ser percebidas então como algo passível de delimitação de acordo com alguns padrões. Bertrand (2004) delimita espacialmente a paisagem (Quadro 01) para que seja possível estudá-la, dividindo-a em unidades, as superiores: Zona;

Domínio e Região Natural (definidas pelo clima e geologia), e as inferiores: Geossistema; Geofácies e Geótopo.

**Quadro 01:** Classificação da paisagem por Bertrand

Unidade de paisagem	Escala tempo-espacial G= grandeza	Unidades elementares				
		Relevo	Clima	Botânica	Biogeografia	Unidade valorada pelo homem
Zona	G I		Zonal		Bioma	Zona
Domínio	G II	Domínio estrutural	Regional			Domínio região
Região natural	G III	Região estrutural		Estágio série		Bairro rural ou urbano
Geossistema	G IV-V	Unidade estrutural	Local		Zona equipotencial	
Geofáceis	G VI			Estádio agrupamento		Exploração ou bairro parcelado (pequena ilha ou cidade)
Geótopo	G VII		Microclima		Biótipo biocenose	parcela (ex. casa na cidade)

Fonte: Adaptado de BERTRAND (2004).

O Geossistema está localizado entre a 4ª e a 5ª grandeza, é o complexo geográfico onde acontecem os fenômenos que alteram a paisagem e sua escala varia de alguns quilômetros a centenas. Este é o objeto de estudo de interesse para o geógrafo. São os estudos geográficos pautados nos geossistemas e na análise integrada da paisagem que vão contribuir para consolidar essa abordagem sistêmica nos campos da Geografia (NETO, 2008). Para o autor, paisagem e geossistemas são comumente discutidos de forma associada como se fossem a mesma categoria de análise, mas deve-se lembrar que não são.

Os geossistemas, sob cuja óptica é realizada a maior parte da pesquisa e atuação dos geógrafos na área ambiental, não eliminam a necessidade do estabelecimento de procedimentos metodológicos necessários à caracterização das variáveis a serem consideradas - é preciso saber quais elementos do relevo, do clima, do solo, da vegetação, são necessários, e qual a importância que eles assumem na dinâmica do meio (SALES, 2004, p. 131).

No Geossistema, sistema dinâmico e aberto, há uma combinação de variáveis influenciando ao mesmo tempo, como clima, hidrologia, geomorfologia, fauna, flora, solo e a ação do homem (através das atividades sociais, econômicas e culturais), é o

local onde se percebe a relação homem-natureza acontecer dinamicamente. Pode-se dizer que a natureza começa a ser humanizada, seja por meio de amostragens, pela quantificação ou mesmo pela noção de causa e efeito de cada elemento componente do sistema (FALCÃO, 2020).

### **A abordagem sistêmica em estudos ambientais**

O ambiente de sedimentação fluvial é importante ferramenta para elucidar e interpretar a evolução histórica de paisagens na escala geológica. Também os rios funcionam como agentes geológicos que desempenham papel importante no modelado do relevo, no condicionamento ambiental e na própria vida do ser humano (CHRISTOFOLETTI, 1981; SUGUIO, 2003).

Para Santos (2013a), uma das maiores vantagens da visão sistêmica tem sido a de concatenar os ramos da Geografia Física, demonstrando um caráter mais realista do meio físico, além de constituir base fundamental para estudos de bacia de drenagem e canais fluviais. Estudar bacias hidrográficas na visão de sistemas faz perceber que os comportamentos naturais do sistema e atividades humanas desenvolvidas na bacia estão intimamente interligadas, de maneira que uma alteração/impacto proveniente de atividade humana pode gerar como consequência alteração das condições naturais (FALCÃO, 2020).

De acordo com Neto (2008), a abordagem sistêmica encontra vasto campo de aplicação em estudos ambientais, principalmente aqueles ligados ao estudo do meio físico, como os estudos da alçada da Geografia Física e da Geomorfologia. A configuração do canal fluvial, por exemplo, possui caráter extremamente dinâmico, pois um conjunto de fatores como aspectos topográficos, geológicos, pedológicos, climáticos e hidrológicos inerentes à própria bacia hidrográfica estão atuando ao mesmo tempo, alterando-o (SPERLING, 2007).

A bacia hidrográfica é um sistema geomorfológico aberto, que recebe matéria e energia através de agentes climáticos e perde através do deflúvio. A bacia hidrográfica como sistema aberto pode ser descrita em termos de variáveis com inter-relações bem definidas. Estas formam os elementos que contribuem para a definição das características da bacia são: o embasamento rochoso, o relevo, o solo e a cobertura vegetal (FALCÃO, 2020, p. 25).

De uma maneira geral, a qualidade da água de um rio é resultante tanto de fenômenos naturais quanto antrópicos, pois depende das condições naturais dos locais de escoamento e drenagem, logo, depende da forma como o homem usa e ocupa os solos na bacia hidrográfica (CALIJURI 2013; SPERLING, 2007). A qualidade pode ser afetada por impurezas ou agentes contaminantes que estejam presentes no solo, o que está diretamente conectado com a interferência antrópica. O despejo inadequado de esgotos domésticos e/ou industriais introduz compostos contaminantes no solo ou diretamente nos rios.

Assim, aplicar a Abordagem Geossistêmica como referencial teórico-metodológico no estudo ambiental de um rio a partir de uma visão holística, como a que é proposta pela TGS, mostra-se adequada, pois, assim se considera todos os fenômenos antrópicos e naturais que afetam a qualidade do rio. Além de se utilizar conjuntamente ferramentas das diversas ciências como a biologia, física, química, matemática e estatística, além da geografia, para avaliar tais fenômenos de uma maneira não isolada.

## **1.2 Qualidade ambiental da água**

A água é substância essencial para a manutenção de todas as formas de vida na Terra, e considerada singular em todos os seus aspectos, tanto na sua estrutura molecular quanto nos seus possíveis usos. A água participa de quase todos os fenômenos que acontecem na superfície terrestre, fazendo parte da composição biológica de todos os seres, e dos ciclos naturais do planeta.

Quimicamente falando a água, hidreto de oxigênio ( $H_2O$ ), é única em suas características, que estão diretamente ligadas à forte interação de suas pontes de hidrogênio, tendo, por isso, comportamento anômalo aos demais hidretos. A diferença de eletronegatividade dos átomos de oxigênio e hidrogênio provoca polarização da ligação  $H-O$ , esses polos forçam a atração entre as moléculas (ATKINS *et al.*, 2018), fazendo com que a água possua “(...) um alto momento dipolar, sendo a esta polarização atribuída as propriedades peculiares da água (alto ponto de ebulição), pois, é a única molécula de massa molar equivalente a conseguir permanecer na superfície terrestre” (LOPES; NETO, 1997, p. 23).

No ciclo de transformação de seus estados físicos, a água percorre os 3 “grandes reservatórios da natureza – atmosfera, continentes e oceanos – através das

diversas fases do ciclo hidrológico. Ao longo delas, elementos químicos e sedimentos de uma forma geral lhe são incorporados, determinando a sua qualidade” (CALIJURI; CUNHA, 2013, p. 245).

Deste modo, além dos fenômenos naturais, como presença de substâncias e impurezas na atmosfera e solo, a atuação do homem também é fator de risco para a qualidade das águas, seja por despejo de efluentes, uso de defensivos agrícolas, dentre outros (SPERLING, 2007). Conforme reforça Calijuri e Cunha (2013) a poluição hídrica, é notadamente acentuada pelo crescimento populacional que intensifica as atividades antrópicas, e principalmente se o tratamento dos efluentes gerados pelas atividades domésticas e industriais não for adequado/satisfatório.

Souza e Gastaldini (2014) observaram que os diferentes usos do solo na bacia hidrográfica do rio Vacacaí-mirim em Santa Maria - RS resultaram em alterações dos parâmetros de qualidade da água, de modo que a bacia Alto da Colina, devido à menor área, maior percentual de urbanização e maior densidade populacional, apresentou os piores índices de degradação ambiental analisados (elevada quantidade de matéria orgânica, agentes patogênicos e nutrientes), as áreas mais preservadas os menores índices de *Coliformes totais* e *Escherichia coli* e as áreas rurais onde predominam as atividades agrícolas, houve aumento da turbidez e dos sólidos suspensos, devido à ocorrência dos processos erosivos.

Fonseca et al. (2024) em estudo sobre a vulnerabilidade ambiental de reservatórios de captação de água para abastecimento público no Rio Grande do Norte, encontraram aumento nos níveis de fósforo e nitrogênio (consequentemente eutrofização elevada) nas áreas sob influência da agricultura, diretamente relacionado com o uso de agrotóxicos nessas regiões.

Existem diversos indicadores para monitoramento da qualidade da água e acompanhamento das mudanças ocorridas no ambiente natural (ALMEIDA, 2021). Índices que são importantes, pois, possibilitam, por exemplo, avaliar a contaminação de água por esgotos domésticos, percentual da população com acesso a água potável, entre outros.

O principal índice utilizado no Brasil é o Índice de Qualidade das Águas - IQA desenvolvido pela *National Sanitation Foundation* (NSF) e adaptado pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo – CETESB. O IQA resume de forma esclarecedora os resultados de todos os parâmetros avaliados.

Os índices podem ser entendidos como “notas”, que retratam condições variando de “muito ruim” a “excelente”, ou que permitam inferências sobre alguns aspectos específicos sobre o curso d’água, tal como biodiversidade e toxicidade. Os resultados podem ser expressos em mapas hidrográficos com escalas de cores nos trechos dos cursos d’água para cada faixa de valor do índice, tornando a comunicação mais fácil e direta com o público (SPERLING, 2007, p. 252).

No Acre destacam-se os trabalhos de Furtado (2005) que calculou o IQA para amostras retiradas de um trecho urbano do Rio Acre, notadamente na cidade de Rio Branco, e Santos (2013ba) que aplicou o índice ao Igarapé Judia, um dos principais afluentes do rio Acre.

No trabalho de Furtado (2005) a autora encontrou valores médios de IQA que corresponderam à qualidade “boa” e “regular” nos trechos avaliados, o que ela associa ao período de cheia que aumenta a capacidade de autodepuração do rio, melhorando o parâmetro Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), que reflete no aumento do IQA. De maneira que, as precipitações pluviais, responsáveis pela flutuação do ciclo hidrológico do rio, exercem influência direta nas variáveis abióticas estudadas pela autora, os trechos mais urbanizados receberam a qualidade “regular” devido à alta densidade de coliformes termotolerantes confirmando a hipótese de que lançamento de efluentes in natura no rio é o principal fator que pesa sobre a qualidade das águas neste estudo.

Já no trabalho de Santos (2013a), o IQA classificou a água como “ruim” a “péssima” em alguns trechos, principalmente próximos ao exutório do Igarapé Judia. Os fatores determinantes, neste caso, foram a urbanização na bacia do igarapé e a falta de saneamento básico. O autor comprovou que a destinação de esgoto *in natura* estaria afetando o sistema, através da comparação entre o Índice de Antropização (Ia) e o IQA. Os elevados valores de Nitrogênio Total, Fósforo Total e Amônia, comprovaram a presença de esgoto.

No meio aquático o nitrogênio é associado ao despejo doméstico e industrial, de fertilizantes e excrementos de animais, e na forma de amônia livre é tóxico aos peixes. Juntamente com fósforo, são essenciais para o crescimento de algas, e em quantidades elevadas podem levar ao processo de eutrofização (crescimento exagerado desses microrganismos) (SPERLING, 2007). Por isso é importante haver balanço adequado das quantidades de carbono, nitrogênio e fósforo disponíveis no meio aquático.



Santos (2013a) identificou ainda que no período de chuva há aumento da disponibilidade dos metais Alumínio, Manganês e Cobre, em razão da alta taxa de lixiviação. Já no período de seca, encontrou maiores quantidades de Ferro, Zinco e Cromo. O autor alerta para as elevadas concentrações desses metais, tanto em período de cheia, quanto de seca, estando completamente fora dos padrões preconizados pela legislação ambiental brasileira.

Entretanto, o referido índice não abrange todos os elementos tóxicos, como metais, por exemplo. Nesse contexto, índices específicos têm sido desenvolvidos e utilizados em complementação aos programas de monitoramento das agências ambientais: Índice de Estado Trófico, de Balneabilidade, de Contaminação por Tóxicos, de Qualidade da Água Bruta Para Fins de Abastecimento Público (ANA, 2024).

Sabe-se que o processo de controle ambiental feito pelos órgãos responsáveis encontra muitas barreiras, há constantes conflitos com os segmentos sociais e econômicos que estão envolvidos na geração de poluentes. Os parâmetros avaliados, os limites seguros para consumo humano, o limite aceitável da presença de substâncias poluentes e/ou contaminantes, estão constantemente sendo revisados e atualizados (Quadro 02).

**Quadro 02:** Instrumentos Legais e Relatórios Oficiais adotados na avaliação de qualidade da água no BR

Relatório/Lei	Ano de publicação	Finalidade
APHA/AWWA	1905	"Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater" publicação conjunta da <i>American Public Health Association</i> (APHA), <i>American Water Works Association</i> (AWWA) e <i>Water Environment Federation</i> (WEF): guia de referência para métodos de análise de água.
WHO (OMS)	1984	Guia de qualidade da água desenvolvido pela Organização Mundial da Saúde (OMS): " <i>World Health Organization's Guidelines for Drinking-water Quality</i> " WHO/GDWQ.
BRASIL/SNIS	1996	Sistema de Informações sobre Serviços de Água e Esgoto dos Municípios Brasileiros
BRASIL 9433/1997	1997	Lei que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos.
UNESCO	2000	Programa Mundial de Avaliação das Águas - WWAP ( <i>World Water Assessment Programme</i> ). Divulga anualmente: "Relatório Mundial sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos das Nações Unidas".
CONAMA 357/2005	2005	Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais

Relatório/Lei	Ano de publicação	Finalidade
		para o seu enquadramento e estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes
CETESB/2006	2006	Programa de Avaliação da qualidade das águas interiores de São Paulo.
CNRH 91/2008	2008	Resolução do Conselho nacional de recursos hídricos que dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos.
CNRH 92/2008	2008	Resolução do Conselho nacional de recursos hídricos estabelece critérios e procedimentos gerais para proteção e conservação das águas subterrâneas no território brasileiro.
CONAMA 396/2008	2008	Específica para as águas subterrâneas, dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências.
CONAMA 430/2011	2011	Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005.
MS - Portaria nº 5/2017	2017	Portaria do Ministério da Saúde: Elabora normas e estabelece padrão de potabilidade de água a serem observados em todo o território nacional.
MS Portaria nº 888/2021	2021	Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017.

Fonte: Adaptado de Almeida (2021). Organização autora (2023).

### 1.3 Sedimentos como estoque de elementos contaminantes

O sedimento possui grande importância ambiental pela alta capacidade de acumular metais e compostos orgânicos, como os hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) e os pesticidas, além de serem carreadores de íons metálicos, agem também como sumidouros (BAIRD; CANN, 2011).

É basicamente composto por camadas minerais e orgânicas, geralmente finamente granulada, em contato com a parte inferior de corpos hídricos (BAIRD; CANN, 2011). O tamanho do grão do sedimento interfere na deposição dos metais, e consequente, correlação positiva, estando mais concentrados em partículas menores (inferiores a 63 µm) (CAVALCANTE; SANTOS, 2021), pois a atração ocorre na fração coloidal, permitindo a troca de íons entre os sedimentos e as espécies químicas que o circulam.

O fenômeno de captura de átomos, íons e moléculas por superfícies é chamado de adsorção, processo fundamental para o entendimento dos ciclos geoquímicos. (ALBAREDE, 2011). “A granulometria fina de argilas e silte, que possuem elevada área superficial, tende ao favorecimento de processos geoquímicos como a

adsorção, absorção e complexação de metais em sedimentos” (SANTOS, 2013b, p. 14).

Essa característica influencia no funcionamento do sedimento como compartimentos de retenção ou liberação de metais para os sistemas aquáticos (OLIVEIRA, 2013; SANTOS et al., 2013, SPERLING, 2007), servindo como bons indicadores de poluição ambiental (PORTO, 2009)

A capacidade de sorção pode ser alterada pelas condições do meio, e podem passar a agir como agentes contaminantes ao tornar essas espécies químicas anteriormente fixadas, de volta à biodisponibilidade (BAIRD; CANN, 2011). Fatores externos como pH interferem diretamente na mobilidade e na mobilização dos metais em solução (LICHT, 1998).

A retenção de mercúrio em sedimento, por exemplo, está diretamente relacionada com o conteúdo de matéria orgânica, fração de areia, silte e argila, por conta dos dois processos de incorporação de metais no sedimento, a complexação por matéria orgânica e a adsorção em partículas minerais (OLIVEIRA, 2016). Já os óxidos hidratados de Fe e Mn são os principais controladores da fixação dos metais pesados (LICHT, 1998).

Na bacia do Córrego Paciência em Minas Gerais Oliveira (2019) atestou a influência dos sedimentos nos trechos d'água superficiais, ao comparar valores de concentração de alumínio no sedimento em período de seca e de chuva, e encontrou diminuição da concentração do metal nos sedimentos conforme aumento da pluviometria.

Em estudo no lago Água Preta no Pará Oliveira (2013) explica a influência do ferro na mobilização dos íons fosfatos para a água, destacando que em ambientes redutores e na presença de oxi-hidróxidos de ferro, o enxofre precipita, formando sulfetos férricos e ferrosos, o que permite que o fósforo seja disponibilizado para a água circundante ou para o sedimento.

### 1.3.1 Metais em sedimentos

No meio ambiente são encontrados principalmente como traço ou subtraços, na forma elementar ou como íons solúveis, íons trocáveis e precipitados (OLIVEIRA, 2016). Licht (1998) define os elementos traço como aqueles presentes em

concentrações muito baixas, com ocorrência natural em solo, sedimentos de drenagem e rochas. A maior parte dos metais são transportados, não pela água, mas pela atmosfera como gases, ou como espécies adsorvidas ou absorvidas sobre material particulado em suspensão, mas de certa maneira, o destino final para metais são sempre os solos e sedimentos (BAIRD; CANN, 2011).

Os estudos sobre a biogeoquímica dos elementos-traço são importantes, por exemplo, para explicar as contribuições naturais e antrópicas, principalmente, para os ecossistemas amazônicos, e contribuir para a identificação de possíveis áreas fontes de contaminação (SILVA, 2020).

Com relação à origem antrópica os metais potencialmente tóxicos têm como fontes principais pesticidas (cobre (Cu), zinco (Zn) e chumbo (Pb)), fertilizantes (cádmio (Cd), cobre (Cu), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn)), queima de combustíveis fósseis (chumbo (Pb), cádmio (Cd), zinco (Zn) e cobre (Cu)), além de, poderem estar, também, dispersos na atmosfera, podendo depositar - se nos solos onde são lixiviados para os corpos de águas, posteriormente acumulando – se nos sedimentos (CALIJURI, CUNHA 2013).

### 1.3.2 Toxicidade dos metais

Os metais se diferenciam dos compostos orgânicos tóxicos, por não serem totalmente degradáveis em formas não tóxicas, embora possam ser transformados em formas insolúveis e biologicamente indisponíveis (BAIRD; CANN, 2011). A toxicidade dos metais depende da especiação (forma química do elemento), em cursos d'água vai depender de outros fatores como pH do meio e a quantidade de matéria orgânica, por exemplo, que podem favorecer a especiação (ATKINS *et al.*, 2018).

Em forma elementar podem ser quase completamente insolúveis e passam pelo corpo humano sem causarem danos, como mercúrio (Hg), chumbo (Pb), cádmio (Cd) e cromo (Cr) que não são tóxicos como elementos livres condensados, porém, podem ser perigosos na forma de cátions e tóxicos quando ligados à cadeias carbônicas (BROWN *et al.*, 2005). Para Hg e Pb, por exemplo, as formas que possuem grupos alquilas (grupos funcionais compostos por carbono e hidrogênio ligados entre si, derivados de hidrocarbonetos saturados) ligados ao metal são altamente tóxicas,

por causa da solubilidade nos tecidos animais, grupos alquilas conseguem atravessar as membranas biológicas, ao contrário de outras formas iônicas (ATKINS et al 2018).

Apesar de alguns elementos-traço serem considerados essenciais à organismos vivos, outros não possuem função fisiológica alguma (Quadro 03), e estão presentes no ambiente, fruto de lançamentos naturais e/ou antropogênicos (alguns neurotóxicos como o Cd, Pb, As e Hg) encontrados em associação com outros elementos (SILVA, 2020). A ação humana, tem contribuído para o aumento da concentração destes elementos no meio ambiente, causando risco à fauna, flora e à própria saúde humana (CALIJURI, CUNHA, 2013).

**Quadro 03:** Funções metabólicas dos metais analisados em amostras de sedimento do rio Acre

<b>Cádmio - Cd</b>	<b>CAS<sup>1</sup>: 7440-48-4</b>	<b>DIT<sup>2</sup>: 1 µg/kg</b>
<b>Função fisiológica:</b> não estabelecida; <b>Deficiência:</b> desconhecida; <b>Absorção:</b> transporte restrito às células sanguíneas e albumina; <b>Toxicidade:</b> diminuição do crescimento e da reprodução, hipertensão e disfunção renal e pulmonar por exposição crônica. Meia-vida de um a três anos, o que o torna tóxico, face à sua acumulação. Fumantes podem absorver de 10 a 40 mcg de cádmio.		
<b>Cromo - Cr</b>	<b>CAS: 7440-47-3</b>	<b>DIT: 0,05 mg/kg (Cr<sup>3+</sup>)</b>
<b>Função fisiológica:</b> metabolismo da glicose, aumenta o efeito periférico da insulina através da transmissão da mensagem hormonal para a célula receptora; <b>Deficiência:</b> intolerância à glicose; resistência relativa à insulina e aumento da insulina circulante; neuropatia periférica; encefalopatia metabólica; perda de peso; liberação de ácidos graxos livres prejudicada e hiperlipidemia; reduz o quociente respiratório; elevação do cromo sanguíneo (aumenta o metabolismo da glicose); hiperglicemia no jejum e glicosúria; <b>Absorção:</b> 0,5-2% do ingerido, ocorre no trato gastrointestinal. É transportado no sangue ligado à transferrina, sendo a sua distribuição tecidual uniforme. Fitatos diminuem sua absorção e os oxalatos a aumentam <b>Toxicidade:</b> CrII e CrIII não relatada, CrVI tóxico e absorvido por ingestão, inalação e contato causando câncer do intestino, dermatite e doenças respiratórias.		
<b>Cobre - Cu</b>	<b>CAS: 7440-50-8</b>	<b>DIT: 1,5-2,5 mg/kg</b>
<b>Função fisiológica:</b> mobilização do ferro, síntese de hemoglobina; <b>Deficiência:</b> anemia, leucopenia, neutropenia, hipotermia e atraso do crescimento, queratinização deficiente, despigmentação capilar, degeneração da elastina aórtica; hipercolesterolemia e hiperuricemia; <b>Absorção:</b> estômago e duodeno proximal, é transportado para o fígado ligado à albumina e transcupreína, incorporado à ceruloplasmina e várias metaloenzimas, que permitem o transporte do cobre para os tecidos extra-hepáticos; <b>Toxicidade:</b> pela via oral, quando a ingestão é maior que 400mg/dia: náusea, vômitos e hemorragia gastrointestinal, diarreia, anemia hemolítica, cirrose hepática crônica, icterícia, bronquite, coma.		
<b>Mercúrio - Hg</b>	<b>CAS: 7439-97-6</b>	<b>DIT: 1,6 µg/kg</b>
<b>Função fisiológica:</b> função fisiológica não estabelecida; <b>Deficiência:</b> desconhecida; <b>Absorção:</b> presente no sangue na concentração de 0,01 mcg/dl, armazena-se no cérebro, rins, pulmões e cabelos.		

<sup>1</sup> CAS: *Chemical Abstracts Service*, número usado como identificação de substância química.

<sup>2</sup> DIT: Dose de Ingestão Diária Tolerável - medida por peso corporal.

<b>Toxicidade:</b> varia de acordo com a forma química. Como mercúrio elementar ( $\text{Hg}^0$ ) apresenta toxicidade para o sistema nervoso central, causando danos neurológicos. Como mercúrio inorgânico, principalmente divalente ( $\text{Hg}^{2+}$ ), afeta os rins e o sistema nervoso. Como mercúrio orgânico na forma metilmercúrio ( $\text{CH}_3\text{Hg}^+$ ), apresenta forte neurotoxicidade, afetando principalmente o desenvolvimento fetal e causa danos neurológicos graves, levando à deficiências cognitivas e distúrbios motores.		
<b>Níquel - Ni</b>	<b>CAS:</b> 7440-02-0	<b>DIT:</b> 0,02 mg/kg
<b>Função fisiológica:</b> Função metabólica e modo de ação no organismo pouco conhecidos. Encontrado sob forma de NiII e NiIII Atua como cofator ou componente estrutural de metaloenzimas específicas; <b>Deficiência:</b> pode acarretar diminuição da atividade de certas enzimas hepáticas como a glicose-6-fosfato. Causas: uremia crônica, psoríase e cirrose hepática <b>Absorção:</b> É absorvido pela via de transporte do ferro, na porção proximal do intestino delgado, competindo com o ferro na absorção por usarem o mesmo sistema de transporte. O teor de absorção é de 10%, decrescendo a taxa na deficiência de ferro, na lactação e gravidez. Localiza-se nos ossos, pele, músculos e fígado. Transportado pela via sanguínea e por ligantes séricos ultrafiltráveis. <b>Toxicidade:</b> acarreta reações alérgicas (asma, dermatite, no caso de a ingestão oral ultrapassar 600 mcg/dia.		
<b>Chumbo - Pb</b>	<b>CAS:</b> 7439-92-1	<b>DIT:</b> 3,6 µg/kg
<b>Função fisiológica:</b> Função fisiológica não estabelecida; <b>Deficiência:</b> diminuição do crescimento; do ferro sérico, hepático e esplênico; diminuição do teor de glicose, glicérides e fosfolípidos hepáticos; <b>Absorção:</b> A maior parte da absorção acontece no trato gastrointestinal e no aparelho respiratório, o chumbo inorgânico distribui-se inicialmente por vários tecidos, principalmente no epitélio tubular renal e no fígado, assim como nos ossos, dentes e cabelos, sendo que cerca de 95% se localizam nos ossos e pequenas quantidades no cérebro. <b>Toxicidade:</b> diminui a reabsorção renal de glicose e aminoácidos; diminuição da capacidade de conversão renal das vitaminas D2 e D3; inibição de enzimas ATPases. Acarreta cansaço, letargia e insônia.		
<b>Zinco - Zn</b>	<b>CAS:</b> 7440-66-6	<b>DIT:</b> 25 mg/kg
<b>Função fisiológica:</b> estabilizador de polissomos durante a síntese protéica e de membranas para a circulação de elementos celulares. Essencial para a mobilização hepática da vitamina A: atua na maturação sexual, fertilidade e reprodução, e na função fagocitária, imunitária celular e humoral. <b>Deficiência:</b> diminuição do paladar, anorexia, apatia, retardo do crescimento, alopecia, hipogonadismo, hipospermia e retardamento da maturação sexual, intolerância à glicose e deficiência da imunidade. <b>Absorção:</b> passivamente no duodeno e jejuno, combina-se no plasma e forma complexos ligantes endógenos e exógenos com a histidina, ácido cítrico e ácido picolínico. A absorção acha-se relacionada com concentração intestinal intraluminal. Passa para a corrente sanguínea por processo ativo, combina-se no plasma com albuminas e ácidos no teor de 55% e 40% com macroglobulinas, não se destina a uso metabólico. Armazena-se no fígado, tecido muscular, unhas, pâncreas e ossos. <b>Toxicidade:</b> aguda: náuseas, vômitos e dores abdominais Crônicas: deficiência de cobre e anemia.		

Fonte: Adaptado de Franco (2002), Organização autora (2024).

### 1.3.3 Metais pesados

Na tabela periódica os metais pesados estão localizados próximos ao meio e topo, e possuem densidades relativamente altas, quando comparadas com demais elementos (Tabela 01), mas essa denominação não se refere somente ao peso/densidade, mas a acumulação nos organismos.

**Tabela 01:** Propriedades dos elementos

Metal	Z	Densidade (g/cm <sup>3</sup> )	Distribuição eletrônica	Reação de oxidação
Cd	48	8,65	[Kr] 4d <sup>10</sup> 5s <sup>2</sup>	$\text{Cd} + \text{O}_2 \rightarrow \text{CdO}$
Cr	24	7,19	[Ar] 3d <sup>5</sup> 4s <sup>1</sup>	$4\text{Cr} + 3\text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cr}_2\text{O}_3$
Cu	29	8,96	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>1</sup>	$2\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{CuO}$ $4\text{Cu} + \text{O}_2 \rightarrow 2\text{Cu}_2\text{O}$
Hg	80	13,55	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup>	$\text{Hg} + \text{O}_2 \rightarrow \text{HgO}$
Ni	28	8,91	[Ar] 3d <sup>8</sup> 4s <sup>2</sup>	$\text{Ni} + \text{O}_2 \rightarrow \text{NiO}$
Pb	82	11,34	[Xe] 4f <sup>14</sup> 5d <sup>10</sup> 6s <sup>2</sup> 6p <sup>2</sup>	$\text{Pb} + \text{O}_2 \rightarrow \text{PbO}$
Zn	30	7,13	[Ar] 3d <sup>10</sup> 4s <sup>2</sup>	$\text{Zn} + \text{O}_2 \rightarrow \text{ZnO}$

Z: número atômico; Adaptado de BROWN et al. (2005).

A toxicidade quando em forma de cátions livres ou ligados às cadeias curtas de carbono se dá por mecanismos bioquímicos, a exemplo da interação com enxofre (S), onde grupos sulfidrilas, -SH, que ocorrem normalmente nas enzimas que controlam a velocidade das reações metabólicas, atacam os cátions de metais pesados, a ligação metal-enxofre resultante afeta a enzima inteira, que deixa de agir normalmente afetando, assim, a saúde humana, muitas vezes de maneira fatal (BAIRD; CANN, 2011). A afinidade por grupos funcionais específicos nas moléculas biológicas, leva a disfunções no organismo, por interferir em processos metabólicos normais, causando danos celulares, desencadeando reações inflamatórias, entre outros danos já mencionados.

Um fenômeno que ocorre especialmente nas cadeias alimentares aquáticas é a bioacumulação, uma vez absorvidos pelos organismos os metais se concentram nos tecidos e órgãos, a dificuldade de excreção leva ao acúmulo contínuo nos tecidos e à medida que os organismos consomem outros organismos os metais são transferidos para níveis cada vez mais altos da cadeia alimentar (ATKINS et al 2018; BAIRD, CANN, 2011; CALIJURI, CUNHA, 2013).

Quando se pensa nos contextos amazônicos, onde não há suficiente fiscalização ambiental, e há crescente atividade ilegal de garimpos, além do desmatamento, que colocam em risco de contaminação o solo e rios da região, o cenário evidencia a urgência dos estudos para conservação da fauna e flora e proteção da saúde da população local.

Um estudo realizado pela Fundação Oswaldo Cruz em 17 municípios na Amazônia, concentrando importantes centros urbanos revelou que os peixes dos 6 estados (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima ) avaliados apresentam concentrações elevadas de mercúrio, com níveis de contaminação muito acima dos limites aceitáveis estabelecidos pela ONU. As amostras de peixes de Rio Branco ultrapassaram 6,9 a 31,5 vezes a dose de referência (0,1 µg/kg pc/dia de Hg) indicada pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (USEPA) (FIOCRUZ, 2023). O estudo evidencia a vulnerabilidade da população acreana à ingestão de peixes contaminados por metais pesados bioacumulados em seus organismos.

#### 1.3.4 Caracterização hidroquímica e geoquímica do rio Acre

As pesquisas realizadas, até o momento, sobre qualidade do Rio Acre são baseadas em dados obtidos a partir da análise de parâmetros físico-químicos e microbiológicos de amostras de água, com destaque para os estudos limnológicos de Abreu e Maier (1992) entre a cidade de Rio Branco e a comunidade Lua Nova no Amazonas, o de Furtado (2005) em um trecho urbano do rio Acre na cidade de Rio Branco e o relatório de levantamento das principais fontes de contaminação da bacia hidrográfica do rio Acre feito pela organização não governamental SOS Amazônia® (SOS, 2011). Dados utilizados como base para avaliação da alteração desses parâmetros ao longo do tempo, até a data do presente trabalho.

Quanto aos estudos sedimentológicos na bacia do rio Acre, organizando em ordem cronológica, destacam-se os estudos de geoquímica e geocronologia feitos por Benchimol e Kronberg (1992), em amostras de sedimentos e fósseis encontrados na bacia do rio Acre e rio Purus, no trabalho os autores analisaram os elementos traço: Cr, Rb, Sr, Y, Zr, Nb e Ba e constataram, também, que os sedimentos dessa região são compostos principalmente por óxidos de Alumínio (Al) e Silício (Si), predominantemente presentes como quartzo e caulinita. Além de identificar complexos de argilas, feldspato, hematita, goethita, calcita, siderita, aragonita e gesso como constituintes traços, na seguinte ordem de abundância  $\text{SiO}_2 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{MgO}$ .

Mascarenhas *et al.* (2004) analisaram a concentração de mercúrio (Hg) em sedimentos e material particulado, em amostragem feita no rio Acre na fronteira com



a Bolívia (nas cidades acreanas Assis Brasil e Brasiléia) e em afluentes do rio Acre (igarapés Quixadá, Santa Cruz, Queimada, Preto e Nazaré), no estudo foram observados valores variando entre 0,067 e 0,088  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de Hg, e nos afluentes do rio Acre, encontrou valores variando entre 0,068 e 0,220  $\mu\text{g.g}^{-1}$  de Hg.

Já Viana (2005) estudou mineralogia dos sedimentos de praia do rio Acre, coletados nas cidades de Assis Brasil, Brasiléia, Xapuri, Rio Branco e Porto Acre, e verificou serem formados principalmente por quartzos, esmectita, feldspatos e biotitas, na ordem  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} > \text{TiO}_2$ . A autora quantificou ainda os elementos traço: Cr, Cu, Pb e Zn.

Num estudo de caracterização físico-química da água e química e mineralógica dos sedimentos do lago do Amapá, lago formado a partir de um meandro do rio Acre, Carvalho (2006), coletou amostras de água, material em suspensão e sedimentos do lago do Amapá e do rio Acre, encontrando concentrações de mercúrio de 0,0059 e 0,0055 ppm em amostras de água do lago do Amapá e 0,011 ppm no rio Acre. Em amostras de material em suspensão, concentrações de 0,071 e 0,072 ppm no lago do e 0,091 ppm no rio. Na análise química do material em suspensão, evidenciou que os sedimentos adsorvem, principalmente, em ordem decrescente, Fe, Al, Mg, Mn, Se, Sn e Na. Quanto a mineralogia, encontrou sedimentos finos siltico-argilosos com granulometria média de 6  $\mu\text{m}$ , constituídos de quartzo, argilominerais (illita, caulinita e esmectita), albita e K-feldspato.

Outro destaque importante, é o trabalho de Santos (2013a) que identificou interferências na bacia do Igarapé Judia, importante afluente do rio Acre, através da medida de produção de sedimentos nas vertentes, concentração de sedimentos em suspensão, evolução do uso e ocupação da terra, além de ter realizado caracterização biogeoquímica do solo e água. Nas análises mineralógicas feitas no estudo, o autor identificou presença dos minerais caulinita e presença de goethita, illita e quartzo em pequenas proporções.

Em um estudo de morfometria de sedimentos e análise granulométrica, do leito do rio Acre, feito por Lucio *et al.* (2020) referentes ao transporte de sedimentos, revelou variação de 68,71  $\mu\text{m}$  a 94,69  $\mu\text{m}$  nos valores de diâmetro médio dos sedimentos em amostras coletadas em Rio Branco. Os autores constataram a ocorrência da redução do diâmetro ao longo do curso do rio, característico da perda de massa ocorrida pelo desgaste durante o processo de transporte.

Já em um estudo de vulnerabilidade da bacia do rio Acre aos eventos climáticos, Sena *et al.* (2012) ressaltam a influência das atividades humanas e diferentes usos da terra na bacia, impactando diretamente na qualidade da água e degradação ambiental dessa área.

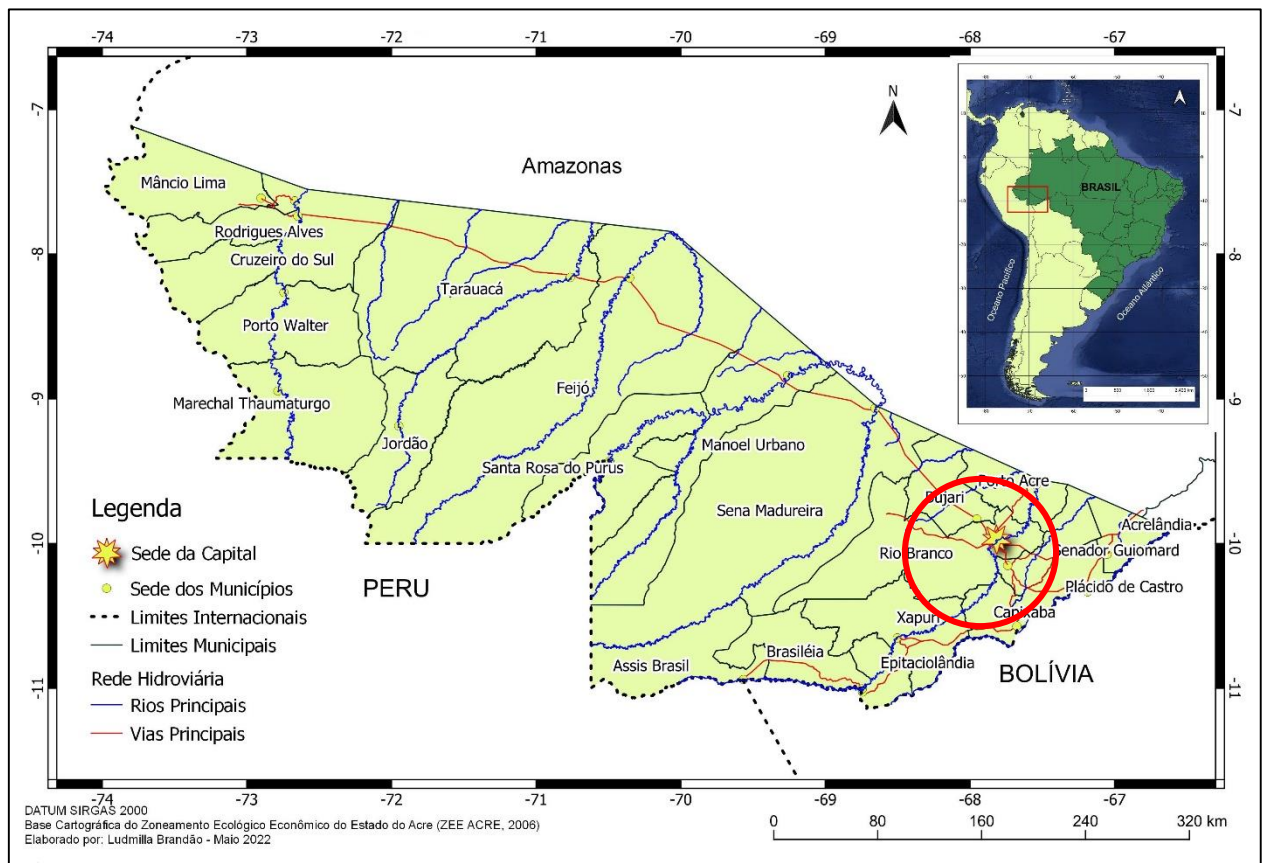
Estes trabalhos realizados anteriormente, servirão como subsídio para análise da situação atual do rio Acre, principalmente no trecho urbano do rio, na cidade de Rio Branco. É importante ressaltar que está previsto no Plano Estadual de Recursos Hídricos - PLERH/AC (SEMA, 2012), a aderência ao Programa Nacional de Avaliação da Qualidade das Águas – PNQA lançado pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA, que busca ampliar o conhecimento sobre a qualidade das águas superficiais no Brasil para orientar a elaboração de políticas públicas. Dentro das ações propostas neste programa está a implementação de um ponto de monitoramento que realize análise de alguns parâmetros físico-químicos, com relatório de monitoramento de sedimentos, por exemplo, mas que não faz análise da natureza química do sedimento. Justifica-se assim a necessidade de trabalhos desenvolvido nesta temática, visto que ainda são escassos.

## 2 CAPÍTULO: MATERIAIS E MÉTODOS

### 2.1 Localização e Aspectos Fisiográficos

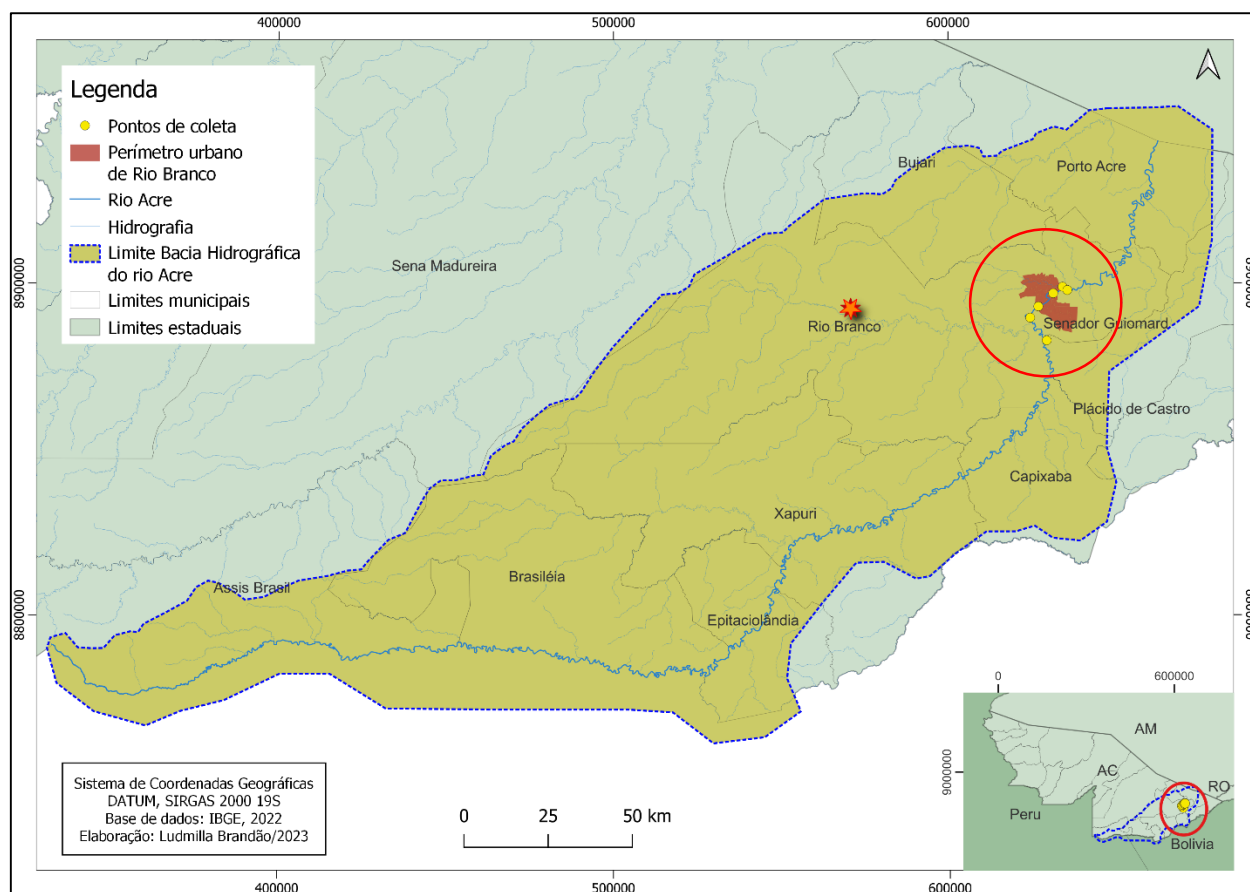
O local de estudo dessa pesquisa, é um trecho de 25 km do rio Acre na cidade de Rio Branco (Figura 01). A Bacia do Rio Acre (Figura 02) é uma microbacia da Bacia Hidrográfica Amazônica, pertence a sub-bacia “Solimões-Purus-Coari”, que por sua vez, pertence a grande Bacia Amazônica (DUARTE, 2007). A BH Amazônica ocupa uma área de aproximadamente 6 milhões de km<sup>2</sup> e se estende por sete países: Colômbia, Bolívia, Equador, Guiana, Peru, Venezuela e Brasil, onde ocupa uma área equivalente à 45% do território nacional brasileiro (ANA, 2015). Já a BH do Rio Acre é uma bacia trinacional (Peru, Brasil e Bolívia) e binacional (Acre e Amazonas), ocupando uma área de mais de 27.000 km<sup>2</sup> em território acreano (ACRE, 2012).

**Figura 01:** Mapa Geopolítico do estado do Acre



Fonte: Autora (2022)

**Figura 02:** Localização da BH do Rio Acre.



Fonte: Autora (2023)

A rede de drenagem fluvial da BH do Rio Acre é formada pelo rio Acre e seus afluentes (Rio Xapuri e Riozinho do Rola), é caracterizada por rios sinuosos e volumosos, escoando suas águas no sentido de Sudoeste para Nordeste, e por estreitas planícies fluviais de deposição de sedimentos retirados das margens (ACRE, 2012).

Na classificação de corpos d'água, estabelecida pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente – CONAMA 357/2005 o rio Acre é enquadrado como um rio de classe número 3 (ACRE, 2012), cujas finalidades são o abastecimento para consumo humano, após tratamento convencional ou avançado, irrigação de culturas arbóreas, cerealíferas e forrageiras; pesca amadora, recreação de contato secundário e dessedentação de animais (BRASIL, 2005).

#### Quadro 04: Geologia, Geomorfologia e Pedologia do Estado do Acre

<b>Relevo</b>	Formado por rochas sedimentares, que formam uma plataforma regular que desce suavemente em cotas da ordem de 300m nas fronteiras internacionais para pouco mais de 110m nos limites com o Estado do Amazonas
<b>Vegetação</b>	Vegetação natural composta basicamente de florestas, divididas em dois tipos: Tropical Densa e Tropical Aberta
<b>Clima</b>	Equatorial. Quente e úmido, caracterizado por altas temperaturas, elevados índices de precipitação pluviométrica e alta umidade relativa do ar
<b>Temperatura</b>	Média anual em torno de 24,5 °C, a máxima em torno de 32°C
<b>Hidrografia</b>	Formada pelas bacias hidrográficas do Juruá e do Purus, afluentes da margem direita do rio Solimões, padrão de drenagem dendrítico
<b>Regiões Políticas</b>	Seguem a distribuição das bacias hidrográficas dos principais rios acreanos: Alto Acre, Baixo Acre, Purus, Tarauacá/Envira e Juruá.
<b>Geologia</b>	Unidade Geotectônica: Bacia do Acre – Formada por material sedimentar pouco consolidado de idade cenozoica onde predominam rochas maciças do tipo argilitos sílticos e siltitos ou rochas finamente laminadas com concreções carbonáticas e gipsíticas e arenitos finos, micáceos, e níveis ou lentes com matéria vegetal carbonizada, em geral fossilíferos
<b>Geomorfologia</b>	O estado é dividido em nove unidades geomorfológicas: a Planície Amazônica, a Depressão do Endimari-Abunã, a Depressão do Iaco-Acre, a Depressão de Rio Branco, a Depressão do Juruá-Iaco, a Depressão do Tarauacá-Itaquai, a Depressão Marginal à Serra do Divisor, a Superfície Tabular de Cruzeiro do Sul e os Planaltos Residuais da Serra do Divisor
<b>Solos</b>	Os principais solos do Acre, em ordem decrescente de expressão territorial, são: Argissolos, Cambissolos, Luvissolos, Gleissolos, Latossolos, Vertissolos, Plintossolos E Neossolos.

Fonte: Zoneamento Ecológico Econômico do Estado do Acre – ACRE, (2010).

O rio Acre apresenta um perfil longitudinal de meandros, com alguns trechos de forma retilínea, chamados de estirões. “A morfometria e morfologia das sub-microbacias, em particular daquelas pertencentes à área urbana, lhes conferem um caráter de sistema ambiental complexo” (DUARTE, 2007, p.8).

A principal unidade geomorfológica em Rio Branco é a Depressão Rio Branco, que se caracteriza por ter um padrão de drenagem angular. O relevo dissecado, com topos convexos, influencia na alta densidade de drenagem das bacias. Há pouca variação altimétrica, onde as cotas mínimas e máximas são 140 a 270m respectivamente. Quanto ao tipo de solo, predomina na região os Argissolos, considerados bastante suscetíveis à erosão, pois possuem uma drenagem moderada a baixa associados às condições de relevo mais movimentado (ACRE, 2010).

O rio Acre é classificado quanto à sua cor, em um rio de águas brancas (águas barrentas), apresentando elevados teores de material particulado em suspensão,

elevada turbidez, quantidade alta de eletrólitos e pH relativamente neutros (SIOLI, 1991).

A maior parte da fauna de peixes presente é composta pelas espécies *Serrapinnus gr. microdon* (lambari), *Otocinclus vittatus* (peixe limpa vidro), *Phenacogaster pectinatus* (piaba), *Brachyhalcinus copei* (matupiri) e *Knodus sp.* A abundância das espécies de pequeno porte na bacia é uma resposta direta aos impactos urbanos, as espécies de maior porte são substituídas por não conseguirem se adaptar aos habitats aquáticos fortemente alterados (GARCIA *et al.*, 2013).

## **2.2 Ocupação histórica da BH do rio Acre**

### **2.2.1 Os rios como vias de circulação**

Para entendermos o atual uso e ocupação do solo às margens do Rio Acre, na área urbana da cidade de Rio Branco, é fundamental conhecer o processo histórico que levou ao estabelecimento da cidade. Sabe-se que, na região amazônica, as cidades se desenvolveram ao longo dos rios, construindo com eles laços fortes (MORAIS *et al.*, 2015). Os rios da Amazônia serviram como vias naturais de acesso para os comerciantes (regatões *etc.*) e colonizadores da região (RESENDE; MACHADO, 1988), pois a navegação era o único meio de transporte viável à época, já que a falta de estradas impedia o acesso terrestre e a cobertura florestal densa da região dificultava o acesso aéreo (GUERRA, 1955).

No Acre, especificamente, o estabelecimento dos povoados e cidades estavam diretamente ligados à facilidade de escoamento da produção de borracha durante o chamado “ciclo da borracha”, período ligado à extração e comercialização da borracha natural obtida da Seringueira (*Hevea brasiliensis*) (GUERRA, 1955). Esse período ficou conhecido como “BOOM” da borracha, onde houve grande expansão da produção motivada pela descoberta da vulcanização e do pneumático, impulsionados pelo desenvolvimento da indústria automobilística. Período em que Amazônia brasileira reinou absoluta entre os produtores da borracha, dominando o mercado e estabelecendo os preços (OLIVEIRA, 2003).

A ocupação das terras no Acre teve aumento expressivo durante os ciclos da borracha. A migração de nordestinos ao Acre, a partir de 1877, momento histórico marcado por conflitos dos governos brasileiro e boliviano por controle sobre o território, que levou a integração do Acre ao território brasileiro com a assinatura do Tratado de Petrópolis em 1903 (UGALDE *et al.*, 2021). A ocupação das primeiras cidades, entre elas Rio Branco, surge como necessidade, a fim de assegurar o território que foi conquistado da Bolívia (MENDONÇA *et al.*, 2020).

Os primeiros grupos de migrantes nordestinos adentraram cada vez mais na bacia amazônica, chegando aos altos cursos e afluentes dos rios Purus e Juruá (GUERRA, 1955), por onde se escoava a produção, com dispersão para o meio da floresta em busca de novas seringueiras, por caminhos chamados de “varadouros”, que interligavam os seringais. As sedes dos barracões eram locais estrategicamente escolhidos às margens dos rios para facilitar o fluxo da produção e de mercadoria, realizado por via fluvial (MORAIS, 2000).

A ocupação do Estado do Acre, diferentemente de outros Estados da Amazônia, apresenta algumas particularidades [...] questões fundiárias históricas e as lutas que essas desencadearam, desde 1867, quando o governo do Império do Brasil assina o Tratado de Ayacucho, reconhecendo ser da Bolívia o antigo espaço que hoje pertence ao Estado do Acre (ACRE, 2010, p. 19).

O estabelecimento de povoamentos que posteriormente deram origem às cidades e principalmente as sedes administrativas nas margens dos rios foi característica forte na Amazônia e no Estado do Acre, principalmente no primeiro ciclo da borracha, ocorrido no final do século XIX e na primeira década do século XX (MENDONÇA, *et al.*, 2020).

Segundo Guerra (1955), na época, as margens mais habitadas eram as próximas aos rios Acre e Juruá, onde anos mais tarde nascem as maiores cidades do estado, Rio Branco e Cruzeiro do Sul. Nessa época o Brasil detinha a supremacia da borracha e a extração na região amazônica era estimulada com promessas de boa vida e acumulação de riquezas para os que se aventurassem por essas novas terras, de tal forma que quase todos os nordestinos que emigraram para o Acre neste período, o fizeram para trabalhar exclusivamente nos seringais.

Esse primeiro ciclo da borracha se estende até 1914, quando a introdução da “matéria-prima” de origem Asiática, encerra a competitividade econômica da borracha

amazônica no mercado internacional (OLIVEIRA, 2003). Com a decadência econômica decorrente da queda dos preços da borracha comercializada internacionalmente, os seringais faliram e novas atividades econômicas e comerciais apareceram (ACRE, 2010). Os núcleos populacionais já estabelecidos às margens do rio começaram a receber então os seringueiros e suas famílias, que foram deixando cada vez mais o isolamento dos seringais que eram localizados no meio da floresta

Um segundo momento de migração ocorre na década de 1940, no contexto da Segunda Guerra Mundial, momento em que surge nova demanda pela produção de borracha amazônica (MENDONÇA, et al., 2020), período conhecido como o segundo ciclo da borracha. A migração para a Amazônia era incentivada pelo governo federal, em um período de “efervescência da economia da borracha”; os seringueiros “chamados de ‘soldados da borracha’ se dirigiram a região sob intensa propaganda [do governo federal], como heróis que iriam contribuir para a vitória dos aliados e foram abandonados à própria sorte após a guerra” (OLIVEIRA, 2003, p. 5). Porém, após o fim da segunda guerra, a demanda internacional volta a cair, levando novamente ao declínio da produção e economia da região.

De acordo com Guerra (1955), dados do censo realizado no Acre mostram que após o período dos ciclos da borracha foi observado decréscimo populacional, explicado principalmente pela crise econômica. Permaneceram então aqueles grupos que já haviam se estabelecido na região, em aglomerados populacionais que posteriormente deram início ao nascimento das primeiras cidades acreanas.

A escassez da mão de obra levou ao emprego crescente das comunidades indígenas remanescentes nos seringais. Os comerciantes sírio-libaneses substituíram as casas aviadoras de Belém e Manaus na função de abastecer os barracões e manter ativos os seringais, e a população foi se estabelecendo na beira dos rios, dando origem a um segmento social tradicional do Estado, os ribeirinhos (ACRE, 2010, p. 20).

As populações que se fixaram às margens dos rios desenvolveram uma organização social própria, com relações sociais e econômicas baseadas nos rios como seu principal meio de transporte e de produção, “constituindo um tipo de população tradicional com estilo próprio na qual o rio tornou-se um dos elementos centrais de sua identidade” (ACRE, 2010, p. 20). Passam a ter a sua subsistência baseada na pesca e em pequenas lavouras, que são cultivadas inclusive às margens destes.

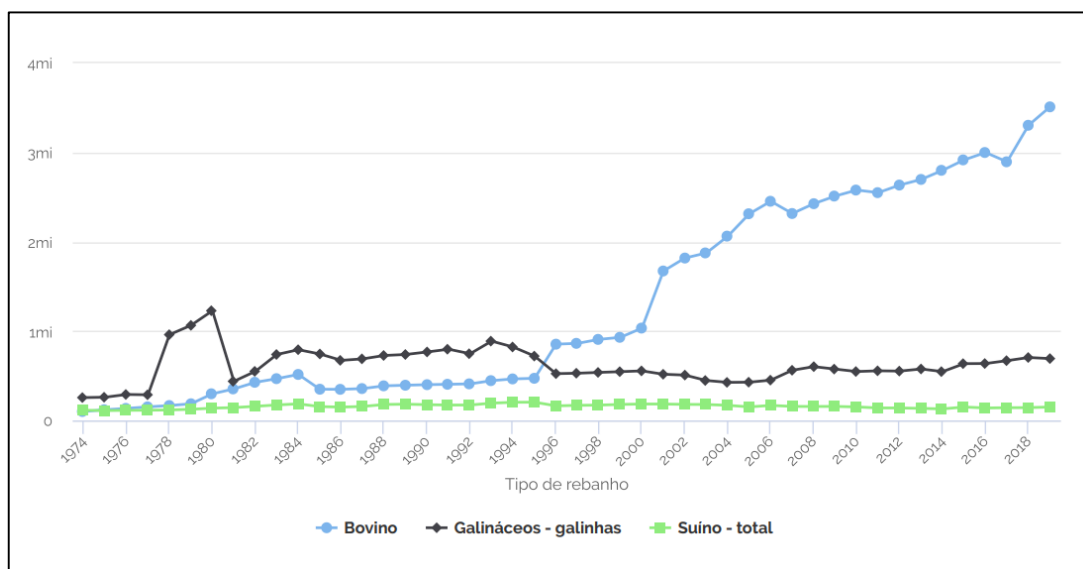


Em algumas áreas do rio, formam-se praias com sedimentos depositados no período da enchente para vazante, sedimentos constituídos de minerais ricos em nutrientes (concentrações elevadas de P, Mg, Ca e K) utilizados para agricultura de subsistência (VIANA, 2005). Guerra (1955) observa que as áreas do leito maior do rio Acre eram aproveitadas para as “culturas de praia”, como o feijão por exemplo.

Muitos seringueiros permaneceram nos seringais até a década de 70, quando acontece a terceira onda migratória, decorrente da expansão agropecuária impulsionada por políticas de desenvolvimento regional do governo federal brasileiro (FARIAS *et al.*, 2010) a partir do Programa de Integração Nacional (PIN), Programa de Polos Agropecuários e Agroindustriais da Amazônia, e construção da BR-364.

Desde o início dos anos 70 a pecuária no Acre cresceu em ritmo acelerado, principalmente a partir do início da década de 90 (Figura 03). Na Pesquisa da Pecuária Municipal (PPM) de 2022 foi contabilizado um efetivo de rebanho bovino de 4.635.381 “cabeças” (IBGE, 2022) no estado do Acre.

**Figura 03:** Efetivo de Rebanhos no Acre, série histórica 1974-2019.



Fonte: PPM/IBGE (2022.)

A expansão da fronteira agropecuária foi marcada pelo desmatamento da floresta e pressões contra os povos que habitavam as florestas (e seringais) levando a expulsão destes para as cidades. A violência instaurada nos seringais ocupados agora pelos empresários do centro sul do país, culminou na crise dos seringais

amazônicos e refletiu diretamente na urbanização da cidade de Rio Branco, grandes bairros começaram a se formar e outros que já existiam cresceram rapidamente na área periférica da cidade de Rio Branco, com ocupações irregulares, sem acesso aos serviços básicos como energia, água potável e esgoto sanitário (FARIAS *et al.*, 2010).

### 2.2.2 Rio Branco às margens do rio Acre

O povoamento que deu origem a cidade de Rio Branco remonta “ao final do século XIX, seguindo o contexto da extração do ‘ouro negro’, o leite da seringa, que desbravou estas terras para o mundo” (MENDONÇA *et al.*, 2020, p. 1323). A instituição da cidade de Rio Branco é feita em 1904 como sede do Departamento do Alto Acre, no antigo Território Federal do Acre.

A cidade de Rio Branco está localizada onde antigamente era o seringal Empresa, fundado por Neutel Maia em 1882. “A sede do seringal foi estabelecida na margem esquerda do rio Acre, porém a futura cidade começaria a se desenvolver na margem oposta” (GUERRA, 1955, p. 126). De acordo com Guerra (1955), em Rio Branco as áreas mais próximas das margens não eram ocupadas com instalações humanas por conta do forte declive e pelas inundações que ocorriam na época de cheia do rio Acre

Desde o início da colonização pelos seringueiros, há registros de grandes flutuações do nível da água dos rios, a rede de drenagem perene do Alto Acre e a baixa permeabilidade dos solos na região (solos rasos e atividade argilosa alta), dificulta a infiltração de água, grandes volumes de precipitação saturam com facilidade o solo e torna todo o sistema ineficiente na regulação dos fluxos de água, levando à inundações e causando aceleração dos processos de erosão do solo (RESENDE; MACHADO, 1988).

Sobre a morfologia dessa área, é observado que “a cidade de Rio Branco, ocupa uma zona de terraços ao longo dos meandros encaixados do rio Acre, sendo de topografia ondulada” (GUERRA, 1955, p. 126). De acordo com o autor, por conta desses aspectos, a topografia da cidade de Rio Branco difere de outras como Sena Madureira e Xapuri, onde os terraços são mais planos e uniformes.

Em Rio Branco a paisagem ondulada foi modelada principalmente pelo afundamento do rio Acre, cujo encaixamento é acentuado e divide a cidade em duas partes (GUERRA 1955).

Ressalta-se aqui a importância do relevo como agente condicionante do estabelecimento dessas populações às margens do rio Acre, “como um dos componentes do meio natural, as feições geomorfológicas se constituem em importante elemento para o desenvolvimento de civilizações, servindo-lhe como lócus de ocupação” (CORREIA; GIRÃO, 2004, p. 36). São as características do relevo que vão direcionar o desenvolvimento de atividades econômicas, o melhor lugar para construção de moradias e o melhor lugar para o desenvolvimento da agricultura.

A migração campo-cidade dos seringueiros, índios, posseiros e ribeirinhos foi elevada, principalmente para Rio Branco. Esse processo favoreceu a expansão da malha urbana. Essa reestruturação do espaço foi construída sob uma nova dinâmica, caracterizada pela ausência de planejamento e ações do Estado, que não apresentara medidas necessárias para atender às demandas naquele momento. Neste cenário, a cidade passou a ser construída através de moradias extremamente precárias, com deficiência da infraestrutura básica e dos equipamentos de consumo coletivos, a maior parte dos bairros estavam situados em margens de igarapés e do rio Acre, locais suscetíveis a deslizamentos de terras e enchentes. (MENDONÇA, et al., 2020, p. 1326).

O processo de urbanização implicou na substituição cada vez mais intensa da vegetação natural das margens (matas ciliares) pelas construções e moradias (maioria irregulares) (ARCOS et al., 2012). Em Rio Branco, “as primeiras instalações [...] resumia-se ao conjunto de casario às margens do rio Acre e, nesse sentido, o rio funcionava como o orientador do traçado das ruas” (MENDONÇA, et al., 2020, p. 1324).

Com a retirada da vegetação, o solo ficou exposto, o que, somado à alta pluviosidade da região, iniciou um processo de erosão nessas áreas (ARCOS et al., 2012). A dinâmica geomorfológica do rio Acre, “muito comum e visível, está ligada ao deslizamento das margens do rio, o que obedece às variações de regime fluvial de cheias e vazantes e ocasiona o assoreamento” (DUARTE, 2007, p. 8).

As inundações anuais contribuem para acelerar o processo erosivo, conforme ressalta Moraes et al., (2015) essas enchentes não são apenas desastres naturais, mas também sociais e os principais atingidos são as populações mais pobres que vivem às margens dos rios e igarapés.

Conforme Farias et al. (2010) explicam, a estratégia para mitigar os prejuízos do fracasso na atividade extrativista resultou, em urbanização da região expandida, com a criação das seguintes colônias: Juarez Távora, Dia Martins, Alberto Torres, Daniel de Carvalho, Mâncio Lima, São Francisco, Apolônio Sales, Cecília Parente e Souza Ramos. Lugares que hoje são bairros da periferia de Rio Branco.

Com o estabelecimento das famílias em ambas as margens do rio Acre, os núcleos urbanos deram origem mais tarde aos bairros: 6 de Agosto, Cidade Nova, Base, Preventório, entre outros, que estão localizados em áreas de inundação e com risco de deslizamento das margens por conta da erosão do solo. Esses bairros têm sua origem ligada à essas ocupações irregulares, feitas por grupos em vulnerabilidades econômica e até hoje são constantemente afetados pelas inundações em época de cheia do rio (Figura 04), além de serem carentes em estruturas urbanísticas como rede de drenagem de esgoto por exemplo.

**Figura 04:** Enchente do rio Acre na cidade de Rio Branco em 2024.



A) 05/03/2024 - Foto de Pedro Devani ® /Secom; B) 05/03/2024 - Foto de Marcos Vicenti ® /Secom. Fonte: Jornal Agência Brasil (2024).

A produção do Espaço Urbano em Rio Branco, no que diz respeito ao processo de formação, com foco na organização espacial feita pela sociedade (construída por múltiplas identidades, indígenas, nordestinos, seringueiros, ribeirinhos), permite que se faça uma leitura do espaço geográfico a partir da análise social (humana – conflitos sociais), bem como da análise ambiental (física – características geomorfológicas) para assim compreender a vulnerabilidade hídrica do rio Acre quanto à interferência antrópica em suas margens.

Entende-se que os aspectos geomorfológicos do solo associados à dinâmica morfológica do rio Acre influenciaram tanto a ocupação das margens na época dos fluxos migratórios, quanto mais tarde no ordenamento da cidade, quando o crescimento natural da cidade exigiu a implementação de obras viárias que deveriam considerar então a susceptibilidade do solo à erosão, e os limites dos terraços fluviais inundáveis.

## **2.3 Procedimentos metodológicos**

### **2.3.1 Amostragem**

A preparação para realização das coletas levou em consideração, as observações em campo para avaliação do local (Figura 05), as características de ocupações nas margens (Figura 06), existência de lançamentos de efluentes, o período de descarga fluvial mínima, além da sensibilidade da coleta para amostragem de metais pesados.

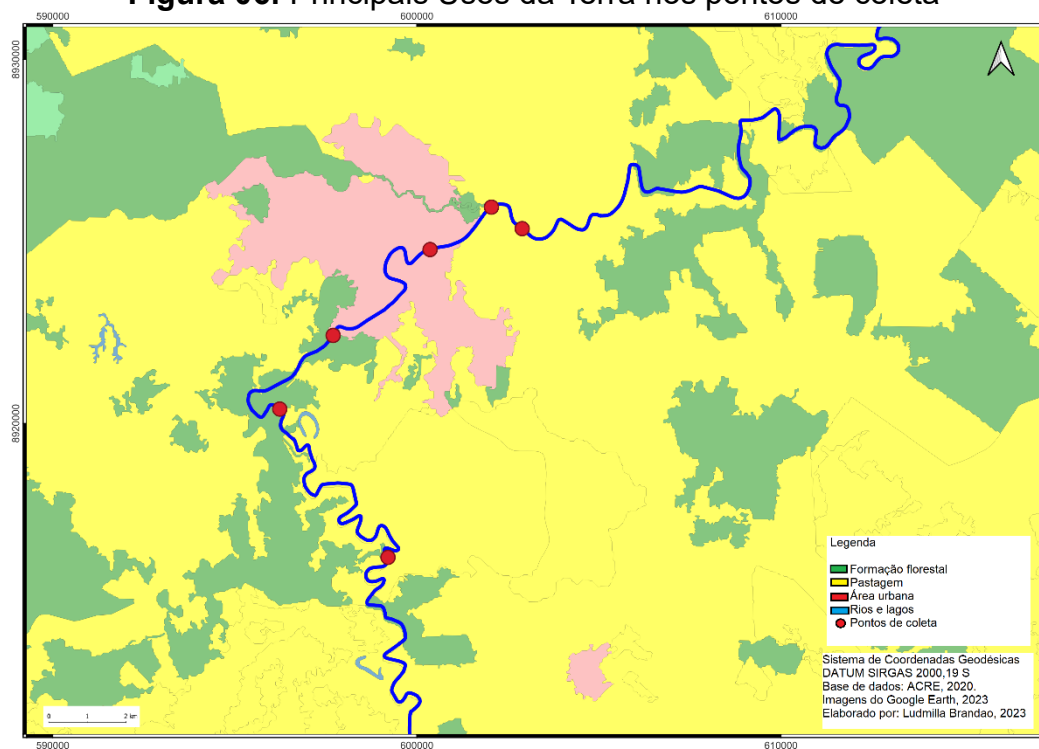


**Figura 05:** A) Centro da cidade, próximo à passarela Joaquim Macedo. B) Margem direita do rio, no Centro Histórico Quixadá



Fonte: Autora (2022).

**Figura 06:** Principais Usos da Terra nos pontos de coleta



Fonte: ACRE (2020). Elaboração: Autora (2023).

### 2.3.1.1 Coletas

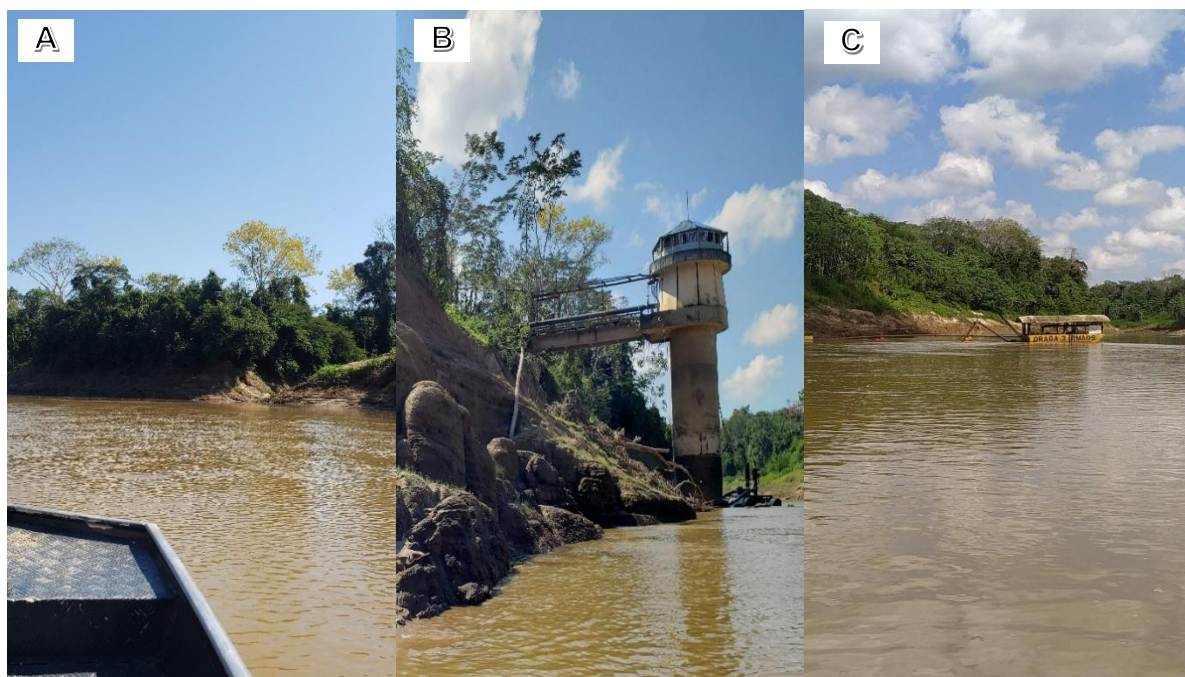
Foram realizadas em um trecho urbano do rio Acre, na cidade de Rio Branco, localizado em um trecho de aproximadamente 25 km de distância. Foram selecionados 6 setores de amostragem com base na presença de vegetação, de construções, descarga de efluentes e captação de água para consumo (Tabela 02 e Figura 07).

**Tabela 02:** Localização e descrição dos pontos de coleta

Ponto	Setor	Margem	Descrição do local	Latitude	Longitude
P1	A	Esquerda	Dragagem - A montante do Riozinho do Rola	10°4'1"S	67°51'3"O
P2	A	Direita	Dragagem - A montante do Riozinho do Rola	10°3'59"S	67°51'4"O
P3	B	Esquerda	Dragagem - Foz do Riozinho do Rola	10°2'37"S	67°52'18"O
P4	B	Direita	Dragagem - A jusante do Riozinho do Rola	10°2'38"S	67°52'16"O
P5	C	Esquerda	Captação de água - ETA (4° Ponte)	10°0'29"S	67°50'21"O
P6	C	Direita	Captação de água - ETA (4° Ponte)	10°0'27"S	67°50'21"O
P7	D	Esquerda	"Catraia 6 de Agosto" - Foz Canal da Maternidade (efluente)	9°58'31"S	67°48'10"O
P8	D	Direita	Foz Canal da Maternidade - A montante do Igarapé Judia	9°58'30"S	67°48'11"O
P9	E	Esquerda	Foz do Igarapé São Francisco	9°57'26"S	67°46'36"O
P10	E	Direita	A jusante do Igarapé Judia	9°57'25"S	67°46'37"O
P11	F	Esquerda	A jusante do Igarapé São Francisco	9°57'56"S	67°46'0"O
P12	F	Direita	"Quixadá" - A jusante do Igarapé São Francisco	9°57'54"S	67°45'59"O

Fonte: Autora (2023)

**Figura 07:** A) Foz do Igarapé Judia. B) Captação de Água para Abastecimento Público, ETA – 4ª ponte. C) Dragagem de areia no rio Acre.



Fonte: Autora (2022)

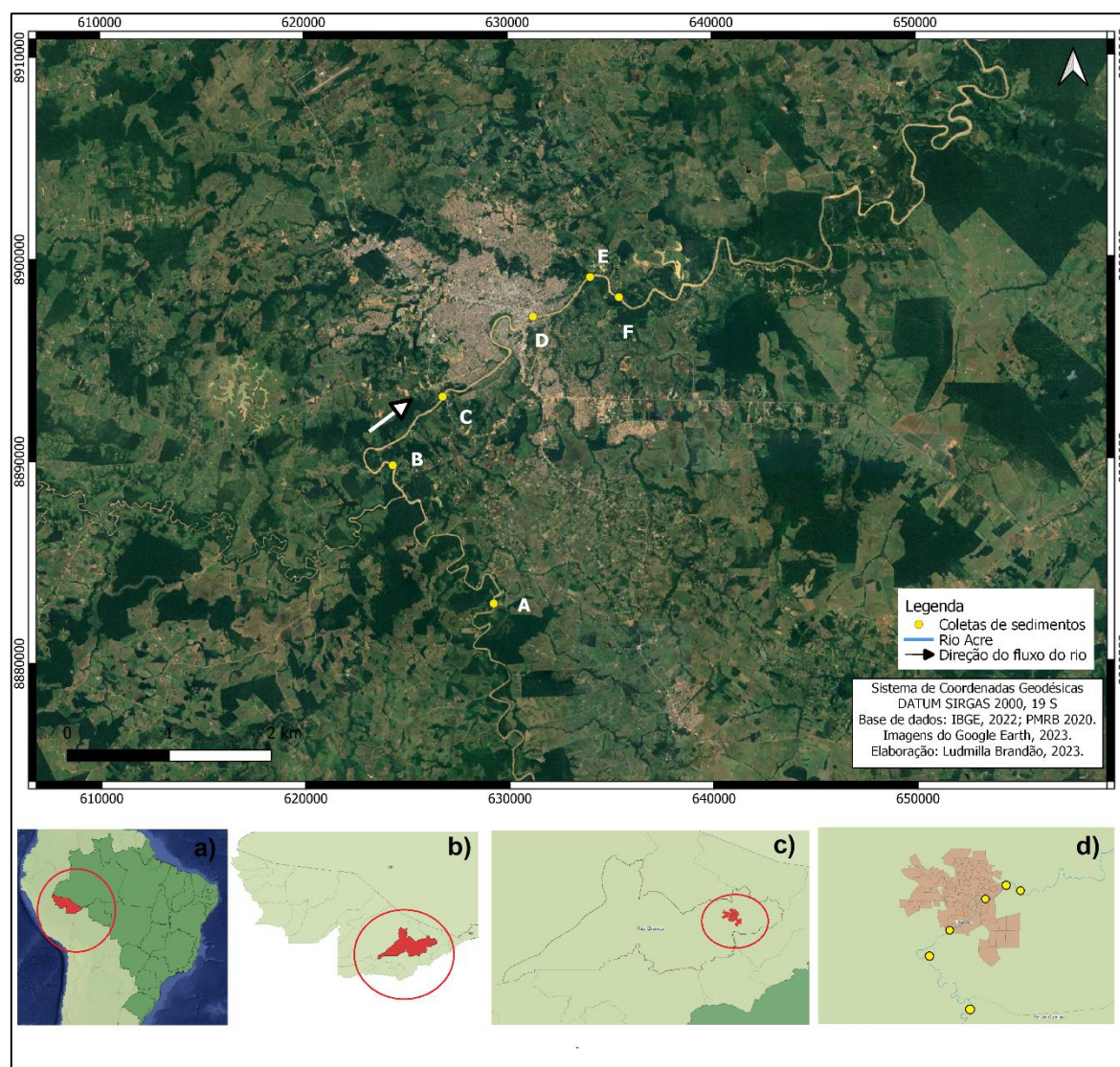
A coleta foi feita próxima às margens esquerda e direita do rio em cada um dos 6 setores de amostragem, totalizando 12 amostras coletadas de água e 12 amostras de sedimento. Para a coleta de amostras desta pesquisa, selecionou-se, pontos à montante da área urbanizada (setor A e B), na área urbanizada (setor C e D) e após a área urbanizada (setor E e F) (Figura 8).

As amostras foram processadas no laboratório de Geomorfologia e Sedimentologia (LAGESE-UFAC) e analisadas no laboratório de físico-química da Unidade de Tecnologia de Alimentos (UTAL-UFAC).

Na coleta de amostras de água utilizou-se frasco NALGON de 500mL previamente limpo com solução de  $\text{HNO}_3$  10%, e imediatamente transferindo para caixa térmica com gelo, coletadas a uma distância de aproximadamente 50 cm da margem e 20 cm de profundidade, na lâmina d'água em contato com o sedimento. A temperatura da água foi medida no momento da coleta em campo.



**Figura 08:** Mapa de Localização dos setores de amostragem e pontos de coleta



a) Localização do estado do Acre no Brasil; b) localização da cidade de Rio Branco no Acre; c) localização do perímetro urbano de Rio Branco; d) Localização dos pontos de coleta em relação a área urbanizada de Rio Branco. Fonte: Elaboração autora (2023)

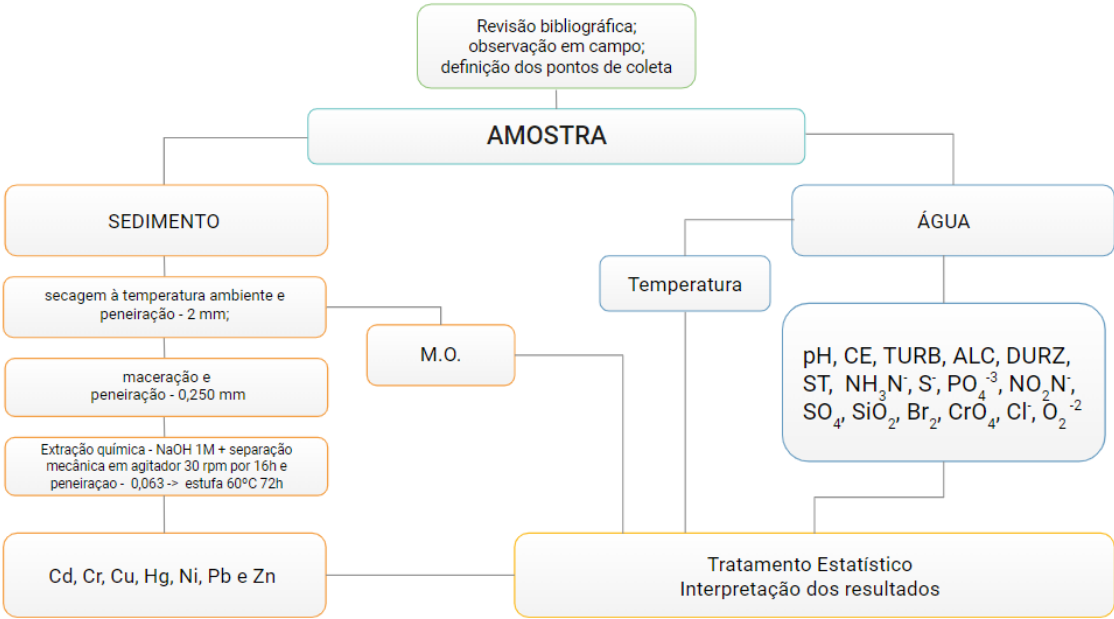
Conforme orientação do Manual de Procedimentos de Coleta de Amostras em Áreas Agrícolas Para Análise da Qualidade Ambiental - Solo, Água e Sedimentos: As coletas de sedimento devem ser feitas por meio de coletores constituídos por tubo de aço inox ou PVC (policloreto de vinila) ou por coletores tipo “garra” (mini dragas) (EMBRAPA, 2017).

Na ausência de coletores de aço inoxidável, optou-se por utilizar artefato de PVC manufaturado em laboratório baseando-se na metodologia orientada pela Embrapa (2017) e utilizada em trabalhos como o de Lima et al. (2001) e Santos et al.

(2013). Assim, imediatamente após a coleta de água, foi realizada coleta da amostra de sedimento, utilizando o cano de PVC de aproximadamente 50 cm, previamente submetido à limpeza com a solução de ácido nítrico. Inseriu-se o cano pvc até a submersão total no sedimento de fundo do rio, transferindo a amostra coletada para saco plástico, as amostras foram transportadas sob refrigeração até o laboratório.

Os procedimentos metodológicos estão organizados no fluxograma de procedimento (Figura 09) e as metodologias de análise, descritas na tabela 03. Todos os mapas foram elaborados usando o programa QGIS ( v. 3.22.8 - “Białowieża”; QGIS Development Team, 2022).

Figura 09: Fluxograma dos procedimentos analíticos



Fonte: Autora (2024).

Tabela 03: Metodologias de análise aplicadas

Parâmetro	Espécie	Método	APHA	Princípio do método
ANÁLISE EM ÁGUA				
Alcalinidade	HCO <sub>3</sub> ,OH,CO <sub>3</sub>	Titulometria	-	Titulação: neutralização com H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>
Amônia	NH <sub>3</sub> N <sup>-</sup>	Espectrofotometria	4500	ASTMD 1426 – 93: reagente Nessler
Bromo	Br <sub>2</sub>	Espectrofotometria	-	DDPD (N,N-dietil-p-fenilendiamina)
Cloreto	Cl <sup>-</sup>	Espectrofotometria	4500	-
Condutividade	Íons	Potenciometria	-	Condutímetro
Dureza	CaCO <sub>3</sub>	Titulometria		Titulação com EDTA 0,01
Fosfato	PO <sub>4</sub> <sup>-3</sup>	Espectrofotometria	4500	ASTMD515.82:Molibdovanadofosfórico

Nitrito	NO <sub>2</sub> N <sup>-</sup>	Espectrofotometria	4500	ASTM D 3867-90
Peróxido	H <sub>2</sub> O <sub>2</sub>	Espectrofotometria	-	Método DDPD
pH	-	Potenciometria	-	Método potenciométrico (pHmetro)
Sílica	SiO <sub>2</sub>	Espectrofotometria	4500	USEPA 370.1; ASTM D859-94
Sólidos Totais	-	Gravimetria	-	Resíduo por evaporação
Sulfato	SO <sub>4</sub>	Espectrofotometria	4500	USEPA 375.4
Sulfeto	S <sup>-</sup>	Espectrofotometria	4500	EPA, method 376.2
Temperatura	-	Termometria	-	Método termométrico
Turbidez	-	Fotometria	-	Método nefelométrico (turbidímetro)
<b>ANÁLISE EM SEDIMENTO</b>				
Cádmio	Cd	ICP/OES	3050	EPA SW 846
Cromo	Cr	ICP/OES	3050	EPA SW 846
Cobre	Cu	ICP/OES	3050	EPA SW 846
Mercúrio	Hg	ICP/OES	7471	EPA SW 846
Níquel	Ni	ICP/OES	3050	EPA SW 846
Chumbo	Pb	ICP/OES	3050	EPA SW 846
Zinco	Zn	ICP/OES	3050	EPA SW 846
M.O.	-	Gravimetria	-	Resíduo por incineração em mufla

APHA: American Public Health Association - Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater; ICP-OES: Espectrometria de Emissão Ótica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplado; M.O.: Matéria orgânica. Organização: Autora (2023)

## 2.4 Tratamento estatístico

### 2.4.1 Estatística univariada

O tratamento estatístico descritivo foi realizado utilizando o *software Microsoft Excel/2016*: média, dispersão (desvio), mediana, máximo, mínimo e variância, com a finalidade de descrição das propriedades estatísticas, organização e classificação dos dados utilizados. Para apresentação gráfica desse sumário, foi elaborado gráficos e tabelas, optou-se por utilizar gráfico do tipo *boxplot*: Gráfico retangular, composto por linha central (mediana), distância interquartílica (diferença entre o quartil inferior Q1 (25%) e o quartil superior Q3 (75%)), máximo e mínimo, esses limites são considerados valores de referência, valores acima ou abaixo são considerados *outliers* (LARSON, FARBER, 2010; TRIOLA 2017).

Em estudos geoquímicos o diagrama de extremos e quartis permite detectar com facilidade valores discrepantes (*outliers*) e assimetrias na distribuição dos dados (LITCH, 1998).

#### 2.4.2 Estatística multivariada

A estatística multivariada foi utilizada para correlacionar os vários elementos investigados ao mesmo tempo, todos os testes foram feitos através do programa Rstudio® (v. 4.3.2, 2023). Antes da escolha do teste estatístico, foram verificados os pressupostos de normalidade da amostra, com a aplicação do teste de *Shapiro-Wilk*, mais indicado para o tamanho amostral desta pesquisa.

Teste de *Shapiro-Wilk* é um método de verificação da distribuição de uma amostra, quanto à normalidade à nível de significância ( $\alpha$ ) de 0,05, o teste verifica as diferenças entre os valores observados e os valores esperados a partir de uma hipótese de normalidade do conjunto de dados, assim quando  $p\text{-valor} > 0,05$  aceita-se a hipótese nula  $H_0$  de que estes dados apresentam uma distribuição normal, e se  $p\text{-valor} < 0,05$ , rejeita-se  $H_0$  e aceita-se a hipótese alternativa  $H_1$  de que seja uma distribuição não normal (LARSON, FARBER, 2010; PALACIO et al 2020).

A quantificação do grau de associação entre duas variáveis foi realizada através do teste de correlação de *Pearson* para amostras com distribuição normal e teste de correlação de *Spearman* para amostra com distribuição livre (não normal)

Tanto o coeficiente de correlação de *Pearson* quanto o de *Spearman*, medem o grau de relação linear entre duas variáveis, quantificando numericamente o nível de relação entre as variáveis e a influência ou não de uma sobre outra (LITCH 1998). A partir do coeficiente é construída uma matriz de correlação  $r$ , com valores entre -1 (negativa) e 1 (positiva), de maneira que, quanto mais próximo de 0, menos correlação existe entre as variáveis (MORETTIN, BUSSAB, 2010; TRIOLA, 2017). Considera-se uma boa correlação valores de  $r > 0,70$  e uma correlação fortemente negativa valores de  $r < -0,70$ .

A partir das correlações verificadas, foram aplicadas as análises de PCA e Cluster. A Análise de Componente Principal (PCA, *Principal Component Analysis*), é uma análise exploratória dos dados, utilizada para reduzir a quantidade de variáveis a um número menor (componentes principais).

A PCA permite que sejam verificadas similaridades tanto das variáveis (elementos químicos) quanto dos pontos de amostragem simultaneamente, é portanto, capaz de identificar relações entre os elementos e como estas representam

a área de estudo, é de grande utilidade para identificar possíveis influências das características ambientais na distribuição dos elementos (PALACIO et al 2020).

As variáveis categóricas são transformadas em numéricas, que expressam essas informações como um conjunto de novas variáveis ortogonais, a representação é feita em gráfico de duas dimensões, onde variáveis correlacionadas positivamente apontam para o mesmo lado do gráfico e variáveis correlacionadas negativamente apontam para lados opostos (PALACIO et al 2020).

Os valores de todas as amostras com todas as variáveis são colocados em um sistema de  $n$  eixos que produz um espaço de  $n$  dimensões, cada eixo (fator ou componente principal) contém ou explica uma parte da variância total do grupo de dados considerado, com os fatores ordenados em uma série decrescente, de acordo com a porcentagem da variância total que cada um explica (LITCH, 1998).

A Análise de Agrupamentos ou Análise de *Cluster*, agrupa os dados com base na proximidade mútua ou similaridade, neste trabalho foi feita através do método aglomerativo hierárquico "*Ward*", utilizando a medida de proximidade calculada a partir de distâncias euclidianas, a representação gráfica foi feita através do diagrama do tipo árvore - dendograma (PALACIO et al 2020).

As técnicas estatísticas multivariada permitem avaliar fenômenos geológicos a partir da compreensão de que são resultados de diversos fatores, assim, as análises de vários elementos químicos e suas correlações, permite fazer associações com o contexto geológico de formação, e até determinar áreas fontes de minerais (LITCH 1998; VALERIO, 2022).

### 3 CAPÍTULO: RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Caracterização Geoquímica – Sedimentos

##### 3.1.1 Análise estatística descritiva

A estatística descritiva univariada (moda, mediana, mínimo, máximo, média, desvio padrão, primeiro quartil e terceiro quartil) foi calculada através do *software RStudio®*. A tabela 04 apresenta os valores da análise estatística dos elementos quantificados no sedimento de fundo do rio Acre onde as variáveis analisadas foram Cádmio (Cd), Cromo (Cr), Cobre (Cu), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn).

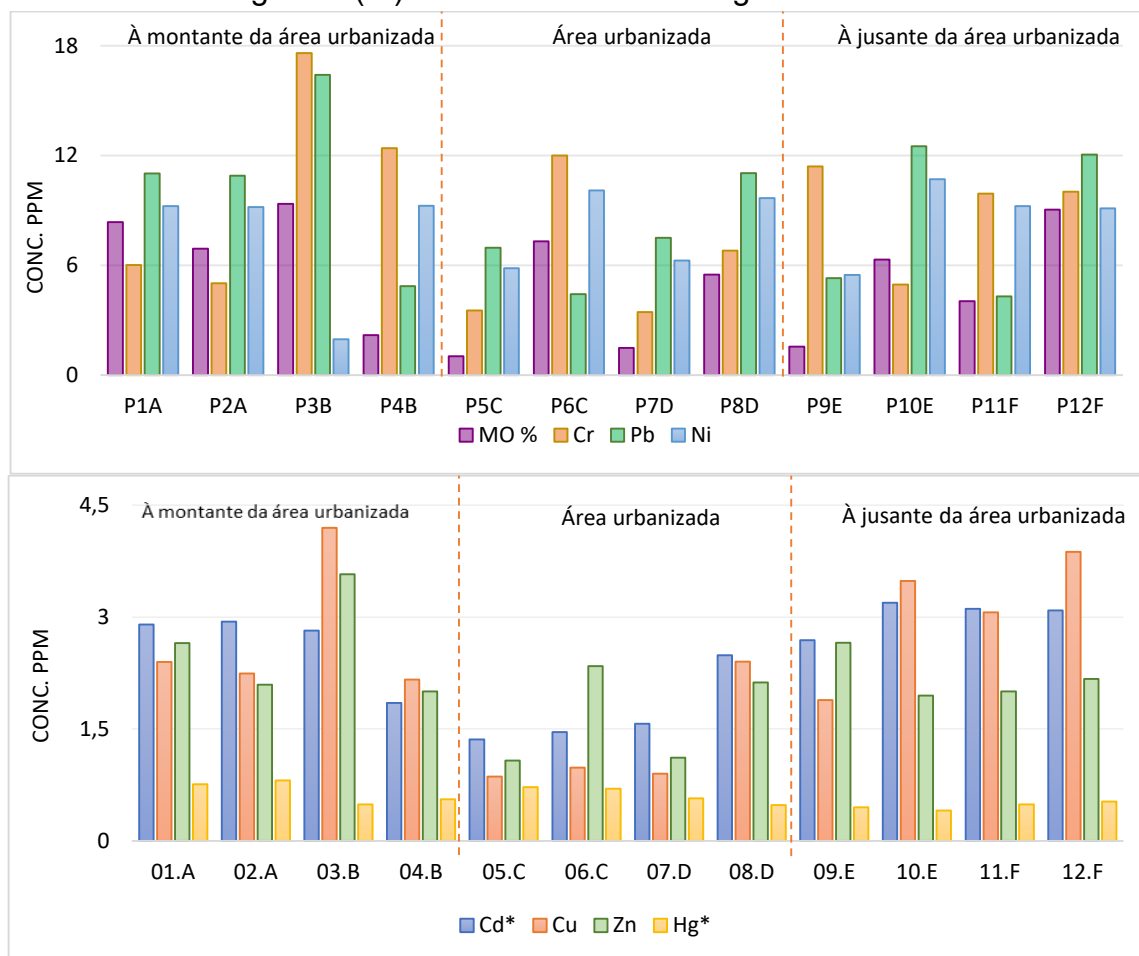
**Tabela 04:** Estatística descritiva dos elementos analisados no sedimento do rio Acre

Variável mg.kg <sup>-1</sup>	Média	Desvio padrão	Min.	Q1	Mediana	Q3	Max.
Cd	0,246	0,060	0,136	0,178	0,276	0,298	0,319
Cr	8,594	3,632	3,440	4,999	8,360	11,550	17,600
Cu	2,372	0,864	0,864	1,664	2,321	3,170	4,196
Hg	0,058	0,011	0,041	0,049	0,055	0,071	0,081
Ni	8,005	2,079	1,957	6,157	9,210	9,360	10,715
Pb	8,944	3,382	4,310	5,190	9,206	11,299	16,410
Zn	2,147	0,443	1,079	1,990	2,109	2,418	3,557

Fonte: Autora, 2023.

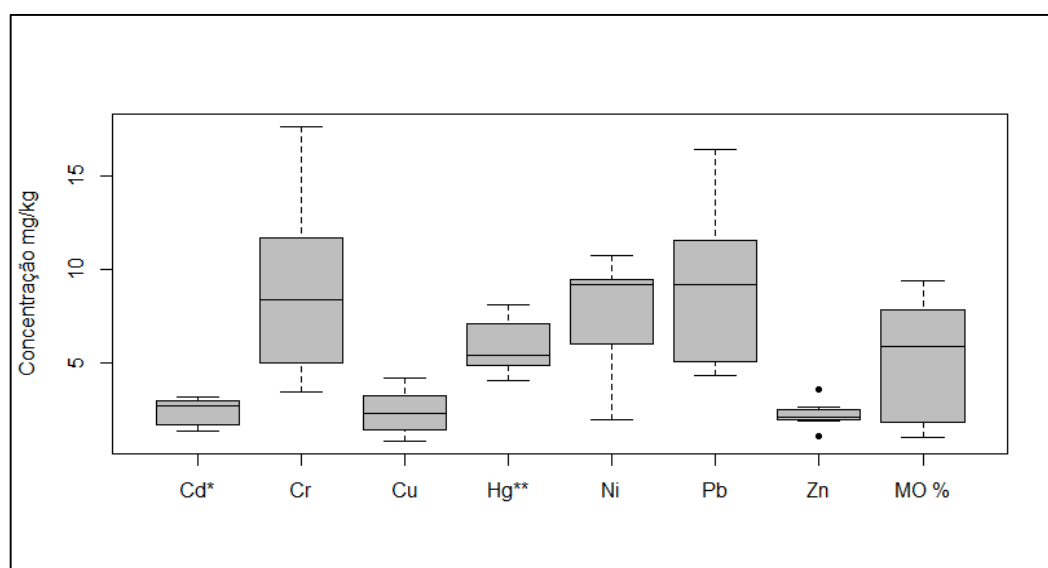
A distribuição das concentrações da matéria orgânica e dos metais analisados no sedimento do Rio Acre está representada no gráfico de distribuição (Figura 10) e gráfico *boxplot* (Figura 11).

**Figura 10:** Gráfico de distribuição da concentração de metais (mg/kg) e matéria orgânica (%) nos sedimentos ao longo do rio Acre.



Fonte: Autora (2023).(conc. de Cd e Hg x 10).

**Figura 11:** *Boxplot* da concentração de metais (mg/kg) e matéria orgânica (%) nos sedimentos do rio Acre



Fonte: Autora (2023) \*Cdx10; \*\*Hg100.



Todas as amostras analisadas neste trabalho apresentaram concentrações menores do que os limites estabelecidos em lei (Tabela 05). As normas legais que tratam do limite de metais em solos e sedimentos no Brasil, são a Resolução CONAMA 454/2012, que estabelece diretrizes para o gerenciamento de áreas contaminadas e do material a ser dragado (sedimento) em águas sob jurisdição nacional, e a Resolução CONAMA 420/2009 que estabelece valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas.

**Tabela 05:** Quantidades máximas de metais (mg/kg) especificadas em leis brasileiras.

	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
<b>Resolução CONAMA 454/2012</b>							
N1 <sup>3</sup>	0,6	37,3	35,7	0,17	18	35	123
N2 <sup>4</sup>	3,53	90	197	0,486	36	91,3	315
<b>Resolução CONAMA 420/2009</b>							
Prevenção <sup>5</sup>	1,3	75	60	0,5	30	72	300
<b>Esta pesquisa</b>							
Mínimo obtido	0,136	3,440	0,864	0,041	1,957	4,310	1,079
Máximo obtido	0,319	17,600	4,196	0,081	10,715	16,410	3,557

Fonte: BRASIL, 2009; 2012 (Organizado pela autora, 2023).

Para uma melhor compreensão do significado dos valores obtidos nesta pesquisa, foi necessário comparar com outras literaturas, em especial as amazônicas. Na falta de dados sobre a geoquímica de sedimentos da Bacia Hidrográfica do Rio Acre, ampliou-se essa avaliação para outras bacias, incluídas na mesma região hidrográfica (APENDICE A) .

#### 3.1.1.1 Cádmio

O Cádmio (Cd) é considerado um metal relativamente raro, não existindo na natureza minerais que contenham Cd em grande quantidade, é obtido, principalmente,

<sup>3</sup> Nível 1- limiar abaixo do qual há menor probabilidade de efeitos adversos à biota;

<sup>4</sup> Nível 2 - limiar acima do qual há maior probabilidade de efeitos adversos à biota;

<sup>5</sup>Concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas funções principais.



como subproduto da extração de outros elementos como o Zn (ATKINS; JONES, 2018).

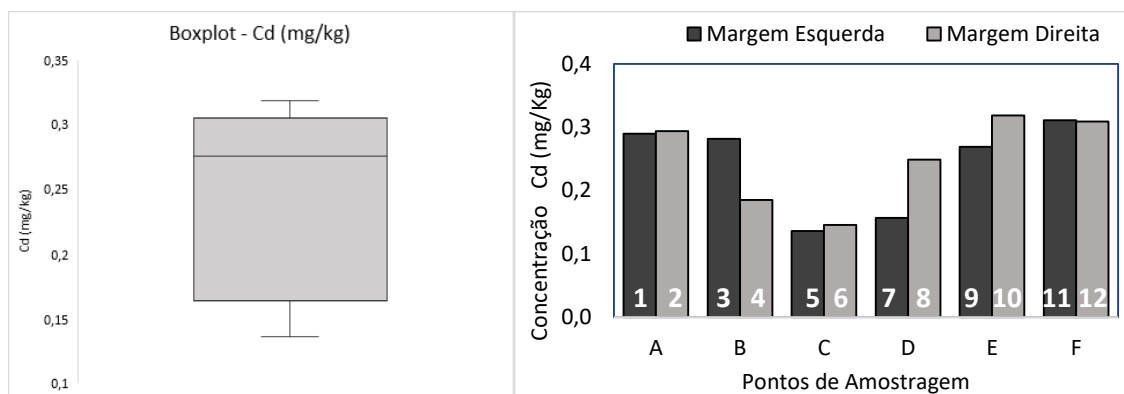
Na natureza não é encontrado no estado metálico, estando, portanto, sempre combinado à minerais do solo (CALIJURI; CUNHA, 2013), precipita como sulfeto, carbonato e fosfato em pH acima de 7 (BAIRD; CANN, 2011). No estado de oxidação  $\text{Cd}^{2+}$ , principalmente na forma de sulfeto de cádmio ( $\text{CdS}$ ), composto inorgânico, material semicondutor utilizado em várias aplicações industriais e tecnológicas, o  $\text{CdS}$  é encontrado associado a um mineral chamado "*greenockite*". (ATKINS et al., 2018; BROWN et al., 2005), e pode ser encontrado, ainda, como carbonato de cádmio ( $\text{CdCO}_3$ ), associado ao mineral octavite e como elemento-traço da esfalerita (minério de zinco), galena (minério de chumbo) e calcopirita (minério de cobre) (ATKINS et al., 2018).

$\text{Cd}$  é utilizado em várias aplicações industriais, como na fabricação de baterias recarregáveis níquel-cádmio, revestimentos e em processos metalúrgicos (BROWN, 2005; RUSSEL, 1994). É utilizado como pigmento na forma de sulfeto de cádmio ( $\text{CdS}$ ), responsável pela cor amarelo brilhante, além de, estar presente em fertilizantes fosfatados (BAIRD; CANN, 2011). A principal fonte de disponibilização para o meio é através da queima de carvão.

Nos ecossistemas aquáticos,  $\text{Cd}$  apresenta grande mobilidade, sendo encontrado nas águas superficiais na forma hidratada ( $\text{Cd}(\text{H}_2\text{O})^{2+}$ ) e quando adsorvido ao sedimento torna-se relativamente imóvel (BAIRD; CANN, 2011).

A figura (12) mostra a concentração e distribuição do  $\text{Cd}$  quantificado nas amostras de sedimento coletadas no rio Acre. Foi encontrada uma média de  $0,25 \pm 0,06 \text{ mg.kg}^{-1}$  de  $\text{Cd}$  e mediana de 0,28. O valor mínimo encontrado foi  $0,14 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto de coleta P5C e valor máximo  $0,32 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto P10E. O gráfico *boxplot* mostra uma amplitude de  $0,18 \text{ mg.kg}^{-1}$  no primeiro quartil e  $0,30 \text{ mg.kg}^{-1}$  no terceiro quartil, indicando uma distância interquartilica de  $0,12 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

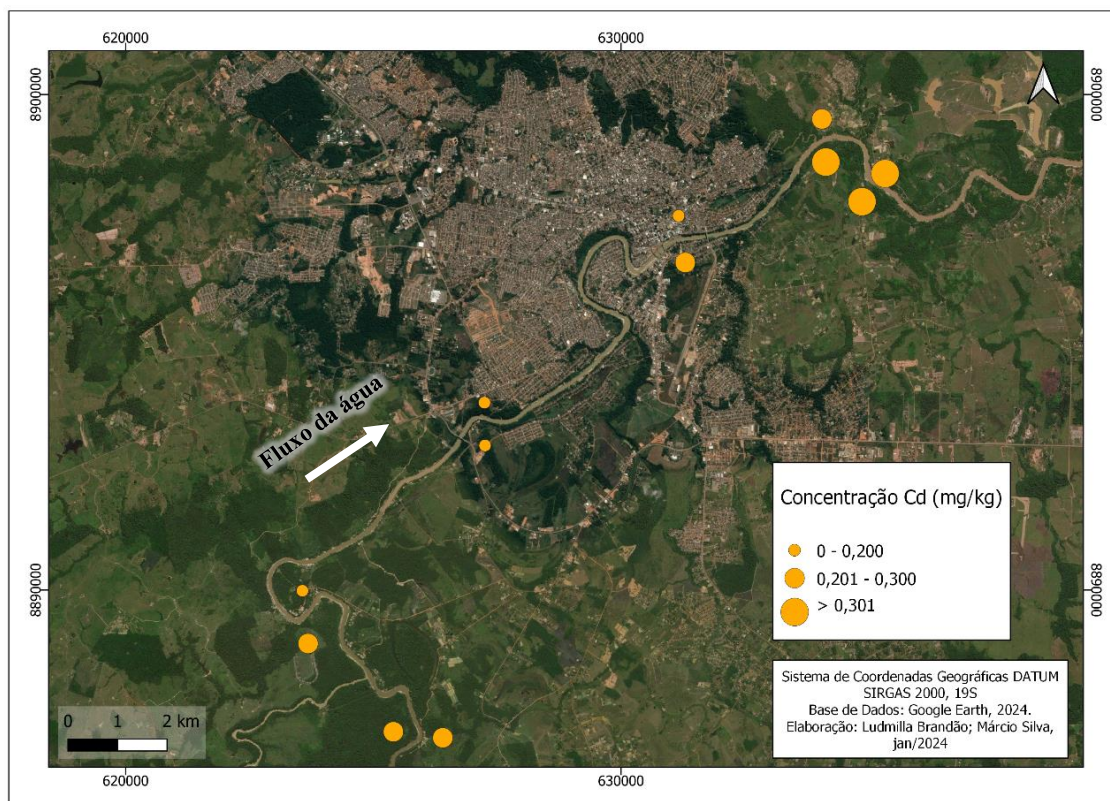
**Figura 12:** Gráfico *boxplot* teor de cádmio e gráfico de concentração nos pontos de coleta.



Fonte: Autora (2023).

O ponto de amostragem que apresenta maior concentração encontra-se na foz do Igarapé São Francisco e o ponto com menor concentração na região onde ocorre a captação da Estação de Tratamento de Água (E.T.A.) da cidade de Rio Branco. Há maior concentração de Cd na área rural, em relação à área urbana (Figura 13).

**Figura 13:** Mapa de distribuição da concentração de Cádmio no rio Acre.



Fonte: Autora (2023)

A inserção do metal no rio Acre, pode estar ocorrendo tanto pelo uso de fertilizantes em área rural, quanto pelo próprio desmatamento destas áreas, que disponibiliza o metal do solo ao corpo d'água. A alta solubilidade do Cd pode explicar a mobilidade do metal do sedimento/solo para a água na área urbanizada (pontos C e D) havendo poucas espécies adsorvidas ao sedimento nestas áreas. Carvalho (2006) encontrou média de 2,85 ppm no sedimento em suspensão da água do rio Acre, valor 11 vezes superior à média encontrada no sedimento de fundo analisado nessa pesquisa.

Os valores encontrados nesta pesquisa são superiores aos descritos na literatura consultada (APENDICE A) Cavalcante e Santos (2020) e Silva (1996) não encontraram teores significativos de Cd nos sedimentos coletados em áreas de manguezal no município de Vigia de Nazaré no Pará e em Igarapés em áreas urbanizadas no Amazonas, respectivamente. Silva (2020) encontrou uma média de 0,01 (ppm) em amostras coletadas no Rio Machado em Rondônia, média 20 vezes menor do que as encontradas neste estudo, porém, é importante ressaltar que na citada pesquisa, a área estudada faz parte de uma reserva biológica, portanto, preservada, em certa medida, de impactos urbanos e agrícolas, quando comparados a um corpo d'água altamente impactado por atividades antrópicas como o rio Acre (FURTADO, 2005; SOS AMAZONIA, 2011).

#### 3.1.1.2 Cromo

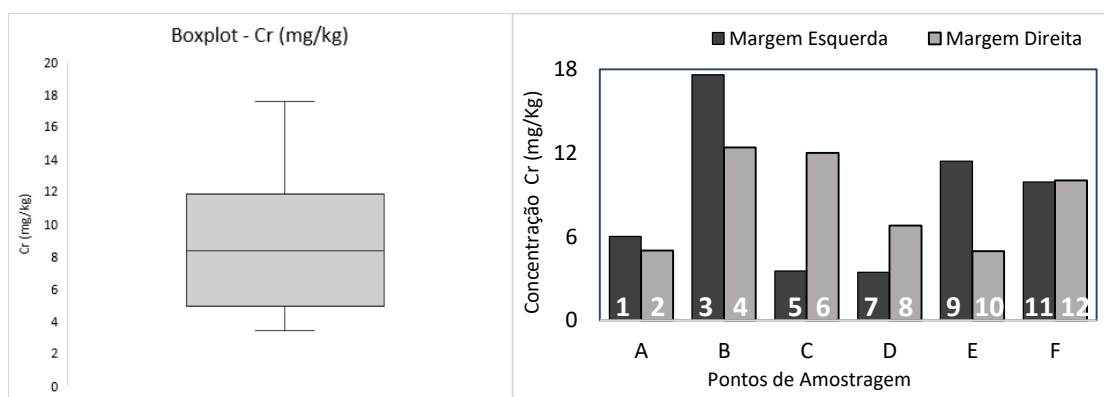
O cromo (Cr) na natureza ocorre como elemento-traço dos minerais muscovita, granada, cianita, anfibólios, piroxênios, epidotos, augitas, cloritas, cromitas, ilmetitas e monazitas (LICHT, 1998). Porém, a extração só é economicamente viável em cromitas, já que em outros minerais está na forma de óxidos e silicatos (SHRIVER et al., 1994). Não há ocorrência de cromo metálico  $Cr^0$  na natureza, por conta da elevada reatividade da forma metálica do Cr ao oxigênio atmosférico.

Na forma metálica tem bastante aplicação industrial, principalmente na galvanoplastia, zinco e cromo formam óxidos protetores de baixa densidade que protegem o ferro da oxidação (proteção eletroquímica) (ATKINS *et al.*, 2018). Além de, soldagens, produção de ligas ferro-cromo, produção de cromatos, dicromatos e

pigmentos. Nas águas subterrâneas a maior contribuição de contaminação por cromo está associada ao chapeamento de metais (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Outra fonte de contaminação importante, principalmente na Amazônia é o curtume, atividade paralela e diretamente ligada ao crescimento da pecuária na região, como avaliado por Sousa (2015) no rio Candeias em Rondônia. O cromo é utilizado em forma de sal (sulfato básico de cromo (III)) como agente curtente, o sulfato de cromo é responsável por penetrar e se incorporar às fibras do couro, através de ligações covalentes entre o cromo e proteínas das fibras, durante esse processo o efluente líquido rico em cromo e outros contaminantes gerado, não é submetido a tratamento, sendo descartado diretamente nos rios (SOUSA, 2015).

**Figura 14:** Gráfico *boxplot* teor de cromo e concentração nos pontos de coleta

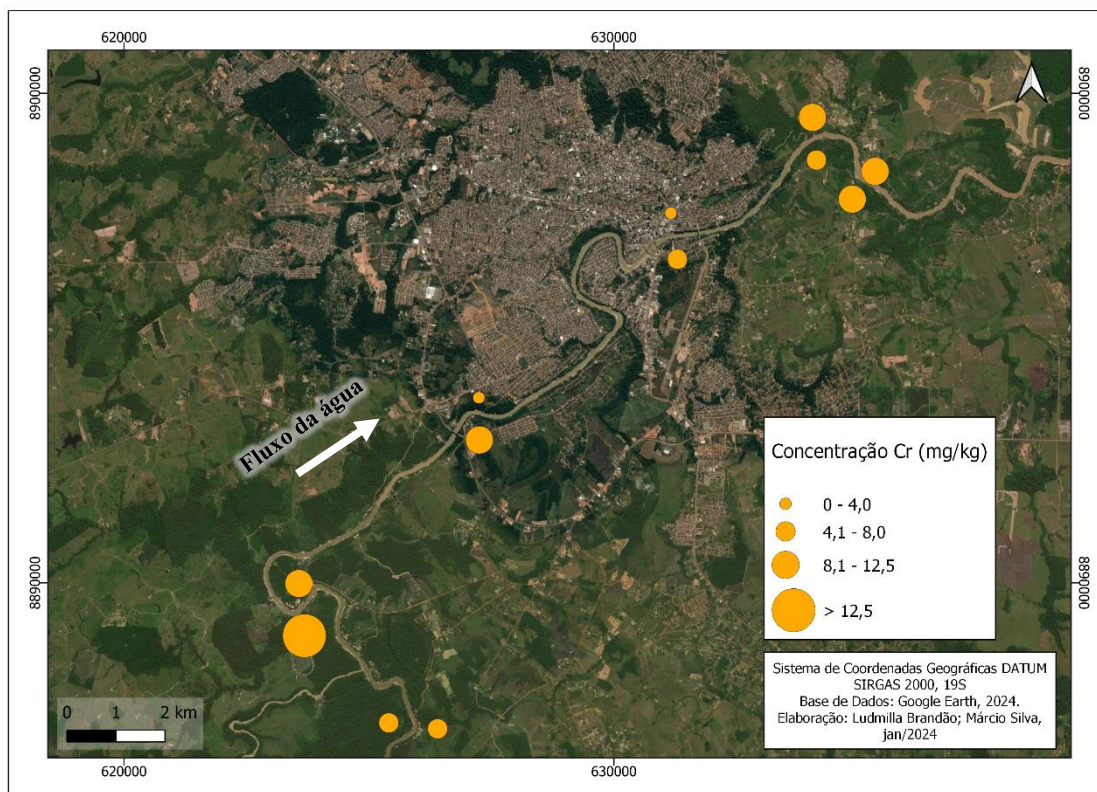


Fonte: Autora (2023)

As amostras apresentaram uma média de  $8,59 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mediana de  $8,36$  e desvio padrão de  $3,6$ . O valor mínimo encontrado foi  $3,44 \text{ mg.kg}^{-1}$ , no ponto de coleta P7D (área urbana) e valor máximo  $17,60 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto P3B (área rural à montante da área urbanizada). O gráfico *boxplot* (Figura 14) mostra o primeiro quartil com  $4,99 \text{ mg.kg}^{-1}$  e o terceiro quartil com  $11,55 \text{ mg.kg}^{-1}$ , indicando uma amplitude de  $6,55 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

Não foram identificados valores de Cr acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Tabela 05), porém, é observada uma elevada variação na concentração de Cr, principalmente no setor de coleta B (Figura 15), área rural com pastagem e agricultura nas margens do rio e intensa atividade de dragagem no leito.

**Figura 15:** Mapa de distribuição da concentração de Cromo no rio Acre.



Fonte: Autora (2023).

Em comparação com a avaliação feita por Viana (2005) nas amostras de sedimento de praia do rio Acre, a média encontrada nesta pesquisa  $8,59 \pm 3,6$  mg/kg, é 9 vezes menor do que os reportados pela autora ( $33,09 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), nas amostras coletadas no ano de 2004. Já Benchimol e Kronberg (1992) encontraram concentração de cromo no solo às margens do rio Acre variando entre 35 à 77 mg/kg, no sedimento do rio Purus os autores reportaram concentração máxima de 270 mg/kg, 30 vezes maior que o encontrado nesta pesquisa. No Lago do Amapá Carvalho (2006) encontrou média de  $76 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Esses resultados mostram que há elevada concentração de Cr em toda a bacia do rio Acre, margens e sedimento.

Sousa (2015) investigou concentração de Cr em uma bacia onde há lançamento de efluentes de dois curtumes e encontrou significativa variabilidade na concentração de cromo ( $4,4$  à  $549,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) nas amostras de sedimentos retiradas do Rio Candeias, no estado de Rondônia, o autor mostra haver tendência de enriquecimento do metal na região, explicado pelas atividades econômicas desenvolvidas nessa bacia, principalmente a pecuária e o curtimento de couro, que



durante esse processo despeja efluente líquido rico em cromo diretamente no rio, sem submeter a pré-tratamento adequado. O que parece não acontecer na bacia do rio Acre, já que não são reportadas atividades associadas ao curtimento de couro nesta região do Acre.

Também Cavalcante e Santos (2020) encontraram teores de cromo ( $81,0 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) abaixo do limite determinado na legislação CONAMA nº 454/2012, porém, os autores atribuem a presença do metal na região (área de mangues – PA) à descarga de efluentes na região e a alta concentração de matéria orgânica encontrada ( $47 \text{ mg.kg}^{-1}$ ), uma vez que o metal possui tendência a se concentrar onde existe maior teor de matéria orgânica, o que também não foi evidenciado nesta pesquisa.

Já Porto (2009) encontrou elevadas concentrações de Cr nos sedimentos do Rio Barcarena no Pará ( $104 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) em pontos localizados próximos ao núcleo urbano e Porto de São Francisco. Segundo a autora, a contaminação é proveniente da descarga de resíduos sólidos e efluentes na região.

Apesar de o teor de cromo na bacia do rio Acre parecer estar associado a própria geologia do local (BENCHIMOL, KRONBERG, 1992; CARVALHO, 2006; VIANA, 2005) o elevado teor de Cr no setor de coleta B (rural) pode estar associado ao revolvimento do leito do rio pelas dragas. O tipo de ocupação da área, também tem influência na inserção do Cr ao ambiente, sendo que na agricultura, o metal pode estar presente nos defensivos agrícolas utilizados, que contêm cromo na composição, já na pecuária o cromo é utilizado na nutrição de bovinos, na forma de cromo orgânico (CAVALCANTI, 2022). A degradação da vegetação na área, por meio de queimadas, também, provoca aumento da concentração de elementos-traço, ao promover deposição do material particulado na coluna d'água através do processo de *wash load* e escoamento para os fundos de vale.

#### 3.1.1.3 Cobre

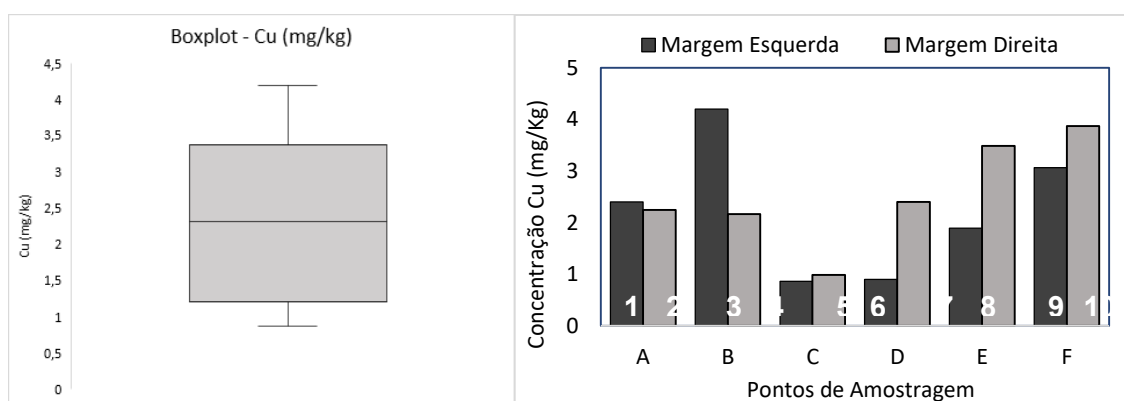
O Cobre (Cu) é um metal de coloração avermelhada, dúctil e maleável (ATKINS *et al.*, 2018). Encontrado em grande quantidade nos minerais calcocita, calcopirita, malaquita e como elemento-traço em azurita, bornita, covelita, crisocola, tumalina, platina, feldspatos alcalinos, augitas, biotitas e aulitas (LICHT, 1998).

O cobre é facilmente extraído de seus minérios, foi um dos primeiros metais a ser trabalhado pelo homem. A descoberta de que a adição de estanho ao cobre resultava em um metal mais duro e resistente marcou o início da Idade do Bronze (ATKINS et al., 2018).

O cobre foi e ainda é amplamente utilizado na produção de diversas ferramentas, e tem bastante aplicações na indústria devido às suas propriedades químicas. É utilizado na fabricação de fios e cabos elétricos devido à sua excelente condutividade elétrica, na fabricação de tubos e canos, devido à alta resistência à corrosão e maleabilidade (ATKINS et al., 2018). Nos centros urbanos a origem da contaminação por Cu está associada à descarga de esgotos e resíduos sólidos, principalmente no período de chuva, onde são lixiviados dos solos urbanos que contém lixo e sucatas (CALIJURI e CUNHA, 2013).

Nas amostras de sedimento do rio Acre não foram identificados valores de concentração de cobre superiores aos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Figura 16). Os valores encontrados nesta pesquisa são bem menores do que os reportados por outras literaturas no Amazonas (HORBE et al., 2007, 2013; SILVA 1996) no Pará (CAVALCANTE, SANTOS 2020; PORTO, 2009) e Rondônia (SOUZA, 2015). Cavalcante e Santos (2020) encontraram concentrações médias de cobre de  $17,39 \text{ mg.Kg}^{-1}$  e afirmam ser valores semelhantes ao reportado por outros autores na mesma região (mangues – Pará) concluindo que as concentrações encontradas retratam condição natural da área estudada.

**Figura 16:** Gráfico *boxplot* teor de cobre e concentração nos pontos de coleta

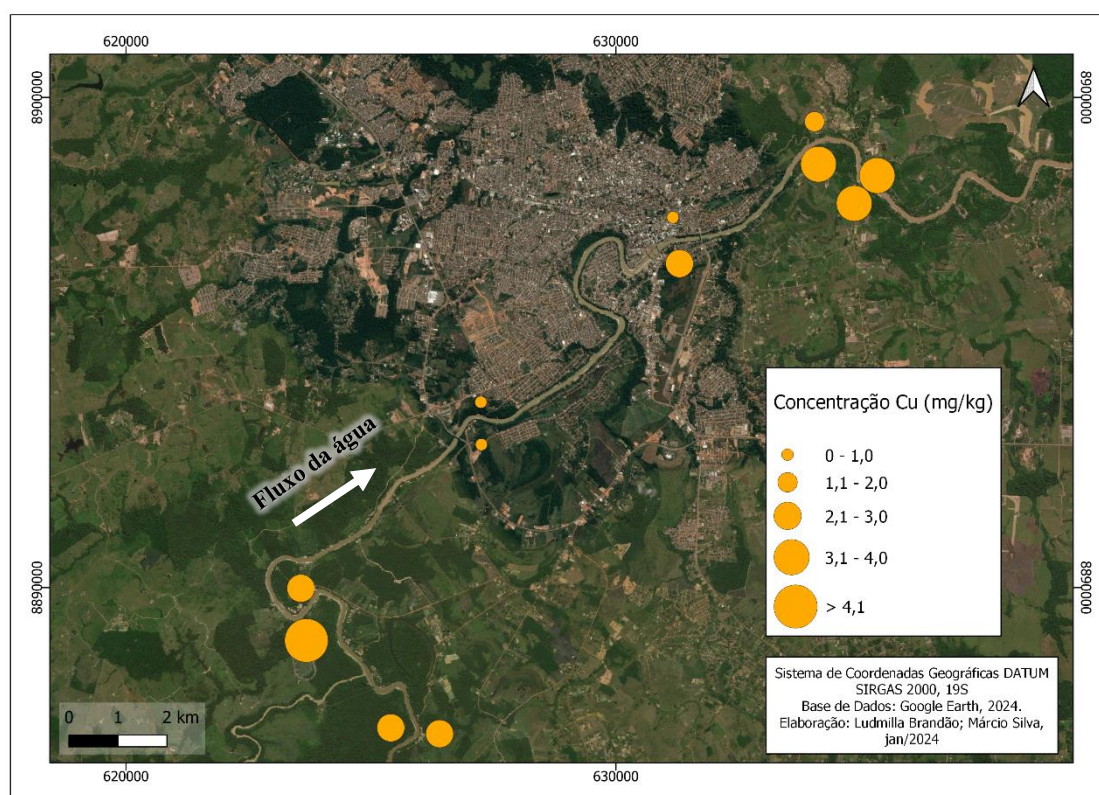


Fonte: Autora, 2023.

As amostras apresentaram uma média de  $2,37 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mediana de  $2,32$  e desvio padrão de  $0,86$ . O valor mínimo encontrado foi  $0,86 \text{ mg.kg}^{-1}$ , no ponto de coleta P5C (captação ETA – área urbanizada) e valor máximo  $4,20 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto P3B (área de dragagem – zona rural). O gráfico *boxplot* mostra uma distribuição bastante homogênea, com primeiro quartil de  $1,66 \text{ mg.kg}^{-1}$  e o terceiro quartil com  $3,17 \text{ mg.kg}^{-1}$ , indicando uma amplitude de  $1,50 \text{ mg.kg}^{-1}$ , demonstrando uma distribuição bem homogênea.

Cabe ressaltar que o valor máximo encontrado também está em área de dragagem (Figura 17), possivelmente pela disponibilização provocada pelo revolvimento do sedimento, porém, as concentrações parecem ser associadas à própria geologia local, já que nas margens do rio Acre foram reportados valores elevados de cobre por Benchimol e Kronberg (1992)  $72 \text{ mg.kg}^{-1}$  e Viana (2005)  $63 \text{ mg.kg}^{-1}$ .

**Figura 17:** Mapa de distribuição da concentração de Cobre no rio Acre.



Fonte: Autora (2023).



A alta mobilidade do metal, associada à baixa concentração de matéria orgânica e as próprias condições hidrogeoquímica da água, podem contribuir para a não fixação do metal ao sedimento, ou disponibilização deste para a água. Carvalho (2006) encontrou baixas concentrações de cobre no sedimento suspenso do lago do Amapá (0,028 ppm) e do rio Acre (0,064). Entretanto, o autor reporta concentração de 31 ppm no sedimento de fundo do lago, explicando que essa alta concentração parece ser influenciada pelo escoamento superficial das chuvas e pulsos de inundação do rio Acre.

#### 3.1.1.4 Mercúrio

O mercúrio (Hg) é encontrado na natureza em minerais como corderoíta (mineral raro de prata), tiemannita (seleneto de mercúrio) e cinábrio (sulfeto de mercúrio), pode ser encontrado, também, como elemento-traço de esfarelita, galena e em minérios de ouro (LICHT, 1998).

A presença de mercúrio no ambiente amazônico está associada a várias atividades, incluindo a queima de biomassa florestal, atividades mineradoras, e a mineração de ouro aluvionar na região. Na região amazônica brasileira, a contaminação por mercúrio teve seu primeiro relato em 1985, quando o pesquisador francês Jacques Cousteau encontrou peixes contaminados no rio Madeira (TORREZANI et al., 2016). E durante muito tempo, os altos níveis de mercúrio encontrados em solos e sistemas aquáticos amazônicos foram atribuídos principalmente às atividades mineradoras (LACERDA et.al, 2004).

Vergotti et al. (2009) mencionam que a mineração de ouro aluvionar na região Amazônica, especificamente em Rondônia, foi uma atividade de tão grande escala, que chegou a envolver cerca de 50 mil pessoas diretamente ou indiretamente durante os anos de 1980.

A utilização intensa do mercúrio no processo de amalgamação durante a extração do ouro foi identificada como uma das principais fontes de contaminação na região, já que o mercúrio utilizado como amalgamador resulta em perdas para os rios que variam de 40 a 45% do total de mercúrio utilizado (OLIVEIRA, 2016; VERGOTTI et al., 2009). A contaminação mercurial tem impactos significativos nos ecossistemas

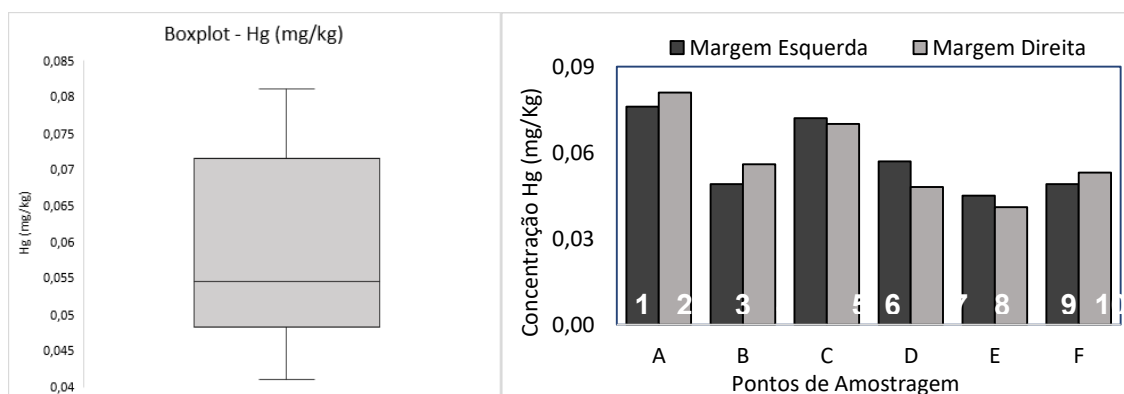
aquáticos e terrestres, capaz de afetar tanto a saúde humana quanto dos animais (CALIJURI; CUNHA, 2013).

Os estudos indicam haver outras fontes envolvidas na contaminação por mercúrio na região. Além das fontes naturais, como relatado por Siqueira & Aprile (2012) em estudos realizados em solos oxisóis-podzóis na Guiana Francesa e na região dos rios Tapajós e Madeira, nos estados do Pará e de Rondônia, revelaram altas concentrações de mercúrio associadas a complexos organometálicos na fração mineral do solo, além das já citadas fontes antrópicas.

Veiga et al. (1994) mostraram uma associação entre a queima de biomassa florestal e a quantidade de mercúrio lançada para a atmosfera anualmente, estimada na época em cerca de 90 toneladas por ano, o que os autores indicaram como responsável por uma parcela importante do mercúrio encontrado nos ecossistemas aquáticos da região. Durante as queimadas, ocorrem modificações químicas no solo e na água, que podem influenciar a disponibilidade de mercúrio inorgânico e outros constituintes químicos (AYRES, 2004).

Nas amostras de sedimentos analisadas do rio Acre (Figura 18) não foram identificadas concentrações de Hg acima do limite estabelecido em lei. As amostras apresentaram uma média de  $0,06 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mediana de  $0,05 \text{ mg.Kg}^{-1}$  e desvio padrão de 0,01. O gráfico *boxplot* mostra o primeiro quartil com 0,05 e o terceiro quartil com 0,07, indicando uma amplitude de  $0,02 \text{ mg.Kg}^{-1}$ .

**Figura 18:** Gráfico *boxplot* teor de mercúrio e concentração nos pontos de coleta



Fonte: Autora (2023)

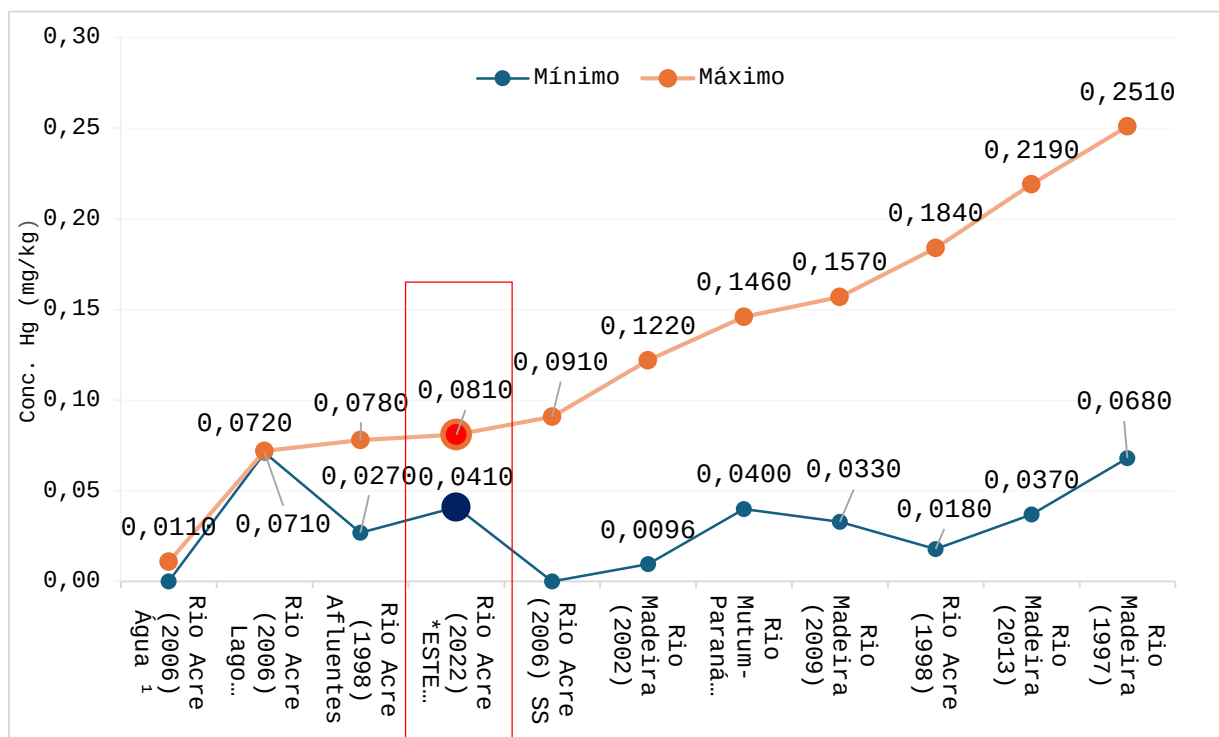
O valor mínimo encontrado foi  $0,04 \text{ mg.kg}^{-1}$ , no ponto de coleta P10E (foz do igarapé São Francisco – à jusante da área urbanizada), é superior aos valores

mínimos reportado por Mascarenhas *et al.* (2004) no sedimento de fundo dos afluentes (igarapé Quixadá, igarapé Santa Cruz, igarapé Queimada, igarapé Preto e igarapé Nazaré) e do rio Acre (cidades de Assis Brasil e Brasiléia) coletados em 1998. De 1998 à 2022 houve aumento de 100% na teor mínimo de Hg quantificado no sedimento do rio Acre, representando um alerta para o monitoramento desse metal.

A quantidade mínima quantificada também foi superior ao reportado por outras literaturas bacia do rio Madeira em Rondônia nas campanhas de 1998, 2002 (AYRES, 2007), 2009 (VERGOTTI *et al.*, 2009 e 2013 (BELEM, 2013; SIQUEIRA, 2013), é importante salientar que esses são corpos d'água impactados diretamente pela mineração, inclusive o garimpo ilegal de ouro (LACERDA *et al.*, 2004; TORREZANI *et al.*, 2016; VERGOTTI *et al.*, 2009) .

O valor máximo 0,08 mg.kg<sup>-1</sup> foi registrado no ponto P2A (área de dragagem – zona rural), está abaixo dos valores consultados, exceto para as amostras analisadas em afluentes do Rio Acre em 1998 por Mascarenhas *et al.* (2004), e sedimentos suspensos no lago do Amapá (0,072 ppm) (CARVALHO, 2006) conforme figura 19.

**Figura 19:** Concentração de Hg na Bacia do rio Acre e rio Madeira.



Fonte: CARVALHO, 2006; MASCARENHAS *et al.*, 2004; AYRES, 2007; BÉLEM, 2013; VERGOTTI *et al.*, 2009; SIQUEIRA, 2013. Organização; Autora (2023).

No estudo de Ayres (2004), a pesquisadora comparou amostras de água do Rio Madeira, entre os estados de Rondônia e Amazonas, coletadas em 1997 e 2002. O objetivo do trabalho foi avaliar a variação da concentração de mercúrio, para verificar o efeito da diminuição do garimpo de ouro e das mudanças nos usos da terra no transporte do mercúrio ao longo do rio. A análise revelou que as concentrações de mercúrio associadas aos sólidos suspensos totais foram significativamente maiores em 1997 do que em 2002, possivelmente devido ao aumento da taxa de erosão atribuído à expansão agrícola na região a partir de 1996. Os resultados sugerem uma alteração na distribuição do mercúrio nas águas do Rio Madeira, indicando que, apesar da diminuição das atividades garimpeiras, os teores de mercúrio na coluna d'água permaneceram elevados.

Segundo a autora, o impacto ambiental da colonização da Bacia do Rio Madeira pode ter contribuído para a disponibilização do mercúrio na coluna d'água, alterando o ciclo do elemento no ambiente amazônico. Além disso, os picos de contaminação observados para todas as frações do mercúrio podem estar relacionados com alterações nos usos do solo na região da bacia, especialmente o desmatamento e as queimadas devido à expansão agrícola (AYRES, 2004), problema também observado na bacia do rio Acre (SENA *et al*, 2012).

Bélem (2013) investigou a distribuição espacial de mercúrio em sedimentos do rio Mutum-Paraná em Rondônia e identificou as maiores concentrações de mercúrio (0,146 mg.kg<sup>-1</sup>) perto da confluência com o rio Madeira, atribuindo, também, esses valores à presença de atividades agropecuárias e de mineração na região. O autor destaca que a exploração de ouro aluvionar ocorreu na região durante as décadas de 70 até a década de 90, e que o rio Mutum-Paraná teve intensa atividade de exploração do minério durante esse período, com uso para manutenção de balsas e dragas do garimpo. Embora o garimpo de ouro ainda continue em menor escala, atualmente também há intensa atividade agrícola e pecuária nessa região do Alto rio Madeira.

Siqueira (2013) também avaliou as concentrações de Hg no sedimento de fundo de amostras coletadas no Rio Madeira em Rondônia, especificamente na área de influência da Usina Hidrelétrica de Jirau. A autora comparou diferentes profundidades (perfis) e observou que as maiores concentrações estavam presentes em amostras das camadas superficiais, com tendência de diminuição com a profundidade. A autora concluiu que a variabilidade das concentrações é influenciada

pelo carreamento e lixiviação da matéria orgânica (ácidos húmicos/fúlvicos) e dos sólidos em suspensão para a área, ficando depositados mais na superfície.

Os dados corroboram com os estudos de Oliveira et al. (2007) sobre a distribuição de mercúrio total em diferentes solos da bacia do médio rio Negro, onde os autores demonstraram que a capacidade do solo para reter mercúrio está diretamente relacionada com o teor de matéria orgânica e silte, de maneira que quanto maior a fração areia, menores as concentrações de Hg reportadas no estudo.

Rocha et al. (2000), ao estudar a redução do mercúrio(II) por Substâncias Húmicas (HS)<sup>6</sup> em amostras de água retiradas do Rio Negro, constataram que as HS têm forte capacidade de complexação e redução do Hg (II), remobilizando e mesmo volatilizando compostos organomercúricos (tóxicos) para Hg elementar (menos tóxico). Em ambientes tropicais como a Bacia Amazônica, depósitos de HS em solo e águas naturais atuam como sumidouro de Hg.

Os resultados máximos encontrados neste estudo são inferiores aos valores encontrados por Mascarenhas et al. (2004) nos sedimentos do Rio Acre e são semelhantes à média dos afluentes. A campanha foi realizada no Rio Acre entre as cidades de Brasiléia e Assis Brasil de 3 a 12 de novembro de 1998, em 32 pontos de amostragem, durante o período de seca no estado do Acre. Os autores enfatizam que os baixos níveis médios de Hg nos sedimentos e no material particulado contrastam com os níveis elevados encontrados na biota, principalmente nos peixes carnívoros, com uma concentração média de 1,287 mg.Kg<sup>-1</sup>.

Níveis elevados na Bacia Hidrográfica Amazônica foram relatados por Torrezani et al. (2016) na Bacia do Educandos, localizada numa das regiões mais habitadas de Manaus (AM), com variação de 0,1950 a 3,3700 mg.kg<sup>-1</sup> de Hg. Os autores encontraram resultados que sugerem que a contaminação por Hg não seja de origem industrial, ao encontrar concentrações elevadas em todos os pontos amostrados, incluindo as nascentes.

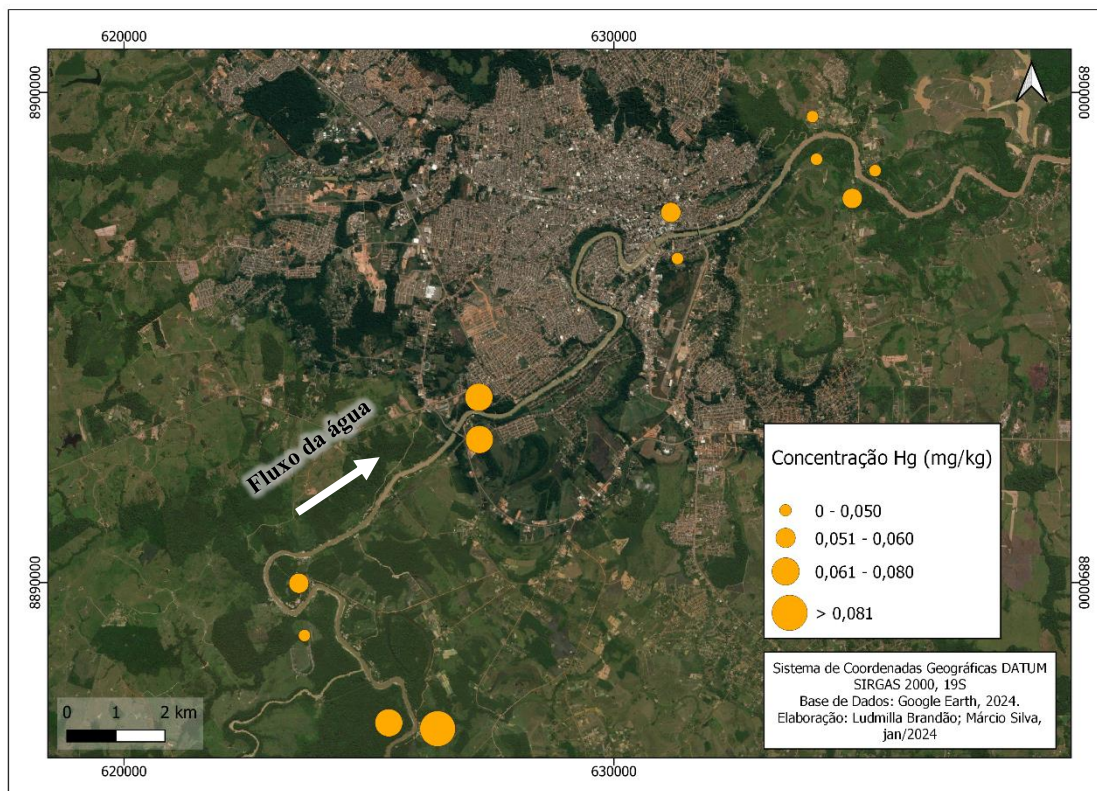
A figura 20 mostra a distribuição da concentração de Hg nas amostras analisadas, mostrando haver maior concentração do metal à montante da área urbanizada, na região onde há dragas e maior revolvimento do sedimento de fundo do rio. As condições oxidativas da água, alteradas pós inserção de efluentes na área

---

<sup>6</sup> misturas complexas de polieletrólitos orgânicos, originados da decomposição bioquímica e microbiológica de restos de plantas e animais

urbanizada pode estar dificultando a agregação do Hg às cargas superficiais do sedimento, disponibilizando-o, assim, para a coluna d'água.

**Figura 20:** Mapa de distribuição da concentração de Mercúrio no rio Acre.



Fonte: Autora (2023).

O consumo de peixes contaminados em ambiente amazônico já vem sendo reportado por diversos estudos (BASTOS et al., 2004; FIOCRUZ, 2023; LACERDA et al., 2004), principalmente alertando quanto à exposição das comunidades tradicionais que têm no peixe a sua principal fonte de ingestão de proteína (VEGA et al., 2018).

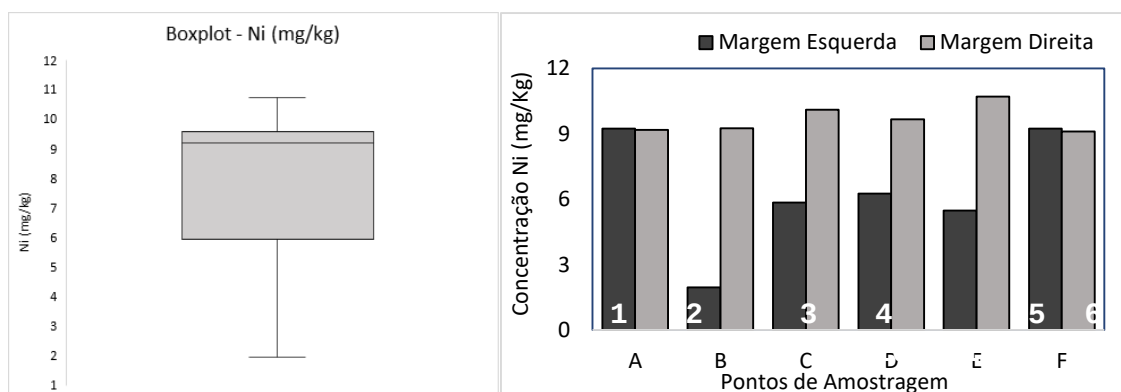
Foram identificados peixes com níveis de Hg acima do limite para consumo humano nos seis estados amazônicos (Acre, Amapá, Amazonas, Pará, Rondônia e Roraima) pesquisados pela FIOCRUZ. Tendo o Acre apresentado a maior prevalência de contaminação (35,9% das amostras condenadas) com doses até 31,5 vezes maior do que a dose de referência US.EPA (0,1 µg/kg pc/dia), em Rondônia a incidência de contaminação foi encontrada em 26,10% das amostras (FIOCRUZ, 2023).

### 3.1.1.5 Níquel

Níquel (Ni) é um metal abundante na crosta terrestre, encontra-se ligado a silicatos como piroxênios, pentlandita ( $\text{FeNi}_9\text{S}_8$ ), niccolita e millerita, como impureza de minerais como germanita, ilmenita e galena e associado a depósitos de Cu e Fe (LICHT, 1998; BROWN et al., 2005).

A contaminação por Ni no ambiente, pode ser, tanto de origem natural, desde vulcões à incêndios florestais, quanto origem antrópica, pela mineração e refino do níquel (CALIJURI; CUNHA, 2013). A alta resistência à corrosão, oxidação e desgaste, torna o metal ideal para diversas aplicações industriais, como baterias recarregáveis de níquel-cádmio, de níquel-hidreto e componente do aço inoxidável (BROWN et al., 2005).

**Figura 21:** Gráfico *boxplot* teor de níquel e concentração nos pontos de coleta



Fonte: Autora, 2023.

As amostras apresentaram uma média de  $8,01 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mediana de  $9,21$  e desvio padrão de  $2,08$ . O valor mínimo encontrado foi  $1,96 \text{ mg.kg}^{-1}$ , no ponto de coleta P3B (área de dragagem – área rural à montante do perímetro urbano) e valor máximo  $10,72 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto P10E (Foz do Igarapé São Francisco à jusante do perímetro urbano). O gráfico *boxplot* (Figura 21) mostra o primeiro quartil com  $6,16$  e o terceiro quartil com  $9,36$ , indicando uma amplitude de  $3,20 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Não foram identificados valores de Ni acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Tabela 05).

Os resultados deste estudo foram superiores aos encontrados por Horbe *et al.* (2013) no rio Madeira ( $0,80 \text{ mg.kg}^{-1}$ ). No entanto, é importante ressaltar que os autores

avaliaram material particulado filtrado de amostras de água, e não o sedimento retirado do leito do rio. Também foram superiores aos encontrados por Silva (2020) de  $0,0133 \text{ mg.kg}^{-1}$  no rio Machado, em uma área de proteção.

Na bacia do rio Acre o único registro encontrado foi o de Carvalho (2006) no sedimento de fundo do lago do Amapá (37,65 ppm) média 400% maior do que a quantificada no rio Acre no presente estudo.

Não foram encontrados dados de concentração de Ni no rio Madeira nas literaturas consultadas. No rio Solimões (AM) Horbe *et al.* (2007) reportou uma variação de 13 a  $38 \text{ mg.kg}^{-1}$  em amostras de solo retiradas das margens do rio.

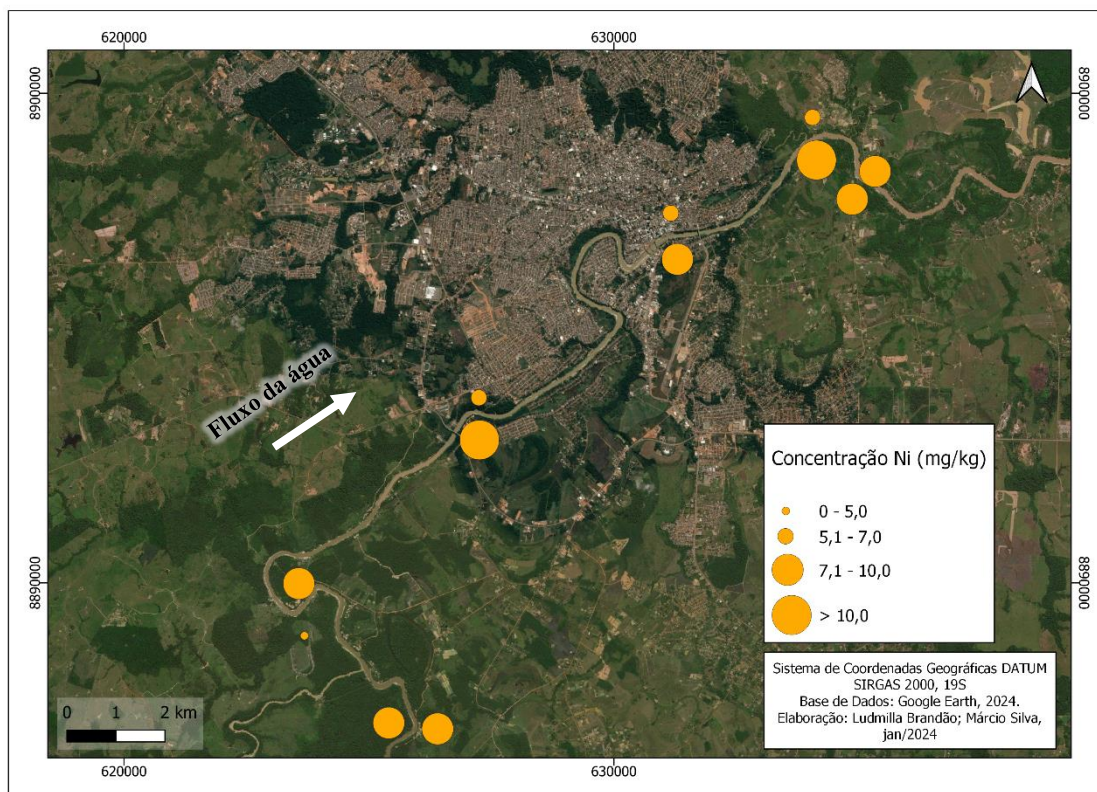
Cavalcante e Santos (2020) encontraram concentrações de Ni ( $51,6 \text{ mg.kg}^{-1}$ ) acima dos valores estabelecidos pela legislação CONAMA 454/2012, nível 2 (36 ppm) em área de manguezal no município de Vigia de Nazaré – PA. Ao comparar com outros teores avaliados na mesma região os autores não consideraram que a região esteja sendo impactada por atividades antrópicas, mas explicam que tais valores se devem à própria composição da crosta continental e das rochas sedimentares presentes na região serem ligeiramente enriquecidas com Ni. Também no Pará, Porto (2009) encontrou média de 34 ppm de níquel no rio Barcarena.

As altas concentrações de Ni encontradas nos Igarapé Quarenta  $491 \text{ mg.kg}^{-1}$ , São Raimundo  $218 \text{ mg.kg}^{-1}$  e Barro Branco  $142 \text{ mg.kg}^{-1}$  por Silva (1996) no Amazonas foram atribuídas à lixiviação de resíduos sólidos enriquecidos por metais das atividades industriais desenvolvidas na área urbana de Manaus.

Ao comparar com as já citadas literaturas, nota-se que em Rio Branco, o rio Acre ainda encontra algum estado de preservação, em relação à contaminação por metais como Ni por haver baixa atividade industrial na bacia. Na figura 22 é possível perceber que as maiores concentrações de Ni foram observadas na margem esquerda do rio Acre.



**Figura 22:** Mapa de distribuição da concentração de Níquel no rio Acre.



Fonte: Autora (2023).

### 3.1.1.6 Chumbo

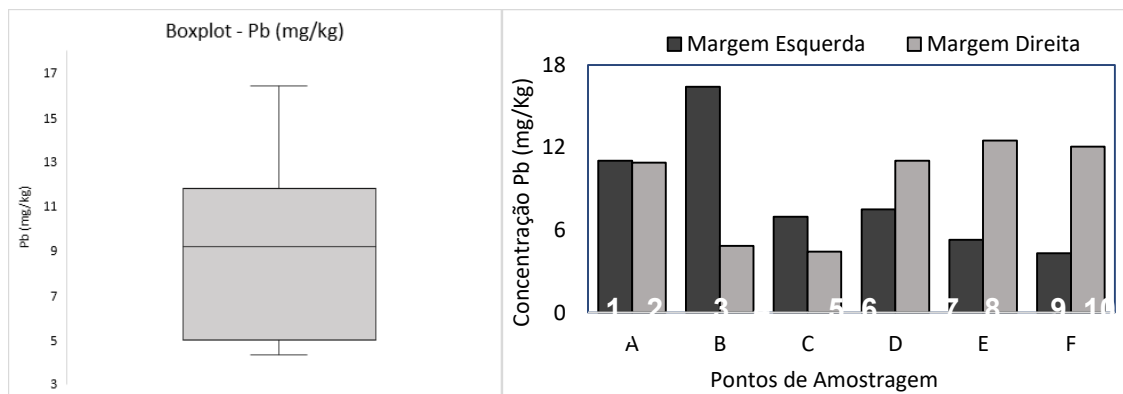
Chumbo (Pb) é encontrado como elemento maior em minerais como a galena (PbS), anglesita (PbSO<sub>4</sub>), e cerussita (PbCO<sub>3</sub>), e como elemento traço de zircão, cromita, feldspatos alcalinos, piroxênios, augitas e dolomitas (LICHT, 1998).

Não é considerado contaminante ambiental quando na forma elementar Pb<sup>0</sup>, mas na forma iônica é potencialmente tóxico. A principal fonte de contaminação em águas subterrâneas é o despejo de lodo de esgoto e em águas superficiais a agricultura (contaminação de solos por uso de pesticidas como Arsenato de Chumbo - Pb<sub>3</sub>(AsO<sub>4</sub>)), as áreas urbanas e o uso em tintas-anticrustantes em embarcações (BAIRD; CANN, 2011).

Com relativo baixo ponto de fusão 327 °C, permite inúmeras aplicações, que são datadas desde Grécia e Roma. Possui íon estável Pb<sup>2+</sup>, presente no sulfeto de chumbo (base do minério galena), no óxido de chumbo (PbO) usado na esmaltação

de cerâmicas para dar brilho, no cromato de chumbo ( $\text{PbCrO}_4$ ) usado como pigmento amarelo de tintas e, como aditivo de combustíveis no estado de oxidação  $\text{Pb}^{4+}$ . A solubilidade dos compostos de chumbo é diretamente determinada pelo pH do meio, quanto mais ácido o meio mais solúvel (BAIRD; CANN, 2011).

**Figura 23:** Gráfico *boxplot* teor de chumbo e concentração nos pontos de coleta



Fonte: Autora (2023).

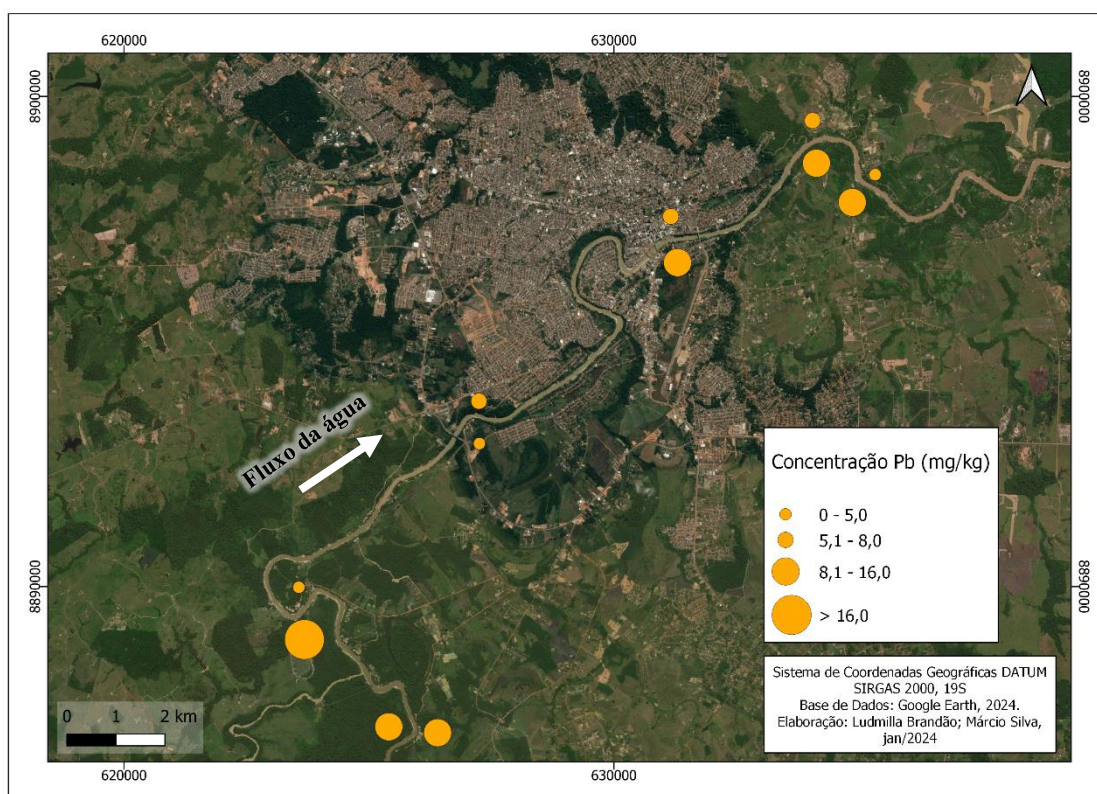
As amostras apresentaram uma média de  $8,94 \text{ mg.kg}^{-1}$ , mediana de  $9,21$  e desvio padrão de  $3,38$ . O valor mínimo encontrado foi  $4,31 \text{ mg.kg}^{-1}$ , no ponto de coleta P11F (foz do Igarapé São Francisco) e valor máximo  $16,41 \text{ mg.kg}^{-1}$  no ponto P3B (área rural - dragagem). O gráfico *boxplot* (Figura 24) mostra o primeiro quartil com  $5,19$  e o terceiro quartil com  $11,3 \text{ mg.kg}^{-1}$ , indicando uma amplitude de  $6,11 \text{ mg.kg}^{-1}$ . Não foram identificados valores de Pb acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Tabela 05), porém foi observada grande variação entre as margens direita e esquerda do rio (Figura 24).

O valor máximo registrado no ponto P3B é 150% maior do que a média e se aproxima da média de chumbo encontrada por Viana (2005)  $14,50 \text{ mg.kg}^{-1}$  nas margens do rio Acre. Já Benchimol e Kronberg (1992) encontraram variação ainda maior (30-65 ppm) nas margens do rio Acre, os valores máximos reportado pelos autores é 800% maior que a média encontrada no sedimento de fundo nesta pesquisa.

Os dados indicam que o chumbo encontrado possivelmente tem origem no próprio solo da região, parece também não haver enriquecimento do metal ao longo desses anos no sedimento e margens. Porém, parece haver uma maior disponibilização de Pb na área de dragagem pelo revolvimento de camadas mais

inferiores do sedimento, que expõem camadas mais antigas para a superfície. O chumbo presente no sedimento pode estar sendo removido pelas condições oxidativas do meio e sendo disponibilizado para a coluna d'água.

**Figura 24:** Mapa de distribuição da concentração de Chumbo no rio Acre.



Fonte: Autora (2023).

Cavalcante e Santos (2020) associam a média encontrada  $39,44 \text{ mg.kg}^{-1}$  à intensa movimentação de embarcações pesqueiras na área pesquisada (PA), enfatizando o uso do Pb como anti-deteriorante nos combustíveis usados nesses barcos. No rio Barcarena (PA), Porto (2004) encontrou média de  $32,54 \text{ mg.kg}^{-1}$  e associou à agricultura desenvolvida na região (uso de defensivos agrícolas com Pb) e a mistura entre o sedimento de fundo e bauxita na área pesquisada.

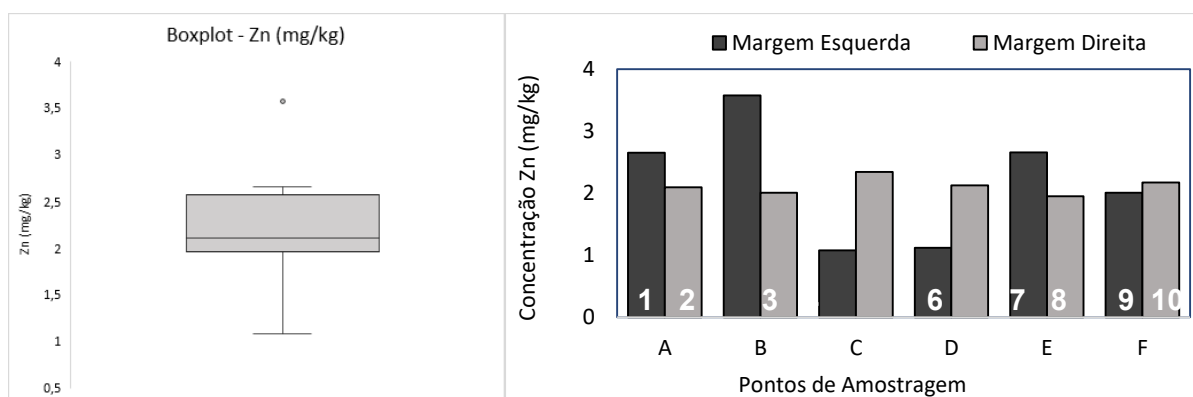
Da literatura consultada a média de chumbo encontrada no sedimento do rio Acre foi superior apenas ao quantificado por Silva (2020) na reserva biológica do Jarú ( $0,0092 \text{ ppm}$ ).

### 3.1.1.7 Zinco

Zinco (Zn) é um metal abundante na crosta terrestre, presente como elemento maior nos minerais espinelios e esfarelitas e como elemento traço em estauroлита, anfibólios alcalinos, olivina, dolomita, monazita, ilmenita (LICHT, 1998). É comumente encontrado na forma de sulfetos mineralizados e pode passar por grandes transformações, resultando na formação de óxidos, carbonatos e silicatos (ALBAREDE, 2011).

As diversas aplicações industriais do Zn estão ligadas às propriedades químicas, principalmente a resistência a corrosão, é amplamente utilizado na indústria metalúrgica e componente de ligas metálicas como latão e bronze, por exemplo (BAIRD; CANN, 2011).

**Figura 25:** Gráfico *boxplot* teor de zinco e concentração nos pontos de coleta

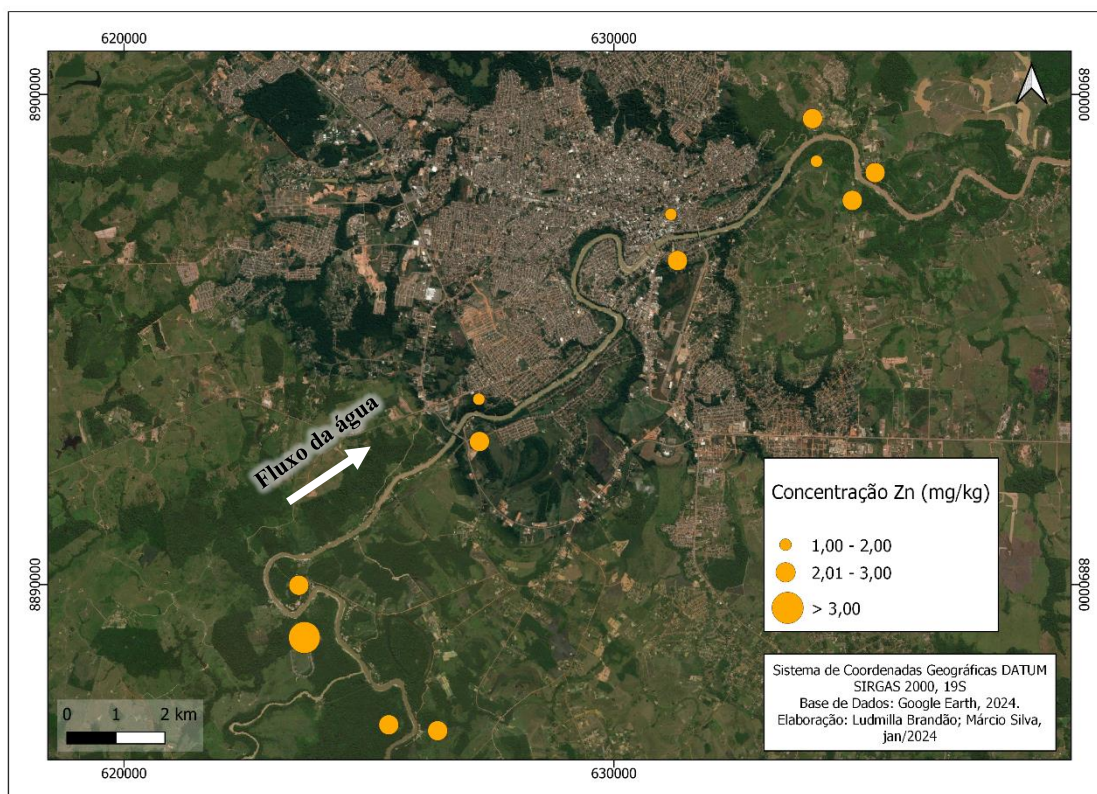


Fonte: Autora (2023).

As amostras apresentaram uma média de 2,15 mg.kg<sup>-1</sup>, mediana de 2,11 e desvio padrão de 0,44. O valor mínimo encontrado foi 1,08 mg.kg<sup>-1</sup>, no ponto de coleta P5C (Captação E.T.A – área urbanizada) e valor máximo 3,57 mg.kg<sup>-1</sup> no ponto P3B (área rural - dragagem) como *outlier* (Figura 25). O gráfico *boxplot* mostra o primeiro quartil com 1,99 e o terceiro quartil com 3,56 mg.kg<sup>-1</sup>, indicando uma amplitude de 0,43 mg.kg<sup>-1</sup>. Não foram identificados valores de Zn acima dos limites estabelecidos pela legislação brasileira (Tabela 05).



**Figura 26:** Mapa de distribuição da concentração de Zinco no rio Acre.



Fonte: Autora, 2023.

Comparando os valores obtidos nesta pesquisa com a literatura consultada, as concentrações de Zn no rio Acre são maiores apenas que as determinadas por Silva (2020) 0,326 mg/kg no Rio Machado em uma área de preservação.

Para Silva (1996) a forma química como o Zn se encontra no Igarapé Barro Branco (168 mg/kg) e nos Igarapés do Quarenta (1048 mg/kg) e São Raimundo (919 mg/kg) no Amazonas, mostrou que o Zn, nesse ambiente altamente impactado, teve tendência a ligar-se com os óxidos e hidróxidos de Fe-Mn, avaliados pelo autor na pesquisa.

Também Viana (2005) associou a quantidade de Zn encontrada nos barrancos do rio Acre (70,87 mg/kg) com os argilominerais do solo, mostrando haver forte correlação entre  $Zn-Fe_2O_3$  e  $Zn-MgO$ . As condições da água e composição do sedimento do rio Acre parece não favorecer a fixação do zinco nesse ambiente.

Elevadas concentrações de zinco foram observadas nos reservatórios hidrelétricos do rio Uatumã/AM (1024 mg/kg) afluente da margem esquerda do rio

Amazonas e rio Jamari/RO(590 mg/kg) afluente da margem direita do rio Madeira, associados a superfície de argilomineral que constituem o sedimento, o autor relaciona essas elevadas quantidades às queimadas que ocorrem na região (SOUZA, 2015).

Todos os metais analisados no sedimento de fundo do rio Acre, nesta pesquisa, com exceção do Hg, demonstraram diferentes comportamentos em relação a outros corpos d'água amazônicos. A baixa concentração desses metais no sedimento indica pouca inserção desses metais ao meio, ou pouca aderência desses metais às cargas presentes no sedimento analisado, um estudo complementar da química do solo e da água seriam necessários para melhor avaliação do fenômeno observado, a fim de identificar as fontes desses elementos.

### 3.1.2 Análises estatísticas multivariadas

A fim de compreender melhor as interações entre os metais analisados, buscou-se identificar padrões que não foram possíveis de serem observadas ao se analisar estes metais de maneira individualizada. Com isso, utilizou-se a análise multivariada para correlacionar todos os elementos. Nesta pesquisa os dados de análise de metais e de matéria orgânica foram submetidos aos testes estatísticos: Teste de Normalidade, Teste de Correlação de *Spearman* (correlação não paramétrica), Análise de Componentes Principais (PCA) e Análise Hierárquica de Agrupamentos (HCA - *Cluster*).

Para verificar o pressuposto de que as variáveis analisadas se aproximam de uma distribuição normal (distribuição simétrica e semelhante a uma distribuição normal), os dados foram submetidos ao teste de *Shapiro-Wilk*, à um nível de significância de 5% (Tabela 06). O coeficiente W explica a proximidade da amostra com a distribuição normal (quanto mais próximo de 1 mais próxima a amostra está de uma distribuição normal).

**Tabela 06:** Teste de normalidade de Shapiro-Wilk.

Parâmetro	Índice de significância	Coeficiente w	Normalidade
Cádmio	0.03122	0.84428	Não normal
Cromo	0.32550	0.92451	Normal

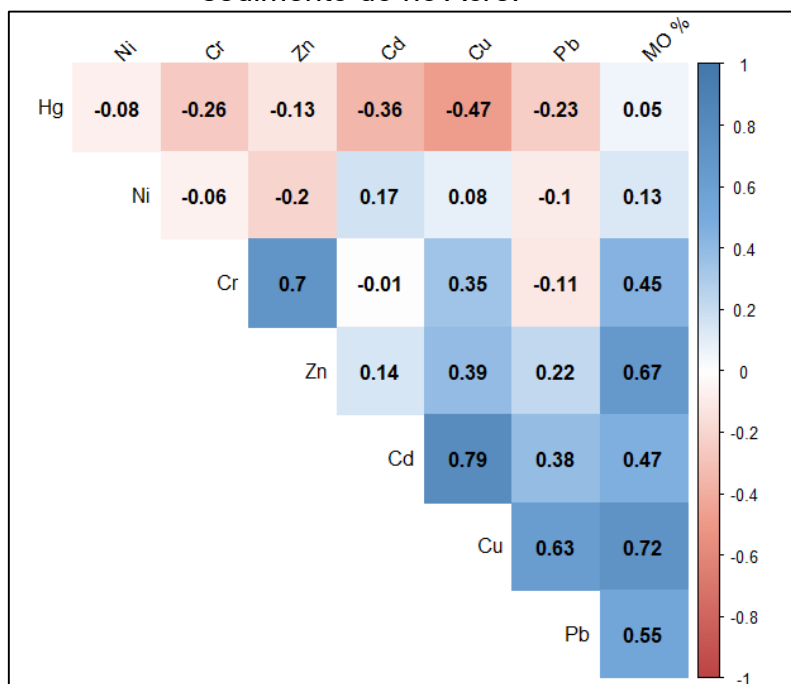
Parâmetro	Índice de significância	Coefficiente w	Normalidade
Cobre	0.43770	0.93513	Normal
Mercúrio	0.20130	0.90803	Normal
Níquel	0.01725	0.82286	Não normal
Chumbo	0.21920	0.91092	Normal
Zinco	0.25260	0.91574	Normal
Matéria Orgânica	0.17780	0.90380	Normal

Fonte: Autora (2023)

### 3.1.2.1 Análise de Correlação

Os dados obtidos mostram que os parâmetros analisados Cr, Cu, Hg, Pb, Zn e M.O., apresentam p-valor maior que 0,05 (nível de significância), sendo, portanto, dados normais ou paramétricos, Já Cd e Ni, apresentam p-valor menor, e, portanto, rejeita-se H0, em detrimento de H1. Neste caso, foi mais apropriado submeter os dados ao teste de correlação não paramétrico de *Spearman* (nível de significância 5%) para verificação da existência de associação entre as variáveis analisadas.

**Figura 27:** Matriz de correlação de *Spearman* entre as variáveis analisadas no sedimento do rio Acre.



Fonte: Autora, 2024

As correlações mais significativas neste conjunto de dados foram entre os metais Cd e Cu ( $r=0,7902$ ), Zn e Cr ( $r=0,7005$ ), houve moderada correlação entre Cu e Pb ( $r=0,6293$ ), a matéria orgânica mostrou forte correlação com Cu ( $r=0,7203$ ) e moderada correlação com Zn ( $r=0,6690$ ). De uma maneira geral os metais analisados mostraram poucas correlações entre si, e entre estes e a matéria orgânica.

Para o cádmio as correlações mais fortes foram, respectivamente, com cobre > matéria orgânica > chumbo, a correlação com cromo encontrada foi praticamente insignificante ( $-0,01$ ) diferente do que foi reportado por Silva (1996) nos igarapés no Amazonas Cr-Cd  $r=0,96$ . Com níquel a correlação também foi fraca  $r=0,17$ , menor do que a encontrada por Silva (2020) no rio Machado em Rondônia Cd-Ni  $r=0,99$ . A forte correlação com cobre encontrada neste trabalho, corrobora com a associação deste elemento a outros minerais como a calcopirita ( $\text{CuFeS}_2$ ) e galena ( $\text{PbS}$ ) Cd-Pb  $r=0,39$ , já descritas pela literatura (ATKINS et al., 2018), indicando uma provável origem geogênica do metal neste ambiente.

O cromo mostrou forte correlação com zinco ( $r = 0,70$ ) nas amostras analisadas no rio Acre, mostrando semelhança com o reportado por Souza (2015) na UHE Samuel/RO  $r=0,70$  e UHE Balbina/AM  $r = 0,60$ ), também por Silva (1996)  $r=0,51$  e Cavalcante & Santos (2020)  $r= 0,45$ . A significativa correlação entre os metais (Cr e Zn) no rio Acre indica que a origem destes, pode estar associada a uma mesma fonte de inserção,

Para ambos, as maiores concentrações foram encontradas na área de dragagem, onde há intenso revolvimento do sedimento de fundo do rio, e, portanto, maior exposição das camadas inferiores, onde os metais encontram-se mais retidos aos sedimentos. Não é possível definir se a origem é antropogênica ou geogênica, mas ressalta-se que estes são encontrados como elemento-traço de óxidos de ferro (ilmetitas) e fosfatos (monazitas).

Viana (2005) avaliou a concentração dos dois metais, correlacionando com o  $\text{K}_2\text{O}$  presente nos minerais potássicos (associados aos argilominerais quantificados pela autora, principalmente feldspatos), e os valores apresentados pela autora foram  $\text{K}_2\text{O}$ -Cr  $r=0,24$  e  $\text{K}_2\text{O}$ -Zn  $r=0,29$  confirmando que os metais se encontram fracamente associados a esses minerais presentes no solo às margens do rio.

Para o cobre as correlações positivas significativas foram com a matéria orgânica ( $0,72$ ) e chumbo ( $0,63$ ). Fortes correlações com chumbo foram relatadas também por Oliveira (2013)  $r=0,99$  e Souza (2015)  $r=1,00$  e  $r=0,82$ , os autores



sugerem existir uma mesma fonte de origem para estes metais e que estes associam-se satisfatoriamente à superfície do sedimento. Naturalmente estes metais encontram-se associados aos feldspatos alcalinos e a augitas.

Mercúrio, níquel e chumbo não tiveram correlação significativa com nenhuma espécie analisada, além do que já foi descrito. A correlação negativa Hg-Cu (-0,47) reflete a competição desses dois elementos pelos sítios de carga das estruturas aos quais se associam.

Por fim, as correlações positivas com a matéria orgânica foram observadas apenas com o metal cobre (0,72) e zinco (0,67). Tanto a concentração de matéria orgânica, quanto dos metais foram encontradas em maior quantidade fora da área urbanizada. Souza (2015) associa as concentrações de Cu e Zn e suas correlações significativas à ocorrência de queimadas no entorno dos reservatórios estudados, hipótese corroborada por outras pesquisas onde se observou alta concentração dos metais em material particulado emitido de queimadas da Amazônia (YAMASOE et. al., 2000; OLIVEIRA, 2007 *apud* SOUZA, 2015).

A matéria orgânica não demonstrou propriedades complexantes necessárias para a fixação dos demais metais analisados. Oliveira (2007) e Siqueira (2013) observam que a baixa porcentagem de M.O (ácidos húmicos/fúlvicos) reflete na baixa concentração de Hg, assim como Fe, Al e Mn presentes na fração silte e argila determinam a taxa de adsorção e sedimentação do mercúrio.

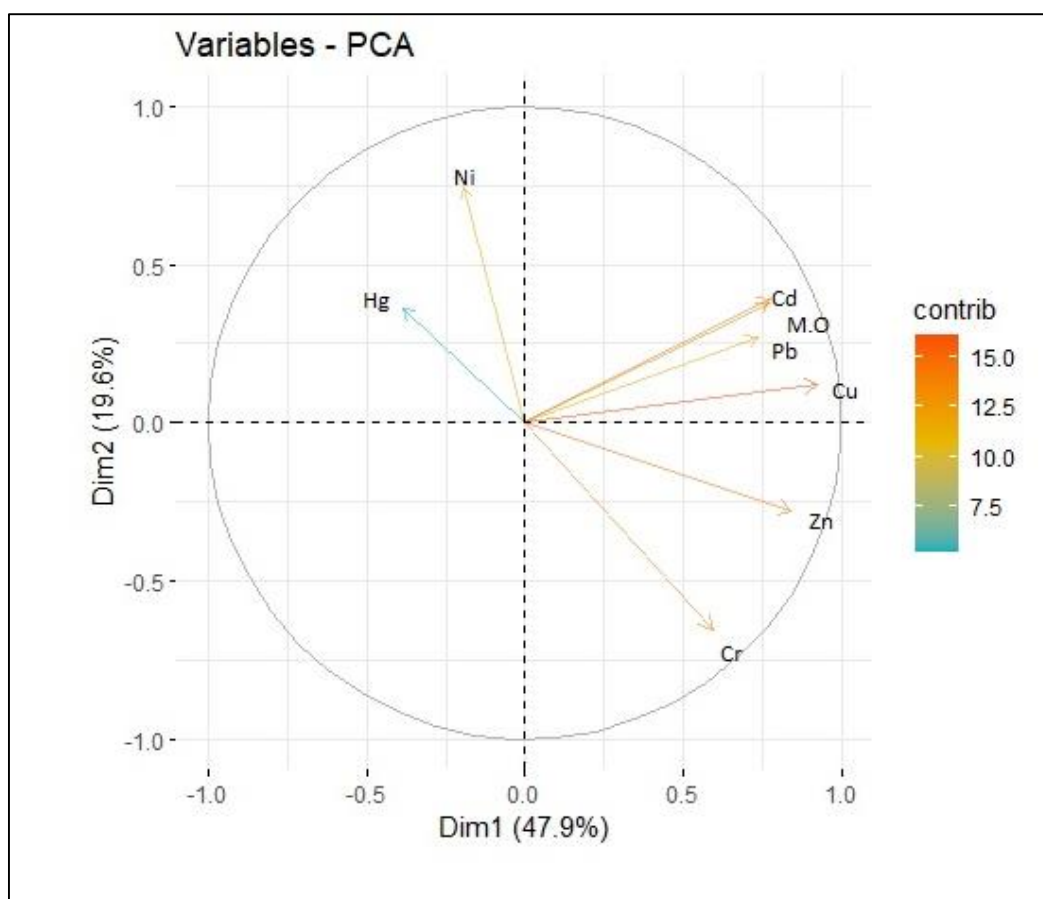
Também outras literaturas constataam que a M.O. não esteja favorecendo a complexação de metais (Pb, Cr, Mn, Fe, Co, Cu, Ni e Zn) na superfície do sedimento (CAVALCANTE, SANTOS, 2020; OLIVEIRA, 2007; PORTO, 2009). A baixa concentração de matéria orgânica e falta de correlação com os metais também foi observada por Viana (2005) nas margens do rio Acre.

Se os solos e sedimentos atuam como sumidouros e reservatórios na retenção dos metais pesados (BAIRD; CANN, 2011) controlando a disponibilidade dos metais, e a composição do sedimento do rio Acre parece não favorecer a complexação de metais em sua superfície, é urgente a necessidade de avaliação da concentração dessas espécies também na água do rio Acre.

### 3.1.2.2 Análise de agrupamentos

A Análise de Componentes Principais (PCA), correlaciona ao mesmo tempo os parâmetros analisados com os locais de coleta, a fim de se estabelecer uma relação entre os elementos analisados em cada amostra e como estas relações representam os pontos de amostragem. Nesta pesquisa (Figura 28) as duas dimensões principais totalizam 67% da variância total, Dim1 = 48% e Dim2= 19%.

**Figura 28:** Análise de componentes principais das amostras coletadas no rio Acre.



Fonte: Autora (2024).

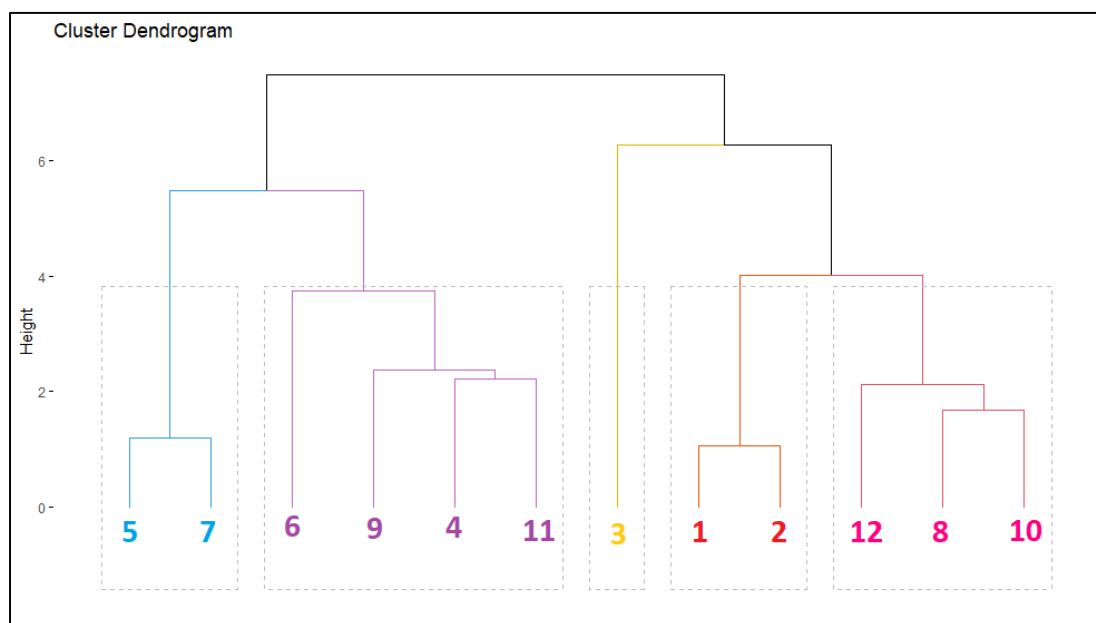
Sobre o gráfico apresentado é possível inferir que embora não haja agrupamentos explícitos, há certa relação entre as variáveis Cd, Pb, MO e Cu, que sugere uma possível relação positiva entre elas, o que significa que tendem a variar juntas, comportamento observado no gráfico de concentração (Figura 10) e explicitada

pela matriz de correlação. Juntas, essas variáveis respondem por 47,9% das alterações no conjunto dos dados observados.

Já Ni e Hg estão negativamente correlacionados com a maioria dos elementos analisados, podendo, inclusive, o Hg ser considerado um *outlier* no conjunto de dados analisado, por ter quase nenhuma contribuição. Essa tendência parece estar associada à fraca interação desses dois metais com a matéria orgânica. Esses comportamentos, também foram explicitados pela análise de correlação de *Spearman* (Figura 27).

Por fim, através do método aglomerativo hierárquico os parâmetros analisados e os pontos de coleta foram agrupados com base em similaridades obtidas a partir da análise de concentração e suas correlações.

**Figura 29:** Dendrograma dos pontos de coleta no rio Acre (sedimentos)

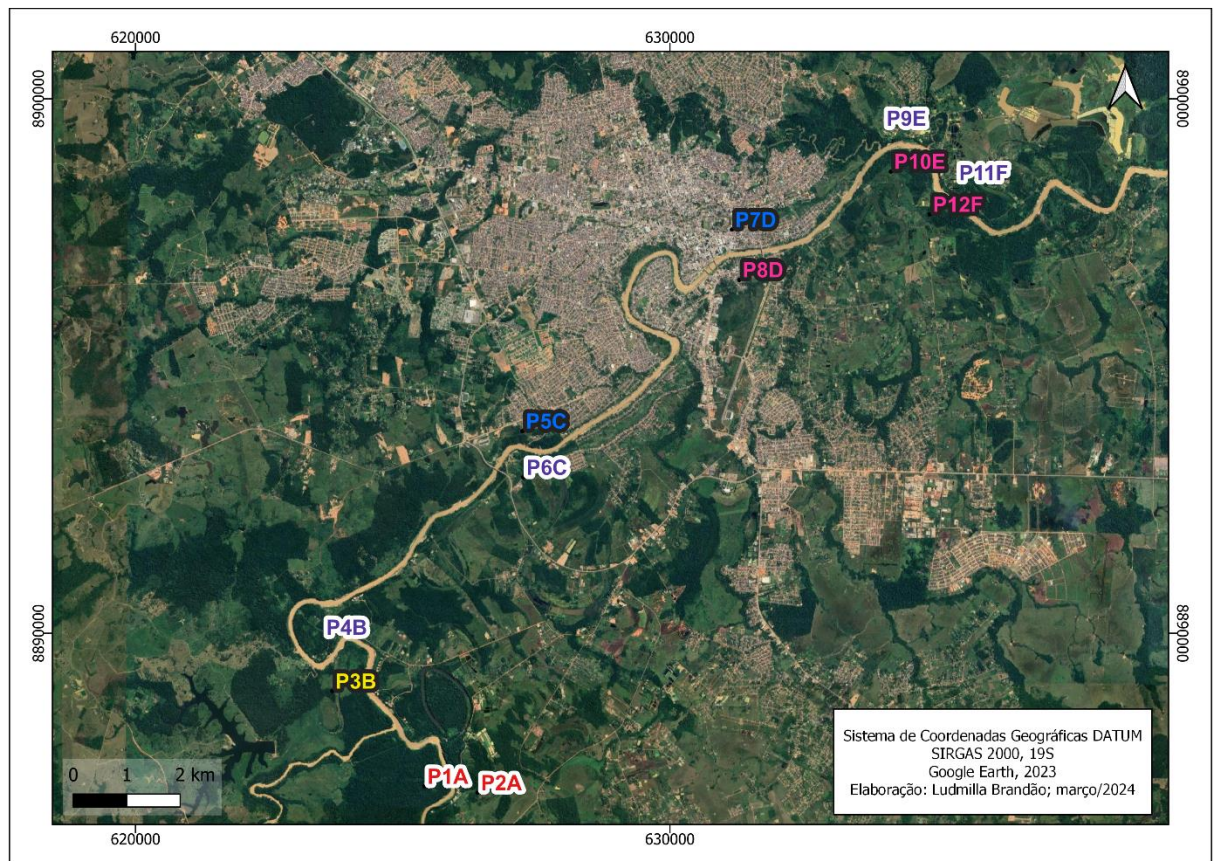


Fonte: Autora, 2024

O dendrograma dos pontos de coleta mostrou uma aglomeração de quatro grupos, as maiores similaridades observadas foram entre os pontos P5C e P7D (área urbanizada), pontos P1A e P2A (área rural à montante da área urbanizada), o ponto P3B manteve-se isolado, fato observado anteriormente nos gráficos de concentração, em que foi observada grande concentração de Cr, Cu, Pb e Zn neste ponto em relação

aos demais pontos. Os pontos P4B, P6C, P9E e P11F estão localizados em área de pastagem onde predomina a atividade de pecuária (Figura 30).

**Figura 30:** Representação dos agrupamentos da análise de cluster dos pontos de coleta no rio Acre.



Fonte: Autora, 2024

Os tipos de uso do solo nesse recorte, parecem influenciar diretamente na composição química dos sedimentos analisados, no que diz respeito à fixação ou não desses cátions em sua superfície. Há que se avaliar se a composição hidrogeoquímica da água tem favorecido essa disponibilização das cargas, bem como a origem desses metais.

### 3.2 Caracterização Hidroquímica – Água

Nesta pesquisa foram avaliados 16 parâmetros na matriz água, coletada em Rio Branco, a tabela descritiva (Tabela 07) apresenta os valores médios, máximos, mínimos, desvio padrão e quartis. Todas as análises de água seguiram recomendações do *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2012) descritas na tabela 03.

**Tabela 07:** Estatística descritiva dos parâmetros analisados na água do rio Acre.

Parâmetro	Média	Desvio padrão	Mínimo	Q1	Mediana	Q3	Máximo
pH	6,97	0,38	5,82	7,01	7,10	7,14	7,21
CE	123,45	5,67	114,60	121,18	123,55	126,83	134,90
Turbidez	170,33	66,84	109,00	138,25	145,00	165,00	309,00
Alcalinidade	45,50	3,12	40,00	43,50	45,50	49,00	49,00
Dureza	45,00	3,67	40,00	43,00	45,00	48,00	50,00
STD	0,225	0,125	0,080	0,130	0,230	0,260	0,460
Temp	27,48	3,33	21,60	25,90	28,00	29,50	33,10
Bromo	1,06	0,37	0,78	0,87	0,91	1,03	1,93
Cloreto	6,56	3,51	3,45	4,78	5,09	6,58	15,02
Fosfato	15,30	4,15	10,64	12,40	14,58	16,25	24,67
Nitrito	0,22	0,11	0,15	0,18	0,19	0,21	0,55
Sulfato	64,97	10,91	34,21	63,74	65,54	69,15	77,60
Sílica	20,22	1,56	17,99	19,36	19,95	20,83	23,63
Peróxido	2,39	0,56	1,90	2,12	2,20	2,50	4,00
Amônia	2,29	1,25	1,38	1,65	1,77	2,20	5,40
Sulfeto	0,38	0,11	0,26	0,31	0,36	0,41	0,62

Fonte: Autora (2024)

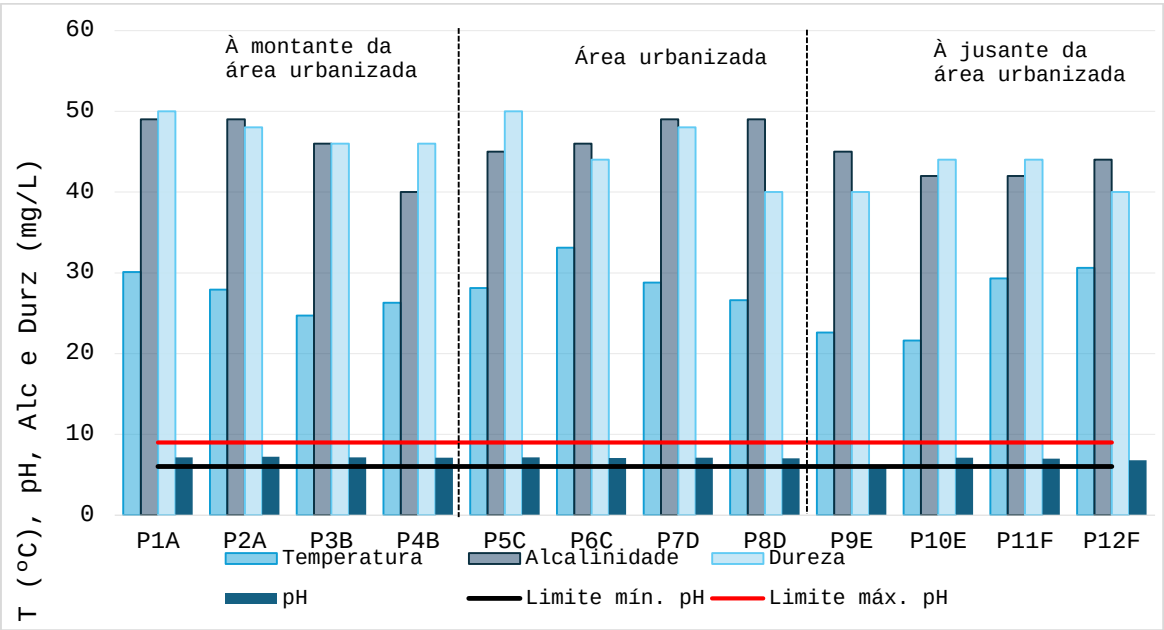
Todos os valores obtidos nesta pesquisa, foram comparados com as resoluções do Conselho Nacional de Meio Ambiente - CONAMA 357/2005 que dispõe sobre a classificação dos corpos d'água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento e CONAMA 430/2011 que estabelece critério e procedimentos para o lançamento de efluentes em corpos d'água (BRASIL, 2005; 2011).

Na matriz água as variáveis pH, cloreto, nitrito, sulfato, sílica e amônia apresentaram médias em conformidade com as referências descritas. Já turbidez, cobre, cromo, manganês, fosfato e sulfeto (Apêndice B) apresentaram valores acima do limite, tendo o sulfeto apresentado valores até 160 vezes maior do que o limite VMP (valor máximo permitido) estabelecido em lei.

3.2.1 pH, temperatura, alcalinidade, dureza, turbidez, condutividade e sólidos totais

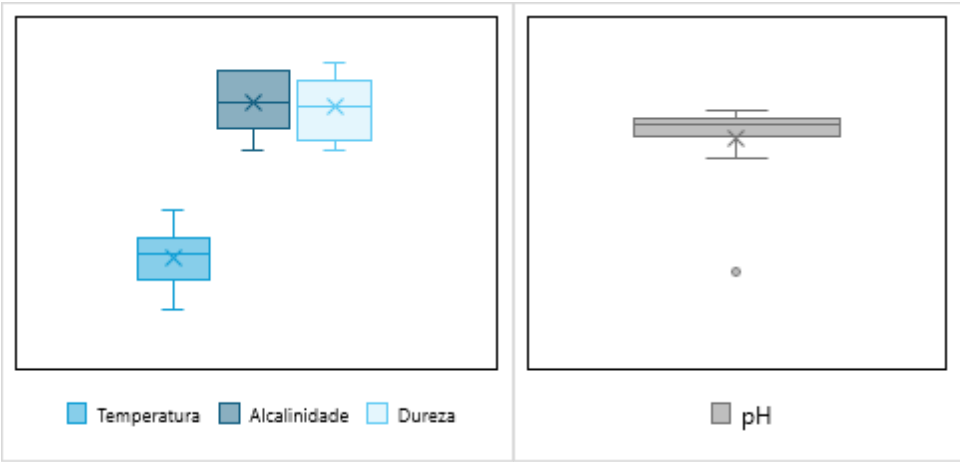
O gráfico de concentração (Figura 31) mostra que temperatura, alcalinidade e dureza apresentaram pouca variabilidade entre os pontos de coleta. O pH apresentou um *outlier* (Figura 32) no ponto P9E (foz do igarapé São Francisco).

**Figura 31:** Gráfico de concentração de T, ALC , DURZ e pH em água



Fonte: Autora (2024)

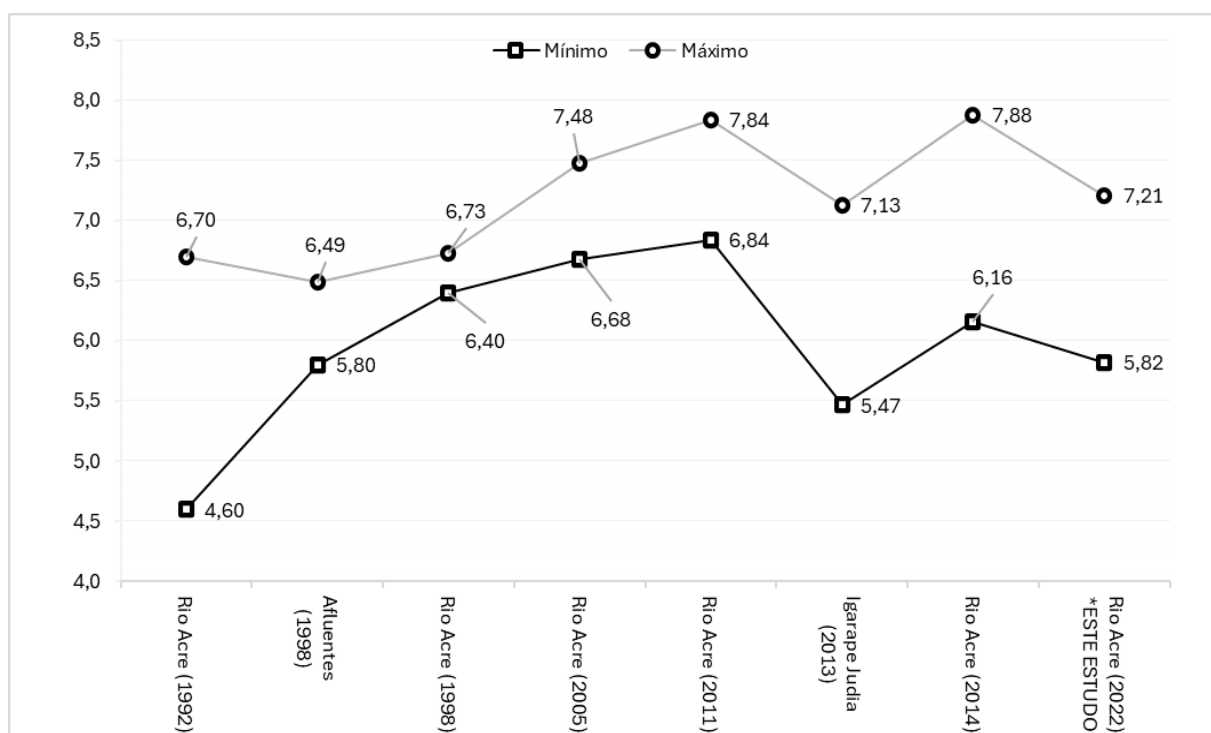
**Figura 32:** gráfico *boxplot* de T, ALC , DURZ e pH



Fonte: Autora (2024)

O pH neutro a levemente ácido é característico de rios amazônicos (SIOLI, 1991), por conta da composição dos solos ácidos da região. Valores semelhantes são encontrados na bacia dos rios Solimões (6,47), Amazonas (6,57), Juruá (7,53) e Purus (6,79) (SILVA *et al.*, 2013). A série histórica (Figura 33) mostra que o pH do rio Acre analisado em 2022 encontra-se dentro da variação esperada.

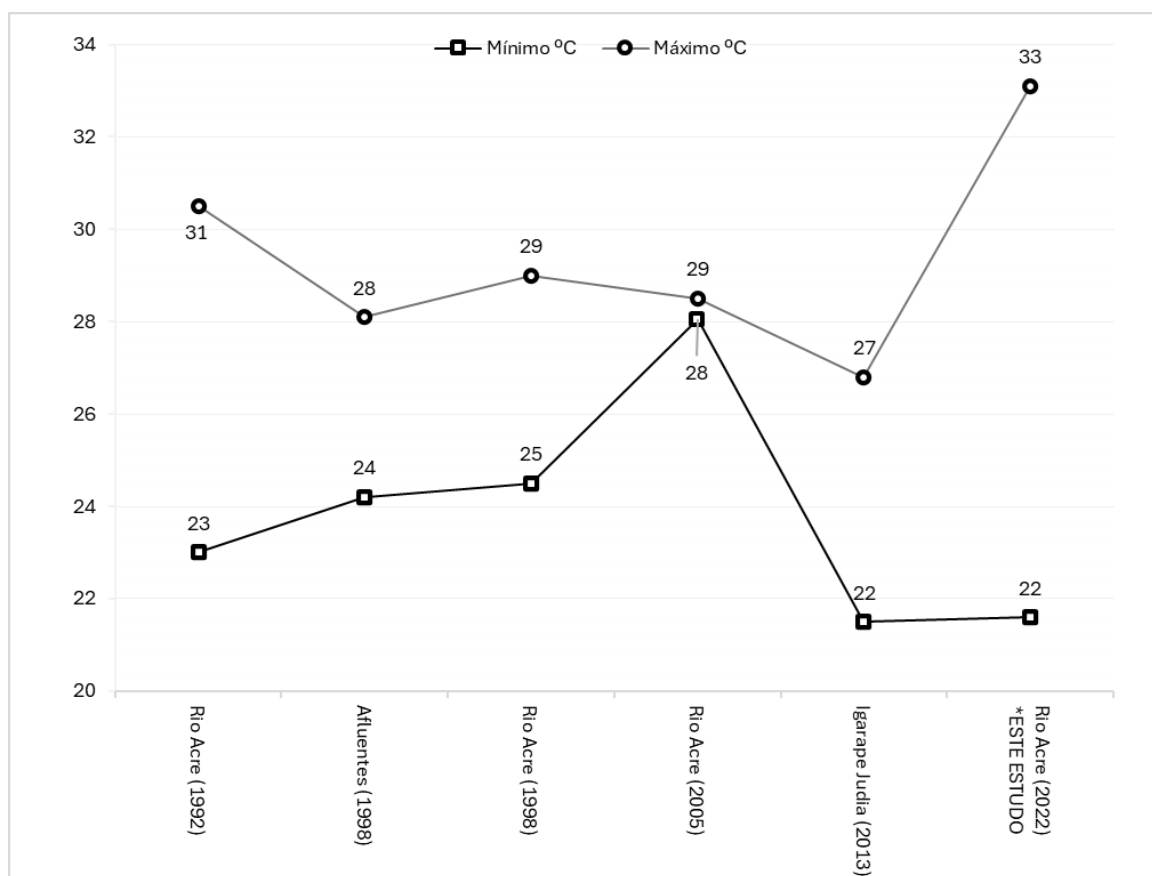
**Figura 33:** Concentração de pH na bacia do rio Acre, de 1992 a 2022.



Fonte: ABREU, MAIER, 1992; MASCARENHA *et al.*, 2004; FURTADO, 2005; SANTOS, 2013a; NETO, 2014. Org. Autora (2024).

O mesmo comportamento foi observado no gráfico de temperatura (Figura 34), por se tratar de uma região de clima quente, equatorial úmido com elevadas temperaturas na maior parte do ano e máximas de 35 °C (ACRE, 2010).

**Figura 34:** Temperatura na bacia do rio Acre, de 1992 a 2022.



Fonte: ABREU, MAIER, 1992; MASCARENHA et al., 2004; FURTADO, 2005; SANTOS, 2013a. Org. Autora (2024).

A alcalinidade da água é uma medida da concentração de ânions básicos (carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos) e releva a habilidade de uma amostra em agir como uma base pela reação com próton (BAIRD; CANN, 2011; MACEDO, 2003). A alcalinidade em águas superficiais é considerada temporária porque os bicarbonatos ( $\text{HCO}_3^-$ ), pela ação do calor, se decompõem em gás carbônico ( $\text{CO}_2$ ), água e carbonatos insolúveis ( $\text{CO}_3^{2-}$ ) que se precipitam (FUNASA, 2006).

Alcalinidade encontrada nesta pesquisa foi semelhante à variação encontrada por Furtado (2005) 43 a 49 mg/L em Rio Branco e superior à encontrada por Santos (2013a) no igarapé Judia, importante afluente do rio Acre (0,5 a 36 mg/L), a variabilidade encontrada pelo autor é explicada pelas campanhas de coletas terem sido realizadas em período de cheia e seca do igarapé, diferente dessa pesquisa que foi realizada em apenas uma campanha.



Já a dureza é um índice que mede a concentração total dos cátions cálcio ( $\text{Ca}^{2+}$ ) e magnésio ( $\text{Mg}^{2+}$ ), que em excesso podem causar problemas como corrosão de tubulações e deposição de calcário (BAIRD; CANN, 2011).

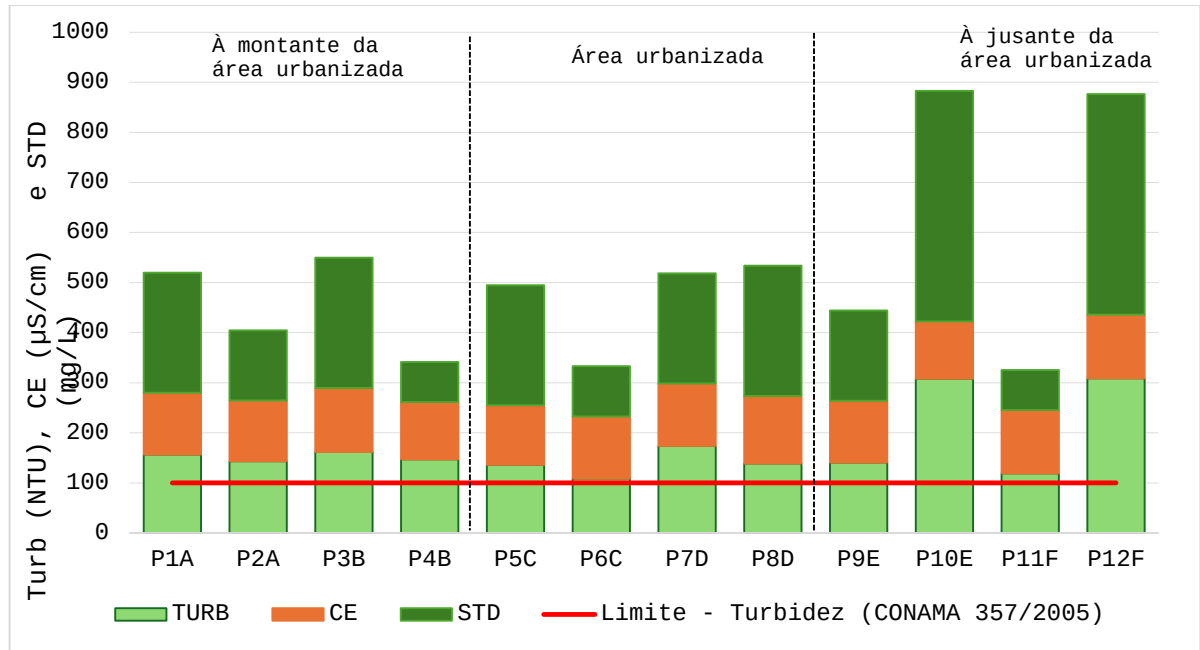
Santos (2013a) encontrou variação de 0,40 a 28mg/L, atribuindo a fontes naturais, por conta da lixiviação de Ca e Mg no período chuvoso. Não foram encontradas outras referências de dureza na bacia do rio Acre para comparação.

A concentração de alcalinidade e dureza encontrada no rio Acre é considerada pequena, mas reflete as cargas disponíveis no sistema aquoso que competem, por exemplo, com as cargas da superfície dos sedimentos, podendo favorecer a mobilização de determinadas espécies químicas no sistema.

A turbidez é uma medida das partículas sólidas em suspensão, que reduzem e alteram a transmissão de luz através de um líquido, é provocada por diversos fatores: presença de plâncton, algas, matéria orgânica, metais como zinco e ferro, compostos de manganês e silicatos, além do despejo de efluentes industriais e doméstico (MACEDO, 2003; SPERLING 2007).

Apesar de a turbidez encontrada no rio Acre (Figura 35) ser maior do que o limite previsto na resolução CONAMA 357/2005 (BRASIL, 2005), reflete as condições naturais de rios amazônicos (SIOLI, 1991; SOUZA, 2015).

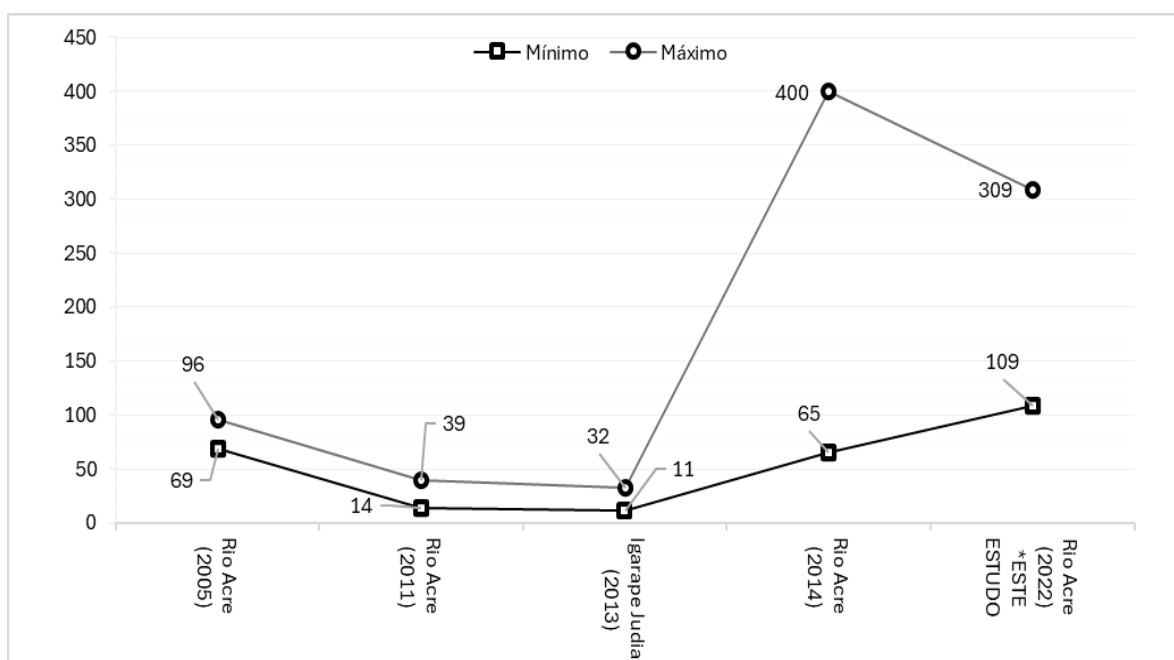
**Figura 35:** Gráfico de concentração de TURB, STD e CE nos pontos de coleta.



Fonte: Autora (2024)

As maiores concentrações foram observadas na área rural P10E e P12F, à jusante da área urbanizada, em local com baixa densidade vegetal com solo exposto (agricultado e pastagem) suscetíveis à erosão. Os elevados valores reportados por Neto (2014) estão relacionados com a precipitação (977 a 981 NTU) no período chuvoso da coleta (Figura 36).

**Figura 36:** Turbidez na bacia do rio Acre, de 2005 a 2022.

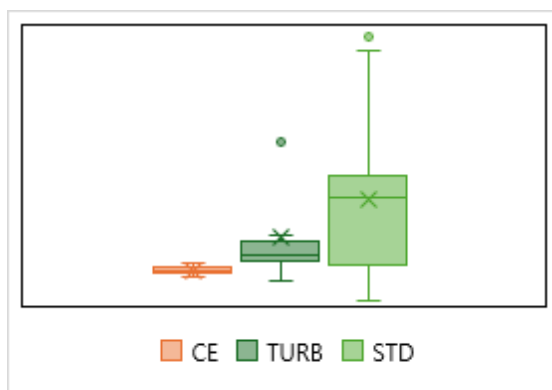


Fonte: FURTADO, 2005; SOS, 2011; SANTOS, 2013a; NETO, 2014. Org. Autora (2024).

A turbidez elevada em rios amazônicos reflete a natureza geológica das bacias de drenagem, os elevados índices pluviométricos da região com intensas chuvas que carreiam partículas de argila, silte e fragmentos de rocha do solo para os ambientes aquáticos (SOUZA, 2015). Um alto fluxo de matéria em suspensão é transportado pelos rios, elevando a turbidez, a exemplo do rio Amazonas que transporta aproximadamente 800 milhões de tonelada por ano, recebendo contribuições andina através dos afluentes Solimões e Madeira (SILVA *et al.*, 2013).

Assim, a elevada turbidez reflete na elevada concentração de sólidos suspensos na água. Nesta pesquisa a concentração máxima também foi observada na área rural à jusante do perímetro urbano de Rio Branco, divergindo bastante da média (225 mg/L) como pode ser observado nos pontos *outliers* do gráfico *boxplot* (Figura 37).

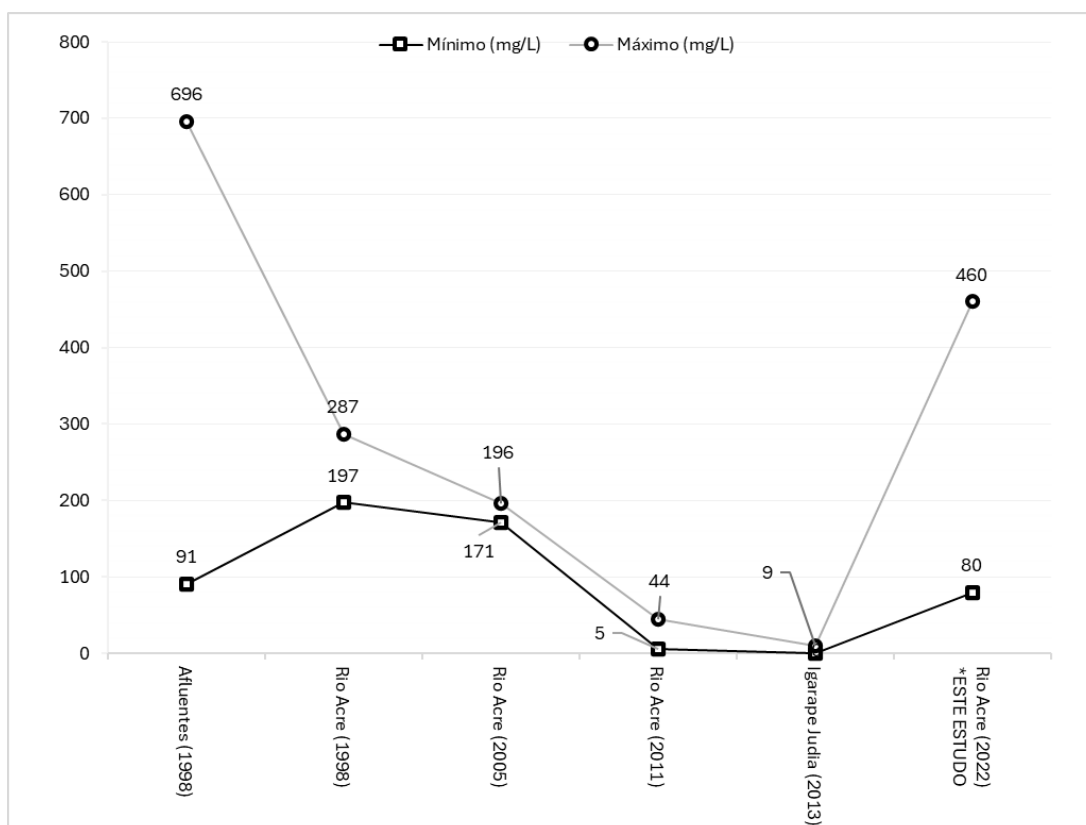
**Figura 37:** Gráfico *boxplot* de turbidez, sólidos totais e condutividade elétrica



Fonte: Autora (2024).

A falta de floresta ripária deixa o solo suscetível ao surgimento de processos erosivos, que com a chuva carregam os componentes dos solos suscetíveis a erosão ou agricultados, transportando partículas de argila, silte e fragmentos de rocha (SILVA *et al.*, 2022) aumentando a concentração de sólidos suspensos na água.

**Figura 38:** Sólidos totais na bacia do rio Acre, de 1998 a 2022.



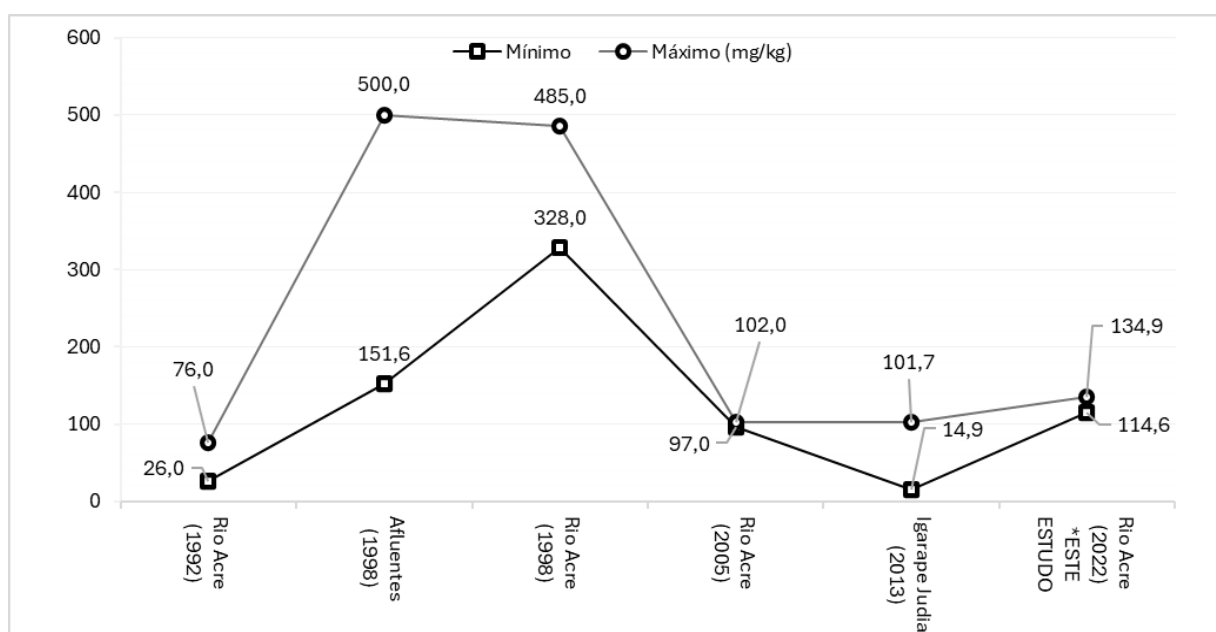
Fonte: MASCARENHA *et al.*, 2004; FURTADO, 2005; SOS, 2011; SANTOS, 2013a. Org. Autora (2024).

A concentração máxima de ST encontrada nesta pesquisa (460 mg/L) reflete um aumento de mais de 200% na concentração máxima reportada por Furtado (2005) (196 mg/L) no mesmo período sazonal (seca) e trecho avaliados nesta pesquisa. As maiores concentrações foram encontradas nos afluentes do rio Acre (MASCARENHAS et al, 2004).

Os diferentes usos de solos região da bacia hidrográfica do rio Acre resultaram em modificações nos parâmetros de qualidade da água, com áreas agrícolas influenciando a turbidez e os sólidos suspensos devido a processos erosivos (BENCHIMOL; KRONBERG 1992). Um dos impactos dessas elevadas concentrações de sólidos na água do rio Acre, é o encarecimento no tratamento de água, já que é necessária a utilização de maior quantidade de coagulantes que decantem as partículas em suspensão (NETO, 2014).

Quanto maior a concentração de sólidos dissolvidos na água, maior a condutividade elétrica, ela reflete a concentração de cátions e ânions dissolvidos e é influenciada pelo volume de chuvas, composição de rochas e usos dos solos (SPERLING, 2007). A CE apresentou valores semelhantes aos de Furtado (2005) e Santos (2013a) e menores do que os avaliados nos anos de 1992 e 1998 (Figura 39).

**Figura 39:** CE na bacia do rio Acre, de 1992 a 2022.



Fonte: ABREU, MAIER, 1992; MASCARENHA et al., 2004; FURTADO, 2005; SANTOS, 2013a. Org. Autora (2024).

Silva (1996) encontrou variações de condutividade de 7,7 a 38,5 PS/cm no igarapé Barro Branco e 82,0 a 182,0 pS/cm no igarapé Quarenta em Manaus, para o autor a condutividade relativamente baixa do igarapé Barro Branco é reflexo de sua localização, por se encontrar em local preservado de poluição. Em ambientes naturais a CE apresenta valores entre 10 a 100  $\mu$ S.cm e em ambientes poluídos até a 1000  $\mu$ S.cm em função da concentração de efluentes (SPERLING, 2007).

Vieira *et al.* (2022) monitoraram 12 sub-bacias pertencentes à bacia do rio Itajaí-Mirim, constatando que todos os riachos com uso da terra urbano apresentaram uma variabilidade maior de condutividade elétrica, indicando impacto do lançamento de esgotos domésticos na água.

### 3.2.2 Sulfato, sulfeto, fosfato, nitrito, amônia, brometo, cloreto, peróxidos e sílica

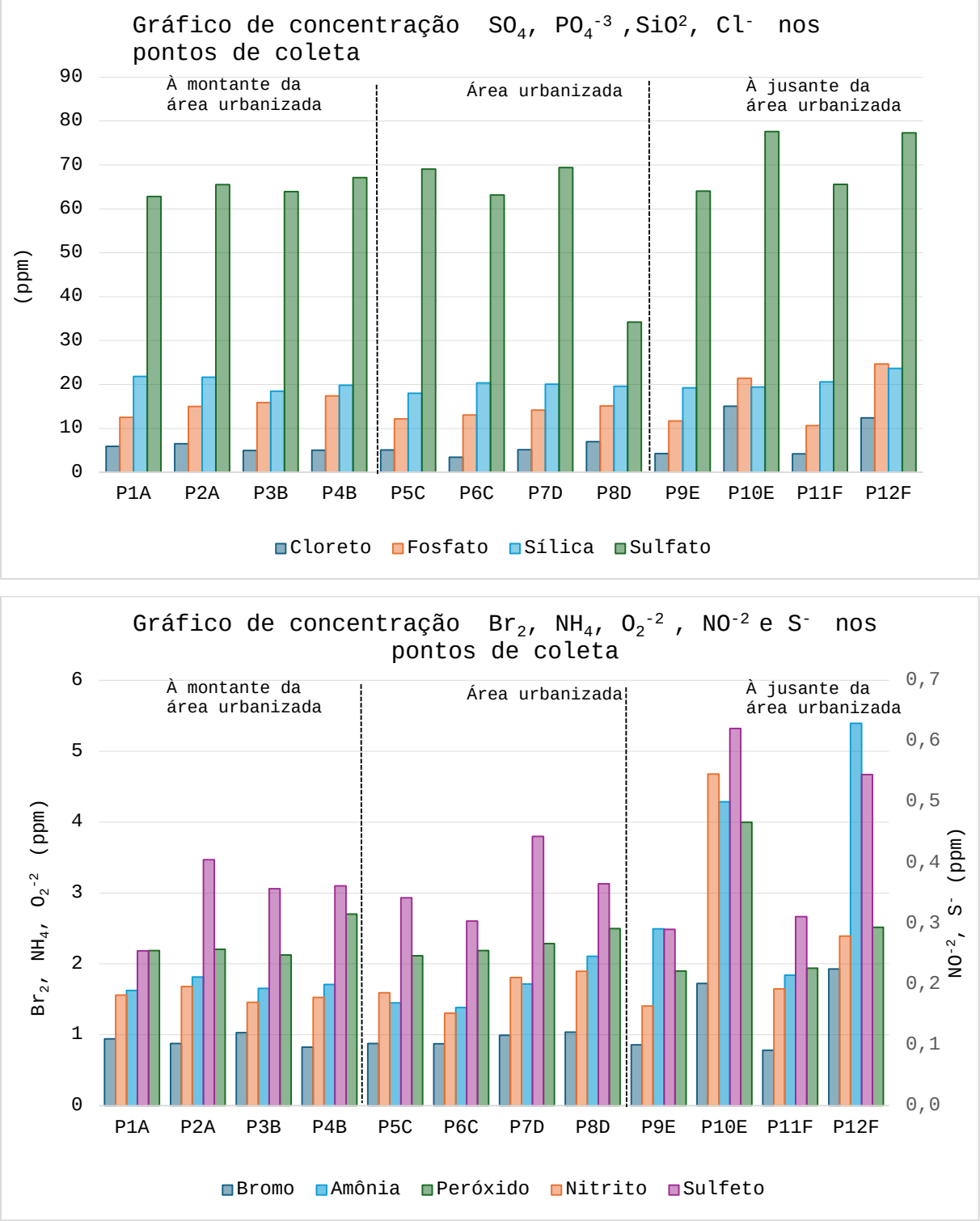
Os principais parâmetros físico-químicos associados ao lançamento de efluentes são os nutrientes: nitrogênio e suas frações (N orgânico, amônia, nitrito e nitrato) e fósforo e suas frações (solúvel e particulado) (Sperling, 2007). Estes são indicadores de eutrofização, crescimento excessivo de algas e plantas (SANTOS *et al.*, 2018).

Na resolução CONAMA 357/2005 o valor máximo permitido de fosfato é 0,15 mg/L, valor muito abaixo do encontrado nesta pesquisa, variação de 10,64 a 24,67 mg/L e na de Furtado (2005) variação de 14 a 16 mg/L. Abreu e Maier (1992) reportam concentrações de 0,018 e 0,038 mg/L (quase 65.000 vezes menor) no rio Acre e Santos (2013a) 1,42 a 5,01 mg/L no igarapé Judia (quase 2.000 vezes menor).

Os resultados confirmam a vulnerabilidade do rio Acre à impactos pelo despejo de efluentes. Já que as principais fontes do íon fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ) são os polifosfatos dos detergentes (tripolifosfatos de sódio - STP  $\text{Na}_5\text{P}_3\text{O}_{10}$ ), o esgoto bruto na área urbana e os fertilizantes fosfatados em área rural (BAIRD; CANN, 2011).

As concentrações de nitrito e amônia encontram-se dentro do VMP do CONAMA 357/2005 (Figura 40), com variação de 0,15 a 0,55 mg/L de nitrito e 1,38 a 5,40 mg/L de amônia, mas são concentrações maiores do que as reportadas por Abreu e Maier (1992) 0,001 – 0,004 mg/L de nitrito e SOS AMAZONIA® (2011) 0,12 a 0,38 mg/L. Já para amônia os autores reportam quantidades de 0,20 a 1,2 mg/L no rio Acre (ABREU;MAIER, 1992) e 0 a 2,63 mg/L no igarapé Judia (SANTOS, 2013a).

**Figura 40:** Gráficos de concentração de sulfato, fosfato, sílica, cloreto, brometo, amônia, peróxido, nitrito e sulfeto.



Fonte: Autora (2024).

É notável que expansão urbana e o consequente aumento populacional, junto com a falta de saneamento básico, contribuem para o aumento desses contaminantes no rio Acre. É importante destacar que A Pesquisa Nacional por Amostra de Domicílios (PNAD) do IBGE (2022) evidenciou esses dados, ao mostrar que no Acre pouco mais da população em área urbana é atendida pelo serviço de saneamento básico (coleta de efluente), sendo que 27% dos domicílios urbanos possuem fossa séptica não ligada à rede geral de esgoto e 25% fazem uso ainda de fossa rudimentar ou outras formas inadequadas de lançamento do esgoto, como o despejo direto em igarapés, rios ou lagos.

Para sulfato e sulfeto não foram encontradas referências na bacia do rio Acre para comparação, e todas as amostras de sulfeto estão acima do VMP CONAMA 357/2005. Se por um lado a presença de sulfetos favorece a complexação de metais pesados em sais sulfídricos ela também indica condições oxidativas do ambiente, já que são resultados da oxidação de sulfatos, na degradação bacteriana de matéria orgânica.

Como explicam Baird e Cann (2011) a reação dos cátions de metais pesados  $M^+$  (onde M é Hg, Pb ou Cd) com as unidades sulfidrilas produz sistemas estáveis como R-S-M-S-R, e permite, por exemplo, que o metilmercúrio (forma mais perigosa de Hg em água porque é solúvel em tecidos gordurosos) seja fotodegradado em águas superficiais.

Outros importantes agentes oxidantes detectados no rio Acre foram: os peróxidos, brometos e cloretos. Não foram encontradas referências para comparação. Todos apresentaram elevadas concentrações na jusante da área urbanizada, pontos P10E e P12F, evidenciando que essas áreas têm recebido as maiores concentrações de poluentes.

Cabe destacar que o estudo de Furtado (2005) na área urbana de Rio Branco também apontou uma deterioração na qualidade da água na foz do igarapé São Francisco, principal afluente do rio Acre, altamente impactado, devido à sobrecarga de esgoto sem tratamento lançado nesse curso d'água.

Furtado (2005) evidenciou a influência do efluente doméstico como potencial fonte de contaminação, destacando a elevada presença de agentes patógenos e nutrientes (DBO, NT, PT e coliformes termotolerantes) no trecho mais urbanizado do rio Acre, indicando a poluição da água.

SENA *et al.* (2012) também afirmam que a bacia hidrográfica do rio Acre está sujeita a contaminação devido à influência do efluente doméstico, que contém a alta carga de matéria orgânica, agentes patogênicos, nutrientes e agentes oxidantes. Além disso, observam que os diferentes usos do solo na região provocaram alterações significativas nas relações entre os parâmetros de qualidade da água analisados.

Segundo relatório da ONG SOS AMZONIA®, o Rio Acre na área urbana de Rio Branco encontra-se contaminado por esgotamento sanitário e ressalta a importância de medidas efetivas de saneamento básico e gestão ambiental na região para mitigar os impactos da poluição hídrica e garantir a qualidade da água do rio Acre.



## CONCLUSÃO

A pesquisa evidencia a importância do rio Acre para a cidade de Rio Branco, principalmente como fonte de abastecimento de água. Evidencia também, a falta de infraestrutura de saneamento básico na região, que resulta em despejo significativo de efluentes com altas cargas de contaminantes nesse corpo d'água. O que representa uma ameaça à fauna e à saúde da população.

A concentração dos elementos Cd, Cr, Cu, Pb, Hg, Ni, Pb e Zn quantificados no sedimento mostram que apesar de atenderem aos limites estabelecidos em lei, precisam ser monitorados a fim de entender o comportamento geoquímico, quanto à acumulação, mobilização e disponibilização para água.

Há maior concentração de Cd e Zn na área rural, em relação à área urbana, e forte correlação desses metais com a matéria orgânica, que também tem menor concentração próxima ao núcleo urbano.

Cr e Pb também apresentaram maiores concentrações em área rural com pastagem e agricultura nas margens do rio. Os dados mostram que a concentração de Cr, Cu e Pb é menor em relação ao encontrado nas margens, indicando uma possível origem geológica para metais. A maior concentração na área de dragagem mostra disponibilização pelo revolvimento de camadas mais inferiores do sedimento, que expõem camadas mais antigas para a superfície.

Não houve evidências de enriquecimento de Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Z ao longo desses anos nos sedimentos e margens do rio Acre. Com exceção do Hg todos demonstraram diferentes comportamentos em relação a outros corpos d'água amazônicos, a baixa concentração desses metais no sedimento indica pouca inserção desses metais ao meio, ou pouca aderência desses metais às cargas presentes no sedimento analisado.

Com relação ao Hg a série histórica mostra que de 1998 a 2022 houve aumento de 100% no teor mínimo de Hg quantificado no sedimento do rio Acre, representando um alerta para o monitoramento desse metal. A quantidade mínima quantificada também foi superior ao reportado por outras literaturas na bacia do rio Madeira em Rondônia, rio impactado diretamente pela mineração, inclusive do garimpo ilegal de ouro.

As condições oxidativas da água, evidenciada pelas altas cargas quantificadas nesse estudo podem estar favorecer a mobilização desses metais para a coluna d'água, principalmente próximo ao núcleo urbano.

As influências antrópicas ficaram evidenciadas nas concentrações dos parâmetros analisados na água que tiveram a maior concentração quantificada na foz do igarapé São Francisco e nas áreas rurais, sem vegetação ripária que parece contribuir para aumento da turbidez, sólidos suspensos e condutividade devido à ocorrência de processos erosivos.

A vulnerabilidade do rio Acre foi evidenciada pela influência direta dos esgotos não tratados e das águas pluviais nas áreas urbanas ao longo do rio que aumentam a concentração de sulfatos, fosfatos e compostos nitrogenados.

A ausência de estudos geoquímicos abrangentes dos sedimentos dos rios na região norte é uma lacuna significativa, compreender a origem e distribuição dos metais pesados nos sedimentos é essencial para avaliar o grau de contaminação e os potenciais riscos ambientais.

A demanda por ações eficazes de gestão ambiental e saneamento básico na região da bacia hidrográfica do rio Acre, visando mitigar os impactos da poluição hídrica e promover a sustentabilidade dos recursos naturais é urgente. A implementação de uma unidade de tratamento de efluente, o gerenciamento da ocupação do solo e o monitoramento constante da qualidade da água são essenciais para proteger esse ecossistema e garantir saúde à população local.

## REFERÊNCIAS

- ACRE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente (SEMA). **Plano estadual de recursos hídricos do Acre**. 1. ed. Acre, 2012. Disponível em <[http://imc.ac.gov.br/wp-content/uploads/2016/09/Plano\\_Estadual\\_Recursos\\_Hidricos.pdf](http://imc.ac.gov.br/wp-content/uploads/2016/09/Plano_Estadual_Recursos_Hidricos.pdf)>. Acesso em: setembro de 2022.
- ACRE. Governo do Estado do Acre. Programa Estadual de Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre. **Zoneamento Ecológico-Econômico do Estado do Acre Fase II: documento Síntese – Escala 1:250.000**. 2. ed. Rio Branco: SEMA, 2010.
- ALBAREDE, F. **Geoquímica**: uma introdução; tradução Fábio R. Dias - São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- ALMEIDA, R. A. S. **Índices de Qualidade de Água**. Cruz das Almas: Editora UFRB, 2021.
- ANA. Agência Nacional De Águas e Saneamento Básico. **Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras de água, Sedimento, Comunidades Aquáticas e Efluentes Líquidos**, Agência Nacional de Águas, 2011.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil**: regiões hidrográficas brasileiras - Edição Especial. Brasília: ANA, 2015.
- ANA. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico. **Atlas esgotos**: despoluição de bacias hidrográficas. Brasília: ANA, 2017
- ANDRADE, F. R. D. **Geoquímica**: uma introdução. São Paulo: Oficina de Textos, 2011.
- ANDRADE, M.; BATISTA, A. H.; CAMPOS, M. S.; FAVARETTO, N.; GRASSI, M. T.; MELO, V. F. Chumbo e Zinco em Águas e Sedimentos de Área de Mineração e Metalurgia de Metais. **Química Nova**. vol. 35, n. 1, p. 22-29, 2012.
- APHA; **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 22<sup>th</sup> ed., American Public Health Association; American Water Works Association; Water Environment Federation: Washington, 2012.
- ARCOS, F. O.; SANTOS, W. L.; LIMA, K. D. J. V. L. Processos erosivos às margens do rio acre: o caso área central do município de rio branco, acre, brasil. **Revista geonorte**, Edição Especial, V.2,N.4,p.622–633, 2012.
- ATKINS, P.; JONES, L; LAVERMAN, L. **Princípios de Química**: questionando a vida moderna e o meio ambiente. Porto Alegre: Bookman. 2018.
- AYRES, G. A. **Distribuição do mercúrio nas águas superficiais do Rio Madeira**. Dissertação (mestrado em Geociências). Universidade Federal Fluminense. Niterói, 2004. F.69

BASTOS, W.R.; FONSECA, M. F.; PINTO, F. N.; REBELO, M. F.; SANTOS, S. S.; SILVEIRA, E. G.; TORRES, J.P.M.; MALM, O.; PFEIFFER, W.C. Mercury Persistence in Indoor Environments in the Amazon Region, Brazil. **Environ. Res.** 2004, 96, 235–238, doi:10.1016/j.envres.2004.01.008.

BÉLEM, F. L. **Estudo da distribuição de mercúrio em sedimentos no período da cheia do Rio Mutum-Paraná, Rondônia.** Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional e Meio Ambiente) Fundação Universidade Federal de Rondônia / UNIR. Porto Velho, Rondônia, 2013. F. 98.

BENCHIMOL, R. E.; KRONBERG, B. I. Geochemistry and geochronology of surficial Acre basin sediments (western amazonia): key information for climate reconstruction. **Acta Amazonia**, 22 n1 51-69, 1992.

BERNARDINO, D. S. M; OLIVEIRA, A. M.; DINIZ, M. T. M. Georges Bertrand e a Análise Integrada da Paisagem em Geografia. **Revista de Geociências do Nordeste**, [S. l.], v. 4, n. 2, p. 63–80, 2018.

BERTRAND, G. Paisagem e geografia física global. Esboço metodológico. **REAGA - O Espaço Geográfico em Análise**, v. 8, p. 141-152. Curitiba - PR: UFPR, 2004.

BOSSETI, E. P. **Geomorfologia 2:** Licenciatura em Geografia - Educação a distância.UEPG/NUTEAD, 2010. 94p.

BRASIL. **Lei nº 9.433**, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. D.O.U de 09/01/1997, pág. nº 470.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA.CONAMA **Resolução n.º 454**, de 1º de novembro de 2012. Estabelece as Diretrizes Gerais e os Procedimentos Referenciais para o Gerenciamento do Material a ser Dragado em Águas Sob Jurisdição Nacional. Brasília, DF: Ministério do Meio Ambiente, [2012]. Disponível em: <<[https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res\\_conama\\_454\\_2012\\_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf](https://www.icmbio.gov.br/cepsul/images/stories/legislacao/Resolucao/2012/res_conama_454_2012_materialserdragadoemaguasjurisdicionaisbrasileiras.pdf)>> Acesso em: novembro de 2022.

BRASIL. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE, MMA. CONAMA **Resolução n.º 430/2011**. Complementa e altera a Resolução n 357/2005. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução CONAMA. Diário Oficial da União, 2011.

CALIJURI, M. C. **Engenharia ambiental:** conceitos, tecnologia e gestão. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013.

CARVALHO, L. C. F. de. **Caracterização físico-química da água e mineralógica e química do material em suspensão e de sedimento de fundo do lago Amapá (Acre).** Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Pará: Centro de Geociências: Belém, 2006.

CAVALCANTE, A. M. S ; SANTOS, R. N. E. S. 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** (2021), 21 (1): 105-123.

CAVALCANTI, M. E. **Benefícios do uso do cromo na produção bovina**. 2022. 26 f. Trabalho de conclusão de curso (Graduação em Zootecnia) - Pontífica Universidade Católica de Goiás, Goiânia.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia Fluvial**. v. 1. São Paulo: Edgard Blücher Ltda, 1981.

CORRÊA, A. C. B, GIRÃO, O. A contribuição da geomorfologia para o planejamento da ocupação de novas áreas. **Revista de Geografia**. Recife: UFPE DCG/NAPA, v. 21, n. 2, p. 36-58, 2004.

FARIAS, C. S.; ARAUJO, J. J. C. N.; MACEDO, G. S.; FARIAS, M. E. S. O crescimento desordenado da cidade de Rio Branco e o ordenamento territorial a partir do plano direto de 2006. **Atelie Geografico** - Goiania - GO. V 4. n 2 .2010 p.107-121.

FONSECA, C. S.; AMARAL, V. S.; NAVONI, J. A. Impacto antrópico nos recursos hídricos do estado do rio grande do norte: uma análise geoespacial de vulnerabilidade ambiental. **Caderno Prudentino De Geografia**, 1(46), 49–67 (2024).

FRANCO, G. **Tabela de composição química dos alimentos**. 9º ed. São Paulo: Editora Atheneu, 2002.

FUNDAÇÃO OSWALDO CRUZ. Escola Nacional de Saúde Pública Sergio Arouca. Nota Técnica: maio 2023 - **Análise regional dos níveis de mercúrio em peixes consumidos pela população da Amazônia brasileira: um alerta em saúde pública e uma ameaça à segurança alimentar**. Rio de Janeiro: FIOCRUZ/ENSP; WWF Brasil; Greenpeace; Instituto Socioambiental; Instituto de Pesquisa e Formação Indígena. p.1-10, 2023.

GARCIA, A. C.; VIEIRA, L. J. S.; JARDULI, L. R; ABRAHÃO, V. P.; SHIBATTA, O. A. Fishes (Osteichthyes: Actinopterygii) from igarapés of the rio Acre basin, Brazilian Amazon. **Check List: Journal of especies lists and distribution**. 9(6): 1410–1438, 2013.

GUIMARÃES, E. C. **Avaliação dos níveis basais de mercúrio na área de influência da UHE Jirau - Rio Madeira/Amazônia**. 2009. 73 p.; Dissertação (mestrado) - Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Goiânia, 2009. F. 73.

DUARTE, A. F. Considerações sobre a Bacia do Rio Acre. **CT-Hidro**, v. 37, n. 1, p.1-28, 2007.

EMBRAPA, **Manual de procedimentos de coleta de amostras em áreas agrícolas para análise da qualidade ambiental**: solo, água e sedimentos, 1ª. ed., Ministério da Agricultura e do Abastecimento: Jaguariúna, 2006.

FALCÃO, C. L. C.. A Teoria geral dos Sistemas e o entendimento dos processos erosivos em uma bacia hidrográfica. Equador: **Revista do Programa de pós graduação em geografia da Universidade Federal do Piauí**, v. 9, n. 4, p.21-39, 2020.

FURTADO, C. M. **Caracterização limnológica e avaliação da qualidade da água de um trecho urbano do rio Acre, Rio Branco – AC, Brasil**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Acre: programa de pós-graduação em ecologia e manejo de recursos naturais. Acre, 2005.

GUERRA, A. T. **Estudo Geográfico do Território do Acre**. Rio de Janeiro: Serviço Gráfico do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1955.

HORBE, A. M. C.; PAIVA, M. R. P.; MOTTA, M. B.; HORBE, M. A. Mineralogia e geoquímica dos perfis sobre sedimentos neógenos e quaternários da bacia do Solimões na região de Coari - AM. **Acta Amazonica** - vol 37 (1), 81 - 90, 2007.

HORBE, A. M. C.; QUERIOZ, M. M. A.; MOURA, C. A. V.; TORO, M. A. G. Geoquímica das águas do médio e baixo rio Madeira e seus principais tributários - Amazonas - Brasil. **Acta Amazonica** VOL. 43(4): 489 - 504, 2013.

KOUMROUYAN, A. & PEREIRA, G. S. Química de elementos-traço nos sedimentos do Lago do Parú (Manacapuru - Amazonas), sob influência do pulso de inundação do baixo Rio Solimões. **Acta Amazonica** vol.38. 3. p.491-502. 2008.

LACERDA, L. D.; SOUZA, M.; RIBEIRO, M. G. The effects of land use change on mercury distribution in soils of Alta Floresta, Southern Amazon. **Environmental Pollution**, v. 129, n. 2, p. 247-255, 2004.

LICHT O.A.B.. 1998. **Prospecção Geoquímica**: Princípios, Técnicas e Métodos. CPRM. Rio de Janeiro, 236 p.

LINHARES D.P; **Mercúrio em solos e sedimentos na sub-bacia do Mutum-Paraná em Rondônia**. Dissertação; UNIR; Porto Velho; 2009.

LOPES, C. V. M; NETO O. G. Z ; KRÜGER, V. (Org.) . **Propostas para o ensino de química**: Águas. Porto Alegre: SE-RS, 1997. v. 1. 262p .

MACÊDO, J.A.B. **Métodos laboratoriais de análises físico-químicas e microbiológicas**: Águas & efluentes & solo. 4ª ed. 1056p. Belo Horizonte: Conselho Regional de Química, 2013.

MASCARENHAS, A. F. S.; BRABO, E. S.; SILVA, A. P.; FAYAL, K. F.; JESUS, I. M.; SANTOS, E. C. O. Avaliação da concentração de mercúrio em sedimentos e material particulado no rio Acre, estado do Acre, Brasil. **Acta Amazonica** v.. 34(1) 61 - 68, 2004.

MENDONÇA, J. F. ; MORAIS, M. J. ; BONFONTI. D. C. ; CAVALCANTE, M. M. A. . Rio Branco-Acre: de cidade ribeirinha à cidade de grandes empreendimentos imobiliários. **Revista Ciência Geográfica** , v. XXIV, p. 1321-1342, 2020.

MORAIS, M.J. **Rio Branco – AC, uma cidade de fronteira: o processo de urbanização e o mercado de trabalho, a partir dos planos governamentais dos militares aos dias atuais**. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2000.

MORAIS, M. J; SIMIONE, S. S; PAULA, E. A., FERREIRAS, A. P. C. Rio Acre e inundações, desastres de uma formação socioespacial. **WATERLAT-GOBACIT NETWORK WORKING PAPERS** , v. 2, p. 47-71, 2015

MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. **Estatística Básica**. 6 ed. São Paulo: Saraiva, 2010.

NASCIMENTO, L. P. ; REIS, D. A.; ROESER, H. M. P.; SANTIAGO, A. F. Avaliação Geoquímica de Metais em Sistemas Fluviais Afetados por Atividades Antrópicas no Quadrilátero Ferrífero. **Eng. Sanit. Ambiental**, v. 23, n. 4, p. 767-778, 2018. DOI: 10.1590/S1413-41522018165852.

NETO, R. M. A Abordagem Sistêmica e os Estudos Geomorfológicos: Algumas Interpretações e Possibilidades de Aplicação. **Geografia**. Universidade Estadual de Londrina. Departamento de Geociências, v. 17, n. 2, p. 67-87, 2008.

NETO, R. M.; OLIVEIRA, T. A. A geomorfologia nos estudos integrados da paisagem: enfoque evolutivo e dinâmico na interpretação dos sistemas geomorfológicos. In: guimarães, R. F. et. al. **Revisões de Literatura da Geomorfologia Brasileira**. UnB, 2022.

OLIVEIRA, H. de MORTATTI, J., MORAES, G. M. "Caracterização físico-química da carga dissolvida dos rios Jundiá e Capivari, São Paulo", **Geochimica Brasiliensis**, v. 28, n. 1, 2014. DOI: 10.5327/z0102-9800201400010004.

OLIVEIRA, L. C., SERUDO, R. L., BOTERO, W. G., MENDONÇA, A. G. R., SANTOS, A. ROCHA, J. C., CARVALHO NETO, F. S. 2007. Distribuição de mercúrio em diferentes solos da Bacia do médio Rio Negro-AM: influência da matéria orgânica no ciclo biogeoquímico do mercúrio. **Química Nova**, 30, 2, 2007.

OLIVEIRA, G. M. T. S. **Avaliação da concentração de nutrientes, metais pesados e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos nos sedimentos de fundo do lago Água Preta (Belém- Pará)**. Dissertação (mestrado). Aquicultura e Recursos Aquáticos Tropicais. 89 p. Belém, 2013.

OLIVEIRA, C. A. S. **Distribuição do mercúrio lábil no sedimento do reservatório de Balbina - AM/BRASIL**. Dissertação (Mestrado em Química Analítica). Universidade Federal do Amazonas, F. 79. 2016.

PALACIO, F. X.; APODACA, M. J.; CRISCI, J. V. **Análisis multivariado para datos biológicos: teoría y su aplicación utilizando el lenguaje R**. Fundación de Historia Natural Félix de Azara: Buenos Aires, 2020.

PORTO, L. J. L. S. **Estudo da qualidade dos sedimentos de fundo no rio Barcarena – Pará** - 2009. x, 91 f. : il. Dissertação (Mestrado em Geoquímica e

Petrologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia e Geoquímica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

RESENDE, M.; MACHADO, R. P. Cotas Fluviométricas do Rio Acre, suas causas e implicações na política de colonização. **Acta Amazonica**, 18 (3-4): 85-92, 1988

ROCHA, J. C.; SARGENTINI, E.; ZARA, L. F.; ROSA, A. H.; SANTOS, A.; Burba, P.; Reduction of mercury(II) by tropical river Humic substances (Rio Negro) — A possible process of the mercury cycle in Brazil. **Talanta**, volume 53, número 3, página 551-559, 2000.

Rodrigues, M. L. K.; **Origem, Distribuição e Mobilidade Potencial de Metais Pesados em Ambiente Fluvial Impactado por Curtumes**. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

RUSSEL, J. B. **Química Geral**, Vol. 1. 2ª edição, São Paulo; Makron Books, 1994.

SALES, V. C. Geografia, Sistemas e Análise Ambiental: Abordagem Crítica. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, São Paulo, n. 16, p. 125-141, 2004.

SANTOS, J. S.; SANTOS, M. L. P.; SOUZA, F. M. Distribuição de Zn, Pb, Ni, Cu, Mn e Fe nas Frações do Sedimento Superficial do Rio Cachoeira na Região Sul da Bahia, Brasil. **Química Nova**, v. 36, n. 2, p. 230-236, 2013.

SANTOS, L. M. M. **Determinação de metais em sedimentos provenientes de manguezais da ilha Itaparica, BA e do manguezal do rio Passa Vaca, Salvador, BA**. 2013. Dissertação (Mestrado em Geoquímica do Petróleo e Ambiental) - Programa de Pós-Graduação em Geoquímica: Petróleo e Meio Ambiente, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2013b.

SANTOS, W. L. **Dinâmica Hidroecogeomorfológica em Bacia de Drenagem: Efeitos do uso e ocupação da terra no sudoeste amazônico – Acre – Brasil**. 2013. Tese (Doutorado em Geografia) - Programa de Pós-Graduação em Geografia do Instituto de Geociências da Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013a.

SENA, J. A.; FREITAS, M. A. V.; BERREDO, D.; FERNANDES, L. C. Evaluation of Vulnerability to Extreme Climatic Events in the Brazilian Amazonia: Methodological Proposal to the Rio Acre Basin. **Water Resour Manage** (2012) 26:4553–4568 DOI 10.1007/s11269-012-0166-2.

SHRIVER, D. F.; ATKINS, P. W.; LANGFORD, C. H. **Inorganic Chemistry**. 2ª edition, Oxford, Oxford University Press. 1994.

SILVA, M. S. R; MIRANDA, S. A. F; DOMINGOS, R. N; SILVA, S. L. R; SANTANA, G. P. Classificação dos rios da Amazônia: uma estratégia para preservação desses recursos. **HOLOS Environment**, v. 13, n. 2, 2013. p. 163-185.



SILVA, M. S. R. S. **Metais pesados em sedimentos de fundo de igarapés (Manaus - AM)**. Dissertação (mestrados em Geoquímica Ambiental). Universidade Federal do Pará, Belém. 120 F., 1996.

SILVA C.A.,; **Especiação do mercúrio na cadeia trófica pelágica de uma costa sujeita a Ressurgência**. Cabo Frio (RJ). Tese. Universidade Federal Fluminense. 2006.

SILVA, R. O.; EL ROBRINI, M; FREITAS, M. P. Influência do índice de chuvas e de rejeitos de efluentes na qualidade das águas do igarapé Santos (Tucuruí-Sudeste Paraense/Amazônia Oriental). **Boletim Paulista de Geografia**, nº 108, jul.-dez. 2022 (ISSN: 2447-0945), p. 188-212.

SILVA, E. O. **Hidroggeoquímica do Rio Machado e seus principais afluentes - reserva biológica do Jaru - Rondônia**. Dissertação (mestrado em Gestão e Regulação dos Recursos Hídricos. Fundação Universidade Federal de Rondônia - UNIR, Ji-Paraná, 2020. F. 168.

SIOLI, H. AMAZONIA: Fundamentos da Ecologia da maior região de florestas tropicais. **Editora vozes limitadas** 3d 1991, Petrópolis – RJ.

SIQUEIRA, A. G. **Características e avaliação dos níveis basais de mercúrio do sedimento na área de influência do aproveitamento hidrelétrico Jirau – Rio Madeira – Rondônia - Brasil**. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência de Materiais da Universidade de Brasília, como requisito parcial para obtenção do título de Mestre em Ciência de Materiais. 80 F. UNB, 2013.

SIQUEIRA, W.; APRILE, M. Distribution of total mercury in sediments from Amazon continental shelf: Brazil. **Acta Amazônica**, volume 42, número 2, p. 259-268, 2012.

SOARES, M. C. C.; MIZUSAKI, A. M. P.; GUERRA, T.; VIGNOL, M. L. Análise Geoquímica dos Sedimentos de Fundo do Arroio do Salso, Porto Alegre - RS - Brasil. **Pesquisas em Geociências**, v. 31, n. 1. p. 39-50, 2004.

SOUSA, E. A. **Dinâmica do cromo em um ecossistema aquático sob influência de efluentes de curtume na sub-bacia do rio Candeias, Rondônia**. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento Regional) – Universidade Federal de Rondônia/UNIR. Porto Velho (RO) , 2015, 62 F.

SOUZA, S. B. **Estudo sobre a presença de metais em sedimentos de fundos nos reservatórios hidrelétricos de Balbina- AM e Samuel- RO**. Dissertação (mestrado em Engenharia de Recursos da Amazônia). Universidade Federal do Amazonas, Manaus, 2015. F. 96.

SOUZA, M. M.; GASLTALDINI, M. C. C. Avaliação da qualidade da água em bacias hidrográficas com diferentes impactos antrópicos. **Eng. Sanit. Ambient.** V 19 (n3), 2014, p.263-274. DOI: 10.1590/S1413-41522014019000001097. Acesso em 10 fev 2024.

SPERLING, M. V. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rio**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - DESA da Universidade Federal de Minas Gerais, v. 7, 2007.

SUGUIO, K. **Geologia Sedimentar**. 1. ed. São Paulo: Edgar Blücher Ltda, 2003.

TORREZANI, L.; SARGENTINI JUNIOR, E.; OLIVEIRA, C. A. S.; SANTANA, G. P. Índice de Geoacumulação de mercúrio na Bacia do Igarapé do Educandos (Manaus/Amazonas). **Journal of Chemical Engineering and Chemistry** - Vol. 02 N. 03 (2016) 161-170, 2016.

UGALDE, M. C. P.; FARIAS, C. S.; ROWEDER, C. A importância da Revolução Acreana no Processo de Formação do Estado do Acre. **UÁQUIRI**: Revista do Programa de Pós-Graduação em Geografia. V.03, n. 01, p. 06-24, 2021. DOI: <https://doi.org/10.47418/uaquiri.vol3.n1.2021.5106>.

VEGA, C.; ORELLANA, J.; OLIVEIRA, M.; HACON, S.; BASTA, P. Human Mercury Exposure in Yanomami Indigenous Villages from the Brazilian Amazon. *Int. J. Environ. Res. Public. Health* 2018, 15, 1051, doi:10.3390/ijerph15061051.

VEIGA, M., BASSIL, L. ,ROSSO, A. **Degradação do solo e da água: Manual de uso, manejo e conservação do solo e da água**. Florianópolis, Secretaria da Agricultura e Abastecimento, 1994, p. 384.

VERGOTTI, M.; BONOTTO, D. M.; SILVEIRA, E.G.; BASTOS, W. R.; LACERDA, L. D. Influência da matéria orgânica na adsorção de Hg e outros elementos em sedimentos de lagos da bacia do rio Madeira (RO). *Geoquímica Ambiental da Bacia do Rio Madeira, RO. Geochimica Brasiliensis*, 23 (1), 100-158, 2009.

VIANA, E. C. A. **Aspectos granulométricos, mineralógicos e químicos de sedimentos de praias (barras em pontal) do rio Acre e sua relação com a fertilidade**. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Universidade Federal do Pará, Belém. 2005.

WHO. World Health Organization. **Guidelines for Drinking-water Quality**. Geneva: World Health Organization, 1984.

## APÊNDICE A

**Tabela 01:** Referências geoquímicas amazônicas

LOCAL	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn	MO (g/100g)	REFERÊNCIA
Rio Acre (margem do rio)		<b>35-77</b>	<b>15-72</b>			<b>30-65</b>	<b>52-112</b>		BENCHIMOL, KRONBERG, 1992
Rio Purus (Acre)		<b>70-270</b>							BENCHIMOL, KRONBERG, 1992
Lago Amappá (Acre) SS	<b>0,022-0,122</b>		<b>0,022-0,028</b>	<b>0,071-0,072</b>			<b>0,56-0,167</b>		CARVALHO, 2006
Rio Acre SS	<b>2,845</b>		<b>0,064</b>	<b>0,091</b>			<b>0,018</b>		CARVALHO, 2006
Lago Amapá (Acre)		<b>77,06</b>	<b>31,18</b>		<b>37,65</b>		<b>81,88</b>		CARVALHO, 2006
Rio Acre, AC	-	-	-	<b>0,018 - 0,184</b>	-	-	-	-	MASCARENHAS et al., 2004
Rio Acre (praia e barranco)	-	<b>33,09</b>	<b>62,79</b>	-	-	<b>14,5</b>	<b>70,87</b>	-	VIANA, 2005
Afluentes Rio Acre, AC	-	-	-	<b>0,027 - 0,078</b>	-	-	-	-	MASCARENHAS et al., 2004
Igarapé Barro Branco, AM	<b>&lt;0,0001</b>	<b>67</b>	<b>14</b>	-	<b>142</b>	-	<b>168</b>	<b>0,31 - 0,96</b>	SILVA, 1996
Igarapé do Educandos, AM	-	-	-	<b>0,195 - 3,37</b>	-	-	-	-	TORREZANI et al, 2016
Igarapé Quarenta, AM	<b>&lt;0,0001</b>	<b>99 - 274</b>	<b>95 - 1524</b>	-	<b>78 - 491</b>	-	<b>581 - 1048</b>	<b>0,34 - 11,17</b>	SILVA, 1996
Igarapé São Raimundo, AM	<b>&lt;0,0001</b>	<b>98</b>	<b>86</b>	-	<b>218</b>	-	<b>919</b>	<b>10,17 - 13,71</b>	SILVA, 1996
Lago Água Preta, PA	<b>0,19</b>	<b>143,33</b>	<b>23,18</b>	-	<b>51,83</b>	<b>33,25</b>	<b>78,43</b>	<b>10,08</b>	OLIVEIRA, 2013
Lagos de várzea em região de mangues, PA	-	<b>46,43</b>	<b>17,39</b>	-	<b>26,62</b>	<b>39,44</b>	<b>83,56</b>	<b>47,01</b>	CAVALCANTE; SANTOS, 2020
Reservatório Balbina, AM	-	-	-	<b>0,0123 - 0,3072</b>	-	-	-	<b>2,08 - 48,29</b>	OLIVEIRA, 2016
Reservatório Hidrelétrico de Balbina (rio Uatumã), AM	-	<b>15,17 - 81,95</b>	<b>1,43 - 185,19</b>	-	<b>1,47 - 53,65</b>	<b>13,98 - 42,42</b>	<b>35,11 - 1024,47</b>	-	SOUZA, 2015
Reservatório Hidrelétrico de Samuel (rio Jamari), RO	-	<b>22,73 - 315,07</b>	<b>7,93 - 96,22</b>	-	<b>3,14 - 67,46</b>	<b>17,80 - 119,88</b>	<b>40,03 - 590,53</b>	-	SOUZA, 2015
Rio Barcarena, PA	-	<b>104,33</b>	<b>34,71</b>	-	<b>34,27</b>	<b>32,54</b>	-	<b>7,35</b>	PORTO, 2009
Rio Candeias, RO	-	<b>4,42 - 549,33</b>	-	-	-	-	-	-	SOUSA, 2015

Rio Machado (afluentes - Reserva Biológica do Jaru) , RO	<b>0,0105</b>	<b>0,0196</b>	<b>0,0084</b>	-	<b>0,0133</b>	<b>0,0092</b>	<b>0,0326</b>	-	SILVA, 2020
Rio Madeira (lagos) - RO	-	-	-	<b>0,033 - 0,157</b>	-	-	-	<b>3,48 - 18,7</b>	VERGOTTI et al, 2009
Rio Madeira, AM - RO ( Água) 1997	-	-	-	<b>0,068 - 0,251</b>	-	-	-	-	AYRES, 2007
Rio Madeira, AM - RO ( Água) 2002	-	-	-	<b>0,0096 - 0,122</b>	-	-	-	-	AYRES ,2007
Rio Madeira, AM (água)	-	<b>0,6</b>	<b>2,3</b>	-	<b>0,8</b>	<b>0,5</b>	<b>21</b>	-	HORBE et al, 2013
Rio Madeira, RO	-	-	-	<b>0,037 - 0,219</b>	-	-	-	<b>5,94</b>	SIQUEIRA, 2013
Rio Mutum-Paraná, RO	-	-	-	<b>0,040 - 0,146</b>	-	-	-	<b>2,29</b>	BÉLEM, 2013
Rio Solimões, Coari - AM	-	<b>61 - 113</b>	<b>9-38</b>	<b>&lt;0,2 - 1,7</b>	<b>13 - 38</b>	<b>5-35</b>	<b>21 -9 7</b>	-	HORBE et al, 2007
Rio Acre, Rio Branco - AC	<b>0,136-0,319</b>	<b>3,440-17,600</b>	<b>0,864-4,196</b>	<b>0,041-0,081</b>	<b>2,079-10,715</b>	<b>3,382-16,410</b>	<b>0,443-3,557</b>	<b>1,040-9,360</b>	ESTA PESQUISA, 2022

## APÊNDICE B

**Tabela 02:** Parâmetros analisados em água

Parâmetro	Conama 357/2005 Água Classe 3	Conama 430/11 Efluentes	P1A	P2A	P3B	P4B	P5C	P6C	P7D	P8D	P9E	P10E	P11F	P12F
pH	6-9	5-9	7,2	7,2	7,1	7,1	7,1	7,1	7,1	7,0	5,8	7,1	7,0	6,8
CE	NA	NA	122,8	121,9	127,8	114,7	119,0	124,0	124,7	134,9	123,1	114,6	126,7	127,2
Turb	100	NA	157,0	143,0	162,0	147,0	136,0	109,0	174,0	139,0	141,0	308,0	119,0	309,0
Alc	NA	NA	49,0	49,0	46,0	40,0	45,0	46,0	49,0	49,0	45,0	42,0	42,0	44,0
Durz	NA	NA	50,0	48,0	46,0	46,0	50,0	44,0	48,0	40,0	40,0	44,0	44,0	40,0
STD	NA	NA	0,2	0,1	0,3	0,1	0,2	0,1	0,2	0,3	0,2	0,5	0,1	0,4
Temp	NA	NA	30,1	27,9	24,7	26,3	28,1	33,1	28,8	26,6	22,6	21,6	29,3	30,6
Br	NA	NA	0,9	0,9	1,0	0,8	0,9	0,9	1,0	1,0	0,9	1,7	0,8	1,9
Cl	250	NA	5,9	6,5	5,0	5,0	5,1	3,4	5,1	6,9	4,3	15,0	4,2	12,4
Fosfato	0,15	NA	12,5	15,0	15,9	17,4	12,2	13,0	14,2	15,1	11,7	21,4	10,6	24,7
Nitrato	1,0	NA	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,5	0,2	0,3
Sulfato	250	NA	62,8	65,5	63,9	67,1	69,1	63,2	69,4	34,2	64,0	77,6	65,6	77,3
Sílica	NA	NA	21,9	21,6	18,5	19,8	18,0	20,4	20,1	19,6	19,3	19,4	20,6	23,6
Peróxido	NA	NA	2,2	2,2	2,1	2,7	2,1	2,2	2,3	2,5	1,9	4,0	1,9	2,5
Amônia	13,3	20	1,6	1,8	1,7	1,7	1,5	1,4	1,7	2,1	2,5	4,3	1,8	5,4
Sulfeto	0,3	1,0	0,3	0,4	0,4	0,4	0,3	0,3	0,4	0,4	0,3	0,6	0,3	0,5