

UNIVERSIDADE FEDERAL DA GRANDE DOURADOS
FACULDADE DE CIÊNCIAS EXATAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL

Metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai: distribuição espacial, ocorrência e lacunas de monitoramento ambiental

Nicolau Uzum Papaya

DOURADOS-MS

2026

Nicolau Uzum Papaya

Metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai: distribuição espacial, ocorrência e lacunas de monitoramento ambiental

Orientadora: Profa. Dra. Alexeia Barufatti

Coorientador: Prof. Dr. Fábio Kummrow

Área de concentração: Ciência Ambiental

Defesa de mestrado apresentada ao programa de pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, como um dos requisitos necessários para a obtenção do título de Mestre em Ciência e Tecnologia Ambiental na área de concentração Ciência Ambiental.

DOURADOS-MS

2026



ATA DA DEFESA DE DISSERTAÇÃO DE MESTRADO APRESENTADA POR NICOLAU UZUM PAPAYA, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E TECNOLOGIA AMBIENTAL, ÁREA DE CONCENTRAÇÃO "CIÊNCIA AMBIENTAL".

Aos três dias do mês de julho do ano de dois mil e vinte e seis, às quatorze horas, em sessão pública, realizou-se na Universidade Federal da Grande Dourados, a Defesa de Dissertação de Mestrado intitulada **"Metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai: distribuição espacial, ocorrência e lacunas de monitoramento ambiental"**, apresentada pela pessoa mestranda Nicolau Uzum Papaya, do Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, à Banca Examinadora constituída pelos membros: Prof.^a. Dr.^a Alexeia Barufatti/UFGD (presidente/orientadora), Prof.^a. Dr.^a Rozanna Marques Muzzi/UFGD (membro titular interno), Prof. Bruno do Amaral Crispim (membro titular externo). Iniciados os trabalhos, a presidência deu a conhecer à pessoa candidata e aos integrantes da banca as normas a serem observadas na apresentação da Dissertação. Após a pessoa candidata ter apresentado a sua Dissertação, os componentes da Banca Examinadora fizeram suas arguições. Terminada a Defesa, a Banca Examinadora, em sessão secreta, passou aos trabalhos de julgamento, tendo a pessoa candidata obtido aprovado. Nada mais havendo a tratar, lavrou-se a presente ata, que vai assinada pelos membros da Comissão Examinadora.

Dourados/MS, 03 de julho de 2026.

Documento assinado digitalmente
gov.br ALEXEIA BARUFATTI
Data: 03/07/2026 16:35:20-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a Alexeia Barufatti
Presidente/orientadora

Documento assinado digitalmente
gov.br ROZANNA MARQUES MUZZI
Data: 03/07/2026 16:45:33-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof.^a. Dr.^a Rozanna Marques Muzzi
Membro Titular Interno

Documento assinado digitalmente
gov.br BRUNO DO AMARAL CRISPIM
Data: 03/07/2026 16:41:27-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Bruno do Amaral Crispim
Membro Titular Externo

(PARA USO EXCLUSIVO DA PROPG)

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP).

P213m Papaya, Nicolau Uzum

Metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai: distribuição espacial, ocorrência e lacunas de monitoramento ambiental [recurso eletrônico] / Nicolau Uzum Papaya. -- 2026.

Arquivo em formato pdf.

Orientadora: Alexeia Barufatti.

Coorientador: Fábio Kummrow.

Dissertação (Mestrado em Ciência e Tecnologia Ambiental)-Universidade Federal da Grande Dourados, 2026.

Disponível no Repositório Institucional da UFGD em:
<https://portal.ufgd.edu.br/setor/biblioteca/repositorio>

1. Elementos inorgânicos. 2. qualidade da água. 3. monitoramento ambiental. I. Barufatti, Alexeia. II. Kummrow, Fábio. III. Título.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente de acordo com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

©Direitos reservados. Permitido a reprodução parcial desde que citada a fonte.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus e à Mãe Imaculada que me fortalecem e acompanham nas horas mais difíceis, inspirando-me com suas inegáveis bênçãos.

Expresso minha profunda gratidão pelo apoio incondicional de meus pais, Álvaro e Sônia, meus primeiros professores, incentivadores no estudo da ciência e exemplos de dedicação e resiliência.

À minha irmã, Emilha, dedicada e imersa em seus estudos, mas sempre presente quando necessária. Estendo meu reconhecimento também a meus tios Luís e Roberto, incentivadores e companheiros que acreditam em minha trajetória acadêmica.

Sou imensamente grato à professora orientadora Dra. Alexeia Barufatti, por acreditar em mim mesmo conhecendo minhas limitações, por dedicar seu tempo com paciência e extrema dedicação como minha orientadora, e por seu apoio incondicional ao meu desenvolvimento.

Agradeço também ao meu coorientador, Dr. Fábio, por sua paciência e dedicação.

Agradeço, de forma especial e carinhosa, aos colegas do LECOGEN. Por fim, ao colega Alexandre Nettho, pela colaboração na análise estatística, que proporcionou um enriquecimento fundamental a este trabalho.

Agradeço à Universidade Federal da Grande Dourados (UFGD), ao Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental (PPGCTA) e à CAPES pela oportunidade que foi fundamental para o desenvolvimento da minha pesquisa e da minha formação acadêmica, e sou profundamente grato pelo apoio, pela infraestrutura e pelo incentivo à ciência e ao conhecimento proporcionados por essas instituições.

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai, com aproximadamente 1.095.000 km² distribuídos entre Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina, abriga um dos maiores complexos alagáveis do planeta, sustentando elevada biodiversidade e atividades econômicas relevantes. Apesar de sua importância ambiental, as informações sobre a ocorrência de metais e metaloides em suas águas superficiais permanecem espacialmente dispersas, temporalmente descontínuas e metodologicamente heterogêneas, dificultando a construção de um diagnóstico integrado em escala transfronteiriça. Este estudo teve como objetivo compilar, sistematizar e analisar criticamente as informações disponíveis na literatura científica sobre a ocorrência desses elementos na bacia entre 1995 e 2025.

Após critérios de inclusão e exclusão, foram selecionados 19 estudos revisados por pares, contemplando 41 corpos hídricos e 158 pontos amostrais distribuídos nos quatro países. As concentrações foram padronizadas em mg L⁻¹ e comparadas com os limites estabelecidos pelas legislações brasileira, paraguaia e boliviana. A distribuição espacial dos pontos foi representada por meio de georreferenciamento e análise espacial no QGIS 3.34.4.

Foram identificados 11 elementos com ocorrência recorrente: alumínio (Al), arsênio (As), cádmio (Cd), cromo (Cr), cobre (Cu), ferro (Fe), mercúrio (Hg), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn). As maiores concentrações foram registradas em tributários da porção boliviana, especialmente em corpos hídricos acima de 2.000 m de altitude e associados à drenagem ácida de mineração na região de Potosí, onde Fe atingiu até 950 mg L⁻¹, Al 630 mg L⁻¹ e Zn 560 mg L⁻¹.

As maiores frequências de excedências foram observadas para Pb (n = 67), Cd (n = 49) e As (n = 47). O Cu apresentou classificações distintas conforme a legislação adotada. A distribuição espacial evidenciou forte assimetria entre os países, com maior concentração de estudos no Brasil e na Bolívia e cobertura escassa no Paraguai e na Argentina. Os resultados demonstram que a contaminação por metais e metaloides na Bacia do Rio Paraguai é recorrente e espacialmente heterogênea, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo, padronizado e cooperativo entre os países da bacia.

Palavras-chave: Elementos inorgânicos, qualidade da água; monitoramento ambiental.

ABSTRACT

The Paraguay River Basin, covering approximately 1,095,000 km² across Brazil, Bolivia, Paraguay, and Argentina, contains one of the largest floodplain systems on the planet, supporting high biodiversity and economically important activities. Despite its environmental relevance, information on the occurrence of metals and metalloids in its surface waters remains spatially scattered, temporally discontinuous, and methodologically heterogeneous, hindering the development of an integrated transboundary assessment. This study aimed to compile, systematize, and critically analyze the scientific literature on the occurrence of these elements in the basin between 1995 and 2025.

Following the application of inclusion and exclusion criteria, 19 peer-reviewed studies were selected, encompassing 41 water bodies and 158 sampling sites across the four countries. Concentrations were standardized to mg L⁻¹ and compared with limits established by Brazilian, Paraguayan, and Bolivian legislation. The spatial distribution of sampling sites was represented through georeferencing and spatial analysis using QGIS 3.34.4.

Eleven elements were identified as recurrent in the basin: aluminum (Al), arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), iron (Fe), mercury (Hg), manganese (Mn), nickel (Ni), lead (Pb), and zinc (Zn). The highest concentrations were recorded in tributaries of the Bolivian portion of the basin, particularly in water bodies located above 2,000 m in altitude and associated with acid mine drainage in the Potosí region, where Fe reached up to 950 mg L⁻¹, Al 630 mg L⁻¹, and Zn 560 mg L⁻¹.

The highest frequencies of limit exceedances were observed for Pb (n = 67), Cd (n = 49), and As (n = 47). Copper (Cu) showed different classifications depending on the legislation adopted. The spatial distribution revealed marked asymmetry among countries, with most studies concentrated in Brazil and Bolivia and limited sampling coverage in Paraguay and Argentina. These results demonstrate that metal and metalloid contamination in the Paraguay River Basin is recurrent and spatially heterogeneous, reinforcing the need for continuous, standardized, and cooperative monitoring among the countries sharing the basin.

Keywords: Inorganic elements; water quality; environmental monitoring.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Fluxograma de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão sistemática sobre a ocorrência de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai (1995–2025), adaptado de Page et al. (2021), PRISMA 2020.

Figura 2. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai na América do Sul e distribuição espacial dos pontos amostrais de águas superficiais incluídos na revisão da literatura (1995–2025). O polígono hachurado representa os limites da bacia hidrográfica, as linhas azuis correspondem aos principais cursos d'água e as linhas laranja indicam as fronteiras internacionais entre Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina. Os círculos pretos representam os pontos amostrais compilados nos estudos selecionados.

Figura 3. Distribuição das concentrações de metais (Pb, Fe, As, Cd, Al, Zn, Mn, Cu, Ni, Cr, Hg) em relação aos limites estabelecidos pelas legislações CONAMA 357/2005 (Brasil), Lei 1333/92 (Bolívia) e Resolución SEAM 222/02 (Paraguai), classificadas como abaixo, acima ou iguais aos limites legais.

Figura 4. Mapa de calor das maiores concentrações de metais e metaloides (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos da Bacia do Rio Paraguai. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e as cores representam a magnitude dos valores observados. Células em branco indicam ausência de dados disponíveis.

Figura 5. Concentrações máximas de metais e metaloides em diferentes categorias de uso do solo em áreas com altitude superior a 2000 m (a) e igual ou inferior a 2000 m (b). As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e representam os maiores valores observados para cada categoria.

Figura 6. Mapa de calor das concentrações máximas de metais e metaloides em diferentes corpos hídricos da Bacia do Rio Paraguai, agrupados por país. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e as cores representam a magnitude dos valores máximos observados para cada elemento. Células em branco indicam ausência de dados disponíveis.

Figura 7. Distribuição temporal das concentrações máximas de metais e metaloides (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) na Bacia do Rio Paraguai entre 1992 e 2023. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} .

Figura 8. Concentrações máximas de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn em corpos hídricos superficiais da Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai. Os valores estão expressos em

mg L⁻¹ e correspondem às maiores concentrações para cada elemento nos estudos compilados na revisão. Os números acima das barras indicam os valores máximos observados.

Figura S1. Maiores concentrações máximas de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn), em mg L⁻¹ estratificadas por tipo de corpo hídrico (Córrego, Lago, Pântano, Riacho e Rio)

Figura S2. Maiores concentrações máximas de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn), em mg L⁻¹, em corpos hídricos classificados por regime hidrológico (efêmero e perene).

Figura S3. Distribuição das concentrações de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos, estratificadas por país (Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai) e ano de monitoramento (1992–2023).

Figura S4. Série histórica das concentrações de 11 metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos superficiais da América do Sul, entre 1992 e 2023. A cor dos pontos indica o país de amostragem: Argentina (amarelo), Bolívia (roxo), Brasil (azul) e Paraguai (verde). Cada ano é apresentado em painel separado com escala de concentração (mg L⁻¹) ajustada para a faixa de valores observada naquele período.

Figura S5. Visualização das concentrações máximas de 11 metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Ferro (Fe), Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) detectadas em corpos hídricos superficiais da Bolívia, Brasil, Argentina e Paraguai. Cada metal é representado por uma cor única, mantida em todos os países para comparação transnacional. Os valores numéricos correspondem à concentração máxima registrada em mg L⁻¹. O símbolo (-) denota ausência de detecção ou dados não disponíveis.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Maiores concentrações de metais e metaloides descritas nos estudos incluídos na revisão para a Bacia do Rio Paraguai, indicando o corpo hídrico e ano de amostragem

Tabela S1. Concentrações de metais e metaloides (mg L^{-1}) em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, por estudo, ponto de amostragem, país, uso do solo e altitude.

SUMÁRIO

Sumário

1.	INTRODUÇÃO.....	13
2.	OBJETIVOS.....	17
2.1.	Geral.....	17
2.2.	Específicos.....	17
3.	MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1.	Delimitação da Área de Estudo.....	18
3.2.	Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos.....	18
3.3.	Georreferenciamento e Análise Espacial.....	20
3.4.	Organização e Padronização dos Dados.....	20
3.5.	Análise Estatística e Comparação com Legislações de Qualidade da Água.....	21
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	21
4.1.	Estudos incluídos e distribuição espacial dos dados.....	21
4.2.	Comparação das concentrações com legislações de qualidade da água.....	23
5.	Distribuição espacial dos metais.....	26
5.1.	Maiores concentrações.....	26
5.2.	Distribuição das concentrações entre corpos hídricos.....	27
5.3.	Influência do uso do solo e altitude.....	29
5.4.	Distribuição espacial e padrões geográficos.....	31
5.5.	Variação Temporal dos registros.....	33
5.6.	Comparação das concentrações máximas entre países.....	35
5.7.	Implicações ambientais, hotspots de contaminação e modelo conceitual.....	37
6.	CONCLUSÃO.....	38
7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	40
8.	ANEXO I.....	47
9.	ANEXO II.....	54

1. INTRODUÇÃO

A Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai constitui uma das mais relevantes unidades hidrográficas da América do Sul, abrangendo aproximadamente 1.095.000 km² e distribuindo-se entre Brasil (410.000 km²; 37,4%), Bolívia (205.000 km²; 18,7%), Paraguai (255.000 km²; 23,3%) e Argentina (225.000 km²; 20,5%) (Carvalho, 1984). Inserida no sistema da Bacia do Prata, uma das maiores bacias hidrográficas do mundo, com cerca de 3.170.000 km², essa região concentra parcela expressiva da população e da atividade econômica sul-americana, reunindo aproximadamente 60% da população e cerca de 70% do Produto Interno Bruto dos países que a compartilham (Avigliano et al., 2019; Nogueira et al., 2021).

O rio Paraguai possui cerca de 2.550 km de extensão, tendo sua nascente na Chapada dos Parecis, no estado de Mato Grosso (Brasil), e seguindo em direção sul até desaguar no rio Paraná. A bacia é estruturada por uma complexa rede hidrográfica transfronteiriça composta por tributários com distintas origens geomorfológicas e regimes hidrológicos. Na porção brasileira, correspondente ao Alto Paraguai, destacam-se como principais tributários os rios Cuiabá, São Lourenço, Taquari, Miranda, Aquidauana, Jauru e Apa. Esses cursos d'água drenam predominantemente áreas do bioma Cerrado e desempenham papel fundamental na manutenção do pulso de inundação do Pantanal (BRASIL, 2017; BRASIL, 2018).

A Bacia do Alto Paraguai engloba dois grandes compartimentos geomorfológicos interdependentes: o Planalto, dominado pelos biomas Cerrado e porções da Amazônia, onde se localizam as principais nascentes, e a Planície, que recebe esses tributários e onde se desenvolve o bioma Pantanal. Nessa planície, os cursos d'água se distribuem em complexos sistemas de meandros e depósitos sedimentares (Silva, 2010). A dinâmica hidrossedimentológica do Alto Paraguai constitui elemento-chave para a manutenção do pulso de inundação, processo essencial para a ciclagem de nutrientes, a produtividade primária e a manutenção da biodiversidade regional (ANA, 2021).

A distinção entre o Alto Paraguai, caracterizado por áreas de planalto, e o Baixo Paraguai, constituído por uma extensa planície alagável que se estende a jusante da confluência com o rio Apa até o encontro com o rio Paraná, é fundamental para compreender os gradientes hidrológicos e o transporte longitudinal de sedimentos e contaminantes (ASSINE, 2003). O Pantanal possui aproximadamente 361.666 km² de extensão total, dos quais cerca de 138.183 km² localizam-se no Brasil, principalmente no estado do Mato Grosso do Sul (89.318 km²) (Silva et al., 1998). Reconhecido como a maior planície inundável do mundo, o Pantanal foi declarado

Patrimônio Nacional pela Constituição Federal de 1988 e Reserva da Biosfera pela UNESCO no ano 2000 (Ferreira, 2012; Kantek et al., 2018).

A elevada conectividade hidrológica existente entre os diferentes compartimentos da bacia favorece não apenas a transferência de água, sedimentos e nutrientes, mas também o transporte de contaminantes. Em bacias hidrográficas de grande escala, metais podem ser transportados tanto na fase dissolvida quanto associados a partículas em suspensão, sendo posteriormente retidos ou remobilizados em planícies de inundação (Zhou et al., 2020).

Em ambientes alagáveis, variações de pH, potencial redox e teor de matéria orgânica influenciam diretamente a mobilidade e a biodisponibilidade desses elementos (Vardhan et al., 2019). Dessa forma, impactos gerados em áreas de cabeceira podem repercutir a jusante, afetando diferentes compartimentos ambientais ao longo de toda a bacia.

A Bacia do Rio Paraguai sustenta atividades econômicas de grande relevância, incluindo a pesca artesanal, a pecuária extensiva, a agricultura e o transporte hidroviário utilizado para o escoamento de commodities agrícolas e minerais (Azevedo e Monteiro, 2006; D'Ávila, 2023). Entretanto, a intensificação dessas atividades tem promovido alterações significativas na paisagem e nos recursos hídricos da região. Entre as principais pressões antrópicas destacam-se a expansão agropecuária, os processos erosivos associados às mudanças no uso da terra, o assoreamento dos cursos d'água, a construção de barragens e os projetos de infraestrutura hidroviária, que podem modificar a conectividade fluvial e interferir na dinâmica natural do pulso de inundação do Pantanal (Girard, 2002; Irigaray et al., 2020).

Além das pressões observadas no território brasileiro, a porção boliviana da bacia recebe contribuição de rios de origem andina e pré-andina, incluindo os rios Pilcomayo e Bermejo, cujas áreas de drenagem apresentam histórico de intensa atividade mineradora, especialmente na região de Potosí (Strosnider et al., 2011). Nesses ambientes, processos de drenagem ácida de mina promovem a liberação de metais tóxicos para os corpos hídricos, contribuindo para o transporte de elementos-traço ao longo do sistema fluvial (Strosnider et al., 2008; Strosnider et al., 2014). Concentrações elevadas de ferro, zinco, cádmio e outros elementos já foram registradas em drenagens associadas à mineração na região andina, evidenciando a relevância dessas atividades como potenciais fontes de contaminação para a bacia (Strosnider e Nairn, 2010).

A sistematização das evidências na literatura científica torna-se necessária para identificar padrões de ocorrência, lacunas de monitoramento e regiões prioritárias para futuras ações de pesquisa e gestão ambiental. Assim, o estudo busca gerar conhecimento para a compreensão da ocorrência de metais e metaloides nas águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, forne-

cendo subsídios para programas de monitoramento, avaliação de risco e formulação de políticas públicas voltadas à proteção dos recursos hídricos em escala regional e transfronteiriça.

As águas doces superficiais desempenham papel fundamental na manutenção da vida e no desenvolvimento socioeconômico das sociedades humanas, constituindo fonte essencial para o abastecimento público, a produção de alimentos, a geração de energia e a conservação da biodiversidade. Entretanto, a intensificação das atividades antrópicas tem aumentado o aporte de contaminantes nos ecossistemas aquáticos, comprometendo a qualidade da água e a integridade dos ambientes fluviais. Entre esses contaminantes, destacam-se os metais e metalóides, que podem ter origem natural, associada ao intemperismo de rochas, ou resultantes de atividades como mineração, urbanização e agricultura. Devido à sua persistência ambiental, ao potencial de bioacumulação e à associação com efeitos adversos à saúde humana, especialmente para elementos como Pb, Cd, Hg e As, sua presença em corpos hídricos representa risco para os ecossistemas aquáticos e para as populações que dependem desses recursos (Vardhan et al., 2019; Zhou et al., 2020; Warren-Vega et al., 2023). Em sistemas fluviais associados a extensas planícies de inundação, a dinâmica hidrossedimentológica atua na retenção, transporte e remobilização de sedimentos. As variações sazonais do pulso de inundação promovem a deposição de partículas finas e matéria orgânica nas áreas inundáveis, favorecendo o acúmulo desses elementos e sua posterior redistribuição durante eventos hidrológicos (Junk et al., 1989; Hamilton et al., 1996; Zhou et al., 2020). Tais processos influenciam diretamente a distribuição espacial e a biodisponibilidade dos metais e metalóides nos ecossistemas aquáticos.

Nesse contexto, os rios da América do Sul figuram entre os ecossistemas fluviais mais suscetíveis às pressões decorrentes da expansão das atividades humanas. A intensificação do uso dos recursos hídricos, a expansão da agricultura, o avanço da urbanização e as atividades mineradoras têm contribuído para o aumento da carga de contaminantes em diversos sistemas fluviais do continente. Esses impactos são frequentemente agravados pela limitada disponibilidade de programas sistemáticos de monitoramento ambiental em várias regiões da América Latina (Torremorell et al., 2021).

Particularmente, a Bacia do Prata constitui uma das maiores bacias hidrográficas do mundo, com aproximadamente 3.170.000 km² de extensão, abrangendo territórios da Argentina, Bolívia, Brasil, Paraguai e Uruguai. Cerca de 60% da população da América do Sul reside em sua área de influência, onde também se concentra aproximadamente 70% do Produto Interno Bruto dos países que a compartilham (Avigliano et al., 2019; Nogueira et al., 2021). Em muitas regiões dessa bacia, especialmente em áreas rurais, ribeirinhas e comunidades tradicionais, os recursos hídricos são utilizados diretamente para abastecimento, higiene e atividades

produtivas, muitas vezes com infraestrutura limitada de tratamento de água (Avigliano et al., 2019).

A Bacia do Prata é composta pelas sub-bacias dos rios Paraná, Paraguai e Uruguai. Entre elas, destaca-se a Bacia do Rio Paraguai, que possui área superior a 1.000.000 km² e apresenta características geomorfológicas marcadas pela presença de planícies de baixa declividade. O rio Paraguai possui aproximadamente 2.550 km de extensão e recebe contribuições dos rios Cuiabá, São Lourenço, Pilcomayo e Bermejo (Avigliano et al., 2019).

A porção do Alto Paraguai integra o complexo ecológico Chaco-Pantanal, caracterizado por uma das maiores planícies alagáveis contínuas do planeta. A dinâmica hidrológica dessa região é fortemente controlada pelo pulso anual de inundação, que regula a conectividade entre rios, lagoas e áreas inundáveis, influenciando diretamente a ciclagem de nutrientes, a produtividade biológica e a estrutura das comunidades aquáticas (Junk et al., 1989; Hamilton et al., 1996). Além de sua relevância ecológica, essa dinâmica influencia a retenção, o transporte e a redistribuição de sedimentos e elementos-traço ao longo do sistema fluvial.

Apesar da relevância ecológica, social e econômica da Bacia do Rio Paraguai, os estudos sobre metais e metaloides em águas superficiais permanecem espacialmente dispersos, temporalmente descontínuos e metodologicamente heterogêneos. Além disso, a natureza transfronteiriça da bacia dificulta a integração das informações produzidas pelos diferentes países que a compartilham. Essa condição limita uma avaliação abrangente da ocorrência desses elementos e dificulta a identificação de padrões espaciais em escala regional.

Diante desse cenário, torna-se necessária a sistematização crítica das evidências disponíveis na literatura científica. Assim, o presente estudo teve como objetivo compilar, sistematizar e analisar criticamente as informações disponíveis sobre a ocorrência de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, buscando identificar padrões de distribuição espacial, comparar os registros com referenciais normativos de qualidade da água e apontar lacunas de conhecimento relevantes para futuras ações de monitoramento e gestão ambiental.

2.OBJETIVOS

2.1. Geral

- Compilar, sistematizar e analisar criticamente as informações disponíveis na literatura científica sobre a ocorrência de metais e metaloides nas águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, no período de 1995 a 2025.

2.2. Específicos

- Identificar e selecionar estudos científicos publicados entre 1995 e 2025 que documentem a ocorrência de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai.
- Sistematizar as informações disponíveis na literatura quanto às concentrações de metais e metaloides, locais de amostragem, períodos de coleta e características dos estudos selecionados.
- Comparar as concentrações com valores de referência estabelecidos em normas de qualidade da água e diretrizes ambientais aplicáveis.
- Avaliar a distribuição espacial dos registros disponíveis e identificar lacunas geográficas e temporais no monitoramento de metais e metaloides na bacia.
- Discutir as possíveis associações entre a ocorrência desses elementos e atividades antrópicas descritas na literatura, incluindo mineração, agricultura, urbanização e outras pressões ambientais.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Delimitação da Área de Estudo

A presente revisão foi delimitada à Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai, cuja área de drenagem é estimada em aproximadamente 1.095.000 km², abrangendo territórios do Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina (Carvalho, 1984; Barresi Armoa et al., 2024). O principal curso hídrico da bacia é o rio Paraguai, com cerca de 2.550 km de extensão, que se estende desde sua nascente na Chapada dos Parecis até sua confluência com o rio Paraná (ANA, 2017; ANA, 2018).

A bacia apresenta elevada heterogeneidade geomorfológica, incluindo áreas de planalto, regiões sob influência de atividades agropecuárias e mineradoras, além da extensa planície alagável do Pantanal. Essas características influenciam os processos de transporte, retenção e redistribuição de sedimentos e elementos-traço ao longo do sistema fluvial, tornando a região particularmente relevante para estudos sobre a ocorrência e distribuição de metais e metaloides em águas superficiais.

Foram considerados elegíveis para esta revisão os estudos realizados em corpos hídricos localizados dentro dos limites geográficos da Bacia do Rio Paraguai, independentemente do país de origem ou da sub-bacia investigada.

3.2. Estratégia de Busca e Seleção dos Estudos

A busca bibliográfica foi realizada na Plataforma CAPES, abrangendo artigos científicos revisados por pares publicados entre janeiro de 1995 e dezembro de 2025. Foram utilizadas combinações de palavras-chave em português e inglês relacionadas a metais e metaloides, qualidade da água, águas superficiais, rios, bacias hidrográficas, Pantanal e Bacia do Rio Paraguai, empregando operadores booleanos (AND, OR e NOT) para ampliar a abrangência e a precisão da busca.

As estratégias de busca foram refinadas, considerando combinações de termos associados aos elementos químicos, aos ambientes aquáticos e a área geográfica de interesse. A seleção dos estudos foi conduzida em etapas de identificação dos artigos, triagem e avaliação de elegibilidade. Os registros recuperados foram submetidos à leitura dos títulos e resumos para verificação de aderência ao tema. Em seguida, os estudos relevantes foram avaliados em texto completo para confirmação dos critérios de inclusão e exclusão. O processo de seleção encontra-se no fluxograma apresentado na Figura 1.

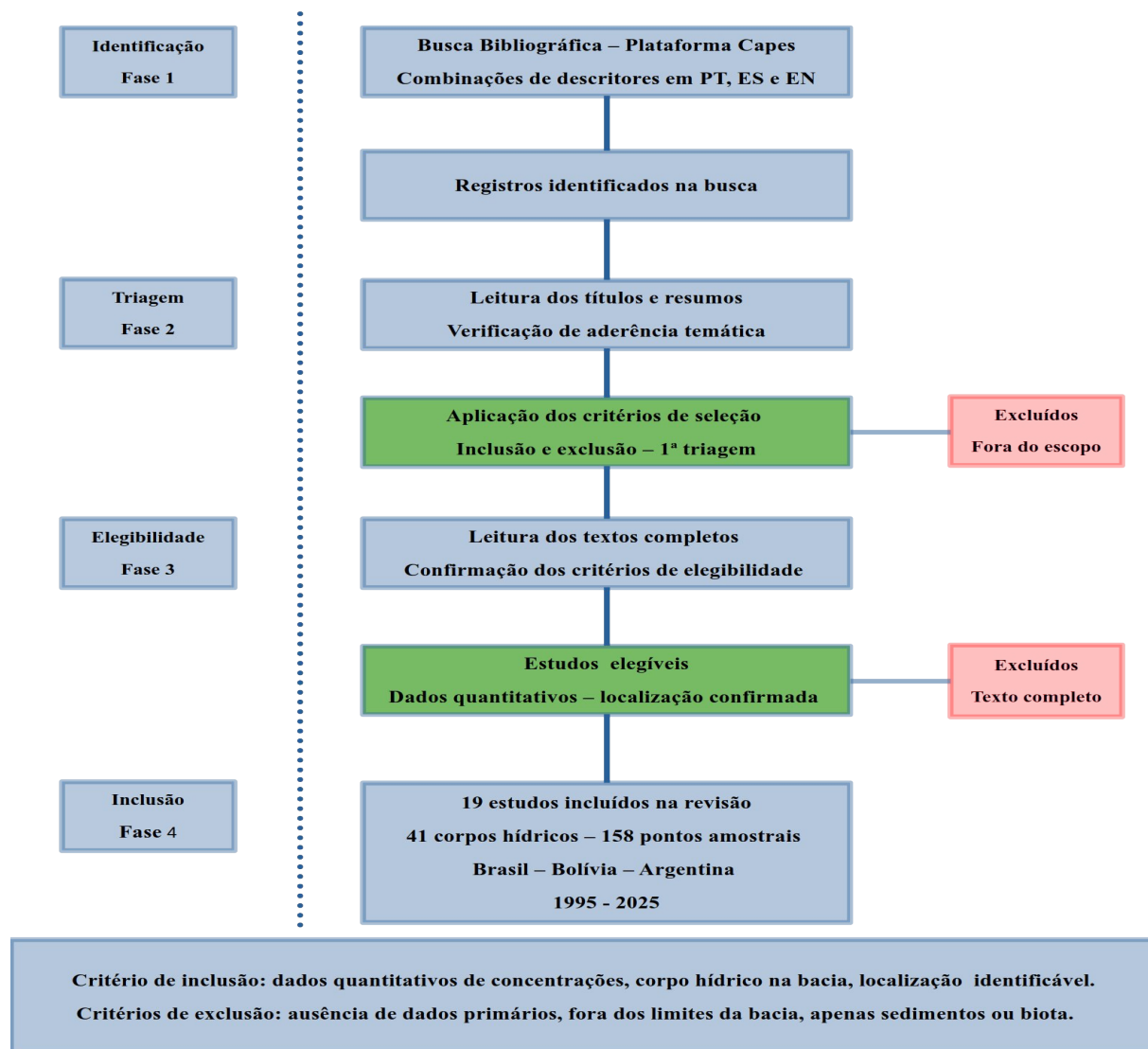


Figura 1. Fluxograma de identificação, triagem, elegibilidade e inclusão dos estudos na revisão sistemática sobre a ocorrência de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai (1995–2025), adaptado de Page et al. (2021), PRISMA 2020.

Foram incluídos estudos que: (i) apresentaram dados quantitativos de concentração de metais e/ou metaloides em águas superficiais; (ii) foram conduzidos em corpos hídricos localizados dentro dos limites geográficos da Bacia do Rio Paraguai; e (iii) disponibilizaram informações para identificação espacial e comparação com valores de referência de qualidade da água. Foram excluídos estudos que: (i) não apresentaram dados primários de concentração; (ii)

foram realizados fora dos limites geográficos da bacia; ou (iii) avaliaram exclusivamente matrizes distintas de águas superficiais, como sedimentos, solos ou organismos aquáticos.

Ao final do processo de seleção foram incluídos 19 estudos, cuja relação completa encontra-se apresentada na Tabela Suplementar 1 (Anexo 1).

3.3. Georreferenciamento e Análise Espacial

As coordenadas geográficas dos pontos amostrais foram obtidas dos estudos selecionados. Quando essas informações não foram fornecidas, as localizações foram estimadas com base nas descrições textuais, mapas e informações geográficas apresentadas nas publicações, utilizando imagens de satélite e ferramentas de georreferenciamento disponíveis no Google Earth Pro. Apenas os locais cuja posição foi identificada foram considerados nas análises espaciais. As coordenadas foram organizadas em arquivos no formato KML e processadas no software QGIS versão 3.34.4. A partir desses dados foram elaborados mapas visando representar a distribuição espacial dos estudos, a localização dos pontos amostrais e sua relação com os principais tributários e sub-bacias da Bacia do Rio Paraguai. Os registros foram agrupados de acordo com os principais afluentes do rio Paraguai e sua localização geográfica ao longo da bacia, permitindo identificar padrões espaciais na distribuição dos estudos e dos registros de metais e metalóides presentes na literatura.

3.4. Organização e Padronização dos Dados

As informações extraídas dos estudos selecionados foram organizadas em uma base de dados estruturada contendo, sempre que disponível, as seguintes variáveis: país, corpo hídrico, sub-bacia ou afluente, ano de amostragem, número de pontos amostrais, coordenadas geográficas, elementos químicos analisados e suas respectivas concentrações.

Para assegurar a comparabilidade entre os diferentes estudos, as concentrações de metais e metalóides foram padronizadas para a unidade mg L^{-1} . Quando necessário, foram realizadas conversões de unidades a partir dos valores descritos pelos autores.

Para estudos que apresentaram múltiplos pontos amostrais ou campanhas de monitoramento, os registros foram mantidos individualmente sempre que as informações estivessem disponíveis, preservando a variabilidade espacial e temporal dos dados.

Após a organização e padronização dos dados, a base consolidada foi utilizada para as análises descritivas, comparações com valores de referência de qualidade da água e representação espacial dos registros obtidos na revisão.

3.5. Análise Estatística e Comparação com Legislações de Qualidade da Água

Para cada elemento químico foram calculadas estatísticas descritivas, incluindo média geométrica, valores mínimo e máximo das concentrações, bem como a frequência de ocorrência nos estudos. A média geométrica foi adotada devido à distribuição assimétrica observada para concentrações de metais e metaloides em ambientes aquáticos. As análises foram realizadas considerando a distribuição dos registros por país, sub-bacia e corpo hídrico, permitindo identificar padrões espaciais de ocorrência dos elementos.

A avaliação dos resultados foi realizada por meio da comparação das concentrações registradas com os limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil, 2005), pela Resolución SEAM Nº 222/02 (Paraguai, 2002) e pela Ley del Medio Ambiente Nº 1333 (Bolívia, 1992), considerando os valores de referência aplicáveis à proteção da vida aquática e ao uso para abastecimento humano após tratamento convencional.

Com base nessa comparação, foram identificadas e contabilizadas as ocorrências de concentrações superiores aos valores de referência estabelecidos pelas respectivas legislações, permitindo discutir a distribuição espacial dessas excedências e sua relevância para o monitoramento da qualidade da água na Bacia do Rio Paraguai.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Estudos incluídos e distribuição espacial dos dados

Foram incluídos na análise 19 estudos científicos revisados por pares, publicados entre 1995 e 2025, que apresentaram concentrações de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai. No conjunto, esses estudos contemplaram 41 corpos hídricos e totalizaram 158 pontos amostrais distribuídos entre Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina (Figura 2).

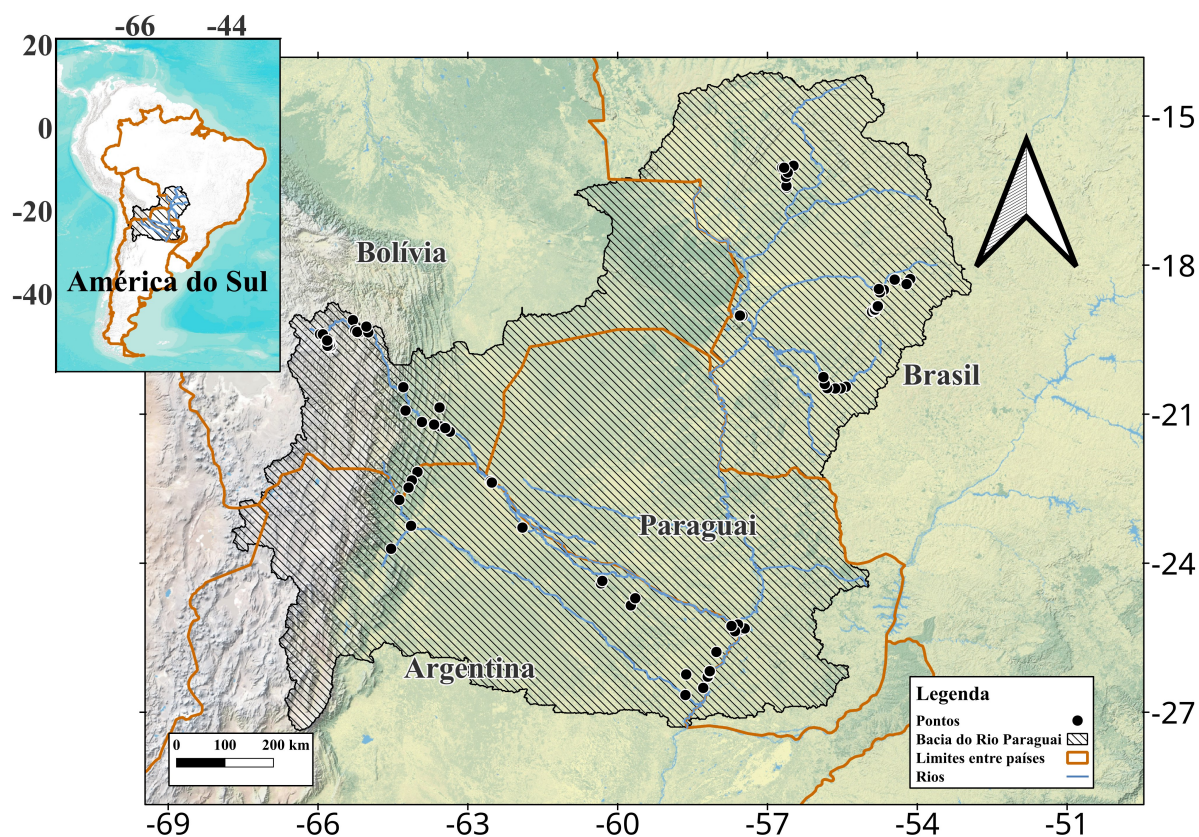


Figura 2. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Paraguai na América do Sul e distribuição espacial dos pontos amostrais de águas superficiais incluídos na revisão da literatura (1995–2025). O polígono hachurado representa os limites da bacia hidrográfica, as linhas azuis correspondem aos principais cursos d’água e as linhas laranja indicam as fronteiras internacionais entre Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina. Os círculos pretos representam os pontos amostrais compilados nos estudos selecionados.

A distribuição espacial dos pontos de amostragem evidencia maior concentração de estudos nas porções brasileira e boliviana da bacia, enquanto os territórios paraguaio e argentino apresentam baixa representatividade amostral. Esse padrão sugere a existência de assimetria espacial no monitoramento da qualidade da água, refletindo desigualdades na produção científica e na disponibilidade de dados entre os países que compartilham a bacia.

4.2. Comparação das concentrações com legislações de qualidade da água

A Bacia do Rio Paraguai é compartilhada por diferentes países que adotam referenciais próprios para avaliação da qualidade da água. Neste estudo foram consideradas a Resolução CONAMA nº 357/2005 (Brasil), a Ley nº 1333/92 (Bolívia) e a Resolución SEAM nº 222/02 (Paraguai), que estabelecem valores máximos permitidos distintos para diversos metais e metaloides. Essas diferenças refletem abordagens regulatórias específicas de cada país e podem influenciar a classificação de um mesmo conjunto de dados ambientais.

A comparação das concentrações com os limites estabelecidos por essas legislações evidenciou diferenças importantes na frequência de registros classificados como conformes ou não conformes (Figura 3).

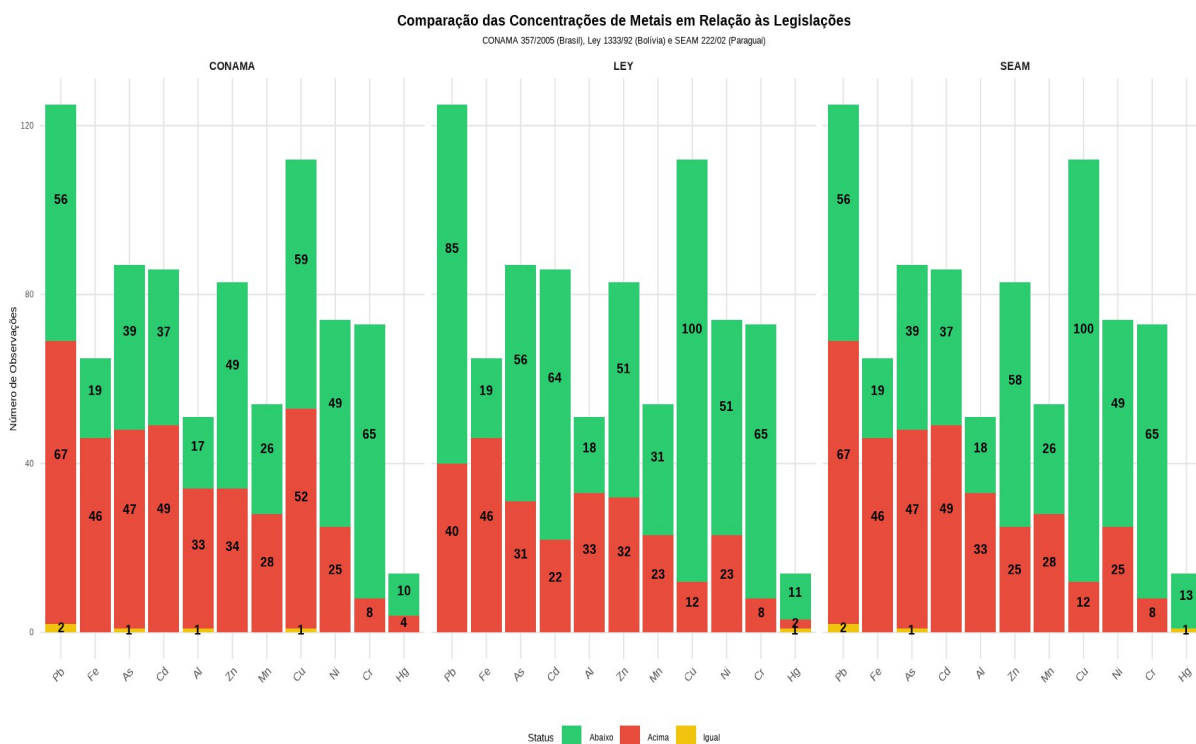


Figura 3. Distribuição das concentrações de metais (Pb, Fe, As, Cd, Al, Zn, Mn, Cu, Ni, Cr, Hg) em relação aos limites estabelecidos pelas legislações CONAMA 357/2005 (Brasil), Lei 1333/92 (Bolívia) e Resolución SEAM 222/02 (Paraguai), classificadas como abaixo, acima ou iguais aos limites legais.

Em alguns casos, um mesmo conjunto de concentrações foi enquadrado de forma distinta dependendo da legislação. O Cu representa o exemplo, apresentando elevada frequência de registros acima dos limites da legislação brasileira, enquanto a maior parte dos valores foi classificada como abaixo dos limites estabelecidos pelas legislações boliviana e paraguaia.

Após a aplicação dos diferentes referenciais legais, observou-se que Pb, Cd e As apresentaram as maiores frequências de concentrações superiores aos limites permitidos.

Considerando a Resolução CONAMA nº 357/2005, o Pb registrou o maior número de excedências ($n = 67$), seguido por Cd ($n = 49$) e As ($n = 47$). Mesmo sob legislações com critérios distintos, o Pb foi o que mais apresentou concentrações superiores aos valores de referência. Os elementos Hg e Al apresentaram número reduzido de registros disponíveis quando comparados a Pb, Cu e Zn. Essa diferença na disponibilidade de dados limita comparações entre os elementos e evidencia lacunas de monitoramento para determinados contaminantes na bacia.

Dessa forma, os resultados demonstram que a interpretação da conformidade das concentrações observadas depende do referencial legal adotado. As diferenças entre os limites

estabelecidos pelas legislações brasileira, boliviana e paraguaia dificultam comparações diretas entre estudos realizados em diferentes países e reforçam a importância de iniciativas voltadas à harmonização dos critérios de qualidade da água em sistemas hidrográficos transfronteiriços.

De maneira geral, Pb, Cd e As foram os elementos que apresentaram maior número de concentrações acima dos valores de referência, independentemente da legislação considerada. Esse resultado indica que esses contaminantes representam os pontos de atenção para a qualidade das águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai.

Entre todos os elementos avaliados, o Pb apresentou a situação mais crítica. Considerando os critérios da Resolução CONAMA nº 357/2005, foram registrados 67 excedências, correspondendo ao maior número de excedências entre todos os metais analisados. Resultados similares foram observados quando aplicados os critérios da legislação boliviana e paraguaia, evidenciando que a ocorrência de Pb acima dos valores de referência constitui um padrão recorrente na bacia. A frequência de excedências pode estar relacionada aos registros da região andina boliviana, onde atividades mineradoras foram apontadas como fontes de liberação desse elemento para os sistemas aquáticos.

O Cd e o As também apresentaram elevadas frequências de não conformidade. Pela legislação brasileira, foram observadas 49 excedências para Cd e 47 para As. Esses elementos ocorreram em áreas associadas à mineração e drenagem ácida de mina, especialmente nos tributários andinos dos rios Pilcomayo e Tarapaya. A elevada ocorrência desses contaminantes reforça a influência das atividades extrativas na composição química das águas superficiais da porção superior da bacia.

Em contraste, Fe, Zn, Mn e Ni apresentaram comportamento intermediário, com ocorrência simultânea de registros acima e abaixo dos limites legais. Embora nem sempre tenham ultrapassado os valores de referência com a mesma frequência observada para Pb, Cd e As, suas concentrações foram elevadas em áreas sob influência de mineração, indicando que podem contribuir para alterações na qualidade da água.

O Cu destacou-se por apresentar dependência do referencial legal adotado. Enquanto a legislação brasileira classificou parcela dos registros como acima do limite permitido, a maioria dessas mesmas concentrações foi considerada compatível com os critérios estabelecidos pela legislação boliviana e paraguaia. Esse resultado demonstra que a interpretação da conformidade ambiental pode variar em função dos limites legais, dificultando comparações diretas entre estudos conduzidos em diferentes países da bacia.

O Hg e Al apresentaram menor número de registros disponíveis na literatura quando comparados aos demais metais. Consequentemente, as interpretações relacionadas a esses elementos devem ser realizadas com cautela, uma vez que a reduzida disponibilidade de dados limita avaliações mais robustas sobre seus padrões de ocorrência e excedência.

As diferenças observadas entre os referenciais normativos demonstram um desafio recorrente em bacias hidrográficas transfronteiriças. Um mesmo conjunto de concentrações pode ser interpretado de maneira distinta dependendo da legislação utilizada, resultando em classificações divergentes sobre a qualidade ambiental de um mesmo corpo hídrico. Essa condição evidencia a necessidade de maior harmonização dos critérios de avaliação da qualidade da água entre os países que compartilham a Bacia do Rio Paraguai, favorecendo diagnósticos ambientais mais consistentes e comparáveis.

5. Distribuição espacial dos metais

5.1. Maiores concentrações

A síntese das maiores concentrações de metais e metaloides registradas nos estudos incluídos revelou ampla variação entre os elementos avaliados (Tabela 2).

Tabela 1. Maiores concentrações de metais e metaloides descritas nos estudos incluídos na revisão para a Bacia do Rio Paraguai, indicando o corpo hídrico e ano de amostragem

Metal	Concentração (mg L⁻¹)	Rio	Ano
Fe	950	Rio Agua Dulce	2007
Al	630	Rio Agua Dulce	2007
Zn	560	Córrego Quebrada Chimborazo	2007
Mn	110	Riacho Jayac Mayu	2007
As	12,8	Rio Tarapaya	2007
Pb	9,2	Córrego Huayna Mayu Leste	2007
Ni	7,2	Córrego afluente sem nome do Rio Jayac	2007
Cu	6,7	Riacho Jayac Mayu	2007
Cd	1,2	Córrego Quebrada Chimborazo	2007
Cr	0,47	Rio Água Dulce	2007
Hg	0,002	Rio Bento Gomes	1992

Os maiores valores foram observados para Fe (950 mg L⁻¹), Al (630 mg L⁻¹), Zn (560 mg L⁻¹) e Mn (110 mg L⁻¹), e os menores foram para Hg (0,002 mg L⁻¹) e Cr (0,47 mg L⁻¹).

Observou-se que dez dos onze maiores valores foram registrados em amostragens realizadas em 2007, principalmente em corpos hídricos localizados na porção boliviana da bacia. Destacaram-se o Rio Água Dulce, responsável pelos maiores registros de Fe, Al e Cr, o Córrego Quebrada Chimborazo, que apresentou os maiores valores de Zn e Cd, e o sistema Jayac Mayu–Huayna Mayu, associado aos maiores registros de Mn, Ni, Cu e Pb.

Os resultados indicam que as concentrações máximas observadas na literatura se encontram concentradas em um número reduzido de tributários da região andina da bacia. Esse padrão sugere a existência de áreas críticas ("hotspots") para ocorrência de metais e metaloides, contrastando com a maioria dos demais corpos hídricos avaliados, nos quais foram registradas concentrações inferiores. Embora diversos valores máximos excedam os limites estabelecidos pelas legislações de qualidade da água discutidas anteriormente, deve-se ressaltar que tais registros representam concentrações pontuais observadas em estudos específicos e não necessariamente refletem as condições médias dos corpos hídricos analisados.

5.2. Distribuição das concentrações entre corpos hídricos

A distribuição das concentrações máximas de metais e metaloides entre os corpos hídricos da Bacia do Rio Paraguai evidenciou heterogeneidade espacial (Figura 4).

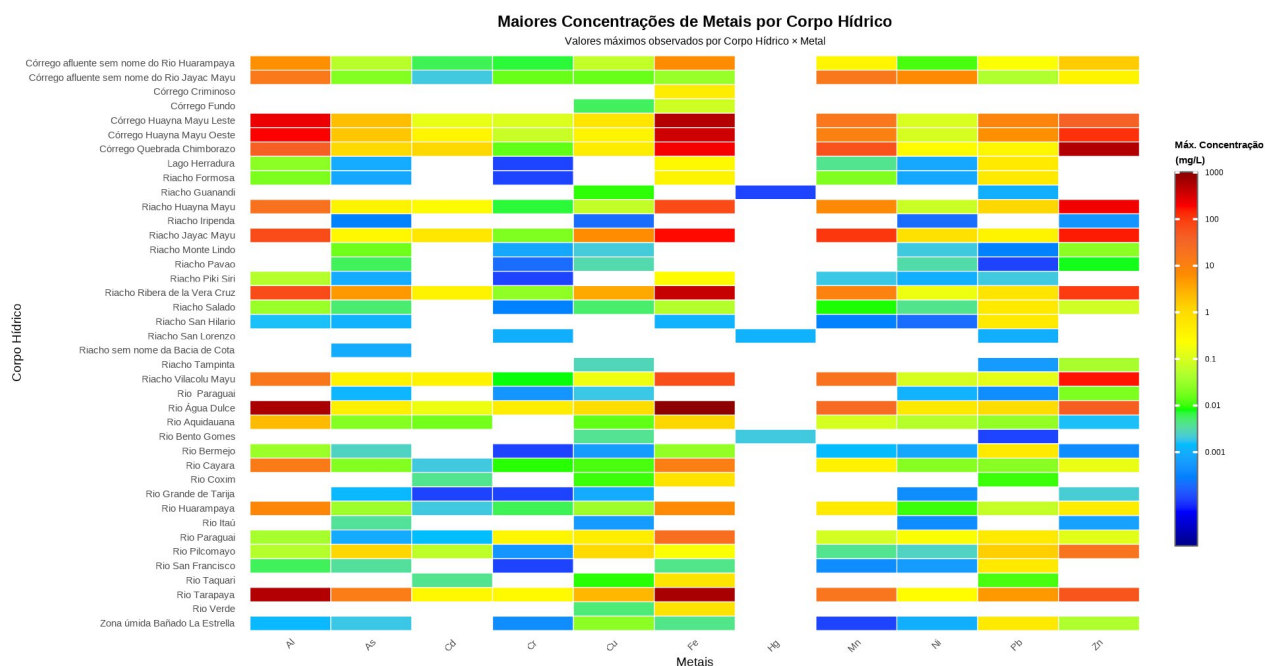


Figura 4. Mapa de calor das maiores concentrações de metais e metaloides (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos da Bacia do Rio Paraguai. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e as cores representam a magnitude dos valores observados. Células em branco indicam ausência de dados disponíveis.

O mapa de calor (Figura 4) demonstra que os maiores registros se concentraram em poucos tributários localizados na porção oeste da bacia, especialmente na Bolívia, enquanto a maior parte dos corpos hídricos apresentou concentrações moderadas ou baixas para a maioria dos elementos avaliados. Os maiores valores de Fe, Al e Cr foram registrados no Rio Água Dulce, enquanto o Córrego Quebrada Chimborazo apresentou os maiores registros de Zn e Cd. De forma semelhante, concentrações elevadas de Pb, Ni, Cu e Mn foram observadas principalmente nos sistemas Huayna Mayu e Jayac Mayu. Esses resultados indicam que determinados tributários concentram simultaneamente elevados níveis de diversos elementos, caracterizando áreas de maior relevância para o monitoramento ambiental da bacia.

A concentração dos maiores valores de metais e metaloides em corpos hídricos da região andina boliviana sugere que os registros máximos observados na literatura estão mais associados às características ambientais desses sistemas do que propriamente ao período de amostragem. Os rios Água Dulce, Tarapaya, Jayac Mayu, Huayna Mayu e a Quebrada Chimborazo localizam-se na região de Potosí, uma das áreas mineradoras mais antigas e exploradas da América do Sul, reconhecida pela extração histórica de prata, estanho, chumbo, zinco e cobre desde o período colonial (Hudson-Edwards et al., 2001; Smolders et al., 2003; Strosnider et al., 2011).

Os elevados valores de Fe, Al, Zn, Cu, Cd e Pb observados nesses tributários são consistentes com ambientes influenciados por drenagem ácida de mina (Acid Mine Drainage – AMD), processo descrito como uma das principais fontes de contaminação por metais em sistemas aquáticos associados à mineração (Nordstrom, 2011; Blowes et al., 2014). Segundo Nordstrom (2011), a oxidação de minerais sulfetados, especialmente pirita (FeS_2), promove a geração de ácido sulfúrico e a consequente diminuição do pH da água, aumentando a solubilidade e a mobilidade de diversos metais potencialmente tóxicos. Como resultado, elementos como Fe, Al, Zn, Cu, Cd e Pb podem atingir concentrações elevadas em rios e córregos localizados a jusante de áreas mineradas.

Além da influência das atividades minerárias, a própria geologia da região andina contribui para a disponibilidade natural desses elementos. De acordo com Salomons e Förstner (1984), áreas metalogenéticas caracterizadas por depósitos sulfetados apresentam elevada suscetibilidade à mobilização geoquímica de metais, particularmente quando submetidas à intensa alteração física e química decorrente de atividades de extração mineral. Nesse contexto, os

processos geogênicos e antrópicos atuam de forma conjunta na determinação das concentrações observadas nos sistemas aquáticos.

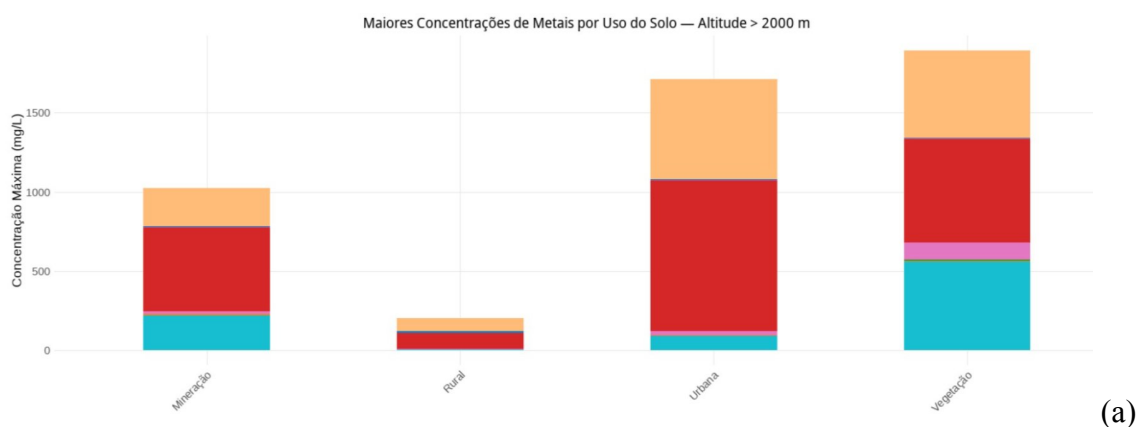
Os padrões observados nesta revisão também podem ser interpretados sob a perspectiva do conceito de hotspots de contaminação ambiental, que correspondem a áreas que concentram níveis superiores de contaminantes em relação ao padrão regional, representando zonas prioritárias para monitoramento e gestão ambiental (Zhou et al., 2020). A recorrente ocorrência dos maiores registros de metais em tributários específicos da região de Potosí sugere que esses sistemas constituem importantes hotspots de contaminação na Bacia do Rio Paraguai.

Os resultados são consistentes com os de Strosnider et al. (2011), que identificaram elevadas concentrações de metais dissolvidos e particulados em tributários da bacia do rio Pilcomayo associados à mineração histórica de Potosí. Esses autores destacam que a drenagem ácida de mina e o transporte de rejeitos minerais representam importantes mecanismos de transferência de contaminantes para os ecossistemas aquáticos da região.

Dessa forma, os maiores registros compilados nesta revisão não devem ser interpretados como uma condição representativa de toda a Bacia do Rio Paraguai, mas como reflexo da existência de sistemas hidrológicos específicos influenciados por processos de mineração histórica e drenagem ácida de mina. Esse padrão reforça a importância de considerar o contexto geológico, hidrológico e de uso do solo das áreas de cabeceira na interpretação da distribuição espacial de metais e metaloides em bacias hidrográficas de grande escala.

5.3. Influência do uso do solo e altitude

As concentrações máximas de metais e metaloides foram avaliadas em função das categorias de uso do solo e de duas faixas altitudinais (> 2000 m e ≤ 2000 m), permitindo explorar possíveis padrões espaciais associados às características dos locais de amostragem (Figura 5).



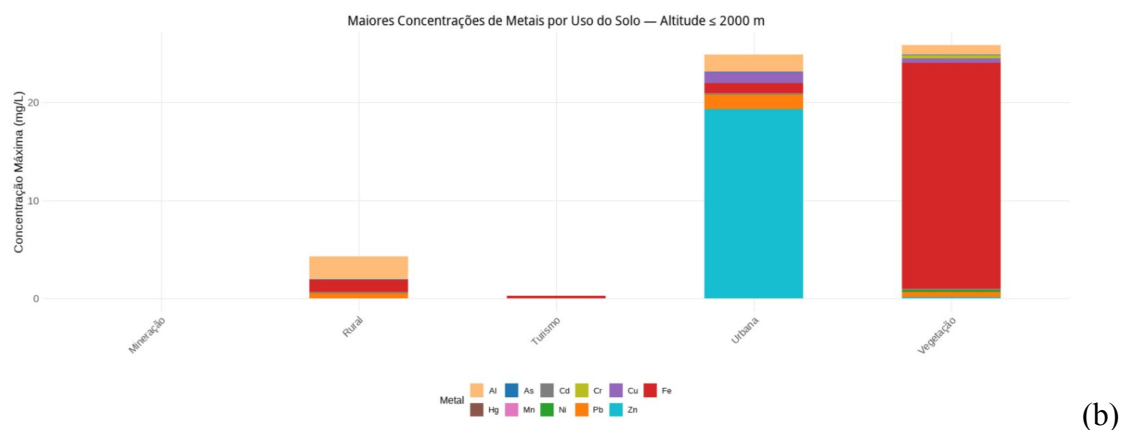


Figura 5. Concentrações máximas de metais e metalóides em diferentes categorias de uso do solo em áreas com altitude superior a 2000 m (a) e igual ou inferior a 2000 m (b). As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e representam os maiores valores observados para cada categoria.

Os resultados evidenciaram diferenças entre as duas faixas altitudinais. Nas áreas situadas acima de 2000 m (Figura 5a) foram registrados os maiores valores máximos para a maioria dos elementos avaliados, destacando-se Fe (950 mg L^{-1}), Al (630 mg L^{-1}), Zn (560 mg L^{-1}), Mn (110 mg L^{-1}) e As ($12,8 \text{ mg L}^{-1}$). Em contraste, nas áreas localizadas em altitudes iguais ou inferiores a 2000 m (Figura 5b), as concentrações máximas foram substancialmente menores, raramente ultrapassando 25 mg L^{-1} para os elementos.

A predominância dos maiores registros em altitudes elevadas está relacionada à distribuição geográfica dos principais hotspots identificados nesta revisão. Os rios Água Dulce, Tarapaya, Jayac Mayu, Huayna Mayu e a Quebrada Chimborazo localizam-se na região andina de Potosí, área associada à exploração de depósitos polimetálicos e reconhecida como uma das principais regiões mineradoras da América do Sul (Hudson-Edwards et al., 2001; Smolders et al., 2003; Strosnider et al., 2011). Dessa forma, a altitude deve ser interpretada como uma variável indicadora do contexto geográfico e ambiental.

Os elevados valores de Fe, Al, Zn, Cu, Cd e Pb observados nesses tributários são consistentes com ambientes influenciados por drenagem ácida de mina (Acid Mine Drainage – AMD), processo reconhecido como mecanismo de mobilização de metais em regiões mineradas (Nordstrom, 2011; Blowes et al., 2014). Assim, os resultados sugerem que a associação observada entre maiores concentrações e altitudes elevadas reflete a localização dos sistemas impactados da bacia em áreas andinas sujeitas à influência histórica da mineração.

Em ambas as faixas altitudinais, as categorias Vegetação e Urbana apresentaram os maiores valores máximos. Entretanto, esse resultado não deve ser interpretado como indicativo

de maior contaminação em áreas preservadas. Em diversos casos, os pontos classificados como Vegetação estavam inseridos em bacias hidrográficas influenciadas por atividades mineradoras a montante, especialmente nos tributários andinos da Bolívia. Segundo a abordagem de bacia hidrográfica proposta por Allan (2004) e Allan e Castillo (2007), a qualidade da água reflete a integração dos processos que ocorrem em toda a área de drenagem, e não apenas as características locais do entorno do ponto amostral. Dessa forma, a classificação do uso do solo descreve as condições da área e representa as pressões ambientais atuantes em escalas espaciais.

As categorias Rural e Turismo apresentaram concentrações inferiores às observadas nas demais classes, embora alguns elementos tenham registrado valores elevados em locais específicos. Esse padrão sugere que a ocorrência de concentrações elevadas de metais e metaloides resulta da interação entre características geológicas, histórico de uso da terra, atividades antrópicas e processos hidrológicos que atuam em diferentes escalas espaciais. Estudos em ecologia de rios demonstram que alterações na qualidade da água refletem efeitos decorrentes da conectividade hidrológica e da combinação de múltiplas fontes de contaminação ao longo da bacia (Ward et al., 2002; Pringle, 2003).

De forma geral, os resultados reforçam a existência de um gradiente espacial de concentrações ao longo da Bacia do Rio Paraguai, caracterizado por valores mais elevados nos tributários andinos de cabeceira e redução progressiva em direção às regiões centrais e inferiores da bacia. Esse padrão é consistente com a distribuição geográfica dos principais hotspots de contaminação identificados na revisão e com o conceito de conectividade longitudinal dos sistemas fluviais, segundo o qual processos físicos, químicos e biológicos observados a montante influenciam as condições ambientais observadas a jusante (Pringle, 2003). Contudo, as interpretações devem ser realizadas com cautela, uma vez que os dados representam concentrações máximas e refletem diferenças na intensidade do monitoramento e na disponibilidade de informações entre as regiões da bacia.

5.4. Distribuição espacial e padrões geográficos

A análise das concentrações máximas de metais e metaloides agrupadas por país revelou diferenças geográficas na distribuição dos elementos ao longo da Bacia do Rio Paraguai (Figura 6).

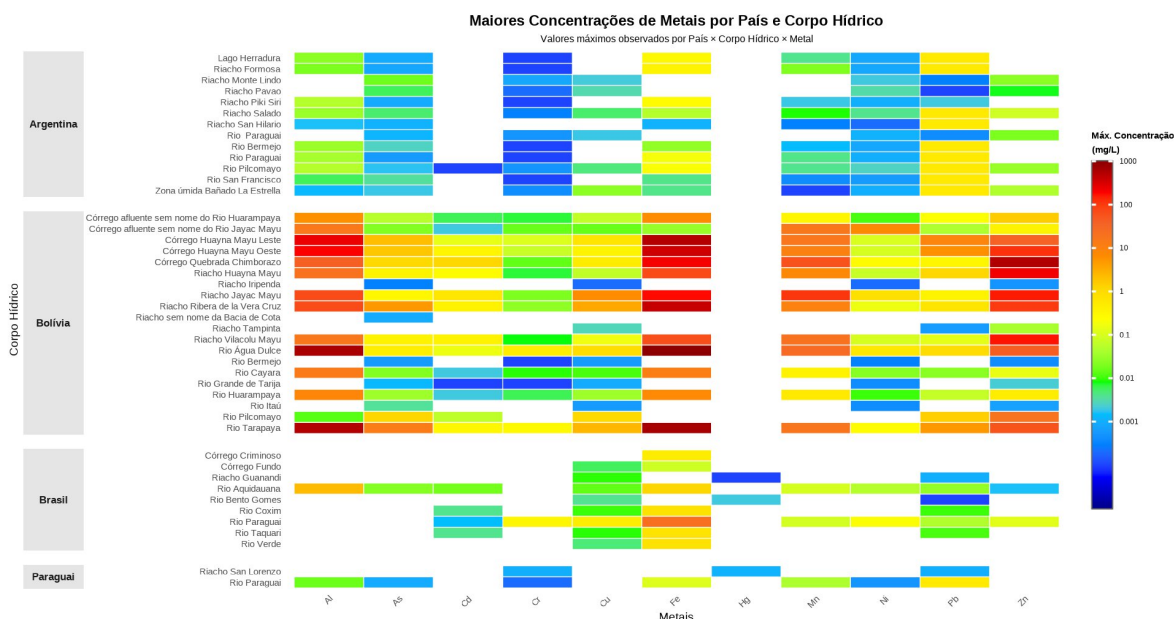


Figura 6. Mapa de calor das concentrações máximas de metais e metaloides em diferentes corpos hídricos da Bacia do Rio Paraguai, agrupados por país. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} e as cores representam a magnitude dos valores máximos observados para cada elemento. Células em branco indicam ausência de dados disponíveis.

De forma geral, os maiores valores foram registrados em corpos hídricos localizados na Bolívia, enquanto Brasil, Paraguai e Argentina apresentaram concentrações máximas inferiores para a maioria dos elementos avaliados. Os tributários bolivianos destacaram-se por apresentarem elevadas concentrações de diversos metais e metaloides, incluindo Fe, Al, Zn, Pb, As, Cd, Cu e Mn. Entre os corpos hídricos de maior relevância destacaram-se o Rio Água Dulce, o Rio Tarapaya, o Córrego Quebrada Chimborazo, o sistema Huayna Mayu e o Riacho Jayac Mayu, responsáveis pelos maiores registros nesta revisão. Em diversos desses locais foram observadas concentrações elevadas para múltiplos elementos, caracterizando áreas críticas ou hotspots de contaminação. Segundo Zhou et al. (2020), essas áreas correspondem a áreas que concentram níveis de contaminantes superiores ao padrão regional, sendo consideradas prioritárias para monitoramento e gestão ambiental.

Em contraste, os estudos realizados no Brasil apresentaram concentrações máximas inferiores às observadas nos tributários andinos bolivianos, embora alguns corpos hídricos tenham registrado valores expressivos para determinados elementos. Destacam-se o Rio Paraguai, o Rio Aquidauana, o Rio Taquari e o Rio Coxim, onde foram observadas concentrações elevadas de Fe, Pb, Ni, Cr e Zn quando comparadas aos demais ambientes do país.

Os dados da Argentina e do Paraguai evidenciaram concentrações mais baixas e menor diversidade de elementos avaliados. Contudo, essa interpretação deve considerar a reduzida

disponibilidade de estudos nessas regiões, fator que limita comparações mais robustas entre os diferentes setores da bacia e evidencia importantes lacunas de monitoramento ambiental.

Os padrões geográficos observados sugerem a existência de um gradiente espacial de concentrações ao longo da Bacia do Rio Paraguai, caracterizado por valores mais elevados nos tributários andinos da Bolívia e redução progressiva em direção às regiões do Chaco, Pantanal e baixo curso do rio Paraguai. Esse comportamento é compatível com conceitos de conectividade hidrológica e funcionamento de paisagens fluviais, nos quais processos físicos, químicos e biogeoquímicos que ocorrem nas áreas de cabeceira influenciam as condições ambientais observadas a jusante (Ward et al., 2002; Pringle, 2003; Tockner et al., 2002).

Embora os dados não permitam quantificar os fluxos de transporte dos elementos ao longo da bacia, os padrões sugerem a atuação de processos de dispersão longitudinal, sedimentação e retenção de partículas no sistema hidrográfico. Nesse contexto, as planícies de inundação do Pantanal desempenham papel na retenção temporária e redistribuição de sedimentos e contaminantes. De acordo com o Flood Pulse Concept (Junk et al., 1989), os ciclos sazonais de inundação promovem a troca de matéria entre rios e planícies alagáveis, favorecendo processos de armazenamento, transformação e redistribuição de elementos químicos nos sistemas fluviais.

Em conjunto, os resultados demonstram que a distribuição dos metais e metaloides na Bacia do Rio Paraguai apresenta componente geográfico, evidenciando diferenças entre os compartimentos hidrogeomorfológicos e os países que compartilham a bacia. Esses achados reforçam a importância de estratégias integradas de monitoramento e gestão ambiental transfronteiriça, especialmente em regiões identificadas como hotspots de contaminação e em áreas estratégicas para retenção e transporte de contaminantes.

5.5. Variação Temporal dos registros

A distribuição temporal das concentrações máximas de metais e metaloides incluídos revelou elevada variabilidade entre os anos avaliados (Figura 7).

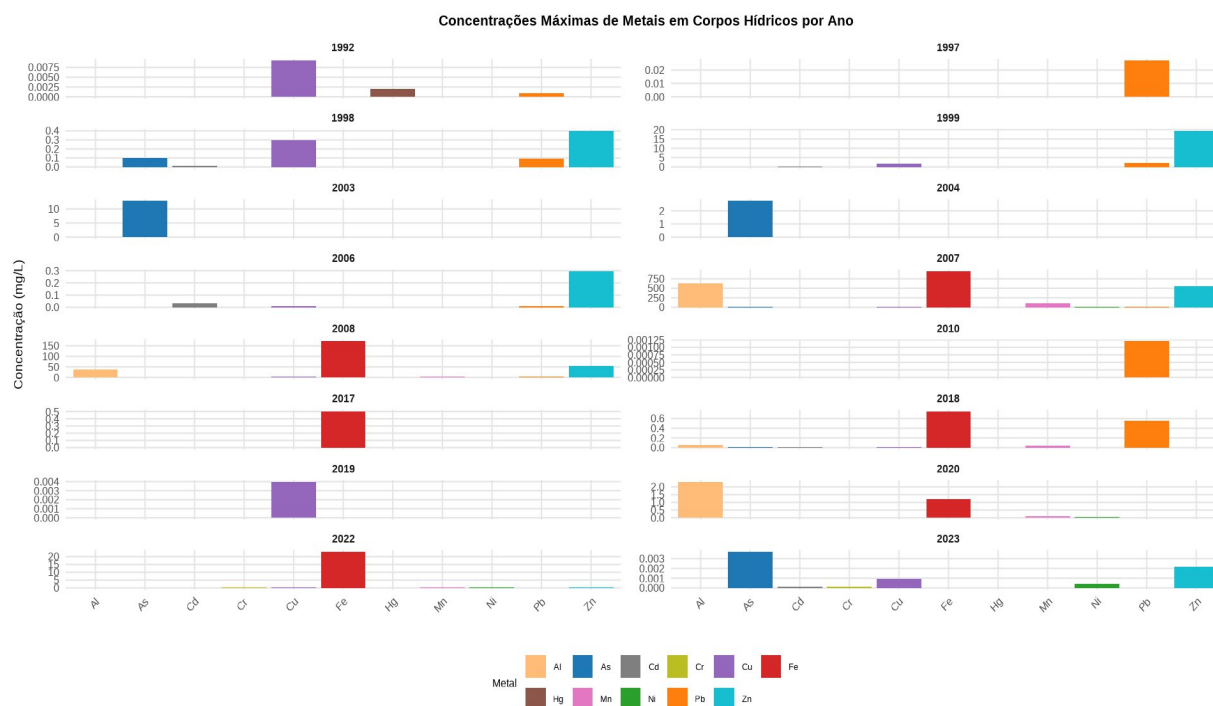


Figura 7. Distribuição temporal das concentrações máximas de metais e metaloides (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) na Bacia do Rio Paraguai entre 1992 e 2023. As concentrações estão expressas em mg L^{-1} .

Os registros abrangem o período de 1992 a 2023, porém a disponibilidade de dados mostrou-se descontínua, refletindo diferenças na realização de campanhas de monitoramento, nos locais amostrados e nos elementos investigados ao longo do tempo.

Os maiores valores foram observados em registros associados ao ano de 2007, destacando-se Fe (950 mg L^{-1}), Al (630 mg L^{-1}), Zn (560 mg L^{-1}), Mn (110 mg L^{-1}) e Pb ($9,2 \text{ mg L}^{-1}$). Entretanto, esses resultados não devem ser interpretados como evidência de um período de maior contaminação em toda a Bacia do Rio Paraguai. Os valores máximos observados nesse ano estão associados principalmente a estudos realizados em tributários andinos da região de Potosí, Bolívia, incluindo os sistemas Água Dulce, Tarapaya, Jayac Mayu e Huayna Mayu, reconhecidos na literatura por apresentarem elevada influência de mineração histórica e drenagem ácida de mina (Strosnider et al., 2011).

Valores elevados também foram observados em outros períodos específicos, particularmente para As, Pb, Cu e Zn. Contudo, a ocorrência desses registros esteve associada a estudos conduzidos em locais distintos e sob diferentes contextos ambientais, evidenciando que a variabilidade observada reflete predominantemente diferenças espaciais entre os sistemas investigados. Dessa forma, os padrões temporais identificados nesta revisão estão fortemente condicionados à distribuição geográfica dos estudos disponíveis.

Após 2017, as concentrações máximas foram, em geral, inferiores às observadas nos estudos realizados na região andina durante as décadas anteriores. No entanto, essa diferença deve ser interpretada com cautela. Os estudos incluídos apresentam diferenças substanciais quanto ao delineamento amostral, número de pontos avaliados, elementos analisados e localização geográfica, impossibilitando comparações temporais diretas. Segundo Lindenmayer e Likens (2010), a ausência de programas padronizados de monitoramento de longo prazo constitui uma das principais limitações para a identificação de tendências temporais robustas em sistemas ambientais complexos.

Além disso, a utilização de concentrações máximas favorece a identificação de eventos extremos e áreas críticas de contaminação, mas não representa necessariamente as condições médias dos corpos hídricos avaliados (Lovett et al., 2007). Assim, os resultados apresentados devem ser interpretados como indicadores da ocorrência de concentrações elevadas em determinados períodos e locais, e não como uma série temporal contínua da qualidade da água da Bacia do Rio Paraguai.

Em conjunto, os resultados indicam que a variabilidade temporal observada na literatura está fortemente associada à evolução do esforço de monitoramento e à distribuição espacial dos estudos realizados ao longo da bacia. Os maiores registros concentraram-se em campanhas conduzidas em tributários andinos da Bolívia, enquanto estudos mais recentes abrangeram diferentes setores da bacia e frequentemente descreveram concentrações inferiores. Dessa forma, a análise temporal deve ser interpretada principalmente como um reflexo da disponibilidade e distribuição dos estudos publicados, e não como evidência de tendências temporais de aumento ou redução da contaminação em escala de bacia hidrográfica (Burt et al., 2011).

5.6. Comparação das concentrações máximas entre países

A comparação das concentrações máximas de metais e metaloides entre os países que compartilham a Bacia do Rio Paraguai indicou diferenças na magnitude dos valores registrados (Figura 8).

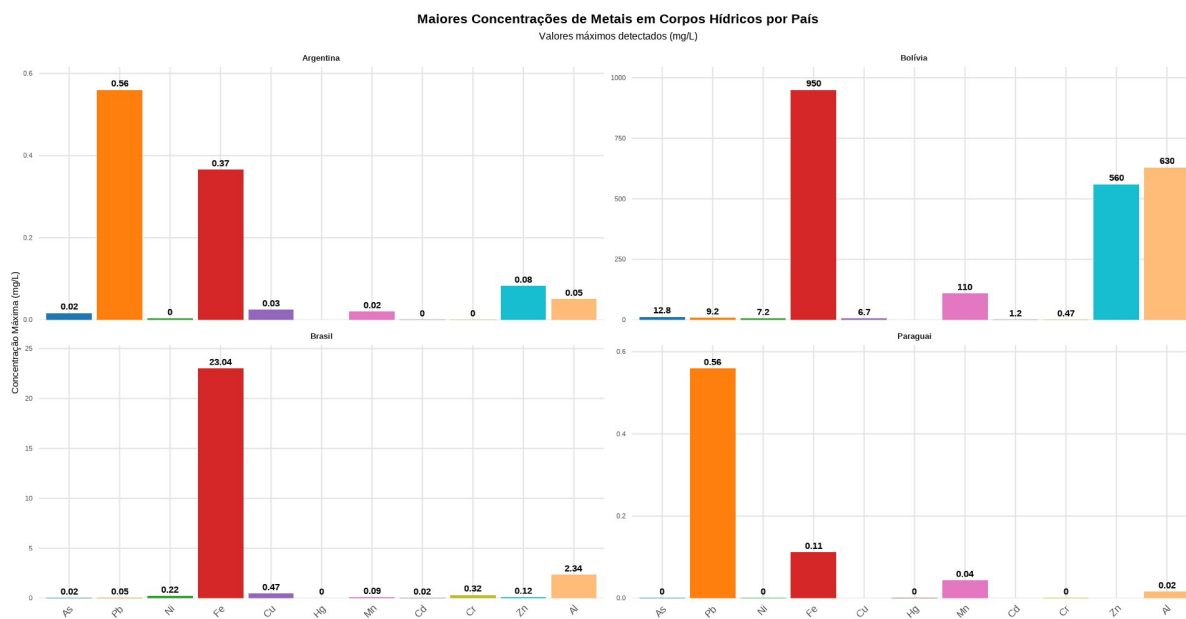


Figura 8. Concentrações máximas de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn em corpos hídricos superficiais da Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai. Os valores estão expressos em mg L^{-1} e correspondem às maiores concentrações para cada elemento nos estudos compilados na revisão. Os números acima das barras indicam os valores máximos observados.

De maneira geral, os maiores valores compilados na literatura foram observados em corpos hídricos localizados na Bolívia, enquanto Argentina, Brasil e Paraguai apresentaram concentrações máximas inferiores para a maioria dos elementos avaliados.

A Bolívia concentrou os maiores registros para todos os metais e metalóides analisados, destacando-se Fe (950 mg L^{-1}), Al (630 mg L^{-1}), Zn (560 mg L^{-1}), Mn (110 mg L^{-1}), As ($12,8 \text{ mg L}^{-1}$), Pb ($9,2 \text{ mg L}^{-1}$), Ni ($7,2 \text{ mg L}^{-1}$) e Cu ($6,7 \text{ mg L}^{-1}$). Esses valores foram registrados principalmente em tributários andinos associados aos sistemas Tarapaya, Água Dulce, Jayac Mayu, Huayna Mayu e Quebrada Chimborazo, que também concentraram os maiores registros observados em toda a revisão.

No Brasil, as maiores concentrações foram observadas para Fe ($23,04 \text{ mg L}^{-1}$) e Al ($2,34 \text{ mg L}^{-1}$), enquanto os demais elementos apresentaram valores máximos inferiores a 1 mg L^{-1} . Embora menores que os observados na Bolívia, esses registros demonstram a ocorrência de metais em diferentes setores da bacia, especialmente em áreas associadas aos rios Paraguai, Aquidauana, Taquari e Coxim.

Na Argentina e no Paraguai, os maiores registros foram observados para Pb, com concentrações máximas de $0,56 \text{ mg L}^{-1}$ em ambos os países. Na Argentina, também se destacaram Fe ($0,37 \text{ mg L}^{-1}$) e Zn ($0,08 \text{ mg L}^{-1}$), enquanto no Paraguai os maiores valores, além de Pb, foram registrados para Fe ($0,11 \text{ mg L}^{-1}$), Mn ($0,04 \text{ mg L}^{-1}$) e Al ($0,02 \text{ mg L}^{-1}$).

As diferenças observadas entre os países revelam contrastes expressivos na magnitude das concentrações máximas registradas para diversos elementos, frequentemente superiores em mais de uma ordem de grandeza. O Fe representa um exemplo particularmente ilustrativo, apresentando concentração máxima de 950 mg L^{-1} na Bolívia, enquanto os maiores valores observados no Brasil, Argentina e Paraguai foram de 23,04, 0,37 e $0,11 \text{ mg L}^{-1}$, respectivamente. Padrão semelhante foi observado para Al, Zn, As e Pb, evidenciando que os registros extremos se encontram fortemente concentrados na porção andina da bacia.

Esses resultados reforçam a existência de heterogeneidade espacial na distribuição dos metais e metaloides e indicam que a ocorrência dos maiores valores está associada a um número reduzido de sistemas hidrográficos específicos, previamente identificados como *hotspots* de contaminação. Essa abordagem pode contribuir para a compreensão dos processos de transporte de contaminantes em escala de bacia e para o desenvolvimento de ações integradas de gestão em sistemas hidrográficos transfronteiriços.

5.7. Implicações ambientais, hotspots de contaminação e modelo conceitual

A análise integrada da distribuição espacial dos estudos, das concentrações máximas de metais e metaloides, das diferenças altitudinais e dos padrões observados entre os países permitiu identificar tendências geográficas recorrentes ao longo da Bacia do Rio Paraguai. Em conjunto, os resultados demonstram que os maiores registros se concentram predominantemente em tributários localizados na região andina da Bolívia, enquanto concentrações progressivamente menores são observadas em direção às porções central e inferior da bacia.

Esse padrão evidencia que a distribuição dos metais e metaloides não ocorre de forma homogênea ao longo do sistema hidrográfico, mas está associada à existência de hotspots de contaminação, representados principalmente pelos sistemas Água Dulce, Tarapaya, Jayac Mayu, Huayna Mayu e Quebrada Chimborazo. Esses tributários concentraram alguns dos maiores registros compilados para Fe, Al, Zn, Mn, As, Pb, Cu e Cd, exercendo influência desproporcional sobre os padrões espaciais observados em escala de bacia. Segundo Zhou et al. (2020), hotspots correspondem a áreas que apresentam concentrações superiores ao padrão regional e constituem regiões prioritárias para monitoramento e gestão ambiental.

Embora os dados não permitam quantificar os fluxos de transporte e retenção dos elementos ao longo da rede hidrográfica, os resultados sugerem a existência de um gradiente espacial de concentrações associado às características geomorfológicas e hidrológicas da bacia. Esse comportamento é compatível com conceitos de conectividade hidrológica e funcionamento de paisagens fluviais, nos quais processos físicos, químicos e biogeoquímicos observados

em áreas de cabeceira podem influenciar as condições ambientais em regiões localizadas a jusante (Ward et al., 2002; Pringle, 2003)

Nesse contexto, os tributários andinos podem ser interpretados como áreas de origem dos maiores registros de metais e metaloides, enquanto as extensas planícies de inundação do Chaco e do Pantanal podem atuar como compartimentos relevantes para processos de sedimentação, retenção temporária e redistribuição de partículas e contaminantes. De acordo com o Flood Pulse Concept (Junk et al., 1989), os ciclos sazonais de inundação favorecem intensa troca de matéria entre rios e planícies alagáveis, influenciando o transporte, armazenamento e transformação de elementos químicos em grandes sistemas fluviais.

Sob a perspectiva da gestão ambiental, os resultados destacam a importância da identificação de áreas críticas de contaminação e da ampliação do monitoramento em regiões ainda pouco investigadas da bacia. A forte concentração dos registros extremos em um número reduzido de tributários sugere que ações de monitoramento direcionadas aos principais hotspots podem contribuir significativamente para a compreensão dos processos de transporte de contaminantes em escala regional.

O modelo conceitual proposto integra os principais resultados obtidos nesta revisão e sugere que a distribuição dos metais e metaloides na Bacia do Rio Paraguai não ocorre de forma aleatória, mas segue um padrão espacial associado à interação entre geologia, mineração histórica, conectividade hidrológica e processos de sedimentação. Nesse contexto, os tributários andinos constituem importantes áreas de origem dos maiores registros de contaminação, enquanto as planícies do Chaco e do Pantanal podem atuar como zonas de armazenamento temporário e redistribuição de contaminantes ao longo do sistema fluvial.

6. CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática constitui a primeira síntese transfronteiriça e sistematizada da ocorrência de metais e metaloides em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, abrangendo 19 estudos publicados entre 1995 e 2025, com dados provenientes de 41 corpos hídricos e 158 pontos amostrais distribuídos entre Brasil, Bolívia, Paraguai e Argentina.

Os resultados evidenciaram heterogeneidade espacial na distribuição desses elementos ao longo da bacia. As maiores concentrações foram registradas em tributários da porção andina boliviana, especialmente nos sistemas associados aos rios Tarapaya, Pilcomayo, Água Dulce, Jayac Mayu e Huayna Mayu, onde a drenagem ácida proveniente da mineração histórica de Potosí responde pelos registros mais extremos de Fe (até 950 mg L⁻¹), Al (até 630 mg L⁻¹) e

Zn (até 560 mg L⁻¹). Em contraste, os corpos hídricos das porções central e inferior da bacia, Pantanal, Chaco e Baixo Paraguai, apresentaram concentrações menores. Esse conjunto de processos configura um gradiente de contaminação consistente com os processos de diluição, sedimentação e retenção temporária que caracterizam as planícies de inundação.

A comparação com os referenciais normativos demonstrou excedências recorrentes dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 357/2005, pela Resolución SEAM nº 222/02 e pela Ley nº 1333/92, com maior frequência de não conformidade para Pb, Cd e As. Os resultados também revelaram que a interpretação da qualidade da água pode diferir substancialmente conforme a legislação adotada, como no caso do Cu, que apresentou elevada frequência de excedências pelo critério brasileiro e conformidade segundo os critérios boliviano e paraguaio. Esse achado reforça a necessidade urgente de padronização dos critérios de avaliação em sistemas hidrográficos transfronteiriços, onde a ausência de padrões comuns compromete tanto o diagnóstico integrado quanto a tomada de decisão em escala de bacia.

A análise temporal evidenciou descontinuidade expressiva na produção de dados ao longo das três décadas investigadas, com concentração dos registros entre 2003 e 2008 e ausência de séries históricas contínuas em qualquer dos países signatários. Associada à heterogeneidade metodológica entre os estudos, especialmente quanto aos elementos monitorados, técnicas analíticas e limites de detecção, essa fragmentação inviabiliza a identificação de tendências temporais e o estabelecimento de linhas de base confiáveis para a bacia.

As lacunas de monitoramento são tão expressivas quanto os próprios registros de contaminação. Paraguai e Argentina apresentaram cobertura amostral marcadamente inferior à de Brasil e Bolívia, e determinados setores da bacia, incluindo o Baixo Paraguai e tributários menores do Chaco, permanecem praticamente ausentes da literatura científica. A natureza compilatória desta revisão não permite estabelecer relações causais diretas entre as concentrações registradas e fontes específicas de contaminação; entretanto, os padrões espaciais observados são compatíveis com a influência simultânea de mineração, uso agropecuário do solo e processos geogênicos, cuja contribuição relativa constitui objeto prioritário para investigações futuras.

Diante desses resultados, reforça-se a necessidade de ampliar e padronizar os programas de monitoramento ambiental na Bacia do Rio Paraguai, promover a integração de dados entre os quatro países signatários e fortalecer mecanismos de cooperação internacional voltados à padronização de protocolos analíticos e critérios de qualidade da água. Tais ações são indispensáveis para subsidiar estratégias de gestão ambiental, conservação da biodiversidade

aquática e proteção dos recursos hídricos de uma das mais relevantes e ameaçadas bacias hidrográficas da América do Sul.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALLAN, J. D. Landscapes and riverscapes: the influence of land use on stream ecosystems. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, v. 35, p. 257–284, 2004. <https://doi.org/10.1146/annurev.ecolsys.35.120202.110122>.
- ALLAN, J. D.; CASTILLO, M. M. *Stream ecology: structure and function of running waters*. 2. ed. Dordrecht: Springer, 2007.
- ANDRADE, H. S.; MOREIRA, R. M.; COSTA JUNIOR, E. F. Influência da área urbana do Município de Coxim, Mato Grosso do Sul, Brasil, sobre a qualidade da água. *Revista Gestão & Sustentabilidade Ambiental*, v. 11, n. esp., p. 463–481, 2022.
- ASSINE, M. L. Sedimentação na bacia do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil. 2003. Tese (Livre-docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. Disponível em: <http://acervodigital.unesp.br/handle/11449/108382>.
- AVIGLIANO, E.; CLAVIJO, C.; SCARABOTTI, P.; SÁNCHEZ, S.; VEGH, S. L.; ROSSO, F. R.; CAFFETTI, J. D.; FACETTI, J. F.; DOMANICO, A.; VOLPEDO, A. V. Exposure to 19 elements via water ingestion and dermal contact in several South American environments (La Plata Basin): from Andes and Atlantic Forest to sea front. *Microchemical Journal*, v. 149, p. 103986, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.microc.2019.103986>.
- AVIGLIANO, E.; RESONGLES, E.; MORENO, E.; MARIE, M.; JALDÍN, M.; POUILLY, M. Transboundary mining pollution? Metal(oid) concentrations in water, sediments, and risk assessment for fish consumption in a lower Andean-to-Chaco sediment-choked basin. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 32, p. 15258–15273, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11356-025-36563-5>.
- ARCHER, J.; HUDSON-EDWARDS, K. A.; PRESTON, D. A.; HOWARTH, R. J.; LINGE, K. Aqueous exposure and uptake of arsenic by riverside communities affected by mining contamination in the Río Pilcomayo basin, Bolivia. *Mineralogical Magazine*, v. 69, n. 5, p. 719–736, 2005. <https://doi.org/10.1180/0026461056950283>.
- AZEVEDO, A. A.; MONTEIRO, J. L. G. Análise dos impactos ambientais da atividade agropecuária no Cerrado e suas inter-relações com os recursos hídricos na região do Pantanal. Brasília: WWF-Brasil, 2006. Disponível em: https://wwfbr.awsassets.panda.org/downloads/wwf_brasil_impactos_atividade_agropecuaria_cerrado_pantanal.pdf.

BAILLY, D.; BATISTA-SILVA, V. F.; CASSEMIRO, F. A. S.; LEMES, P.; GRAÇA, W. J.; OLIVEIRA, A. G.; COUTO, E. V.; FERREIRA, J. H. D.; RÉ, R.; RANGEL, T. F.; AGOSTINHO, A. A. The conservation of migratory fishes in the second largest river basin of South America depends on the creation of new protected areas. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, v. 31, p. 2515–2532, 2021. <https://doi.org/10.1002/aqc.3594>.

BARRESI ARMOA, O. L.; ARNOLD, J. G.; BIEGER, K.; SAUVAGE, S.; SÁNCHEZ-PÉREZ, J. M. Large wetlands representation in SWAT+: the case of the Pantanal in the Paraguay River Basin. *Frontiers in Water*, v. 6, p. 1451648, 2024. <https://doi.org/10.3389/frwa.2024.1451648>.

BLOWES, D. W.; PTACEK, C. J.; JAMBOR, J. L.; WEISENER, C. G. The geochemistry of acid mine drainage. In: HOLLAND, H. D.; TUREKIAN, K. K. (ed.). *Treatise on geochemistry*. 2. ed. Oxford: Elsevier, 2014. v. 11, p. 131–190. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-095975-7.00905-0>.

BOLÍVIA. Reglamento en Materia de Contaminación Hídrica: reglamenta la Ley del Medio Ambiente N° 1333, de 27 de abril de 1992. La Paz: Ministerio de Desarrollo Sostenible y Medio Ambiente, [s.d.]. Título I–VI, arts. 1°–74.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Plano de recursos hídricos da região hidrográfica do Paraguai – PRH Paraguai: diagnóstico consolidado da região hidrográfica do rio Paraguai (Produto Parcial PP-02). Brasília: ANA/SPR; Engecorps Engenharia S.A., 2017. 347 p. Disponível em: https://arquivos.ana.gov.br/portal/RH-Paraguai/plano_de_trabalho.pdf.

BRASIL. Agência Nacional de Águas (ANA). Plano de recursos hídricos da região hidrográfica do Paraguai – PRH Paraguai: resumo executivo. Brasília: ANA, 2018. 180 p. Disponível em: http://arquivos.ana.gov.br/portal/SAS/PRH_Paraguai/PF-02_PRH_Paraguai_Resumo_Executivo.pdf.

BRASIL. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Plano nacional de recursos hídricos 2022–2040. Brasília, DF: ANA, 2021. Disponível em: https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos/conjuntura_2021_pdf_final_revdirec.pdf.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. *Diário Oficial da União*, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450.

BURT, T. P.; HOWDEN, N. J. K.; WORRALL, F.; WHELAN, M. J.; BIEROZA, M. Nitrate in United Kingdom rivers: policy and its outcomes since 1970. *Environmental Science & Technology*, v. 45, n. 1, p. 175–181, 2011. <https://doi.org/10.1021/es102395s>.

CARVALHO, N. O. Hidrologia da bacia do Alto Paraguai. In: SIMPÓSIO SOBRE RECURSOS NATURAIS E SOCIOECONÔMICOS DO PANTANAL, 1., 1984, Corumbá. Anais... Corumbá: Embrapa Pantanal, 1986. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1144159/1/Hidrologia-alto-paraguai-1986.pdf>.

D'ÁVILA, R. B. Pesquisa pauta políticas públicas voltadas à pesca artesanal no Pantanal. Embrapa, 2023. Disponível em: <https://www.embrapa.br/busca-de-noticias/-/noticia/80394654/pesquisa-pauta-politicas-publicas-voltadas-a-pesca-artesanal-no-pantanal>.

FERREIRA, A. B. B. Pantanal Mato-Grossense: considerações sobre a proteção constitucional para um desenvolvimento econômico sustentável. *InterAções*, v. 14, n. 1, p. 11–20, 2012. <https://doi.org/10.1590/S1518-70122013000100002>.

GIRARD, P. Efeito cumulativo das barragens no Pantanal. Campo Grande: Instituto Centro de Vida – ICV, 2002. <https://ecoa.org.br/wp-content/uploads/2024/03/Efeito-Cumulativo-Das-Barragens-No-Pantanal.pdf>.

GOMES, P. E. S.; VIANA, J. G. M.; MIRANDA, W. A. M.; SILVA, G. R.; OLIVEIRA, H. R. Análise Físico-Química e de Metais Potencialmente Contaminantes em Águas do Córrego Criminoso, Bacia do Rio Paraguai, no Município de Coxim-MS. *Revista Internacional de Ciências*, v. 13, n. 2, p. 140–156, 2023. <https://doi.org/10.12957/ric.2023.72026>.

GOMES, P. E. E.; et al. Análise físico química e de metais potencialmente contaminantes em águas superficiais do rio verde e do córrego fundo, bacia do rio paraguai, município de Rio Verde de Mato Grosso – MS. *Revista UNESUM-Ciencias*, v. 7, n. 2, p. 29–41, 2023. <https://doi.org/10.47230/unesum-ciencias.v7.n2.2023.29-41>.

HAMILTON, S. K.; SIPPEL, S. J.; MELACK, J. M. Inundation patterns in the Pantanal wetland of South America determined from passive microwave remote sensing. *Archiv für Hydrobiologie*, v. 137, p. 1–23, 1996.

HUDSON-EDWARDS, K. A.; MACKLIN, M. G.; MILLER, J. R.; LECHLER, P. J. Sources, distribution and storage of heavy metals in the Río Pilcomayo, Bolivia. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 72, n. 3, p. 229–250, 2001. [https://doi.org/10.1016/S0375-6742\(01\)00164-9](https://doi.org/10.1016/S0375-6742(01)00164-9).

IRIGARAY, C. T. J. H. et al. Pantanal à margem da lei: panorama das ameaças e perspectivas para a conservação. Cuiabá: MUPAN, 2020.

- JUNK, W. J.; BAYLEY, P. B.; SPARKS, R. E. The flood pulse concept in river-floodplain systems. In: DODGE, D. P. (ed.). *Proceedings of the International Large River Symposium*. Canadian Special Publication of Fisheries and Aquatic Sciences, v. 106, p. 110–127, 1989. https://www.researchgate.net/publication/256981220_The_Flood_Pulse_Concept_in_River-Floodplain_Systems.
- KANTEK, D. L. Z. et al. Diagnóstico dos aspectos socioambientais da proposta de criação do mosaico de unidades de conservação no Pantanal Norte. Brasília: ICMBio, 2018. https://www.gov.br/icmbio/pt-br/acesso-a-informacao/participacao-social/estudos_tecnicos_proposta.pdf.
- LIMA, N. A.; VIANA, L. F.; CRISPIM, B. A.; SILVA, C. D.; FRANÇA, R. S. S. R.; SANTANA, A. B.; RHODEN, S. L.; CARDOSO, C. A. L.; BARUFATTI, A. Integrated approach to assess water quality and risk assessment for aquatic biota in Baía Negra, Pantanal, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, v. 20, e3065, 2025. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.3065>.
- LINDENMAYER, D. B.; LIKENS, G. E. The science and application of ecological monitoring. *Biological Conservation*, v. 143, n. 6, p. 1317–1328, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.biocon.2010.02.013>.
- LOVETT, G. M.; BURNS, D. A.; DRISCOLL, C. T.; JENKINS, J. C.; MITCHELL, M. J.; RUSTAD, L.; SHANLEY, J. B.; LIKENS, G. E.; HAEUBER, R. Who needs environmental monitoring? *Frontiers in Ecology and the Environment*, v. 5, n. 5, p. 253–260, 2007. [https://doi.org/10.1890/1540-9295\(2007\)5\[253:WNEM\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/1540-9295(2007)5[253:WNEM]2.0.CO;2).
- NOGUEIRA, M. G.; PERBICHE-NEVES, G.; NALIATO, D. O.; CASANOVA, S. M. C.; DEBASTIANI-JÚNIOR, J. R.; ESPÍNDOLA, E. G. Limnology and water quality in La Plata basin (South America): spatial patterns and major stressors. *Ecological Indicators*, v. 120, p. 106968, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106968>.
- NORDSTROM, D. K. Mine waters: acidic to circumneutral. *Elements*, v. 7, n. 6, p. 393–398, 2011. <https://doi.org/10.2113/gselements.7.6.393>.
- PAGE, M. J. et al. The PRISMA 2020 statement: an updated guideline for reporting systematic reviews. *Systematic Reviews*, v. 10, n. 89, p. 1–11, 2021. <https://doi.org/10.1186/s13643-021-01626-4>.
- PARAGUAI. Secretaría del Ambiente. Resolución N° 222/02: por la cual se establece el padrón de calidad de las aguas en el territorio nacional. Asunción, 22 abr. 2002. Arts. 1°–20.
- PRINGLE, C. M. What is hydrologic connectivity and why is it ecologically important? *Hydrological Processes*, v. 17, n. 13, p. 2685–2689, 2003. <https://doi.org/10.1002/hyp.5145>.

- RIBEIRO, P. E. A. M. et al. Análise da expansão agropecuária no bioma Cerrado com base no comportamento da cobertura e uso do solo no período de 1985 a 2019. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GESTÃO AMBIENTAL, 12., 2021. Anais... São Paulo: IBEAS, 2021.
- RODRIGUES-FILHO, S.; MADDOCK, J. E. L.; MOURÃO, G. M.; OLIVEIRA, J. M.; SANTOS, A. P. Mercury contamination in the Pantanal wetland, Brazil: assessment of water, sediments and aquatic biota in the Bento Gomes River basin. *Environmental Pollution*, v. 111, n. 2, p. 293–302, 1998.
- SALINAS FRANCO, N.; BENÍTEZ, J.; LÓPEZ, T. Metales pesados contenidos en los sedimentos de fondo y en la columna de agua del arroyo San Lorenzo, Departamento Central, Paraguay. *Revista da Sociedade Científica do Paraguai*, v. 26, n. 1, p. 100–114, 2021. <https://doi.org/10.32480/rscp.2021.26.1.100>.
- SALOMONS, W.; FÖRSTNER, U. *Metals in the hydrocycle*. Berlin: Springer-Verlag, 1984. 349 p. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-69325-0>.
- SILVA, A. Geomorfologia do megaleque do rio Paraguai, Quaternário do Pantanal Mato-Grossense, Centro-Oeste do Brasil. 2010. Tese – Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. <http://hdl.handle.net/11449/102884>.
- SILVA, G. R.; OLIVEIRA, H. R.; CRUZ, T. F.; GANDRA, L. P. Avaliação físico-química e quantificação de metais potencialmente tóxicos em águas superficiais do rio Jauru. *Revista Internacional de Ciências*, v. 8, n. 2, p. 268–280, 2018. <https://doi.org/10.12957/ric.2018.34864>.
- SILVA, J. S. V.; ABDON, M. M. Delimitação do Pantanal brasileiro e suas sub-regiões. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v. 33, p. 1703–1711, 1998. <https://repositorio.unesp.br/items/c3ae308a-987a-40fe-b91e-aad24051948c>.
- SMOLDERS, A. J. P. et al. Effects of mining activities on heavy metal concentrations in water, sediment, and macroinvertebrates in different reaches of the Pilcomayo River, South America. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, v. 44, p. 314–323, 2003. <https://doi.org/10.1007/s00244-002-2042-1>.
- STASSEN, M. J. M.; PREEKER, N. L.; RAGAS, A. M. J.; VAN DE VEN, M. W. P. M.; SMOLDERS, A. J. P.; ROELEVELD, N. Metal exposure and reproductive disorders in indigenous communities living along the Pilcomayo River, Bolivia. *Science of the Total Environment*, v. 427–428, p. 26–34, 2012. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2012.03.072>.
- STROSNIDER, W. H. et al. A legacy of nearly 500 years of mining in Potosí, Bolivia: acid mine drainage source identification and characterization. In: AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION NATIONAL CONFERENCE, 2008.

- STROSNIDER, W. H. et al. Impacto en afluentes del río Pilcomayo por contaminantes adicionales de drenaje ácido de minas desde Cerro Rico, Potosí, Bolivia. 2014.
- STROSNIDER, W. H. et al. Water quality impacts from in-stream mine tailings in Rio Tarapaya, Potosí, Bolivia. In: AMERICAN SOCIETY OF MINING AND RECLAMATION NATIONAL MEETING, 2011. <https://doi.org/10.21000/JASMR11010635>.
- STROSNIDER, W. H.; NAIRN, R. W. Effective passive treatment of high-strength acid mine drainage and raw municipal wastewater in Potosí, Bolivia. *Journal of Geochemical Exploration*, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2010.02.007>.
- STROSNIDER, W. H. J.; NAIRN, R. W.; LLANOS, F.; ENCINAS, J. P. Passive biochemical treatment of acid mine drainage in Potosí, Bolivia. *Mine Water and the Environment*, v. 30, n. 2, p. 141–151, 2011. <https://doi.org/10.1007/s10230-010-0131-1>.
- SUN, W.; STROSNIDER, W. H. J.; LLANOS, F.; NAIRN, R. W. Water quality impacts of in-stream mine tailings on a headwater tributary of the Río Pilcomayo, Potosí, Bolivia. *Environmental Geochemistry and Health*, v. 42, n. 10, p. 3275–3294, 2020. <https://doi.org/10.1007/s10653-019-00508-5>.
- TOCKNER, K.; STANFORD, J. A. Riverine flood plains: present state and future trends. *Environmental Conservation*, v. 29, n. 3, p. 308–330, 2002. <https://doi.org/10.1017/S037689290200022X>.
- TORREMORELL, A.; HGOBURU, C.; BRANDIMARTE, A. L.; RODRIGUES, E. H. C.; POMPÊO, M.; SILVA, S. C.; MOSCHINI-CARLOS, V.; CAPUTO, L.; FIERRO, P.; MOJICA, J. I.; PANTOJA MATTA, Á. L.; DONATO, J. C.; JIMÉNEZ-PARDO, P.; MOLINERO, J.; RÍOS-TOUMAI, B.; GOYENOLA, G.; IGLESIAS, C.; LÓPEZ-RODRÍGUEZ, A.; PACHECO, J. P.; TEIXEIRA DE MELLO, F.; RODRÍGUEZ-OLARTE, D.; BARRIOS GÓMEZ, M.; MONTOYA, J. V.; LÓPEZ-DOVAL, J. C.; NAVARRO, E. Current and future threats for ecological quality management of South American freshwater ecosystems. *Inland Waters*, v. 11, p. 125–140, 2021. <https://doi.org/10.1080/20442041.2019.1608115>.
- VAN DE VEN, M.; SWINKELS, L.; STASSEN, M. J. M.; SMOLDERS, A. J. P. Metales pesados en el medio acuático y en la biota en el río Pilcomayo. In: *Peces y pesquerías en las cuencas Pilcomayo y Bermejo*, p. 111–134, 2019. Disponible en: <https://hdl.handle.net/2066/303583>.
- VARDHAN, K. H.; KUMAR, P. S.; PANDA, R. C. A review on heavy metal pollution, toxicity and remedial measures: current trends and future perspectives. *Journal of Molecular Liquids*, v. 290, p. 111197, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.molliq.2019.111197>.

VIANA, L. F.; CRISPIM, B. A.; KUMMROW, F.; NASCIMENTO, V. A.; MELO, E. S. P.; LIMA, N. A.; BARUFATTI, A. Bioaccumulation, genotoxicity and risks to native fish species from inorganic contaminants in the Pantanal Sul-Mato-Grossense, Brazil. *Environmental Pollution*, v. 314, p. 120204, 2022. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2022.120204>.

WARD, J. V.; TOCKNER, K.; ARSCOTT, D. B.; CLARET, C. Riverine landscape diversity. *Freshwater Biology*, v. 47, n. 4, p. 517–539, 2002. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2427.2002.00893.x>.

WARREN-VEGA, W. M.; CAMPOS-RODRÍGUEZ, A.; ZÁRATE-GUZMÁN, A. I.; ROMERO-CANO, L. A. A current review of water pollutants in American continent: trends and perspectives in detection, health risks, and treatment technologies. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 20, p. 4499, 2023. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054499>.

ZHOU, Q.; YANG, N.; LI, Y.; REN, B.; DING, X.; BIAN, H.; YAO, X. Total concentrations and sources of heavy metal pollution in global river and lake water bodies from 1972 to 2017. *Global Ecology and Conservation*, v. 22, e00925, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e00925>.

8. ANEXO I

Tabela Suplementar 1. Concentrações de metais e metaloides (mg L⁻¹) em águas superficiais da Bacia do Rio Paraguai, por estudo, ponto de amostragem, país, uso do solo e altitude.

Refêrências	Sigla	Corpo hídrico	Tipo	Sta- tus	USO	Al- ti- tude	País	Ano	As	Pb	Ni	Fe	Cu	Hg	Mn	Cd	Cr	Zn	Al
Smolders et al., 2003	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	3414	Bo- lívia	1999	NA	0,0022	NA	NA	0,0006	NA	NA	0,00015	NA	0,028	NA
Smolders et al., 2003	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	3401	Bo- lívia	1999	NA	2,291	NA	NA	1,709	NA	NA	0,315	NA	12,416	NA
Smolders et al., 2003	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	2282	Bo- lívia	1999	NA	1,399	NA	NA	0,304	NA	NA	0,0592	NA	6,021	NA
Smolders et al., 2003	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	2505	Bo- lívia	1999	NA	0,0198	NA	NA	0,017	NA	NA	0,00077	NA	0,186	NA
Smolders et al., 2003	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	347	Bo- lívia	1999	NA	0,002	NA	NA	0,0025	NA	NA	0,00012	NA	0,009	NA
Smolders et al., 2003	CAM	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	258	Bo- lívia	1999	NA	0,001	NA	NA	0,0018	NA	NA	0,00011	NA	0,008	NA
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Ur- bana	174	Bra- sil	2020	0,0195	0,0244	0,0519	1,0021	0,0141	NA	0,0714	0,0176	NA	0,0008	1,3926
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Ur- bana	168	Bra- sil	2020	0,021	0,0263	0,021	0,6844	0,012	NA	0,0832	0,0154	NA	0,0008	1,7971
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Ve- ge- tação	161	Bra- sil	2020	0,0173	0,0195	0,0228	0,5863	0,0095	NA	0,0383	0,0113	NA	0,0008	0,9773
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Ur- bana	144	Bra- sil	2020	0,0158	0,019	0,0223	0,6649	0,01	NA	0,0411	0,0114	NA	0,0008	1,8005
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Rural	140	Bra- sil	2020	0,0225	0,0281	0,0207	0,7996	0,0122	NA	0,0564	0,0169	NA	0,0012	1,562
Viana et al., 2022	AQU	Rio Aquidau- ana	Rio	Pe- rene	Rural	140	Bra- sil	2020	0,0175	0,0196	0,0306	1,216	0,0125	NA	0,0936	0,0122	NA	0,0016	2,3374
Salinas-Fran- co et al., 2021	SLO	Riacho San Lorenzo	Ri- acho	Pe- rene	Ur- bana	146	Pa- ra- guai	2018	NA	0,001	NA	NA	NA	0,00084	NA	NA	0,001	NA	NA
Salinas-Fran- co et al., 2021	SLO	Riacho San Lorenzo	Ri- acho	Pe- rene	Ur- bana	106	Pa- ra- guai	2018	NA	0,001	NA	NA	NA	0,00112	NA	NA	0,001	NA	NA
Salinas-Fran- co et al., 2021	SLO	Riacho San Lorenzo	Ri- acho	Pe- rene	Ur- bana	85	Pa- ra- guai	2018	NA	0,001	NA	NA	NA	0,001	NA	NA	0,001	NA	NA
Avigliano et al., 2019	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe- rene	Ur- bana	58	Ar- gen- tina	2018	0,00064	0,00012	0,00055	0,158	NA	NA	0,00419	NA	0,00009	NA	0,0133
Avigliano et al., 2019	BER	Rio Bermejo	Rio	Pe- rene	Rural	60	Ar- gen- tina	2018	0,00263	NA	0,00067	0,00476	NA	NA	NA	NA	0,00004	NA	0,0039
Avigliano et al., 2019	PIK	Riacho Piki Siri	Ri- acho	Pe- rene	Ve- ge- tação	59	Ar- gen- tina	2018	0,0009	0,00198	0,00099	0,265	NA	NA	0,00187	NA	0,00012	NA	0,0503
Avigliano et al., 2019	SAH	Riacho San Hilario	Ri- acho	Pe- rene	Ve- ge- tação	58	Ar- gen- tina	2018	0,00107	0,56	0,000159	0,0011	NA	NA	0,0003	NA	0,00003	NA	0,0016
Avigliano et al., 2019	FOR	Riacho For- mosa	Ri- acho	Pe- rene	Ur- bana	52	Ar- gen- tina	2018	0,0008	0,56	0,00084	0,366	NA	NA	0,0206	NA	0,0001	NA	0,0196
Avigliano et al., 2019	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe- rene	Ur- bana	51	Ar- gen- tina	2018	0,00063	0,56	0,00066	0,193	NA	NA	0,00255	NA	0,00011	NA	0,036
Avigliano et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe- rene	Ur- bana	62	Ar- gen- tina	2018	0,00166	0,56	0,00159	0,205	NA	NA	0,00402	NA	0,0002	NA	0,0498

Avigliano et al., 2019	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ur-bana	57	Pa-ra-guai	2018	0,00085	0,56	0,00054	0,112	NA	NA	0,0441	NA	0,00017	NA	0,0159
Avigliano et al., 2019	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ur-bana	56	Ar-gen-tina	2018	0,00061	0,56	0,00095	0,184	NA	NA	0,00152	NA	0,00012	NA	0,0387
Avigliano et al., 2019	SAF	Rio San Francisco	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	486	Ar-gen-tina	2018	0,00359	0,56	0,00055	0,00423	NA	NA	0,00043	NA	0,00006	NA	0,00578
Avigliano et al., 2019	BER	Rio Bermejo	Rio	Pe-rene	Rural	319	Ar-gen-tina	2018	0,00128	0,56	0,00082	0,0274	NA	NA	0,00137	NA	0,00012	NA	0,0323
Avigliano et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	254	Ar-gen-tina	2018	0,00126	0,56	0,0009	0,00626	NA	NA	0,00069	NA	0,00004	NA	0,00734
Avigliano et al., 2019	HER	Lago Herra-dura	Lago	Pe-rene	Ur-bana	57	Ar-gen-tina	2018	0,0009	0,56	0,00075	0,301	NA	NA	0,00404	NA	0,00012	NA	0,0247
Avigliano et al., 2019	SAL	Riacho Salado	Ri-acho	Pe-rene	Ur-bana	69	Ar-gen-tina	2018	0,00487	0,56	0,00176	0,0501	NA	NA	0,00858	NA	0,00009	NA	0,0315
Avigliano et al., 2019	EST	Zona úmida Bañado La Estrella	Pân-tano	Pe-rene	Rural	134	Ar-gen-tina	2018	0,00149	0,56	0,00061	0,00419	NA	NA	0,00009	NA	0,00003	NA	0,00126
Strosnider et al., 2011	VMA	Riacho Vi-lacolu Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	4235	Bo-lívia	2007	0,022	0,012	0,008	1	0,005	NA	3	0,002	0,001	1,5	1,3
Strosnider et al., 2011	VMA	Riacho Vi-lacolu Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	4231	Bo-lívia	2007	0,38	0,13	0,095	66	0,17	NA	21	0,39	0,008	170	16
Strosnider et al., 2011	QCH	Córrego Que-brada Chim-borazo	Cór-rego	Efê-mero	Ve-ge-tação	4402	Bo-lívia	2007	0,091	0,33	0,011	2,7	0,014	NA	0,79	0,018	0,002	7,3	3,5
Strosnider et al., 2011	QCH	Córrego Que-brada Chim-borazo	Cór-rego	Efê-mero	Ve-ge-tação	4233	Bo-lívia	2007	1,1	0,33	0,26	210	0,5	NA	61	1,2	0,014	560	41
Strosnider et al., 2011	SMJ	Córrego af-luente sem nome do Rio Jayac Mayu	Cór-rego	Pe-rene	Ve-ge-tação	3748	Bo-lívia	2007	0,022	0,046	7,2	0,03	0,015	NA	16	0,002	0,015	0,37	15
Strosnider et al., 2011	JMA	Riacho Jayac Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	3748	Bo-lívia	2007	0,25	0,24	0,8	180	6,7	NA	110	0,24	0,02	64	71
Strosnider et al., 2011	JMA	Riacho Jayac Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	3748	Bo-lívia	2007	0,11	0,17	0,21	63	1,7	NA	25	0,63	0,009	160	21
Strosnider et al., 2011	JMA	Riacho Jayac Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	3570	Bo-lívia	2007	0,31	0,37	0,23	79	1,3	NA	27	0,58	0,02	140	24
Strosnider et al., 2011	ADU	Rio Água Dulce	Rio	Pe-rene	Rural	3570	Bo-lívia	2007	0,088	0,18	0,065	100	0,076	NA	2,5	0,018	0,054	2,3	81
Strosnider et al., 2011	ADU	Rio Água Dulce	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3569	Bo-lívia	2007	0,13	0,26	0,12	100	0,4	NA	9,5	0,16	0,049	44	71
Strosnider et al., 2011	ADU	Rio Água Dulce	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3758	Bo-lívia	2007	0,45	0,95	0,57	950	0,91	NA	27	0,082	0,47	25	630
Strosnider et al., 2011	SMH	Córrego af-luente sem nome do Rio Hu-arampaya	Cór-rego	Pe-rene	Ur-bana	3805	Bo-lívia	2007	0,053	0,22	0,011	6,7	0,065	NA	0,34	0,006	0,007	1,6	5,9
Strosnider et al., 2011	HPA	Rio Huaram-paya	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3758	Bo-lívia	2007	0,034	0,046	0,01	7,3	0,015	NA	0,3	0,002	0,004	0,16	8,1
Strosnider et al., 2011	HPA	Rio Huaram-paya	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3623	Bo-lívia	2007	0,032	0,069	0,005	4,7	0,033	NA	0,55	0,002	0,006	0,47	2,6
Strosnider et al., 2011	HMA	Riacho Huayna Mayu	Ri-acho	Pe-rene	Mi-ne-ração	3765	Bo-lívia	2007	0,37	1,2	0,073	73	0,064	NA	7,7	0,27	0,007	220	21
Strosnider et al., 2011	HMW	Córrego Hu-ayna Mayu Oeste	Cór-rego	Efê-mero	Mi-ne-ração	4259	Bo-lívia	2007	1,8	6,1	0,095	370	0,35	NA	11	0,34	0,074	120	190

Strosnider et al., 2011	HME	Córrego Huayna Mayu Leste	Córrego	Efêmero	Mi-ne-ração	4257	Bo-lívia	2007	2,2	9,2	0,1	530	0,69	NA	17	0,14	0,11	38	240
Strosnider et al., 2011	RDL	Riacho Ribera de la Vera Cruz	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3944	Bo-lívia	2007	0,84	0,66	0,046	40	1,9	NA	5,2	0,23	0,009	38	16
Strosnider et al., 2011	RDL	Riacho Ribera de la Vera Cruz	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3902	Bo-lívia	2007	5	0,52	0,16	410	3,6	NA	6,7	0,37	0,026	93	71
Strosnider et al., 2011	RDL	Riacho Ribera de la Vera Cruz	Rio	Pe-rene	Mi-ne-ração	3625	Bo-lívia	2007	4,6	0,62	0,15	330	3,5	NA	10	0,39	0,022	100	60
Strosnider et al., 2011	RDL	Riacho Ribera de la Vera Cruz	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3621	Bo-lívia	2007	1,6	0,35	0,056	100	1,1	NA	3,7	0,12	0,01	35	20
Strosnider et al., 2011	RDL	Riacho Ribera de la Vera Cruz	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3566	Bo-lívia	2007	2,1	0,57	0,079	100	1,2	NA	4,2	0,11	0,01	33	19
Strosnider et al., 2011	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3575	Bo-lívia	2007	0,43	0,95	0,25	650	0,6	NA	18	0,12	0,29	10	550
Strosnider et al., 2011	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3434	Bo-lívia	2007	1,8	0,98	0,097	150	1,4	NA	7,2	0,18	0,019	53	36
Strosnider et al., 2011	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3431	Bo-lívia	2007	1,2	1,2	0,065	92	0,93	NA	4,1	0,11	0,013	30	24
Strosnider et al., 2011	CAY	Rio Cayara	Rio	Pe-rene	Rural	3444	Bo-lívia	2007	0,022	0,024	0,023	12	0,011	NA	0,38	0,002	0,009	0,15	14
Rodrigues-Filho et al., 1998	BGO	Rio Bento Gomes	Rio	Pe-rene	Rural	146	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	BGO	Rio Bento Gomes	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	117	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	BGO	Rio Bento Gomes	Rio	Pe-rene	NA	NA	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0015	0,002	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	BGO	Rio Bento Gomes	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	119	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0039	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	Mi-ne-ração	135	Bra-sil	1992	NA	0,001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	Rural	135	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	NA	NA	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	Rural	149	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	Rural	179	Bra-sil	1992	NA	0,0009	NA	NA	0,0092	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	NA	NA	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0004	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Rodrigues-Filho et al., 1998	GUA	Riacho Guanandi	Ri-acho	Pe-rene	NA	NA	Bra-sil	1992	NA	0,0001	NA	NA	0,0001	0,0001	NA	NA	NA	NA	NA
Lima et al., 2025	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	83	Bra-sil	2022	NA	0,0467	0,2167	22,26	0,4567	NA	0,09	0,0015	0,31	0,1133	NA
Lima et al., 2025	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	83	Bra-sil	2022	NA	0,0433	0,21	22,3667	0,4433	NA	0,0867	0,0015	0,3133	0,1033	NA
Lima et al., 2025	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ve-ge-	83	Bra-sil	2022	NA	0,04	0,2033	23,04	0,4667	NA	0,0833	0,0014	0,32	0,1233	NA

					tação														
Gomes et al., 2023 a	CRI	Córrego Criminoso	Córrego	Pe-rene	Rural	252	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	0,35	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 a	CRI	Córrego Criminoso	Córrego	Pe-rene	Ur-bana	228	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	0,29	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 a	CRI	Córrego Criminoso	Córrego	Pe-rene	Ur-bana	218	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	0,2	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 a	CRI	Córrego Criminoso	Córrego	Pe-rene	Ve-ge-tação	200	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	0,5	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Silva et al., 2018	JAU	Rio Jauru	Rio	Pe-rene	Ur-bana	254	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	NA	0,000011	NA	0,000011	NA	NA	NA	NA
Silva et al., 2018	JAU	Rio Jauru	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	253	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	NA	0,000013	NA	0,00001	NA	NA	NA	NA
Silva et al., 2018	JAU	Rio Jauru	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	253	Bra-sil	2017	NA	NA	NA	NA	0,000008	NA	0,000011	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Tu-rismo	363	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,269	0,004844	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ur-bana	322	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,288	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ur-bana	318	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,332	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	304	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,315	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	276	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,744	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Tu-rismo	288	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	NA	0,004256	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Tu-rismo	286	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	NA	0,005705	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Ve-ge-tação	276	Bra-sil	2018	NA	NA	NA	0,0802	0,004446	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Tu-rismo	363	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,001019	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ur-bana	322	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,000777	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ur-bana	318	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,000882	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	304	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,000585	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	VER	Rio Verde	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	276	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,000887	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Tu-rismo	288	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,003624	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Tu-rismo	286	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,002151	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Gomes et al., 2023 b	FUN	Córrego Fundo	Córrego	Pe-rene	Ve-ge-tação	276	Bra-sil	2019	NA	NA	NA	NA	0,003975	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Andrade et al., 2022	TAQ	Rio Taquari	Rio	Pe-rene	Rural	212	Bra-sil	2018	NA	0,011	NA	0,694	0,009	NA	NA	0,004	NA	NA	NA
Andrade et al., 2022	COX	Rio Coxim	Rio	Pe-rene	Ur-bana	208	Bra-sil	2018	NA	0,010	NA	0,736	0,010	NA	NA	0,004	NA	NA	NA
Andrade et al., 2022	TAQ	Rio Taquari	Rio	Pe-rene	Rural	198	Bra-sil	2018	NA	0,009	NA	0,720	0,008	NA	NA	0,004	NA	NA	NA
Avigliano et al., 2025	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	201	Ar-gen-tina	2022	0,00077	0,00007	0,00066	NA	0,00166	NA	NA	0,00001	0,000194	0,00534	NA
Avigliano et al., 2025	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-	201	Ar-gen-	2022	0,00071	0,00006	0,00027	NA	0,00078	NA	NA	0,0000035	0,000051	0,00385	NA

					tação		tina												
Avigliano et al., 2025	STR	Zona úmida Bañado La Estrella	Pântano	Pe-rene	Ve-ge-tação	132	Ar-gen-tina	2022	0,00186	0,00029	0,001	NA	0,00109	NA	NA	0,000013	0,000378	0,00685	NA
Avigliano et al., 2025	STR	Zona úmida Bañado La Estrella	Pântano	Pe-rene	Ve-ge-tação	132	Ar-gen-tina	2022	0,00062	0,00183	0,00068	NA	0,02521	NA	NA	0,000031	0,00017	0,0453	NA
Avigliano et al., 2025	PAV	Riacho Pavao	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	111	Ar-gen-tina	2022	0,00576	0,00011	0,00317	NA	0,00307	NA	NA	0,00001	0,000153	0,00783	NA
Avigliano et al., 2025	PAV	Riacho Pavao	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	111	Ar-gen-tina	2022	0,0005	0,00005	0,00019	NA	0,00025	NA	NA	0,000007	0,000042	0,00496	NA
Avigliano et al., 2025	SAL	Riacho Salado	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	113	Ar-gen-tina	2022	0,00508	0,00026	0,00401	NA	0,00516	NA	NA	0,00001	0,000291	0,0149	NA
Avigliano et al., 2025	SAL	Riacho Salado	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	113	Ar-gen-tina	2022	0,00421	0,00013	0,00092	NA	0,00125	NA	NA	0,0000055	0,00014	0,0823	NA
Avigliano et al., 2025	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	57	Ar-gen-tina	2022	0,00099	0,00028	0,00261	NA	0,00462	NA	NA	0,000078	0,000478	0,0306	NA
Avigliano et al., 2025	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	57	Ar-gen-tina	2022	0,00076	0,00012	0,0003	NA	0,0008	NA	NA	0,000003	0,000068	0,0102	NA
Avigliano et al., 2025	ARL	Riacho Monte Lindo	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	67	Ar-gen-tina	2022	0,0167	0,00012	0,00195	NA	0,0016	NA	NA	0,0000083	0,000053	0,012	NA
Avigliano et al., 2025	ARL	Riacho Monte Lindo	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	67	Ar-gen-tina	2022	0,00334	0,00026	0,00112	NA	0,00214	NA	NA	0,000016	0,00077	0,0249	NA
Avigliano et al., 2025	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ur-bana	51	Ar-gen-tina	2022	0,00119	0,00022	0,00114	NA	0,00181	NA	NA	0,0000085	0,000536	0,0197	NA
Avigliano et al., 2025	PAR	Rio Paraguai	Rio	Pe-rene	Ur-bana	51	Ar-gen-tina	2022	0,00066	0,00041	0,0009	NA	0,00189	NA	NA	0,00001	0,0002	0,0176	NA
Avigliano et al., 2025	IRI	Riacho Iri-penda	Ri-acho	Pe-rene	Rural	776	Bo-lívia	2023	0,00028	0,00001	0,00016	NA	0,00022	NA	NA	0,0000011	0,000037	0,00047	NA
Avigliano et al., 2025	IRI	Riacho Iri-penda	Ri-acho	Pe-rene	Rural	776	Bo-lívia	2023	0,00023	0	0,0001	NA	0,00007	NA	NA	0,0000004	0,000014	0,00009	NA
Avigliano et al., 2025	ITA	Rio Itaú	Rio	Pe-rene	Rural	555	Bo-lívia	2023	0,0037	0,00001	0,00038	NA	0,00059	NA	NA	0,0000028	0,000044	0,00066	NA
Avigliano et al., 2025	ITA	Rio Itaú	Rio	Pe-rene	Rural	555	Bo-lívia	2023	0,00061	0	0,00016	NA	0,00018	NA	NA	0,0000005	0,000025	0,00045	NA
Avigliano et al., 2025	GDT	Rio Grande de Tarija	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	479	Bo-lívia	2023	0,00099	0,00002	0,00032	NA	0,00072	NA	NA	0,0000026	0,000059	0,00071	NA
Avigliano et al., 2025	GDT	Rio Grande de Tarija	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	479	Bo-lívia	2023	0,00126	0,00001	0,00017	NA	0,00038	NA	NA	0,0000016	0,000029	0,00033	NA
Avigliano et al., 2025	BER	Rio Bermejo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	419	Bo-lívia	2023	0,00058	0,00002	0,00027	NA	0,00061	NA	NA	0,0000017	0,000073	0,00043	NA
Avigliano et al., 2025	BER	Rio Bermejo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	419	Bo-lívia	2023	0,00045	0,00001	0,00008	NA	0,00016	NA	NA	0,0000008	0,00004	0,00018	NA
Avigliano et al., 2025	GDT	Rio Grande de Tarija	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	430	Bo-lívia	2023	0,00108	0,00002	0,00035	NA	0,00086	NA	NA	0,000092	0,000061	0,00221	NA
Avigliano et al., 2025	GDT	Rio Grande de Tarija	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	430	Bo-lívia	2023	0,00117	0,00001	0,00017	NA	0,00038	NA	NA	0,0000013	0,000035	0,00114	NA
Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1997	NA	0,027	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1998	NA	0,0356	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1999	NA	0,0198	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	2003	NA	0,0017	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	2006	NA	0,0017	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012 apud Smolders et al.	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	2010	NA	0,0012	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	984	Bo-lívia	2006	NA	0,00165	NA	NA	NA	NA	NA	0,03	NA	NA	NA
Stassen et al., 2012	PIL	Rio Bermejo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	2817	Ar-gen-tina	2006	NA	0,00043	NA	NA	NA	NA	NA	0,000003	NA	NA	NA
Sun et al., 2019	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3455	Bo-lívia	2008	0,02	0,01	NA	1,2	0,04	NA	3	0,03	0,001	3,3	0,1
Sun et al., 2019	TAP	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3437	Bo-lívia	2008	0,01	5	NA	171	2,6	NA	5	0,22	0,026	56	39
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3414	Bo-lívia	1999	NA	0,0022	NA	NA	0,0006	NA	NA	0,00015	NA	0,028	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2231	Bo-lívia	1999	NA	1,399	NA	NA	0,304	NA	NA	0,0592	NA	6,021	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1999	NA	0,0198	NA	NA	0,017	NA	NA	0,00077	NA	0,186	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	255	Bo-lívia	1999	NA	0,002	NA	NA	0,0025	NA	NA	0,00012	NA	0,009	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3414	Ar-gen-tina	2006	NA	0,0017	NA	NA	0,0033	NA	NA	0,00003	NA	0,0085	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	3377	Bo-lívia	2006	NA	0,001	NA	NA	0,0032	NA	NA	0,00001	NA	0,0107	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2231	Bo-lívia	2006	NA	0,0116	NA	NA	0,0105	NA	NA	0,00077	NA	0,296	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	2006	NA	0,0021	NA	NA	0,0023	NA	NA	0,00005	NA	0,0677	NA
Van de Ven et al., 2019	TAM	Riacho Tampinta	Ri-acho	Pe-rene	Ve-ge-tação	418	Bo-lívia	2006	NA	0,0006	NA	NA	0,0028	NA	NA	0	NA	0,0404	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1997	NA	0,027	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1998	NA	0,0356	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Van de Ven et al., 2019	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	2010	NA	0,0012	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Hudson-Edwards et al., 2001	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	3710	Bo-lívia	1998	0,065	0,041	NA	NA	0,3	NA	NA	0,01	NA	0,035	NA
Hudson-Edwards et al., 2001	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2231	Bo-lívia	1998	0,1	0,09	NA	NA	0,03	NA	NA	0,01	NA	0,4	NA
Hudson-Edwards et al., 2001	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	910	Bo-lívia	1998	0,042	0,021	NA	NA	0,02	NA	NA	0,01	NA	0,043	NA
Hudson-Edwards et al., 2001	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	519	Bo-lívia	1998	0,025	0,03	NA	NA	0,02	NA	NA	0,01	NA	0,015	NA
Hudson-Edwards et al., 2001	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ve-ge-tação	473	Bo-lívia	1998	0,03	0,025	NA	NA	0,02	NA	NA	0,01	NA	0,016	NA
Smolders et al., 2002	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1999	NA	0,0355	NA	NA	0,0239	NA	NA	NA	NA	0,139	0,00055

Smolders et al., 2002	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Ur-bana	371	Bo-lívia	1999	NA	1,495	NA	NA	1,107	NA	NA	NA	NA	19,327	0,0124
Archer et al., 2005	TAR	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Rural	3390	Bo-lívia	2003	12,8	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2285	Bo-lívia	2003	0,272	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2248	Bo-lívia	2003	0,154	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2110	Bo-lívia	2003	1,213	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	TAR	Rio Tarapaya	Rio	Pe-rene	Rural	3390	Bo-lívia	2004	2,74	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2285	Bo-lívia	2004	0,113	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2248	Bo-lívia	2004	0,199	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	PIL	Rio Pilcomayo	Rio	Pe-rene	Rural	2110	Bo-lívia	2004	0,421	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Archer et al., 2005	SMC	Riacho sem nome da Bacia de Cota	Ri-acho	Pe-rene	Rural	2539	Bo-lívia	2004	0,0009	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

9. ANEXO II

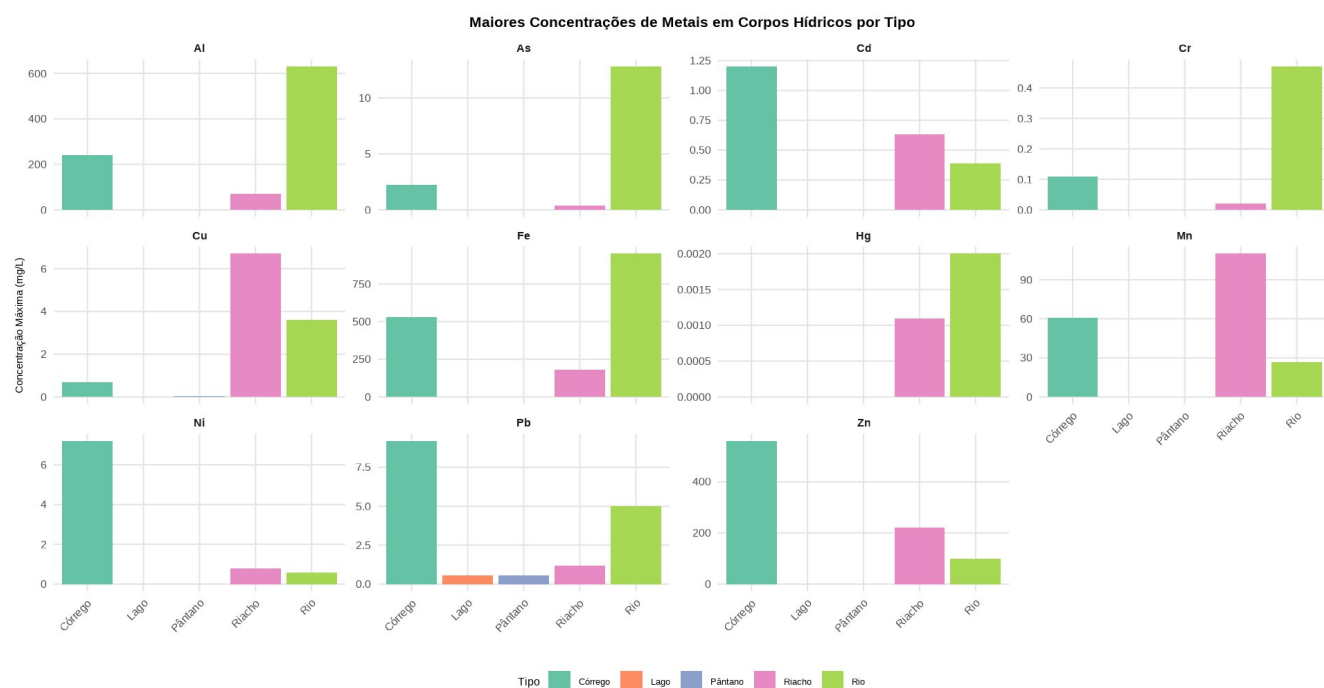


Figura S1. Maiores concentrações máximas de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn), em mg L^{-1} estratificadas por tipo de corpo hídrico (Córrego, Lago, Pântano, Riacho e Rio)

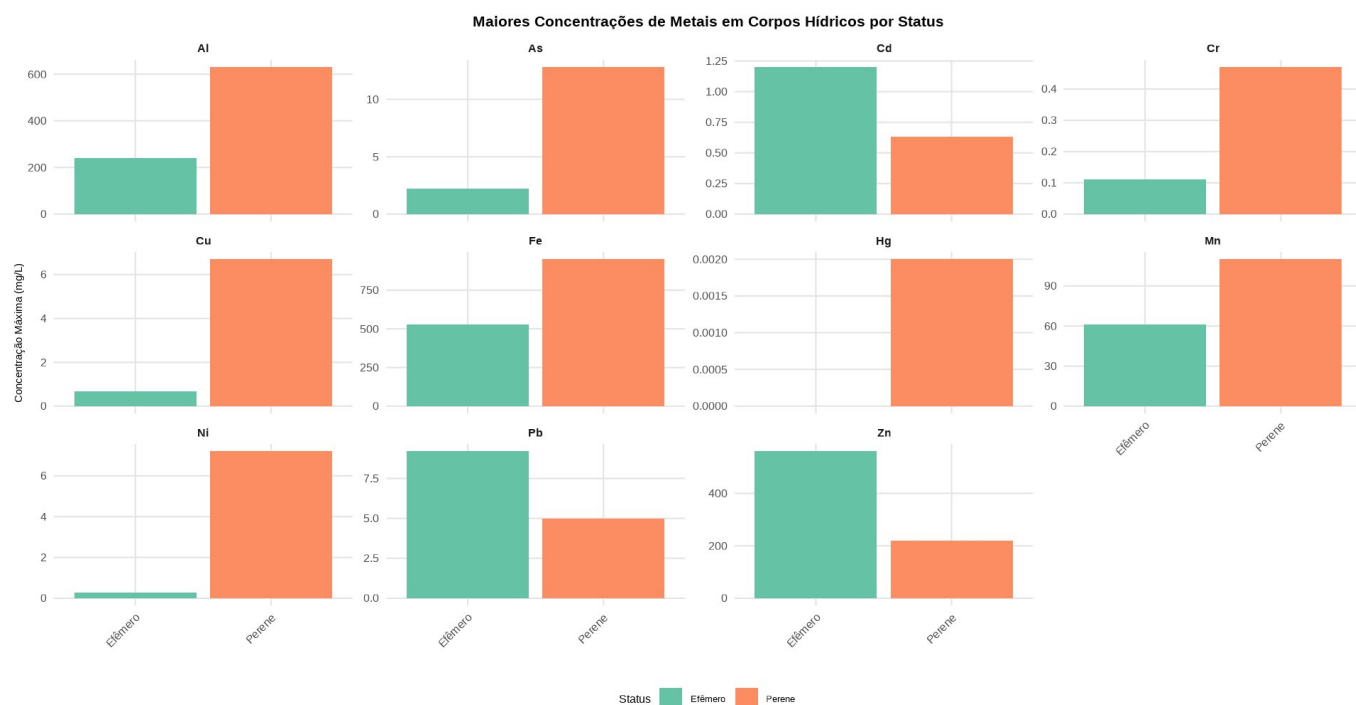


Figura S2. Maiores concentrações máximas de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn), em mg L^{-1} , em corpos hídricos classificados por regime hidrológico (efêmero e perene).

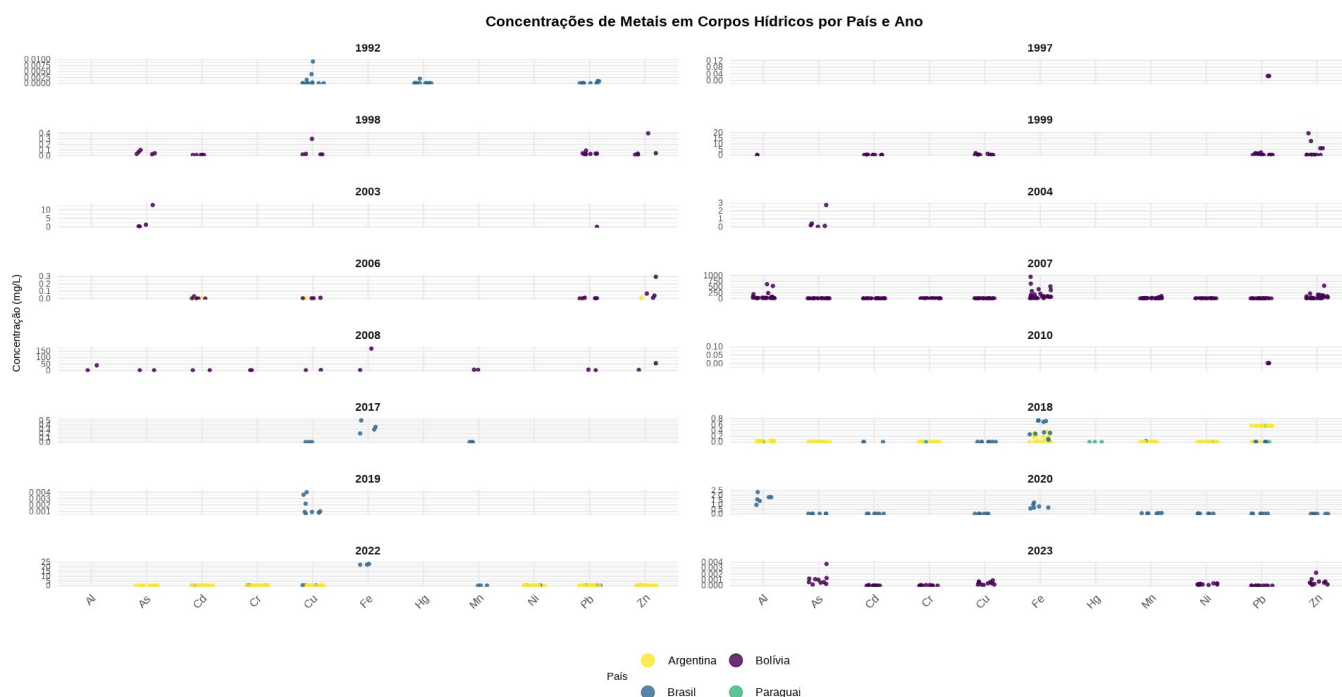


Figura S3. Distribuição das concentrações de metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos, estratificadas por país (Argentina, Bolívia, Brasil e Paraguai) e ano de monitoramento (1992–2023).

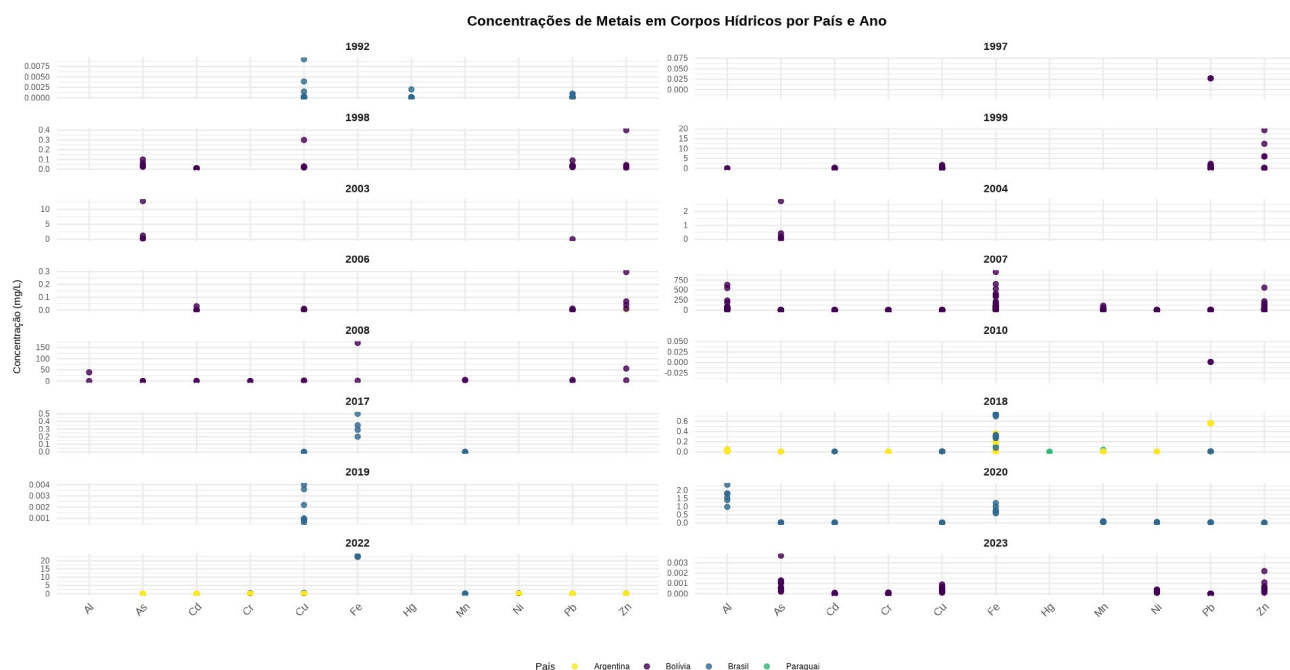


Figura S4. Série histórica das concentrações de 11 metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) em corpos hídricos superficiais da América do Sul, entre 1992 e 2023. A cor dos pontos indica o país de amostragem: Argentina (amarelo), Bolívia (roxo), Brasil (azul) e Paraguai (verde). Cada ano é apresentado em painel separado com escala de concentração (mg L^{-1}) ajustada para a faixa de valores observada naquele período.

Maiores Concentrações de Metais em Corpos Hídricos por País

Bolívia		Brasil	
Metal	Concentração Máxima (mg/L)	Metal	Concentração Máxima (mg/L)
As	12.800	As	0.022
Pb	9.200	Pb	0.047
Ni	7.200	Ni	0.217
Fe	950.000	Fe	23.040
Cu	6.700	Cu	0.467
Hg	-	Hg	0.002
Mn	110.000	Mn	0.094
Cd	1.200	Cd	0.018
Cr	0.470	Cr	0.320
Zn	560.000	Zn	0.123
Al	630.000	Al	2.337

Argentina		Paraguai	
Metal	Concentração Máxima (mg/L)	Metal	Concentração Máxima (mg/L)
As	0.017	As	0.001
Pb	0.560	Pb	0.560
Ni	0.004	Ni	0.001
Fe	0.366	Fe	0.112
Cu	0.025	Cu	-
Hg	-	Hg	0.001
Mn	0.021	Mn	0.044
Cd	0.000	Cd	-
Cr	0.001	Cr	0.001
Zn	0.082	Zn	-
Al	0.050	Al	0.016

Figura S5. Visualização das concentrações máximas de 11 metais (Al, As, Cd, Cr, Cu, Ferro (Fe), Hg, Mn, Ni, Pb e Zn) detectadas em corpos hídricos superficiais da Bolívia, Brasil, Argentina e Paraguai. Cada metal é representado por uma cor única, mantida em todos os países para comparação transnacional. Os valores numéricos correspondem à concentração máxima registrada em mg L⁻¹. O símbolo (-) denota ausência de detecção ou dados não disponíveis.