



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgf>



Bioacumulação de metais pela macrófita aquática *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) em um rio urbano de Santa Catarina

Kayky Leonardo Bauer de Britto^{1A}, Ricardo Larroyed de Oliveira^{1B}, Elisabeth Maria Nardelli de Oliveira^{1C}, André Werlang Garcia^{1D}, Joelson Graciano Feliciano^{1E}, Igor Shoiti Shiraishi^{1F}, João Carlos Ferreira de Melo-Júnior^{1G}

¹Departamento de Ciências Biológicas, Laboratório de Morfologia e Ecologia Vegetal, Programa de Pós-Graduação em Saúde e Meio Ambiente, Universidade da Região de Joinville (Univille). ^Akaykylb76sbs@gmail.com, ^Bricardo.larroyed@univille.br, ^Celisabeth.nardelli@gmail.com, ^Dandrewg.eyology@gmail.com, ^Ejoelson.gfeliciano@gmail.com, ^Figorshoiti@gmail.com, ^Gjoao.melo@univille.br.

Artigo recebido em 25/03/2023 e aceito em 02/04/2024

RESUMO

O biomonitoramento é o processo de avaliação ambiental que utiliza organismos vivos para compreender desequilíbrios e reações biológicas causados por elementos antropogênicos. A espécie *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae), uma macrófita aquática de grande distribuição geográfica na flora do Brasil, é utilizada como monitora da qualidade de ambientes fluviais. O presente estudo avaliou a capacidade de bioacumulação de metais pesados nos órgãos vegetativos dessa espécie e sua interação com as características de ocupação do solo ao longo de um rio urbano em Santa Catarina. Foram coletadas amostras de raízes, caules e folhas em seis pontos amostrais no corpo principal do rio para avaliar a influência antropogênica nas concentrações de alumínio, zinco, níquel, chumbo e cobre em diferentes órgãos da espécie. Dentre os metais estudados, constatou-se maior concentração de alumínio, seguido pelo zinco, cobre, níquel e chumbo, respectivamente. As folhas apresentaram a maior concentração de metais, seguidas pelas raízes e caules. A análise de correlação mostrou que há uma correlação positiva entre as concentrações de zinco, chumbo, alumínio e níquel presentes nas amostras e os pontos de coleta, à medida que se distanciam a montante do rio. O uso e a ocupação do solo, com consequente efeito nos efluentes despejados ao longo do rio, podem estar associados ao aumento progressivo da concentração de metais na planta monitora. Neste estudo, *E. grandiflorus* demonstrou alta sensibilidade e capacidade de bioacumulação de metais pesados, o que ratifica seu uso como biomarcador eficaz da qualidade ambiental fluvial em áreas poluídas.

Palavras-chave: biomonitoramento; vegetação aquática; rio urbano; qualidade ambiental; metais pesados.

Bioaccumulation of metals by the aquatic macrophyte *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) in an urban river in Santa Catarina

ABSTRACT

Biomonitoring is the process of environmental assessment that uses living organisms to understand imbalances and biological reactions caused by anthropogenic elements. The species *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae), an aquatic macrophyte with a wide geographic distribution in the flora of Brazil, has been used to monitor the quality of river environments. This study aims to evaluate the bioaccumulation capacity of heavy metals in the vegetative organs of this species and its interaction with soil occupancy characteristics along an urban river in Santa Catarina. Samples of roots, stems and leaves were collected at six sampling points in the main body of the river to evaluate the anthropogenic influence on the concentrations of aluminum, zinc, nickel, lead and copper in different organs of the species. Among the metals studied, a higher concentration of aluminum was found, followed by zinc, copper, nickel, and lead, respectively. Leaves showed the highest concentration of metals, followed by roots and stems. Correlation analysis showed a positive correlation between the concentrations of zinc, lead, aluminum, and nickel in the samples and the collection points, as they moved river upstream. Land use and occupancy, with consequent effects on effluents discharged along the river, may be associated with the progressive increase in metal concentration in the monitoring plant. In this study, *E. grandiflorus* demonstrated high sensitivity and capacity for bioaccumulation of heavy metals, confirming its use as an effective biomarker of riverine environmental quality in polluted areas.

Keywords: biomonitoring; aquatic vegetation; urban river; environmental quality; heavy metals.

Introdução

O biomonitoramento é uma importante ferramenta no processo de detecção e quantificação de poluentes ambientais, refletindo sobre os possíveis impactos aos ecossistemas e à saúde humana. A técnica consiste em diagnosticar a qualidade de um ambiente usando organismos vivos como indicadores.

Várias são as cidades brasileiras que se desenvolveram no entorno de corpos hídricos fluviais, tornando os rios completamente inseridos na malha urbana e sujeitos a diferentes níveis de poluição. Não diferentemente deste cenário, está a cidade de Joinville, localizada no sul do Brasil. Ela encontra no setor industrial uma de suas principais atividades econômicas, de forma que o rio Cachoeira, integralmente localizado na porção urbanizada do município, atravessa toda a região central da cidade, e é considerado o mais vulnerável às intervenções antrópicas (Junqueira & Prates, 2023).

Trata-se de um rio interinamente de planície, com cerca de 16 km de extensão, que forma uma bacia hidrográfica com 59,10 km² e que ocupa 72,60% da porção urbana do município (Junqueira & Prates, 2023). Dessa forma ele contribui com a hidrologia da região, oferecendo aporte hídrico, serve de base de alimentação para diversas espécies de vegetais e animais e ainda promove equilíbrio aos sistemas de inundação (Reginato et al., 2023).

Apesar da relevância ecológica e social do rio Cachoeira, o despejo irregular de efluentes industriais e do esgotamento sanitário representam grandes ameaças de poluição das suas águas, considerando a notável presença de indústrias de grande porte e a crescente urbanização em suas imediações (Chen et al., 2021). Outros fatores de risco incluem a supressão das matas ciliares e o descarte irregular de resíduos sólidos (Junqueira & Prates, 2023).

Por ser um rio de grande extensão, que recebe contribuição de afluentes que cruzam grandes centros urbanos e industriais do município, são diversas as fontes de poluição em potencial, assim como a gama de possíveis compostos contaminantes. Os efluentes industriais estão relacionados com a presença de metais pesados, inerentes aos processos produtivos desempenhados. Dentre os contaminantes de origem industrial, destacam-se os metais pesados, de baixa biodegradabilidade e com capacidade de bioacumulação (Sharma & Kumar, 2021).

Alguns metais inorgânicos são utilizados em pequenas quantidades no metabolismo dos seres vivos, como o sódio (Na), o zinco (Zn), o cromo (Cr³⁺), o magnésio (Mg) e o níquel (Ni).

Por outro lado, alguns metais pesados não desempenham qualquer função metabólica, como é o caso do mercúrio (Hg), do alumínio (Al), da prata (Ag) e do cádmio (Cd), podendo ser prejudiciais aos organismos (Sharma et al., 2021; Sharma & Kumar, 2021). Nesse contexto, os esforços voltados a preservar e monitorar a qualidade da água não apenas protegem a saúde pública, mas também sustentam a biodiversidade local e a integridade dos ecossistemas aquáticos (Bogardi et al., 2020).

A técnica denominada como “biomonitoramento” baseia-se na compreensão de que elementos do ambiente, sejam eles naturais ou causados pela ação humana, têm a capacidade de desequilibrar um ecossistema, o que por sua vez leva a reações biológicas passíveis de quantificação e análise (Fedorova et al., 2021; Rial-Berriel et al., 2020). A poluição dos rios ocorre a partir de uma série de fatores e vias diferentes, fazendo-se de extrema importância acompanhar a qualidade das águas utilizando recursos naturais através de uma abordagem mensurável e poder interpretar dados de forma estatística proporcionando ações preventivas (Mamun & An, 2021).

Dentre os tipos existentes de biomonitoramento, tem se destacado cada vez mais o método passivo, pois este utiliza espécies nativas presentes no ambiente para identificar a presença de poluentes no seu entorno, permitindo a previsão de consequências da poluição sobre os organismos vivos, com baixo custo operacional (Cavallaro et al., 2019; Mulgrew & Williams, 2000). Estudos dessa natureza, que utilizaram macrófitas aquáticas, têm se mostrado factíveis na avaliação da qualidade da água de corpos hídricos fluviais.

Eid et al. (2020) relataram viabilidade em utilizar a planta aquática *Typha domingensis* (Typhaceae) no monitoramento de metais-traço como Ag, Cd, Fe, Pb e Zn no lago egípcio Burullus (Eid et al., 2020). Além disso, a correlação entre a concentração de metais pesados acumulados nas plantas aquáticas *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae) e nas águas de seus respectivos habitats foi objeto de estudo da pesquisa realizada por Eid et al. (2021). Os contaminantes avaliados foram Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb e Zn, sendo que os resultados apontaram a maior correlação para Fe ($R^2 = 0,978$), seguido do Cr ($R^2 = 0,959$) (Eid et al., 2021). Em estudo realizado em três regiões do Delta do Nilo, no Egito, onde suas águas são usadas para irrigação de lavouras, avaliou-se a presença de metais pesados em macrófitas aquáticas selvagens de distintas famílias botânicas (*Cyperus alopecuroides*, *Echinochloa stagnina*,

Eichhornia crassipes, *Ludwigia stolonifera*, *Phragmites australis*, *Ranunculus sceleratus* and *Typha domingensis*). Dentre os metais quantificados (Fe, Cu, Zn, Mn, Co, Cd, Ni e Pb), verificou-se descumprimentos aos padrões ambientais para Cu, Zn e Pb nas três regiões amostradas (Abdelaal et al., 2021).

O estudo desenvolvido por Pasichna (2023) e colaboradores classificou diferentes corpos d'água em Kiev, Ucrânia, com base nas concentrações dos metais Mn, Pb, Ni e Cd acumulados em macrófitas pertencentes às espécies *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae), *Myriophyllum spicatum* (Haloragaceae) e *Potamogeton perfoliatus* (Potamogetonaceae) (Pasichna et al., 2023). Três espécies de musgo e duas plantas vasculares, *Elodea canadenses* (Hydrocharitaceae) e *Myriophyllum spicatum* (Haloragaceae) foram avaliadas quanto à concentração de Hg acumulado e indicaram desconformidades com os padrões ambientais em três rios amostrados na Bulgária (Gecheva et al., 2023).

A macrófita *E. grandiflorus* (Cham. & Schltr.) (Alismataceae) apresenta-se como espécie de potencial uso no biomonitoramento de corpos hídricos antropizados, devido à notável bioacumulação de metais pesados em seus tecidos radiculares (Reginato et al., 2023). Trata-se de uma

Metodologia

A área de pesquisa está situada no município de Joinville, localizado na região nordeste de Santa Catarina, no litoral norte do Estado (Figura 1). A cidade faz fronteira a leste com a baía Babitonga e a oeste com uma porção da cadeia de montanhas da Serra do Mar. Suas coordenadas geográficas são 26° 18' 14" S de latitude e 48° 50' 45" O de longitude. Essa área abrange uma extensão territorial total de 1.127,947 km², que inclui a área urbana de 210,40 km², a área rural do distrito de Pirabeiraba de 396,30 km² e a área rural do distrito sede. O clima da região é classificado como mesotérmico, caracterizado por verões quentes e ausência de uma estação seca definida, seguindo a classificação de Köppen (Cfa). A temperatura média anual é de 20,9°C, com máximas atingindo 24,8°C e mínimas registrando 13,2°C. Fevereiro se destaca como o mês mais quente, com uma média de aproximadamente 24,8°C, enquanto julho representa o mês mais frio, com uma temperatura média de 16,5°C. A umidade relativa média anual do ar na região é de 76,04%. As precipitações anuais alcançam uma média de 1976 mm, com chuvas mais frequentes durante o período de verão (Clima-Date, 2023).

macrófita nativa da flora brasileira e componente de comunidades aquáticas dulcícolas com distribuição natural em todos os biomas do país. Possui folhas amplas e coriáceas, característica que originou o nome popular "chapéu-de-couro". Seus órgãos aéreos têm uma longa tradição de uso popular no Brasil, sendo empregadas para tratar condições como reumatismo, artrite e hipertensão arterial (Rocha et al., 2023). Além disso, segundo Marques et al. (2017), a *E. grandiflorus* apresenta grande capacidade de bioacumulação de poluentes ambientais. Devido ao seu uso fitoterápico e potencial de bioacumulação, a composição química da espécie foi examinada por diversos pesquisadores, podendo ser usada como um indicador de mudanças causadas pela exposição à poluição ambiental (Marques et al., 2017; Mulgrew & Williams, 2000).

O presente trabalho teve por objetivo avaliar a capacidade de bioacumulação de metais pesados nos órgãos vegetativos (folhas, raiz e caule) de *E. grandiflorus* e a sua relação com o contexto de uso e ocupação do solo ao longo do rio Cachoeira. Tem-se como hipóteses que os metais pesados bioacumulados possuem distribuição diferencial entre os órgãos da planta e que a maior concentração ocorre em áreas onde há maior industrialização ao longo do corpo do rio.

Área de estudo

Dentro dos limites da área urbana do município, estão incluídas as bacias hidrográficas do Cubatão, Pirai, Cachoeira, além das bacias hidrográficas independentes das Vertentes Leste e Sul, e a bacia do Palmital (SEDUP, 2019). A Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira é parte integrante do complexo hídrico da baía Babitonga, em que o rio Cachoeira desempenha o papel central como curso d'água principal. Ao longo dos seus 16 Km de extensão, recebe contribuições de diversos afluentes, incluindo os rios Morro Alto, Mathias, Jaquarão, Bucarein, Bom Retiro e Boa Vista. O rio Cachoeira e seus afluentes estão completamente contidos no território de Joinville, abrangendo uma área de cerca de 92 km² (Zschornack & Oliveira, 2018). A diversidade florística ao longo do rio Cachoeira consiste em 55 espécies de macrófitas aquáticas, das quais 69,6% são nativas da flora brasileira e 30,4% são exóticas naturalizadas. A forma anfíbia é preponderante, correspondendo a 86,2% das espécies. Plantas emergentes, flutuantes fixas e flutuantes livres possuem baixa representatividade em número de espécies. A família Alismataceae está representada pela

espécie *Echinodorus grandiflorus* (Mello Júnior, 2020).

Pontos amostrais

Foram selecionados seis pontos de coleta (Figura 1) ao longo do canal principal do rio, abrangendo 3 km da extensão, de forma a contemplar a ocorrência da espécie biomonitora e, também, locais com diferentes usos e ocupação do solo adjacentes ao curso do rio. São eles:

Ponto 1 - Área próxima a um grande centro comercial, uma oficina de motocicletas e residências.

Ponto 2 - Abrange uma área que inclui uma estação de tratamento de esgoto, uma fábrica de plástico e residências.

Ponto 3 - Nesta localidade, há uma empresa de manutenção de eletrodomésticos, um fornecedor de gás butano, uma construtora e uma vizinhança residencial.

Ponto 4 - Abrange uma área onde há uma padaria, uma loja de pedras, uma loja de laticínios e residências.

Ponto 5 - Engloba um trecho do rio onde está localizada uma fábrica de bebidas, uma loja de materiais de massagens, um complexo de condomínios, um salão de beleza e um ferro velho.

Ponto 6 - Adjacente ao local, há uma concessionária de carros, uma loja de tintas, dois comércios de pneus, um ponto de ônibus e restaurantes.

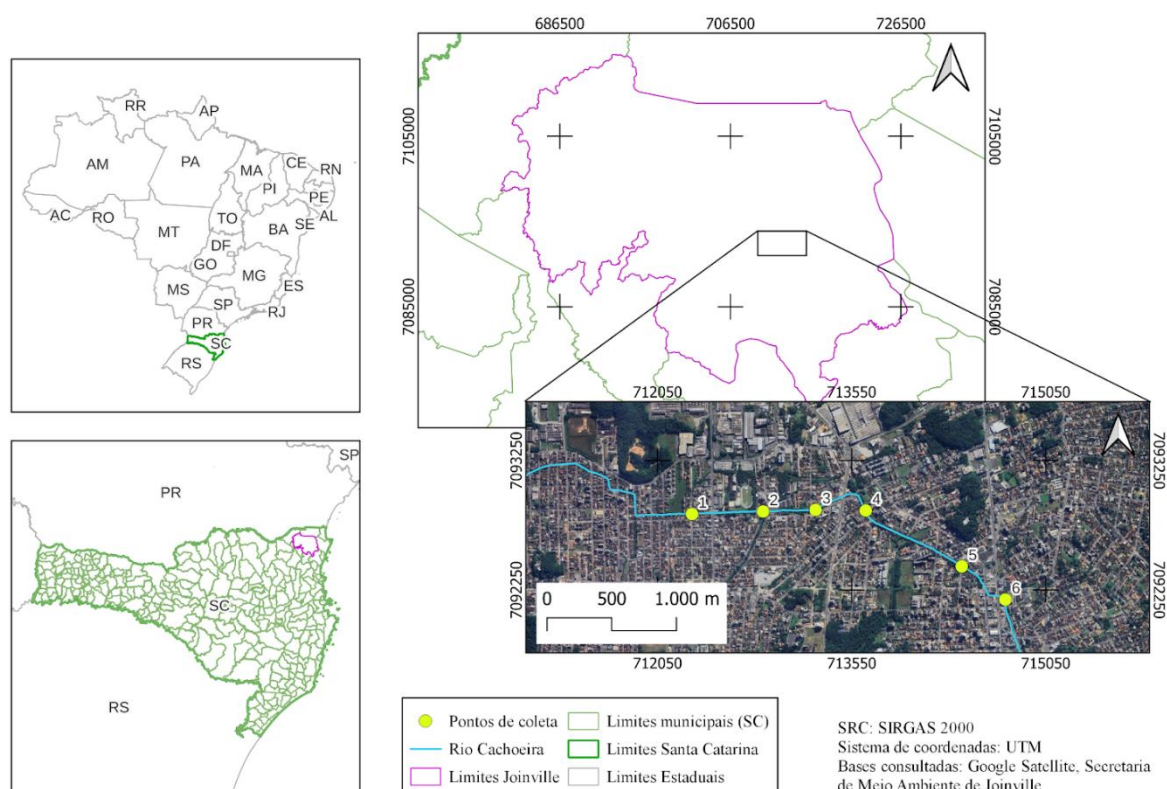


Figura 1. Pontos de coleta de amostras da espécie *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) no Rio Cachoeira em Joinville/ SC.

Espécie biomonitora

A espécie *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) é uma planta herbácea aquática perene, com 40 a 70 cm de altura. Suas folhas são simples, coriáceas, cordiformes, com base cordada e ápice agudo a arredondado, variando em tamanho de 10 a 35 cm de comprimento e 20 a 25 cm de largura. O pecíolo é longo, com seção transversal circular a ovalada. O caule subterrâneo é do tipo rizoma. A haste é triangular. As inflorescências são compostas por racemos ou panículas com eixo de

25 a 60 cm de comprimento, eretas, com várias zonas de ramificação. As flores são bissexuais, com pedicelos longos de 10 a 22 mm de comprimento e sépalas ovais, glabros e persistentes. Os frutos são globosos ou achatados e, às vezes, com quilhas abaxiais e glândulas (Marques et al., 2017)

Coleta de material botânico, preparo das amostras e análise da concentração dos metais pesados

Em cada ponto de coleta foram selecionados três indivíduos sem sinais de lesões por herbívoros, dos quais foram coletadas amostras de folhas, caules (rizomas) e raízes, totalizando 18 indivíduos amostrais. Ainda em campo, as plantas foram dissecadas, triando-se cada órgão de interesse e os acondicionando separadamente.

Em laboratório, todas as amostras foram submetidas a dois processos de lavagem. O primeiro, para a remoção de grandes sedimentos e materiais aderidos, por meio da dispersão de água ultrapura sobre as amostras. O segundo, para limpeza final, através da submersão em água ultrapura, seguida pela centrifugação por 30 minutos a 180 rpm das amostras. Após as etapas da lavagem, as amostras foram desidratadas em estufa de circulação de ar forçado a 60 °C por 72 horas. Em seguida, as amostras foram maceradas separadamente com auxílio de cadinho e pistilo de porcelana, obtendo-se um pó fino. Deste último, foi pesado 0,2 gramas de cada amostra coletada para o processo de digestão ácida.

Para a digestão ácida, foi acondicionado 0,2 gramas de cada amostra em um Becker de vidro, juntamente com 3,0 ml de ácido nítrico concentrado (65%), e aquecidos a 90 °C por quatro horas em chapa aquecedora em capela de exaustão de gases. O extrato resultante passou por centrifugação e filtração em filtro tarja preta (retenção nominal de 20 – 25 micras). O filtrado (2 ml) foi transferido e avolumado para 15 ml, com água ultrapura, em tubos Falcon. A caracterização química do extrato foi conduzida por meio de um

espectrômetro de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES) utilizando um equipamento Avio 200 da marca Perkin Elmer.

Análise estatística

Por meio da estatística descritiva foram obtidas as médias e respectivos desvios-padrão da concentração de metais pesados em cada órgão estudado por indivíduo amostral e por ponto de coleta. A comparação das médias entre os diferentes grupos (órgãos da planta e pontos de coleta) foi conduzida por meio da aplicação da Análise de Variância (ANOVA) de Kruskal-Wallis. As análises de correlação entre as concentrações dos metais e as áreas de coleta foram realizadas utilizando a correlação de Spearman. O nível de significância determinado para os testes foi alfa igual a 0,05. A escolha de testes não paramétricos deveu-se à não homocedasticidade da variância e à distribuição não normal dos resíduos dos dados. O teste estatístico foi realizado no ambiente R.

Resultados

Foi registrada uma maior concentração de alumínio e zinco nos três órgãos vegetais estudados nas amostras da planta monitora. Os metais pesados cobre, níquel e chumbo estiveram presentes, porém em concentrações menores. O acúmulo desses metais diminuiu da parte aérea em direção aos órgãos subterrâneos (raiz e caule), com diferença estatisticamente significativa entre os órgãos vegetais (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição e comparação da concentração média de metais pesados e respectivos desvios-padrão entre os órgãos da espécie *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) coletados no rio Cachoeira, Joinville/SC. Legenda: H = valor da estatística do teste de Kruskal-Wallis. p = significância estatística.

Metal Pesado (mg/kg)	Folha	Caule	Raiz	H	p
Alumínio	3.472,87 (±471,57)	985,63 (±208,41)	1.175,57 (±273,82)	17,50	0,002
Zinco	1.743,96 (±328,51)	540,57 (±99,15)	693,03 (±204,99)	16,75	0,002
Níquel	43,95 (±6,46)	13,56 (±2,66)	13,97 (±3,94)	16,04	0,003
Chumbo	9,56 (±1,68)	2,79 (±0,96)	4,02 (±1,16)	14,06	0,009
Cobre	98,07 (±12,20)	27,85 (±4,53)	42,20 (±9,58)	20,8	0,000

A concentração de alumínio foi maior nas plantas coletadas nos pontos 6, 4 e 3, respectivamente (Tabela 2). Da mesma forma, a concentração de níquel nestes mesmos locais mostrou níveis superiores em comparação aos demais locais de amostragem. Em contraste, os pontos de coleta 1 e 2 revelaram as menores concentrações dos metais pesados.

O teste de Kruskal-Wallis mostrou uma diferença significativa nas médias de alumínio e

zinco entre os pontos de coleta. Contudo, não houve diferença significativa nas médias das concentrações de zinco, chumbo e cobre. O teste *post-hoc* mostrou que a média da concentração de alumínio encontrada na área 4 é maior do que na área 2 ($p = 0,005$) e que a concentração média do zinco é menor na área 2 do que nas áreas 3 ($p = 0,021$), 4 ($p = 0,004$) e 6 ($p = 0,041$).

A correlação de Spearman mostrou que há uma correlação positiva, de efeito fraco, entre as

concentrações de zinco ($p=0,293$; $p=0,016$) e chumbo ($p=0,243$; $p=0,038$); e de efeito moderado nas concentrações de alumínio ($p=0,327$; $p=0,008$) e níquel ($p=0,381$; $p=0,002$) entre as amostras e os

pontos de coleta. O cobre também apresentou uma correlação positiva, de efeito fraco, em relação aos pontos de coleta, mas não foi estatisticamente significativa ($p=0,128$; $p=0,179$).

Tabela 2. Distribuição e comparação da concentração média de metais pesados e respectivos desvios-padrão, entre os pontos de coleta, em amostras da espécie *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) coletadas no rio Cachoeira, Joinville/SC. Legenda: H = valor da estatística do teste de Kruskal-Wallis. p = significância estatística.

Metal Pesado (mg/kg)	Ponto 1	Ponto 2	Ponto 3	Ponto 4	Ponto 5	Ponto 6	H	p
Alumínio	1.179,68 ($\pm 376,12$)	507,95 ($\pm 220,26$)	2.331,13 ($\pm 674,23$)	3.125,41 ($\pm 620,76$)	1.771,08 ($\pm 577,46$)	2.352,92 ($\pm 705,67$)	15,94	0,007
Zinco	376,42 ($\pm 109,48$)	470,98 ($\pm 131,14$)	1.361,82 ($\pm 316,10$)	1.066,85 ($\pm 240,56$)	1.687,06 ($\pm 670,38$)	992,01 ($\pm 312,77$)	10,19	0,069
Níquel	13,43 ($\pm 5,09$)	4,14 ($\pm 2,29$)	33,22 ($\pm 9,05$)	35,36 ($\pm 6,66$)	24,41 ($\pm 6,75$)	32,44 ($\pm 11,11$)	18,73	0,002
Chumbo	3,14 ($\pm 1,75$)	2,44 ($\pm 1,17$)	5,99 ($\pm 2,05$)	7,36 ($\pm 2,01$)	8,72 ($\pm 2,8$)	5,10 ($\pm 1,87$)	6,94	0,224
Cobre	29,81 ($\pm 9,63$)	68,36 ($\pm 20,08$)	45,86 ($\pm 15,41$)	65,62 ($\pm 15,57$)	80,02 ($\pm 21,06$)	46,57 ($\pm 12,90$)	4,31	0,504

Discussão

Um alto teor de metais foi identificado em amostras de *Echinodorus grandiflorus* (Alismataceae) coletadas ao longo do curso do rio Cachoeira, sendo que alguns apresentaram concentrações acima dos limites aceitáveis pela legislação vigente (Reginato et al., 2023). As concentrações de chumbo, níquel, zinco e cobre, por exemplo, são maiores do que as descritas em análises de amostras da mesma espécie cultivada em outros ambientes (Franco et al., 2011). Essa variabilidade nas concentrações de metais é influenciada por uma variedade de fatores, incluindo propriedades físico-químicas do solo, estratégias de adaptação da planta e condições ambientais. Contudo, em muitos casos, fatores antropogênicos são os principais determinantes da presença de metais tóxicos em plantas (Adhikari et al., 2022).

A maior concentração de alumínio nas amostras da planta monitora, em relação aos outros metais estudados, pode ser decorrente da presença do elemento em grande quantidade no solo e água. O alumínio é o segundo elemento metálico mais abundante na crosta terrestre, depois do silício (US Geological Survey, 2023). Nas águas fluviais, as altas concentrações de alumínio na água podem ser atribuídas a atividades antropogênicas, como indústrias de transformação, reciclagem e processos de tratamento de água que empregam agentes à base de alumínio (Assal et al., 2024; HAFSI et al., 2024; Kim et al., 2021), tal como se observa na área de estudo.

No estudo, o ponto 4 apresentou uma concentração média de alumínio estatisticamente superior em relação ao ponto 2, mesmo não contendo atividades industriais. Isso pode ser atribuído a obras de modernização realizadas próximas ao leito do rio, atividades comerciais e padrões de consumo da população local (Senze et al., 2022).

Não há um padrão estabelecido de normalidade para a concentração de alumínio em plantas, uma vez que diferentes espécies vegetais demonstram variados mecanismos de resposta em relação a esse metal (Ofoe et al., 2022). Contudo, foi observado que altas concentrações do metal estão associado a superprodução de espécies reativas de oxigênio, a redução na absorção de água e nutrientes (Chauhan et al., 2021). As macrófitas aquáticas, em geral, são capazes de acumular alumínio, especialmente em áreas próximas à fonte de contaminação, sendo sensíveis presença desse metal (Scofield et al., 2023).

Além das plantas, o alumínio pode contaminar vertebrados aquáticos, como peixes e anfíbio, que são consumidos por animais e, eventualmente, pelos seres humanos (Chauhan et al., 2021; Closset et al., 2022). Em pessoas, foi demonstrado que diferentes concentrações do metal podem estar associadas alterações patológicas no sistema esquelético, neurológico, gastrointestinal e hematopoiético (Byrne, 2021; Hao et al., 2022; Souza-Monteiro et al., 2022; Zhang et al., 2021). A exposição ao alumínio em crianças, especialmente prematuros e aqueles com

insuficiência renal, pode levar à toxicidade do sistema nervoso central e do metabolismo ósseo (Alasfar & Isaifan, 2021).

O zinco foi o segundo metal com maior concentração encontrado nas amostras da planta monitorada. Trata-se de um elemento essencial para os processos metabólicos das plantas, desempenhando um papel na síntese de RNA, na fotossíntese e na regulação do crescimento vegetal (Wang et al., 2021). No entanto, altos níveis de zinco nos podem impactar negativamente o crescimento das plantas, as taxas fotossintéticas e respiratórias, e desequilibrar a nutrição mineral (Kaur & Garg, 2021).

Nos seres humanos, os efeitos da toxicidade do zinco não são amplamente compreendidos. No entanto, pesquisadores demonstraram que a toxicidade por zinco está associada a sintomas que causam desconforto nas atividades diárias e no estilo de vida, como febre, dispneia, dor no peito e tosse (Hussain et al., 2022).

O zinco entra nos solos por várias fontes, como intemperismo de rochas, incêndios florestais, vulcões, atividades de mineração e fundição, esterco, lodo de esgoto e fertilizantes fosfatados (Kaur & Garg, 2021). Neste estudo, a maior concentração do metal foi encontrada no ponto 5, onde foi descrita a presença de atividade industrial e um complexo de condomínios, porém não houve uma diferença estatisticamente significativa em comparação com os outros pontos de amostragem.

As concentrações de chumbo e níquel encontradas nas amostras da planta monitorada foram menores do que as de alumínio, zinco e cobre. Contudo, levantam alertas devido aos graves efeitos desse metal na saúde ambiental e humana (Nawaz et al., 2021; Samarghandian et al., 2021).

Em pessoas, a intoxicação por chumbo pode causar distúrbios neurológicos, cardiovasculares, gastrointestinais, hematológicos e reprodutivos, com efeitos deletérios nas funções cognitivas e comportamentais das crianças (Gundacker et al., 2021; Olufemi et al., 2022; Samarghandian et al., 2021). A intoxicação por níquel pode levar doenças pulmonares inflamatórias crônicas, distúrbios endócrinos e neoplasias pulmonares (Lee et al., 2021; Yang & Ma, 2021).

Das et al. (2021) examinaram os efeitos negativos de diferentes graus de exposição ao chumbo nas macrófitas aquáticas *Salvinia cucullata* (Salviniaceae), *Alternanthera sessilis* (Amaranthaceae), *Lemna minor* e *Pistia stratiotes* (Araceae). Estas espécies foram expostas experimentalmente a concentrações crescentes do metal (0,12 a 0,48 mM) por 96 horas,

em sistema de cultivo hidropônico. Neste experimento, todas as plantas apresentaram efeito de bioacumulação do metal e, na maior concentração, expressaram sinais de fitotoxicidade, com alterações fisiológicas e redução de biomassa (Das et al., 2021).

Nas amostras da *E. grandiflorus* não foi observada uma diferença significativa nas concentrações médias de chumbo entre os pontos de coleta. Entretanto, em relação ao níquel, locais com maior diversidade de atividades industriais e comerciais (pontos de coleta 3,4 e 6) apresentaram valores significativamente mais elevados da concentração do metal em comparação com o ponto 2.

Íons metálicos tais como manganês, cobre, ferro e zinco são fundamentais para o crescimento saudável das plantas (Silva & Ferreira, 2021). Além desses, o níquel desempenha um papel importante como micronutriente, sendo absorvido na forma de íon divalente (Ni^{2+}). Sua presença é crucial para diversos processos, como o metabolismo do nitrogênio, o crescimento, o envelhecimento, a absorção de ferro e a resistência a doenças (Sinicropi et al., 2010). Todavia, em concentrações elevadas, o níquel interfere nas atividades metabólicas das plantas, resultando na inibição da atividade enzimática, do transporte eletrônico fotossintético e da biossíntese de clorofila (Begum et al., 2022; Ugurlar & Kaya, 2023).

Os efeitos tóxicos do níquel utilizando soluções aquosas sintéticas de $NiSO_4$, em concentrações de 0,5, 1,5 e 2,5 mg/L, analisados em macrófitas aquáticas *Lemna minor* (Araceae) e *Eichhornia crassipes* (Pontederiaceae), durante 10 dias, mostram alterações físicas negativas nas plantas: *L. minor* apresentou processo de necrose com 1,5 mg/L e danos irreversíveis em 2,5 mg/L; já em *E. crassipes* detectou-se necrose no pecíolo em 1,5 mg/L e clorose em 2,5 mg/L (Moreno-Rubio et al., 2023).

O cobre é essencial para o metabolismo das plantas, atuando como cofator em vários processos enzimáticos, e está envolvido na função mitocondrial, sinalização e defesa contra patógenos (Rai et al., 2021). No entanto, o excesso do metal está associado a uma redução no crescimento e na biomassa, nos parâmetros fotossintéticos, no teor e na fluorescência da clorofila, nos parâmetros de troca gasosa e na indução de atividades enzimáticas antioxidantes (Nomani et al., 2022).

Os efeitos da toxicidade pelo cobre em plantas aquáticas resultam em alterações negativas em biomarcadores, no sistema fisiológico, na síntese de DNA e no equilíbrio hormonal (Krayem et al., 2021). Luengluetham et al. (2023)

observaram que concentrações excessivas do metal induzem à morte a planta aquática *Ceratophyllum demersum* (Ceratophyllaceae). As concentrações avaliadas foram de 0, 2, 5, 10 e 50 μM , sendo que o efeito da bioconcentração nos tecidos vegetais foi considerado grave nas três últimas concentrações, resultando em fitotoxicidade, rápida diminuição na eficiência fotossintética, indução do estresse oxidativo e degradação de proteínas (Luengluetham et al., 2023).

Em relação à distribuição das concentrações dos metais nos órgãos da planta, as folhas apresentaram concentrações mais altas de alumínio, zinco, níquel, chumbo e cobre em comparação com as raízes e caules, respectivamente. Meera et al. (2021) descreveram que, em diversas macrófitas aquáticas, o acúmulo de metais pesados dentro do corpo da planta resulta em alterações fisiológicas e na síntese enzimática. Quando alcança o xilema, o metal é transportado junto com a seiva em direção às folhas, levando a maior bioacumulação nas folhas em relação aos outros órgãos (Meera et al., 2021). Todavia, a distribuição do chumbo entre os órgãos pode variar de acordo com a concentração no substrato e da forma de exposição ao poluente (Kabata-Pendias, 2001; Ribeiro et al., 2015; Sharma & Dubey, 2005). Souza (2023) verificou uma baixa concentração de chumbo em plantas cultivadas em solo mais protegido de poluentes e insumos agrícolas (Sousa, 2023).

Ribeiro et al. (2015) observaram que o conteúdo de chumbo nas folhas, raiz e caule da *E. grandiflorus* variam de acordo com as diferentes concentrações do metal no substrato. Em menores concentrações, o chumbo apresentou maior acúmulo nas raízes e caules em comparação com as folhas. Já em concentração intermediária, o caule apresentou maior acumulação do metal do que as folhas (Ribeiro et al., 2015). De acordo com Sharma e Dubey (2005), o conteúdo de chumbo nos órgãos vegetais tende a diminuir na raiz, folhas e caules, respectivamente. Kabata-Pendias (2001) descreveu que a variação da concentração de chumbo entre os órgãos de uma planta depende de outros fatores, como a sua capacidade de absorção do metal de fontes aéreas (Kabata-Pendias, 2001).

A comparação das médias das concentrações dos metais evidenciou apenas diferenças estatisticamente significativas para o alumínio e o zinco entre os pontos de coleta. Entretanto, o teste de correlação indicou uma relação positiva entre os pontos de coleta e as concentrações de alumínio, níquel, zinco e chumbo. Esse resultado demonstra que as concentrações desses metais aumentam conforme

os pontos de coleta se distanciam seguindo a corrente fluvial em direção à foz do rio.

A ocupação econômica do solo nas áreas adjacentes ao curso pluvial pode influenciar a qualidade da água, juntamente com as características fitoquímicas dos elementos (Chen et al., 2021). Metais pesados podem entrar no ecossistema aquático por meio de fontes terrestres e antropogênicas, como o descarte inadequado de resíduos industriais e o lançamento de águas residuais contaminadas (Nour, 2020; Yuan et al., 2020).

Neste estudo, não foi possível identificar uma fonte poluidora específica. No entanto, a tendência de aumento na concentração dos metais estudados à medida que o curso do rio seguia jusante sugere o efeito de uma combinação de fatores descritos na literatura, como a atividade da construção civil, a urbanização de áreas residenciais e o possível descarte de efluentes industriais (Strokal et al., 2021).

Na bacia hidrográfica do rio Cachoeira, o estilo de vida da população, incluindo o consumo de água, energia, combustível e geração de lixo, está associado a um nível de exploração de recursos considerado insustentável, sendo 24 vezes maior do que a capacidade de suporte da bacia (Carletto & Oliveira, 2017). As concentrações de chumbo, cobre, cromo, zinco e níquel solubilizados no sedimento do rio Cachoeira, de acordo com parâmetros descritos na resolução CONAMA 454/2011, excederam o limite permitido pela legislação (Coan, 2019).

As comunidades, especialmente aquelas diretamente dependentes de recursos provenientes do rio, tais como pescadores e coletores, podem desenvolver mais problemas de saúde devido à exposição aos contaminantes, como metais pesados (Deb et al., 2021; Hasan et al., 2021). A presença de elevadas concentrações de metais em *E. grandiflorus* também pode indicar problemas relacionados à qualidade dos peixes pescados para consumo humano ao longo do curso do rio Cachoeira (Pinheiro et al., 2017). Este resultado é corroborado por Coan (2019), que observou que a maioria das amostras de peixes coletadas no rio Cachoeira apresentou altas concentrações de chumbo, cobre, cromo, zinco e níquel (Coan, 2019).

As altas concentrações de metais também podem afetar a biodiversidade da flora e da fauna na bacia do rio Cachoeira. Nessa região, foram identificadas 381 espécies de plantas distribuídas em 226 gêneros e 89 famílias, além de 32 espécies de mamíferos, distribuídas em 13 famílias e sete ordens (Dornelles et al., 2017; Júnior et al., 2017). A herpetofauna conta com 54 espécies, sendo 36 de

anfíbios e 18 de répteis. Nas margens do rio, também foram identificadas 241 espécies de aves de 63 famílias (Grose, 2017; Jasper Comitt, 2017).

O uso do solo das bacias hidrográficas está diretamente associado a qualidade da água dos rios, sendo importante integrar as ações de planejamento urbano ao monitoramento da saúde ambiental (Liu et al., 2022). Medidas voltadas para controlar os efeitos da urbanização nas águas de rios urbanos incluem a revisão dos fatores de emissão, como a aglomeração de indústrias e residência, junto ao monitoramento da qualidade da água (Dong et al., 2022).

Conclusão

A macrófita aquática *E. grandiflorus* demonstrou uma alta capacidade de bioacumulação de metais pesados, bem como sensibilidade às variações em suas concentrações, à medida que acumulava os efeitos da urbanização e industrialização nas áreas adjacentes ao curso do rio. Esses resultados indicam uma relação entre o

Nesse contexto, a espécie *E. grandiflorus* demonstrou capacidade de bioacumulação de metais pesados num contexto ambiental de uso e ocupação do solo por distintas atividades humanas ao longo do rio Cachoeira. Com base nesses resultados, recomenda-se a realização de estudos adicionais que incorporem variáveis anatômicas e fisiológicas da planta monitora, visando ampliar o entendimento sobre as alterações estruturais e eco fisiológicas causadas pela poluição por metais pesados na espécie.

contexto de uso e ocupação do solo ao longo do rio Cachoeira e a concentração dos metais estudados na planta monitorada. Logo, a *E. grandiflorus* apresenta potencial como biomarcador, podendo ser utilizada no monitoramento da qualidade da água fluvial e na inferência sobre a influência das atividades antropogênicas na região.

Referências

- Abdelaal, M., Mashaly, I. A., Srouf, D. S., Dakhil, M. A., El-Liethy, M. A., El-Keblawy, A., El-Barougy, R. F., Halmy, M. W. A., & El-Sherbeny, G. A. (2021). Phytoremediation Perspectives of Seven Aquatic Macrophytes for Removal of Heavy Metals from Polluted Drains in the Nile Delta of Egypt. *Biology* 2021, Vol. 10, Page 560, 10(6), 560. <https://doi.org/10.3390/BIOLOGY10060560>
- Adhikari, S., Marcelo-Silva, J., Rajakaruna, N., & Siebert, S. J. (2022). Influence of land use and topography on distribution and bioaccumulation of potentially toxic metals in soil and plant leaves: A case study from Sekhukhuneland, South Africa. *The Science of the Total Environment*, 806. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.150659>
- Alasfar, R. H., & Isaifan, R. J. (2021). Aluminum environmental pollution: the silent killer. *Environmental Science and Pollution Research International*, 28(33), 44587–44597. <https://doi.org/10.1007/S11356-021-14700-0>
- US Geological Survey. (2023). *Aluminum Statistics and Information*. <https://www.usgs.gov/centers/national-minerals-information-center/aluminum-statistics-and-information>
- Assal, A., Nasrellah, H., Aarfane, A., Bakasse, M., El Mahi, M., & El Mostapha, L. (2024). Supplementary Treatment of Wastewater by Using Ecological Lime Derived from Eggshell Waste: a New Sustainable Strategy for Safe Reuse. *Ecological Engineering & Environmental Technology*, 25(1), 180–189. <https://doi.org/10.12912/27197050/174967>
- Begum, W., Rai, S., Banerjee, S., Bhattacharjee, S., Mondal, M. H., Bhattacharai, A., & Saha, B. (2022). A comprehensive review on the sources, essentiality and toxicological profile of nickel. *RSC Advances*, 12(15), 9139–9153. <https://doi.org/10.1039/D2RA00378C>
- Bogardi, J. J., Leentvaar, J., & Sebesvári, Z. (2020). Biologia Futura: integrating freshwater ecosystem health in water resources management. *Biologia Futura*, 71(4), 337–358. <https://doi.org/10.1007/S42977-020-00031-7>
- Byrne, P. J. (2021). Simulation and development of a transportable neutron activation analysis system for the assessment of aluminum in vivo. School of Health Sciences, West Lafayette, Indiana. https://hammer.purdue.edu/articles/thesis/Simulation_and_Development_of_a_Transportable_Neutron_Activation_Analysis_System_for_the_Assessment_of_Aluminum_In_Vivo/15082803
- Carletto, D. L., & Oliveira, T. M. N. de. (2017). Educação ambiental e sustentabilidade: a Pegada Ecológica na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville, SC. *Acta Biológica Catarinense*, 4(3), 136–144. <https://doi.org/10.21726/ABC.V4I3.398>

- Cavallaro, R., Ferreira De Melo Júnior, J. C., Bonatti-Chaves, M., Daniela, G., & Renner, R. (2019). Avaliação do efeito da poluição atmosférica em populações urbanas de *ingulis mart.* (FABACEAE) por meio do método de biomonitoramento passivo. *Connection line - revista eletrônica do UNIVAG*, 0(20).
<https://doi.org/10.18312/CONNECTIONLINE.V0I20.1246>
- Chauhan, D. K., Yadav, V., Vaculík, M., Gassmann, W., Pike, S., Arif, N., Singh, V. P., Deshmukh, R., Sahi, S., & Tripathi, D. K. (2021). Aluminum toxicity and aluminum stress-induced physiological tolerance responses in higher plants. *Critical Reviews in Biotechnology*, 41(5), 715–730.
<https://doi.org/10.1080/07388551.2021.1874282>
- Chen, Z., An, C., Tan, Q., Tian, X., Li, G., & Zhou, Y. (2021). Spatiotemporal analysis of land use pattern and stream water quality in southern Alberta, Canada. *Journal of Contaminant Hydrology*, 242.
<https://doi.org/10.1016/J.JCONHYD.2021.103852>
- Clima-Data. (2023). *Clima Joinville: Temperatura, Tempo e Dados climatológicos Joinville*. <https://pt.climate-data.org/americado-sul/brasil/santa-catarina/joinville-4496/>
- Closset, M., Cailliau, K., Slaby, S., & Marin, M. (2022). Effects of Aluminium Contamination on the Nervous System of Freshwater Aquatic Vertebrates: A Review. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(1).
<https://doi.org/10.3390/IJMS23010031>
- Coan, A. S. (2019). *Caracterização ambiental da água e sedimento do rio cachoeira (joinville-sc) por diferentes bioindicadores* [Dissertação de Mestrado]. Universidade da Região de Joinville.
https://www.univille.edu.br/account/ppgsma/VirtualDisk.html/downloadDirect/1622313/Dissertacao_Final_Aline_Scheller.pdf
- Das, S., Das, A., Mazumder, P. E. T., Paul, R., & Das, S. (2021). Lead phytoremediation potentials of four aquatic macrophytes under hydroponic cultivation. *International Journal of Phytoremediation*, 23(12), 1279–1288.
<https://doi.org/10.1080/15226514.2021.1895714>
- Deb, D., Schneider, P., Dudayev, Z., Emon, A., Areng, S. S., & Mozumder, M. M. H. (2021). Perceptions of Urban Pollution of River Dependent Rural Communities and Their Impact: A Case Study in Bangladesh. *Sustainability*, 13(24).
<https://doi.org/10.3390/SU132413959>
- Dong, M., Liu, M., Yin, L., Zhou, J., & Sun, D. (2022). Concept and Practices Involved in Comprehensive River Control Based on the Synergy among Flood Control, Ecological Restoration, and Urban Development: A Case Study on a Valley Reach of Luanhe River in a Semiarid Region in North China. *Water*, 14(9).
<https://doi.org/10.3390/W14091413>
- Dornelles, S. S., Evaristo, G. H., Tosetto, M., Jr., C. M., Seifert, V. R., Raboch, B., Gonçalves, J., & Valentim, C. (2017). Diversidade de mamíferos em fragmentos florestais urbanos na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville, SC. *Acta Biológica Catarinense*, 4(3), 126–135.
<https://doi.org/10.21726/ABC.V4I3.397>
- Eid, E. M., Galal, T. M., Shaltout, K. H., El-Sheikh, M. A., Asaeda, T., Alatar, A. A., Alfarhan, A. H., Alharthi, A., Alshehri, A. M. A., Picó, Y., & Barcelo, D. (2020). Biomonitoring potential of the native aquatic plant *Typha domingensis* by predicting trace metals accumulation in the Egyptian Lake Burullus. *Science of The Total Environment*, 714, 136603.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.136603>
- Eid, E. M., Shaltout, K. H., Almuqrin, A. H., Aloraini, D. A., Khedher, K. M., Taher, M. A., Alfarhan, A. H., Picó, Y., & Barcelo, D. (2021). Uptake prediction of nine heavy metals by *Eichhornia crassipes* grown in irrigation canals: A biomonitoring approach. *Science of The Total Environment*, 782, 146887.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.146887>
- Fedorova, D. G., Karpova, G. V., & Ukenov, B. S. (2021). The Accumulation of Heavy Metals in the Leaves of *Crataegus Sanguinea* Pall. (Redhaw Hawthorn) in the Urban Environment (On the Example of Orenburg). *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 670(1), 012030.
<https://doi.org/10.1088/1755-1315/670/1/012030>
- Franco, M. J., da Silva Caetano, I. C., Caetano, J., & Dragunski, D. C. (2011). Determinação de metais em plantas medicinais comercializadas na região de Umuarama-PR. *Arquivos de Ciências Da Saúde Da UNIPAR*, 15(2).
- Gecheva, G., Stankova, S., Varbanova, E., Kaynarova, L., Georgieva, D., & Stefanova,

- V. (2023). Macrophyte-Based Assessment of Upland Rivers: Bioindicators and Biomonitoring. *Plants* 2023, Vol. 12, Page 1366, 12(6), 1366.
<https://doi.org/10.3390/PLANTS12061366>
- Grose, A. V. (2017). Avifauna na Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, Joinville, Santa Catarina. *Acta Biológica Catarinense*, 4(3), 106–125.
<https://doi.org/10.21726/ABC.V4I3.396>
- Gundacker, C., Forsthuber, M., Szigeti, T., Kakucs, R., Mustieles, V., Fernandez, M. F., Bengtsen, E., Vogel, U., Hougaard, K. S., & Saber, A. T. (2021). Lead (Pb) and neurodevelopment: A review on exposure and biomarkers of effect (BDNF, HDL) and susceptibility. *International Journal of Hygiene and Environmental Health*, 238.
<https://doi.org/10.1016/J.IJHEH.2021.113855>
- HAFSI, A., Bourefis, A., Kessasra, F., & Boushaba, A. (2024). Environmental assessment of pollution in an industrial environment using heavy metal pollution indices and stable isotopes, case study of the industrial zone of skikda, north-east algeria. *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences*, 19(1), 33–50.
<https://doi.org/10.26471/CJEES/2024/019/278>
- Hao, W., Hao, C., Wu, C., Xu, Y., & Jin, C. (2022). Aluminum induced intestinal dysfunction via mechanical, immune, chemical and biological barriers. *Chemosphere*, 288, 132556.
<https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2021.132556>
- Hasan, M. F., Nur-E-alam, M., Salam, M. A., Rahman, H., Paul, S. C., Rak, A. E., Ambade, B., & Towfiqul Islam, A. R. M. (2021). Health Risk and Water Quality Assessment of Surface Water in an Urban River of Bangladesh. *Sustainability*, 13(12).
<https://doi.org/10.3390/SU13126832>
- Hussain, S., Khan, M., Sheikh, T. M. M., Mumtaz, M. Z., Chohan, T. A., Shamim, S., & Liu, Y. (2022). Zinc Essentiality, Toxicity, and Its Bacterial Bioremediation: A Comprehensive Insight. *Frontiers in Microbiology*, 13.
<https://doi.org/10.3389/FMICB.2022.900740/PDF>
- Jasper Comitt, E. (2017). Herpetofauna da bacia do Rio Cachoeira, município de Joinville, Santa Catarina, Sul do Brasil. *Acta Biológica Catarinense*, 4(3), 90–105.
<https://doi.org/10.21726/ABC.V4I3.395>
- Júnior, J. C. F. de M., Amorim, M. W., Arriol, I. A., Canuto, K. K., & Pereira, L. G. da S. (2017). Flora vascular, estrutura comunitária e conservação de fragmentos da oresta atlântica na Bacia Hidrográ-ca do Rio Cachoeira, Joinville, SC, Brasil. *Acta Biológica Catarinense*, 4(3), 41–72.
<https://doi.org/10.21726/ABC.V4I3.393>
- Junqueira, S. T., & Prates, R. C. (2023). Environmental conservation and psychoanalytic defense mechanisms. The case of the Cachoeira River Watershed, Joinville–SC–Brazil. *Fórum Ambiental Da Alta Paulista*, 19(3).
- Kabata-Pendias, A. (2001). Trace elements in soils and plants/authors, Alina Kabata-Pendias, Henryk Pendias. p. cm. In URL: <http://base.dnsgb.com.ua/files/book/Agriculture/Soil/Trace-Elements-in-Soilsand-Plants.pdf> (data zvernennya: 23.12. 2021) (3rd ed.).
- Kaur, H., & Garg, N. (2021). Zinc toxicity in plants: a review. *Planta*, 253(6).
<https://doi.org/10.1007/S00425-021-03642-Z>
- Kim, Y.-J., Kim, Y.-H., Adikari, A. A. D. I., Yi, Y.-J., & Lee, S.-M. (2021). Effects of aluminum on the behavior and regeneration of planarian. *Journal of Biomedical and Translational Research*, 22(2), 92–99.
<https://doi.org/10.12729/JBTR.2021.22.2.92>
- Krayem, M., Khatib, S. El, Hassan, Y., Deluchat, V., & Labrousse, P. (2021). In search for potential biomarkers of copper stress in aquatic plants. *Aquatic Toxicology (Amsterdam, Netherlands)*, 239.
<https://doi.org/10.1016/J.AQUATOX.2021.105952>
- Lee, H. W., Jose, C. C., & Cuddapah, S. (2021). Epithelial-mesenchymal transition: Insights into nickel-induced lung diseases. *Seminars in Cancer Biology*, 76, 99–109.
<https://doi.org/10.1016/J.SEMCANCER.2021.05.020>
- Liu, J., Cheng, F., Zhu, Y., Zhang, Q., Song, Q., & Cui, X. (2022). Urban Land-Use Type Influences Summertime Water Quality in Small- and Medium-Sized Urban Rivers: A Case Study in Shanghai, China. *Land*, 11(4).
<https://doi.org/10.3390/LAND11040511>
- Luengluetham, P., Chotikarn, P., Nopparat, J., & Buapet, P. (2023). Ecotoxicological assessment of copper and zinc in a common aquatic plant *Ceratophyllum demersum*: Physiological effects and biomarker responses. *Aquatic Botany*, 188, 103678.

- <https://doi.org/10.1016/J.AQUABOT.2023.103678>
- Mamun, M., & An, K. G. (2021). Application of multivariate statistical techniques and water quality index for the assessment of water quality and apportionment of pollution sources in the yeongsan river, south korea. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 18(16), 8268. <https://doi.org/10.3390/IJERPH18168268/S1>
- Marques, A. M., Provance, D. W., Kaplan, M. A. C., & Figueiredo, M. R. (2017). Echinodorus grandiflorus: Ethnobotanical, phytochemical and pharmacological overview of a medicinal plant used in Brazil. *Food and Chemical Toxicology*, 109, 1032–1047. <https://doi.org/10.1016/J.FCT.2017.03.026>
- Meera, A. V., KC, M. T., John, J., Sudha, B., Sajeena, A., Meera, A. V., KC, M. T., John, J., Sudha, B., & Sajeena, A. (2021). Aquatic Plants as Bioremediators in Pollution Abatement of Heavy Metals. *Biodegradation Technology of Organic and Inorganic Pollutants*. <https://doi.org/10.5772/INTECHOPEN.99627>
- Mello Júnior, J. C. F. de. (2020). *Macrófitas aquáticas como Bioindicadores da qualidade de água fluviais. Qualidade ambiental e conservação da biodiversidade: estudos de casos brasileiros*. Editora Univille.
- Moreno-Rubio, N., Ortega-Villamizar, D., Marimon-Bolívar, W., Bustillo-Lecompte, C., & Tejeda-Benítez, L. P. (2023). Potential of Lemna minor and Eichhornia crassipes for the phytoremediation of water contaminated with Nickel (II). *Environmental Monitoring and Assessment*, 195(1), 1–16. <https://doi.org/10.1007/S10661-022-10688-3/METRICS>
- Mulgrew, A., & Williams, P. (2000). *Biomonitoring of air quality using plants*.
- Nawaz, M. F., Rashid, M. H. U., Arif, M. Z., Sabir, M. A., Farooq, T. H., Gul, S., & Gautam, N. P. (2021). Ecophysiological response of Eucalyptus camaldulensis to dust and lead pollution. *New Zealand Journal of Forestry Science*, 51. <https://doi.org/10.33494/NZJFS512021X145X>
- Nomani, L., Zehra, A., Choudhary, S., Wani, K. I., Naeem, M., Siddiqui, M. H., Khan, M. M. A., & Aftab, T. (2022). Exogenous Hydrogen Sulfide Alleviate Copper Stress Impacts in Artemisia annua L.: Growth, Antioxidant Metabolism, Glandular Trichomes Development and Artemisinin Biosynthesis. *Plant Biology*, 24(4), 642–651. <https://doi.org/10.1111/PLB.13242>
- Nour, H. E. S. (2020). Distribution and accumulation ability of heavy metals in bivalve shells and associated sediment from Red Sea coast, Egypt. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(6). <https://doi.org/10.1007/S10661-020-08285-3>
- Ofoe, R., Thomas, R. H., Asiedu, S. K., Wang-Pruski, G., Fofana, B., & Abbey, Lord. (2022). Aluminum in plant: Benefits, toxicity and tolerance mechanisms. *Frontiers in Plant Science*, 13. <https://doi.org/10.3389/FPLS.2022.1085998>
- Olufemi, A. C., Mji, A., & Mukhola, M. S. (2022). Potential Health Risks of Lead Exposure from Early Life through Later Life: Implications for Public Health Education. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(23). <https://doi.org/10.3390/IJERPH192316006>
- Pasichna, O. O., Gorbatiuk, L. O., Platonov, M. O., Burmistrenko, S. P., & Godlevska, O. O. (2023). Biomonitoring of Heavy Metals Pollution in Lakes of Kyiv (Ukraine) Using Submerged Macrophytes and Assessment of Their Phytoremediative Potential. *Hydrobiological Journal*, 59(5), 80–92. <https://doi.org/10.1615/HYDROBJ.V59.I5.50>
- Pinheiro, P., Dalcin, R., & Batista, T. (2017). A ictiofauna de áreas com interesse para a proteção ambiental de Joinville, Santa Catarina, Brasil. *Acta Biológica Catarinense*, 4. <https://doi.org/10.21726/abc.v4i3.455>
- Rai, S., Singh, P. K., Mankotia, S., Swain, J., & Satbhai, S. B. (2021). Iron homeostasis in plants and its crosstalk with copper, zinc, and manganese. *Plant Stress*, 1. <https://doi.org/10.1016/J.STRESS.2021.100008>
- Reginato, B. C., Silveira, V. F., Schaidhauer, A. C. G., Madeira, A. D. R., de Oliveira, A. A. D., Bernardi, F. F., Borgmann, G., Ferreira, H. C., Plautz, K., de Britto, K. L. B., Nunes, L. V., Schroeder, M. W., Horner, M. B. W., Botelho, N. G. N. T., Korn, R., Sierth, R., Josino, T. F., Stangarlin, T. S., Grawe, V. H., ... de Mello Junior, J. C. F. (2023). Análise de Metais Pesados pelo Método de Biomonitoramento no Rio Cachoeira, Região Nordeste de Santa Catarina. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 16(1), 310–

324.
<https://doi.org/10.26848/RBGF.V16.1.P310-324>
- Rial-Berriel, C., Acosta-Dacal, A., Zumbado, M., & Luzardo, O. P. (2020). Micro QuEChERS-based method for the simultaneous biomonitoring in whole blood of 360 toxicologically relevant pollutants for wildlife. *The Science of the Total Environment*, 736.
<https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2020.139444>
- Ribeiro, E. S., Pereira, M. P., de Castro, E. M., Baroni, G. de R., Corrêa, F. F., & Pereira, F. J. (2015). Relações da anatomia radicular na absorção, no acúmulo e na tolerância ao chumbo em *Echinodorus grandiflorus*. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 19(6), 605–612. <https://doi.org/10.1590/1807-1929/AGRIAMBI.V19N6P605-612>
- Rocha, M. P., da Silva, L. M. C., Silva, L. P. M., Gomes, J. H. de S., Pádua, R. M. de, Batista, J. A. N., Sena, M. M., Campana, P. R. V., & Braga, F. C. (2023). Quantitative Chemical Composition, Anti-Oxidant Activity, and Inhibition of TNF Release by THP-1 Cells Induced by Extracts of *Echinodorus macrophyllus* and *Echinodorus grandiflorus*. *Antioxidants*, 12(7), 1365.
<https://doi.org/10.3390/ANTIOX12071365/S1>
- Samarghandian, S., Shirazi, F. M., Saeedi, F., Roshanravan, B., Pourbagher-Shahri, A. M., Khorasani, E. Y., Farkhondeh, T., Aaseth, J. O., Abdollahi, M., & Mehrpour, O. (2021). A systematic review of clinical and laboratory findings of lead poisoning: lessons from case reports. *Toxicology and Applied Pharmacology*, 429.
<https://doi.org/10.1016/J.TAAP.2021.115681>
- Scofield, B. D., Fields, S. F., & Chess, D. W. (2023). Aquatic macrophytes show distinct spatial trends in contaminant metal and nutrient concentrations in Coeur d'Alene Lake, USA. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(25), 66610–66624.
<https://doi.org/10.1007/s11356-023-27211-x>
- SEDUP. (2019). *Joinville Cidade em Dados 2019*. <https://www.joinville.sc.gov.br/wp-content/uploads/2019/08/Joinville-Cidade-em-Dados-2019-Ambiente-Natural.pdf>
- Senze, M., Kowalska-Górska, M., & Czyż, K. (2022). Aluminum Bioaccumulation in Reed Canary Grass (*Phalaris arundinacea* L.) from Rivers in Southwestern Poland. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5).
<https://doi.org/10.3390/IJERPH19052930>
- Sharma, P., & Dubey, R. S. (2005). Lead toxicity in plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, 17, 35–52.
- Sharma, P., & Kumar, S. (2021). Bioremediation of heavy metals from industrial effluents by endophytes and their metabolic activity: Recent advances. *Bioresource Technology*, 339, 125589.
<https://doi.org/10.1016/J.BIORTECH.2021.125589>
- Sharma, P., Sirohi, R., Tong, Y. W., Kim, S. H., & Pandey, A. (2021). Metal and metal(oids) removal efficiency using genetically engineered microbes: Applications and challenges. *Journal of Hazardous Materials*, 416, 125855.
<https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2021.125855>
- Silva, K. C. M. da, & Ferreira, A. M. da C. (2021). Desenvolvimento de produtos para aplicação foliar de micronutrientes em plantas. 9º *Workshop Do Mestrado Profissional Instituto de Química Universidade de São Paulo*, 80–85.
<https://doi.org/10.5151/9786555501407-07>
- Sinicropi, M. S., Amantea, D., Caruso, A., & Saturnino, C. (2010). Chemical and biological properties of toxic metals and use of chelating agents for the pharmacological treatment of metal poisoning. *Archives of Toxicology*, 84(7), 501–520.
<https://doi.org/10.1007/S00204-010-0544-6/METRICS>
- Sousa, B. J. de. (2023). *Chumbo em vegetais folhosos provenientes de sistemas de produção orgânicos e convencionais: revisão sistemática e metanálise*. <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/55258>
- Souza-Monteiro, D., Guerra, M. C. D. S., Bittencourt, L. O., Aragão, W. A. B., Dionizio, A., Silveira, F. M., Buzalaf, M. A. R., Martins, M. D., Crespo-Lopez, M. E., & Lima, R. R. (2022). Salivary Glands after Prolonged Aluminum Exposure: Proteomic Approach Underlying Biochemical and Morphological Impairments in Rats. *International Journal of Molecular Sciences*, 23(4), 2251.
<https://doi.org/10.3390/IJMS23042251/S1>
- Strokal, M., Bai, Z., Franssen, W., Hofstra, N., Koelmans, A. A., Ludwig, F., Ma, L., van Puijenbroek, P., Spanier, J. E., Vermeulen, L. C., van Vliet, M. T. H., van Wijnen, J., & Kroeze, C. (2021). Urbanization: an

- increasing source of multiple pollutants to rivers in the 21st century. *Npj Urban Sustainability* 2021 1:1, 1(1), 1–13.
<https://doi.org/10.1038/s42949-021-00026-w>
- Ugurlar, F., & Kaya, C. (2023). Synergistic mitigation of nickel toxicity in pepper (*Capsicum annuum*) by nitric oxide and thiourea via regulation of nitrogen metabolism and subcellular nickel distribution. *Functional Plant Biology : FPB*, 50(12), 1099–1116.
<https://doi.org/10.1071/FP23122>
- Wang, J., Moeen-ud-din, M., & Yang, S. (2021). Dose-dependent responses of *Arabidopsis thaliana* to zinc are mediated by auxin homeostasis and transport. *Environmental and Experimental Botany*, 189, 104554.
<https://doi.org/10.1016/J.ENVEXPBOT.2021.104554>
- Yang, J., & Ma, Z. (2021). Research progress on the effects of nickel on hormone secretion in the endocrine axis and on target organs. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 213.
<https://doi.org/10.1016/J.ECOENV.2021.112034>
- Yuan, P., Wu, X., Xia, Y., Peng, C., Tong, H., Liu, J., Jiang, L., & Wang, X. (2020). Spatial and seasonal variations and risk assessment for heavy metals in surface sediments of the largest river-embedded reservoir in China. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(28), 35556–35566.
<https://doi.org/10.1007/S11356-020-09868-W>
- Zhang, T., He, F., Lin, S., Wang, X., Li, F., Zhai, Y., Gu, X., Wu, M., & Lin, J. (2021). Does aluminum exposure affect cognitive function? a comparative cross-sectional study. *PLOS ONE*, 16(2), e0246560.
<https://doi.org/10.1371/JOURNAL.PONE.0246560>
- Zschornack, T., & Oliveira, T. (2018). Avaliação do impacto da implantação do sistema de esgotamento sanitário na qualidade da água da Bacia Hidrográfica do Rio Cachoeira, em Joinville, Santa Catarina. *Revista DAE*, 66, 118–131.
<https://doi.org/10.4322/dae.2018.027>