



Uso de espécies da arborização urbana com potencial bioindicadoras de poluentes metálicos

Rick Herick Lima Alves¹, Iselino Nogueira Jardim², Márcia Orie de Sousa Hamada^{3*}

¹Graduado em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Pará, Brasil.

²Doutor em Plantas Medicinais, Universidade Federal do Pará, Brasil.

³Doutora em Ciências Florestais, Universidade Federal do Pará, Brasil. (*Autor correspondente: marciahamada@ufpa.br)

Histórico do Artigo: Submetido em: 13/11/2024 – Revisado em: 22/12/2024 – Aceito em: 03/01/2025

RESUMO

As plantas bioindicadoras incluem musgos, líquens e algumas espécies de árvores, e são altamente sensíveis a poluentes ambientais. Isso faz delas ferramentas valiosas para monitorar a qualidade do ar em áreas urbanas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o uso das árvores urbanas como potencial bioindicadoras de poluição urbana, e assim contribuir com monitoramento de contaminação ambiental. Neste estudo, foram avaliadas as folhas de 30 indivíduos pertencentes às espécies *Mangifera indica* L., *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S. Grose e *Cenostigma tocantinum* Ducke presentes na arborização urbana de duas áreas da cidade de Altamira, Pará. As espécies foram selecionadas após levantamento in loco. As amostras foram secas, trituradas, pesadas e submetidas a digestão ácida e analisadas através da técnica de Espectrometria de Absorção Atômica em chama para a determinação dos metais cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr) e zinco (Zn). Utilizando dados de concentrações individuais de cada espécie, foram gerados mapas de distribuição espacial dos metais possibilitando a comparação das áreas estudadas. Foram encontradas concentrações acima do limite de detecção apenas para os metais Cr, Cu e Zn, enquanto Cd e Pb não foram detectadas concentrações equivalentes. Os resultados demonstraram maior suscetibilidade para as espécies *C. tocantinum* e *H. serratifolius* na bioacumulação de Cr e Cu, e para o metal Zn a espécie *H. serratifolius*. Enquanto a espécie *M. indica*, apresentou resultados estatisticamente menores. Deste modo, através do método de biomonitoramento passivo, foi possível identificar as espécies mais suscetíveis e ressalta a importância de se considerar espécies bioacumuladoras nos planejamentos da arborização urbana.

Palavras-Chaves: Poluentes atmosféricos, Espécies bioindicadoras, Biomonitoramento, Qualidade do ar, Poluição ambiental.

Use of urban tree species with potential bioindicators of metallic pollutants

ABSTRACT

Bioindicator plants include mosses, lichens, and are some tree species, which are highly sensitive to environmental pollutants. This makes them valuable tools for monitoring air quality in urban areas. This work aimed to evaluate the use of urban trees as potential bioindicators of urban pollution and thus contributes to the monitoring of environmental contamination. In this study, the leaves of 30 individuals belonging to the species *Mangifera indica* L., *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S. Grose and *Cenostigma tocantinum* Ducke present in the urban forestry of two areas of the city of Altamira, Pará, were evaluated. The species were selected after an on-site survey. The samples were dried, crushed, weighed and subjected to acid digestion and analyzed using the Flame Atomic Absorption Spectrometry technique to determine the metals cadmium (Cd), lead (Pb), copper (Cu), chromium (Cr) and zinc (Zn). Using data on individual concentrations of each species, maps of the spatial distribution of metals were generated, enabling comparison of the areas studied. Concentrations above the detection limit were found only for the metals Cr, Cu and Zn, while no equivalent concentrations were detected for Cd and Pb. The results demonstrated greater susceptibility for the species *C. tocantinum* and *H. serratifolius* in the bioaccumulation of Cr and Cu, and for the metal Zn the species *H. serratifolius*. While the species, *M. indica*, presented statistically lower results. Thus, through the passive biomonitoring method, it was possible to identify the most susceptible species and highlights the importance of considering bioaccumulating species in urban afforestation planning.

Keywords: Atmospheric pollutants, Bioindicator species, Biomonitoring, Air quality, Environmental pollution.

Alves, R. H. L., Jardim, I. N., Hamada, M. O. S. (2025). Uso de espécies da arborização urbana com potencial bioindicadoras de poluentes metálicos. *Meio Ambiente (Brasil)*, v.7, n.1, p.67-80.



1. Introdução

O crescimento populacional, a expansão urbana e aumento das atividades industriais e os sistemas de tráfego tem contribuído para a degradação da qualidade do ar em todo o mundo (Tovar-Sánchez et al., 2019). O tráfego de veículos é uma fonte significativa de poluição em ambientes urbanos e as atividades de tráfego geram partículas, aerossóis e metais tóxicos no ambiente urbano (Solgi et al., 2020). Além disso, os metais tóxicos provenientes de fontes urbanas são emitidos principalmente através de emissões atmosféricas e tendem a ligar-se a partículas finas e poeiras, até serem eventualmente depositados no solo e na vegetação, especialmente nas árvores (Ugolini et al., 2013).

Os principais metais pesados emitidos pelos veículos incluem cromo, cobre, ferro, chumbo e zinco (Janta & Chantara, 2017). Segundo esses autores os poluentes são produzidos a partir da combustão de combustível e de óleo lubrificante, do desgaste de pneus e das lonas de freio. O aumento desses poluentes na atmosfera resulta em enormes impactos de deterioração no ecossistema urbano e na saúde humana. Um levantamento recente realizado pela Organização Mundial da Saúde (OMS, 2024) concluiu que 99% da população mundial vivem em lugares com níveis de poluição do ar acima dos limites das diretrizes estabelecidos pela OMS.

O monitoramento dos níveis de poluição atmosférica em áreas urbanas é bastante complexo, sendo geralmente realizado de formas diferentes dependendo da região (Deecken et al., 2022). A poluição atmosférica causada por metais pesados tem sido importante e novos métodos de observação da deposição têm sido constantemente procurados (Jardim et al., 2021). Um método que tem registrado um grande progresso desde a sua implantação a décadas atrás é o biomonitoramento. Este método consiste em um conjunto de técnicas que se utilizam de organismos vivos para apontar e monitorar possíveis alterações ambientais oriundas de fontes poluidoras (Cardoso et al., 2017). Segundo Souza et al. (2018) as respostas biológicas podem ser consideradas mais representativas do que dados fornecidos pelos sensores químicos ou físicos.

As plantas superiores surgiram nos últimos anos como uma ferramenta valiosa que permite a identificação da poluição ambiental. O uso de plantas fornece informações não apenas sobre as concentrações de poluentes atmosféricos, mas também sobre seus efeitos adversos nos sistemas vivos (Solgi et al., 2020). Nos últimos anos, as árvores têm sido utilizadas no biomonitoramento da poluição metálica em ambientes urbanos, fato verificado em vários trabalhos de pesquisa (Solgi et al., 2020; Jeddi et al., 2021; Mulenga et al., 2023; Liu et al., 2022; Fang et al., 2021; Isinkaralar et al., 2022; Savas et al., 2021; Cesur et al., 2022). Todavia, essa capacidade de absorver e acumular elementos potencialmente tóxicos depende de muitos fatores, incluindo espécies de plantas (Mulenga et al., 2023).

Recentemente, como meio de obter mais informações com precisão e resolução espacial das áreas estudadas, outras ferramentas estão sendo incorporadas de forma secundária. Com as ferramentas geoestatísticas é possível determinar a distribuição espacial dos elementos no ambiente, através dos dados obtidos com a aplicação das técnicas de biomonitoramento (Moreira, 2015; Grego, Oliveira & Vieira, 2014). Nesse sentido, torna-se especialmente importante durante o planejamento da arborização urbana, o conhecimento de árvores exóticas e nativas capazes de absorver e acumular metais pesados e, assim, limitar a dispersão de elementos potencialmente tóxicos no ambiente.

Este trabalho tem como objetivo avaliar o uso das árvores urbanas como potencial bioindicadores de poluição urbana, e assim contribuir com monitoramento de contaminação ambiental. Com isso espera-se que os resultados deste estudo forneçam informações preliminares sobre o impacto desses elementos pesados no ecossistema e possam formar bases de dados para futuras avaliações de impacto sobre a poluição por metais pesados.

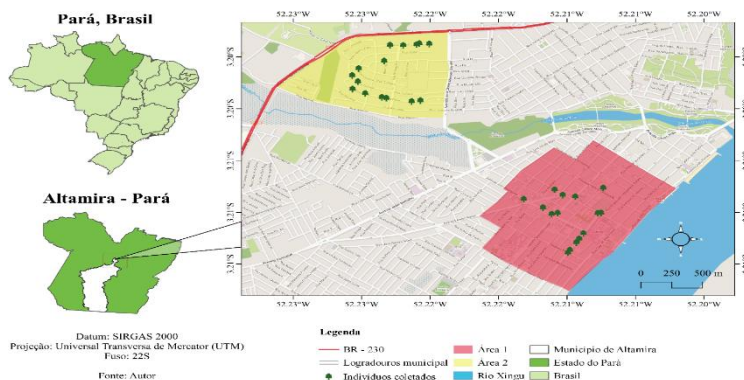
2. Material e Métodos

2.1 Área de estudo

O estudo foi realizado na cidade de Altamira – PA (Figura 1), que está localizado a oeste do Estado, à margem esquerda do Rio Xingu e apresenta as coordenadas geográficas 03°12'00" S e 52°13'45".

Figura 1 – Mapa de localização da área do estudo.

Figure 1 – Location map of the study area.



Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

O clima de Altamira, segundo Köppen, é do tipo Equatorial Am e Aw, com temperatura média de 26 °C, e precipitação pluviométrica anual média de 1.700 mm e com umidade relativa do ar a 80% (Alvares et al., 2013).

O município de Altamira possui uma área de 159.533,306 km² de extensão, com uma população estimada para 2024 de 136.982 habitantes, apresentando uma densidade demográfica de 0,79 habitantes/km² (IBGE, 2022). A frota na cidade para o ano de 2022 somou um total de 69.323 veículos, sendo está a 8º maior frota de veículos do Estado do Pará (IBGE, 2022).

Na Figura 1 está apresentado os dois locais onde foram realizadas as coletas das amostras. A área 1 – zona urbana central (bairros Centro e Esplanada do Xingu), devido apresentar tráfego de veículos e com atividades comerciais intensas. A área 2 – zona urbana periférica da cidade (bairro São Joaquim), em virtude do baixo fluxo de veículos e atividades comerciais. A distância entre essas duas áreas de estudo é de cerca de 1 Km.

2.2 Amostragem e Coleta de Dados

Para a seleção das espécies arbóreas, foram baseadas no diagnóstico in loco, identificando as mais representativas e de ocorrência nas duas áreas. Desta forma, as espécies selecionadas e georreferenciadas foram: *M. indica* (Anacardiaceae), *H. serratifolius* (Bignoniaceae) e *C. tocanthum* (Fabaceae).

Foram coletadas folhas de 30 indivíduos, sendo 15 na área 1 e 15 na área 2, com cinco indivíduos de cada espécie em cada área. As folhas foram coletadas na parte exterior da copa com o auxílio de um podão, entre 2,0 e 3,0 metros de altura. De cada indivíduo, foram coletados três ramos, cada ramo pertencente a um

lado diferente da copa e perpendiculares às vias de tráfego, formando um ângulo de 180°. Em seguida, as amostras foram homogeneizadas e retirada uma amostra composta por indivíduo. As coletas foram realizadas nos meses de outubro e novembro de 2023, em diferentes dias, abrangendo a estação verão. O período de amostragem ocorreu entre 6:00 e 17:00 horas, a fim de abranger os horários de maior tráfego veicular. A maior parte das coletas ocorreram em dias de sol intenso, com temperaturas variando entre 24 e 36 °C.

Após a coleta, as folhas foram acondicionadas em sacos de papel Kraft, etiquetados e levados para o laboratório de Morfo-Anatomia Vegetal da Universidade Federal do Pará, campus Altamira.

2.3 Preparo das Amostras

Em laboratório, as amostras foram secas em estufa com circulação de ar forçada a 70 °C, até atingirem peso constante. Após a secagem, as folhas foram trituradas em moinho de facas. Em seguida, cinco gramas (5 g) de cada amostra foram pesados em balança digital de precisão, embaladas, etiquetadas e enviadas ao Laboratório de Análises Químicas do Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, Pará.

2.4 Digestão das Amostras

Neste processo, inicialmente as amostras foram submetidas a uma digestão ácida, em forno micro-ondas modelo ETHOS™ EASY da marca Milestone, de acordo com a metodologia descrita no Manual de Análises Químicas de Solos, Plantas e Fertilizantes (EMBRAPA, 2009).

2.5 Procedimento Analítico

Para a determinação dos metais (Cr, Zn, Cd, Pb e Cu) utilizou-se de um espectrômetro de absorção atômica de chama (marca Thermo, modelo ICE3000). Foi utilizada a chama de ar/acetileno para análise de Cu^{+2} , Zn^{+2} , Cd^{+2} , Pb^{+2} e Cr^{+2} . Os parâmetros instrumentais estabelecidos para a determinação destes metais estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Parâmetros instrumentais usados na determinação de Cr, Zn, Cd, Pb e Cu.

Table 1 – Instrumental parameters used in the determination of Cr, Zn, Cd, Pb and Cu.

Elemento	Comprimento de onda (nm)	Corrente da lâmpada (%)	Resolução espectral (nm)
Cromo	357,9	100	0,5
Zinco	213,9	75	0,2
Cádmio	228,8	50	0,5
Chumbo	217,0	75	0,5
Cobre	324,8	75	0,5

Fonte: Museu Paraense Emílio Goeldi, Laboratório de Absorção Atômica (2023).

Source: Emílio Goeldi Museum of Pará, Atomic Absorption Laboratory (2023).

2.6 Análise Estatística

Inicialmente foi verificado se os dados obedeciam a distribuição normal através do teste de Shapiro-Wilk. Posteriormente, a análise de variância (ANOVA) foi usada para comparar a diferença significativa na concentração média de metais pesados entre os locais de amostragem e entre as espécies, usando teste Tukey ($p < 0,05$). A análise dos dados foi realizada com o software estatístico SISVAR (Ferreira, 2011).

2.7 Análise Espacial

Para a análise espacial, os dados de concentrações de Cr, Cu e Zn obtidas das folhas de cada indivíduo das espécies *C. tocanthum*, *H. serratifolius* e *M. indica* foram inseridas no programa livre QGIS.org. (versão 3.28.6) e interpoladas por meio da técnica geoestatística de Ponderação pelo Inverso da Distância (IDW). Deste modo, baseado nos pontos amostrados foram gerados os mapas de distribuição espacial de concentrações dos metais.

3. Resultados e Discussão

Dentre os metais analisados, Cr, Zn e Cu apresentaram concentrações acima do limite de detecção para as espécies e áreas de coleta, porquanto, Cd e Pb não foram detectadas concentrações equivalentes. Tal fato pode ser evidenciado pelas principais fontes de emissões destes metais. Apesar de o Cd e o Pb serem emitidos pelas frotas veiculares como afirma Martins (2009) e Cardoso et al. (2017), suas detecções são mais acentuadas em áreas de industriais siderúrgicas e metalúrgicas (Silva et al., 2016; Sawidis et al., 2011). Deste modo, inferindo-se que as concentrações abaixo do limite de detecção podem ser influenciadas pela baixa disponibilidade destes metais na área estudada.

Na Tabela 2, são apresentados os quadrados médios e níveis de significância pelo teste F para os elementos analisados. Os dados indicam que houve efeito significativo do fator espécie (E) sobre a concentração dos elementos Cr, Zn e Cu. Já o fator local (L) e a interação E x L influenciou significativamente a concentração dos elementos Cr e Cu, contudo não teve efeito significativo na concentração do Zn. No presente estudo o coeficiente de variação (CV) para o Zn e Cu pode ser considerado normal de acordo com Pimentel-Gomes (2009). Contudo, para o elemento Cromo, o CV é considerado alto, porém, trata-se de medidas realizadas em diferentes sítios de coletas.

Tabela 2 – Resumo da análise de variância (Quadrado médio) obtidas de análises foliares das espécies *C. tocanthum*, *M. indica* e *H. serratifolius*.

Table 2 – Summary of analysis of variance (mean square) obtained from leaf analyses of the species *C. tocanthum*, *M. indica* and *H. serratifolius*.

FV	GL	Quadrado médio		
		Cr	Zn	Cu
E	2	2,634**	205,5**	5,859*
L	1	2,134*	3,699 ^{ns}	43,26**
ExL	2	2,313**	1,328 ^{ns}	6.863*
Residuo	24	0,343	9,4277	1,560
CV (%)		48,33	19,46	18,96
MG		1,212	15,77	6,588

FV: fator de variação; MG: média geral; GL: graus de liberdade; * (p<0,05) e ** (p<0,01); ns (não significativo).

VF: variation factor; GM: general mean; DF: degrees of freedom; * (p<0.05) and ** (p<0.01); ns (not significant)

Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

Para a concentração do Cr, houve interação significativa entre os fatores espécie e local, mostrando que há dependência entre os fatores. Realizou-se o teste F para cada fator e verificou-se que houve efeito significativo (p<0,01) para os dois fatores em estudo, o que indica diferença entre os níveis de cada fator (Tabela 3). Na análise individual do fator local, a área 1 apresentou média de concentração de cromo estatisticamente superior à área 2.

Tabela 3 – Desdobramento, através do teste de Tukey, da interação entre os fatores local (Fator A) e espécie (Fator B), para a concentração de cromo (variável) em mg.kg⁻¹.

Table 3 – Unfolding, through the Tukey test, of the interaction between the local factors (Factor A) and species (Factor B), for the chromium concentration (variable) in mg.kg⁻¹.

Espécies	Local		F (B dentro de A)
	Área 1	Área 2	
<i>Cenostigma tocantinum</i>	2,328 aA	0,727 abB	1,527 a
<i>Handroanthus serratifolius</i>	1,357 bA	1,622 aA	1,489 a
<i>Mangifera indica</i>	0,753 bA	0,488 bA	0,620 b
F (A dentro de B)	1,479 a	0,946 b	

Médias seguidas por letras maiúsculas (minúsculas) distintas na mesma linha (coluna) diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Means followed by distinct uppercase (lowercase) letters in the same row (column) differ from each other by the Tukey test ($p < 0,05$).

Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

O fato da área 1 apresentar maior concentração de cromo (1,479 mg.kg⁻¹) pode estar relacionado ao intenso fluxo de veículos, o que ocasiona uso frequente dos sistemas veiculares, gerando desgastes de peças, freios e pneus que são fontes de emissões de Cr por veículos urbanos (Moreira, 2015).

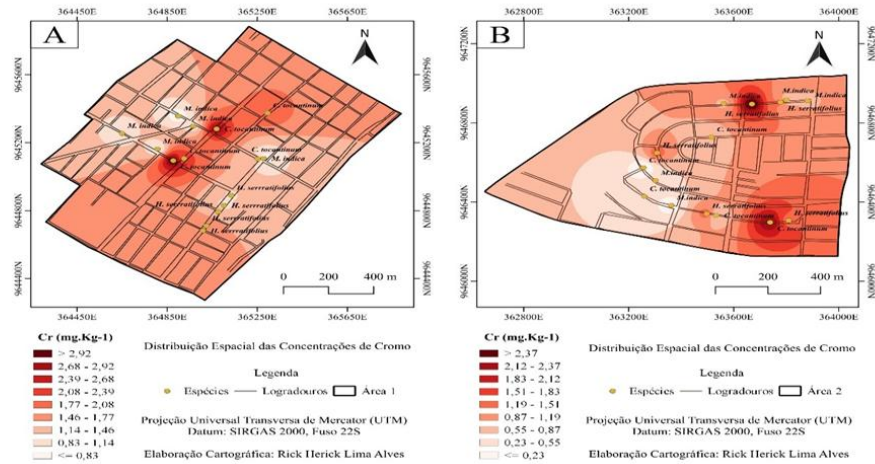
Quanto aos níveis do fator espécie, a espécie *M. indica*, demonstrou baixa capacidade de bioacumulação do cromo pela espécie nas áreas amostrais. Por outro lado, as espécies *C. tocantinum* (1,527 mg.kg⁻¹) e *H. serratifolius* (1,489 mg.kg⁻¹) apresentaram a maior concentração de Cr registrada nas folhas, o que sugere a maior capacidade de absorver e acumular Cr.

O desdobramento da interação entre os fatores, para o cromo, é apresentado na Tabela 3. Pelos valores de F (A dentro de B), pode-se observar que existe diferença significativa entre as concentrações de Cr, tanto na área 1 quanto na área 2. A espécie que apresentou a maior concentração de Cr, na área 1, foi a *C. tocantinum*, com 2,328 mg.kg⁻¹. Na área 2, verificaram-se os melhores resultados com *H. serratifolius* (1,622 mg.kg⁻¹), ainda que, neste caso, não tenham diferido estatisticamente de *C. tocantinum* (0,727 mg.kg⁻¹). Já a concentração de Cr bioacumulado pela espécie *M. indica* não se diferiu significativamente entre as áreas de amostragem. Na literatura, são encontrados relatos sugerindo a grande capacidade fitorremediadora de algum tipo de metal, dentre eles o Cr, por espécies da família Fabaceae (Pandey et al., 2022; Jach et al., 2022). Semelhantemente, Sasso (2020) demonstrou a capacidade bioindicadora de altas doses de cromo por duas espécies do gênero *Handroanthus*.

Os mapas de distribuição espacial de concentrações dos metais gerados pela técnica de IDW são apresentados nas Figuras 2 a 4. A partir do gradiente de concentrações (mg.kg⁻¹) dos elementos, as cores menos intensas indicam os locais e espécies com menor concentração, enquanto as áreas de cores mais intensas indicam os locais e espécies com maior concentração.

Através do mapa de distribuição espacial das concentrações individuais do Cr, verificou-se que os maiores valores para as concentrações foram observados na área 1, onde as concentrações individuais de Cr, variaram com valor mínimo de 0,83 mg.kg⁻¹ e máximo de 2,92 mg.kg⁻¹ (Figura 2A), enquanto na área 2 variaram com valor mínimo de 0,23 mg.kg⁻¹ e máximo de 2,37 mg.kg⁻¹ (Figura 2B).

Figura 2 – Mapa conceitual da distribuição espacial da concentração de Cr nas espécies avaliadas.
Figure 2 – Conceptual map of the spatial distribution of Cr concentration in the species evaluated.



Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

De um modo geral, a concentração de Cr nas folhas variou de 0,488 a 2,328 mg/kg. A faixa normal de Cr nos tecidos vegetais é de 0,1 a 0,5 mg/kg, enquanto sua faixa de concentração tóxica é de 5 a 30 mg/kg (Kabata-Pendias, 2000). Notavelmente, os resultados do presente estudo demonstram que a concentração de Cr nas folhas não está na faixa tóxica para plantas, o que é uma descoberta importante. Contudo, o aumento da frota de veículos, levará o aumento da poluição de plantas por Cr, uma vez que a emissão desse metal é realizada pelo escapamento de automóveis e atrito de pneus (Adamiec et al., 2016).

Para a concentração do Cu, houve interação significativa entre os fatores espécie e local, mostrando que há dependência entre os fatores. Realizou-se o teste F para cada fator e verificou-se que houve efeito significativo ($p < 0,05$) para os dois fatores em estudo, o que indica diferença entre os níveis de cada fator (Tabela 4). Na análise individual do fator local, a área 2 apresentou média de concentração de Cu estatisticamente superior à área 1.

Tabela 4 – Desdobramento, através do teste de Tukey, da interação entre os fatores local (Fator A) e espécie (Fator B), para a concentração de Cu (variável) em mg.kg^{-1} .

Table 4 – Unfolding, through the Tukey test, of the interaction between the local factors (Factor A) and species (Factor B), for the Cu concentration (variable) in mg.kg^{-1} .

Espécies	Local		F (B dentro de A)
	Área 1	Área 2	
<i>Cenostigma spp</i>	6,143 aB	8,236 aA	7,189 a
<i>Handroanthus serratifolius</i>	6,388 aA	7,308 aA	6,848 ab
<i>Mangifera indica</i>	3,631 bB	7,822 aA	5,726 b
F (A dentro de B)	5,387 b	7,789 a	

Médias seguidas por letras maiúsculas (minúsculas) distintas na mesma linha (coluna) diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Means followed by distinct uppercase (lowercase) letters in the same row (column) differ from each other by the Tukey test ($p < 0,05$).

Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

Quanto aos níveis do fator espécie, a bioacumulação de Cu pelas espécies *C. tocaninum*, *H. serratifolius* e *M. indica* com a diferença de concentrações obtidas nas áreas amostrais, infere-se que as três espécies foram capazes de bioacumular o metal de acordo com os níveis de concentrações encontrados nas áreas que estão inseridas. Considerando a concentração média de Cu por espécie, a espécie *M. indica* ($5,726 \text{ mg.kg}^{-1}$) demonstrou menor capacidade bioacumuladora em relação as demais espécies. Já as espécies *C. tocaninum* ($7,189 \text{ mg.kg}^{-1}$) e *H. serratifolius* ($6,848 \text{ mg.kg}^{-1}$) demonstraram melhores resultados, indicando que as folhas dessas duas espécies de árvores exibem uma forte capacidade de absorver e acumular Cu.

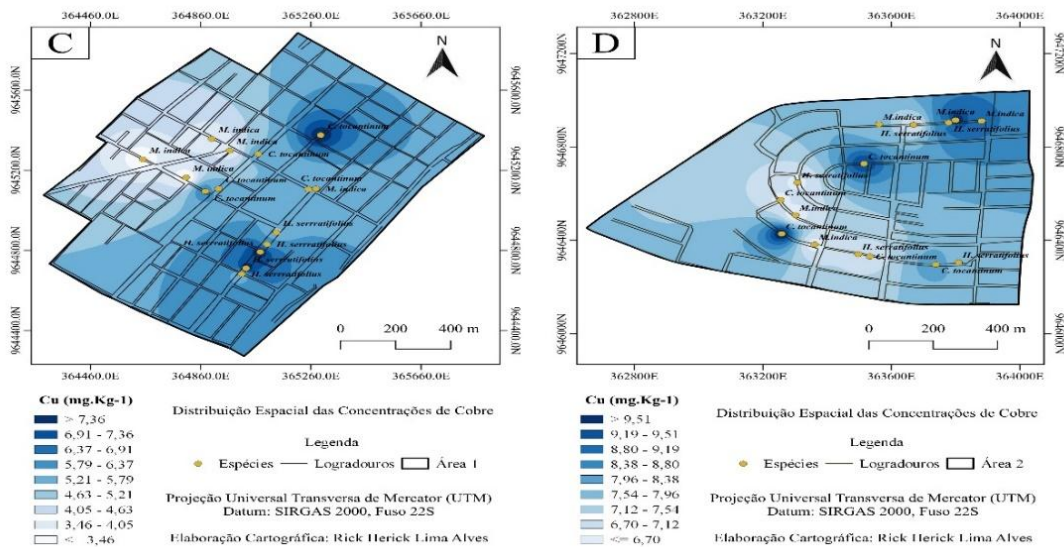
Na Tabela 4, são apresentados os valores referentes ao desdobramento da interação entre os fatores espécie e local para a variável concentração de Cu. Observa-se que ocorre diferença significativa entre as concentrações de Cu somente na área 1, as espécies que apresentaram a maior concentração de Cu, foram a *C. tocaninum* ($6,143 \text{ mg.kg}^{-1}$) e *H. serratifolius* ($6,388 \text{ mg.kg}^{-1}$). Na área 2, verificaram-se os maiores valores para a concentração de Cu, ainda que, neste caso, não tenham diferido estatisticamente entre si nas espécies.

A alta concentração de Cu no *C. tocaninum*, pode ser explicado em parte pela alta taxa assimilação de nitrogênio que ocorre pela associação com microrganismos fixadores de N, característica de espécies da família Fabaceae. A alta concentração de nitrogênio na planta restringe a translocação do Cu, devido a sua imobilização ocasionado pelos complexos proteico/nitrogenados (Cardoso et al., 2017). Esse resultado é corroborado por Silva et al. (2015), que demonstraram a alta capacidade fitoacumuladora de Cu da *Apuleia leiocarpa*, uma espécie da família Fabaceae.

Comparando as distribuições individuais do elemento cobre nas duas áreas de estudo, verifica-se que os maiores valores para as concentrações foram observados na área 2, onde as concentrações individuais de Cu, variaram com valor mínimo de $6,70 \text{ mg.kg}^{-1}$ e máximo de $9,51 \text{ mg.kg}^{-1}$ (Figura 3D), enquanto na área 1 variaram com valor mínimo de $3,46 \text{ mg.kg}^{-1}$ e máximo de $7,36 \text{ mg.kg}^{-1}$ (Figura 3C).

Figura 3 – Mapa conceitual da distribuição espacial da concentração de Cu nas espécies avaliadas.

Figure 3 – Conceptual map of the spatial distribution of Cu concentration in the species evaluated.



Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

Na área 1, verificou-se maior tráfego de veículos leves e médios. Contudo, na área 2, observou-se maior tráfego de veículos pesados (caminhões, carretas e tratores), o que proporcionou maior concentração de Cu determinado no estudo (Tabela 4). Esse resultado é corroborado por Moreira (2015) que afirma que as maiores concentrações de Cu estão associadas a vias expressas trafegáveis com maior número de caminhões. Fato explicado da seguinte maneira: veículos pesados e uso frequente dos sistemas de frenagem, emitem mais Cu que os veículos leves (Gupta, 2020; Singh & Devi, 2023; Davis et al., 2001).

O cobre é um elemento essencial para todos os organismos e a sua concentração normal varia de 3 a 30 mg/kg (Kabata-Pendias, 2000), enquanto concentrações fitotóxicas em plantas têm uma faixa de 20–100 mg/kg (Padmavathiamma & Li, 2007). As concentrações de Cu nas folhas das árvores estudadas variaram de 3,631 a 8,236 mg/kg, consideradas aceitáveis dentro da faixa normal.

No processo de bioacumulação de Zn os níveis de concentrações de cada espécie apresentaram o mesmo padrão, não diferindo-se estatisticamente entre as áreas amostrais (Tabela 5). Em relação a espécies, a maior concentração média de Zn (20,92 mg.kg⁻¹) foi verificada na espécie *H. serratifolius*, diferindo significativamente em comparação as outras espécies.

Tabela 5 – Desdobramento, através do teste de Tukey, da interação entre os fatores local (Fator A) e espécie (Fator B), para a concentração de zinco (variável) em mg.kg⁻¹.

Table 5 – Unfolding, through the Tukey test, of the interaction between the local factors (Factor A) and species (Factor B), for the zinc concentration (variable) in mg.kg⁻¹.

Espécies	Local		F (B dentro de A)
	Área 1	Área 2	
<i>Cenostigma spp</i>	12,54 bA	12,24 bA	12,39 b
<i>Handroanthus serratifolius</i>	21,70 aA	20,15 aA	20,92 a
<i>Mangifera indica</i>	14,14 bA	13,87 bA	14,00 b
F (A dentro de B)	16,12 a	15,42 a	

Médias seguidas por letras maiúsculas (minúsculas) distintas na mesma linha (coluna) diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Means followed by distinct uppercase (lowercase) letters in the same row (column) differ from each other by the Tukey test (p<0.05).

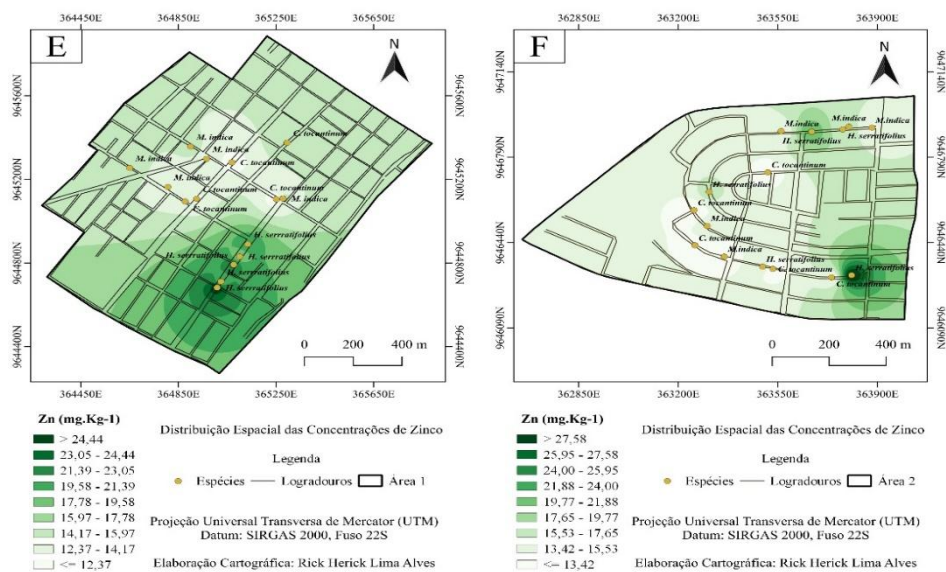
Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

Observa-se também que na análise de desdobramento, *H. serratifolius*, foi a espécie que mais acumulou Zn nas duas áreas amostrais em comparação as outras espécies. Relatos na literatura demonstram que plantas de Ipê acumulam altas concentrações de Zn, evidenciando assim, a capacidade de biorremediação dessas espécies (Gai, Santos & Vieira, 2017). Deste modo, se pode inferir que espécies da família Bignoniaceae são adequadas para detectar e monitorar a presença de Zn no ar citadino.

O gradiente de concentrações de Zn, na área 1, variou com quantitativo mínimo de 12,37 mg.kg⁻¹ e máximo de 24,44 mg.kg⁻¹, enquanto na área 2, o mínimo foi de 13,42 mg.kg⁻¹ e máximo 27,58 mg.kg⁻¹ (Figura 4E e F).

Figura 4 – Mapa conceitual da distribuição espacial da concentração de Zn nas espécies avaliadas.
Figure 4 – Conceptual map of the spatial distribution of Zn concentration in the species evaluated.



Fonte: Autores (2024).

Source: Authors (2024).

Observou-se que as concentrações de Zn foram iguais estatisticamente entre as duas áreas pesquisadas, e com maior concentração de zinco nas vias com intenso tráfego veicular. Situação semelhante foi reportado por Figueiredo et al. (2007) que verificaram altas concentrações de Zn em avenidas com intenso tráfego de veículos na cidade de São Paulo, sugerindo que a origem deste metal estar relacionada às emissões de fontes veiculares.

O zinco é um componente vital da proteína vegetal que desempenha uma função essencial na biossíntese (Serbula et al., 2012). As concentrações de Zn obtidas no estudo variaram entre 12,24 a 21,70 mg/kg, portanto, são aceitáveis, pois estão dentro da faixa de 10 e 150 mg/kg, consideradas normais para o Zn em plantas (Kabata-Pendias, 2000).

Entre os metais, a quantidade de Cd e Pb em todas as espécies de árvores estudadas não foram identificados. Segundo Padmavathiamma e Li (2007) os níveis considerados normais em plantas para o Cd e Pb são, respectivamente, 0,05-2 mg/kg e 0,5 a 10 mg/kg.

4. Conclusão

O estudo possibilitou determinar que as espécies *C. tocanthum* e *H. serratifolius*, apresentaram os melhores resultados na bioacumulação dos metais. Sendo a espécie *C. tocanthum* e *H. serratifolius* foram mais suscetíveis aos metais Cr e Cu, e a espécie *H. serratifolius* mais suscetível ao metal Zn. Portanto, a espécie *M. indica*, obteve resultados estatisticamente inferiores.

Através dos mapas de distribuição das concentrações dos metais foi possível avaliar a distribuição dos elementos no ambiente, constatando-se que o método de biomonitoramento associado às técnicas de geoestatísticas podem ser de grande valia para obtenção de informações da poluição ambiental citadina.

Deste modo, as espécies identificadas podem ser potencialmente úteis no biomonitoramento da qualidade do ar e ser priorizadas nos projetos de arborização urbana. Contribuindo com informações a órgãos governamentais e instituições interessadas para implementação de estratégias de controle da contaminação ambiental e cidades mais sustentáveis.

5. Referências

- Adamiec, E., Jarosz-Krzemińska, E., & Wieszala, R. (2016). Heavy metals from non-exhaust vehicle emissions in urban and motorway road dusts. *Environmental Monitoring and Assessment*, 188(6), 1–11. <https://doi.org/10.1007/s10661-016-5377-1>
- Alvares, C. A., Stape, J. L., Sentelhas, P. C., Gonçalves, J. L. M., & Sparovek, G. (2013). Koppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728. DOI: 10.1127/0941-2948/2013/050714
- Cardoso, K. M., Paula, A., Santos, M. L. P., & Santos, J. S. (2017). Uso de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de poluição ambiental. *Ciência Florestal*, 27(2), 535-547.
- Cesur, A., Cetin, I. Z., Cetin, M., Sevik, H., & Ozel, H. B. (2022). The Use of *Cupressus arizonica* as a Biomonitor of Li, Fe, and Cr Pollution in Kastamonu. *Water, Air, & Soil Pollut* 233, 193. <https://doi.org/10.1007/s11270-022-05667-w>
- Davis, A. P., Shokouhian, M., & Ni, S. (2001). Loading estimates of lead, copper, cadmium, and zinc in urban runoff from specific sources, *Chemosphere*, 44 (5), 997–1009.
- Deecken, B. P., Andrade, E., Costa, C. A., Andrade, R. L. T., & Battirola, L. D. (2022). Arborização urbana como bioindicadora de poluição atmosférica por mercúrio: um estudo de caso com *Moquilea tomentosa* Benth. (Chrysobalanaceae) na região sul da Amazônia. *Research, Society and Development*, 11(14), e480111436557. <http://dx.doi.org/10.33448/rsd-v11i14.36557>
- EMBRAPA – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2009). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes** (2 ed.). Brasília: Embrapa Informação Tecnológica.
- Fang, T., Jiang, T., Yang, K., Li, J., Liang, Y., Zhao, X., Gao, N., Li, H., Lu, W., & Cu, K. (2021). Biomonitoring of heavy metal contamination with roadside trees from metropolitan area of Hefei, China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 193(151). <https://doi.org/10.1007/s10661-021-08926-1>
- Ferreira, D. F. (2011). Sisvar: a computer statistical analysis system. *Ciência e Agrotecnologia*, 35(6), 1039-1042. <https://dx.doi.org/10.1590/S1413-70542011000600001>.
- Figueiredo, A. M. G., Nogueira, C. A., Saiki, M., Milian, & F. M., Domingos, M. (2007). Assessment of atmospheric metallic pollution in the metropolitan region of São Paulo, Brazil, employing *Tillandsia usneoides* L. as biomonitor. *Environmental Pollution*, 145, 279e292. doi:10.1016/j.envpol.2006.03.010
- Gai, A. P. C., Santos, D. S., & Vieira, E. A. (2017). Effects of zinc excess on antioxidant metabolism, mineral content and initial growth of *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos and *Tabebuia roseoalba* (Ridl.) Sandwith. *Environmental and Experimental Botany*, 144, 88–99.

<https://doi.org/10.1016/j.envexptbot.2017.09.006>

Grego, C. R., Oliveira, R. P., & Vieira, S. R. (2014). **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão**. In: Bernardi, A. C. C., et al. (eds.) AGRICULTURA DE PRECISÃO: Resultados de um novo olhar. Embrapa, Brasília.

Gupta, V. (2020). **Poluição por metais pesados gerada por veículos em ambiente urbano e sua distribuição em vários componentes ambientais**. In: Shukla, V., Kumar, N. (eds.) Preocupações Ambientais e Desenvolvimento Sustentável. Springer, Cingapura. https://doi.org/10.1007/978-981-13-5889-0_5

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2022). Censo demográfico: séries temporais. Rio de Janeiro. Disponível em: <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pa/altamira/panorama>>. Acessado em setembro/2024.

Isinkaralar, K. (2022). Atmospheric deposition of Pb and Cd in the *Cedrus atlantica* for environmental biomonitoring. **Landscape and Ecological Engineering**, 18, 341–350. <https://doi.org/10.1007/s11355-022-00503-z>

Jach, M. E., Sajnaga, E., & Ziaja, M. (2022). Utilization of Legume-Nodule Bacterial Symbiosis in Phytoremediation of Heavy Metal-Contaminated Soils. **Biology**, 11, 676. <https://doi.org/10.3390/biology11050676>

Janta, R., & Chantara, S. (2017) Tree bark as bioindicator of metal accumulation from road traffic and air quality map: A case study of Chiang Mai, Thailand. **Atmospheric Pollution Research**, 8(5), 956-967. <https://doi.org/10.1016/j.apr.2017.03.010>

Jardim, W. S., Cardoso, K. M., & Jesus, C. P. (2021). Caracterização e utilização de espécies da arborização urbana no biomonitoramento de material particulado. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, 9(2).

Jeddi, K., Fatnassil, M., Chaieb, M., & Siddique, K. H. M. (2021). Tree species as a biomonitor of metal pollution in arid Mediterranean environments: case for arid southern Tunisia. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, 28598–28605. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-12788-y>

Kabata-Pendias, A. (2000). **Trace elements in soils and plants**. CRC Press.

Liu, Y., Zhao, X., Liu, R., Zhou, J., & Jiang, Z. (2022). Biomonitoring and phytoremediation potential of the leaves, bark, and branch bark of street trees for heavy metal pollution in urban áreas. **Environmental Monitoring and Assessment**, 194(344). <https://doi.org/10.1007/s10661-022-10004-z>

Martins, A. P. G. (2009). **Cascas de árvores como biomonitores da poluição atmosférica de origem veicular em parques urbanos da cidade de São Paulo**. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Moreira, T. C. L. (2015). **Biomonitoramento intra-urbano da poluição de origem veicular: utilização da casca de árvore na identificação de fontes de poluição atmosférica**. Tese, Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil.

Mulenga, C., Phiri, D., Ortega-Rodriguez, D. R., & Meincken, M. (2023). Bioaccumulation of potentially toxic elements by indigenous and exotic trees growing around a copper leaching plant in Mufulira, Zambia. **Environmental Systems Research**, 12:26. <https://doi.org/10.1186/s40068-023-00310-x>

OMS – Organização Mundial da Saúde. (2024). **Air pollution data portal**. Disponível em <<https://www.who.int/data/gho/data/themes/air-pollution/ambient-air-pollution>>

Padmavathiamma, P. K., & Li, L.Y. (2007). Phytoremediation technology: hyperaccumulation metals in plants. *Water, Air, Soil & Pollution*, 184, 105–126.

Pandey, A. K., Zorić, L., Sun, T., Karanović, D., Fang, P., Borišev, M., Wu, X., Luković, J., & Xu, P. (2022). The Anatomical Basis of Heavy Metal Responses in Legumes and Their Impact on Plant–Rhizosphere Interactions. *Plants*, 11, 2554. <https://doi.org/10.3390/plants11192554>

Pimentel-Gomes, F. (2009). **Curso de estatística experimental** (15 ed.). Piracicaba: FEALQ.

Sasso, V. M. (2020). **Potencial fitorremediador para cromo de *Handroanthus chrysotrichus* (Mart. ex DC.) Mattos e *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos**. Dissertação, Universidade Federal de Santa Maria, Rio Grande do Sul, RS, Brasil.

Savas, D. S., Sevik, H., Isinkaralar, K., Turkyilmaz, A., & Cetin, M. (2021). The potential of using *Cedrus atlantica* as a biomonitor in the concentrations of Cr and Mn. **Environmental Science and Pollution Research**, 28, 55446–55453. <https://doi.org/10.1007/s11356-021-14826-1>

Sawidis, T., Breuste, J., Mitrovic, M., Pavlovic, P., & Tsigaridas, K. (2011). Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. **Environmental pollution**, 159(12), 3560-3570. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2011.08.008>

Serbula, S. M., Kalinovic, T. S., Ilic, A. A., Kalinovic, J. V., & Steharnik, M. M. (2013) Assessment of air borne heavy metal pollution using *Pinus* spp. and *Tilia* spp. *Aerosol and Air Quality Research*, 13:563–573.

Silva, N. G., Brehm, F., Mancio, M., & Moraes, C. A. M. (2016). **Reutilização e reciclagem de resíduos siderúrgicos: oportunidades de pesquisa e desafios do setor**. In: Fórum Nacional de Resíduos Sólidos, Porto Alegre, RS.

Silva, R. F., Andreazza, R., Roshan, C., Dellai, A., Jacques, E. J. S., & Scheid, D. (2015). Growth of tropical tree species and absorption of copper in soil artificially contaminated. **Brazilian Journal of Biology**, 75, 119–125.

Singh, S., & Devi, N.L. (2023). **Poluição por metais pesados na atmosfera por emissão veicular**. In: Singh, R. P., Singh, P., Srivastava, A. (eds.) *Toxicidade de metais pesados: preocupações ambientais, remediação e oportunidades*. Springer, Cingapura. https://doi.org/10.1007/978-981-99-0397-9_9

Solgi, E., Keramaty, M., & Solgi, M. (2020). Biomonitoring of airborne Cu, Pb, and Zn in an urban area employing a broad leaved and a conifer tree species. **Journal of Geochemical Exploration**, 208. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2019.106400>

Souza, A. K. R., Morassuti, C. Y., & Deus, W. B. (2018). Poluição do ambiente por metais pesados e utilização de vegetais como bioindicadores. **Acta Biomedica Brasiliensia**, 9(3), 95-106.

Tovar-Sánchez, E., Suarez-Rodríguez, R., Ramírez-Trujillo, A., Valencia-Cuevas, L., Hernández-Plata, I., & Mussali-Galante, P. (2019). The Use of Biosensors for Biomonitoring Environmental Metal Pollution. **IntechOpen**. doi: 10.5772/intechopen.84309

Ugolini, F., Tognetti, R., Raschi, A., & Bacci, L. (2013). *Quercus ilex* L. as bioaccumulator for heavy metals in urban areas: effectiveness of leaf washing with distilled water and considerations on the trees distance from traffic. **Urban Forestry & Urban Greening**, 12, 576–584. <https://doi.org/10.1016/j.ufug.2013.05.007>