

Distribuição Espacial de Chumbo em *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense* em uma Cidade de Médio Porte, Colômbia

Christian Valderrama ^I
Hernan Zarate ^{II}

Resumo: O desenvolvimento urbano descontrolado e o deslocamento populacional aumentaram a necessidade de desenvolver estratégias que mitiguem a insegurança alimentar na América Latina. Esta pesquisa caracterizou a presença e a distribuição espacial de concentrações de chumbo (Pb) em espécies de árvores frutíferas nas vias públicas de Neiva, Colômbia. Um censo identificou *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense* como as espécies mais prevalentes. Amostras de frutas foram coletadas e analisadas de acordo com padrões internacionais. Métodos de interpolação espacial e Kriging foram utilizados para mapear as concentrações de chumbo no ambiente urbano. Foram detectados níveis de chumbo em todas as amostras, com cinco delas excedendo o limite permissível de 0,1 mg/kg. As concentrações mais elevadas foram observadas em áreas industriais. Esses achados destacam a importância de estabelecer estratégias de agroflorestação urbana em áreas com baixos níveis de contaminação e indicam a necessidade de futuras pesquisas que zonifiquem a agricultura urbana.

^I Complutense University of Madrid; Madrid – Spain.

^{II} University of Manizales, Manizales, Colombia.

Palavras-chave: Floresta Urbana de Alimentos; Metal pesado; Paisagem Comestível; Serviços Ecossistêmicos; Sustentabilidade

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artigo Original

DOI: <http://dx.doi.org/10.1590/1809-4422asoc0147vu28L4AO>

Introdução

Nos ambientes urbanos, os metais pesados provêm principalmente de fontes antrópicas. O tráfego veicular, as plantas industriais e os incineradores liberam metais na atmosfera, que posteriormente se depositam no solo e são absorvidos por espécies vegetais (SAWIDIS et al., 2011). O grau de absorção metálica depende de diversos fatores, incluindo a espécie vegetal específica, o tipo de contaminante e sua concentração (ALAHABADI et al., 2017). Entre os metais mais estudados, devido à sua toxicidade e prevalência, destacam-se o mercúrio (Hg), o arsênio (As) e o chumbo (Pb) (ALLOWAY, 2013). O monitoramento desses contaminantes em áreas urbanas tende a ser oneroso e, por vezes, pouco confiável, o que tem levado à preferência pela avaliação da resposta de organismos vivos, como as árvores, que atuam como bioindicadores eficazes da poluição atmosférica (BOQUETE et al., 2014).

A silvicultura alimentar urbana (*Urban Food Forestry*, UFF) tem ganhado relevância como estratégia de apoio aos Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS), em particular à iniciativa Fome Zero. Nos últimos 20 anos, as pesquisas nesse campo cresceram a uma taxa de 13,8% (VALDERRAMA et al., 2023), contribuindo para o fortalecimento dos espaços verdes urbanos e para a melhoria da qualidade do ar (DOUGLAS; IRGA; TORPY, 2019; WARD et al., 2015; ZUPANCIC; WESTMACOTT; BULTHUIS, 2015). Apesar de seus benefícios, a UFF enfrenta desafios relacionados ao risco de contaminação por metais pesados em áreas urbanas. As plantas que se desenvolvem nesses ambientes estão expostas a elevadas cargas de contaminantes, o que pode ocasionar a bioacumulação de substâncias nocivas em frutos comestíveis (MEHARG, 2016; SÄUMEL et al., 2012). Embora haja um crescente interesse nessa abordagem, o paisagismo baseado em árvores frutíferas permanece limitado e ainda não existem diretrizes padronizadas para a produção de frutos saudáveis em áreas urbanas (GORI; FERRINI; FINI, 2019).

Os avanços recentes na geoestatística têm aprimorado significativamente o monitoramento da poluição ambiental, em especial mediante a aplicação do krigagem para a análise espacial e a predição. O krigagem mantém-se como uma técnica de destaque por fornecer previsões lineares ótimas e não enviesadas em locais não amostrados, o que é crucial para avaliações ambientais precisas (OLIVER; WEBSTER, 2014; SRIVASTAVA, 2013). Métodos não lineares de krigagem, como o lognormal e o krigagem por indicadores, demonstraram ser particularmente eficazes para lidar com tendências de dados não gaussianos (ROUHANI, 1996). Do mesmo modo, a modelagem geoestatística tem sido fundamental na avaliação da poluição do solo associada à deposição atmosférica, permitindo previsões acuradas dos níveis de contaminação com mínimo esforço amostral, reduzindo custos e aumentando a eficiência (BORKOWSKI; KWIATKOWSKA-MALINA, 2017; HENSHAW et al., 2004). A integração de sistemas de informação geográfica (SIG) com técnicas de krigagem refinou ainda mais a precisão na avaliação da distribuição espacial em ambientes urbanos, tornando-se uma ferramenta indispensável para a caracterização da poluição em áreas impactadas por atividades industriais (CHENG et al., 2009; NICKEL et al., 2017; WANG; XIE; LI, 2015).

Em diferentes contextos, têm-se aplicado abordagens semelhantes, como a combinação de krigagem fatorial e regressão passo a passo para identificar os fatores ambientais que influenciam a distribuição de metais pesados em solos em Rizhao, China, onde o krigagem revelou variabilidade multiescalar e facilitou a avaliação ambiental (LV et al., 2013). Outro estudo utilizou krigagem para analisar a dependência espacial de propriedades do solo em áreas de marisma salobra, fornecendo informações críticas para a gestão territorial e a melhoria da produtividade agrícola (SIGUA; HUDNALL, 2008). Da mesma forma, o krigagem por regressão tem sido empregado para aumentar a precisão da predição de propriedades do solo em agricultura de precisão, integrando a correlação espacial dos resíduos de regressão e melhorando de forma significativa a caracterização edáfica (YUFENG GE et al., 2007). Esses exemplos ressaltam a versatilidade do krigagem em aplicações ambientais e agrícolas, evidenciando seu valor na predição e gestão da poluição.

Nesse contexto, e considerando o crescente interesse nas paisagens comestíveis vinculados à silvicultura urbana, a geoestatística — em particular o krigagem — oferece grande potencial para suprir lacunas de conhecimento relacionadas à identificação, localização e predição de sítios ótimos de cultivo urbano. Atualmente, observa-se uma escassez notória de pesquisas que utilizem essa tecnologia para prever e estabelecer áreas potenciais para a agricultura urbana. Por exemplo, estudos em grandes cidades como Nova Iorque avaliaram as capacidades de produção e as propriedades nutricionais de diferentes espécies de “berries e nozes” (BUNGE et al., 2019). Em Berlim, determinaram-se os teores de Pb e Cd em frutos urbanos (VON HOFFEN; SÄUMEL, 2014). Em Chelyabinsk, demonstrou-se que os metais e metaloides presentes nos frutos não representam riscos à saúde se forem adequadamente lavados (KRUPNOVA et al., 2021). Pesquisas em cidades intermediárias do Congo identificaram o potencial de geração de frutos em residências (USENI et al., 2021). De modo semelhante, em cidades como Sevilha, Palermo, Al Ain e Kastamonu foram analisadas as concentrações de metais em diferentes frutos urbanos, associando os níveis de contaminação a áreas específicas, como os laranjais (OLIVA; VALDÉS, 2003), as palmeiras datileiras (AHMED; KAUR; HASSAN, 2022) e as macieiras (SEVIK et al., 2020). Portanto, a aplicação de métodos geoestatísticos avançados pode fortalecer de forma significativa o monitoramento ambiental e os processos de tomada de decisão em contextos de agricultura urbana.

Na América Latina, as cidades intermediárias (com populações entre 50.000 e 1 milhão de habitantes) funcionam como nós críticos de conexão entre áreas rurais e urbanas, representando aproximadamente 20% da população mundial (IGLESIAS, 2016). Essas cidades, como Neiva (Colômbia), enfrentam desafios e oportunidades particulares para implementar iniciativas de silvicultura urbana como estratégia para reduzir a distância entre os locais de produção e de consumo de alimentos (CASTRO et al., 2018). Considerando-se que cerca de 90% da população da América Latina e do Caribe viverá em zonas urbanas até 2050, garantir a segurança alimentar por meio da agricultura urbana torna-se cada vez mais crucial (UNITED NATIONS; DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; POPULATION DIVISION, 2019). Nesse marco, o presente estudo tem como objetivo caracterizar a presença e a distribuição espacial de concentrações de chumbo em espécies frutíferas localizadas em vias públicas de Neiva, a fim de

verificar se os níveis desse contaminante ultrapassam os limites permissíveis em alimentos.

1. Materiais e Metodos

1.1 Seleção de frutos e área de amostragem

A área urbana de Neiva, Colômbia, foi sistematicamente dividida em dez zonas, cada uma representando diferentes níveis de atividade industrial e tráfego veicular (Figura 1). As zonas 6 e 9 foram identificadas como áreas com presença de pequenas operações industriais, enquanto as demais corresponderam principalmente a setores residenciais com uma mescla de pequenos comércios. Diante da ausência de um inventário formal de árvores frutíferas por parte das autoridades locais, realizou-se uma identificação inicial de espécies com base em literatura de países com condições ambientais semelhantes (DOUGLAS; IRGA; TORPY, 2019). O estudo concentrou-se em árvores frutíferas localizadas em espaços públicos, como canteiros centrais, calçadas e parques, particularmente aquelas mais expostas à poluição direta derivada de emissões veiculares e descargas industriais.

Figura 1 – Área de investigação de árvores alimentares urbanas



Fonte: Autor, 2024.

1.2 Coleta de amostras

As amostras de frutos foram coletadas por meio de uma amostragem aleatória estratificada, direcionada às duas espécies mais predominantes identificadas no censo inicial: *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense*. Esse método foi selecionado com o intuito de assegurar que as amostras fossem representativas das diferentes condições ambientais presentes na área de estudo. A estratificação foi estabelecida com base em fatores como proximidade de zonas industriais, densidade de tráfego e nível de urbanização.

Cada fruto selecionado foi avaliado quanto ao grau de maturação, cor e posição na árvore, a fim de garantir consistência na coleta. Para minimizar a contaminação externa, todas as amostras foram coletadas utilizando luvas e ferramentas esterilizadas, sendo posteriormente acondicionadas em sacos de polietileno hermeticamente selados e previamente rotulados. Em seguida, os sacos foram armazenados imediatamente em caixas térmicas a 4 °C, prevenindo alterações bioquímicas durante o transporte. As amostras foram transferidas ao laboratório em até 4 horas após a coleta, mantendo-se a cadeia de frio em todo o processo para preservar sua integridade e assegurar a confiabilidade das análises.

1.3 Análises laboratoriais

As análises laboratoriais foram conduzidas conforme os protocolos internacionais estabelecidos pela Association of Official Analytical Collaboration (AOAC), tanto para a preparação das amostras quanto para a quantificação das concentrações de chumbo (Pb).

Inicialmente, cada amostra de fruto foi cuidadosamente lavada com água deionizada para remover contaminantes superficiais como poeira e material particulado. Após secagem ao ar, as amostras foram manualmente separadas em polpa e sementes, utilizando instrumentos de aço inoxidável esterilizados. A polpa foi cortada em fragmentos pequenos e uniformes, que foram desidratados em estufa de convecção a 100 °C durante 24 horas. Em seguida, as amostras secas foram moídas até obtenção de pó homogêneo e fino, utilizando almofariz e pistilo de ágata, de modo a evitar qualquer contaminação metálica.

A extração de metais foi realizada por digestão ácida assistida por micro-ondas, utilizando uma mistura de ácido nítrico (HNO₃) concentrado e peróxido de hidrogênio (H₂O₂) em sistema de vasos fechados, de acordo com o método EPA 3052. As amostras digeridas foram posteriormente analisadas por espectroscopia de absorção atômica (AAS) em comprimento de onda de 217,0 nm. Os padrões de calibração foram preparados a partir de materiais de referência certificados, e o limite de detecção para Pb foi estabelecido em 3,0 µg/L.

Como medidas de controle de qualidade, incluíram-se brancos, duplicatas e amostras fortificadas, garantindo a exatidão e a precisão dos resultados obtidos.

1.4 Análises estatísticas

Inicialmente, foram aplicados estatísticos descritivos para resumir as tendências

centrais e as dispersões dos dados de concentração de Pb nos frutos coletados. A normalidade da distribuição foi rigorosamente avaliada por meio do teste de Shapiro-Wilk, enquanto a homogeneidade das variâncias foi verificada com os testes de Levene e Bartlett. Para comparar as concentrações de Pb entre *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense*, aplicou-se um teste t de Student para duas amostras, sob o pressuposto de variâncias iguais confirmado pelas análises preliminares.

No que se refere ao análise espacial, adotou-se uma abordagem geoestatística integral. Foram desenvolvidos mapas de calor para visualizar a densidade de árvores frutíferas e a distribuição espacial das concentrações de Pb em Neiva. Tais mapas foram elaborados mediante estimativa de densidade por núcleo (kernel density estimation), integrando tanto o inventário de espécies arbóreas quanto dados oficiais sobre retenção de calor urbano. A identificação de ilhas de calor urbano foi fundamental para compreender a correlação entre zonas de maior temperatura e níveis elevados de Pb.

A interpolação espacial das concentrações de Pb foi realizada por meio do krigagem ordinário, permitindo obter previsões em locais não amostrados. O modelo de krigagem utilizou um semivariograma esférico, selecionado a partir dos resultados da validação cruzada, garantindo o melhor ajuste à estrutura espacial dos dados. Adicionalmente, foram gerados mapas de erro de estimativa para identificar áreas com incerteza significativa nas predições, os quais servirão de guia para esforços futuros de monitoramento.

2. Resultados

2.1 Identificação de árvores frutíferas em vias principais

Durante a fase exploratória inicial, realizada em 2019, foram identificadas 2.025 árvores frutíferas distribuídas ao longo das vias principais de Neiva. As espécies mais prevalentes foram *Syzygium malaccense*, com 962 indivíduos (47,5%), e *Mangifera indica*, com 717 indivíduos (35,4%). Essas espécies concentraram-se principalmente em zonas com maior exposição ao tráfego veicular e às atividades industriais, apresentando correlação com áreas previamente identificadas como potenciais pontos críticos de contaminação por chumbo (Tabela 1).

Tabela 1 – Espécies frutíferas em vias principais de Neiva (N = 2025)

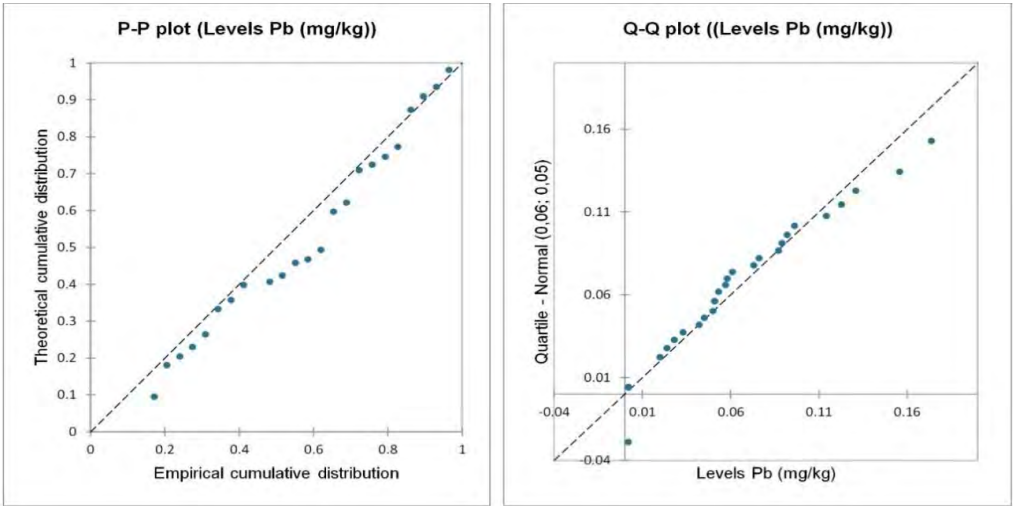
ESPÉCIES	N (%)
<i>Syzygium malaccense</i>	962 (47.5)
<i>Mangifera indica</i>	717 (35.4)
<i>Cocos nucifera</i>	117 (5.8)
<i>Morinda citrifolia</i>	84 (4.2)
<i>Anacardium occidentale</i>	35 (1.7)
<i>Citrus × Limon</i>	27 (1.3)

ESPÉCIES	N (%)
<i>Citrus × aurantium</i>	20 (1.0)
<i>Musa × paradisiaca</i>	15 (0.7)
<i>Melicoccus bijugatus</i>	14 (0.7)
<i>Psidium guajava</i>	13 (0.6)
<i>Carica papaya</i>	8 (0.4)
<i>Annona squamosa</i>	6 (0.3)
<i>Tamarindus indica</i>	5 (0.3)
<i>Citrus reticulata</i>	2 (0.1)

Fonte: Autor, 2024.

Os níveis de chumbo (Pb) foram detectados nas 29 amostras de frutos analisadas, das quais 16 corresponderam a *Mangifera indica* e 13 a *Syzygium malaccense*. A concentração mediana de Pb para *Mangifera indica* foi de 0,075 mg/kg [intervalo interquartílico: 0,093 – 0,052], enquanto *Syzygium malaccense* apresentou uma concentração mediana inferior de 0,024 mg/kg [intervalo interquartílico: 0,051 – 0,002]. Esses valores sugerem que *Mangifera indica* pode apresentar maior tendência à acumulação de chumbo em comparação com *Syzygium malaccense* (Figura 2).

Figura 2 – Distribuição acumulativa de chumbo (Pb)



Fonte: Autor, 2024.

Os resultados do teste de Shapiro-Wilk não apresentaram desvios significativos em

relação à normalidade nos níveis de Pb ($W = 0,941$; $p = 0,104$), o que valida o uso de testes paramétricos. A homogeneidade das variâncias entre as duas espécies foi confirmada pelo teste de Levene ($F = 0,054$; $p = 0,818$) e pelo teste de Bartlett ($\chi^2 = 0,090$; $p = 0,765$). Em consequência, os dados sustentaram a aplicação do teste t de Student para comparar as concentrações de Pb entre *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense*.

O teste t de Student revelou uma diferença estatisticamente significativa nas concentrações de Pb entre ambas as espécies ($p < 0,05$). *Mangifera indica* apresentou uma concentração média de Pb de $0,080 \text{ mg/kg} \pm 0,041$, superior à observada em *Syzygium malaccense* ($0,039 \text{ mg/kg} \pm 0,044$). Esses resultados sugerem que *M. indica* pode ser mais propensa à absorção de chumbo, possivelmente em função de suas características fisiológicas e dos microambientes em que geralmente se desenvolve (PRASETIA et al., 2018).

A análise de ANOVA não mostrou diferenças estatisticamente significativas nas concentrações de Pb entre as diferentes zonas urbanas ($F = 0,497$; $p = 0,738$). Contudo, as concentrações mais elevadas foram encontradas de forma consistente nas zonas com maior atividade industrial, particularmente nas zonas 6, 9 e 10. Essa distribuição espacial coincide com estudos prévios que associam níveis elevados de Pb a fontes locais de poluição, como emissões industriais e tráfego veicular (KRUPNOVA et al., 2021; SEVIK et al., 2020). Os mapas de calor gerados por meio de modelos de krigagem ilustraram esses padrões, destacando as áreas com maior risco de contaminação.

Ao comparar os resultados com a norma internacional de inocuidade alimentar CODEX STAN 193-1995, que estabelece um limite permissível de $0,1 \text{ mg/kg}$ de Pb em alimentos, observou-se que cinco amostras superaram esse limiar. Entre elas, três corresponderam a *Syzygium malaccense* nas zonas 2 e 10, com concentrações de $0,131 \text{ mg/kg}$, $0,123 \text{ mg/kg}$ e $0,5095 \text{ mg/kg}$, respectivamente. Além disso, duas amostras de *Mangifera indica* nas zonas 2, 6 e 9 apresentaram concentrações de $0,174 \text{ mg/kg}$, $0,114 \text{ mg/kg}$ e $0,156 \text{ mg/kg}$, respectivamente. Esses achados evidenciam os potenciais riscos à saúde associados ao consumo de frutos nessas áreas e ressaltam a necessidade de estabelecer um monitoramento ambiental contínuo (CODEX ALIMENTARIUS COMMISSION, 1995).

2.2 Geoestatística ambiental

A Figura 3 ilustra a distribuição dos agrupamentos de calor urbano em Neiva, desenvolvida por meio da integração do inventário de espécies arbóreas frutíferas identificadas com fontes oficiais de dados sobre retenção de calor na cidade. O mapa de calor revela que as maiores concentrações de calor urbano se localizam em áreas com densa atividade industrial e intenso tráfego veicular, particularmente nas zonas ao sul da cidade. Essas áreas, caracterizadas pela escassez de espaços verdes e pela predominância de superfícies impermeáveis, apresentam correlação significativa entre a redução da cobertura vegetal e o aumento da retenção de calor. A identificação desses agrupamentos de calor é fundamental para o planejamento urbano, pois evidencia a necessidade de intervenções focalizadas para fortalecer a arborização urbana e reduzir o estresse térmico nessas zonas vulneráveis.

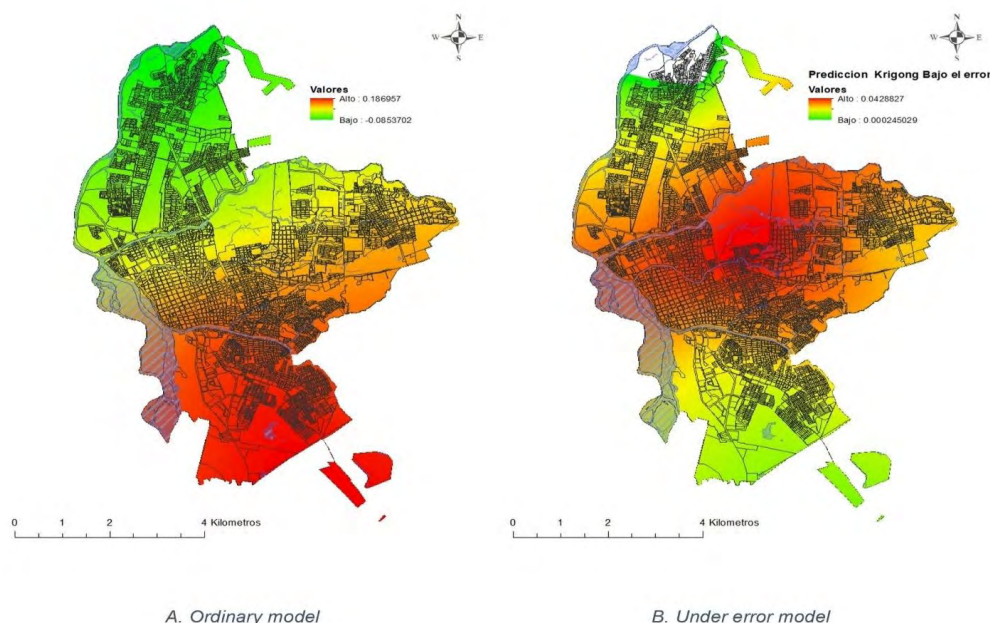
Figura 3 – Agrupamentos de calor na área urbana de Neiva



Fonte: Autor, 2024.

A primeira imagem (A) da Figura 4 apresenta a distribuição espacial predita das concentrações de chumbo (Pb) em Neiva, gerada por meio do método de krigagem ordinário. Essa abordagem geoestatística permite estimar os níveis de chumbo em áreas não amostradas a partir da correlação espacial dos dados coletados nos pontos de amostragem. O mapa revela que as concentrações mais elevadas de Pb encontram-se nas zonas industriais do sul da cidade, caracterizadas por intensa atividade industrial e elevados volumes de tráfego. Esses resultados mostram-se coerentes com as condições ambientais observadas e evidenciam a influência das emissões industriais e veiculares locais na contaminação urbana por chumbo.

Figura 4 – Modelos de predição por krigagem



Fonte: Autor, 2024.

A segunda imagem (B) da Figura 4 incorpora a estimativa do erro no modelo de krigagem, destacando as áreas de incerteza na predição das concentrações de chumbo (Pb). O mapa de erro identifica zonas com variabilidade significativa nas previsões, particularmente no centro e no leste da cidade, o que pode ser atribuído a dados inconsistentes ou a fontes variáveis de poluição, como padrões de tráfego flutuantes e usos mistos do solo. Essas áreas com maior incerteza requerem monitoramento ambiental focalizado e amostragem mais frequente para refinar a precisão preditiva dos modelos de contaminação. Essa análise não apenas reforça a necessidade de um monitoramento localizado, mas também contribui para identificar zonas críticas onde devem ser priorizadas as intervenções de saúde pública.

3. Discussão

A diversidade de espécies de árvores frutíferas identificada em Neiva reflete um esforço urbano significativo de aproveitamento dos espaços verdes tanto para o embelezamento quanto para a produção alimentar. A dominância de *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense* evidencia a adaptabilidade dessas espécies ao ambiente urbano local, incluindo sua resiliência frente a diferentes poluentes e estressores urbanos (TODOROV; BOGSAN, 2016). No entanto, a presença de contaminação por Pb, particularmente em *Mangifera indica*, sugere que, apesar dos benefícios da agrofloresta urbana, existem riscos ambientais relevantes à saúde que devem ser gerenciados. Esses achados coincidem com estudos

prévios que destacam o potencial de acumulação de metais pesados em árvores frutíferas urbanas, especialmente em áreas com intensa atividade veicular e industrial (AHMED; KAUR; HASSAN, 2022; SÄUMEL et al., 2012).

As concentrações mais elevadas de chumbo em *Mangifera indica* em relação a *Syzygium malaccense* podem ser atribuídas a diversos fatores, incluindo diferenças fisiológicas específicas de cada espécie e os microambientes em que as árvores se desenvolvem (ALAHABADI et al., 2017; PRASETIA et al., 2018). Sabe-se que *M. indica* apresenta maior área foliar e de casca, o que pode favorecer sua capacidade de absorver e acumular poluentes atmosféricos (SAWIDIS et al., 2011). Essa observação é consistente com pesquisas realizadas em outros ambientes urbanos, onde espécies perenes de folhas largas demonstraram maiores níveis de acumulação de metais pesados (VITTORI ANTISARI et al., 2015). As concentrações significativas de Pb detectadas neste estudo ressaltam a necessidade de desenhar estratégias focalizadas para mitigar os riscos de exposição, particularmente em zonas com elevadas cargas de poluição.

Os resultados mostram que 17% das amostras analisadas ultrapassaram o limite permissível de chumbo estabelecido no CODEX STAN 193-1995 (FAO; WHO, 2019). Essas ultrapassagens estiveram associadas principalmente a árvores localizadas em áreas de intenso tráfego veicular e atividade industrial, corroborando estudos que identificam as emissões veiculares e as descargas industriais como os principais contribuintes à poluição urbana por metais pesados (SEVIK et al., 2020; WU et al., 2015). Esses achados destacam a necessidade de um monitoramento ambiental contínuo e do desenvolvimento de práticas de agrofloresta urbana que priorizem a segurança alimentar. Ademais, torna-se importante considerar a possível variabilidade sazonal nos níveis de contaminação, uma vez que as condições atmosféricas e a dispersão de poluentes podem influenciar significativamente a bioacumulação de metais (LEVIN et al., 2020).

A análise geoestatística revelou variabilidade espacial significativa nas concentrações de Pb em Neiva, com os níveis mais elevados observados nas zonas industriais do sul e em áreas de tráfego intenso. Esses resultados são congruentes com investigações anteriores que evidenciam o caráter localizado da poluição por metais pesados em ambientes urbanos (CHENG et al., 2009; WANG; XIE; LI, 2015). A análise de erro do modelo de krigagem identificou, além disso, zonas com incerteza considerável, o que enfatiza a necessidade de monitoramento ambiental focalizado nesses setores. Em conjunto, os resultados sugerem que os planejadores urbanos devem implementar estratégias de intervenção localizadas que se concentrem nas áreas de maior risco, com o objetivo de gerir e mitigar de forma eficaz a exposição ao chumbo em contextos de agrofloresta urbana.

Esses achados possuem implicações relevantes para a agrofloresta urbana e para o planejamento urbano. Os níveis significativos de contaminação por Pb detectados em áreas específicas ressaltam os riscos potenciais à saúde associados ao consumo de frutos cultivados nesses ambientes. Os planejadores urbanos e responsáveis por políticas públicas devem considerar esses resultados ao desenvolver iniciativas de reverdecimento urbano, assegurando que a segurança alimentar seja tratada como prioridade. Estratégias como o monitoramento periódico, a seleção de espécies menos suscetíveis e a implementação de

zonas de amortecimento ao redor de áreas de alto risco podem contribuir para mitigar os riscos associados à poluição por metais pesados na agrofloresta urbana (MCCLINTOCK, 2010; ZUPANCIC; WESTMACOTT; BULTHUIS, 2015).

Conclusões

Este estudo demonstrou que as áreas urbanas de cidades intermediárias, como Neiva (Colômbia), apresentam um potencial significativo para a produção alimentar por meio da agrofloresta urbana. No entanto, os resultados evidenciam um desafio crítico: a presença de contaminação por chumbo (Pb) em árvores frutíferas, particularmente *Mangifera indica* e *Syzygium malaccense*. Aproximadamente **17% das amostras analisadas** ultrapassaram os limites permissíveis de Pb em alimentos, com os níveis mais elevados registrados em zonas industriais e áreas de tráfego intenso. Esses achados ressaltam a necessidade de intervenções ambientais focalizadas e de um monitoramento mais rigoroso para garantir a inocuidade dos frutos cultivados em ambientes urbanos.

A detecção de níveis elevados de Pb em determinadas zonas urbanas levanta sérias preocupações de saúde pública. O consumo de frutos contaminados com chumbo representa um risco, especialmente para populações vulneráveis. À medida que a agricultura urbana se expande, torna-se indispensável implementar estratégias que minimizem a exposição a poluentes, incluindo a seleção de espécies menos propensas à absorção de metais pesados, o estabelecimento de zonas de amortecimento entre áreas de alto risco e locais de cultivo, e a realização de avaliações periódicas da qualidade do ar e do solo. Essas medidas são essenciais para proteger a saúde dos residentes urbanos e assegurar a sustentabilidade das iniciativas de agrofloresta urbana.

Os achados deste estudo reforçam a necessidade de que os planejadores urbanos incorporem a segurança alimentar como critério central no desenho e no desenvolvimento dos espaços verdes. Isso implica priorizar as áreas com baixos níveis de contaminação para projetos de agrofloresta urbana e integrar o monitoramento ambiental aos processos de planejamento urbano. Pesquisas futuras deverão explorar os mecanismos de bioacumulação de outros contaminantes em diferentes espécies frutíferas urbanas, bem como os impactos de longo prazo da poluição urbana sobre a segurança alimentar. Recomenda-se ainda a realização de estudos longitudinais que permitam monitorar a evolução dos níveis de poluentes ao longo do tempo, fundamentais para o desenvolvimento de práticas agrícolas urbanas sustentáveis.

Em síntese, embora a agrofloresta urbana ofereça benefícios promissores para cidades intermediárias, particularmente em termos de segurança alimentar e reverdecimento urbano, sua implementação deve ser conduzida com cautela. Garantir que os alimentos produzidos na cidade sejam seguros para o consumo requer um esforço colaborativo entre planejadores urbanos, cientistas ambientais e autoridades de saúde pública. Ao integrar o monitoramento ambiental e a gestão de riscos às práticas de agricultura urbana, as cidades poderão aproveitar os benefícios da agrofloresta protegendo, ao mesmo tempo, a saúde de seus habitantes.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Universidad Complutense de Madrid pelo apoio concedido no desenvolvimento desta pesquisa e à Universidad de Manizales, pelo apoio proporcionado por meio do Doutorado em Administração.

Referências

AHMED, Z. F. R.; KAUR, N.; HASSAN, F. E. Ornamental Date Palm and Sidr Trees: Fruit Elements Composition and Concerns Regarding Consumption. *International Journal of Fruit Science*, v. 22, n. 1, p. 17–34, 2022.

ALAHABADI, A. et al. A comparative study on capability of different tree species in accumulating heavy metals from soil and ambient air. *Chemosphere*, v. 172, p. 459–467, 2017.

ALLOWAY, B. J. Sources of Heavy Metals and Metalloids in Soils. Em: [s.l: s.n.]. p. 11–50.

BOQUETE, M. T. et al. Effect of age on the heavy metal concentration in segments of *Pseudocleropodium purum* and the biomonitoring of atmospheric deposition of metals. *Atmospheric Environment*, v. 86, p. 28–34, 2014.

BORKOWSKI, A. SZ.; KWIATKOWSKA-MALINA, J. Geostatistical modelling as an assessment tool of soil pollution based on deposition from atmospheric air. *Geosciences Journal*, v. 21, n. 4, p. 645–653, 1 ago. 2017.

BUNGE, A. et al. Urban foraging for food security and sovereignty: Quantifying edible forest yield in Syracuse, New York using four common fruit- and nut-producing street tree species. *Journal of Urban Ecology*, v. 5, n. 1, 2019.

CASTRO, J. et al. “edible” urban forests as part of inclusive, sustainable cities. *Unasylva*, v. 69, n. 250, p. 59–65, 2018.

CHENG, W. et al. Integrating classification and regression tree (CART) with GIS for assessment of heavy metals pollution. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 158, n. 1–4, p. 419–431, 13 nov. 2009.

CODEx ALIMENTARIUS COMMISSION. General standard for contaminants and toxins in food and feed (CXS 193-1995). Roma: [s.n.]. Disponível em: <<https://www.fao.org/fao-who-codexalimentarius/codex-texts/list-standards/en/>>. Acesso em: 24 ago. 2024.

DOUGLAS, A. N. J.; IRGA, P. J.; TORPY, F. R. Determining broad scale associations between air

pollutants and urban forestry: A novel multifaceted methodological approach *. *Environmental Pollution*, v. 247, p. 474–481, 2019.

FAO; WHO. GENERAL STANDARD FOR CONTAMINANTS AND TOXINS IN FOOD AND FEED, CXS 193-1995. [s.l: s.n.]. Disponível em: <<http://www.fao.org/fao-who-codex-alimentarius/sh-proxy/es/?lnk=1&url=https%25253A%25252F%25>>. Acesso em: 11 jul. 2020.

GORI, A.; FERRINI, F.; FINI, A. Growing healthy food under heavy metal pollution load: Overview and major challenges of tree based edible landscapes. *Urban Forestry & Urban Greening*, v. 38, p. 403–406, fev. 2019.

HENSHAW, S. L. et al. Geostatistics and GIS: Tools for Characterizing Environmental Contamination. *Journal of Medical Systems*, v. 28, n. 4, p. 335–348, ago. 2004.

IGLESIAS, B. M. Intermediary cities in the territorial integration of the Global South. *Revista CIDOB d'Afers Internacionals*, v. 2016, n. 114, p. 109–132, 2016.

KRUPNOVA, T. G. et al. Apple trees as a possible monitor and phytoremediator of urban and industrial areas in Chelyabinsk, Russian Federation. *Biodiversitas*, v. 22, n. 7, p. 2824–2828, 2021.

LEVIN, R. et al. Lead seasonality in humans, animals, and the natural environment. *Environmental Research*, v. 180, p. 108797, 2020.

LV, J. et al. Factorial kriging and stepwise regression approach to identify environmental factors influencing spatial multi-scale variability of heavy metals in soils. *Journal of Hazardous Materials*, v. 261, p. 387–397, out. 2013.

MCCLINTOCK, N. Why farm the city? Theorizing urban agriculture through a lens of metabolic rift. *Cambridge Journal of Regions, Economy and Society*, v. 3, n. 2, p. 191–207, 1 jul. 2010.

MEHARG, A. A. Perspective: City farming needs monitoring. *Nature*, v. 531, n. 7594, p. S60–S60, 16 mar. 2016.

NICKEL, S. et al. Modelling and mapping heavy metal and nitrogen concentrations in moss in 2010 throughout Europe by applying Random Forests models. *Atmospheric Environment*, v. 156, p. 146–159, maio 2017.

OLIVA, S. R.; VALDÉS, B. Metal concentrations in Seville orange (*Citrus aurantium*) fruits from Seville (Spain) and Palermo (Italy). *Annales Botanici Fennici*, v. 40, n. 5, p. 339–344, 2003.

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. *CATENA*, v. 113, p. 56–69, fev. 2014.

PRASETIA, H. et al. Mangifera indica as Bioindicator of Mercury Atmospheric Contamination in an ASGM Area in North Gorontalo Regency, Indonesia. *Geosciences*, v. 8, n. 1, p. 31, jan.

2018.

ROUHANI, S. Geostatistical Estimation: Kriging. Em: *Geostatistics for Environmental and Geotechnical Applications*. [s.l.] ASTM International 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959, 1996. p. 20–31.

SÄUMEL, I. et al. How healthy is urban horticulture in high traffic areas? Trace metal concentrations in vegetable crops from plantings within inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Environmental Pollution*, v. 165, p. 124–132, 2012.

SAWIDIS, T. et al. Trees as bioindicator of heavy metal pollution in three European cities. *Environmental Pollution*, v. 159, n. 12, p. 3560–3570, dez. 2011.

SEVIK, H. et al. Changes in heavy metal accumulation in some edible landscape plants depending on traffic density. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 192, n. 2, 2020.

SIGUA, G. C.; HUDNALL, W. H. Kriging analysis of soil properties. *Journal of Soils and Sediments*, v. 8, n. 3, p. 193–202, 3 jun. 2008.

SRIVASTAVA, R. M. Geostatistics: A toolkit for data analysis, spatial prediction and risk management in the coal industry. *International Journal of Coal Geology*, v. 112, p. 2–13, jun. 2013.

TODOROV, S. D.; BOGSAN, C. S. *Tropical Fruits-- From Cultivation to Consumption and Health Benefits : Guava and Mango*. New York: Nova Science Publishers, Inc, 2016.

UNITED NATIONS; DEPARTMENT OF ECONOMIC AND SOCIAL AFFAIRS; POPULATION DIVISION. *World Urbanization Prospects 2018: Highlights*. New York: UN, 2019.

USENI, Y. S. et al. Diversity, use and management of household-located fruit trees in two rapidly developing towns in Southeastern D.R. Congo. *Urban Forestry and Urban Greening*, v. 63, 2021.

VALDERRAMA, C. FELIPE et al. Análisis de la agroforestería urbana: una revisión sistemática y análisis bibliométrico. *Colombia forestal*, v. 26, n. 2, p. 77–91, 1 jul. 2023.

VITTORI ANTISARI, L. et al. Uptake and translocation of metals and nutrients in tomato grown in soil polluted with metal oxide (CeO_2 , Fe_3O_4 , SnO_2 , TiO_2) or metallic (Ag, Co, Ni) engineered nanoparticles. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 22, n. 3, p. 1841–1853, 2015.

VON HOFFEN, L. P.; SÄUMEL, I. Orchards for edible cities: Cadmium and lead content in nuts, berries, pome and stone fruits harvested within the inner city neighbourhoods in Berlin, Germany. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 101, n. 1, p. 233–239, 2014.

WANG, Q.; XIE, Z.; LI, F. Using ensemble models to identify and apportion heavy metal pollution sources in agricultural soils on a local scale. *Environmental Pollution*, v. 206, p. 227–235,

nov. 2015.

WARD, H. C. et al. Effects of urban density on carbon dioxide exchanges: Observations of dense urban, suburban and woodland areas of southern England. *Environmental Pollution*, v. 198, p. 186–200, 2015.

WU, S. et al. Levels and health risk assessments of heavy metals in urban soils in Dongguan, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 148, p. 71–78, 2015.

YUFENG GE et al. A Comparison of Regression and Regression-kriging for Soil Characterization Using Remote Sensing Imagery. 2007 Minneapolis, Minnesota, June 17-20, 2007. *Anais...St. Joseph, MI: American Society of Agricultural and Biological Engineers*, 2007.

ZUPANCIC, T.; WESTMACOTT, C.; BULTHUIS, M. The impact of green space on heat and air pollution in urban communities: A meta-narrative systematic review. A meta-narrative systematic review, 2015.

Christian Valderrama

✉ chrivald@ucm.es

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-2260-5046>

Editor Responsável

José Irivaldo Alves Oliveira
Silva

Editor Associado

Rylanneive Teixeira

Hernan Zarate

✉ hzarate105280@umanizales.edu.co

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9851-7857>

Submetido em: 25/08/2024

Aceito em: 02/05/2025

2025;28:e00147

Declaração de disponibilidade de dados:

Os dados de pesquisa só estão disponíveis mediante solicitação.

Obs: Os conjuntos de dados relacionados a este artigo estarão disponíveis mediante solicitação ao autor correspondente. A maior parte dos dados utilizados nesta pesquisa — incluindo a identificação, o censo, as análises de amostras e os respectivos resultados (figure 1, 3, table 1) — está disponível no próprio artigo. Além disso, os dados relacionados às informações geoestatísticas estarão disponíveis mediante solicitação formal ao autor correspondente (figure 4), devido ao grande volume e tamanho desses arquivos.

Por meio dessa solicitação, os interessados poderão obter o *modelo de kriging*, juntamente com sua respectiva configuração e as informações complementares descritas no artigo, para fins de pesquisas adicionais.

Distribución espacial de plomo en *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* en una ciudad intermedia, Colombia

Christian Valderrama
Hernan Zarate

Resumen: El desarrollo urbano descontrolado y el desplazamiento poblacional, ha incrementado la necesidad de diseñar estrategias que mitiguen la seguridad alimentaria en América Latina. Esta investigación caracterizó la presencia y distribución espacial de concentraciones de plomo (Pb) en especies de árboles frutales en las vías públicas en Neiva, Colombia. Se realizó un censo que identificó a *Mangifera indica* y *Syzygium malaccense* como las especies más prevalentes. Se recolectaron y analizaron muestras de frutas según estándares internacionales. Se emplearon métodos de interpolación espacial y Kriging para mapear las concentraciones de plomo en el paisaje urbano. Se encontraron niveles de plomo en todas las muestras, con cinco superando el límite permisible de 0.1 mg/kg. Las mayores concentraciones se observaron en áreas industriales. Estos hallazgos destacan la importancia de establecer estrategias de agroforestería urbana en áreas con bajos niveles de contaminación y se identifica la necesidad de futuras investigaciones que zonifiquen la agricultura urbana.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Artículo original

Palabras-clave: Bosques alimentarios urbanos; Metales pesados; Paisajes comestibles; Servicios Ecosistemicos; Sostenibilidad.

Spatial Lead Distribution in *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* in a Medium-Sized City, Colombia

Christian Valderrama
Hernan Zarate

Abstract: Uncontrolled urban development driven by forced migration has heightened the need for strategies to mitigate food security in Latin America. This study aims to characterize the presence and spatial distribution of lead (Pb) concentrations in fruit-bearing tree species along public roads in Neiva, Colombia, a medium-sized city. A comprehensive census identified *Mangifera indica* and *Syzygium malaccense* as the most prevalent species. Fruit samples were collected and analyzed according to FAO standards. Spatial interpolation and Kriging methods were employed to map lead concentrations across the urban landscape. Results revealed detectable levels of lead in all samples, with five samples exceeding the permissible limit of 0.1 mg/kg. The highest concentrations were observed in industrial areas, suggesting significant contamination from vehicular and industrial activities. These findings underscore the importance of urban agroforestry strategies in areas with lower contamination levels and highlight the need for further research to identify safer urban agriculture zones.

São Paulo. Vol. 28, 2025

Original Article

Keywords: Ecosystem Services; Edible landscape; Heavy metal; Sustainability; Urban food forest.