

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Vespas sociais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais

Eldair Santos da Silva
Doctor Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2026**

ELDAIR SANTOS DA SILVA

Vespas sociais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Jose Eduardo Serrao

Coorientadores: Bruno Corrêa Barbosa
Alexandre Somavilla

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S586v
2026

Silva, Eldair Santos da, 1996-

Vespas sociais como potenciais bioindicadores de
contaminação por metais / Eldair Santos da Silva. – Viçosa, MG,
2026.

1 tese eletrônica (67 f.): il. (algumas color.).

Orientador: José Eduardo Serrão.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa,
Departamento de Entomologia, 2026.

Inclui bibliografia.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2026.390>

Modo de acesso: World Wild Web.

1. Vespas - Efeito dos metais pesados. 2. Vespas - Efeito da
poluição. I. Serrão, José Eduardo, 1965-. II. Universidade
Federal de Viçosa. Departamento de Entomologia. Programa de
Pós-Graduação em Entomologia. III. Título.

CDD 22. ed. 595.7981727531

ELDAIR SANTOS DA SILVA

Vespas sociais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Entomologia, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 19 de maio de 2026.

Assentimento:

Eldair Santos da Silva
Autora

Jose Eduardo Serrao
Orientador

Essa tese foi assinada digitalmente pela autora em 01/07/2026 às 17:01:03 e pelo orientador em 02/07/2026 às 09:11:18. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **87YL.WCDX.F4QL** e clique no botão 'Validar documento'.

Aos meus pais e irmãos, por nunca medirem esforços para que esse sonho pudesse ser realizado.

AGRADECIMENTOS

À Deus, por todas as conquistas até aqui alcançadas, e pela força de sempre continuar lutando.

À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Programa de Pós-Graduação em Entomologia pela oportunidade de realização deste estudo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida durante o doutorado.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG, APQ 02489-22, APQ 01369-22) pelo apoio financeiro.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq 303243/2022-8) pelo apoio financeiro.

Ao professor José Eduardo Serrão por toda orientação, acolhimento, dedicação e atenção durante todo o estudo, e por ter me “adotado” e me recebido tão bem no seu laboratório.

Ao professor José Cola Zanuncio pela orientação e as valiosas contribuições durante a realização deste trabalho.

Ao Bruno Corrêa Barbosa e ao Alexandre Somavilla pelo auxílio no trabalho e por sempre se fazerem presentes.

À coordenação e à secretária do Programa de Pós-Graduação em Entomologia pela dedicação e apoio.

Ao Laboratório de Ultraestrutura Celular pela recepção e parceria.

Às minhas amigas e parceiras de todos os dias Paulinha, Elane e Érika, por todo apoio, momentos de descontração e por não me deixarem surtar. A Elane e Diego, pela ajuda indispensável nas análises estatísticas.

À todos que participaram direta e indiretamente, e que contribuíram e tornaram a realização deste estudo possível. Ao grupo de ecologia do LABECOM pela ajuda e bons momentos na coleta em Mariana, jamais esquecerei.

Aos meus pais, Lúcia e Jerolino por todo apoio, compreensão e carinho durante esse processo. Agradeço por todos os esforços para que mais esse sonho pudesse ser realizado. Aos meus irmãos Carlim, Sandra, Mauro, Eleni e Edivan por cada palavra de incentivo e parceria. Aos meus sobrinhos pelos momentos fofos. Amo muito cada um de vocês.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

“Só se pode alcançar um grande êxito quando nos mantemos fiéis a nós mesmos.”
(Friedrich Nietzsche)

RESUMO

SILVA, Eldair Santos da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, maio de 2026.
Vespas sociais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais.
Orientador: Jose Eduardo Serrao. Coorientadores: Bruno Corrêa Barbosa e Alexandre Somavilla.

A poluição por metais e material particulado têm aumentado no mundo, estando diretamente associados a atividades antrópicas. Nesse contexto, o uso de organismos vivos como bioindicadores tem se mostrado uma ferramenta importante para avaliar a qualidade ambiental e identificar alterações nos ecossistemas. As vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae), devido à sua ampla distribuição e interação com diferentes habitats, apresentam potencial para esse tipo de aplicação. Este estudo avaliou o potencial de vespas sociais como organismos indicadores de poluição ambiental por metais pesados e metaloides. Especificamente foi realizada uma revisão sistemática da literatura sobre o uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados e análises da presença de metais-traço e metaloides nas vespas Neotropicais *Protopolybia sedula* e *Polybia occidentalis*. A revisão sistemática, baseada em buscas em bases de dados científicas, evidenciou que os estudos ainda são limitados e concentrados principalmente na Europa, com foco na análise de indivíduos adultos, sendo chumbo, zinco, cádmio, arsênio e ferro os metais frequentemente analisados, refletindo tanto suas relevâncias ambientais quanto a disponibilidade de métodos analíticos para detecção. No estudo experimental, vespas sociais coletadas em áreas com diferentes níveis de impacto antrópico no estado de Minas Gerais, Brasil foram avaliadas por microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia por energia dispersiva. Os resultados indicaram a presença de diversos metais-traço e metaloides na superfície do corpo de indivíduos adultos e em material do ninho, com variações associadas ao tipo de ambiente. Esses resultados reforçam o potencial das vespas sociais neotropicais como bioindicadoras de contaminação por esses elementos, indicando que, assim como espécies do Velho Mundo, esses organismos podem ser efetivamente incorporados em estratégias de monitoramento ambiental.

Palavras-chave: metais-traço; metaloides; Polistinae; poluição; Vespinae

ABSTRACT

SILVA, Eldair Santos da, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, May, 2026. **Social wasps as potential bioindicators of metal contamination**. Adviser: Jose Eduardo Serrao. Co-advisers: Bruno Corrêa Barbosa and Alexandre Somavilla.

Pollution from metals and particulate matter has been increasing worldwide, and is directly associated with human activities. In this context, the use of living organisms as bioindicators has proven to be an important tool for assessing environmental quality and identifying changes in ecosystems. Social wasps (Hymenoptera: Vespidae), due to their wide distribution and interaction with different habitats, have potential for this type of application. This study evaluated the potential of social wasps as indicator organisms for environmental pollution by heavy metals and metalloids. Specifically, a systematic literature review was conducted on the use of social wasps as bioindicators of heavy metals, and analyses of the presence of trace metals and metalloids in the Neotropical wasps *Protopolybia sedula* and *Polybia occidentalis* were performed. The systematic review, based on searches in scientific databases, showed that studies are still limited and mainly concentrated in Europe, focusing on the analysis of adult individuals, with lead, zinc, cadmium, arsenic, and iron being the metals frequently analyzed, reflecting both their environmental relevance and the availability of analytical methods for detection. In the experimental study, social wasps collected in areas with different levels of anthropogenic impact in the state of Minas Gerais, Brazil, were evaluated by scanning electron microscopy coupled with energy dispersive spectroscopy. The results indicated the presence of various trace metals and metalloids on the body surface of adult individuals and in nest material, with variations associated with the type of environment. These results reinforce the potential of Neotropical social wasps as bioindicators of contamination by these elements, indicating that, like Old World species, these organisms can be effectively incorporated into environmental monitoring strategies.

Keywords: trace metals; metalloids; Polistinae; pollution; Vespinae

Sumário

INTRODUÇÃO GERAL	9
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	12
Capítulo 1.....	14
Vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) como bioindicadoras de metais pesados: panorama atual e perspectivas futuras	14
INTRODUÇÃO	15
METODOLOGIA	16
Coleta de dados	16
DISCUSSÃO	22
Perspectivas futuras e direções de pesquisa	25
CONCLUSÃO	26
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	27
Capítulo 2.....	36
Vespas sociais neotropicais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais-traço e metaloides.....	36
INTRODUÇÃO	37
MATERIAL E MÉTODOS.....	39
Áreas de estudo	39
Coletas.....	40
Análise de metais pesados em cabeças de vespas sociais adultas e em seus ninhos	40
Análise estatística.....	41
RESULTADOS.....	43
Metais por área de coleta.....	43
Teor de metais entre as espécies.....	46
Interação entre vespas sociais e ambientes com diferentes níveis de ação antrópica.....	46
Médias dos teores de metais nos ninhos e análise comparativa entre as concentrações observadas nos ninhos e nas cabeças	49
DISCUSSÃO	54
Metais nas vespas por área de coleta.....	54
Teor de metais entre <i>Polybia occidentalis</i> e <i>Protopolybia sedula</i> (Hymenoptera: Vespidae)	55
Interação entre vespas sociais e ambientes com diferentes níveis de ação antrópica.....	56
Médias de metais nos ninhos e análise comparativa entre concentrações nos mesmos e nas cabeças	56
CONCLUSÃO	57
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
CONSIDERAÇÕES FINAIS	67

INTRODUÇÃO GERAL

As vespas sociais, juntamente com abelhas, formigas, vespas solitárias e moscas-serra, integram a ordem megadiversa Hymenoptera, com mais de 150 mil espécies descritas (Aguiar *et al.*, 2013). No Brasil, vespas sociais são popularmente conhecidas apenas como vespas ou como marimbondos ou cabas, com variação regional na nomenclatura (Souza e Zanuncio, 2012). Esses insetos pertencem aos Aculeata, superfamília Vespoidea, família Vespidae, que compreende seis subfamílias: Euparagiinae, Eumeninae, Masarinae, Stenogastrinae, Polistinae e Vespinae. (Carpenter e Marques, 2001; Somavilla e Carpenter, 2021). Dentre essas, apenas Stenogastrinae, Polistinae e Vespinae apresentam comportamento social, enquanto as demais são compostas por espécies solitárias (Carpenter e Marques, 2001; Somavilla e Carpenter, 2021).

O comportamento social nas vespas é caracterizado pela formação de colônias com organização hierárquica e presença de uma ou mais fêmeas reprodutoras responsáveis pela oviposição, apresentando castas definidas (Jandt e Toth, 2015; Martin, 2020). Em contrapartida, vespas solitárias não apresentam divisão de castas nem compartilham ninhos, sendo as fêmeas responsáveis individualmente pela construção do ninho, oviposição e provisão de alimento para o desenvolvimento das larvas (Jandt e Toth, 2015; Martin, 2020; Udayakumar *et al.*, 2024).

As vespas sociais da subfamília Vespinae, também conhecidas como “yellowjackets” ou vespas do Velho Mundo, ocorrem principalmente na África, Ásia, Europa e América do Norte, não sendo nativas da região Neotropical (Martin, 2020). Já as vespas sociais neotropicais pertencem à subfamília Polistinae, que apresenta elevada diversidade e ampla distribuição, principalmente em florestas tropicais, como também em ambientes urbanos e agroflorestas (Somavilla e Carpenter, 2021). Atualmente, mais de 1.050 espécies descritas são conhecidas globalmente e, no Brasil, 381 espécies (Somavilla *et al.*, 2021). Diferenças ecológicas, comportamentais e morfológicas são evidentes entre esses dois grupos. Em Vespinae, a maioria das espécies apresenta fundação independente, na qual uma única fêmea inicia a colônia e realiza a oviposição (Martin, 2020). De maneira semelhante, dentro de Polistinae, os gêneros *Mischocyttarus* e *Polistes* (tribos Mischocyttarini e Polistini, respectivamente) também apresentam fundação independente (Somavilla e Carpenter, 2021). Por outro lado, a tribo Epiponini, composta por 19 gêneros, caracteriza-se por espécies enxameantes, nas quais múltiplas fêmeas participam da fundação e manutenção da colônia (Somavilla e Carpenter, 2021).

Essas diferenças nos modos de fundação influenciam diretamente o desenvolvimento das colônias. Colônias por fundação independente tendem a apresentar crescimento mais lento, devido à limitação de uma única fêmea responsável pelo início do ninho e oviposição (Martin, 2020). Em contraste, colônias com fundação por enxame, com divisão de trabalho e múltiplas fêmeas reprodutoras, apresentam crescimento mais rápido e maior complexidade estrutural (Udayakumar *et al.*, 2024). Além disso, diferenças morfológicas entre castas são mais evidentes em Vespinae, onde rainhas e operárias apresentam distinções no tamanho corporal e na morfologia das asas (Felippotti *et al.*, 2009). Em Polistinae, por outro lado, essas diferenças são geralmente menos pronunciadas, dificultando a distinção morfológica entre fêmeas reprodutoras e operárias (Mateus, Noll, Zucchi, 1999; Noll, Wenzel, Zucchi, 2004; De Souza *et al.*, 2016).

As vespas sociais desempenham papéis ecológicos relevantes no meio ambiente, atuando como predadoras de outros insetos, no controle biológico de artrópodes de importância agrícola, polinizadoras ocasionais e potenciais indicadoras da qualidade ambiental (De Souza *et al.*, 2010; Silva *et al.*, 2019). Estudos têm demonstrado a viabilidade da realocação de ninhos desses organismos para áreas cultivadas como estratégia complementar no manejo de pragas, evidenciando também a capacidade de adaptação das colônias a ambientes antropizados (Donovan, 2003; Prezoto *et al.*, 2019). Além disso, muitas espécies apresentam elevado grau de sinantropia, sendo frequentemente encontradas em áreas urbanas e sob influência antrópica (Detoni *et al.*, 2018; Silva *et al.*, 2019). Embora aspectos relacionados à sua ecologia, morfologia e comportamento sejam mais bem explorados na literatura com diversos artigos e livros (Prezoto *et al.*, 2021), o uso desses insetos como bioindicadores de poluição ainda permanece relativamente pouco investigado. Esse cenário evidencia a necessidade de ampliar estudos que explorem seu potencial como ferramentas no biomonitoramento ambiental.

Nesse contexto, a contaminação por metais pesados destaca-se como uma preocupação crescente, devido à sua persistência no ambiente, capacidade de bioacumulação e efeitos tóxicos sobre os organismos (Thimmegowda *et al.*, 2020; Sicard *et al.*, 2023; Hollens-Kuhr *et al.*, 2026). Considerando o comportamento de forrageio ativo, a dieta generalista e a ampla interação das vespas sociais com diferentes componentes do ambiente (Silva *et al.*, 2019; Barbosa *et al.*, 2020), esses insetos apresentam características promissoras para refletir a presença e a dinâmica desses contaminantes. Assim, investigar o uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de abordagens mais integradas e eficazes de avaliação da qualidade ambiental. Dessa forma, o objetivo foi analisar estudos já existentes com vespas sociais como bioindicadores de poluição

por metais pesados e o potencial uso de vespas sociais neotropicais como bioindicadores de metais-traço e metaloides.

Especificamente, essa tese está dividida em 2 capítulos, sendo o primeiro uma revisão sistemática dos estudos utilizando vespas sociais como bioindicadores de poluição por metais e o segundo a análise da ocorrência de metais-traço e metaloides em duas espécies de vespas sociais neotropicais ocorrendo em áreas com diferentes impactos antrópicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguiar, A.P., Deans, A.R., Engel, M.S., Forshage, M., Huber, J.T., Jennings, J.T., Johnson, N.F., Lelej, A.S., Longino, J.T., Lohrmann, V., Mikó, I., Ohl, M., Rasmussen, C., Taeger, A., & Yu, D.S.K. (2013). *Order Hymenoptera*. In: Zhang, Z.-Q. (Ed.), *Animal biodiversity: an outline of higher-level classification and survey of taxonomic richness (Addenda 2013)*. Zootaxa, 3703(1), 51–62.
- Barbosa, B.C., Maciel, T.T., Gonzaga, D.R., & Prezoto, F. (2020). Social wasps in an urban fragment: seasonality and selection of nesting substrates. *Journal of Natural History*, 54(25–26), 1581–1591.
- Carpenter, J. M.; Marques, O. M. Contribuição ao estudo dos vespídeos do Brasil (Insecta, Hymenoptera, Vespoidea, Vespidae). Cruz das Almas: Universidade Federal da Bahia, 2001. v. 2, p. 147.
- De Souza, M.M., Louzada, J., Eduardo Serrão, J., Cola Zanuncio, J. (2010). Social wasps (Hymenoptera: Vespidae) as indicators of conservation degree of riparian forests in Southeast Brazil. *Sociobiology*, 56(2), 387.
- De Souza, A. R.; Petrocelli, I.; Lino-Neto, J.; Santos, E. F.; Noll, F. B.; Turillazzi, S. (2016). Ontogenic caste differences in the Van der Vecht organ of primitively eusocial neotropical paper wasps. *PLoS One*, v. 11, n. 5, e0154521.
- Detoni, M. F. D. F. S., Barbosa, B. C., Maciel, T. T., Dos Santos, S. J. L., & Prezoto, F. (2018). Long-and short-term changes in social wasp community structure in an urban area. *Sociobiology*, 65(2), 305-311.
- Donovan, B. J. (2003). Potential manageable exploitation of social wasps, *Vespula* spp. (Hymenoptera: Vespidae), as generalist predators of insect pests. *International Journal of Pest Management*, 49(4), 281-285.
- Felippotti, G.T., Tanaka Junior, G.M., Noll, F.B., & Wenzel, J.W. (2009). Discrete dimorphism among castes of the bald-faced hornet *Dolichovespula maculata* (Hymenoptera: Vespidae) in different phases of the colony cycle. *Journal of Natural History*, 43(39-40), 2481-2490.
- Hollens-Kuhr, H., Gathof, A. K., Grossmann, A. J., & Buchholz, S. (2026). Air pollution and its multifaceted effects on insect pollinators: A review. *Ecological Entomology*, 51(1), 1-17.
- Jandt, J. M.; Toth, A. L. Physiological and genomic mechanisms of social organization in wasps (Family: Vespidae). In: *Advances in Insect Physiology*. v. 48. Academic Press, 2015. p. 95–130.
- Martin, S. J. The old world versus new world social wasps: similarities, differences, and threats. In: *Neotropical Social Wasps: Basic and Applied Aspects*. Cham: Springer International Publishing, 2020. p. 317–326.

- Mateus, S.; Noll, F. B.; Zucchi, R. Caste differences and related bionomic aspects of *Chartergellus communis*, a neotropical swarm-founding polistine wasp (Hymenoptera: Vespidae: Polistinae: Epiponini). *Journal of the New York Entomological Society*, 107 (4), p. 390–405, 1999.
- Noll, F. B., Wenzel, J. W., & Zucchi, R. (2004). Evolution of caste in Neotropical swarm-founding wasps (Hymenoptera: Vespidae; Epiponini). *American Museum Novitates*, 2004(3467), 1-24.
- Prezoto, F., Maciel, T. T., Detoni, M., Mayorquin, A. Z., & Barbosa, B. C. (2019). Pest control potential of social wasps in small farms and urban gardens. *Insects*, 10(7), 192.
- Sicard, P., Agathokleous, E., Anenberg, S. C., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2023). Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment*, 858, 160064.
- Silva, R. C., Da Silva, A. P., Assis, D. S., & Nascimento, F. S. (2019). Occurrence and nesting behavior of social wasps in an anthropized environment. *Sociobiology*, 66(2), 381-388.
- Somavilla, A.; Carpenter, J. M. Key to the genera of social wasps (Polistinae) occurring in neotropics. In: Prezoto, F.; Nascimento, F. S.; Barbosa, B. C.; Somavilla, A. (eds.). *Neotropical social wasps: basic and applied aspects*. Springer Nature Switzerland, 2021. p. 327–336.
- Souza, M. M.; Zanuncio, J. C. *Marimbondos: vespas sociais: Hymenoptera: Vespidae*. Viçosa: UFV, 2012. 79 p.
- Thimmegowda, G. G., Mullen, S., Sottolare, K., Sharma, A., Mohanta, R., Brockmann, A., Dhandapany, P. S., Olsson, S. B. (2020). A field-based quantitative analysis of sublethal effects of air pollution on pollinators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34), 20653-20661.
- Udayakumar, A.; Shamappa, V. H.; Guptar, A.; Shivalingaswamy, T. M.; Subaharan, K.; Sushil, S. N. Consequences of parasitized prey provision on the fitness and development parameters of a solitary wasp, *Rhynchium brunneum brunneum* (Vespidae: Eumeninae). *Sociobiology*, 71, (2), e10449, 2024.

Capítulo 1

Vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) como bioindicadoras de metais pesados: panorama atual e perspectivas futuras

Resumo

Níveis de poluição por material particulado têm aumentado em diferentes regiões do mundo e esse tipo de poluição está diretamente associado a atividades antrópicas. O uso de organismos vivos como bioindicadores é uma ferramenta fundamental na avaliação da qualidade do ambiente, onde a presença ou ausência de metais pode inferir mudanças nos ecossistemas. Diante disso, esta revisão tem como objetivo analisar o estado-da-arte do uso de vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) como bioindicadoras de metais pesados, buscando compreender os padrões de investigação existentes e identificar lacunas que possam orientar pesquisas futuras. Os estudos sobre vespas sociais e metais pesados foram selecionados por meio de buscas nas bases de dados SciELO, ScienceDirect, PubMed, Scopus, Web of Science e Google Acadêmico, considerando publicações disponíveis até dezembro de 2025. Para isso, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “heavy metals”, “social wasps”, “bioindicators”, “biomonitors”, and “pollution”, “Vespidae”, “Vespinae” and “Polistinae”. Artigos publicados em periódicos e revisados por pares que investigaram explicitamente o uso de vespas sociais como bioindicadoras ou biomonitoras de metais pesados foram incluídos nas análises. Doze artigos que abordaram o uso de vespas sociais como bioindicadores de metais pesados foram identificados, sendo nove realizados na Europa, com três na Finlândia, três na Polônia, dois na Itália e um na Espanha. A análise de metais em indivíduos adultos foi o procedimento mais adotado, sendo realizada em 11 dos estudos avaliados. Os metais mais frequentemente encontrados em vespas sociais foram chumbo, zinco, cádmio, arsênio e ferro. O maior número de estudos realizados na Europa pode estar relacionado ao fato de que o estudo pioneiro sobre metais em vespas ter sido conduzido nesse continente, com resultados que indicaram o potencial das vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados. Os estudos analisados mostram que ainda há lacunas importantes no uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais, principalmente em regiões de alta diversidade de espécies, como a Neotropical. a inclusão de espécies com diferentes estratégias de fundação do ninho, contribuindo para uma compreensão mais ampla do tema.

Palavras-chave: Metaloides, Polistinae; Poluição; Vespinae.

INTRODUÇÃO

Nos últimos anos, os níveis de poluição por material particulado têm aumentado em diferentes regiões do mundo (Lim *et al.*, 2020; Sicard *et al.*, 2023). Esse tipo de poluição está diretamente associado às atividades antrópicas, como os processos de industrialização, urbanização, agrícolas e mineração (Al-Swadi *et al.*, 2022; Liu *et al.*, 2022; Yang *et al.*, 2024). Uma das principais preocupações relacionadas a esses poluentes é sua ampla dispersão no ambiente, o que favorece a exposição de diversos seres vivos (Thimmegowda *et al.*, 2020; Hollens-Kuhr *et al.*, 2026).

As partículas podem ser transportadas por longas distâncias a partir de suas fontes de emissão (Phairuang *et al.*, 2020; Inobeme *et al.*, 2024) e apresentam variação em tamanho e composição (Kelly e Fussell, 2012; Hien *et al.*, 2021; Skaldina *et al.*, 2023). Muitas dessas partículas contêm metais pesados e podem se acumular em solo, água, plantas e animais (Wieczorek, Baran, Bubak, 2023; Inobeme *et al.*, 2024; Zhang *et al.*, 2024).

O acúmulo de metais pesados em animais pode provocar alterações morfológicas, fisiológicas e comportamentais, como reportado em peixes (Shahjahan *et al.*, 2022; Habib *et al.*, 2024), anfíbios (Smalling *et al.*, 2021; Marchand *et al.*, 2024), pequenos mamíferos (Wajdzik *et al.*, 2017; Hernández-Plata *et al.*, 2020), humanos (Briffa, Sinagra, Blundell, 2020; Jomova *et al.*, 2025) e insetos (Thimmegowda *et al.*, 2020; Benhadji *et al.*, 2025).

Embora possam ser afetados pelos metais poluentes, os organismos vivos podem ser utilizados como bioindicadores na avaliação da qualidade do ambiente, onde a presença ou ausência dos mesmos pode inferir mudanças nos ecossistemas (Parmar, Rawtani, Agrawal, 2016; Zaghloul *et al.*, 2020). Além disso, esses organismos podem atuar como biomonitores, possibilitando a identificação e quantificação dos níveis de poluentes em suas estruturas e tecidos (Al-Alam *et al.*, 2019, Sumudumali, Jayawardana, 2021). Neste sentido, fungos, líquens, plantas, bactérias e animais são comumente usados como bioindicadores de grau de poluição (Gerdol *et al.*, 2014).

Dentre os animais, os insetos são sensíveis às mudanças ambientais e têm sido amplamente utilizados em estudos voltados à avaliação da qualidade do ambiente (Chowdhury *et al.*, 2023; Ramola *et al.*, 2024). Abelhas, formigas, libélulas e besouros são descritos como eficientes indicadores da presença de poluentes (Celli e Maccagnani, 2003; Miguel *et al.*, 2017; Ghannem *et al.*, 2018). Entre os diferentes grupos de insetos utilizados como bioindicadores, alguns grupos sociais têm recebido destaque em estudos que avaliam a presença de metais no ambiente, especialmente as abelhas, devido ao seu amplo raio de forrageio, importância ecológica e à facilidade de amostragem (Bargańska, Ślebioda, Namieśnik, 2016; Cunningham

et al., 2022; Papa *et al.*, 2025). No entanto, outros insetos com potencial semelhante ainda são pouco explorados.

Assim como as abelhas e formigas, as vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) possuem potencial bioindicador, devido a seu comportamento ativo de forrageio, hábitos alimentares generalistas, alta diversidade e distribuição abrangente (Richter, 2000; Silva *et al.*, 2019; Somavilla *et al.*, 2021). Apesar desse potencial, estudos recentes com esses organismos têm sido direcionados em pesquisas que exibem os efeitos de pesticidas, herbicidas e fungicidas em sua morfologia, fisiologia e comportamento (De Souza *et al.*, 2023; Cappa *et al.*, 2024; De Fazi *et al.*, 2025), e poucos avaliam os efeitos de metais nesses insetos.

O uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados ainda é pouco explorado (Feldhaar e Otti, 2020), com número reduzido de estudos e distribuição geográfica dos mesmos limitada, uma vez que é um grupo cosmopolita. Essa lacuna evidencia a necessidade de ampliar as investigações sobre o tema, especialmente em regiões com alta diversidade de espécies e sob diferentes contextos ambientais, como na região Neotropical. Diante disso, essa revisão sistemática tem como objetivo analisar o uso de vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) como bioindicadoras de metais pesados, buscando compreender os padrões de investigação existentes e identificar lacunas que possam orientar pesquisas futuras.

METODOLOGIA

Coleta de dados

Esta revisão sistemática foi conduzida com base no protocolo “Preferred Reporting Items for Systematic Reviews and Meta-Analyses” (PRISMA) (Moher *et al.*, 2009), contemplando as seguintes etapas: (1) definição do escopo; (2) planejamento; (3) identificação; (4) triagem; (5) elegibilidade/avaliação; e (6) apresentação dos resultados, incluindo síntese dos achados e discussão. Os estudos sobre vespas sociais e metais pesados foram selecionados por meio de buscas nas bases de dados SciELO, ScienceDirect, PubMed, Scopus, Web of Science e Google Acadêmico, considerando publicações disponíveis até dezembro de 2025. Para isso, foram utilizadas as seguintes palavras-chave: “heavy metals”, “social wasps”, “bioindicators”, “biomonitors”, and “pollution”, “Vespidae” and “Polistinae”. Adicionalmente, buscas por referências cruzadas foram realizadas nas listas de referências dos estudos selecionados, com o objetivo de ampliar a recuperação de pesquisas pertinentes.

Apenas artigos publicados em periódicos e revisados por pares que investigaram explicitamente o uso de vespas sociais como bioindicadoras ou biomonitoras de metais pesados

foram incluídos na análise. Trabalhos acadêmicos, como monografias, dissertações, teses, capítulos de livros, livros e registros duplicados foram excluídos.

Dos artigos selecionados, foram extraídas informações sobre o local e a área de coleta, os métodos de análise de metais pesados, os elementos avaliados, as espécies amostradas, o estágio do desenvolvimento analisado, o número de ninhos e o tipo de fundação de ninho (independente ou enxame) das espécies. Essas informações permitem caracterizar os estudos disponíveis, identificar padrões metodológicos e reconhecer lacunas na literatura.

RESULTADOS

Um total de 12 artigos que abordaram o uso de vespas sociais como bioindicadores de metais pesados foram identificados (Tabela 1). O primeiro registro data de 1989, com *Dolichovespula saxonica* (Fabricius, 1793) (Vespidae: Vespinae), marcando o início das investigações nessa temática, na Polônia. Após esse estudo ocorreu um intervalo de 17 anos até a publicação seguinte, em 2006, com *Polistes dominula* (Christ, 1791) (Vespidae: Polistinae) em Florença, Itália. Uma nova pausa é registrada até o terceiro estudo, publicado 12 anos depois, seguido de um aumento em publicações nos últimos seis anos (Figura 1).

Nove dos 12 estudos encontrados foram realizados na Europa, sendo três na Finlândia, três na Polônia, dois na Itália e um na Espanha (Figura 2). Na Ásia, África e América, apenas um estudo foi constatado em cada continente na Turquia, Zimbábue e México, respectivamente (Figura 2).

Cinco dos 12 estudos foram realizados em área industrial, dois em urbana (sendo dois deles também em área rural), dois em mineradora e outros dois em área agrícola (Tabela 1). Um dos artigos não definiu o tipo de área de estudo.

A análise de metais em indivíduos adultos foi o procedimento mais adotado, sendo realizada em 11 dos estudos avaliados. Desses, três também incluíram a análise de imaturos (larvas e pupas), enquanto apenas um estudo utilizou o ninho como material de análise e este avaliou apenas a presença de cobre (Tabela 1).

As vespas utilizadas nos estudos foram todas de fundação independente, incluindo *Dolichovespula saxonica* (Fabricius, 1793), *Polistes nimpha* (Christ, 1791), *Polistes dominula* (Christ, 1791), *Vespa crabro* (Linnaeus, 1758), *Vespa velutina* (Lepeletier, 1836), *Vespula vulgaris* (Linnaeus, 1758) e *Vespula germanica* (Fabricius, 1793) (Tabela 1).

O método de análise de metais mais utilizado nos estudos foi o de espectrofotometria e espectrometria, seja por absorção atômica ou massa. Apenas um estudo fez uso de microscopia

eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia por energia dispersiva (MEV/EDS) (Tabela 1).

Os metais mais frequentemente encontrados em vespas sociais foram chumbo, zinco, cádmio, arsênio e ferro (Figura 3).

Tabela 1: Síntese dos estudos que avaliaram vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) como bioindicadoras de metais, incluindo espécie, material amostrado, local de coleta, tipo de ambiente, metais analisados e técnicas utilizadas.

Espécies	Subfamília	Material amostrado	Fundação do ninho	Área de coleta	País	Metais	Método de análise	Referência bibliográficas
<i>Dolichovespula saxonica</i>	Vespinae	Machos, fêmeas (adultos), larvas, pupas	Independente	—	Polônia	Cd, Fe, Pb e Zn	Espectroscopia de absorção atômica	Kowalczyk e Watafa (1989)
<i>Polistes dominula</i>	Polistinae	larvas, pupas e adultos	Independente	Urbana e rural	Itália	Pb	Espectrômetro de absorção atômica	Urbini <i>et al.</i> (2006)
<i>Polistes dominula</i>	Polistinae	Adultos	Independente	Urbano e rural	Espanha	Pb	Espectrofotometria de massa com plasma indutivamente acoplado	Polidori <i>et al.</i> (2018)
<i>Polistes dominula</i>	Polistinae	Ninho	Independente	Agrícola	Turquia	Cu	Espectrometria de absorção atômica com chama	Şeker e Bağrıaçık (2018)
<i>Polistes nimpha</i>	Polistinae	Adultos	Independente	Complexo industrial	Polônia	Zn, Cd e Pb	Espectrofotometria de absorção atômica	Mielczarek e Wojciechowicz-ŷytko (2020)
<i>Vespula vulgaris</i>	Vespinae	Adultos	Independente	Industrial	Finlândia	As, Co, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn	Espectrometria de massa com plasma acoplado indutivamente	Skaldina <i>et al.</i> (2020)
<i>Vespa crabro</i>	Vespinae	Adultos, pupas e larvas	Independente	Agrícola	Itália	Cd, Pb, Mg, Fe, Zn e Cu	Espectrofotometria de chama com correção de fundo por lâmpada de deutério e outra com forno de grafite	Andreani <i>et al.</i> (2021)
<i>Vespula vulgaris</i>	Vespinae	Adultos	Independente	Industrial	Finlândia	As, Cd, Co, Cu, Fe, Ni, Pb e Zn	Espectrômetro de massa de plasma indutivamente acoplado	Badejo <i>et al.</i> (2021)
<i>Polistes nimpha</i>	Polistinae	Adultos	Independente	Industrial	Polônia	Zn, Cd e Pb	Espectrometria de absorção atômica	Mielczarek <i>et al.</i> (2021)
<i>Polistes</i> sp. e <i>Belonogaster</i> sp.	Polistinae	Adultos	Independente	Mineração e área controle	Zimbábue	Cr, Ni, Mg, Se, Fe, Mn e V	Espectrometria de massas, acoplado de plasma indutivamente	Nadat <i>et al.</i> (2021)
<i>Vespula germanica</i> e <i>Vespula vulgaris</i>	Vespinae	Adultos	Independente	Industrial	Finlândia	Fe, Ni, Cu, e S	Microscopia eletrônica de varredura acoplada à espectroscopia por energia dispersiva	Skaldina <i>et al.</i> (2023)
Não informado	Polistinae	Adultos	—	Mineração e controle	México	As e Hg	Espectrofotometria de absorção atômica	Reboloso-Hernández <i>et al.</i> (2024)

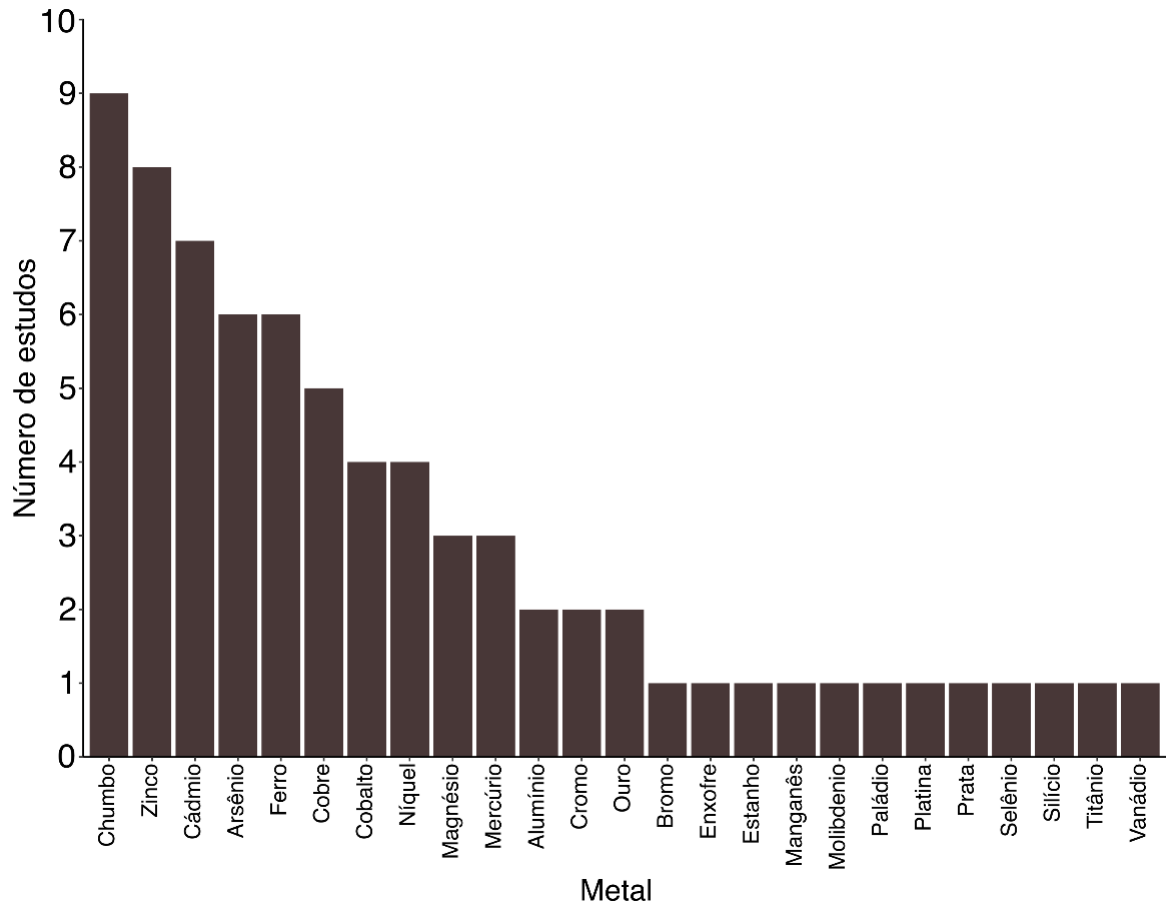


Figura 3: Metais mais frequentemente encontrados em estudos com vespas sociais como bioindicadores.

DISCUSSÃO

A identificação de apenas 12 artigos ao longo de mais de três décadas evidencia que o uso de vespas sociais como bioindicadores de metais pesados ainda é pouco explorado, como sugerido por Feldhaar e Otti (2020). O primeiro estudo, publicado em 1989 com *D. saxonica*, representa um marco inicial importante no uso de vespas sociais como bioindicadores de poluição por chumbo, mas o longo intervalo de 17 anos até o estudo seguinte sugere que a proposta não teve continuidade de imediato. Essa pausa pode refletir a preferência por outros organismos tradicionalmente utilizados como biomonitores, como as abelhas, formigas, líquens ou musgos, que são frequentemente empregados em estudos de contaminação ambiental (Al-Alam *et al.*, 2019; Parikh, Rawtani, Khatri, 2021; Mair, Irrgeher, Haluza, 2023). No entanto, os poucos estudos realizados em que o potencial das vespas sociais como bioindicadores foi explorado, mostraram que esses organismos são úteis para evidenciar poluição por metais pesados, microplásticos e entre outros poluentes (Urbini *et al.*, 2006; Skaldina *et al.*, 2020; Maciel *et al.*, 2025), em ambientes urbanos, agrícolas, rurais e de mineração. O papel das vespas sociais nos ecossistemas, sua biologia e seu comportamento de forrageio generalistas (Silva *et al.*, 2019) são características fundamentais para o uso desses insetos como bons indicadores da qualidade ambiental.

A retomada das pesquisas a partir de 2006, seguida por novo intervalo até o terceiro estudo, indica que o tema avançou de forma lenta. O aumento no número de publicações nos últimos anos pode estar relacionado à crescente preocupação com os impactos ambientais causados nos insetos (Mogren e Trumble, 2010; Feldhaar e Otti, 2020). A longa pausa entre os estudos mostra que as vespas sociais ainda são pouco estudadas como bioindicadores, apesar de possuírem características ecológicas que justificam maior atenção, incluindo o comportamento de forrageio generalista (Richter, 2000), o contato frequente com diferentes superfícies tanto para exploração alimentar, quanto para locais de nidificação, e a construção de ninhos, geralmente, expostos ao ambiente (Silva *et al.*, 2019) tornam as vespas potenciais amostradores da qualidade ambiental.

O maior número de estudos realizados na Europa pode estar relacionado ao fato de que o estudo pioneiro sobre metais em vespas ter sido conduzido nesse continente, com resultados que indicam o potencial das vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados (Kowalczyk e Watala, 1989), o que pode ter despertado, posteriormente, o interesse em novas pesquisas na mesma região. Nos demais continentes, por outro lado, o número de estudos é incipiente. Espécies de vespas sociais podem apresentar diferenças no comportamento e ecologia em

diferentes regiões do mundo, e tais diferenças podem influenciar na forma como esses organismos interagem com contaminantes ambientais. Assim, resultados obtidos na Europa não refletem o mesmo cenário para outras regiões, o que reforça a necessidade de estudos locais.

A escassez de pesquisas é ainda mais evidente em regiões de alta biodiversidade, como a região Neotropical. Apesar da expressiva diversidade de vespas sociais (Polistinae) registrada nessa região, que concentra cerca de 60% de todas as espécies globais (Somavilla e Oliveira, 2017; Menezes, Lloyd, Brady, 2020), apenas um estudo foi conduzido no México (Reboloso-Hernández *et al.*, 2024). Este estudo avaliou diferentes organismos quanto a presença de metais, incluindo plantas e outros insetos, enquanto as vespas foram identificadas apenas em nível de subfamília (Reboloso-Hernández *et al.*, 2024), limitação que dificulta uma avaliação mais precisa do potencial de espécies como bioindicadoras. Neste sentido, o Brasil abriga uma das mais ricas faunas de vespas sociais do mundo, com mais de 380 espécies catalogadas, um número superior ao registrado em qualquer outro país (Somavilla *et al.*, 2021) em biomas reconhecidos como *hotspots* de biodiversidade (Myers *et al.*, 2000) que enfrentam pressões ambientais significativas, relacionadas à expansão de atividades agrícolas e pecuárias, além de impactos decorrentes da mineração e do descarte inadequado de rejeitos (Carmo, Lanchotti, Kamino, 2020; Oliveira *et al.*, 2025). Nesse contexto, ampliar os estudos que investigam o uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais pesados pode contribuir para o desenvolvimento de ferramentas adicionais de monitoramento ambiental.

A maior realização de estudos em áreas industriais, ambientes urbanos e mineradoras, provavelmente, está associado ao fato de que as mesmas são importantes fontes de emissão de metais pesados (Yang *et al.*, 2018; Dehkordi *et al.*, 2024). Nos ambientes urbanos, a presença de diferentes fontes de poluição como a queima de combustíveis fósseis, o desgaste de freios e pneus de veículos, além de emissões resultantes de atividades industriais próximas às cidades, contribuem para a liberação de partículas contendo metais que podem se depositar em diferentes superfícies do ambiente (Urrutia-Goyes *et al.*, 2018; Gupta, 2019). Partículas de chumbo, cobre, zinco, mercúrio, ferro e arsênio são frequentemente associadas a ambientes industriais e urbanos (Wang *et al.*, 2021; Li *et al.*, 2022), e a presença desses elementos foram registrados em insetos como libélula, gafanhoto e borboleta (Azam *et al.*, 2015), abelhas (Giglio *et al.*, 2017; Breidenbach *et al.*, 2023) e vespas (Skaldina *et al.*, 2023). Por outro lado, o número reduzido de estudos em áreas agrícolas e de mineração sugere que esses ambientes ainda são pouco explorados. Em áreas agrícolas, o uso de fertilizantes, corretivos e defensivos pode introduzir diferentes elementos químicos no ambiente (Zhuang *et al.*, 2020; Rashmi *et al.*,

2020). Em regiões de mineração, a movimentação de solo, o beneficiamento de minérios e a presença de rejeitos podem favorecer a liberação e a dispersão de partículas contendo metais (Azizi *et al.*, 2022; Kasongo *et al.*, 2024).

A análise de metais em vespas adultas observada nos estudos avaliados pode estar relacionada à facilidade de coleta e identificação desses organismos. Os adultos são mais facilmente localizados durante as atividades de forrageio (Detoni e Prezoto, 2020) e, muitas vezes, estão disponíveis em maior número, o que favorece sua utilização em análises químicas. Entretanto, a análise de vespas adultas juntamente com imaturos, como larvas e pupas, pode fornecer informações adicionais sobre a transferência de elementos dentro da colônia, uma vez que os imaturos dependem do alimento fornecido pelos adultos (Hunt *et al.*, 1987; Suryanarayanan e Jeanne, 2008). Em contrapartida, o uso do ninho como material de análise foi registrado em apenas um dos estudos e o mesmo, analisou apenas a presença de cobre, o que evidencia a necessidade de estudos com outros elementos. Considerando que os ninhos das vespas sociais permanecem expostos ao ambiente por períodos relativamente longos (Giannotti, 1997), eles podem atuar como estruturas capazes de reter partículas presentes no ar, incluindo aquelas com metais. Essa característica sugere que o ninho pode registrar a deposição desses elementos ao longo do tempo, sendo uma alternativa complementar à análise de indivíduos, e uma ferramenta promissora para avaliar a presença de metais em uma determinada área. Produtos apícolas como mel, cera e componentes do ninho também foram analisados como alternativa viável para estudos de impactos ambientais por metais pesados (Formicki *et al.*, 2013; Hassona e El-Wahed, 2023; Campus *et al.*, 2024; Mushtaq *et al.*, 2024), bem como ninhos de formigas (Skaldina, Peräniemi e Sorvari, 2018).

O uso de vespas sociais, apenas de fundação independente, como os gêneros de Polistinae (*Polistes* e *Belonogaster*) e Vespinae (*Vespa* e *Vespula*), onde uma única fêmea inicia a colônia (Richards, 1971), mostra um padrão na escolha desses organismos como bioindicadores. Em contrapartida, essa abordagem evidencia uma limitação nos estudos disponíveis, uma vez que a ausência de estudos com espécies de fundação por enxame, principalmente aqueles gêneros Neotropicais diversos e abundantes, como *Polybia* e *Agelaia*, por exemplo, indica que grande parte da diversidade de vespas sociais ainda não foi explorada. Além disso, estudos comparando os dois tipos de fundação poderiam favorecer a melhor compreensão dos impactos ambientais na comunidade de vespas sociais.

A espectrometria e a espectrofotometria estão entre as técnicas mais utilizadas em estudos que investigam a presença de metais e isso, provavelmente, se deve ao fato de

permitirem identificar e quantificar esses elementos em diferentes tipos de amostras (Gandhi *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2023), sendo aplicáveis tanto para análises qualitativas quanto quantitativas (Zhang *et al.*, 2023). O uso de MEV/EDS aparece com menor frequência nesse tipo de estudo, mesmo sendo um método de análise semiquantitativo (Girão *et al.*, 2017). Mesmo assim, apresenta vantagens importantes, como a capacidade de reconhecer os metais com boa precisão, além de exigir um preparo de amostra mais simples e rápido, com menor demanda de material. Essa técnica foi empregada em pesquisas com abelhas (Vieira *et al.*, 2020; Santana *et al.*, 2022; 2023) e demonstrou bons resultados, indicando que também pode ser uma alternativa em estudos que utilizam organismos como bioindicadores de metais.

A análise de elementos como chumbo, zinco, cádmio, arsênio e ferro sendo mais comumente realizada em vespas sociais pode estar relacionado às áreas em que os estudos foram realizados. Esses elementos são comumente encontrados em grandes quantidades em ambientes impactados por atividades antrópicas, como áreas urbanas, industriais e de mineração (Briffa, Sinagra, Blundell, 2020; Teschke, 2024). Além disso, o arsênio, chumbo e cádmio são metais conhecidos por sua toxicidade e persistência no ambiente, o que suporta o interesse recorrente em monitorá-los por meio de bioindicadores (Rahman e Singh, 2019; Boudia *et al.*, 2022).

Perspectivas futuras e direções de pesquisa

Apesar dos avanços nos estudos de vespas sociais, o uso das mesmas como bioindicadoras de contaminação por metais permanece pouco explorado, particularmente na região Neotropical. Estudos futuros devem priorizar a identificação em nível de espécie, visto que as diferenças ecológicas e fisiológicas entre os táxons podem influenciar os padrões de acúmulo de metais.

Novas abordagens metodológicas devem ser incorporadas, como o uso de ferramentas moleculares (por exemplo, DNA *barcoding*) para a identificação precisa e mapeamento de espécies e técnicas ômicas para investigar as respostas fisiológicas à contaminação. Protocolos de amostragem padronizados e análises multitecduais (por exemplo, larvas, adultos, ninhos) também podem aumentar a comparabilidade entre estudos.

Programas de monitoramento de longo prazo, especialmente em *hotspots* de biodiversidade sob forte pressão antropogênica, são cruciais para avaliar as tendências temporais da contaminação. Por fim, a combinação de vespas sociais com outros grupos de bioindicadores modelos pode proporcionar uma compreensão mais abrangente da saúde do ecossistema e do risco ambiental.

CONCLUSÃO

Os estudos analisados mostram que ainda há lacunas importantes no uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais, principalmente em regiões de alta diversidade de espécies, como a Neotropical. A maior concentração de pesquisas em áreas urbanas e industriais, bem como o foco em indivíduos adultos, indica a necessidade de ampliar as abordagens, incluindo diferentes ambientes e componentes da colônia. Além disso, a inclusão de espécies com diferentes estratégias de fundação do ninho, pode contribuir para uma compreensão mais ampla do tema. Assim, estudos mais diversificados podem fortalecer o uso das vespas sociais como ferramentas no monitoramento ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Al-Alam, J., Chbani, A., Faljoun, Z., & Millet, M. (2019). The use of vegetation, bees, and snails as important tools for the biomonitoring of atmospheric pollution—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(10), 9391-9408.
- Al-Swadi, H.A., Usman, A.R., Al-Farraj, A.S., Al-Wabel, M.I., Ahmad, M., & Al-Faraj, A. (2022). Sources, toxicity potential, and human health risk assessment of heavy metals-laden soil and dust of urban and suburban areas as affected by industrial and mining activities. *Scientific Reports*, 12(1), 8972.
- Andreani, G., Ferlizza, E., Cabbri, R., Fabbri, M., Bellei, E., & Isani, G. (2020). Essential (Mg, Fe, Zn and Cu) and non-essential (Cd and Pb) elements in predatory insects (*Vespa crabro* and *Vespa velutina*): a molecular perspective. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(1), 228.
- Azam, I., Afsheen, S., Zia, A., Javed, M., Saeed, R., Sarwar, M.K., & Munir, B. (2015). Evaluating insects as bioindicators of heavy metal contamination and accumulation near industrial area of Gujrat, Pakistan. *BioMed research international*, 2015(1), 942751.
- Azizi, M., Faz, A., Zornoza, R., Martínez-Martínez, S., Shahrokh, V., & Acosta, J.A. (2022). Environmental pollution and depth distribution of metal (loid) s and rare earth elements in mine tailing. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 10(3), 107526.
- Badejo, O., Skaldina, O., Peräniemi, S., Carrasco-Navarro, V., & Sorvari, J. (2021). Phenotypic plasticity of common wasps in an industrially polluted environment in southwestern Finland. *Insects*, 12(10), 888.
- Bargańska, Ż., Ślebioda, M., & Namieśnik, J. (2016). Honey bees and their products: Bioindicators of environmental contamination. *Critical reviews in environmental science and technology*, 46(3), 235-248.
- Benhadji, N., Kurniawan, S.B., & Imron, M.F. (2025). Review of mayflies (Insecta Ephemeroptera) as a bioindicator of heavy metals and microplastics in freshwater. *Science of the Total Environment*, 958, 178057.
- Bouida, L., Rafatullah, M., Kerrouche, A., Qutob, M., Alosaimi, A.M., Alorfi, H.S., & Hussein, M.A. (2022). A review on cadmium and lead contamination: Sources, fate, mechanism, health effects and remediation methods. *Water*, 14(21), 3432.
- Breidenbach, L.R., Benner, L., Roß-Nickoll, M., Linnemann, V., & Schäffer, A. (2023). Monitoring metal patterns from urban and agrarian sites using the bumblebee *Bombus*

- terrestris* as a bioindicator. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(57), 119947-119960.
- Briffa, J., Sinagra, E., & Blundell, R. (2020). Heavy metal pollution in the environment and their toxicological effects on humans. *Heliyon*, 6(9).
- Campos, N.A., Holanda, G.H., Recktenvald, M.C., Costa-Junior, W.A., Ronqui, L., Parpinelli, R.S., Froelich, J.D., Bastos, W. R., Oliveira, D.F. (2024). Mercury in honey of stingless bee species from Brazil's south, southeast and north (Amazon) regions. *Journal of Food Composition and Analysis*, 129, 106084.
- Cappa, F., De Fazi, L., Baracchi, D., & Cervo, R. (2024). Adverse effects of the fungal biopesticide *Beauveria bassiana* on a predatory social wasp. *Science of the Total Environment*, 908, 168202.
- Carmo, F.F., Lanchotti, A.O., & Kamino, L.H. (2020). Mining waste challenges: environmental risks of gigatons of mud, dust and sediment in megadiverse regions in Brazil. *Sustainability*, 12(20), 8466.
- Celli, G., & Maccagnani, B. (2003). Honey bees as bioindicators of environmental pollution. *Bulletin of Insectology*, 56(1), 137-139.
- Chowdhury, S., Dubey, V.K., Choudhury, S., Das, A., Jeengar, D., Sujatha, B., Kumar, A., Kumar, N., Semwal, A., Kumar, V. (2023). Insects as bioindicator: A hidden gem for environmental monitoring. *Frontiers in Environmental Science*, 11, 1146052.
- Cunningham, M.M., Tran, L., McKee, C.G., Polo, R.O., Newman, T., Lansing, L., Griffiths, J. S., Bilodeau, G. J., Rott, M., Guarna, M. M. (2022). Honey bees as biomonitors of environmental contaminants, pathogens, and climate change. *Ecological Indicators*, 134, 108457.
- De Fazi, L., Cervo, R., Baracchi, D., Bruschini, C., & Cappa, F. (2025). Biopesticide exposure increases aggression without impairing nestmate recognition in a social paper wasp. *Environmental Toxicology*, 40(11), 1321-1331.
- De Souza, A.R., Prato, A., Franca, W., Santos, S., Lima, L.D., Alves, D.A., Bernardes, R.C., Santos, E.F., Nascimento, F.S., Lima, M.A.P. (2023). A predatory social wasp does not avoid nestmates contaminated with a fungal biopesticide. *Environmental Science and Pollution Research*, 30(47), 103851-103861.
- Dehkordi, M.M., Nodeh, Z.P., Dehkordi, K.S., Khorjestan, R.R., & Ghaffarzadeh, M. (2024). Soil, air, and water pollution from mining and industrial activities: Sources of pollution,

- environmental impacts, and prevention and control methods. *Results in Engineering*, 23, 102729.
- Detoni, M., & Prezoto, F. (2020). The foraging behaviour of neotropical social wasps. In *Neotropical Social Wasps: Basic and applied aspects* (pp. 47-69). Cham: Springer International Publishing.
- Feldhaar, H., & Otti, O. (2020). Pollutants and their interaction with diseases of social Hymenoptera. *Insects*, 11(3), 153.
- Formicki, G., Greń, A., Stawarz, R., Zyśk, B., & Gał, A. (2013). Metal Content in Honey, Propolis, Wax, and Bee Pollen and Implications for Metal Pollution Monitoring. *Polish Journal of Environmental Studies*, 22(1), 99-106.
- Gandhi, K., Sharma, N., Gautam, P.B., Sharma, R., Mann, B., & Pandey, V. (2022). Atomic absorption spectroscopy and flame photometry. In *Advanced analytical techniques in dairy chemistry* (pp. 219-247). New York, NY: Springer US.
- Ghannem, S., Touaylia, S., & Boumaiza, M. (2018). Beetles (Insecta: Coleoptera) as bioindicators of the assessment of environmental pollution. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 24(2), 456-464.
- Giannotti, E. (1997). Biology of the wasp *Polistes (epicnemius) cinerascens* Saussure (Hymenoptera: Vespidae). *Anais da Sociedade Entomológica do Brasil*, 26(1), 61-67.
- Giglio, A., Ammendola, A., Battistella, S., Naccarato, A., Pallavicini, A., Simeon, E., Tagarelli, A., & Giulianini, P.G. (2017). *Apis mellifera ligustica*, Spinola 1806 as bioindicator for detecting environmental contamination: a preliminary study of heavy metal pollution in Trieste, Italy. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(1), 659-665.
- Girão, A.V., Caputo, G., & Ferro, M.C. (2017). Application of scanning electron microscopy–energy dispersive X-ray spectroscopy (SEM-EDS). In *Comprehensive analytical chemistry* (Vol. 75, pp. 153-168). Elsevier.
- Gupta, V. (2019). Vehicle-generated heavy metal pollution in an urban environment and its distribution into various environmental components. In *Environmental concerns and sustainable development: volume 1: air, water and energy resources* (pp. 113-127). Singapore: Springer Singapore.
- Habib, S.S., Maqaddas, S., Fazio, F., Amouri, R.E., Shaikh, G.S., Rahim, A., Khan, K., Ullah, J., Mohany, M., Al-Emam, A. (2024). Evaluation of lead exposure effects on tissue accumulation, behavior, morphological and hemato-biochemical changes in common carp, *Cyprinus carpio*. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 86, 127523.

- Hassona, N.M., & El-Wahed, A.A.A. (2023). Heavy metal concentrations of beeswax (*Apis mellifera* L.) at different ages. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 111(3), 26.
- Hien, P.D., Bac, V.T., Thinh, N.T.H., Anh, H.L., Thang, D.D., & Nghia, N.T. (2021). A comparison study of chemical compositions and sources of PM_{1.0} and PM_{2.5} in Hanoi. *Aerosol and Air Quality Research*, 21(10), 210056.
- Hernández-Plata, I., Rodríguez, V.M., Tovar-Sánchez, E., Carrizalez, L., Villalobos, P., Mendoza-Trejo, M.S., & Mussali-Galante, P. (2020). Metal brain bioaccumulation and neurobehavioral effects on the wild rodent *Liomys irroratus* inhabiting mine tailing areas. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(29), 36330-36349.
- Hollens-Kuhr, H., Gathof, A.K., Grossmann, A.J., & Buchholz, S. (2026). Air pollution and its multifaceted effects on insect pollinators: A review. *Ecological Entomology*, 51(1), 1-17.
- Hunt, J.H., Jeanne, R.L., Baker, I., & Grogan, D.E. (1987). Nutrient dynamics of a swarm-founding social wasp species, *Polybia occidentalis* (Hymenoptera: Vespidae). *Ethology*, 75(4), 291-305.
- Inobeme, A., Natarajan, A., Pradhan, S., Adetunji, C.O., Devolli, A., Chauhan, C., Mathew, J.J., Inobeme, J., Pal, K., Singh, K.R.B., Pandey, S.S. (2024). Probing heavy metals in tropospheric particulate matter—An approach towards sustainability. *Journal of Molecular Liquids*, 412, 125822.
- Jomova, K., Alomar, S.Y., Nepovimova, E., Kuca, K., & Valko, M. (2025). Heavy metals: toxicity and human health effects. *Archives of toxicology*, 99(1), 153-209.
- Kasongo, J., Alleman, L.Y., Kanda, J.M., Kaniki, A., & Riffault, V. (2024). Metal-bearing airborne particles from mining activities: A review on their characteristics, impacts and research perspectives. *Science of the Total Environment*, 951, 175426.
- Kelly, F.J., & Fussell, J.C. (2012). Size, source and chemical composition as determinants of toxicity attributable to ambient particulate matter. *Atmospheric Environment*, 60, 504-526.
- Kowalczyk, J.K., & Watala, C. (1989). Content of some heavy metal ions in various developmental stages of the social wasp *Dolichovespula saxonica* (Fabr.) (Hymenoptera, Vespidae). *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 43(3), 415-420.
- Li, F.J., Yang, H.W., Ayyamperumal, R., & Liu, Y. (2022). Pollution, sources, and human health risk assessment of heavy metals in urban areas around industrialization and urbanization-Northwest China. *Chemosphere*, 308, 136396.

- Lim, C.H., Ryu, J., Choi, Y., Jeon, S.W., & Lee, W.K. (2020). Understanding global PM_{2.5} concentrations and their drivers in recent decades (1998–2016). *Environment International*, 144, 106011.
- Liu, Y., Wang, R., Zhao, T., Zhang, Y., Wang, J., Wu, H., & Hu, P. (2022). Source apportionment and health risk due to PM₁₀ and TSP at the surface workings of an underground coal mine in the arid desert region of northwestern China. *Science of The Total Environment*, 803, 149901.
- Maciel, T.T., Brito, S., Barbosa, B.C., & Oliveira, M.L. (2025). First record of microfibers associated with insects in the Amazon: social wasps (Hymenoptera: Vespidae). *Revista de la Sociedad Entomológica Argentina*, 84(3), 303-303.
- Mair, K.S., Irrgeher, J., & Haluza, D. (2023). Elucidating the role of honey bees as biomonitors in environmental health research. *Insects*, 14(11), 874.
- Marchand, G., Fliniaux, I., Titran, P., Uchimura, Y.T., Bodart, J. F., Lepers, A.H., Cailliau, K., Marin, M. (2024). Cadmium induces physiological and behavioral changes associated with 180 kDa NCAM lower expression and higher polysialic acid, in the African clawed *Xenopus laevis* tadpoles. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 273, 116119.
- Menezes, R.S., Lloyd, M.W., & Brady, S.G. (2020). Phylogenomics indicates Amazonia as the major source of Neotropical swarm-founding social wasp diversity. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 287(1928), 10.
- Mielczarek, A., & Wojciechowicz-Żyto, E.T. (2020). Bioaccumulation of heavy metals (Zn, Pb, Cd) in *Polistes nimphus* (Christ, 1791) (Hymenoptera, Vespidae) living on contaminated sites. *Polish Journal of Environmental Studies*, 29(6), 4249-4256.
- Mielczarek, A., Mielczarek, Ł., & Wojciechowicz-Żyto, E. (2021). The influence of heavy metals on the shape and asymmetry of wings of female *Polistes nimpha* (Hymenoptera, Vespidae) living on contaminated sites. *Ecotoxicology*, 30(9), 1854-1861.
- Miguel, T.B., Oliveira-Junior, J.M.B., Ligeiro, R., & Juen, L. (2017). Odonata (Insecta) as a tool for the biomonitoring of environmental quality. *Ecological Indicators*, 81, 555-566.
- Mogren, C.L., & Trumble, J.T. (2010). The impacts of metals and metalloids on insect behavior. *Entomologia Experimentalis et Applicata*, 135(1), 1-17.
- Mushtaq, A., Khalid, S., Noor, M.J., & Khanoranga. (2025). Honey bee products as bio indicator of heavy metals pollution and health risk assessment through the consumption of multifloral honey collected in Azad Kashmir, Pakistan. *Biological Trace Element Research*, 203(4), 2099-2113.

- Myers, N., Mittermeier, R. A., Mittermeier, C.G., Da Fonseca, G.A., & Kent, J. (2000). Biodiversity hotspots for conservation priorities. *Nature*, 403(6772), 853-858.
- Nadat, Y.T., Kylin, H., Sithole, R., Lesch, V., & Bouwman, H. (2021). The wasp as a terrestrial indicator of environmental metal composition: evidence from Zimbabwe. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(6), 1726-1739.
- Oliveira, F.É.R., de Almeida Ferreira, E., Fernandes, R., Tavares, V.N.S., de Almeida Araújo, Y., Lima, J. L., Antunes, L.F.S., Chagas, N.R.C., Freitas, P.L.N., Lemos, C.T., Fernandes, A.N., Silva, E.F. (2025). Droughts, livestock expansion, and Forest degradation: A 37-year assessment of landscape change in a semiarid municipality of Brazil. *Science of The Total Environment*, 986, 179733.
- Parmar, T.K., Rawtani, D., & Agrawal, Y.K. (2016). Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. *Frontiers in life science*, 9(2), 110-118.
- Papa, G., Pellicchia, M., Capitani, G., & Negri, I. (2025). The use of honey bees (*Apis mellifera* L.) to monitor airborne particulate matter and assess health effects on pollinators. *Environmental Science and Pollution Research*, 32(16), 10357-10369.
- Parikh, G., Rawtani, D., & Khatri, N. (2021). Insects as an indicator for environmental pollution. *Environmental Claims Journal*, 33(2), 161-181.
- Phairuang, W., Inerb, M., Furuuchi, M., Hata, M., Tekasakul, S., & Tekasakul, P. (2020). Size-fractionated carbonaceous aerosols down to PM_{0.1} in southern Thailand: Local and long-range transport effects. *Environmental Pollution*, 260, 114031.
- Polidori, C., Pastor, A., Jorge, A., & Pertusa, J. (2018). Ultrastructural alterations of midgut epithelium, but not greater wing fluctuating asymmetry, in paper wasps (*Polistes dominula*) from urban environments. *Microscopy and Microanalysis*, 24(2), 183-192.
- Rahman, Z., & Singh, V.P. (2019). The relative impact of toxic heavy metals (THMs) (arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr)(VI), mercury (Hg), and lead (Pb)) on the total environment: an overview. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(7), 419.
- Ramola, G.C., Rawat, N., Singh, R., Sajwan, A.S., Sahu, L., & Rawat, P. (2024). Insects as ecological indicators: A review. *Internacional. Journal of Environment Climate Change*, 14, 260-279.
- Rashmi, I., Roy, T., Kartika, K. S., Pal, R., Coumar, V., Kala, S., & Shinoji, K.C. (2020). Organic and inorganic fertilizer contaminants in agriculture: Impact on soil and water resources. In *Contaminants in Agriculture: Sources, Impacts and Management* (pp. 3-41). Cham: Springer International Publishing.

- Rebollos-Hernández, C.A., Vallejo-Pérez, M.R., Carrizales-Yáñez, L., Garrigos-Lomelí, G.J., Razo-Soto, I., & Diaz-Barriga, F. (2024). Arsenic and mercury exposure in different insect trophic guilds from mercury mining areas in Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5), 422.
- Richter, M. R. (2000). Social wasp (Hymenoptera: Vespidae) foraging behavior. *Annual Review of Entomology*, 45(1), 121-150.
- Santana, S.E.A., Serrão, J.E., De Carvalho, C.A.L., de Abreu Júnior, P.B., & Waldschmidt, A.M. (2023). Chemical profile of elements in the stingless bee *Melipona scutellaris* (Hymenoptera: Apidae: Meliponini) from sites with distinct anthropogenic activities. *Biological Trace Element Research*, 201(11), 5431-5440.
- Santana, S.E.A., Silva, A.P., Serrão, J.E., de Mello Affonso, P.R.A., Nunes, L.A., & Waldschmidt, A.M. (2022). Chemical profile of elements in the stingless bee *Melipona quadrifasciata anthidioides* (Hymenoptera: Apidae). *Biological Trace Element Research*, 200(8), 3885-3889.
- Şeker, F., & Bağrıaçık, N. (2018). Determination of the copper accumulation in the nest materials of *Polistes dominulus* and *Polistes nimpha* (Hymenoptera: Vespidae: Polistinae). *Kafkas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi*, 11(1), 1-5.
- Shahjahan, M., Taslima, K., Rahman, M.S., Al-Emran, M.D., Alam, S. I., & Faggio, C. (2022). Effects of heavy metals on fish physiology—a review. *Chemosphere*, 300, 134519.
- Sicard, P., Agathokleous, E., Anenberg, S.C., De Marco, A., Paoletti, E., & Calatayud, V. (2023). Trends in urban air pollution over the last two decades: A global perspective. *Science of The Total Environment*, 858, 160064.
- Silva, R. C., Da Silva, A. P., Assis, D. S., & Nascimento, F. S. (2019). Occurrence and nesting behavior of social wasps in an anthropized environment. *Sociobiology*, 66(2), 381-388.
- Skaldina, O., Cizek, R., Peräniemi, S., Kolehmainen, M., & Sorvari, J. (2020). Facing the threat: common yellowjacket wasps as indicators of heavy metal pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27(23), 29031-29042.
- Skaldina, O., Łukowski, A., Leskinen, J.T., Koistinen, A.P., & Eeva, T. (2023). Mobile samplers of particulate matter – Flying omnivorous insects in detection of industrial contamination. *Science of the Total Environment*, 867, 161511.
- Skaldina, O.; Peraniemi, S.; Sorvari, J. Ants and their nests as indicators for industrial heavy metal contamination. *Environmental Pollution*, 2018, 240, 574–581.

- Somavilla, A., & de Oliveira, M. L. (2017). Social wasps (Vespidae: Polistinae) from Ducke Reserve, Amazonas, Brazil. *Sociobiology*, 64(1), 125-129.
- Smalling, K.L., Oja, E.B., Cleveland, D.M., Davenport, J.M., Eagles-Smith, C., Grant, E.H.C., Kleeman, P.M., Halstead, B.J., Stemp, K.M., Tornabene, B.J., Bunnell, Z.J., Hossack, B.R. (2021). Metal accumulation varies with life history, size, and development of larval amphibians. *Environmental Pollution*, 287, 117638.
- Somavilla, A., Barbosa, B.C., Souza, M.M., & Prezoto, F. List of species of social wasps from Brazil, pp. 293-316. In: PREZOTO, F., NASCIMENTO, F.S., BARBOSA, B.C., SOMAVILLA, A. (eds). Neotropical social wasps: basic and applied aspects. Springer Nature Switzerland, 2021.
- Sumudumali, R.G.I., & Jayawardana, J.M.C.K. (2021). A review of biological monitoring of aquatic ecosystems approaches: with special reference to macroinvertebrates and pesticide pollution. *Environmental management*, 67(2), 263-276.
- Suryanarayanan, S., & Jeanne, R.L. (2008). Antennal drumming, trophallaxis, and colony development in the social wasp *Polistes fuscatus* (Hymenoptera: Vespidae). *Ethology*, 114(12), 1201-1209.
- Teschke, R. (2024). Copper, iron, cadmium, and arsenic, all generated in the universe: elucidating their environmental impact risk on human health including clinical liver injury. *International Journal of Molecular Sciences*, 25(12), 6662.
- Thimmegowda, G.G., Mullen, S., Sottolare, K., Sharma, A., Mohanta, R., Brockmann, A., Dhandapany, P.S., Olsson, S.B. (2020). A field-based quantitative analysis of sublethal effects of air pollution on pollinators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34), 20653-20661.
- Urbini, A., Sparvoli, E., & Turillazzi, S. (2006). Social paper wasps as bioindicators: a preliminary research with *Polistes dominulus* (Hymenoptera Vespidae) as a trace metal accumulator. *Chemosphere*, 64(5), 697-703.
- Vieira, K.I.C., Werneck, H.D.A., Santos Júnior, J.E.D., Flores, D.S.D.S., Serrão, J.E., Campos, L A.D.O., & Resende, H.C. (2020). Bees and the Environmental Impact of the Rupture of the Fundão Dam. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 16(5), 631-635.
- Wajdzik, M., Halecki, W., Kalarus, K., Gąsiorek, M., & Pająk, M. (2017). Relationship between heavy metal accumulation and morphometric parameters in European hare (*Lepus europaeus*) inhabiting various types of landscapes in southern Poland. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 145, 16-23.

- Wang, J.M., Jeong, C.H., Hilker, N., Healy, R.M., Sofowote, U., Debosz, J., Su, J., Munoz, A., & Evans, G.J. (2021). Quantifying metal emissions from vehicular traffic using real world emission factors. *Environmental Pollution*, 268, 115805.
- Wieczorek, J., Baran, A., & Bubak, A. (2023). Mobility, bioaccumulation in plants, and risk assessment of metals in soils. *Science of The Total Environment*, 882, 163574.
- Yang, Q., Li, Z., Lu, X., Duan, Q., Huang, L., & Bi, J. (2018). A review of soil heavy metal pollution from industrial and agricultural regions in China: Pollution and risk assessment. *Science of the Total Environment*, 642, 690-700.
- Yang, Q., Liu, G., Falandysz, J., Yang, L., Zhao, C., Chen, C., Sun, Y., Zheng, M., Jiang, G. (2024). Atmospheric emissions of particulate matter-bound heavy metals from industrial sources. *Science of the Total Environment*, 947, 174467.
- Zhang, Z., Wu, H., Zhang, A., Tan, M., Yan, S., & Jiang, D. (2024). Transfer of heavy metals along the food chain: A review on the pest control performance of insect natural enemies under heavy metal stress. *Journal of Hazardous Materials*, 478, 135587.
- Zhang, M., Song, H., Shang, J., Liu, X., Qi, S., & Li, H. (2023). Spectroscopic methods for isotope analysis of heavy metal atoms: A review. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 207, 106740.
- Zhuang, Z., Mu, H. Y., Fu, P.N., Wan, Y.N., Yu, Y., Wang, Q., & Li, H.F. (2020). Accumulation of potentially toxic elements in agricultural soil and scenario analysis of cadmium inputs by fertilization: A case study in Quzhou county. *Journal of Environmental Management*, 269, 110797.

Capítulo 2

Vespas sociais neotropicais como potenciais bioindicadores de contaminação por metais-traço e metaloides

Resumo

Preocupações com desmatamento, poluição e expansão urbana, principalmente, devido à agricultura, mineração e indústria têm aumentado. Metais-traço e metaloides acumulam no solo, plantas, água e externa e internamente, em animais, podendo afetar o sistema imunológico, morfologia e percepção olfativa dos insetos. O conhecimento de espécies com potencial para uso como bioindicadores de poluição metais, é importante. Vespas sociais podem utilizar recursos contaminados na alimentação e nidificação e, por isso, podem ser bioindicadores. O objetivo do estudo foi avaliar metais-traço e metaloides na superfície corporal e ninhos de vespas sociais Neotropicais, em ambientes com diferentes níveis de ação antrópica. As vespas sociais *Protopolybia sedula* e *Polybia occidentalis* foram coletadas, por busca ativa, em áreas impactadas por rejeitos de mineração, cultivo de café e área urbana, no estado de Minas Gerais, Brasil. Os indivíduos foram transferidos vivos para paraformaldeído a 4%. A cabeça das vespas foi separada do corpo e a presença de metais-traço e metaloides, na mesma, avaliada por Microscopia Eletrônica de Varredura e Espectroscopia de raio-X por dispersão de energia (MEV/EDS). Fragmentos de ninhos das espécies também foram analisados. Dezesete metais e metaloides foram identificados na superfície da cabeça em vespas dessas áreas, com valores diferentes para os teores de cálcio, cádmio, cromo) e potássio, entre as três áreas amostradas. As concentrações relativas de cálcio, magnésio e potássio foram menores em *Pr. sedula* que em *Po. occidentalis* nas áreas de mineração, cultivo e urbana, respectivamente e os de cromo e silício maiores em área de mineração. Os teores de metais e metaloides foram maiores nas vespas da área de mineração, seguida por aquelas das áreas de cultivo e urbana. Além disso, as concentrações de metais-traço e metaloides nos ninhos foram maiores que aquelas quantificadas nos indivíduos adultos. Vespas sociais Neotropicais são potenciais bioindicadores para avaliar áreas contaminadas por metais.

Palavras-chave: biomonitores, marimbondos, metais pesados, poluição.

INTRODUÇÃO

A crescente preocupação com as alterações ambientais provocadas por atividades humanas, como desmatamento, poluição e expansão urbana, tem motivado investigações sobre os impactos dessas ações na biodiversidade (Tscharntke *et al.*, 2005; Foley *et al.*, 2011; Newbold *et al.*, 2015). A agricultura, mineração e atividade industrial estão entre as principais ameaças à integridade dos ecossistemas, afetando especialmente a fauna de insetos (Thimmegowda *et al.*, 2020; Maciel *et al.*, 2022; Skaldina *et al.*, 2023). Estes organismos podem acumular resíduos de diferentes fontes poluentes e, por isso, são promissores para avaliações de ambientes contaminados (Zhang *et al.*, 2021).

Metais-traço e metaloides tendem a se acumular em solos, plantas, corpos d'água e nas partes interna e externa de organismos (Zhang *et al.*, 2021), podendo provocar alterações no sistema imunológico (Borowska e Pyza, 2011), na morfologia (Mielczarek *et al.*, 2021) e percepção olfativa (Wang *et al.*, 2023) de insetos.

Metais-traço são elementos naturalmente presentes no ambiente, incluindo micronutrientes essenciais, metais não essenciais e altamente tóxicos. Os metaloides, por sua vez, podem incluir metais e não metais, que frequentemente se comportam como metais tóxicos (Tang *et al.*, 2023; Jeong *et al.*, 2023). Estes elementos foram relatados em insetos, como por exemplo, *Apis mellifera* Linnaeus, 1758 (Hymenoptera: Apidae) (Negri *et al.*, 2015), *Musca domestica* Linnaeus, 1758 (Diptera: Muscidae) (Wang *et al.*, 2023a) e *Vespula vulgaris* Linnaeus, 1758 (Hymenoptera: Vespidae) (Skaldina *et al.*, 2023).

Metais-traço e metaloides podem afetar, diretamente, insetos e serem transferidos ao longo das cadeias tróficas, gerando efeitos tóxicos em diferentes níveis ecológicos (Zhang *et al.*, 2021), com impactos, ainda pouco conhecidos, na biologia e comportamento de insetos (Thimmegowda *et al.*, 2020; Wang *et al.*, 2023a).

A dispersão e acúmulo de poluentes reforça a necessidade de métodos eficazes, acessíveis e de baixo custo para o monitoramento da contaminação ambiental. Nesse contexto, as vespas sociais (Vespidae: Polistinae) representam um grupo promissor, ainda pouco explorado em estudos sobre poluição ambiental (Feldhaar e Otti, 2020).

No Brasil, ocorrem cerca de 380 espécies de vespas sociais (Somavilla *et al.*, 2021) em todos os biomas e adaptadas a diferentes tipos de ambiente (Barbosa *et al.*, 2016).

Diferentes funções ecológicas são desempenhadas pelas vespas sociais, incluindo predação de pragas urbanas e agrícolas (Southon *et al.*, 2019; Elisei *et al.*, 2021), polinização (Clemente *et al.*, 2012; Sühs *et al.*, 2021) e integração de cadeias alimentares (Santos *et al.*,

2007; Detoni *et al.*, 2021) logo, perpassam por diferentes habitats (Brock, Cini e Sumner, 2021). Tais características apontam esses indivíduos como potenciais amostradores ambientais, quando comparado a outros insetos. Sendo assim, a relevância ecológica e aplicabilidade prática justificam a escolha desses insetos como modelo para investigações sobre acúmulo de partículas e metais pesados em ambientes impactados.

Vespas sociais podem absorver substâncias benéficas, como ferro e sais minerais e bioacumular elementos tóxicos como arsênio, cádmio, chumbo, mercúrio e selênio, além de outros resíduos químicos diversos (Skaldina *et al.*, 2020; Batista *et al.*, 2022). O material, coletado pelas vespas para alimentação e construção dos ninhos, pode estar contaminado por poluentes de fontes como a agricultura, a atividade industrial, o transporte e mineração (Nadat *et al.*, 2021).

As vespas sociais *Protopolybia sedula* (de Saussure, 1854) e *Polybia occidentalis* (Olivier, 1792) (Hymenoptera: Vespidae) são espécies de Epiponini, com características sociais avançadas, como cuidado com a prole, sobreposição de gerações e divisão reprodutiva e de trabalho, e ocorrendo em colônias numerosas e estáveis (Richards, 1978).

Polybia occidentalis é amplamente distribuída na região Neotropical, do México ao sul do Brasil e norte da Argentina, sendo mais comum na América do Sul e *Pr. sedula* é amplamente distribuída na América do Sul. Essas vespas são comuns em biomas do Brasil, incluindo a Amazônia, Floresta Atlântica e Cerrado, adaptando-se a diferentes condições ambientais e climáticas, em áreas florestadas e ambientes alterados, incluindo zonas rurais e urbanas (Richards, 1978). A escolha dessas espécies se deve à sua ocorrência abundante nas áreas estudadas. Características comportamentais, ecológicas e estruturais que tornam essas vespas modelos apropriados para avaliação da qualidade ambiental (Richards, 1978; Wenzel, 1998).

No Brasil, vespas sociais, como bioindicadores de poluição por metais-traço e metaloides, não foram estudadas. No entanto, a atuação destes insetos em diferentes níveis tróficos e seu deslocamento por diferentes ambientes, colocam esses organismos como potenciais biomonitores de áreas poluídas. Assim, o objetivo foi avaliar o potencial uso de vespas sociais Neotropicais como bioindicadores de metais-traço e metaloides, em ambientes com diferentes níveis de ação antrópica. Especificamente foram avaliadas a presença destes elementos na cabeça e ninhos de *Po. occidentalis* e *Pr. sedula*.

MATERIAL E MÉTODOS

Áreas de estudo

O estudo foi conduzido em três áreas de Floresta Atlântica, no estado de Minas Gerais, Brasil, com diferentes níveis de ação antrópica, e com as seguintes descrições:

Área periurbana: o *Campus* da Universidade Federal de Viçosa está situado no município de Viçosa (20°45' S, 42°52' O). O *campus*, embora arborizado com espécies exóticas e com espécies nativas da Floresta Atlântica, possui constante fluxo de veículos e pessoas (Figura 1). Além disso, o município de Viçosa caracteriza-se por sua área territorial reduzida e com pouca atividade industrial, quando comparado aos grandes centros urbanos.

Área agrícola: Vespas sociais foram coletadas em plantio com 600 a 700 mil pés de café, margeados por um pequeno fragmento de Floresta Atlântica, e fonte de água no município de Araponga (20°39' S, 42°27' O) (Figura 1). Esse plantio é, segundo os proprietários, orgânico com uso apenas de fertilizantes para o solo.

Área impactada por mineração: coletas foram realizadas, em novembro de 2023, às margens do Rio Doce, município de Mariana (20°25'S 43°41' O) (Figura 1), região afetada pelo rompimento da barragem da mineradora Samarco em novembro de 2015, que resultou no escoamento e deposição de rejeitos de mineração. Este é um dos maiores desastres ambientais do país e estudos têm sido desenvolvidos para avaliar os impactos causados na fauna e flora, e a contaminação das mesmas (Almeida *et al.*, 2018).

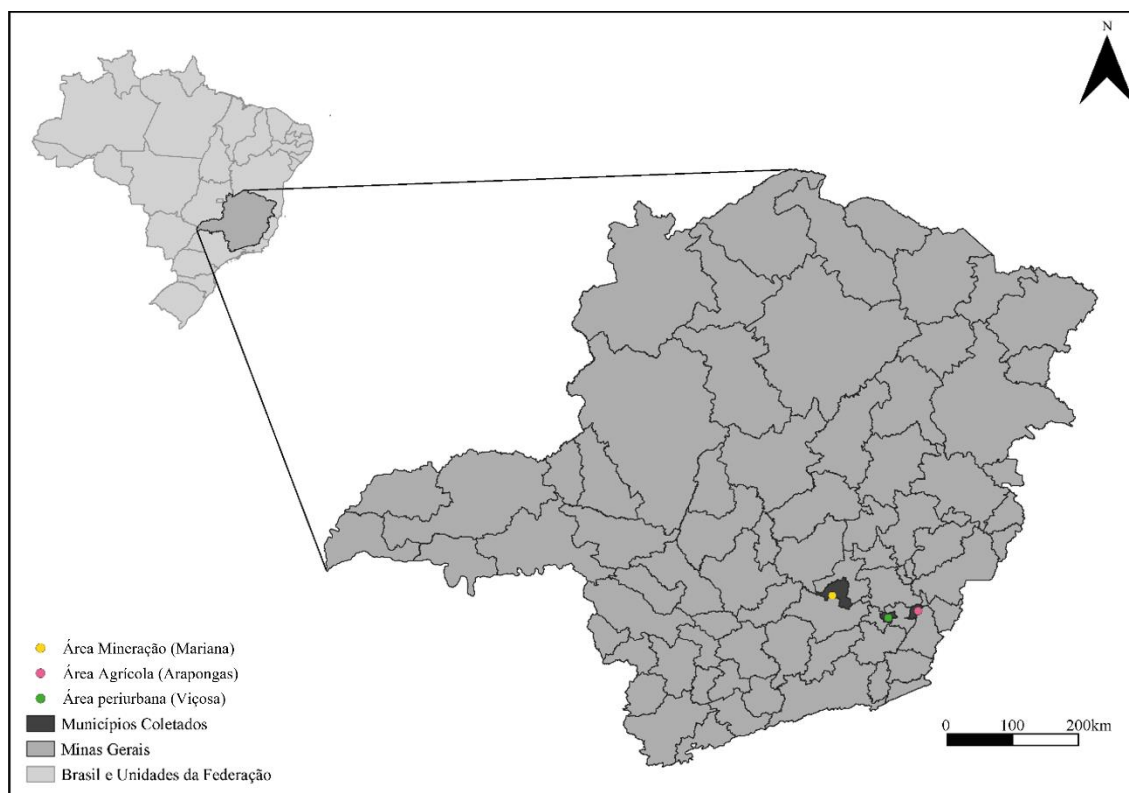


Figura 1. Localização dos municípios de coleta de adultas das vespas sociais *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula* (Hymenoptera: Vespidae) no estado de Minas Gerais, sudeste do Brasil. Pontos coloridos indicam as áreas de mineração (Mariana, em amarelo), agrícola (Araponga, em rosa) e área periurbana (Viçosa, em verde). Os municípios de coleta estão destacados em preto.

Coletas

As colônias das vespas sociais foram coletadas de novembro de 2023 a abril de 2024, por busca ativa, utilizando sacos plásticos transparentes para capturar e armazenar os ninhos e espécimes dessas vespas. Os espécimes foram imobilizados a 4°C e transferidos para microtubos contendo paraformaldeído a 4% e encaminhados ao Laboratório de Ultraestrutura de Insetos da Universidade Federal de Viçosa para preparo e análises de metais no corpo dos mesmos.

Os gêneros das vespas foram identificados utilizando a bibliografia especializada (Somavilla e Carpenter, 2021) e as espécies foram identificadas pelo Dr. Alexandre Somavilla, do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), e depositadas na Coleção Zoológica de Invertebrados do respectivo instituto.

Análise de metais pesados em cabeças de vespas sociais adultas e em seus ninhos

Trinta e seis cabeças de vespas sociais foram utilizadas, sendo 18 de *Po. occidentalis* e 18 de *Pr. sedula*. Desse total, 12 cabeças foram analisadas em cada área, sendo seis de cada espécie.

A escolha da cabeça se deve ao fato de ser a estrutura mais indicada para fornecer informações sobre o ambiente e possíveis contaminações e ser, facilmente, dissecada e processada em laboratório (Skaldina *et al.*, 2023). As cabeças, das vespas foram separadas do corpo, sob estereomicroscópio, com o auxílio de tesouras e pinças inox e lavadas, e as antenas retiradas. Essas cabeças, foram desidratadas em série crescente de etanol, (70%, 80%, 90%, 95% e 99,5%) por 10 minutos cada, transferidas para hexametildisilazano por 10 minutos e secas ao ar. Amostras das mesmas foram fixadas em suportes de alumínio, cobertas com carbono em evaporador Quorum Q150T e analisadas por espectroscopia de raios-x por energia dispersiva (EDX, IXRF Systems, EUA) acoplada a microscópio eletrônico de varredura LEO 1430 VP (MEV/EDS) no Núcleo de Microscopia e Microanálise da Universidade Federal de Viçosa.

Alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cálcio (Ca), cobre (Cu), chumbo (Pb), cromo (Cr), ferro (Fe), magnésio (Mg), manganês (Mn), mercúrio (Hg), níquel (Ni), potássio (K), selênio (Se), silício (Si) e zinco (Zn) foram os metais analisados nas amostras de vespas pois foram citados em pesquisas em áreas impactadas pelos rejeitos da lama da barragem da mineradora Samarco (Carvalho *et al.*, 2017; Davila *et al.*, 2020). Esses metais foram analisados em amostras das demais áreas para comparações entre as mesmas.

Os metais foram também analisados nos ninhos das vespas sociais *Po. occidentalis* e *Pr. sedula*, utilizando um ninho de cada espécie por área, totalizando seis ninhos. Esses ninhos, após a coleta, foram mantidos em potes fechados, evitando contato com o ambiente externo. Após esse processo, um pequeno fragmento do ninho, com a base das células de cria foi selecionada para a análise. A análise dos metais nos ninhos foi realizada como descrito acima em MEV/EDS, exceto a fixação em paraformaldeído a 4%.

Análise estatística

Os dados de cada metal foram analisados, separadamente, e correlacionados entre as áreas de coleta e espécies de vespas. Diferenças por área de coleta, comparação do teor de metais entre as espécies e interação entre espécies e área foram analisadas pelos testes de normalidade de Shapiro-Wilk, e o teste de Levene para homogeneidade de variâncias.

Para as diferenças por área de coleta, os dados que apresentaram normalidade e homogeneidade, foi realizada análise de variância (ANOVA), e os dados não paramétricos, foram submetidos ao teste de Kruskal-Wallis.

Na comparação do teor de metais entre as espécies, os dados com distribuição normal foram submetidos ao teste t-Student, e os não paramétricos ao teste de Wilcoxon.

Para as análises de interação entre espécies e a área, os dados que atenderam aos critérios de normalidade e homogeneidade de variâncias, foram analisados por ANOVA fatorial, para cada metal. Todas as análises foram conduzidas usando o software R versão 4.4.0 (R Core Team, 202X, 2026), com nível de significância de 5%.

Para a análise nos ninhos foi calculado a média dos teores dos metais-traço e metaloides. Uma análise descritiva comparativa foi realizada para comparar o teor dos metais nas cabeças e nos ninhos das vespas sociais.

RESULTADOS

Os 17 metais examinados foram identificados nas cabeças e ninhos de *Po. occidentalis* e *Pr. sedula* nas três áreas analisadas.

Metais por área de coleta

Os teores de Cd ($p = 0,0245$) (Figura 2A) e Cr ($p = 0,055$) (Figura 2B) foram maiores na área de mineração do que na agrícola e periurbana. O teor de Ca foi menor nas áreas de mineração e urbana ($p = 0,00136$) (Figura 2C) que na de cultivo e o de K, menor na área de mineração ($p = 0,007$) que nas demais (Figura 2D).

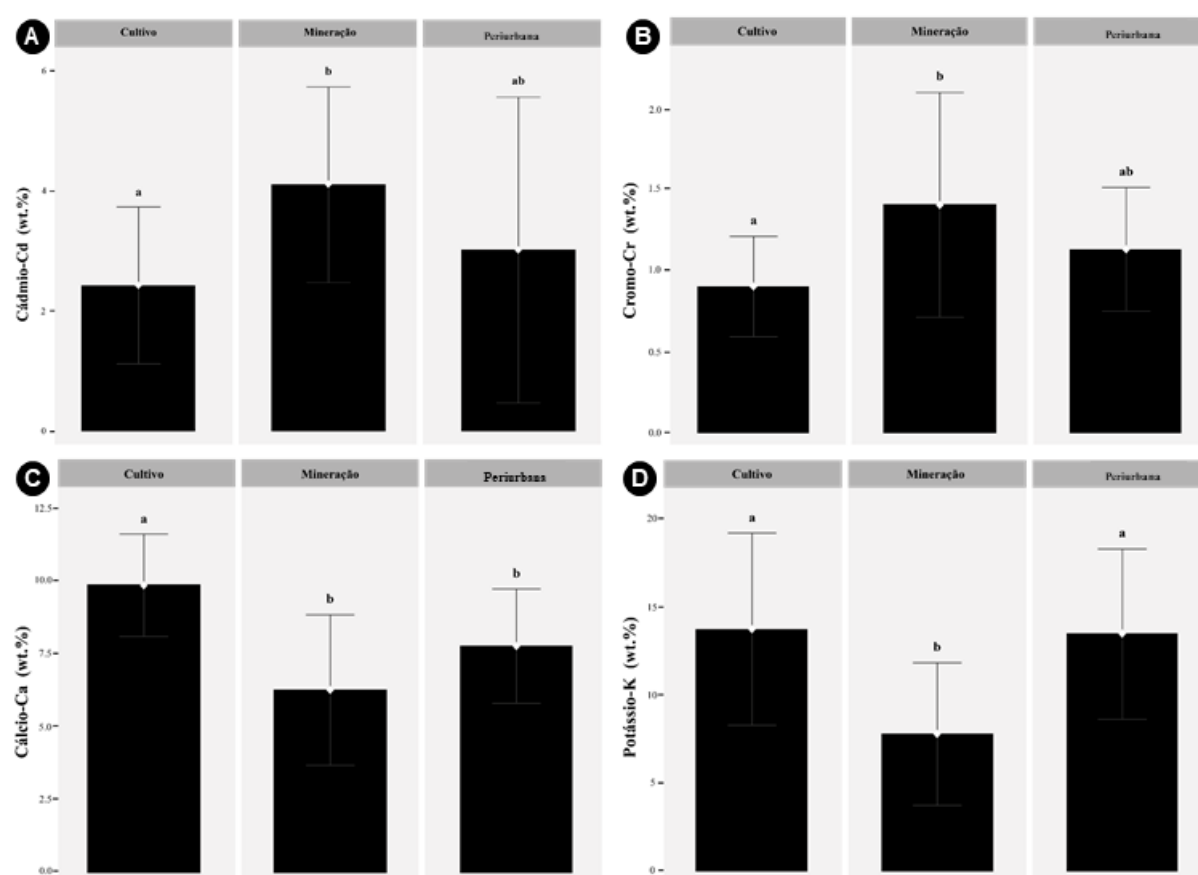


Figura 2. Teores de cádmio (A) cromo (B), cálcio (C) e potássio (D) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana obtidas de *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula* (Hymenoptera: Vespidae). As colunas representam os valores médios obtidos, e as barras verticais indicam o desvio padrão. Letras diferentes sobre a barras indicam as diferenças significativas entre as áreas ($p < 0,05$).

Os teores de Al, As, Ba, Pb, Cu, Fe, Mg, Mn, Hg, Ni, Se, Si e Zn não diferiram entre as áreas avaliadas ($p > 0,05$) (Figura 3 e 4).

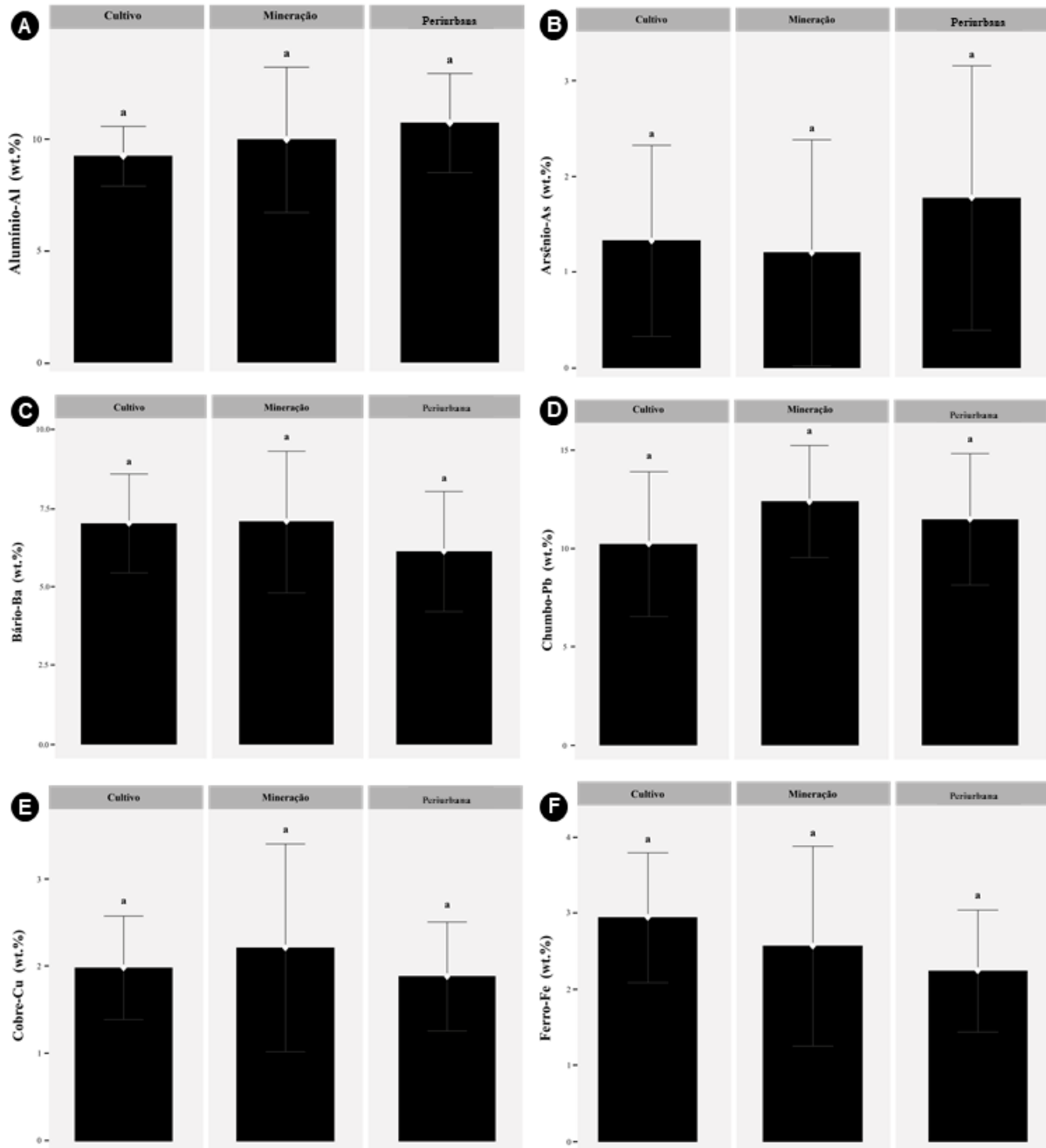


Figura 3. Teores médios de alumínio (A), arsênio (B), bário (C), chumbo (D), cobre (E) e ferro (F) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana obtidas de *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula* (Hymenoptera: Vespidae). As colunas representam os valores médios obtidos, e as barras verticais indicam o desvio padrão. Letras diferentes sobre as barras indicam as diferenças significativas entre as áreas ($p < 0,05$).

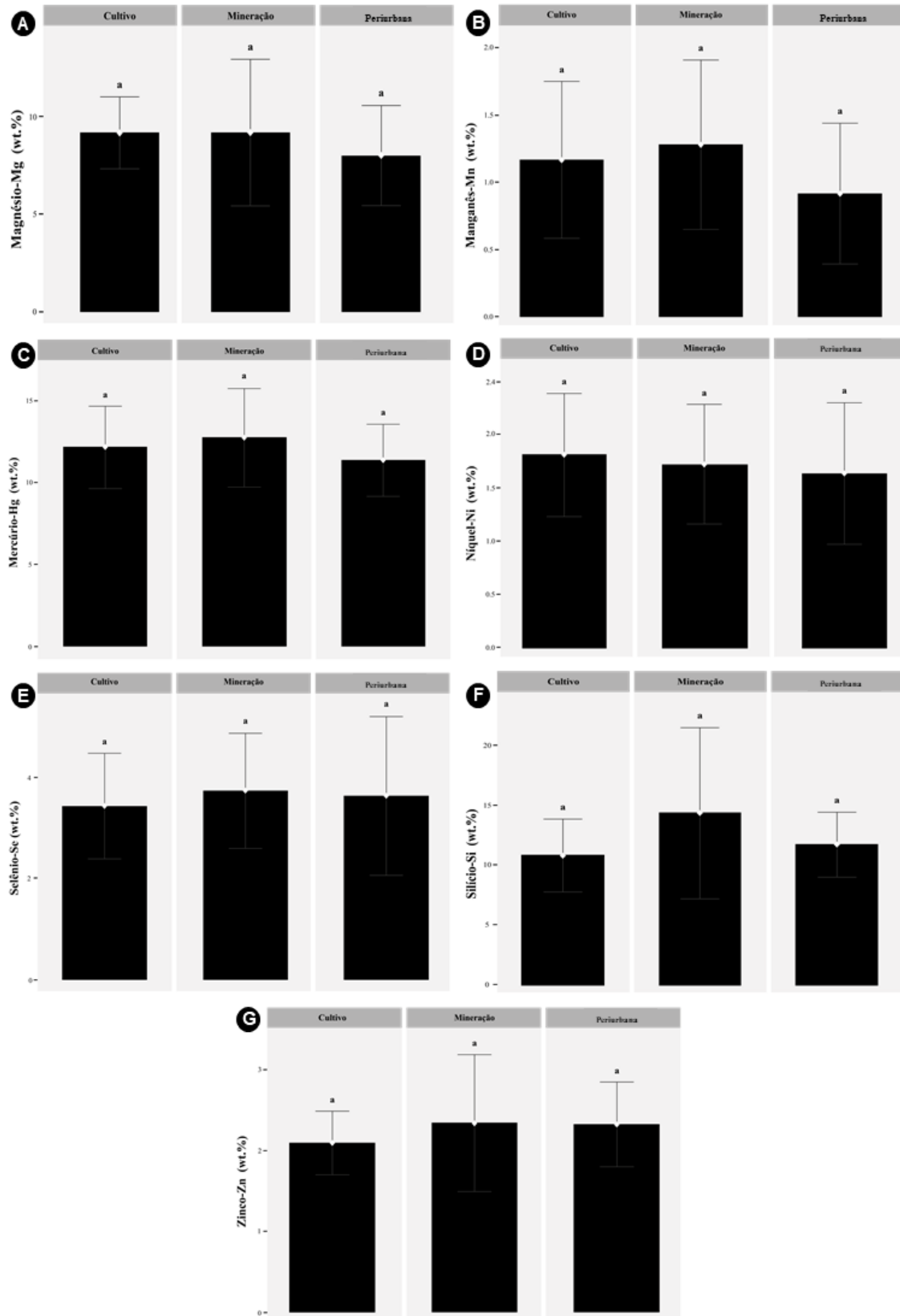


Figura 4. Teores médios de magnésio (A), manganês (B), mercúrio (C), níquel (D), selênio (E), silício (F) e zinco (G) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana obtidas de *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula* (Hymenoptera: Vespidae). As colunas representam os

valores médios obtidos, e as barras verticais indicam o desvio padrão. Letras diferentes sobre as barras indicam as diferenças significativas entre as áreas ($p < 0,05$).

Teor de metais entre as espécies

A comparação da abundância relativa dos elementos analisados entre as duas espécies de vespas, indicou que Ca ($p = 9,77 \times 10^{-5}$) (Figura 6A) e Mg ($p = 0,0276$) (Figura 6B) em área de mineração e K em áreas de cultivo ($p = 0,0024$) e urbana ($p = 5,40 \times 10^{-5}$) (Figura 6C) foram maiores em *Po. occidentalis* que em *Pr. sedula*.

Os teores de Cr ($p = 0,025$) (Figura 6D) e Si ($p = 0,0128$) (Figura 6E) foram maiores em *Pr. sedula* que em *Po. occidentalis* em áreas de mineração, mas similares nas demais áreas.

Interação entre vespas sociais e ambientes com diferentes níveis de ação antrópica

O teor de Al foi maior em *Po. occidentalis* na área periurbana comparado ao de *Pr. sedula*, e nas demais áreas, maior em *Pr. sedula* (Figura 7A).

O teor de As foi maior em *Pr. sedula* na área periurbana, seguido daqueles nas de cultivo e mineração e o de *Po. occidentalis* semelhante nas três áreas (Figura 7B). Em relação ao Ba, *Po. occidentalis* apresentou teores semelhantes entre áreas de cultivo e mineração, com redução na periurbana, enquanto *Pro. sedula* mostrou teores semelhantes entre as três áreas (Figura 7C).

No caso do Ca, em *Po. occidentalis* diminuiu da área de cultivo à periurbana e foi maior em *Pr. sedula* na área de cultivo, seguido da periurbana e mineração (Figura 7D). O teor de Cd em *Po. occidentalis* foi maior na área de mineração, seguida por cultivo e periurbana e em *Pr. sedula* foi menor na área de cultivo que nas de mineração e periurbana (Figura 7E). Para o Cr em *Po. occidentalis*, o teor foi semelhante entre as áreas e em *Pr. sedula* maior na de mineração (Figura 7F).

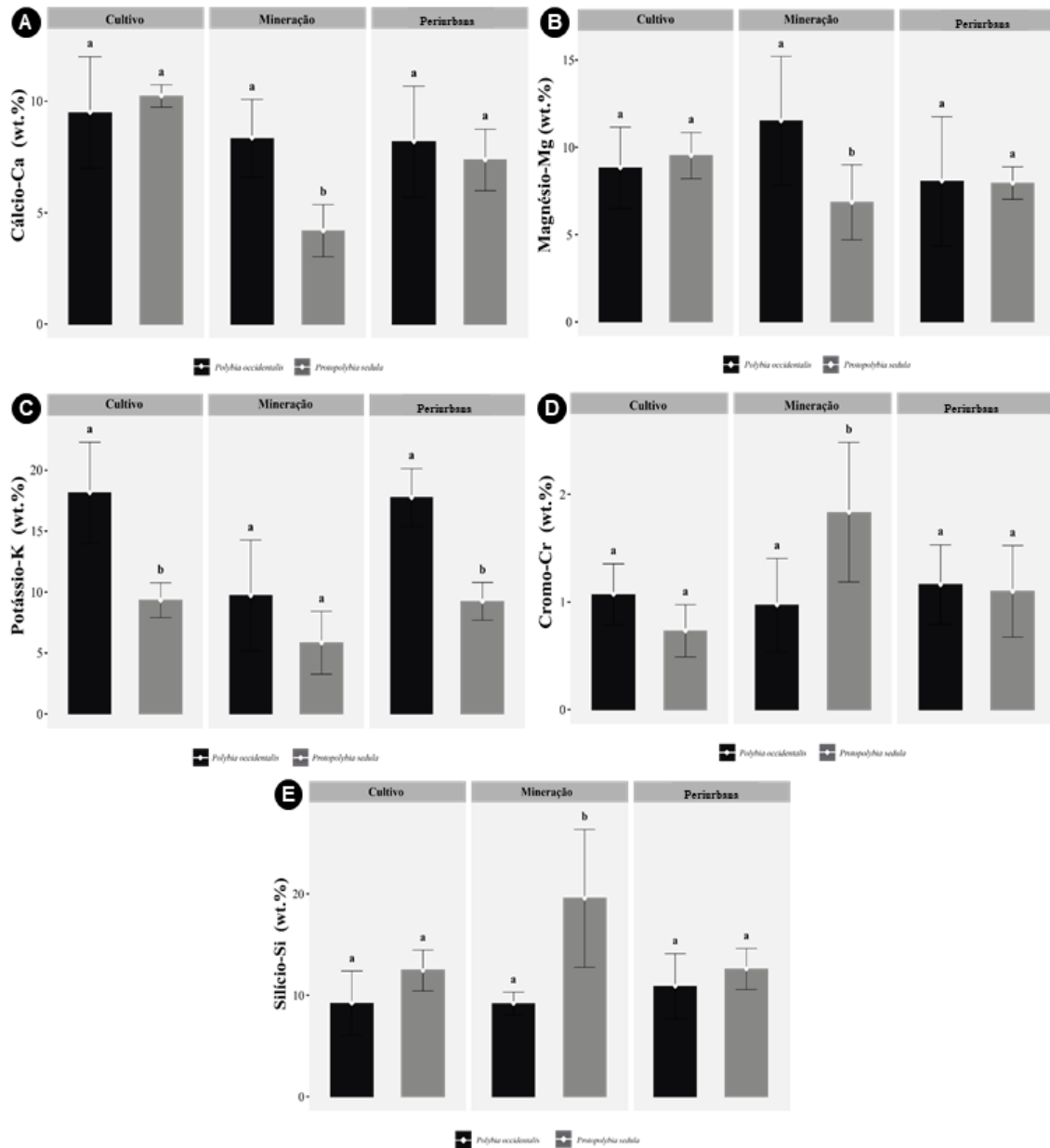


Figura 6. Concentração de cálcio (A), magnésio (B), potássio (C), cromo (D) e silício (E) na cabeça de *Protopolybia sedula* (barra cinza) e *Polybia occidentalis* (barra preta) em áreas de cultivo, mineração e periurbana. As colunas representam os valores médios e as barras de erro indicam o desvio padrão. Letras diferentes sobre as barras indicam as diferenças significativas entre as espécies e as áreas analisadas ($p < 0,05$).

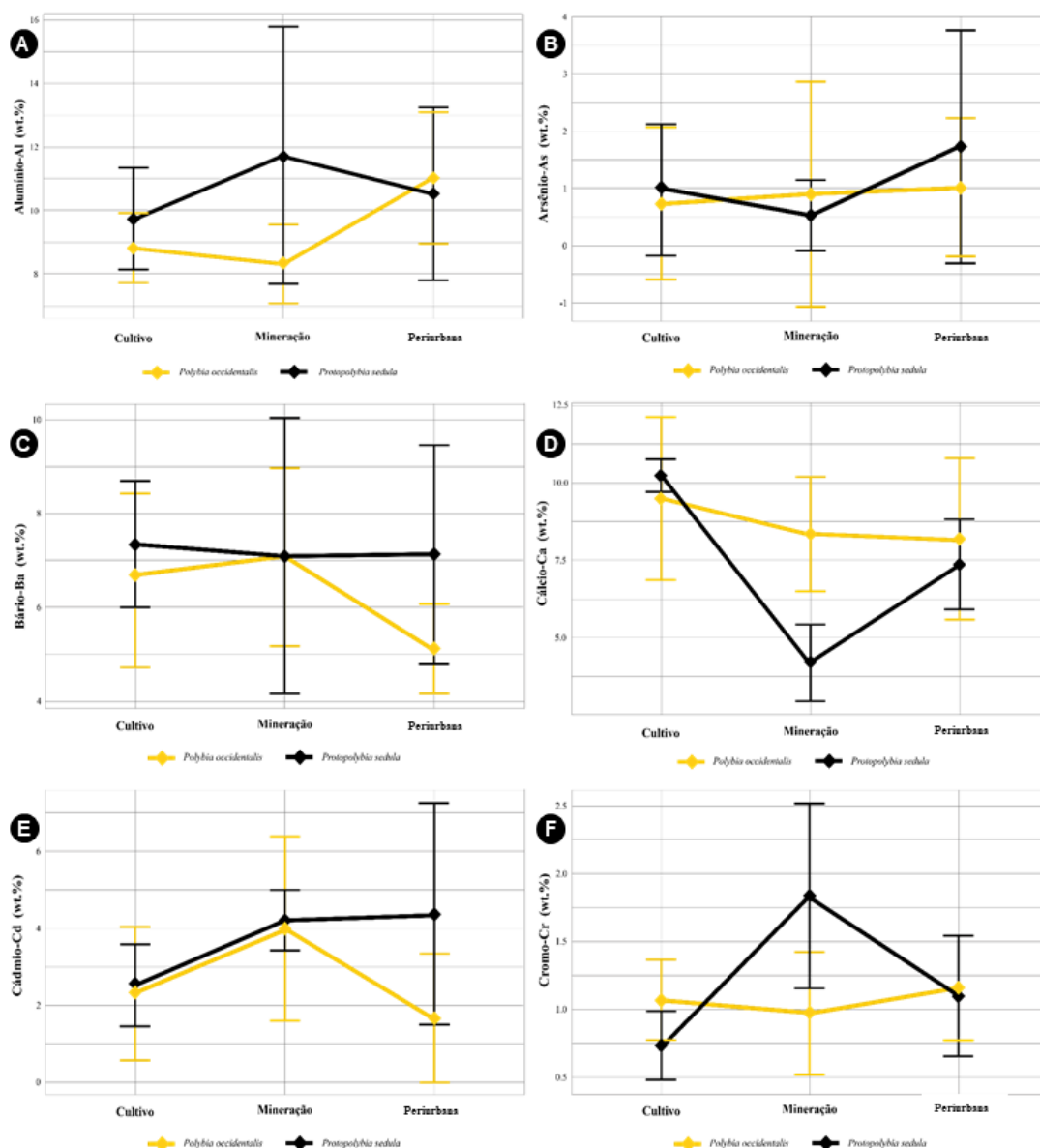


Figura 7. Teor de alumínio (A), arsênio (B), bário (C), cálcio (D), cádmio (E) e cromo (F) nas vespas sociais *Protopolybia sedula* (linha preta) e *Polybia occidentalis* (linha amarela) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana. Pontos são a média e barras o desvio padrão.

O teor de Cu em *Po. occidentalis* foi maior nas áreas de cultivo e mineração que na periurbana e em *Pr. sedula* semelhante nas três áreas (Figura 8A). Quanto ao Hg, em *Po. occidentalis* foi maior na área de mineração e em *Pr. sedula* na de cultivo que nas demais (Figura 8B).

Para o K, em *Po. occidentalis*, foi maior nas áreas de cultivo e periurbana que na de mineração e o em *Pr. sedula* semelhante entre as áreas (Figura 8C). Em relação ao Mg em *Po. occidentalis* foi maior na área de mineração que na periurbana e cultivo, e em *Pr. sedula* na de

cultivo que na de mineração e periurbana (Figura 8D). Para o Pb em *Po. occidentalis* o teor foi maior na área de mineração e o de *Pr. sedula* na periurbana (Figura 8E).

O teor de Si, em *Po. occidentalis*, foi semelhante nas áreas de cultivo e mineração e maior na periurbana e o de *Pr. sedula* maior na de mineração (Figura 8F).

Não foram observadas interações significativas entre espécies e áreas para os teores de Fe, Mn, Ni, Se e Zn. O Fe diminuiu da área de cultivo para a mineração e periurbana, em ambas as espécies (Figura 9A). Para o Mn, ambas as espécies apresentaram variações semelhantes, em *Pr. sedula* com aumento discreto na área de mineração e o de *Po. occidentalis*, semelhante entre as três áreas (Figura 9B). Quanto ao teor de Ni, em *Pr. sedula* e *Po. occidentalis*, diminuiu da área de cultivo até a periurbana (Figura 9C).

O teor de Se, em ambas as espécies, foi menor na área cultivo que na periurbana (Figura 9D). Em relação ao teor de Zn, em *Pr. sedula* e *Po. occidentalis*, aumentou da área de cultivo para a de mineração e periurbana (Figura 9E).

Médias dos teores de metais nos ninhos e análise comparativa entre as concentrações observadas nos ninhos e nas cabeças

As concentrações dos 17 metais estudados variaram entre os ninhos, com maiores teores de As, Ba, Cr, Cu, Hg, K, Mn, Ni e Se em *Pr. sedula* que em *Po. occidentalis*, enquanto o teor de Al, Ca, Cd, Fe, Mg, Pb, Si e Zn foi maior em *Po. occidentalis* (Figura 10).

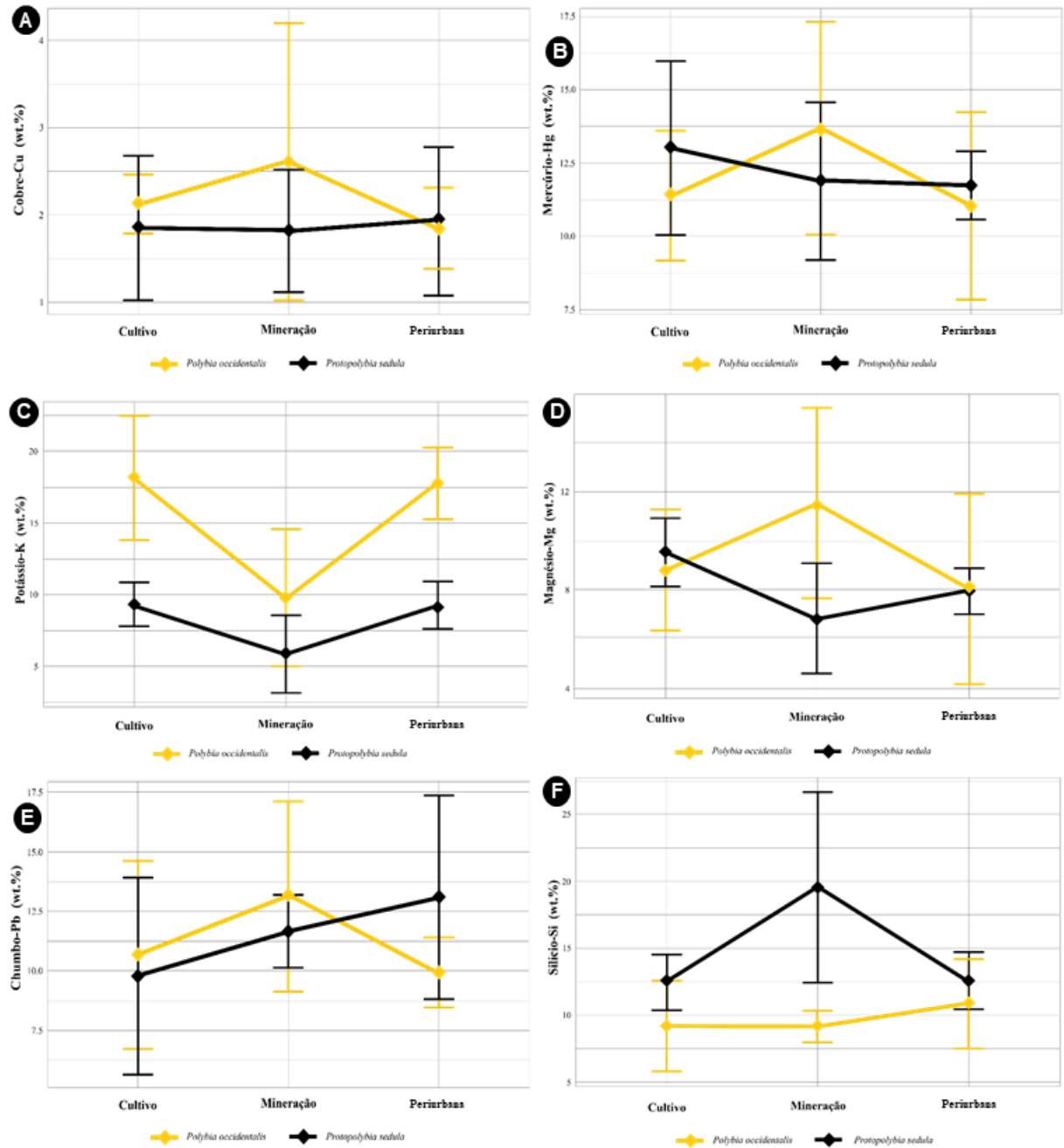


Figura 8. Teor de cobre (A), mercúrio (B), potássio (C), magnésio (D), chumbo (E) e silício (F) nas vespas sociais *Protopolybia sedula* (linha preta) e *Polybia occidentalis* (linha amarela) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana. Pontos são a média e barras o desvio padrão.

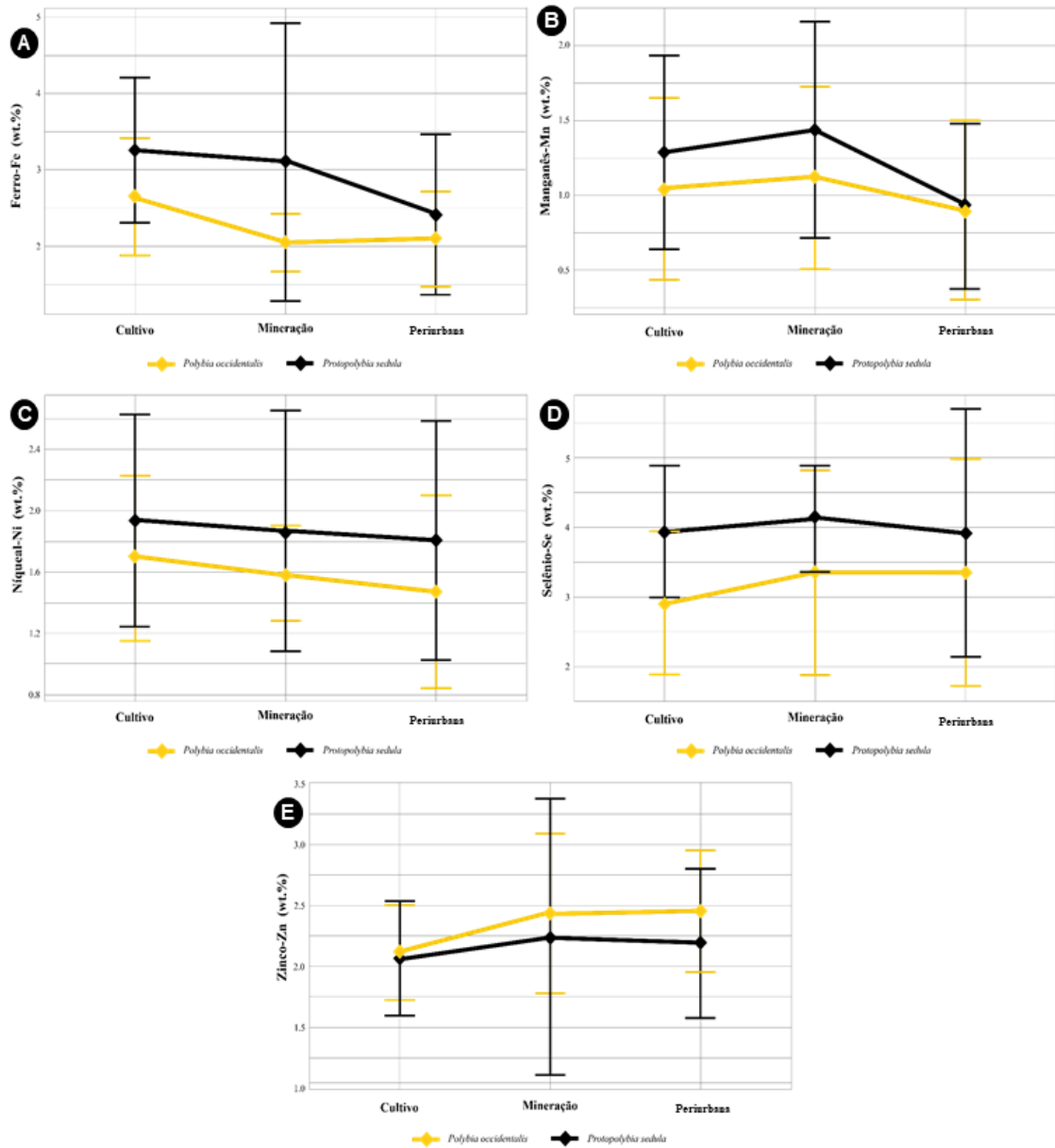


Figura 9. Teor de ferro (A), manganês (B), níquel (C), selênio (D) e zinco (E) nas vespas sociais *Protopolybia sedula* (linha preta) e *Polybia occidentalis* (linha amarela) nas áreas de cultivo, mineração e periurbana. Pontos são a média e barras o desvio padrão.

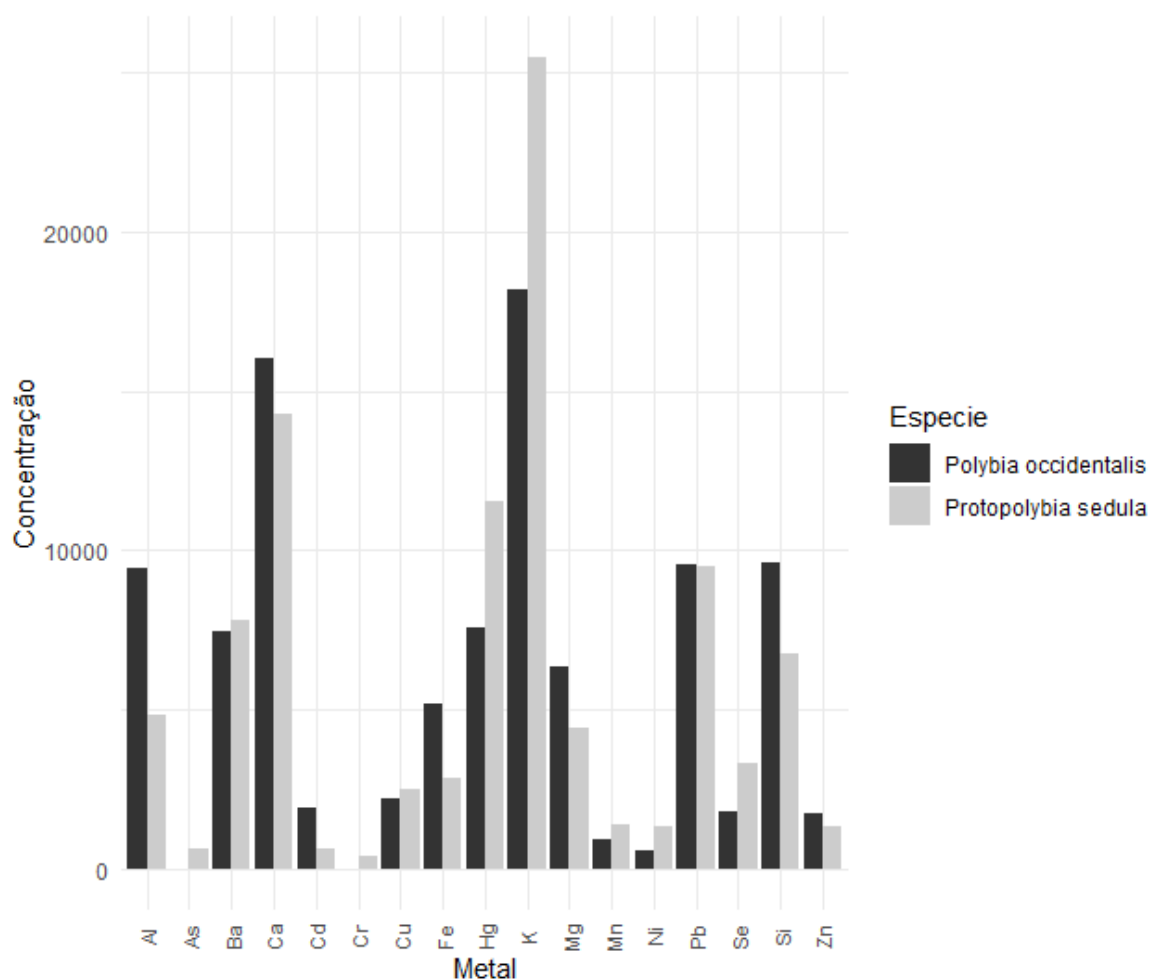


Figura 10. Proporção média dos metais-traço e metaloides detectados em ninhos de *Protopolybia sedula* e *Polybia occidentalis*.

A análise comparativa dos elementos entre cabeças e ninhos revelou que Al, Ba, Ca, Cd, Cu, Fe, Hg, K, Mg, Mn, Ni, Pb, Se, Si e Zn tiveram maiores teores nos ninhos do que na cabeça, em *Po. occidentalis*, enquanto que apenas As e Cr foi maior na cabeça (Tabela 1). Para os metais analisados em *Pr. sedula*, todas os teores foram maiores no ninho do que na cabeça (Tabela 1).

Tabela 1. Análise descritiva comparativa da proporção média dos metais na cabeça e no ninho de *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula*, com diferenças entre os compartimentos e o local de maior acúmulo.

Espécie	Metal	Cabeça	Ninho	Ninho – cabeça	Maior
<i>Po.occidentalis</i>	Al	9,38	9443	9433,61	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	As	0,88	0,06	-0,82	Cabeça
<i>Po. occidentalis</i>	Ba	6,30	7458,33	7452,03	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Cd	2,67	1902	1899,32	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Ca	8,67	16035,33	16026,65	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Pb	11,25	9568	9556,74	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Cu	2,20	2237	2234,80	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Cr	1,06	0,69	-0,36	Cabeça
<i>Po. occidentalis</i>	Fe	2,26	5210,66	5208,40	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Mg	9,46	6363	6353,53	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Mn	1,02	940,50	939,47	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Hg	12,05	7555,66	7543,62	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Ni	1,58	564,13	562,55	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	K	15,21	18187,66	18172,45	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Se	3,20	1803,33	1800,12	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Si	9,75	9598	9588,24	Ninho
<i>Po. occidentalis</i>	Zn	2,33	1740,66	1738,32	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Al	10,66	4831,33	4820,67	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	As	1,07	647,33	646,25	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Ba	7,18	7838,33	7831,14	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Cd	3,70	624,37	620,66	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Ca	7,26	14254	14246,73	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Pb	11,52	9491,33	9479,81	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Cu	1,86	2518,33	2516,46	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Cr	1,22	423,38	422,16	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Fe	2,92	2887,33	2884,41	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Mg	8,10	4462	4453,89	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Mn	1,22	1377,33	1376,11	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Hg	12,21	11535	11522,78	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Ni	1,86	1354,93	1353,06	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	K	8,13	25465,33	25457,19	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Se	3,99	3309,66	3305,67	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Si	14,86	6783,33	6768,46	Ninho
<i>Pr. sedula</i>	Zn	2,17	1365,48	1363,30	Ninho

DISCUSSÃO

Metais nas vespas por área de coleta

O maior teor de Cd e Cr nas vespas em áreas de mineração pode estar associado à extração de minério, quando metais pesados podem ser liberados e acumulados no solo (Shi *et al.*, 2022). Isto pode resultar em concentrações mais elevadas de elementos, como semelhante ao relatado para Cd, na região de Guangxi, China (Zhao *et al.*, 2020). A maior concentração de Cr nas vespas da área de mineração pode ser justificada devido este metal ser, naturalmente, encontrado em rochas metarmórficas e ultramáficas (Bolaños-Benítez *et al.*, 2021), onde a extração e lixiviação dessas rochas podem aumentar sua concentração no solo (Bolaños-Benítez *et al.*, 2021). A rocha itabirítica, a principal matéria prima utilizada nas áreas de mineração de ferro da área coletada, é uma rocha metamórfica (Almeida *et al.*, 2018), cuja composição inclui a cromita, que é constituída de ferro e cromo e estes elementos, além de Al e Mn, foram encontrados em rejeito da lama do rompimento da Barragem do Fundão, nesta área (Almeida *et al.*, 2018). Além do registro de Cr, quantidades baixas de Cd também foram encontradas, o que corrobora com o achado desses metais nas vespas sociais na área de mineração.

O maior teor de Ca em vespas da área de cultivo que nas de mineração e periurbana pode estar relacionado ao tipo de uso do solo, especialmente pelo fato de o cultivo tradicional do café ser uma monocultura, intensivamente manejada com insumos agrícolas (Ramírez-Builes *et al.*, 2020; Biswas *et al.*, 2024). Além disso, o uso de corretivos como o calcário (CaCO_3) para neutralizar a acidez do solo, pode aumentar a disponibilidade de Ca no ambiente (Wang *et al.*, 2023b).

A maior quantidade de K na cabeça das vespas da área periurbana pode estar associado a atividades antrópicas como queima de combustíveis fósseis, transporte e indústria (Mikhailova *et al.*, 2019) como relatado para seu aumento em áreas urbanas e suburbanas dos Estados Unidos da América, 1979 a 2020, relacionado à atividade humana (Conrad-Rooney *et al.*, 2023). Em áreas de cultivo, a presença de K pode ser dividido ao fato que esse elemento é um dos principais componentes de fertilizantes agrícolas (Mikhailova *et al.*, 2019), como adubação com NPK (Zhang *et al.*, 2017), contribuindo para a nutrição e crescimento de plantas (Mikhailova *et al.*, 2019). A presença do K, em áreas de mineração não é comum, mas depende do material extraído. Rochas máficas, ultramáficas e áreas com solo argiloso são pobres em K (Hamilton e Mountjoy, 1965). A análise granulométrica dos rejeitos da lama de Fundão caracterizou o material como argila, areia e silte (Almeida *et al.*, 2018), justificando o baixo teor de K nesta área, comparado com a periurbana e de cultivo.

A ausência de diferenças significativas nos teores de alumínio, níquel, ferro, cobre, zinco, arsênio, manganês, magnésio, selênio, bário, silício, mercúrio e chumbo entre as áreas estudadas, podem estar associados a baixos teores dos mesmos nesses locais, o transporte de partículas de contaminantes. Além disso, a possibilidade desses elementos serem aerotransportados pode explicar sua presença, mesmo em locais distantes de fontes de contaminação, como indústrias e mineração (Prabhakar *et al.*, 2014).

Teor de metais entre *Polybia occidentalis* e *Protopolybia sedula* (Hymenoptera: Vespidae)

Os menores teores de Ca, Mg e K em *Pr. sedula* que em *Po. occidentalis* pode ser justificado por diferenças no comportamento de forrageio entre essas vespas. *Polybia occidentalis* e vespas do gênero *Protopolybia* podem voar, respectivamente, por, até, 300 e 75 metros do ninho (Santos *et al.*, 2001, Junior *et al.*, 2008). Além disso, indivíduos de *Polybia* forrageiam das 6:45h até as 18:30h (Hernández *et al.*, 2009) e os do gênero *Protopolybia* em torno das 7:30h até, no máximo, 18:00h (Detoni *et al.*, 2015), aumentando a exposição dos primeiros ao ambiente externo

Ca, K, Mg e Si, encontrados em *Pr. sedula* e em *Po. occidentalis*, são naturalmente identificados em insetos e, em baixas concentrações, não são tóxicos (Uvarov, 1931; Clark, 1958; Dow, 2017). O Ca, por exemplo, é um elemento incorporado às mandíbulas das vespas, desempenhando um papel fundamental na dureza dessas estruturas, reduzindo seu desgaste ao longo da vida (Quicke *et al.*, 1998; Cribb *et al.*, 2008; Sarmiento e Silveira, 2021).

Diferenças nos teores de Ca, Mg, K, Cr e Si observadas apenas em *Pr. sedula*, sugerem que essa espécie apresente uma resposta mais acentuada à disponibilidade desses elementos no ambiente do que *Po. occidentalis*. Esses resultados indicam que as vespas sociais Neotropicais, assim como as do Velho Mundo, possuem potencial para atuar como bioindicadores de poluição por metais-traço e metaloides. A presença de Cr em *Pr. sedula* na área de mineração deve ser melhor investigada pois este é um metal pesado que, em altas concentrações, pode afetar a fisiologia, morfologia e comportamento de insetos (Zhou *et al.*, 2020, Rong *et al.*, 2023). O Cr foi, também, relatado em *Aedes albopictus* (Skuse, 1894) (Diptera: Culicidae) (Zhou *et al.*, 2020), *Bombyx mori* Linnaeus, 1758 (Lepidoptera: Bombycidae) (Rong *et al.*, 2023), e *Ephemera orientalis* McLachlan, 1875 (Ephemeroptera: Ephemeridae) (Mo *et al.*, 2013). Esse metal foi relatado em rejeitos da mineradora Samarco, em concentrações dentro dos limites estabelecidos pela legislação para solo e água subterrânea (Almeida *et al.*, 2018). Entretanto,

mesmo metais em níveis dentro dos padrões legais podem ser prejudiciais a invertebrados (Monchanin *et al.*, 2021).

Interação entre vespas sociais e ambientes com diferentes níveis de ação antrópica

Os maiores teores de metais na área de mineração evidenciam impactos da atividade antrópica, com a contaminação do solo, água e plantas o que aumenta a disponibilidade e a absorção desses metais por organismos na cadeia alimentar local (Obasi e Akudinobi, 2020; Chen *et al.*, 2023).

As maiores concentrações de Mg, Cu e Hg em área de mineração, em *Po. occidentalis* podem estar relacionadas a uma maior tolerância fisiológica ou diferenças no uso de recursos alimentares e locais de nidificação por essa vespa (Gall *et al.*, 2015; Chen *et al.*, 2020). Por outro lado, variações em *Pr. sedula* entre as áreas, com teores mais elevados de As, Cd e Pb em área periurbana e Cr, Si e Al em mineração é semelhante ao relatado em Florença, Itália, com presença de Pb em uma espécie de vespa social em áreas urbanas (Urbini *et al.*, 2006), evidenciando o papel desses insetos como bioindicadores de áreas contaminadas por este metal.

Teores semelhantes de Mn, Fe, Ni, Zn, Se e Cd entre as espécies de vespas sugerem que ambas respondam de forma similar à presença desses metais. Por outro lado, diferenças no acúmulo de metais em áreas distintas reforçam a importância de incluir diferentes espécies de insetos em estudos ecotoxicológicos. Isto é necessário devido a diferenças na alimentação, comportamento de forrageio, fisiologia e exposição ambiental, podendo afetar o acúmulo de metais e a interpretação dos impactos ambientais (Lidman e Berglund, 2022).

Médias de metais nos ninhos e análise comparativa entre concentrações nos mesmos nas cabeças

Concentrações mais elevadas de As, Ba, Cr, Cu, Hg, K, Mn, Ni e Se em ninhos de *Pr. sedula*, e Al, Ca, Cd, Fe, Mg, Pb, Si e Zn em *Po. occidentalis* sugerem os ninhos dessas espécies como uma ferramenta promissora para a análise de poluentes no ambiente. O registro de elementos altamente tóxicos como As, Cd, Cr, Hg, Ni e Pb reforçam essa observação por não serem essenciais para esses organismos, sendo a presença dos mesmos relacionadas, diretamente, com poluição antrópica (Angon *et al.*, 2024).

A maior concentração de metais nos ninhos do que na cabeça pode estar associado ao fragmento do ninho selecionado, uma vez que nas células de cria pode conter mecônio (fezes das larvas). No processo de defecação as larvas podem expelir parte dos elementos tóxicos ingeridos, como observado em larvas de *Polistes dominulus* (Christ, 1791) (Hymenoptera: Vespidae) com alta concentração de Pb (Urbini *et al.*, 2006).

CONCLUSÃO

A poluição por metais-traço e metaloides variou significativamente entre áreas de mineração, cultivo e urbana, podendo estar associado às ações antrópicas nessas regiões. Vespas sociais neotropicais, especialmente *P. sedula* e *P. occidentalis*, mostraram-se eficientes bioindicadoras, com diferenças interespecíficas na acumulação de elementos como Cr, Si, Ca, K e Mg.

O uso de ninhos em vez de indivíduos adultos representa uma abordagem ecologicamente sustentável para monitoramento de poluentes inorgânicos, minimizando impactos sobre as colônias. Essas espécies, semelhantes a vespas do Velho Mundo, revelam-se promissoras para avaliar contaminação ambiental, com potencial aplicação em programas de biomonitoramento em gradientes de degradação.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Angon, P.B., Islam, M.S., Das, A., Anjum, N., Poudel, A., & Suchi, S.A. (2024). Sources, effects and present perspectives of heavy metals contamination: Soil, plants and human food chain. *Heliyon*, 10(7), e28357.
- Almeida, C.A., de Oliveira, A.F., Pacheco, A.A., Lopes, R.P., Neves, A.A., & de Queiroz, M. E.L.R. (2018). Characterization and evaluation of sorption potential of the iron mine waste after Samarco dam disaster in Doce River basin–Brazil. *Chemosphere*, 209, 411-420.
- Badejo, O., Skaldina, O., Peräniemi, S., Carrasco-Navarro, V., & Sorvari, J. (2021). Phenotypic plasticity of common wasps in an industrially polluted environment in southwestern Finland. *Insects*, 12(10), 888.
- Barbosa, B.C., Detoni, M., Maciel, T.T., & Prezoto, F. (2016). Studies of social wasp diversity in Brazil: Over 30 years of research, advancements and priorities. *Sociobiology*, 63(3), 858-880.
- Barbosa, B.C., Maciel, T.T., Prezoto, F. Nesting habits of neotropical social wasps. In: Prezoto, F., Nascimento, F.S., Barbosa, B.C., Somavilla, A. (eds) Neotropical Social Wasps: Basic and Applied Aspects, p. 85-98, 2021.
- Batista, N.R., de Oliveira, V.E.S., Crispim, P.D., Nocelli, R.C.F., & Antonialli-Junior, W.F. (2022). Is the social wasp *Polybia paulista* a silent victim of neonicotinoid contamination? *Environmental Pollution*, 308, 119682.
- Biswas, S.S., Natta, S., De, L.C., & Das, S.P. (2024). Maximizing *Zygopetalum maculatum* orchid yield through calcium nutrition: Unveiling calcium content and dynamics across different plant parts at different growth stages of the orchid. *Scientia Horticulturae*, 333, 113244.
- Bolaños-Benítez, V., van Hullebusch, E.D., Birck, J. L., Garnier, J., Lens, P.N., Tharaud, M., Quantin, C., Sivry, Y. (2021). Chromium mobility in ultramafic areas affected by mining activities in Barro Alto massif, Brazil: An isotopic study. *Chemical Geology*, 561, 120000.
- Borowska, J., & Pyza, E. (2011). Effects of heavy metals on insect immunocompetent cells. *Journal of Insect Physiology*, 57(6), 760-770.
- Brock, R.E., Cini, A., & Sumner, S. (2021). Ecosystem services provided by aculeate wasps. *Biological Reviews*, 96(4), 1645-1675.
- Carvalho, M.S., Ribeiro, K.D., Moreira, R.M., & de Almeida, A.M. (2017). Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. *Acta Brasiliensis*, 1(3), 37-41.

- Castillo, V.M., Martinez-Mena, M., & Albaladejo, J. (1997). Runoff and soil loss response to vegetation removal in a semiarid environment. *Soil Science Society of America Journal*, 61(4), 1116-1121.
- Chen, Z.Y., Zhao, Y.Y., Chen, D.L., Huang, H.T., Zhao, Y., & Wu, Y.J. (2023). Ecological risk assessment and early warning of heavy metal cumulation in the soils near the Luanchuan molybdenum polymetallic mine concentration area, Henan Province, central China. *China Geology*, 6(1), 15-26.
- Chen, J., Wang, J.W., & Shu, Y.H. (2020). Review on the effects of heavy metal pollution on herbivorous insects. *Ying Yong Sheng tai xue bao= The Journal of Applied Ecology*, 31(5), 1773-1782.
- Clark, E.W. (1958). A review of literature on calcium and magnesium in insects. *Annals of the Entomological Society of America*, 51(2), 142-154.
- Clemente, M.A., Lange, D., Del-Claro, K., Prezoto, F., Campos, N.R., e Barbosa, B.C. (2012). Flower-visiting social wasps and plants interaction: network pattern and environmental complexity. *Psyche: A Journal of Entomology*, 2012(1), 478431.
- Conrad-Rooney, E., Gewirtzman, J., Pappas, Y., Pasquarella, V.J., Hutyra, L.R., e Templer, P.H. (2023). Atmospheric wet deposition in urban and suburban sites across the United States. *Atmospheric Environment*, 305, 119783.
- Cribb, B.W., Stewart, A., Huang, H., Truss, R., Noller, B., Rasch, R. e Zalucki, M.P. (2008). Insect mandibles—comparative mechanical properties and links with metal incorporation. *Naturwissenschaften*, 95, 17-23.
- Davila, R.B., Fontes, M.P.F., Pacheco, A.A. e da Silva Ferreira, M. (2020). Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. *Science of the Total Environment*, 709, 136151.
- Detoni M., Feás, X., Jeanne, R.L., Loope, K.J., O'Donnell, S., Santoro, D., Sumner, S. & Jandt, J.M. (2021). Evolutionary and ecological pressures shaping social wasps collective defenses. *Annals of the Entomological Society of America*, 114(5), 581-595.
- Detoni, M., Mattos, M., De Castro, M.M., Barbosa, B.C., Prezoto, F. (2015). Activity schedule and foraging in *Protopolybia sedula* (Hymenoptera, Vespidae). *Revista Colombiana de Entomologia*, 41(2), 245-248.
- Dow, J.A. (2017). The essential roles of metal ions in insect homeostasis and physiology. *Current Opinion in Insect Science*, 23, 43-50.

- Elisei, T., Junior, C.R., & Prezoto, F. (2021). Economic Importance of Neotropical Social Wasps. In: Prezoto, F., Nascimento, F.S., Barbosa, B.C., Somavilla, A. (eds) Neotropical Social Wasps. Springer, Cham.
- Fazekašová, D., Fazekaš, J., Hronec, O., & Horňák, M. (2017, October). Magnesium contamination in soil at a magnesite mining area of Jelšava-Lubeník (Slovakia). In *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science* (Vol. 92, No. 1, p. 012012). IOP Publishing.
- Feldhaar, H., & Otti, O. (2020). Pollutants and their interaction with diseases of social Hymenoptera. *Insects*, 11(3), 153.
- Feng, R., Chen, L., & Chen, K. (2021). Cytotoxicity and changes in gene expression under aluminium potassium sulfate on *Spodoptera frugiperda* 9 cells. *Ecotoxicology*, 30(10), 2056-2070.
- Ferrari, A., Polidori, C., Trisoglio, C.F., & Bonasoro, F. (2024). Increasing road cover in urban areas is associated with greater midgut histological damage in a primitively eusocial bee. *Insectes Sociaux*, 71(3), 331-341.
- Foley, J.; Ramankutty, N.; Brauman, K.; Cassidy, E.S.; Gerber, J.S.; Johnston, M.; Mueller, N.D.; O'Connell, C.; Ray, D.K.; West, P.C., Balzer, C., Bennett, E.M., Carpenter, S.R., Hill, J., Monfreda, C., Polasky, S., Rockstrom, J., Sheehan, J., Siebert, S., Tilman, D., Zaks, D.P. (2011). Solutions for a cultivated planet. *Nature*, 478(7369), 337-342.
- Gall, J.E., Boyd, R.S., & Rajakaruna, N. (2015). Transfer of heavy metals through terrestrial food webs: a review. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187(4), 201.
- Gomes, L., Simões, S.J., Dalla Nora, E.L., de Sousa-Neto, E.R., Forti, M.C., & Ometto, J.P. H. (2019). Agricultural expansion in the Brazilian Cerrado: Increased soil and nutrient losses and decreased agricultural productivity. *Land*, 8(1), 12.
- Graça, M.B., & Somavilla, A. (2019). Effects of forest fragmentation on community patterns of social wasps (Hymenoptera: Vespidae) in Central Amazon. *Austral Entomology*, 58(3): 657–665.
- Hamilton, W., & Mountjoy, W. (1965). Alkali content of alpine ultramafic rocks. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 29(6), 661-671.
- Haynes, R.J. (2014). A contemporary overview of silicon availability in agricultural soils. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 177(6), 831-844.

- Hernández, J., Sarmiento, C.E., & Fernández, C. (2009). Actividad de forrajeo de *Polybia occidentalis venezuelana* (Hymenoptera, Vespidae). *Revista Colombiana de Entomología*, 35(2), 230-234.
- Jeong, H., Byeon, E., Kim, D.H., Maszczyk, P., Lee, J.S. (2023). Heavy metals and metalloid in aquatic invertebrates: A review of single/mixed forms, combination with other pollutants, and environmental factors. *Marine Pollution Bulletin*, 191, 114959.
- John, D.A., & Leventhal, J.S. (1995). Bioavailability of metals. *Preliminary compilation of descriptive geoenvironmental mineral deposit models*, 10-18.
- Júnior, C.R., Elisei, T., Guimarães, D.L., & Prezoto, F. (2008). Flight range extension in the swarm-founding wasp *Protopolybia exigua* (Hymenoptera, Vespidae, Epiponini). *Sociobiology*, 51(1), 173.
- Knoll, S., & Cappai, M.G. (2024). Foraging Activity of Honey Bees (*Apis mellifera* L., 1758) and Exposure to Cadmium: A Review. *Biological Trace Element Research*, 202(12), 5733-5742.
- Li, W., Cao, X., Hu, Y., & Cheng, H. (2024). Source apportionment and risk assessment of heavy metals in agricultural soils in a typical mining and smelting industrial area. *Sustainability*, 16(4), 1673.
- Lidman, J. e Berglund, Å.M. (2022). The effect of aquatic and terrestrial prey availability on metal accumulation in pied flycatcher (*Ficedula hypoleuca*) nestlings. *Environmental Research*, 209, p. 112779.
- Luo, M., Cao, H.M., Fan, Y.Y., Zhou, X.C., Chen, J.X., Chung, H., & Wei, H.Y. (2019). Bioaccumulation of cadmium affects development, mating behavior, and fecundity in the Asian Corn Borer, *Ostrinia furnacalis*. *Insects*, 11(1), 7.
- Ma, L., Sun, J., Yang, Z., & Wang, L. (2015). Heavy metal contamination of agricultural soils affected by mining activities around the Ganxi River in Chenzhou, Southern China. *Environmental Monitoring and Assessment*, 187, (12), 731.
- Maciel, T.T., Barbosa, B.C., & Prezoto, F. (2022). Physiological selectivity and tolerance of social wasps exposed to Malathion. *Environmental Pollution*, 315, 120339.
- Mielczarek, A., Mielczarek, Ł., & Wojciechowicz-Żytko, E. (2021). The influence of heavy metals on the shape and asymmetry of wings of female *Polistes nimpha* (Hymenoptera, Vespidae) living on contaminated sites. *Ecotoxicology*, 30, 1854-1861.

- Mikhailova, E.A., Post, G.C., Cope, M.P., Post, C.J., Schlautman, M.A., & Zhang, L. (2019). Quantifying and mapping atmospheric potassium deposition for soil ecosystem services assessment in the United States. *Frontiers in Environmental Science*, 7, 74.
- Mo, H.H., Lee, S.E., Son, J., Hwang, J.M., Bae, Y.J., & Cho, K. (2013). Exposure of mayfly *Ephemera orientalis* (Ephemeroptera) eggs to heavy metals and discovery of biomarkers. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 36(3), 1167-1175.
- Monchanin, C., Devaud, J.M., Barron, A.B., & Lihoreau, M. (2021). Current permissible levels of metal pollutants harm terrestrial invertebrates. *Science of the Total Environment*, 779, 146398.
- Nadat, Y.T., Kylin, H., Sithole, R., Lesch, V., & Bouwman, H. (2021). The wasp as a terrestrial indicator of environmental metal composition: Evidence from Zimbabwe. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 40(6), 1726-1739.
- Negri, I., Mavris, C., Di Prisco, G., Caprio, E., & Pellecchia, M. (2015). Honey bees (*Apis mellifera*, L.) as active samplers of airborne particulate matter. *PLoS ONE*, 10(7), e0132491.
- Newbold, T., Hudson, L.N., Hill, S.L.L., Contu, S., Lysenko, I., Sênior, R.A., Börger, L., Bennett, D.J., Choimes, A., Collen, B., Day, J., De Palma, A., Díaz, S., Echeverria-Londoño, S., Edgar, M.J., Feldman, A., Garon, M., Harrison, M.L.K., Alhusseini, T., Ingram, D.J., Itescu, Y., Kattge, J., Kemp, V., Kirkpatrick, L., Kleyer, M., Correia, D.L.P., Martin, C.D., Meiri, S., Novosolov, M., Pan, Y., Phillips, H.R.P., Purves, D.W., Robinson, A., Simpson, J., Tuck, S.L., Weiher, E., White, H.J., Ewers, R.M., Mace, G.M., Scharlemann, J.P.W., Andy, P. (2015) Global effects of land use on local terrestrial biodiversity. *Nature*, 520:45–50.
- Obasi, P.N., & Akudinobi, B.B. (2020). Potential health risk and levels of heavy metals in water resources of lead–zinc mining communities of Abakaliki, southeast Nigeria. *Applied Water Science*, 10(7), 1-23.
- Oliveira, C.S., Nogara, P.A., Lima, L.S., Galiciolli, M.E., Souza, J.V., Aschner, M., & Rocha, J.B. (2022). Toxic metals that interact with thiol groups and alteration in insect behavior. *Current Opinion in Insect Science*, 52, 100923.
- Prabhakar, G., Sorooshian, A., Toffol, E., Arellano, A.F., & Betterton, E.A. (2014). Spatiotemporal distribution of airborne particulate metals and metalloids in a populated arid region. *Atmospheric Environment*, 92, 339-347.
- Prezoto, F., Maciel, T.T., Barbosa, B.C., & Sarmiento, C.E. (2021). Social Wasp Sampling Methods. *Measuring Arthropod Biodiversity: A Handbook of Sampling Methods*, 85-99.

- Prezoto, F.; Maciel, T.T.; Detoni, M.; Mayorquin, A. Z.; & Barbosa, B. C. 2019. Pest control potential of social wasps in small farms and urban gardens. *Insects*, 10(7): 192.
- Quicke, D. L., Wyeth, P., Fawke, J. D., Basibuyuk, H. H., & Vincent, J. F. (1998). Manganese and zinc in the ovipositors and mandibles of hymenopterous insects. *Zoological Journal of the Linnean Society*, 124(4), 387-396.
- Ramírez-Builes, V.H., Küsters, J., de Souza, T.R., & Simmes, C. (2020). Calcium nutrition in coffee and its influence on growth, stress tolerance, cations uptake, and productivity. *Frontiers in Agronomy*, 2, 590892.
- Rea, R.S., Islam, M.R., Rahman, M.M., Nath, B., & Mix, K. (2022). Growth, nutrient accumulation, and drought tolerance in crop plants with silicon application: a review. *Sustainability*, 14(8), 4525.
- Reboloso-Hernández, C.A., Vallejo-Pérez, M.R., Carrizales-Yáñez, L., Garrigos-Lomelí, G.J., Razo-Soto, I., & Diaz-Barriga, F. (2024). Arsenic and mercury exposure in different insect trophic guilds from mercury mining areas in Mexico. *Environmental Monitoring and Assessment*, 196(5), 422.
- Rezende Diniz, I., & Kitayama, K. (1998). Seasonality of vespid species (Hymenoptera: Vespidae) in a central Brazilian cerrado. *Revista de Biologia Tropical*, 46(1), 109-114.
- Richards, O. W. (1978). *The social wasps of the Americas excluding the Vespinae*. British Museum (Natural History), p.580.
- Rong, W., Chen, Y., Lu, J., Huang, S., Xin, L., Guan, D., & Li, X. (2023). Effects of chromium exposure on the gene expression of the midgut in silkworms, *Bombyx mori*. *Genes*, 14(8), 1616.
- Santana, S.E.A., Serrão, J.E., De Carvalho, C.A.L., de Abreu Júnior, P.B., & Waldschmidt, A.M. (2023). Chemical profile of elements in the stingless bee *Melipona scutellaris* (Hymenoptera: Apidae: Meliponini) from sites with distinct anthropogenic activities. *Biological Trace Element Research*, 201(11), 5431-5440.
- Santana, S.E.A., Silva, A.P., Serrão, J.E., de Mello Affonso, P.R.A., Nunes, L.A., & Waldschmidt, A.M. (2022). Chemical profile of elements in the stingless bee *Melipona quadrifasciata anthidioides* (Hymenoptera: Apidae). *Biological Trace Element Research*, 200(8), 3885-3889.
- Santos, G.M., Santana-Reis, V.P., Resende, J.J., De Marco, P., & Bichara Filho, C.C. (2001). Flying capacity of swarm-founding wasp *Polybia occidentalis occidentalis* Oliver, 1791 (Hymenoptera, Vespidae). *Revista brasileira de Zoociências*, 3(2), 33-39.

- Santos, G.M.M., Bichara Filho, C.C., Resende, J.J., Cruz, J.D.D., Marques, O.M. Diversidade e estrutura da comunidade de vespas sociais (Hymenoptera: Vespidae) em três ecossistemas na Ilha de Itaparica, Estado da Bahia, Brasil. *Neotropical Entomology*, 36(2), 180-185, 2007.
- Sarmiento, C.E., Silveira, O.T. (2021). Evolution and Adaptation of the Wings and Mandibles of Neotropical Social Wasps. In: Prezoto, F., Nascimento, F.S., Barbosa, B.C., Somavilla, A. (eds) *Neotropical Social Wasps*. Springer, Cham.
- Satsangi, P.G., & Yadav, S. (2014). Characterization of PM 2.5 by X-ray diffraction and scanning electron microscopy–energy dispersive spectrometer: its relation with different pollution sources. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 11, 217-232.
- Shi, J., Du, P., Luo, H., Wu, H., Zhang, Y., Chen, J., Minghong, W.U., Xu, G., eGao, H. (2022). Soil contamination with cadmium and potential risk around various mines in China during 2000–2020. *Journal of Environmental Management*, 310, 114509.
- Skaldina, O., Ciszek, R., Peräniemi, S., Kolehmainen, M., & Sorvari, J. (2020). Facing the threat: common yellowjacket wasps as indicators of heavy metal pollution. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 29031-29042.
- Skaldina, O., Łukowski, A., Leskinen, J.T., Koistinen, A.P., & Eeva, T. (2023). Mobile samplers of particulate matter–flying omnivorous insects in detection of industrial contamination. *Science of the Total Environment*, 867, 161511.
- Somavilla, A., & Carpenter, J.M. (2021). Key to the Genera of Social Wasps (Polistinae) Occurring in Neotropics. In F. Prezoto, F. Nascimento, B. Correa, & A. Somavilla (Eds.), *Neotropical Social Wasps* (pp. 327–336). Springer International Publishing.
- Somavilla, A., Barbosa, B.C., Souza, M.M., & Prezoto, F. List of species of social wasps from Brazil, pp. 293-316. In: Prezoto, F., Nascimento, F.S., Barbosa, B.C., Somavilla, A. (eds). *Neotropical social wasps: basic and applied aspects*. Springer Nature Switzerland, 2021.
- Sohal, R.S., Allen, R.G., Farmer, K.J., & Newton, R.K. (1985). Iron induces oxidative stress and may alter the rate of aging in the housefly, *Musca domestica*. *Mechanisms of Ageing and Development*, 32(1), 33-38.
- Southon, R.J., Fernandes, O.A., Nascimento, F.S., & Sumner, S. (2019). Social wasps are effective biocontrol agents of key lepidopteran crop pests. *Proceedings of the Royal Society B*, 286(1914), 20191676.

- Štofejová, L., Fazekaš, J., & Fazekašová, D. (2021). Analysis of heavy metal content in soil and plants in the dumping ground of magnesite mining factory Jelšava-Lubeník (Slovakia). *Sustainability*, 13(8), 4508.
- Sühs, R.B., Somavilla, A., & Giehl, E.L.H. (2021). Weather variables affecting the behaviour of Insect flower visitors and main pollinators of *Erythroxylum myrsinites* Martius (Erythroxylaceae). *Sociobiology*, 68(1), e5451-e5451.
- Tang, Z., Wang, H.Q., Chen, J., Chang, J.D., Zhao, F.J. (2023). Molecular mechanisms underlying the toxicity and detoxification of trace metals and metalloids in plants. *Journal of Integrative Plant Biology*, 65(2), 570-593.
- Thimmegowda, G.G., Mullen, S., Sottolare, K., Sharma, A., Mohanta, R., Brockmann, A., Dhandapany, P.S. & Olsson, S.B. (2020). A field-based quantitative analysis of sublethal effects of air pollution on pollinators. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 117(34), 20653-20661.
- Tscharntke, T., Klein, A.M., Kruess, A., Steffan-Dewenter, I., e Thies, C. 2005. Landscape perspectives on agricultural intensification and biodiversity ecosystem service management. *Ecology Letters* 8: 857–874.
- Tubana, B.S., Babu, T., e Datnoff, L.E. (2016). A review of silicon in soils and plants and its role in US agriculture: history and future perspectives. *Soil science*, 181(9/10), 393-411.
- Urbini, A., Sparvoli, E., e Turillazzi, S. (2006). Social paper wasps as bioindicators: a preliminary research with *Polistes dominulus* (Hymenoptera Vespidae) as a trace metal accumulator. *Chemosphere*, 64(5), 697-703.
- Uvarov, E.B. (1931). The ash content of insects. *Bulletin of Entomological Research*, 22(4), 453-457.
- Wang, Q., Liu, G., Yan, L., Xu, W., Hilton, D.J., Liu, X., Pei, W., Li, X., Wu, J., Zhao, H., Zhang, D. & Elgar, M. A. (2023). Short-term particulate matter contamination severely compromises insect antennal olfactory perception. *Nature Communications*, 14(1), 4112a.
- Wang, J., Geng, Y., Zhang, J., Li, L., Guo, F., Yang, S., Zou, J. e Wan, S. (2023). Increasing calcium and decreasing nitrogen fertilizers improves peanut growth and productivity by enhancing photosynthetic efficiency and nutrient accumulation in acidic red soil. *Agronomy*, 13(7), 1924b.
- Yang, Q., Yang, J., Liu, X., Zhang, Y., Li, Y., Ao, D., Zhong, P., & Yong, K. (2023). Crosstalk between the mitochondrial dynamics and oxidative stress in zinc-induced cytotoxicity. *Biological Trace Element Research*, 201(9), 4419-4428.

- Zhang, H., Zhao, Y., Wang, Z., & Liu, Y. (2021). Distribution characteristics, bioaccumulation and trophic transfer of heavy metals in the food web of grassland ecosystems. *Chemosphere*, 278: 130407.
- Zhang, Z.X., Cai, Z.Q., Liu, G.Z., Wang, H., Huang, L., & Cai, C.T. (2017). Effects of fertilization on the growth, photosynthesis, and biomass accumulation in juvenile plants of three coffee (*Coffea arabica* L.) cultivars. *Photosynthetica*, 55, 134-143.
- Zhao, Y., Deng, Q., Lin, Q., Zeng, C., & Zhong, C. (2020). Cadmium source identification in soils and high-risk regions predicted by geographical detector method. *Environmental Pollution*, 263, 114338.
- Zhou, C., Huang, J.C., Zheng, L., He, S., & Zhou, W. (2020). Trophic transfer and biotransformation of selenium in the mosquito (*Aedes albopictus*) and interactive effects with hexavalent chromium. *Environmental Pollution*, 262, 114288.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos estudos que abordam o uso de vespas sociais como bioindicadoras de metais evidencia que ainda existem lacunas na compreensão do potencial desses organismos como indicadores da qualidade ambiental. Esses resultados mostram que a maioria das pesquisas está concentrada em países do Velho Mundo, especialmente no continente europeu, enquanto outras regiões permanecem pouco exploradas. Nesse sentido, torna-se importante ampliar as investigações em áreas com elevada biodiversidade, como a região Neotropical, onde a diversidade de espécies pode contribuir para novas abordagens e interpretações.

Nas análises do presente estudo, realizadas com *Po. occidentalis* e *Pr. sedula*, foi registrada a presença de metais-traço e metaloides tanto nos indivíduos quanto em seus ninhos. Esses achados reforçam o potencial das vespas sociais neotropicais como bioindicadoras de contaminação por esses elementos, indicando que, assim como espécies do Velho Mundo, esses organismos podem ser úteis em estratégias de monitoramento ambiental.