



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E BIOLÓGICAS
DEPARTAMENTO DE BIODIVERSIDADE, EVOLUÇÃO E MEIO AMBIENTE
LABORATÓRIO DE BIODIVERSIDADE

Cecília Sol Brandão

Produtos apícolas como amostradores de elementos químicos: uma ferramenta para o monitoramento de contaminantes atmosféricos aplicada ao setor da mineração

Ouro Preto

2026

Cecília Sol Brandão

Produtos apícolas como amostradores de elementos químicos: uma ferramenta para o monitoramento de contaminantes atmosféricos aplicada ao setor da mineração

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas.

Orientadora: Yasmine Antonini
Coorientadora: Thayane Nogueira

Ouro Preto

2026

SISBIN - SISTEMA DE BIBLIOTECAS E INFORMAÇÃO

B817p Brandão, Cecília Sol.

Produtos apícolas como amostradores de elementos químicos
[manuscrito]: uma ferramenta para o monitoramento de contaminantes
atmosféricos aplicada ao setor da mineração. / Cecília Sol Brandão. -
2026.

30 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.

Orientadora: Profa. Dra. Yasmine Antonini.

Coorientadora: Dra. Thayane Nogueira.

Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto.
Instituto de Ciências Exatas e Biológicas. Graduação em Ciências
Biológicas .

1. Monitoramento ambiental. 2. Indicadores biológicos. 3. Poluição
ambiental. I. Antonini, Yasmine. II. Nogueira, Thayane. III. Universidade
Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 614.7

Bibliotecário(a) Responsável: Renata Mara de Almeida - CRB-6: 2507



FOLHA DE APROVAÇÃO

Cecília Sol Barbosa Brandão

Produtos apícolas como amostradores de elementos químicos: uma ferramenta para o monitoramento de contaminantes atmosféricos aplicada ao setor da mineração

Monografia apresentada ao Curso de Bacharelado em Ciências Biológicas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Ciências Biológicas

Aprovada em 14 de agosto de 2026

Membros da banca

Dra. Yasmine Antonini – Presidente da banca - Universidade Federal de Ouro Preto
Dra. Adriana Trópia de Abreu - Laboratório de Geoquímica-UFOP
MSc. Rodolfo Pessotti Messner Campelo - PPG Ecologia de Biomas Tropicais

Yasmine Antonini, orientadora do trabalho, aprovou a versão final e autorizou seu depósito na Biblioteca Digital de Trabalhos de Conclusão de Curso da UFOP em 14/08/2026



Documento assinado eletronicamente por **Yasmine Antonini Itabaiana, PROFESSOR DE MAGISTERIO SUPERIOR**, em 14/08/2026, às 14:47, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 6º, § 1º, do [Decreto nº 8.539, de 8 de outubro de 2015](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site http://sei.ufop.br/sei/controlador_externo.php?acao=documento_conferir&id_orgao_acesso_externo=0, informando o código verificador **1146505** e o código CRC **010CBB0D**.

AGRADECIMENTOS

Agradeço, primeiramente, à vida, pela oportunidade de me dedicar ao estudo daquilo que transborda o meu coração. A natureza é o meu lugar de epifania. Sou grata por ter me sido concedido saúde, força e diligência para enfrentar os desafios ao longo desta trajetória.

À minha família, pelo apoio e incentivo. À minha mãe, Patrícia, e ao meu pai, Reinaldo, pelo presente da existência e por terem me provido com os meios necessários para alcançar os meus sonhos. Obrigada por todo o amor, pelos ensinamentos e pelos sacrifícios. À minha irmã, Sophie, pela companhia e força. À Nina, que também faz parte da nossa família, por nos preencher com alegria.

A todos os amigos de curso, que se tornaram minha família da Biologia, pela convivência ao longo dos últimos anos, pelas risadas durante os trabalhos de campo e pelos momentos especiais que jamais esqueerei.

À Universidade Federal de Ouro Preto e a todos os professores do curso de Ciências Biológicas, pelas contribuições para construção da minha visão de mundo e formação como bióloga.

À minha orientadora, Prof.^a Dr.^a Yasmine Antonini, pela confiança, dedicação e pelos valiosos ensinamentos transmitidos. Obrigada pela parceria e oportunidade de fazer ciência.

Aos integrantes do Laboratório de Biodiversidade e aos demais pesquisadores com os quais convivi, pela troca de aprendizagem, pelas discussões científicas e pelo companheirismo ao longo desta pesquisa.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pela concessão da bolsa de iniciação científica e pelo apoio que possibilitou o desenvolvimento deste estudo.

Por fim, agradeço a todas as pessoas que passaram pela minha vida e contribuíram, direta ou indiretamente, para que eu me tornasse quem sou hoje.

RESUMO

A mineração é um dos pilares da economia do Brasil. Entretanto, seus processos geram impactos para o meio ambiente, como a contaminação atmosférica pela dispersão de material particulado. Este material contém elementos potencialmente tóxicos que podem se acumular nos organismos e ecossistemas. Uma das estratégias de monitoramento deste impacto é a utilização de bioindicadores. Nesse contexto, os polinizadores e seus produtos são utilizados pela eficiência em indicador impacto e saúde ambiental. Neste estudo, avaliou-se a eficiência das matrizes biológicas mel e pólen para quantificar elementos, a partir de um gradiente de distância de uma planta de pelotização de minério de ferro. Foi hipotetizado que (1) a matriz pólen apresentaria maior eficiência na quantificação de elementos químicos e que (2) seriam registradas menores concentrações nos pontos de amostragem mais distantes. Os resultados demonstram que o pólen foi um amostrador significativamente mais eficiente para todos os elementos (GLMs; $p < 0,001$) e que a influência do gradiente de distância limitou-se a alguns elementos químicos, sendo significativa para Al ($\chi^2 = 7,52$; $p = 0,0061$), As ($\chi^2 = 20,18$; $p < 0,001$), Ba ($\chi^2 = 5,02$; $p = 0,017$), Cd ($\chi^2 = 20,32$; $p < 0,001$), Fe ($\chi^2 = 17,12$; $p < 0,001$) e Ni ($\chi^2 = 9,32$; $p = 0,001$), enquanto Cu ($\chi^2 = 0,25$; $p = 0,6167$), Mn ($\chi^2 = 0,42$; $p = 0,5184$), Pb ($\chi^2 = 0,90$; $p = 0,3421$) e Zn ($\chi^2 = 0,08$; $p = 0,7773$) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas. Os resultados confirmaram que os produtos armazenados em ninhos de *Tetragonisca angustula* são eficientes indicadores biológicos da contaminação atmosférica. A concentração de determinados elementos estudados variou com a distância da fonte emissora e entre os elementos estudados.

Palavras-chave: Monitoramento ambiental, indicadores biológicos, contaminação atmosférica.

ABSTRACT

Mining is one of the main pillars of the Brazilian economy. However, mining activities generate significant environmental impacts, including atmospheric contamination through the dispersion of particulate matter. This particulate matter contains potentially toxic elements that may accumulate in organisms and ecosystems. One strategy for monitoring these impacts is the use of biological indicators. In this context, pollinators and their products have been widely employed as efficient bioindicators of environmental contamination and ecosystem health. This study evaluated the efficiency of honey and pollen as biological matrices for quantifying chemical elements along a distance gradient from an iron ore pelletizing plant. We hypothesized that (1) pollen would be a more efficient matrix for quantifying chemical elements than honey, and (2) lower element concentrations would be recorded at sampling sites located farther from the emission source. The results demonstrated that pollen was a significantly more efficient sampler for all evaluated elements (GLMs; $p < 0.001$). The effect of the distance gradient was significant only for Al ($\chi^2 = 7.52$; $p = 0.0061$), As ($\chi^2 = 20.18$; $p < 0.001$), Ba ($\chi^2 = 5.02$; $p = 0.017$), Cd ($\chi^2 = 20.32$; $p < 0.001$), Fe ($\chi^2 = 17.12$; $p < 0.001$), and Ni ($\chi^2 = 9.32$; $p = 0.001$), whereas Cu ($\chi^2 = 0.25$; $p = 0.6167$), Mn ($\chi^2 = 0.42$; $p = 0.5184$), Pb ($\chi^2 = 0.90$; $p = 0.3421$), and Zn ($\chi^2 = 0.08$; $p = 0.7773$) showed no statistically significant differences. These findings confirm that products stored in nests of *Tetragonisca angustula* are effective biological indicators of atmospheric contamination. The concentrations of specific elements varied according to the distance from the emission source and differed among the elements analyzed, highlighting the potential of stingless bee products as low-cost and reliable tools for environmental biomonitoring in mining-affected areas.

Keywords: Environmental monitoring, biological indicators, atmospheric contamination.

SUMÁRIO

1. Introdução	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Hipóteses.....	3
2. Materiais e métodos.....	4
<i>Aquisição das colônias e coleta de amostras</i>	<i>4</i>
<i>Área de estudo.....</i>	<i>4</i>
<i>Procedimento para Análise geoquímica.....</i>	<i>5</i>
<i>Análises estatísticas.....</i>	<i>6</i>
3. Resultados.....	6
3.1 Resultados gerais	6
3.2 Resultados para matrizes biológicas	7
3.3 Resultados para o gradiente de distância.....	9
4. Discussão.....	10
5. Conclusão.....	12
REFERÊNCIAS	14
APÊNCIDE A.....	19
APÊNCIDE B.....	21

1. Introdução

A mineração desempenha papel estratégico mundialmente, fornecendo matérias-primas essenciais para diversos setores produtivos, incluindo construção civil, geração de energia, transporte e tecnologias de alta complexidade. No Brasil, essa atividade representa um dos pilares da economia, destacando-se historicamente desde o período colonial e mantendo elevada relevância na atualidade, principalmente em um contexto de expansão da globalização e busca por recursos minerais (SIMONSEN, 1978; ARAÚJO & FERNANDES, 2016). Entretanto, a crescente demanda tem intensificado os desafios relacionados à mitigação dos impactos ambientais associados às atividades de extração, beneficiamento e transporte dos minérios (MILANEZ, 2017).

Nesse contexto, as implicações da mineração são frequentemente associadas à supressão da vegetação, alterações da paisagem e acidentes envolvendo barragens, que se tornaram particularmente evidentes após grandes derramamentos, como o rompimento da barragem de Fundão, considerado um dos maiores desastres socioambientais da história brasileira (SERRA, 2018). Entretanto, existem também efeitos menos perceptíveis, porém igualmente relevantes, que ocorrem de forma crônica e contínua, demandando monitoramento constante. Entre eles destacam-se as emissões atmosféricas de material particulado contendo elementos potencialmente tóxicos, capazes de se dispersar por extensas áreas e atingir diferentes compartimentos ambientais, (MILANEZ, 2017).

Durante os processos de lavra, beneficiamento e pelotização dos minérios, partículas contendo metais e outros elementos químicos são liberadas para a atmosfera. Muitos desses elementos apresentam elevada persistência ambiental e potencial de bioacumulação, podendo ser incorporados ao solo, à vegetação, aos corpos d'água e aos organismos (ROMAN, 2009; CESAR *et al.*, 2022). Apesar de serem elementos naturalmente encontrados, por vezes desempenhando funções fisiológicas e bioquímicas importantes, quando presentes em concentrações elevadas, elementos como arsênio, cádmio, chumbo e manganês podem provocar efeitos adversos à biodiversidade e à saúde humana, incluindo alterações neurológicas, cardiovasculares, imunológicas, hematológicas e reprodutivas, além de efeitos carcinogênicos (TCHOUNWOU *et al.*, 2012; MATÉS *et al.*, 2010).

Diante desse cenário, o monitoramento ambiental torna-se uma ferramenta fundamental para avaliar a dispersão desses contaminantes atmosféricos e subsidiar estratégias de gestão ambiental voltadas ao desenvolvimento sustentável (MAHATO; SINGH; GIRI, 2021; MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023). Tradicionalmente, essa inspeção é realizada por meio da coleta

direta de amostras ambientais, como solo, água e material particulado atmosférico, ou pela utilização de estações automáticas de monitoramento. Entretanto, tais abordagens podem apresentar elevado custo operacional e limitada cobertura espacial (PINDER *et al.*, 2019; SANI *et al.*, 2023).

Nessa perspectiva, o biomonitoramento apresenta-se como uma alternativa complementar de avaliação da presença e a distribuição de contaminantes ambientais. Essa metodologia baseia-se no uso de organismos vivos ou de seus produtos como indicadores da qualidade ambiental, permitindo detectar alterações ambientais de forma integrada, contínua e economicamente viável (CUNNINGHAM *et al.*, 2021; ĆIRIĆ *et al.*, 2020). Além de sua natureza não invasiva, o biomonitoramento possibilita a obtenção de informações sobre a biodisponibilidade dos contaminantes e seus efeitos nos ecossistemas (KADRY *et al.*, 2025; MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023).

Dentre os organismos utilizados para essa finalidade, as abelhas destacam-se pela elevada sensibilidade às alterações do ambiente. Durante suas atividades naturais, como polinização e forrageamento, esses insetos entram em contato com recursos ambientais como água, néctar, pólen e outras fontes de exposição, incorporando contaminantes provenientes de partículas atmosféricas aos produtos das suas colônias (ĆIRIĆ *et al.*, 2020; CUNNINGHAM *et al.*, 2021). Além disso, sua capacidade de deslocamento relativamente ampla permite a amostragem de áreas extensas, tornando-as eficientes, considerando a escala espacial (RASHED; EL-HATY; MOHAMED, 2009).

Adiante, os produtos apícolas mel e pólen têm sido investigados como matrizes para biomonitoramento. O mel é produzido a partir do néctar coletado pelas abelhas, funcionando como reserva energética de alto valor nutricional (KILIÇ ALTUN *et al.*, 2017). Por ser um alimento consumido pela população humana, essa matriz também possibilita avaliações de risco à saúde por contaminação de elementos potencialmente tóxicos (BARTHA *et al.*, 2020; KILIÇ ALTUN *et al.*, 2017). Por sua vez, o pólen é uma importante fonte proteica para as abelhas e possui elevada capacidade de retenção de partículas e contaminantes devido às suas características físico-químicas, sendo frequentemente apontado como uma das matrizes mais eficientes para detecção de elementos-traço no ambiente (ROMAN, 2009; MORGANO *et al.*, 2012; MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023).

Grande parte dos estudos realizados até o momento concentra-se na espécie *Apis mellifera*, amplamente distribuída em diferentes regiões do mundo e frequentemente empregada em programas de biomonitoramento ambiental (MAIR *et al.*, 2023; ZAVRTNIK *et al.*, 2024).

Entretanto, as abelhas nativas sem ferrão apresentam fundamentalidade nos ecossistemas tropicais, especialmente devido à sua contribuição para a polinização de espécies vegetais (CAETANO *et al.*, 2024). Dentre este grupo, destaca-se a *Tetragonisca angustula* (Jataí), amplamente distribuída no território brasileiro e já utilizada em estudos que demonstraram seu uso potencial para o monitoramento de contaminantes atmosféricos (NASCIMENTO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2017; RANGEL, 2020).

Apesar dos avanços recentes, ainda são escassos os estudos que avaliam a eficiência dos produtos apícolas de abelhas sem ferrão como amostradores ambientais em áreas sob influência direta de atividades mineradoras. Considerando a mineração como uma importante fonte de emissão de elementos potencialmente tóxicos para o ambiente, compreender a capacidade do mel e do pólen de *T. angustula* em registrar padrões espaciais de deposição atmosférica pode contribuir significativamente para o desenvolvimento de ferramentas inovadoras de monitoramento ambiental aplicadas ao setor (CESAR *et al.*, 2022; MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023).

1.2. Objetivos

Em face do cenário descrito, o presente estudo visa investigar como a quantificação de elementos químicos varia no mel e pólen armazenados por *Tetragonisca angustula* em áreas localizadas ao redor de uma planta industrial para a produção de pelotas de minério de ferro, no estado do Espírito Santo. O principal objetivo é avaliar o potencial dessas matrizes biológicas como bioindicadoras da deposição atmosférica associada às atividades industriais, bem como verificar a influência da distância da fonte emissora sobre as concentrações dos elementos monitorados.

1.3. Hipóteses

Para verificar os objetivos, duas hipóteses foram postuladas:

1. As concentrações dos elementos químicos variam entre as matrizes pólen e mel. Espera-se encontrar maiores concentrações dos metais na matriz pólen, devido seu caráter lipofílico e maior exposição aos contaminantes emitidos, em comparação ao mel, em função da localização do néctar nas flores.
2. As concentrações dos elementos químicos variam com a distância da fonte emissora. Espera-se registrar menores concentrações nos pontos de amostragem mais distantes, pois com o

aumento da distância há menor quantidade de material particulado depositado nos recursos explorados pelas abelhas.

2. Materiais e métodos

Aquisição das colônias e coleta de amostras

As colônias de abelhas Jataí foram compradas de apicultores no município de Conceição do Castelo, Espírito Santo. Posteriormente foram levadas para um dos pontos de controle (Fazenda UBU), para um período de quarentena, com o propósito de que as amostras coletadas registrem os elementos químicos associados aos pontos de instalação definidos, ao invés de o local de origem dessas colônias (FIG.1). Destas colônias foram retiradas amostras de mel e pólen que foram utilizadas para quantificação das concentrações de metais pesados.

Figura 1. Caixas de abelha Jataí instaladas na Fazenda Ubu (A) e em estação de monitoramento (B)

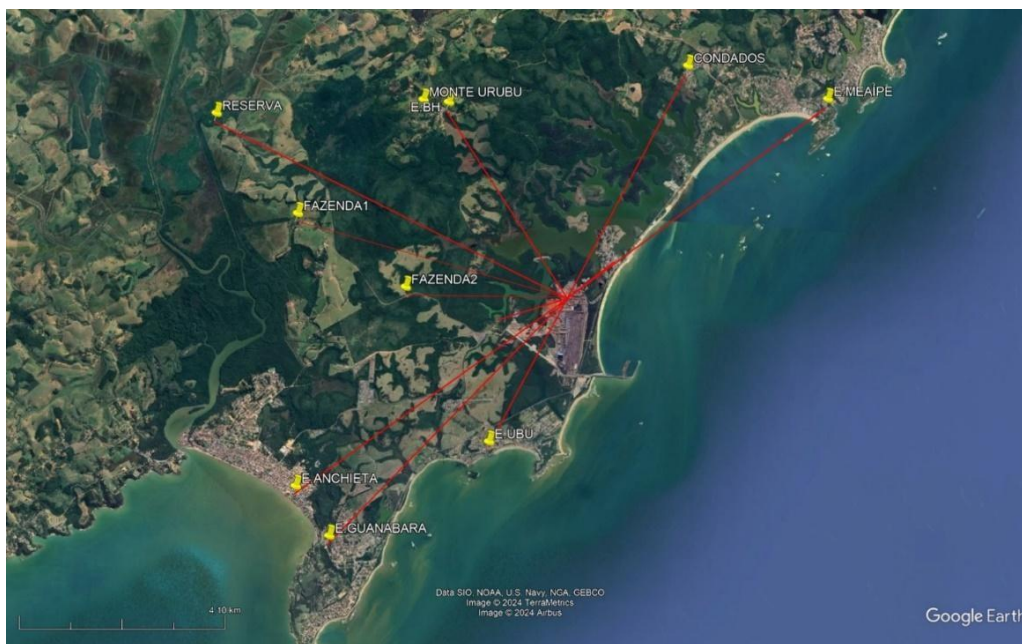


Área de estudo

As coletas foram realizadas no estado do Espírito Santo, em 10 pontos localizados no entorno da planta industrial de pelotização de minério de ferro, de acordo com um gradiente de distância. Os pontos classificados como controle correspondem a áreas com maior cobertura vegetal e, em geral, mais distantes da planta industrial, o que favorece a redução da deposição de contaminantes atmosféricos, com as respectivas distâncias: Condados (5.934 m), Fazenda 1 e Fazenda 2 (5.521,4 m), Monte Urubu (4.645,24 m) e Reserva (7.898,4 m). O ponto Monte Urubu, apesar da relativa proximidade em relação à planta industrial, foi incluído no grupo controle devido às suas características ambientais (FIG. 2).

Os pontos classificados como tratamento correspondem às estações de monitoramento da Samarco, localizadas em áreas com maior potencial de influência das emissões atmosféricas da planta industrial, com as respectivas distâncias: Anchieta (6.172,3 m), Belo Horizonte (5.031,3 m), Guanabara (6.328,2 m), Meaípe (6.999,4 m) e Ubu (2.645,9 m).

Figura 2. Mapa com pontos de amostragem selecionados com indicação da direção em relação a planta industrial.



Procedimento para Análise geoquímica

O material coletado foi destinado para análises no Laboratório de Geoquímica do Departamento de Geologia da UFOP. A digestão geoquímica das amostras foi realizada em forno de micro-ondas com ácidos ultrapuros, em análises de triplicatas validadas com materiais de referência certificados (MRC Nist 1515) e amostras brancas (KILIÇ ALTUN *et al.*, 2017).

Nos frascos de micro-ondas previamente limpos, foram pesados 1,000g para as amostras de mel e 0,2500 g para as amostras de pólen. Em seguida, foram adicionados 7 mL de ácido nítrico Merck PA ACS ISO 2 mol/L previamente destilado e 1 mL de peróxido de hidrogênio (30 %, Suprapur, Merck). Após uma pré-digestão de 16 h as amostras foram levadas para digestão em forno micro-ondas (Milestone, Ethos), de acordo com o seguinte protocolo: 10 minutos até 200 °C, 15 minutos em 200 °C e resfriamento por aproximadamente 30 minutos. Após atingir a temperatura ambiente os frascos foram abertos e as amostras digeridas foram quantitativamente transferidas para tubos de centrífuga. Em sequência foram completados com

água milli-Q até atingir o volume final de 20 mL para pólen e 40 mL para mel (RANGEL, 2020).

Após a digestão em micro-ondas, a determinação das concentrações dos elementos químicos foi realizada por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES, marca Agilent e modelo 725) e Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS, modelo Agilent 7700x) (DOS REIS *et al.*, 2025). Para a determinação por ICP-MS as amostras digeridas foram diluídas. Assim, cerca de 4,000 g de amostra foi pesada num frasco de centrifuga e foram adicionados cerca de 6,000 g de água ultrapura (Milli Q). Nas amostras coletadas e analisadas foram quantificadas as concentrações de mais de 50 elementos nas matrizes da fração solúvel da deposição atmosférica total de mel e pólen.

Análises estatísticas

Dentre os elementos químicos identificados e quantificados durante as análises geoquímicas, os seguintes foram selecionados para análises das hipóteses: Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Níquel (Ni) e Zinco (Zn). Tal seleção foi realizada devido a possível relação com a atividade industrial monitorada, principalmente Fe e elementos adicionados no processo industrial, e pelo potencial de toxicidade de alguns, como As e Pb.

Para avaliar a eficiência das matrizes biológicas e o efeito do gradiente de distância sobre a quantificação dos elementos, foram realizadas análises estatísticas com Modelos Lineares Generalizados (GLM). A adequação dos modelos foi verificada por meio da análise gráfica dos resíduos, avaliação da dispersão e inspeção de possíveis violações dos pressupostos do modelo.

3. Resultados

3.1 Resultados gerais

Ao longo das campanhas de amostragem foram coletadas e analisadas 81 amostras, sendo 54 amostras de mel e 27 de pólen. De maneira geral, observou-se elevada variabilidade nas concentrações dos elementos entre as amostras, com maior dispersão dos valores para Al, Fe, Mn e Zn e presença de valores extremos para alguns elementos, principalmente nas amostras de pólen e nos pontos de monitoramento. Em contraste, As, Cd e Pb apresentaram concentrações absolutas mais baixas ao longo das amostras.

Em suma, no comparativo de eficiência das matrizes biológicas o pólen demonstrou maior potencial acumulativo para as concentrações de todos os elementos analisados em comparação ao mel. Por outro lado, no comparativo entre tratamentos as áreas sob influência da atividade minerária apresentaram enriquecimento de diversos metais e metalóides, principalmente Al, Fe, Zn, Ni, As, Cd e Pb, em relação às áreas-controle. Tais resultados apontam para a elevada influência que o tipo de matriz biológica exerce sobre a quantificação de todos os elementos avaliados, enquanto o efeito do gradiente de distância foi dependente do elemento químico.

3.2 Resultados para matrizes biológicas

A comparação entre as matrizes biológicas revelou diferenças estatisticamente significativas para todos os elementos avaliados (GLMs; $p < 0,001$). Em todos os casos, as concentrações registradas no pólen foram significativamente superiores às registradas no mel, evidenciando sua elevada capacidade de acumular elementos químicos e corroborando a hipótese de que essa matriz apresenta maior eficiência para o monitoramento de contaminantes atmosféricos (FIG. 3 e 4).

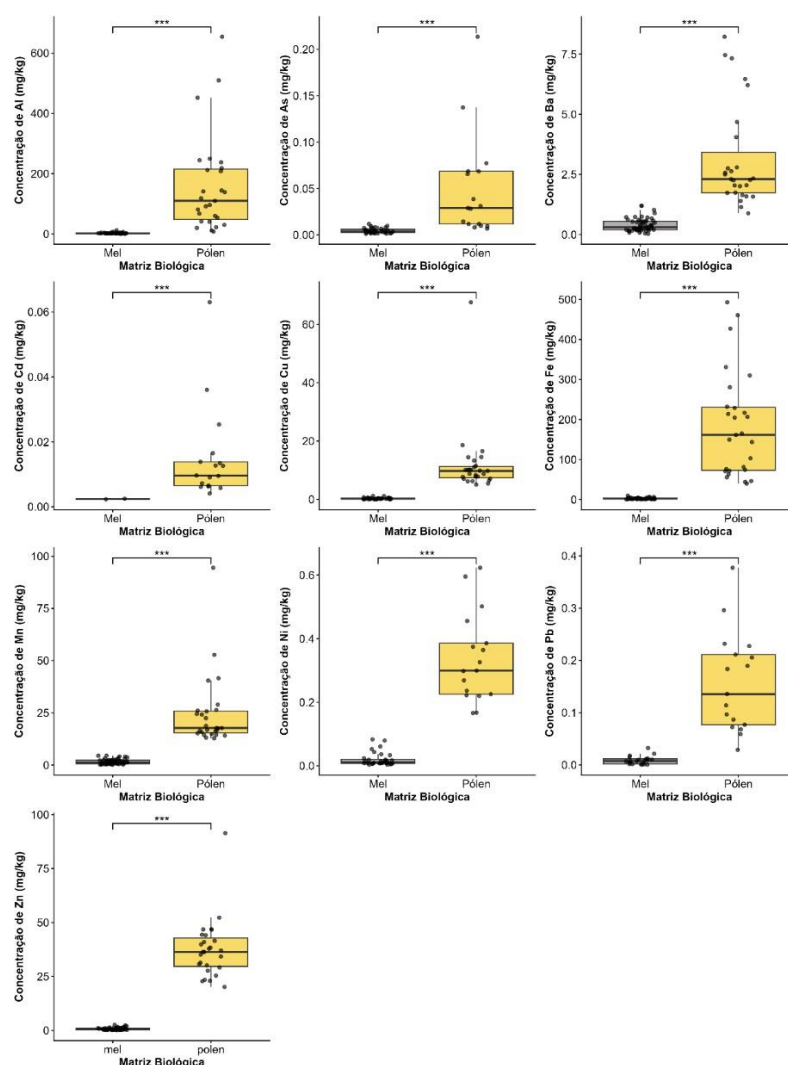
O alumínio (Al) apresentou uma das maiores diferenças entre as matrizes ($\chi^2 = 36,93$; $p < 0,001$), com concentrações substancialmente superiores no pólen e elevada variabilidade entre as amostras. Um comportamento semelhante foi observado para o ferro (Fe) ($\chi^2 = 50,77$; $p < 0,001$), que apresentou os maiores valores de concentração entre todos os elementos analisados (FIG. 3).

Além das diferenças nas concentrações, observou-se maior amplitude de variação no pólen para todos os elementos analisados, evidenciada pelos maiores intervalos interquartis e pela presença de valores máximos mais elevados (FIG. 4). Em contraste, as amostras de mel apresentaram concentrações reduzidas para a maioria dos elementos, frequentemente próximas ao limite inferior de detecção (APÊNDICE A e B), apesar da elevada sensibilidade da técnica analítica utilizada além de menor variabilidade entre as amostras. De forma geral, os resultados demonstram que o pólen foi uma matriz significativamente mais eficiente que o mel para a quantificação dos elementos químicos avaliados, apresentando maior capacidade de acumulação e discriminação das concentrações ambientais.

Figura 3. Resultados dos modelos lineares generalizados (GLMs) utilizados para comparar as concentrações dos elementos químicos entre as matrizes biológicas mel e pólen.

Modelo	Família (função de ligação)	Chisq	df	p
Al ~ matriz	Gamma(link = "inverse")	280,6400	1	0
As ~ matriz	Gamma(link = "log")	120,1400	1	0
Ba ~ matriz	Gamma(link = "log")	178,3500	1	0
Cd ~ matriz	Gamma(link = "log")	13,0230	1	0
Cu ~ matriz	Gamma(link = "log")	388,4700	1	0
Fe ~ matriz	Gamma(link = "log")	765,0700	1	0
Mn ~ matriz	tweedie(link = "log")	343,4800	1	0
Ni ~ matriz	gaussian(link = "log")	15,9280	1	0
Pb ~ matriz	Gamma(link = "log")	114,2900	1	0
Zn ~ matriz	Gamma(link = "inverse")	532,4200	1	0

Figura 4. Distribuição das concentrações de Alumínio (Al), Arsênio (As), Bário (Ba), Cádmiu (Cd), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Níquel (Ni), Chumbo (Pb) e Zinco (Zn) nas matrizes biológicas mel e pólen. As diferenças entre as matrizes foram avaliadas por modelos lineares generalizados (GLMs), sendo significativas para todos os elementos (***) $p < 0,001$; ver Tabela 1 para os valores exatos de p).



3.3 Resultados para o gradiente de distância

A concentração dos elementos variou com a distância da fonte emissora, mas de uma forma diferenciada por elemento (FIG. 5 e 6). Foram observadas diferenças significativas para Al ($\chi^2 = 7,52$; $p = 0,0061$), As ($\chi^2 = 20,18$; $p < 0,001$), Ba ($p = 0,017$), Cd ($p < 0,001$), Fe ($\chi^2 = 17,12$; $p < 0,001$) e Ni ($\chi^2 = 9,32$; $p = 0,001$), cujas concentrações exibiram variações robustas, indicando teores elevados nas áreas mais próximas das emissões da atividade mineradora (pontos de monitoramento) em comparação às áreas de controle. Por outro lado, Cu ($p = 0,6167$), Mn ($p = 0,5184$), Pb ($p = 0,116$) e Zn ($p = 0,7773$) não apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os tratamentos, indicando que, para esses elementos, a proximidade da fonte emissora não influenciou as concentrações observadas nas amostras (FIG. 5).

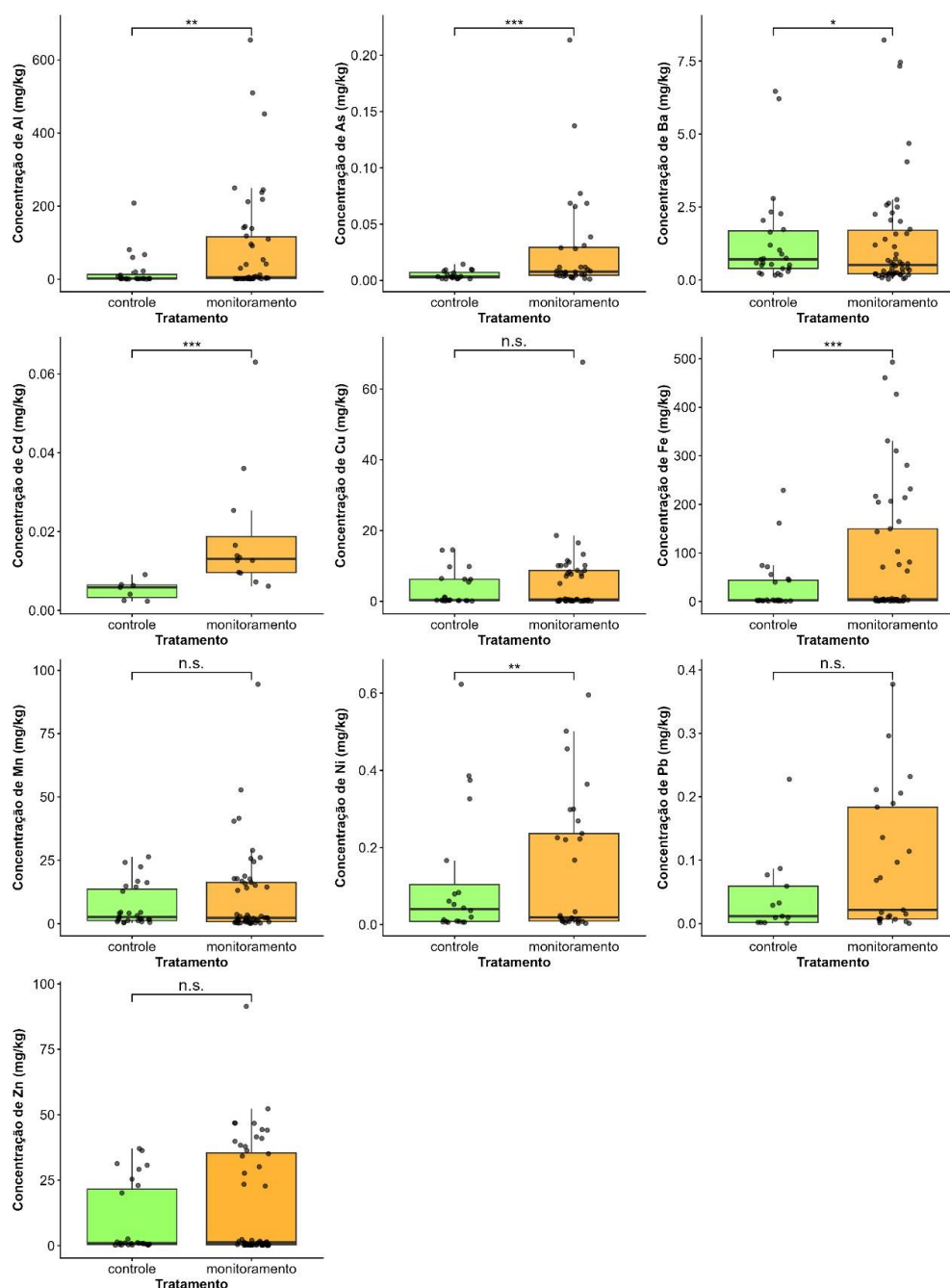
Os boxplots evidenciaram maior dispersão dos dados nas amostras provenientes das áreas de monitoramento, especialmente para Al, Fe e Ni, além da ocorrência de valores extremos para alguns elementos (FIG. 6). Essa maior variabilidade sugere heterogeneidade espacial na deposição dos elementos químicos ao longo da área monitorada. De forma geral, os resultados indicam que o efeito do gradiente de distância foi dependente do elemento químico, confirmando parcialmente a hipótese de que as concentrações seriam mais elevadas nas áreas próximas à fonte potencial de emissão.

Figura 5. Resultados dos modelos lineares generalizados (GLMs) utilizados para comparar as concentrações dos elementos químicos entre as áreas de controle e monitoramento.

Modelo	Família (função de ligação)	Chisq	df	p
Al ~ matriz	Gamma(link = "inverse")	7,5187	1	0,0061
As ~ matriz	Gamma(link = "log")	20,1790	1	0,0000
Ba ~ matriz	Gamma(link = "log")	5,0213	1	0,0100
Cd ~ matriz	Gamma(link = "log")	20,3170	1	0,0000
Cu ~ matriz	Gamma(link = "log")	0,2505	1	0,6167
Fe ~ matriz	Gamma(link = "log")	17,1210	1	0,0000
Mn ~ matriz	tweedie(link = "log")	0,4171	1	0,5184
Ni ~ matriz	gaussian(link = "log")	9,3174	1	0,0010
Pb ~ matriz	Gamma(link = "log")	0,9025	1	0,3421
Zn ~ matriz	Gamma(link = "inverse")	0,0800	1	0,773

Figura 6. Comparação das concentrações de alumínio (Al), arsênio (As), bário (Ba), cádmio (Cd), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), níquel (Ni), chumbo (Pb) e zinco (Zn) entre as áreas de controle e monitoramento. As diferenças entre os tratamentos foram avaliadas por modelos lineares generalizados (GLMs). Os asteriscos indicam diferenças estatisticamente

significativas entre os tratamentos ($p < 0,05$; ** $p < 0,01$; *** $p < 0,001$), enquanto **n.s.** indica ausência de diferença significativa ($p \geq 0,05$).



4. Discussão

Os resultados confirmaram que os produtos armazenados em ninhos de *Tetragonisca angustula* são eficientes indicadores biológicos da contaminação atmosférica. Como vantagem em relação aos métodos convencionais de monitoramento, a amostragem do ambiente é realizada de forma contínua durante suas atividades de forrageamento, com a coleta de néctar, pólen, resinas e água ocorrendo em uma área relativamente ampla. Nesse processo, elementos

químicos presentes no ambiente são incorporados às matrizes biológicas produzidas pelas colônias, que representam uma ferramenta eficiente para avaliar a distribuição espacial de contaminantes (ĆIRIĆ *et al.*, 2020; MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023; MARCOCCIA *et al.*, 2024).

Corroborando a predição da primeira hipótese, o pólen foi a matriz mais eficiente na detecção dos elementos analisados, apresentando concentrações substancialmente mais elevadas para todos os elementos analisados, em comparação ao mel. Tal resultado demonstra a eficiência do seu uso como amostrador de elementos químicos, com potencial uso para monitoramento de contaminantes atmosféricos, e estão em conformidade com outros estudos que avaliaram a eficiência dessa matriz biológica (KADRY *et al.*, 2025; KILIÇ ALTUN *et al.*, 2017; OLIVEIRA *et al.*, 2016; RANGEL *et al.*, 2022). A forte disparidade registrada entre as matrizes reflete a natureza lipofílica e o elevado potencial de retenção de partículas atmosféricas na superfície exterior dos grãos de pólen, enquanto o mel apresentou concentrações de base significativamente inferiores (ALDGINI *et al.*, 2019).

A concentração de determinados elementos estudados variou com a distância da fonte emissora e entre os elementos estudados, o que corroborou parcialmente a segunda hipótese. Foram observadas concentrações significativamente mais elevadas de Al, As, Ba, Cd, Fe e Ni nos pontos de monitoramento mais próximos da fonte emissora, em comparação às áreas de controle, em geral mais distantes, indicando que a proximidade da planta industrial está associada ao aumento da deposição desses elementos (CSAVINA *et al.*, 2012; TENAILLEAU *et al.*, 2024). Por outro lado, Cu, Mn, Pb e Zn não apresentaram diferenças significativas. Esse resultado sugere que a distribuição desses elementos não foi significativamente influenciada pela atividade industrial avaliada. Além disso, diferenças nas propriedades físico-químicas dos elementos, como mobilidade e tamanho das partículas transportadas, podem contribuir para padrões espaciais distintos (HE *et al.*, 2023).

A alta concentração de Fe nas áreas monitoradas era esperado, considerando que esse elemento constitui o principal componente do minério processado na usina de pelotização. O minério utilizado na unidade industrial é proveniente da Mina de Germano, localizada no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, uma das principais províncias minerais do mundo, cujas formações ferríferas bandadas são naturalmente enriquecidas em ferro e contêm outros elementos, como Al, Mn, Si e, em menores proporções, metais e metaloides, incluindo As (SELMÍ *et al.*, 2009). Dessa forma, a elevação concomitante de Al, Ba e Ni possivelmente reflete a composição mineralógica do material particulado associado às operações de mineração

e beneficiamento, uma vez que esses elementos podem ocorrer em associação a minerais presentes em formações ferríferas (AFTABI *et al.*, 2021).

A exposição crônica aos elementos que apresentaram uma maior concentração pode representar um alerta devido aos seus potenciais efeitos prejudiciais sobre a saúde humana e os ecossistemas (JAISHANKAR *et al.*, 2014; TCHOUNWOU *et al.*, 2012). O As é reconhecido por seu efeito carcinogênico para o ser humano, além de causar alterações cardiovasculares e neurológicas (TCHOUNWOU *et al.*, 2012). Já o Cd apresenta elevada persistência ambiental e bioacumulação, estando relacionado a disfunções respiratórias (TCHOUNWOU *et al.*, 2012). O Ni, por sua vez, pode causar efeitos alérgicos respiratórios (GENCHI *et al.*, 2020). Embora o Fe, o Al e o Ba sejam elementos naturalmente presentes na crosta terrestre, o aumento de suas concentrações decorrente de atividades industriais pode aumentar a exposição ambiental e contribuir para efeitos adversos (CSAVINA *et al.*, 2012; HE *et al.*, 2023).

De acordo com a Resolução CONAMA nº 506, que estabelece os padrões nacionais de qualidade atmosféricos, não existem limites legais específicos para concentrações nas matrizes biológicas avaliadas neste estudo. Dessa forma, os resultados obtidos não podem ser comparados diretamente aos valores previstos na legislação. Entretanto, a detecção de concentrações mais elevadas de elementos como Al, Ba, Fe e Ni nas áreas de monitoramento em relação às áreas de controle sugere uma dispersão atmosférica associada às atividades da usina de pelletização, reforçando a necessidade de monitoramento contínuo da qualidade ambiental e da exposição aos contaminantes atmosféricos (BRASIL, 2024).

5. Conclusão

Atividades industriais como a mineração causam alterações ambientais que devem ser monitoradas (CSAVINA *et al.*, 2012; LOTTERMOSER, 2023). Neste contexto, o biomonitoramento apresenta-se como uma alternativa eficiente para mensuração dos impactos desta atividade (MAIR; IRRGEHER; HALUZA, 2023; dos REIS *et al.*, 2025).

Dessa forma, estudos como este, que avaliam a eficiência de diferentes matrizes biológicas, tornam-se relevantes para subsidiar medidas de mitigação e de avaliação da exposição a contaminantes atmosféricos potencialmente tóxicos (dos REIS *et al.*, 2025).

A detecção de maiores concentrações de determinados elementos nas áreas próximas à planta industrial sugere a ocorrência de deposição atmosférica advinda da atividade mineradora, reforçando a importância do monitoramento contínuo, especialmente porque alguns desses elementos são reconhecidos por sua elevada toxicidade (CSAVINA *et al.*, 2012; TCHOUNWOU *et al.*, 2012). Os resultados demonstram a eficiência da matriz pólen na

quantificação de elementos, indicando sua manutenção em programas e estudos de monitoramento ambiental (NASCIMENTO *et al.*, 2018).

Além de sua elevada sensibilidade ambiental, as abelhas sem ferrão nativas apresentam vantagens práticas para programas de biomonitoramento, incluindo ampla distribuição nas regiões tropicais, manejo relativamente simples, baixo custo de manutenção e possibilidade de coletas periódicas ao longo do tempo. Essas características permitem o acompanhamento da dinâmica temporal e espacial da deposição de contaminantes, complementando os métodos tradicionais de monitoramento da qualidade do ar (NASCIMENTO *et al.*, 2018; OLIVEIRA *et al.*, 2017; RANGEL, 2020; de SANTANA *et al.*, 2022).

REFERÊNCIAS

- AFTABI, Alijan; ATAPOUR, Habibeh; MOHSENI, Sadegh; BABAKI, Anita.** Geochemical discrimination among different types of banded iron formations (BIFs): a comparative review. *Ore Geology Reviews*, v. 136, p. 104244, 2021. DOI: 10.1016/j.oregeorev.2021.104244.
- AISHANKAR, Monisha; TSETEN, Tenzin; ANBALAGAN, Naresh; MATHEW, Blessy B.; BEEREGOWDA, Krishnamurthy N.** Toxicity, mechanism and health effects of some heavy metals. *Interdisciplinary Toxicology*, v. 7, n. 2, p. 60–72, 2014. DOI: 10.2478/intox-2014-0009.
- ALDGINI, Hamza M. M.; AL-ABBADI, Amal Abdullah; ABU-NAMEH, Eyad S. M.; ALGAZHEER, Rabia O.** Determination of metals as bio indicators in some selected bee pollen samples from Jordan. *Saudi Journal of Biological Sciences*, v. 26, n. 7, p. 1418–1422, 2019. DOI: 10.1016/j.sjbs.2019.03.005.
- ÁLVARES, Clayton Alcarde; STAPE, José Luiz; SENTELHAS, Paulo Cesar; GONÇALVES, José Leonardo de Moraes; SPAROVEK, Gerd.** Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- ARAÚJO, Eliane R.; FERNANDES, Francisco R. Chaves.** Mineração no Brasil: crescimento econômico e conflitos ambientais. In: GUIMARÃES, Paulo Eduardo; PÉREZ CEBADA, Juan Diego (org.). *Conflitos ambientais na indústria mineira e metalúrgica: o passado e o presente*. Rio de Janeiro: CETEM/CICP, 2016. p. 65–88.
- BARTHA, Szilárd; TAUT, Ioan; GOJI, Győző; VLAD, Ioana Andra; DINULICĂ, Florin.** Heavy metal content in polyfloral honey and potential health risk: a case study of Copșa Mică, Romania. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 5, p. 1507, 2020. DOI: <https://doi.org/10.3390/ijerph17051507>
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA).** Resolução nº 506, de 5 de julho de 2024. Estabelece padrões nacionais de qualidade do ar e fornece diretrizes para sua aplicação. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, 9 jul. 2024.
- CAETANO, Tamires Silva Guimarães; FRANCO, João Ricardo; OLIVEIRA, Victor Carlos de; AGOSTINHO, Isabela Maria; ALMEIDA, Isabela Alves de; PAI, Edson Donizete; NARDI JUNIOR, Geraldo de.** A importância das abelhas sem ferrão na polinização das culturas agrícolas no Brasil. *Revista Delos*, v. 17, n. 61, 2024. DOI: 10.55905/rdelosv17.n61-126.
- CESAR, Ricardo Gonçalves; MARÇAL, Mônica dos Santos; SERRANO, Aline Freire; LOURENÇO, Rodrigo Sardinha; NASCIMENTO, Matheus Teixeira do; RABELLO, Mariana Vezzoni Tosta; POLIVANOV, Helena; RAMOS, Jéssica Zickwolf; CASTILHOS, Zuleica Carmen.** Metal pollution in fluvial deposits impacted by a mining dam failure in the Doce river watershed (MG): earthworms as bioindicators. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 15, n. 1, p. 414–428, 2022. DOI: 10.26848/rbgf.v15.1.p414-428.

ĆIRIĆ, Jelena; JOVANOVIĆ, Ivana; PANTIĆ, Milica; ĐURĐEVIĆ, Vesna; KRNJAJA, Vesna; STANISAVLJEVIĆ, Ljubiša; ŽIVKOV-BALOŠ, Milica. Honey bees and their products as indicators of environmental element deposition. *Biological Trace Element Research*, v. 199, n. 6, p. 2312–2319, 2021. DOI: 10.1007/s12011-020-02321-6.

CRANE, Eva (1983). *The archaeology of beekeeping*. Ithaca, New York: Cornell University Press.

CUNNINGHAM, Morgan M.; MULVEY, Patrick; BAKER, Erin N.; ZHONG, Shijie; McART, Scott H. Honey bees as biomonitors of environmental contaminants, pathogens, and climate change. *Ecological Indicators*, v. 134, p. 108457, 2022. DOI: 10.1016/j.ecolind.2021.108457.

GENCHI, Giuseppe; CAROCCI, Alessia; LAURIA, Graziantonio; SINICROPI, Maria Stefania; CATALANO, Alessia. Nickel: human health and environmental toxicology. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, v. 17, n. 3, p. 679, 2020. DOI: 10.3390/ijerph17030679.

HE, Liang; WANG, Shengli; LIU, Mengbo; CHEN, Zhaoming; XU, Jun; DONG, Yinwen. Transport and transformation of atmospheric metals in ecosystems: a review. *Journal of Hazardous Materials Advances*, v. 9, p. 100218, 2023. DOI: 10.1016/j.hazadv.2022.100218.

KADRY, Ahmed M.; KHALIFA, Ahmed G.; MOSELY, Waleed A.; ABD-EL-HAKAM, Ahmed H.; ABDOU, Khaled A. H. Honey as a valuable bioindicator of environmental pollution. *Journal of Veterinary Medical Research*, v. 32, n. 1, p. 10–16, 2025. DOI: 10.21608/jvmr.2025.381473.1128.

KILIÇ ALTUN, Serap; DINÇ, Hikmet; PAKSOY, Nilgün; TEMAMOĞULLARI, Füsün Karaçal; SAVRUNLU, Mehmet. Analyses of mineral content and heavy metal of honey samples from south and east region of Turkey by using ICP-MS. *International Journal of Analytical Chemistry*, v. 2017, Article ID 6391454, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1155/2017/6391454>

KOWALCZUK, Izabela; GĘBSKI, Jerzy; STANGIERSKA, Dorota; SZYMAŃSKA, Agnieszka. Determinants of honey and other bee products use for culinary, cosmetic, and medical purposes. *Nutrients*, v. 15, n. 3, p. 737, 2023. DOI: 10.3390/nu15030737.

LOTTERMOSER, Bernd G. *Mine wastes: characterization, treatment and environmental impacts*. 4. ed. Cham: Springer, 2023.

MAHATO, Mukesh Kumar; SINGH, Abhay Kumar; GIRI, Soma. Evaluation of metal contamination, flux and the associated human health risk from atmospheric dustfall in metal mining areas of Southern Jharkhand, India. *Environmental Science and Pollution Research*, v. 29, n. 18, p. 30348–30362, 2022. DOI: 10.1007/s11356-021-18463-6.

MAIR, Katharina S.; IRRGEHER, Johanna; HALUZA, Daniela. Elucidating the role of honey bees as biomonitors in environmental health research. *Insects*, v. 14, n. 11, p. 874, 2023. DOI: 10.3390/insects14110874.

MARCOCCIA, Daniele; TZANETOU, Evangelia N.; PIETROPAOLI, Marco; ROESSINK, Ivo; VAN DER STEEN, Jozef; CUVA, Camilla; FORMATO, Giovanni; KASIOTIS, Konstantinos M. Biomonitoring of particulate matter and volatile organic compounds using honey bees and their products. A contemporary overview. *Science of the Total Environment*, v. 956, p. 177391, 2024. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2024.177391.

MATÉS, José Manuel; SEGURA, Juan Antonio; ALONSO, Francisco Javier; MÁRQUEZ, Javier. Roles of dioxins and heavy metals in cancer and neurological diseases using ROS-mediated mechanisms. *Free Radical Biology and Medicine*, v. 49, n. 9, p. 1328–1341, 2010. DOI: 10.1016/j.freeradbiomed.2010.07.028.

MILANEZ, Bruno. Mineração, ambiente e sociedade: impactos complexos e simplificação da legislação. *Boletim Regional, Urbano e Ambiental*, Brasília: Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA), n. 16, p. 93–99, 2017.

MORGANO, Marcelo Antonio; MARTINS, Marcia Cristina Teixeira; RABONATO, Luana Cristina; MILANI, Raquel F.; YOTSUYANAGI, Katumi; RODRIGUEZ-AMAYA, Delia B. A comprehensive investigation of the mineral composition of Brazilian bee pollen: geographic and seasonal variations and contribution to human diet. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, v. 23, n. 4, p. 727–736, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0103-50532012000400019>

NASCIMENTO, Natália Oliveira; NALINI, Hernani Alves; ATAÍDE, Frederico; ABREU, André T.; ANTONINI, Yasmine. Pollen storage by stingless bees as an environmental marker for metal contamination: spatial and temporal distribution of metal elements. *Sociobiology*, v. 65, n. 2, p. 259–270, 2018.

OLIVEIRA, Fernanda A.; ABREU, André T.; NASCIMENTO, Natália O.; FROES-SILVA, Renata E.; ANTONINI, Yasmine; NALINI JÚNIOR, Hernani Alves; LENA, Jean Claude. Evaluation of matrix effect on the determination of rare earth elements and As, Bi, Cd, Pb, Se and In in honey and pollen of native Brazilian bees (*Tetragonisca angustula* - Jataí) by Q-ICP-MS. *Talanta*, v. 162, p. 488–494, 2017. DOI: 10.1016/j.talanta.2016.10.058.

PINDER, Robert W.; KLOPP, Jacqueline M.; KLEIMAN, Gary; HAGLER, Gail S. W.; AWE, Yewande; TERRY, Susan. Opportunities and challenges for filling the air quality data gap in low- and middle-income countries. *Atmospheric Environment*, v. 215, p. 116794, 2019. DOI: 10.1016/j.atmosenv.2019.06.032.

RANGEL, Leonardo Barbosa. A contaminação de mel e pólen por metais pesados e o transporte de metais em uma cadeia alimentar na região atingida pelo rompimento da Barragem de Fundão (MG). 2020. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ecologia de Biomas Tropicais) – Instituto de Ciências Exatas e Biológicas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2020.

RANGEL, Leonardo Barbosa; KOZOVITS, Alessandra Rodrigues; MESSIAS, Maria Cristina Teixeira Braga; ABREU, Adriana Trópia; ANTONINI, Yasmine. Impacts of a tailing dam break on the contamination of pollen and honey from the stingless bee *Tetragonisca angustula* (Apidae: Trigonini). *Journal of Apicultural Research*, v. 63, n. 5, p. 901–911, 2022. DOI: 10.1080/00218839.2022.2081428.

RASHED, Mohamed N.; EL-HATY, Mohamed T. A.; MOHAMED, Sayed M. Bee honey as environmental indicator for pollution with heavy metals. *Toxicological and Environmental Chemistry*, v. 91, n. 3, p. 389–403, 2009. DOI: 10.1080/02772240802294870.

REIS, Marcos Levi C. M. dos; SANTOS, Lucas F. M. dos; GUIMARÃES, Leonardo B.; ALBUQUERQUE, Luciano A. de; SANTANA, Rodolfo M. M.; SANTOS, Daniele C. M. B. dos; TEIXEIRA, Leonardo S. G.; DIAS, Fabio de S. Atomic spectrometric techniques in bees and beehive products analysis for elemental determination and their use as environmental indicators. *Trends in Environmental Analytical Chemistry*, v. 48, p. e00288, 2025. DOI: 10.1016/j.teac.2025.e00288.

ROMAN, Anna. Concentration of chosen trace elements of toxic properties in bee pollen loads. *Polish Journal of Environmental Studies*, v. 18, n. 2, p. 265–272, 2009.

SANI, Sadiku Aminu; IBRAHIM, Amina; MUSA, Abuhuraira Ado; DAHIRU, Muntaka; BABALLE, Muhammad Ahmad. Drawbacks of traditional environmental monitoring systems. *Computer and Information Science*, v. 16, n. 3, p. 30–39, 2023.

SANTANA, Sintia Emmanuelle Andrade de; SILVA, Arlete Prado; SERRÃO, José Eduardo; MELLO AFFONSO, Paulo Roberto Antunes de; NUNES, Lorena Andrade; WALDSCHMIDT, Ana Maria. Chemical profile of elements in the stingless bee *Melipona quadrifasciata anthidioides* (Hymenoptera: Apidae). *Biological Trace Element Research*, v. 200, n. 8, p. 3885–3889, 2022. DOI: 10.1007/s12011-021-02951-4.

SAVINA, Janae; FIELD, Jason; TAYLOR, Mark P.; GAO, Song; LANDÁZURI, Andrea; BETTERTON, Eric A.; SÁEZ, A. Eduardo. A review on the importance of metals and metalloids in atmospheric dust and aerosol from mining operations. *Science of the Total Environment*, v. 433, p. 58–73, 2012. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2012.06.013.

SELMÍ, Marcelo; LAGOEIRO, Leonardo Evangelista; ENDO, Issamu. Geochemistry of hematite and itabirite, Quadrilátero Ferrífero, Brazil. *Rem: Revista Escola de Minas, Ouro Preto*, v. 62, n. 1, p. 35–43, 2009. DOI: 10.1590/S0370-44672009000100006.

SERRA, Cristina. Tragédia em Mariana: a história do maior desastre ambiental do Brasil. Rio de Janeiro: Record, 2018.

SIMONSEN, Roberto C. História econômica do Brasil: 1500-1820. São Paulo: Companhia Editora Nacional, 1978.

TENAILLEAU, Quentin; LANIER, Caroline; PRUD'HOMME, Julie; CUNY, Damien; DERAM, Annabelle; OCCELLI, Florent. Distance-based indicators for evaluating environmental multi-contamination and related exposure: how far should we go? *Environmental Science and Pollution Research*, v. 31, p. 50642–50653, 2024. DOI: 10.1007/s11356-024-34519-9.

TCHOUNWOU, Paul B.; YEDJOU, Clement G.; PATLOLLA, Anita K.; SUTTON, Dwayne J. Heavy metals toxicity and the environment. *EXS*, v. 101, p. 133–164, 2012..

YOUSAFZAI, Ali Muhammad; SIRAJ, Muhammad; AHMAD, Habib; CHIVERS, Douglas P. Bioaccumulation of heavy metals in common carp: implications for human health. *Pakistan Journal of Zoology*, v. 44, n. 2, p. 489–494, 2012.

ZAVRTNIK, Saša; LOBOREC, Jelena; KAPELJ, Sanja; GRČIĆ, Ivana. Environmental biomonitoring of heavy and toxic metals using honeybees and their products—an overview of previous research. *Sustainability*, v. 16, n. 19, p. 8526, 2024. DOI: 10.3390/su16198526.

APÊNDICE A – Dados das coletas das amostras

Código	Matriz	Local inicial	Local 2	Local final	Tratamento	Estação	Data
PQ23-481	Pólen	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-483	Pólen	Samarco	Samarco	Samarco	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-486	Pólen	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	06/2023
PQ23-489	Pólen	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-615	Pólen	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	06/2023
PQ23-618	Pólen	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-622	Pólen	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-994	Pólen	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-997	Pólen	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	07/2023
PQ23-1000	Pólen	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ24-97	Pólen	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-100	Pólen	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-103	Pólen	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-106	Pólen	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-109	Pólen	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-112	Pólen	Monte urubu	Monte urubu	Monte urubu	Controle	Úmida	02/2024
PQ24-623	Pólen	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-626	Pólen	Condados	Condados	Condados	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-629	Pólen	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-633	Pólen	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ24-636	Pólen	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	08/2023
PQ24-639	Pólen	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ24-642	Pólen	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-645	Pólen	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	05/2024
PQ24-648	Pólen	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	05/2024
PQ24-652	Pólen	Monte urubu	Monte urubu	Monte urubu	Controle	Seca	05/2024
PQ24-655	Pólen	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Seca	05/2024
PQ23-827	Mel	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-829	Mel	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-832	Mel	Samarco	Samarco	Samarco	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-835	Mel	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-838	Mel	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-841	Mel	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-844	Mel	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	06/2023
PQ23-877	Mel	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	06/2023
PQ23-880	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	06/2023
PQ23-883	Mel	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-945	Mel	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-948	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-951	Mel	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-978	Mel	Samarco	Samarco	Samarco	Monitoramento	Seca	07/2023

PQ23-981	Mel	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-984	Mel	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	07/2023
PQ23-987	Mel	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	07/2023
PQ23-989	Mel	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	07/2023
PQ23-993	Mel	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-659	Mel	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-661	Mel	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-664	Mel	Samarco	Samarco	Samarco	Controle	Seca	08/2023
PQ24-668	Mel	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	08/2023
PQ24-669	Mel	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-671	Mel	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-674	Mel	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-676	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-679	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-681	Mel	Condados	Condados	Condados	Controle	Seca	08/2023
PQ24-684	Mel	Fazenda	Fazenda	Fazenda	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-688	Mel	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-691	Mel	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-695	Mel	Fazenda	Fazenda	Fazenda	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-698	Mel	Monte urubu	Monte urubu	Monte urubu	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-700	Mel	Condados	Condados	Condados	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-735	Mel	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Úmida	11/2023
PQ24-738	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-741	Mel	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Úmida	11/2023
PQ24-744	Mel	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Seca	08/2023
PQ24-747	Mel	Meaipe	Meaipe	E. Meaipe	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-750	Mel	Guanabara	Guanabara	E. Guanabara	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-753	Mel	Anchieta	Anchieta	E. Anchieta	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-756	Mel	Ubu	Ubu	E. Ubu	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-759	Mel	Condados	Condados	Condados	Controle	Úmida	02/2024
PQ24-762	Mel	Monte urubu	Monte urubu	Monte urubu	Controle	Úmida	02/2024
PQ24-765	Mel	EBH	EBH	E. BH	Monitoramento	Úmida	02/2024
PQ24-768	Mel	Fazenda	Fazenda	Fazenda	Controle	Seca	05/2024
PQ24-771	Mel	Samarco	Samarco	Samarco	Controle	Seca	05/2024
PQ24-774	Mel	Maeba	Maeba	E. Maeba	Monitoramento	Seca	05/2024
PQ24-776	Mel	Fazenda	Fazenda	Fazenda	Controle	Seca	05/2024
PQ24-779	Mel	Reserva	Reserva	Reserva	Controle	Seca	05/2024
PQ24-781	Mel	Ubu	Ubu	E. ubu	Monitoramento	Seca	05/2024
PQ24-839	Mel	Ubu	Ubu	E. ubu	Monitoramento	Seca	05/2024
PQ24-840	Mel	Monte urubu	Monte urubu	Monte urubu	Controle	Seca	05/2024

APÊNDICE B – Concentrações dos elementos nas amostras

Código	Ba	Cu	Zn	Mn	Al	Fe	Pb	Ni	As	Cd
PQ23-481	1,591	7,822	36,349	13,123	91,398	216,870	NA	NA	NA	NA
PQ23-483	8,220	11,496	35,115	28,926	249,723	164,769	NA	NA	NA	NA
PQ23-486	2,270	6,431	37,078	14,805	19,943	39,810	NA	NA	NA	NA
PQ23-489	2,253	10,107	37,872	15,145	96,008	330,933	NA	NA	NA	NA
PQ23-615	1,730	6,194	31,362	16,217	80,977	161,332	NA	NA	NA	NA
PQ23-618	0,883	7,683	41,546	16,259	30,104	62,860	NA	NA	NA	NA
PQ23-622	2,010	18,590	46,756	41,569	138,691	204,597	NA	NA	NA	NA
PQ23-994	7,460	10,127	39,874	26,077	244,647	280,676	NA	NA	NA	NA
PQ23-997	2,792	14,530	36,346	22,440	208,240	229,015	NA	NA	NA	NA
PQ23-1000	1,579	16,521	44,113	52,780	141,068	231,901	NA	NA	NA	NA
PQ24-97	1,397	5,039	38,370	14,126	53,608	75,900	0,190	0,222	0,031	0,013
PQ24-100	2,632	7,108	44,350	17,768	212,212	213,810	0,184	0,298	0,069	0,017
PQ24-103	2,500	8,325	52,292	17,603	109,811	143,643	0,072	0,269	0,039	0,013
PQ24-106	1,739	11,062	46,868	16,751	144,380	102,936	0,068	0,300	0,028	0,006
PQ24-109	4,680	67,604	91,413	94,494	452,202	206,545	0,114	0,595	0,069	0,025
PQ24-112	6,464	6,248	30,735	24,170	11,241	74,117	0,029	0,623	0,009	0,006
PQ24-623	2,050	13,278	40,993	24,486	40,529	81,076	0,206	0,364	0,012	0,014
PQ24-626	2,331	9,836	29,176	16,728	67,406	71,374	0,228	0,326	0,014	0,006
PQ24-629	4,050	8,709	30,156	18,757	654,280	460,912	0,377	0,456	0,077	0,036
PQ24-633	1,143	10,090	46,838	25,701	41,840	70,817	0,097	0,236	0,012	0,007
PQ24-636	1,642	5,437	22,998	12,778	59,793	55,511	0,077	0,166	0,010	0,004
PQ24-639	2,302	10,212	27,699	14,426	237,561	310,276	0,232	0,220	0,066	0,010
PQ24-642	2,753	8,751	34,238	15,779	118,416	149,631	0,136	0,501	0,029	0,063
PQ24-645	2,043	9,749	20,142	14,453	22,457	46,127	0,087	0,375	0,008	0,007

PQ24-648	7,325	7,826	23,448	17,737	509,761	493,124	0,296	0,225	0,137	0,013
PQ24-652	6,209	14,440	25,408	26,377	7,863	43,816	0,059	0,386	0,007	0,009
PQ24-655	2,570	7,023	22,785	40,443	218,407	427,193	0,211	0,167	0,214	0,009
PQ23-827	0,384	NA	0,287	1,237	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-829	0,031	NA	NA	NA	1,955	2,942	NA	NA	NA	NA
PQ23-832	0,491	0,393	1,230	3,637	NA	1,739	NA	NA	NA	NA
PQ23-835	0,248	NA	0,307	1,165	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-838	0,078	NA	0,375	0,112	2,592	1,413	NA	NA	NA	NA
PQ23-841	0,722	0,460	2,347	2,115	2,920	4,641	NA	NA	NA	NA
PQ23-844	0,889	NA	1,367	3,158	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-877	0,732	NA	0,842	1,786	NA	1,497	NA	NA	NA	NA
PQ23-880	0,261	0,531	1,586	2,303	NA	1,566	NA	NA	NA	NA
PQ23-883	1,199	0,416	1,680	2,511	3,147	4,523	NA	NA	NA	NA
PQ23-945	0,081	NA	0,457	0,204	1,731	2,954	NA	NA	NA	NA
PQ23-948	0,219	NA	1,323	1,909	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-951	0,675	NA	0,735	2,865	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-978	0,615	0,415	1,063	2,323	1,576	1,421	NA	NA	NA	NA
PQ23-981	0,153	NA	0,368	0,550	NA	2,420	NA	NA	NA	NA
PQ23-984	0,585	NA	0,847	1,689	2,294	2,077	NA	NA	NA	NA
PQ23-987	0,046	NA	0,864	0,167	2,070	2,804	NA	NA	NA	NA
PQ23-989	1,025	NA	0,872	4,123	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ23-993	0,179	NA	0,463	0,755	NA	NA	NA	NA	NA	NA
PQ24-659	0,261	0,118	0,298	0,818	0,853	0,817	NA	0,009	0,001	NA
PQ24-661	0,559	0,190	0,390	1,620	4,069	3,247	0,001	0,017	0,004	NA
PQ24-664	0,584	0,370	1,039	4,043	1,573	1,807	NA	0,061	0,002	NA
PQ24-668	1,194	0,263	1,145	4,471	1,450	1,504	NA	0,053	0,002	NA

PQ24-669	0,218	0,360	2,038	0,708	4,435	6,182	0,004	0,024	0,008	NA
PQ24-671	0,611	0,096	0,219	1,339	1,924	1,377	0,000	0,014	0,005	NA
PQ24-674	0,546	0,143	0,725	1,271	5,455	4,570	0,010	0,015	0,005	NA
PQ24-676	0,254	0,684	1,426	3,405	1,694	3,055	NA	0,016	0,002	NA
PQ24-679	0,211	0,606	1,265	2,933	1,403	2,697	NA	0,014	0,002	NA
PQ24-681	0,745	0,304	0,942	2,187	1,902	2,510	NA	0,080	0,003	NA
PQ24-684	0,510	1,127	2,590	4,435	1,870	3,213	0,002	0,083	0,005	0,002
PQ24-688	0,205	0,020	0,182	1,123	6,698	6,565	0,012	0,011	0,012	NA
PQ24-691	0,396	0,347	0,596	0,802	11,818	9,397	0,021	0,034	0,010	NA
PQ24-695	0,293	0,390	0,484	1,185	1,979	2,174	0,002	0,009	0,003	NA
PQ24-698	0,171	0,335	0,383	0,357	1,837	1,338	0,001	0,007	0,001	NA
PQ24-700	0,707	0,169	0,449	1,613	3,768	3,112	0,001	0,020	0,004	NA
PQ24-735	0,535	0,255	0,686	1,844	0,609	0,876	NA	0,037	0,002	NA
PQ24-738	0,307	0,216	0,429	2,291	2,475	2,060	NA	0,008	0,003	NA
PQ24-741	0,200	0,194	0,554	0,622	4,524	4,323	0,008	0,008	0,008	NA
PQ24-744	0,181	0,028	0,081	0,235	1,910	1,439	0,007	0,003	0,007	NA
PQ24-747	0,551	0,050	0,111	1,179	1,380	0,753	NA	NA	0,007	NA
PQ24-750	0,404	0,114	0,318	0,453	7,461	4,891	0,015	0,019	0,008	NA
PQ24-753	0,177	0,127	0,331	0,406	1,841	1,477	0,007	0,005	0,007	NA
PQ24-756	0,191	0,014	0,131	0,660	1,450	1,242	0,007	0,008	0,005	NA
PQ24-759	0,399	0,092	0,218	0,768	1,516	1,379	NA	0,006	0,003	0,002
PQ24-762	0,227	1,151	0,626	2,621	0,553	1,898	0,032	0,043	0,003	NA
PQ24-765	0,344	0,270	0,787	2,302	2,045	2,390	NA	0,008	0,004	NA
PQ24-768	0,244	0,201	1,020	1,284	0,888	1,157	NA	0,013	0,002	NA
PQ24-771	0,162	0,159	0,354	0,436	2,288	3,169	0,009	0,007	0,009	NA
PQ24-774	0,215	0,062	0,171	0,299	1,681	1,532	NA	NA	0,003	NA

PQ24-776	0,393	0,186	0,272	0,773	2,260	2,166	0,010	0,009	0,004	NA
PQ24-779	0,513	0,068	0,233	1,167	1,631	0,740	NA	0,006	0,003	NA
PQ24-781	0,143	0,037	0,133	0,442	2,353	1,468	0,003	0,003	0,005	NA
PQ24-839	0,154	0,334	NA	0,305	1,373	1,004	0,018	NA	0,005	NA
PQ24-840	0,204	0,231	0,262	0,477	0,387	0,418	0,012	0,008	0,002	NA