

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MINAS GERAIS

INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS

DEPARTAMENTO DE QUÍMICA

Pedro Costa Evangelista

AVALIAÇÃO DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM UMA
PROPRIEDADE PARTICULAR LOCALIZADA NAS PROXIMIDADES
DE UMA MINERAÇÃO DE FERRO EM ITATIAIUÇU MG

Belo Horizonte

Junho, 2026

PEDRO COSTA EVANGELISTA

AVALIAÇÃO DE CONTAMINANTES INORGÂNICOS EM UMA
PROPRIEDADE PARTICULAR LOCALIZADA NAS PROXIMIDADES DE
UMA MINERAÇÃO DE FERRO EM ITATIAIUÇU MG

Trabalho de Conclusão de Curso
apresentado ao Departamento de
Química do Instituto de Ciências
Exatas, da Universidade Federal de
Minas Gerais, como requisito para a
obtenção do título de Bacharel em
Química Tecnológica

Orientador(a): Profa. Cláudia
Carvalhinho Windmöller

BELO HORIZONTE

Junho, 2026

Ata da sessão de avaliação do Trabalho de Conclusão de Curso de Bacharelado em Química Tecnológica da Universidade Federal de Minas Gerais, do aluno Pedro Costa Evangelista, nº de registro 2024423315.

O Trabalho de Conclusão de Curso do aluno **Pedro Costa Evangelista**, intitulado **“Avaliação de contaminantes inorgânicos em uma propriedade particular localizada nas proximidades de uma mineração de ferro em Itatiaiuçu MG”**”, foi avaliado e aprovado pela Banca Examinadora constituída por Profa. Patrícia Sueli de Rezende (CEFET-MG), Prof. Wagner da Nova Mussel (DQ - UFMG), e Profa. Cláudia Carvalhinho Windmöller (DQ - UFMG), orientadora do trabalho de conclusão de curso, no dia 24 de junho de 2026.



Documento assinado digitalmente
CLAUDIA CARVALHINHO WINDMOLLER
Data: 25/06/2026 18:03:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Cláudia Carvalhinho Windmöller



Documento assinado digitalmente
PATRICIA SUELI DE REZENDE
Data: 26/06/2026 06:44:17-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Profa. Patrícia Sueli de Rezende



Documento assinado digitalmente
WAGNER DA NOVA MUSSEL
Data: 27/06/2026 20:05:34-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Wagner da Nova Mussel



Documento assinado digitalmente
DALVA ESTER DA COSTA FERREIRA SANTOS
Data: 30/06/2026 13:50:46-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dario Windmöller / Profa. Dalva Ester da Costa Ferreira
Coordenador dos Cursos de Graduação em Química e Química Tecnológica
ICEx –UFMG

Dedico esse trabalho a minha família. A Chácara Aparecida sempre nos reservou momentos únicos, assim como este trabalho.

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar quero agradecer a Deus, sem Ele não seria possível estar vivendo um momento tão único em minha vida.

Agradeço a minha família, a minha mãe Felícia pelo amor incondicional, apoio, incentivo, companheirismo, amizade, por diversas vezes abdicar de inúmeras coisas para dar o melhor para os filhos, você é meu maior exemplo, é a maior pureza que reflete em minha vida, sem ela não seria possível nada disso. Ao meu pai Alex, pelo amor, amizade, apoio e sempre me incentivar a estudar independente do momento. Ao meu irmão Henrique, pelas risadas, pela amizade, ver você crescer me ensinou muito sobre resiliência, esforço, foco, você é luz. Amo vocês!

Rafaela Nogueira, minha eterna companheira de vida, te agradeço por tudo que o que já vivemos ao longo dos anos e ansioso para o que vamos viver pelo resto de nossas vidas. Você representa para mim um porto seguro, uma amizade incondicional, um amor único. Se hoje finalizo essa etapa, foi porque você foi a primeira a acreditar em mim, me levantando quando eu caía e sempre me incentivando e falando “Vai lá pookie, você consegue”. Meu muito obrigado, você é única. Te amo!

Quero agradecer ao meu avô Amilton meu eterno amigo, nossos momentos são únicos desde as idas a praça do Salgado Filho, até nossas viagens a praia. Minha avó Aparecida, que guardo eternamente em meu coração, sei que ainda cuida da nossa família no plano superior. Agradeço a vocês por cuidarem de mim no início e me mostrarem o amor mais puro, cuidado e carinho.

Agradeço aos meus tios Amanda e Francisco, primeiro pela amizade, carinho e companheirismo e pelo apoio nesse desafio que foi a realização desse trabalho na propriedade que residem atualmente, esse trabalho é para vocês.

A Profa. Cláudia Carvalhinho, pela orientação, apoio e ensino em todos os momentos desse trabalho, você foi crucial, sem medir esforços em nenhuma das solicitações ou ideias que tive, além de sempre se preocupar com a minha formação, buscando o melhor para mim. Meu muito obrigado.

Agradeço a Dra. Gabriela Santos, você me deu a oportunidade da minha primeira iniciação científica, me ensinou tudo, com muito cuidado e dedicação. Aliado

a isso a amizade, sem você esse trabalho não seria concluído, o que sei e aprendi até hoje devo muito a você. Obrigado.

Quero agradecer aos amigos que fiz ao longo dos anos, Tomaz, Gabriel, Marcella, Maria Eduarda, Marco Tulio, Bernardo e Marina, vocês foram de extrema importância ao longo desse percurso, seja só para dar uma risada, ou passar a madrugada jogando juntos. Vocês são sensacionais, meu muito obrigado.

*“Onde o medo não estiver mais, nada haverá.
Somente eu restarei”*

Frank Herbert - DUNA

RESUMO

Este trabalho teve como objetivo a avaliação de contaminantes inorgânicos em uma propriedade próxima a uma mineração de ferro na cidade de Itatiaiuçu (MG), além da elucidação de possíveis fontes de exposição que os residentes estão sujeitos. O trabalho compreendeu uma amostragem de matrizes de solo, poeira, além de amostras de água de poço, de rio e para consumo humano. As amostras de solo e poeira passaram por um método de digestão ácida assistida por micro-ondas (EPA 3051A) e posterior análise via ICP-QQQ. Foram realizadas análises estatísticas e comparação com normas regulamentadoras dentre elas a CONAMA 420/2009 que apresenta valores de prevenção relacionados a presença de contaminantes inorgânicos em solos e a resolução da GM/MS N° 888/2021 que indica valores máximos permitidos de contaminantes inorgânicos em águas potáveis. Para as amostras de solo, identificou-se que os elementos Ni, Cr e As excederam os valores de prevenção descritos na CONAMA 420/2009. Enquanto para as amostras de água somente o As excedeu os limites da resolução GM/MS N° 888/2021. A matriz de poeira não possui normas regulamentadoras para comparação, mas elementos foram quantificados nessa matriz e comparados com os obtidos na matriz de solo, em que se calculou o fator de enriquecimento/empobrecimento (poeira/solo) na poeira, indicando que Li, Mn, Zn, Ba e Cd apresentaram enriquecimento na matriz. As amostras de alimento não foram analisadas. Com a amostragem e posterior análise foi possível elucidar uma fonte de exposição, a água, vez que as concentrações de As excederam o limite da resolução GM/MS N° 888/2021 para potabilidade.

Palavras-chave: Mineração, Contaminantes inorgânicos, Digestão ácida, Micro-ondas, Amostras ambientais

Lista de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática do princípio operacional do espectrômetro de massas do tipo quadrupolo	27
Figura 2 - Localização da propriedade em relação a área de mineração – distância da propriedade até a área de mineração	33
Figura 3 - Pontos de coleta de amostras de solo e poeira na propriedade de interesse do estudo.....	34
Figura 4 - Coleta de amostra de solo com auxílio de estrado de aço inox	35
Figura 5 - Pontos de coleta de amostras de água na propriedade de interesse do estudo	36
Figura 6 - Coleta de amostra de água na nascente interna da propriedade	37
Figura 7 - Gráficos com as concentrações médias de cada elementos nas amostras, desvios padrões e Valor de Prevenção, Valor de investigação para solos agrícolas, residenciais e industriais de acordo com a Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009	48
Figura 8 - Gráfico dos elementos pelo valor da razão da concentração do metal na poeira sobre a concentração do metal no solo.....	54
Figura 9 - Gráficos com as concentrações em µg/L de cada elemento nas amostras, valor do limite de detecção da análise e valor máximo permitido de acordo com a Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021	57

Lista de Tabelas

Tabela 1 - Coordenadas geográficas em UTM das amostras coletadas	32
Tabela 2 - Parâmetros instrumentais do ICP-QQQ para determinação de metais	41
Tabela 3 - Avaliação do método, metais analisados, linearidade, precisão em porcentagem, recuperação em porcentagem e valores de limite de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) em µg/g	42
Tabela 4 - Médias e desvios padrões das concentrações dos elementos em µg/g obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de solo - médias e desvio padrões de Hg em µg/g obtidos via DMA e valores de prevenção para os elementos certificados de acordo com a CONAMA 420/2009	45
Tabela 5 - Médias e desvios padrões das concentrações dos elementos em µg/g obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de poeira	46
Tabela 6 - Valores das razões para cada um dos elementos estudados	53
Tabela 7 - Enriquecimento/empobrecimento dos elementos nas amostras de solo e poeira	54
Tabela 8 - Valores das concentrações dos elementos em µg/L obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de água e VMP dos elementos certificados Portaria 888/2021 em µg/L	56

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	13
2.	OBJETIVO	17
2.1	Objetivo geral	17
2.2	Objetivos Específicos	17
3	REFERENCIAL TEÓRICO	18
3.1	Mineração em Minas Gerais, relevância e impactos	18
3.1.1	Mineração e relevância econômica	18
3.1.2	Mineração e impactos ambientais	19
3.2	Amostragem	20
3.2.1	Conceito, planejamento e materiais	20
3.3	Decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas	22
3.3.1	Contexto e princípios	22
3.3.2	Aplicações, normas e métodos padronizados	23
3.4	Análise instrumental via ICP-MS	24
3.4.1	Princípio analítico	24
3.4.2	O ICP-MS	25
3.4.3	Espectrômetro de massas tipo Quadrupolo e o detector	26
4	PARTE EXPERIMENTAL	29
4.1	Materiais	29
4.1.1	Reagentes e materiais de referência	29
4.1.2	Equipamentos	29
4.2	Amostras	Erro! Indicador não definido.
4.2.1	Coleta das amostras	30
4.3	Metodologia	38
4.3.1	Tratamento preliminar de amostras	38
4.3.2	Digestão ácida assistida por micro-ondas	38
4.3.3	Preparo das curvas analíticas	39
4.3.4	Diluição das amostras	39
4.3.5	Instrumentação analítica	40
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	42
5.1	Avaliação do método realizado	42
5.2	Determinação de elementos potencialmente tóxicos em matrizes de solo e poeira	43

5.3	Determinação de elementos potencialmente tóxicos em matrizes de água	55
6	CONCLUSÃO	60
	Referências	62

1. INTRODUÇÃO

Regiões minerárias são caracterizadas pela acessibilidade econômica de recursos minerais em abundância (PARAGUASSÚ, 2019 apud BRIDGE, 2004). Minas Gerais foi nomeada dessa maneira, pela alta quantidade e diversidade de minérios que a região possui, os quais são extraídos desde a época da colonização e exercem um papel protagonista na economia do estado, corroborando para uma relevância tanto em âmbito nacional como mundial (REZENDE, 2016). A mineração está presente em todo o estado, sendo responsável pelo desenvolvimento de diversas cidades e municípios.

A indústria mineral brasileira configura um importante setor econômico do país, os inúmeros elementos químicos (metais, ametais, terras raras) com aplicabilidades amplas são encontrados e extraídos dos minérios, ao longo do território nacional. Somente os estados de Minas Gerais e Pará, no ano de 2023 foram responsáveis por mais de 87% do valor arrecadado por este setor da economia. (Anuário Mineral, 2024).

Inegável o impacto econômico gerado pela mineração, desde empregabilidade, até os desdobramentos oriundos do pagamento de impostos em forma de Royalties (AMIG, s.d.). Entretanto, existem outros impactos visíveis e invisíveis que tal atividade causa. Inicialmente pode-se citar a mudança drástica na paisagem natural. Antes do processo de extração, a vegetação deve ser retirada para que o minério possa ser explorado. Nesse processo muitas nascentes são afetadas. A retirada do minério implica em grandes movimentações de material, alterando o relevo e a paisagem de forma permanente. Outro aspecto importante é a geração de resíduos sólidos e efluentes. Em geral é utilizada água para a retirada de rochas e solos em grandes quantidades, gerando assim volumes exorbitantes de resíduos líquidos e sólidos. Na maioria dos casos, esses resíduos são depositados em barragens minerárias, (PARAGUASSÚ, 2019 apud LECHNER, 2017) que necessitam de monitoramento constante devido aos riscos de rompimento.

Dois desastres minerários, de rompimento de barragem, de enorme repercussão, aconteceram no estado de Minas Gerais. No ano de 2015, na cidade de

Mariana e posteriormente no ano de 2019 em Brumadinho. Desastres como esses espalham rejeitos por grandes áreas superficiais e ao longo dos rios, causando danos ambientais muitas vezes irreparáveis, como a morte de animais, devastação de áreas protegidas, contaminação dos recursos hídricos e ainda da atmosfera pelos resíduos sólidos do rejeito.

Mesmo sem a ocorrência de desastres, a população que mora ou trabalha em áreas próximas a atividades minerárias também está sujeita aos impactos ambientais que se apresentam. Inicialmente, estão expostas a uma poluição visual causada pelo desmatamento de áreas naturais, além do risco de rompimento de barragens. Todavia, tem-se aliado a isso riscos silenciosos como os poluentes inorgânicos, que durante o processo de extração podem estar sendo remobilizados e dispersos no ambiente, acarretando outras possíveis vias de exposição para a população.

Esses poluentes inorgânicos, podem estar sendo transportados por meio da poeira que é dispersa pela extração. Dados de literatura afirmam que a poeira de atividade minerária pode ser transportada à distância de até 5 km (ZAMOTEV, 2017). Tal poeira pode estar sendo depositada em águas, solos, sedimentos, alimentos e na região interna das residências, de forma que as pessoas das proximidades estão expostas a esses materiais.

Diversos estudos são realizados para verificação da forma como ocorre a distribuição e transporte de poluentes inorgânicos em áreas vicinais a minerações, principalmente correlacionando essa dispersão a fatores climáticos (YUN, 2017), como precipitações e direção dos ventos ou o intemperismo, que pode acarretar mobilidade e disponibilidade destes poluentes (LI, 2022).

Para determinação destes poluentes, são conduzidas metodologias utilizando decomposições ácidas em frascos abertos ou assistidas por micro-ondas e a análise instrumental para a determinação dos contaminantes por meio das técnicas de Espectrometria de Absorção Atômica (AAS), Espectroscopia de Emissão Óptica com Plasma Indutivamente Acoplado ICP-OES (*Inductively Coupled Plasma Optical Emission Spectrometer*) ou Espectrometria de Massas com Plasma indutivamente acoplado ICP-MS (*Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometer*).

Os estudos ora em andamento e os que estão por vir, são de extrema importância para o entendimento de como estes poluentes oriundos de atividades minerárias estão sendo dispersos no ambiente, auxiliando no entendimento dos riscos que de fato representam e da maneira como podem estar afetando a fauna e os habitantes que residem nas redondezas de mineradoras.

Minas Gerais possui diversas localidades de exploração de minério de ferro, sendo assim, quando se fala de poluentes inorgânicos, casos a serem estudados e pesquisados são os metais potencialmente tóxicos, que em determinadas situações podem estar ultrapassando valores de referência certificados por normas regulamentadoras como as da CONAMA e assim representando algum risco para a fauna, a flora e a população.

Exemplo disso é a cidade de Itatiaiuçu, localizada a uma distância de 70 km de Belo Horizonte a capital do estado de Minas Gerais. Itatiaiuçu teve sua origem no ano de 1670, devido a chega dos bandeirantes vindos de São Paulo, que se instalaram na região com o objetivo de explorar o ouro contido na serra próxima à cidade.

Atualmente a cidade possui aproximadamente 12 mil habitantes e 4 principais mineradoras na região, tais mineradoras são responsáveis por uma alta taxa de empregabilidade na cidade e pela geração de renda por meio de impostos como o CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerais). Diversos bairros estão alocados nas redondezas da mineração, próximos tanto das áreas de extração como das barragens de rejeitos.

A população muitas vezes não possui conhecimento, instrução e respaldo suficiente para compreender a maneira como podem estar sendo afetadas pela atividade extrativista, aliado a isso estão habituadas com a dinâmica do ambiente dessa atividade e acreditam que ela não acarreta malefícios para a forma como vivem.

Devido a isso, é muito importante que estudos avaliativos sejam conduzidos em regiões vicinais a minerações. Poluentes inorgânicos podem ser investigados por meio da coleta e análise de matrizes ambientais relevantes, que retratem como uma determinada região pode estar sendo afetada.

Os resultados obtidos a partir dessas análises, devem ser submetidos a análises estatísticas, com o intuito de auxiliar no entendimento dos dados, de como

esses contaminantes estão presentes nas matrizes analisadas, como eles se relacionam ou não entre si, possíveis fontes e possíveis vias de exposição que os habitantes estão sujeitos em seu cotidiano.

Aliado a isso, os resultados devem passar por interpretações e comparações com normas regulamentadoras (CONAMA), com o objetivo de identificar quais possíveis elementos encontram-se em concentrações acima do valor considerado de qualidade e assim pautar possíveis medidas de remediação ou corretivas. Além disso, análises de risco podem ser conduzidas para uma melhor interpretação dos dados produzidos no estudo.

Fica claro portanto, que estudos em regiões vicinais a minerações são de extrema importância, não somente para o cuidado e manutenção do meio ambiente, mas também para o bem-estar da população que reside nos arredores dessa atividade e que pode estar exposta a diversos poluentes inorgânicos.

2. OBJETIVO

2.1 Objetivo Geral

O objetivo do presente trabalho consiste em uma avaliação e determinação de contaminantes inorgânicos em uma propriedade próxima a uma mineração de ferro localizada na cidade de Itatiaiuçu (MG).

2.2 Objetivos Específicos

- Quantificação de contaminantes inorgânicos presentes na matriz solo por meio da espectrometria de massas por plasma indutivamente acoplado do tipo quadrupolo;
- Quantificação de contaminantes inorgânicos presentes na matriz água por meio da espectrometria de massas por plasma indutivamente acoplado do tipo quadrupolo;
- Avaliação estatística e discussão de possíveis fontes e exposição.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Mineração em Minas Gerais, relevância e impactos

3.1.1 Mineração e relevância econômica

A mineração no estado de Minas Gerais desempenha um papel crucial, sendo um dos pilares da economia brasileira. Tal atividade, datada desde o século 16 (período colonial), teve como foco inicial a exploração de ouro, em uma região denominada de Quadrilátero Ferrífero, província mineral mais importante do sudeste do país (FILHO *et al*, 2025). Ao passar dos anos, com o avanço da ciência e tecnologia, foi possível o mapeamento de jazidas e posterior exploração de diversos outros minerais ao longo do território de Minas Gerais, em especial o minério de ferro.

Atualmente a região do Quadrilátero Ferrífero, como assim nomeada, tornou-se uma das maiores regiões do Brasil em exploração minerária, desde ouro e lítio e principalmente o minério de ferro. Tal minério que é explorado e comercializado em larga escala, desde sua forma bruta, até sua forma beneficiada, demonstrando que o estado possui um papel crucial em termos tecnológicos e científicos na extração mineral, o que corrobora também para o seu protagonismo na área econômica local e do país tanto em aspectos financeiros bem como na empregabilidade local de onde jazidas realizam sua exploração.

Quando se realiza um recorte financeiro da exploração de ferro no Brasil, Minas Gerais se destaca, tendo uma arrecadação de mais de 80 bilhões de reais levando em consideração a produção bruta, beneficiada e comercializada. Além disso a arrecadação de impostos minerários como o CFEM (Compensação Financeira pela Exploração de Recursos Minerários) também é algo relevante, o estado detém diversas jazidas ativas e obteve no ano de 2024 uma arrecadação superior a 3 bilhões de reais (Anuário Mineral, 2025).

3.1.2 Mineração e impactos ambientais

A mineração mundial atingiu um patamar em que se exige que a atividade cumpra não somente o objetivo da retirada do mineral de interesse, mas que também se preocupe e obedeça a controles alinhados ao desenvolvimento sustentável, regional e nacional, além da preocupação com a sociedade na qual estão inseridos (REZENDE, 2016). Ao longo da última década, a questão ambiental aliada à social tornou-se uma pauta cada vez mais relevante e presente em cidades, estados e regiões que possuem minerações, principalmente aquelas em que se tem ainda barragens de rejeitos minerários oriundos do beneficiamento de minérios (FILHO *et al*, 2025).

Especificamente nos anos de 2015 e 2019 o estado de Minas Gerais sofreu com o rompimento de duas barragens minerárias, a primeira na cidade de Mariana e a segunda na cidade de Brumadinho respectivamente, em que foram causados danos severos para o meio ambiente e levantou-se o questionamento de possíveis contaminantes inorgânicos que foram espalhados, remobilizados e consequentemente disponibilizados, tanto no ambiente natural, como na população (FILHO *et al*, 2025). Isso exemplifica a necessidade de estudos que monitorem possíveis contaminantes químicos, não somente em momentos de desastre, mas sim quando a exploração ainda ocorre e há residentes aos arredores de áreas minerárias com possíveis vias de exposição a esses contaminantes.

Como descrito por Filho (2025, p 1) a região de Minas Gerais é rica em termos de jazidas para diversos metais e metaloides, devido à sua alta exploração, diversos elementos potencialmente tóxicos, como Al, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, Pb, Sn, V e Zn, podem estar sendo remobilizados e dispersos no meio ambiente. Existe uma preocupação com tais elementos, devido à sua persistência no ambiente natural, bem como seu potencial de bioacumulação e toxicidade tanto nos ambientes terrestres, bem como nos aquáticos (Reimann, 2017).

Aliado a isso, o meio ambiente não é o único sujeito a possíveis contaminações oriundas da atividade extrativista, a população também pode estar sendo afetada diretamente com tal prática, estudos descritos por (YUN, 2017) elucidam a importância do entendimento de como tais poluentes podem estar sendo dispersos no ambiente e corroborando para possíveis contaminações de humanos que residem em áreas vicinais a mineração. Daí a importância do monitoramento e avaliação das possíveis vias de exposição para estabelecer limites de concentração para tais elementos potencialmente tóxicos, corroborando para uma diferenciação do background natural e do que pode estar sendo oriundo da atividade minerária (Windmöller, *et al*, 2007).

3.2 Amostragem

3.2.1 Conceito, planejamento e materiais

A amostragem, em diversos estudos é considerada uma atividade simples e em inúmeros casos não recebe a devida importância e rigor metodológico, o que caracterizasse como um erro grave, pois por definição a amostragem deve representar o ambiente estudado em sua totalidade. Desta forma a coleta e posterior preservação das amostras demanda de um conhecimento técnico e científico. Importante citar que o planejamento de amostragem e coleta depende também do que será realizado subsequente, corroborando para que as análises posteriores tenham respaldo, devido a robustez com que o planejamento e coleta das amostras foi realizado (CETESB, 2023).

Quando se tem o interesse na realização de coleta de matrizes ambientais, é essencial que o planejamento da amostragem tenha sido elaborado de forma criteriosa. Existem diversas variáveis que influenciam na amostragem, como o uso, natureza, a área de influência, características da área de estudo que se deseja coletar. Tais aspectos são relevantes para a escolha da metodologia de coleta a ser executada,

pois tanto a preservação das amostras, quanto as análises instrumentais a serem realizadas subsequentemente dependem diretamente dessas definições (CETESB, 2023).

O planejamento da amostragem para determinação de elementos químicos deve priorizar a obtenção de amostras que sejam representativas da área a ser estudada, pois a variabilidade espacial do solo ou da área como um todo pode corroborar para a confiabilidade dos resultados a serem obtidos. Sendo assim existem estratégias como a divisão da área em glebas homogêneas por exemplo, o que leva em consideração o relevo, estrutura, vegetação e histórico da área (EMBRAPA, 2014).

Localização e definição dos pontos de coleta também exercem papel fundamental no estudo a ser realizado. Inicialmente quando alguns objetivos do trabalho já estão delimitados os pontos de coleta podem ser direcionados para atender a essas finalidades. Entretanto caso seja um estudo com objetivos mais amplos, os pontos de coleta devem ser escolhidos minuciosamente, para que as amostras coletadas representem de forma abrangente a área investigada. Nesse contexto a utilização de ferramentas como georreferenciamento, GPS, visitas a área de estudo e catálogo fotográfico e o uso de softwares específicos para o tipo de coleta, contribuem para uma maior assertividade nos pontos de amostragem (CETESB, 2023).

Após planejamento da amostragem, levantamento de estudos sobre a área de interesse, definição dos pontos de coleta, a etapa da amostragem pode ser iniciada, sendo a fase mais crítica. Isso se deve ao fato de que ela influencia diretamente para a confiabilidade dos resultados analíticos a serem obtidos posteriormente. Sendo assim, é fundamental seguir protocolos de coleta e amostragem, como o uso de materiais limpos e descontaminados adequados para cada uma das matrizes e analitos, recipientes próprios, catalogação das amostras garantindo assim sua rastreabilidade e confiabilidade (CETESB, 2023).

Os materiais para a coleta são de extrema importância, para garantir a representatividade da amostra e evitar contaminações. Entre os equipamentos para a coleta de solos por exemplo, pode-se destacar o trado de solo, sonda de amostragem, pá reta ou pá de corte, isso para a retirada de amostras e subamostras em

profundidades previamente definidas no planejamento da amostragem (EMBRAPA, 2014).

Também é primordial assegurar um armazenamento e transporte adequado até o local onde as próximas análises serão realizadas, isso para garantir a preservação das características físicas e químicas das amostras o que acarreta resultados analíticos confiáveis. O armazenamento inadequado pode acarretar alterações químicas, biológicas e físicas, comprometendo a representatividade da amostra coletada o que afetará diretamente os resultados obtidos. Sendo assim fica claro que a correta conservação das amostras entre coleta e análise laboratorial é essencial para garantia da qualidade dos resultados a serem gerados na análise instrumental (EMBRAPA, 2014).

3.3 Decomposição ácida assistida por radiação micro-ondas

3.3.1 Contexto e princípios

Para que seja possível a determinação multielementar em amostras ambientais, é necessário empregar etapas prévias a análise instrumental, que sejam capazes de decompor as matrizes complexas como solos e sedimentos, tornando os elementos disponíveis para sua quantificação. Diversos métodos são capazes de realizar tal feito, como decomposições por via úmida ou seca, processos de extração e sistemas a combustão, entretanto um método que é amplamente utilizado na química analítica quantitativa atualmente é a decomposição via radiação micro-ondas.

Com a evolução e posterior consolidação de técnicas espectrométricas tanto óptica quanto de massas, aliadas ao desenvolvimento dos sistemas micro-ondas contribuíram para a difusão dessa metodologia. Melhorias como o uso de frascos fechados, aprimoramento dos materiais, bem como monitoramento de temperatura e pressão, permitiu-se assim um patamar adequado para que tal metodologia pudesse ser amplamente difundida na área de química analítica o que corroborou também para

a otimização dos métodos de preparo de amostras que fazem o uso de fornos micro-ondas (KRUG, 2019).

A digestão ácida assistida micro-ondas apresenta vantagens em relação as demais técnicas de preparo de amostras. Ela se baseia na absorção da radiação eletromagnética pela amostra e posterior conversão em energia térmica, acarretando o aquecimento do meio reacional (KRUG, 2019). Com o uso da radiação micro-ondas tanto velocidade quanto eficiência da decomposição para algumas matrizes complexas, tornaram-se possível com o uso dessa metodologia (MATUSIEWICZ, 2017).

3.3.2 Aplicações, normas e métodos padronizados

Como descrito por Smith e Arsenault (1996, p 1), em um estudo de revisão publicado em 1996, as digestões assistidas por micro-ondas demonstrou-se eficiente para a decomposição de diversas matrizes, dentre elas as geológicas reconhecidas pela sua complexidade. Essas amostras possuem uma composição definida e elaborada, o que as torna resistentes a ataques ácidos convencionais. Nesse contexto com a introdução da decomposição ácida assistida por forno micro-ondas, representou um avanço significativo, permitindo uma decomposição mais eficaz dessas matrizes. Importante citar que naquele período, o desenvolvimento de micro-ondas específicos para o uso laboratorial estava se iniciando e que posteriormente o uso de sistemas fechados, com controle de temperatura e pressão seria algo primordial (MATUSIEWICZ, 2017), além de possibilitar composições ácidas distintas, com o uso de reagentes únicos e com finalidades específicas, como o ácido nítrico, ácido clorídrico e ácido fluorídrico por exemplo (SMITH, ARSENAULT, 1996).

A United States Environmental Protection Agency (US-EPA), criada com o intuito de proteger tanto a saúde humana quanto ambiental, estabelece em diversos métodos desenvolvidos o uso de decomposições ácidas assistidas por micro-ondas para a determinação de metais em amostras ambientais. Entre esses métodos destacam-se US-EPA 3051A que consiste em uma extração de metais em matrizes

como solos e sedimentos ou o US-EPA 3052 que consiste em uma decomposição total dessas mesmas matrizes (U.S. EPA, 2007).

Com o avanço da metodologia, seu uso passou a ser amplamente adotado em diferentes países. No contexto brasileiro mais especificamente a Resolução CONAMA 420 que dispõe sobre valores orientadores da qualidade de solo quanto a presença de substâncias químicas, recomenda o uso do método US-EPA 3051A, para a determinação de contaminantes inorgânicos em solos e sedimentos. Tal fato evidencia o amplo uso, aceitação e relevância de metodologias que se baseiam em decomposições ácidas assistidas por radiação micro-ondas na área ambiental.

3.4 Análise instrumental via ICP-MS

3.4.1 Princípio analítico

A determinação de elementos potencialmente tóxicos em amostras ambientais, demanda uma série de fatores listados anteriormente, como planejamento de amostragem, coleta e preparo de amostras. Após isso a análise instrumental se torna o ponto central do estudo. Considerando a complexidade das matrizes ambientais, se tem a necessidade de uma técnica robusta, elevada precisão, e capacidade multielementar, permitindo a determinação e quantificação dos analitos de interesse. Nesse contexto, uma das principais ferramentas analíticas é a espectrometria de massas atômicas.

O princípio da técnica reside na ionização eficiente de diversos elementos em um plasma de argônio indutivamente acoplado e a posterior separação e detecção dos íons por meio da espectrometria de massas. Tal técnica consolidou-se como uma ferramenta essencial e poderosa para a determinação de elementos em nível traço em diversas áreas da química analítica (BALCAEN, 2015).

De acordo com Skoog (2002, p 235), a espectrometria de massas é utilizada tanto na detecção, quanto na determinação de concentrações presentes nas amostras,

tendo seu princípio na separação dos elementos em função da razão massa/carga individual (m/z). Tal técnica possui vantagens significativas sobre outras técnicas analíticas como a espectroscopia óptica. Elencando as vantagens da espectrometria de massas pode-se citar a determinação de quase 80 elementos da tabela periódica, bem como detecção dos analitos em parte por trilhão, além da obtenção de espectros simples e a possibilidade de realizar análises isotópicas. Entretanto, trata-se de uma técnica que também apresenta limitações, por ser uma técnica precisa, delicada, se tem agregado a ela um alto investimento a ser realizado, em relação a infraestrutura laboratorial, necessidade de ambiente de sala limpa, uso de argônio contínuo de alto grau de pureza e profissionais qualificados capazes de operar o equipamento, garantindo assim confiabilidade e qualidade nas análises realizadas, conforme discutido por (NOGUEIRA, 2023).

3.4.2 O ICP-MS

Técnicas de determinação de elementos traço estão em constante desenvolvimento, e uma que se destaca no contexto das análises ambientais é a técnica denominada ICP-MS do inglês *Inductively Coupled Plasma Mass Spectrometry*. O plasma indutivamente acoplado quando em conjunto com espectrômetro de massas ele atua como uma fonte de íons altamente eficiente. Isso se deve principalmente as elevadas temperaturas alcançadas pelo plasma, corroborando para uma decomposição mais eficiente dos componentes presentes na matriz analisada, promovendo um grau de ionização maior, para a maioria dos elementos da tabela periódica (NOGUEIRA, 2023).

Os componentes instrumentais da ICP-MS, desempenham um papel crucial no desempenho analítico da técnica. Inicialmente destaca-se o sistema de introdução da amostra, composto pela bomba peristáltica responsável pelo bombeamento da amostra até o nebulizador, esse que por sua vez converte a amostra líquida em um fino aerossol utilizando argônio para melhor dispersão da matriz. Em seguida, o aerossol é transportado até a tocha, que pelo fluxo de gás atinge o plasma que irá

proporcionar a atomização dos metais preferencialmente em íons carregados positivamente. Esses íons atravessam a interface do equipamento saindo de uma pressão atmosférica para a região do alto vácuo (NOGUEIRA, 2023).

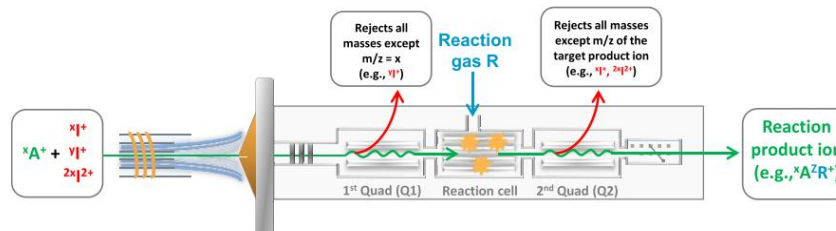
O detector de massas está localizado na região de alto vácuo do ICP-MS, anterior a ele tem-se componentes relevantes, como o cone de amostragem (sample cone) e de extração (skimmer cone), responsáveis por direcionar e colimar o feixe de íons. Subsequente a eles tem-se o conjunto de lentes com o intuito de desviar os íons para a cela de colisão/reação uma das partes mais importantes da técnica. Essa cela possui um papel fundamental na eliminação de interferências na análise, mais especificamente as interferências espectrais, sendo assim a cela de colisão/reação elimina interferências de razão m/z iguais, pois o detector de massas não consegue diferenciar se essa razão é oriunda de um átomo A ou átomo B, sendo assim a cela atua promovendo colisões que eliminam e reduzem essas interferências (NOGUEIRA, 2023).

3.4.3 Espectrômetro de massas tipo Quadrupolo e o detector

O espectrômetro mais comum de massas utilizado na técnica ICP-MS, é o espectrômetro de massas do tipo Quadrupolo (ICP-QQQ). O analisador de massas do tipo quadripolar em comparação com os demais espectrômetros possui vantagens significativas, como o seu baixo custo, robustez e possui uma taxa de varredura alta, possibilitando a obtenção de espectros na taxa de 100 ms^{-3} (SKOOG, 2002).

O grande diferencial dessa tecnologia é a inclusão de um quadrupolo anterior a cela de colisão/reação atuando como um filtro de massas permitindo que apenas íons de massa/carga específicas possam adentrar a cela de colisão/reação. Dessa maneira a cela de colisão/reação irá desempenhar um papel mais seletivo e controlado das reações químicas que ocorrem internamente, o que acarreta uma determinação livre de possíveis interferências (BALCAEN, 2015). A figura 1 ilustra de forma esquemática o princípio operacional do espectrômetro de massas do tipo triplo quadrupolo com a cela de reação/colisão.

Figura 1 - Representação esquemática do princípio operacional do espectrômetro de massas do tipo quadrupolo



Fonte: Balcaen, 2015

O espectrômetro está posicionado após a cela de colisão/reação, o cerne desse componente baseia-se em quatro barras metálicas cilíndricas paralelas, dispostas de forma equidistante. Essas barras atuam como eletrodos sobre os quais são aplicados potenciais elétricos combinados: um campo de rádio frequência (RF) e um potencial de corrente contínua (DC). A interação desses campos acarreta a formação de um campo elétrico oscilante no interior do quadrupolo (NOGUEIRA, 2023).

O campo elétrico oscilante é fundamental para a análise, a oscilação desse campo gera um caminho estável para os íons, o que favorece que somente os íons de interesse com a respectiva razão massa/carga desejada, percorra esse caminho estável e chegue ao detector, os demais íons que não possuem a razão m/z estável durante a aplicação dos potenciais de rádio frequência e do potencial de corrente direta, sofrerão um desvio para fora do analisador e como consequência não serão identificados pelo detector (NOGUEIRA, 2023).

Após a separação os íons que percorrem o trajeto estável criado pelo quadrupolo são direcionados para o detector que por sua vez irá quantificar gerando assim um espectro de massas. Atualmente os detectores mais utilizados são os de multiplicadores de elétrons. Nesse tipo de detector os íons positivos filtrados pelo quadrupolo colidem com o dinodo que acarreta a geração de elétrons secundários. Esses elétrons são então acelerados e sofrem uma atração positiva pelo próximo dinodo e repete o processo anterior, acarretando a geração de mais elétrons secundários, esse processo se repete, desencadeando o efeito multiplicador de elétrons. O processo se encerra quando esses elétrons colidem com o anodo, o que

gera uma corrente elétrica, que é convertida pelo software em um sinal analítico (NOGUEIRA, 2023).

Como discutido por Lieve Balcaen (2015) e por tudo apresentado nos tópicos anteriores, o ICP-QQQ constitui um avanço significativo na análise elementar por espectrometria de massas, corroborado pela elevada sensibilidade e com um controle das interferências que podem ocorrer. Aliado a isso sua alta aplicabilidade na determinação de elementos em nível traço e ultra-traço, e a possibilidade de estudos em análises isotópicas.

4 PARTE EXPERIMENTAL

4.1 Materiais

Béquer de boro silicato 50 mL;

Tubos falcon 50 mL (CORNING);

Pipeta de Pasteur;

4.1.1 Reagentes e materiais de referência

HNO₃ 65% concentrado, (Merck, Darmstadt, Alemanha);

HCl 37% concentrado, PA (Merck, Darmstadt, Alemanha);

Água MILI-Q: resistividade de 18MΩ;

Material de referência de solo certificado: TILL-3 (Canadian Soil MRC);

Material de referência certificado multi-elementar 50 mg L⁻¹ (CPA Chem, Bulgária, França);

Material de referência certificado monoelementar de Rh 1000 mg L⁻¹ (Inorganic Ventures, Christiansburg, EUA)

4.1.2 Equipamentos

Balança Analítica AUY220 Shimadzu (Shimadzu, Kyoto, Japão);

Amostrador de aço inox com copo de 40 cm;

Destilador de ácidos DuoPur Quartz Acid Purification (Milestone, Sorisole BG, Italy);

Nanopuro (Milipore, Bedford, MA, EUA)

Sonda multiparâmetro HI9829 (HANNA Instruments, Woonsocket, EUA);

Micro-ondas Ethos UP (Milestone, Sorisole BG, Italy);
ICP-MS 8900, triplo quadrupolo, (Agilent Technologies);
DMA – Direct Mercury Analyzer (Milestone, Sorisole BG, Italy)

4.2 Escolha de amostras

O planejamento da coleta das amostras se iniciou com a definição das matrizes que representassem possíveis fontes de exposição a contaminantes inorgânicos. Sendo assim foram escolhidas 3 matrizes: solos, água, poeira doméstica e alimentos. Foram coletadas 6 amostras de solo, 5 amostras de água, uma amostra de poeira indoor. As amostras de solo e poeira foram submetidas a processos de digestão ácida assistida por micro-ondas e posterior análise instrumental via ICP-QQQ, as amostras de água foram acidificadas em campo e lidas diretamente no equipamento.

4.2.1 Coleta das amostras

Para a coleta das amostras, inicialmente realizou-se um estudo da propriedade de interesse, delimitando sua área total, distância da propriedade até a área de mineração e a definição dos pontos de coleta. Para as coletas de águas, foram seguidos os procedimentos e recomendações descritos no Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidas da ANA/CETESB. Para as amostras de solo, a coleta seguiu os procedimentos e recomendações descrito no Manual de análises químicas, de solos, plantas e fertilizantes. Para a coleta da matriz de poeira doméstica realizou-se uma adaptação descrita em um estudo realizado por Laycock *et al* (2022).

A amostragem de solo, foi realizada de modo a contemplar áreas previamente definidas como representativas para esse trabalho. Foram coletados pontos que mapeassem a propriedade de interesse, bem como tivessem distâncias equivalentes

entre os pontos quando possível. Tal metodologia adotada para caracterizar a qualidade do solo na área estudada. Para as amostras de água e poeira, por sua vez adotou-se uma amostragem não probabilística de maneira intencional. Para a escolha dos pontos, levou-se em consideração as possíveis fontes de exposição que os residentes estariam sujeitos, desde a água que consomem, que utilizam para recreação ou irrigação e no caso da poeira, onde foi-se observado um maior acúmulo dessa matriz.

Para as amostras de solo e poeira, realizou-se somente uma campanha de coleta, na data de 21 de março do ano de 2026, importante ressaltar que no estado de Minas Gerais como um todo estava passando por um período de chuvas constantes, então o sólido estava húmido na data da coleta. Por sua vez, para as amostras de água foram realizadas duas campanhas de coleta a primeira na mesma data das amostras de solo e poeira, a segunda coleta por sua vez ocorreu na data de 05 de maio do ano de 2026. A segunda campanha de coleta das amostras de água, teve como objetivo ampliar os pontos coletados, para corroborar uma melhor identificação de possíveis fontes de exposição da matriz.

Para a coleta da matriz solo, fez-se um uso de um kit de materiais para coleta de solos, contendo trado de aço inox, copo coletor com tamanho de 40 cm, limpador do trado para retirada dos resquícios de amostras anteriores. A matriz água fez-se o uso de tubos Corning de 50,00 mL, além de HNO_3 65%, sendo adicionado posteriormente a coleta como estabilizante dos analitos de interesse. As amostras de torneira, teve-se o cuidado de realizar a purga anterior a coleta, com um tempo adequado, mas com o intuito de coletar o que realmente estava sendo consumido pelos residentes. A matriz poeira, foi coletada com o auxílio de um pincel e de um frasco coletor estéril de 80,00 mL.

Todas as amostras posteriormente a coleta, foram armazenadas em caixas térmicas, refrigeradas e transportadas até o laboratório de análise, esse transporte teve uma duração de 2 horas. No laboratório as amostras de solo e água inicialmente foram acondicionadas na geladeira, por um período de 1 semana até início das análises necessárias a cada uma das matrizes coletadas, as amostras de poeira por

sua vez foram armazenadas em um armário por um período de 1 semana até início das análises necessárias.

Os pontos de coleta foram localizados e registrados suas respectivas coordenadas geográficas. A Tabela 1 abaixo, contém as coordenadas geográficas de cada uma das amostras coletadas. Além disso as amostras foram catalogadas no momento da coleta, para garantir rastreabilidade e confiabilidade das análises a serem realizadas posteriormente.

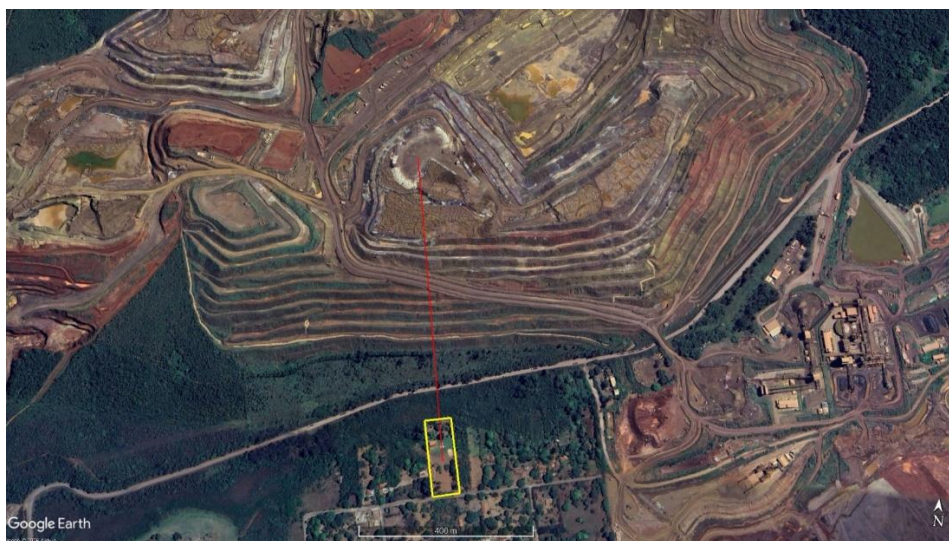
Tabela 1 - Coordenadas geográficas em UTM das amostras coletadas

ÁGUA		
CX ÁGUA	Lat. 20°10'39.85"S	Long. 44°27'50.99"O
PISCINA	Lat. 20°10'36.67"S	Long. 44°27'52.56"O
CASA	Lat. 20°10'36.43"S	Long. 44°27'53.28"O
NASCENTE	Lat. 20°10'34.82"S	Long. 44°27'52.01"O
POÇO	Lat. 20°10'35.07"S	Long. 44°27'52.77"O
POEIRA		
POEIRA 1	Lat. 20°10'36.51"S	Long. 44°27'53.57"O
POEIRA 2	Lat. 20°10'36.51"S	Long. 44°27'53.57"O
SOLO		
SOLO 1	Lat. 20°10'39.68"S	Long. 44°27'52.32"O
SOLO 2	Lat. 20°10'39.53"S	Long. 44°27'51.53"O
SOLO 3	Lat. 20°10'38.44"S	Long. 44°27'51.93"O
SOLO 4	Lat. 20°10'38.61"S	Long. 44°27'52.64"O
SOLO 5	Lat. 20°10'35.47"S	Long. 44°27'52.55"O
SOLO 6	Lat. 20°10'35.73"S	Long. 44°27'53.42"O

Fonte: Autoral, 2026

A Figura 2, indica a área de interesse, bem como sua delimitação e distância entre a propriedade alvo e a mineração. Esse estudo inicial foi importante para definição dos locais de amostragem, de forma que as amostras abrangessem a área por completo e corroborasse para elucidação das possíveis fontes de exposição humana aos contaminantes inorgânicos estudados no presente trabalho.

Figura 2 - Localização da propriedade em relação a área de mineração – distância da propriedade até a área de mineração



Fonte: Autoral, 2026

A partir da imagem acima, pode-se concluir a influência direta da mineração na área de interesse do estudo, a distância medida utilizando um software de mapeamento via satélite, determinou uma distância da propriedade até a mineração de 735 m. Isso indica alguns pontos de atenção, primeiro deles relacionado a proximidade que esses residentes encontram-se de uma área minerária, segundo o contato direto que os moradores possuem com tráfego de caminhões de transporte de minério, que podem acarretar na remobilização e dispersão de partículas ao longo do percurso e o principal deles a maneira como a atividade minerária pode estar acarretando em diversas fontes de exposição a contaminantes inorgânicos, desde a remobilização destes pelo processo extrativista e disponibilização dos mesmo em solo e água, ou pela poeira que é suspendida durante a retirada do minério e demais processos realizados na área.

No caso das amostras de solo, foram definidos 6 pontos considerados representativos da área, distribuídos ao longo da propriedade, com uma distância aproximada entre eles de 20 metros. Dois pontos iniciais coletados próximo à rua na entrada da propriedade, dois pontos em uma área intermediária a propriedade e dois aos fundos da propriedade, estes os mais próximos a área mineradora, seguindo uma

amostragem probabilística sistemática. A Figura 3, é um mapa indicando os pontos de coleta das amostras de solo e poeira, distribuídos de forma espacial ao longo da propriedade.

Figura 3 - Pontos de coleta de amostras de solo e poeira na propriedade de interesse do estudo



Fonte: Autoral, 2026.

Para a coleta de amostras de solo, utilizou-se um trado de aço inox, com um copo coletar de 40 cm de profundidade, o que possibilitou uma coleta de um perfil daquele solo. Para tal, o trado foi inserido no solo, girou-se o mesmo para que atingisse uma profundidade adequada para a coleta e posteriormente o coletado foi transferido para um ziplock previamente etiquetado. Para a amostragem do ponto seguinte, garantiu-se a limpeza adequada dos resquícios do solo anterior, retirando o excesso do solo no trado com o auxílio do limpador do trado. A Figura 4, exemplifica como foi a coleta realizada em um dos pontos amostrados.

Figura 4 - Coleta de amostra de solo com auxílio de estrado de aço inox



Fonte: Autoral, 2026.

Para as amostras de água, foram definidas localidades que exemplificassem a forma como os moradores pudessem estar sendo expostos aos possíveis contaminantes inorgânicos. Sendo assim, os pontos amostrados neste trabalho, compreenderam tanto amostras de água que os moradores utilizam para consumo, bem como amostras de recreação e de fontes naturais que se encontram na região interna da propriedade de interesse.

Definiram-se 6 pontos de coleta de água. Sendo eles, água do filtro de barro, torneira da cozinha, torneira da piscina, água da cisterna, tanto a que chega oriunda do abastecimento da rua, quanto a que pode ser retirada via torneira ao lado da cisterna, coleta de água da nascente e água do poço artesiano da propriedade, seguindo uma amostragem não probabilística intencional, para que fosse possível a elucidação de fontes de exposição aos residentes. A Figura 5, indica o mapa com os pontos de coleta realizados para esse trabalho.

Figura 5 - Pontos de coleta de amostras de água na propriedade de interesse do estudo



Fonte: Autoral, 2026.

Para a coleta das amostras de água, todas foram coletadas com o auxílio de um tubo Corning de 50,00 mL previamente etiquetado, para as águas do filtro e torneiras, abriu-se as respectivas válvulas e deixou a água escoar por alguns segundos (purga), posteriormente o tubo Corning foi inserido na saída da água e coletado um volume igual a 50,00 mL, no momento posterior a coleta as amostras foram acidificadas com HNO_3 65%, de forma que a concentração do ácido nas águas fosse de 2%, isso com o intuito de preservar as amostras e os respectivos analitos de interesse para análises posteriores.

As amostras do poço, cisterna e nascente, foram coletadas diretamente no local com a inserção do tubo Corning de 50,00 mL previamente catalogado, até sua completa submersão, coletando assim um volume igual a 50,00 mL de amostra. No momento posterior a coleta as amostras foram acidificadas com HNO_3 65%, de forma que a concentração do ácido nas águas fosse de 2%, isso com o intuito de preservar as amostras e os respectivos analitos de interesse para análises posteriores. A Figura 6 abaixo, exemplifica a coleta de uma das amostras de água desse respectivo trabalho.

Figura 6 - Coleta de amostra de água na nascente interna da propriedade



Fonte: Autoral, 2026

Para as amostras de poeira, adaptou-se uma metodologia descrita por Laycock *et al* (2022), verificou-se em um dos pontos da residência maior acúmulo de poeira residual, com o auxílio de um pincel, varreu-se a poeira residual para um frasco coletor estéril de 80,00 mL, até atingir uma quantidade de massa que foi considerada ideal (0,400 g de amostra) para as análises pretendidas nesse trabalho.

Para a coleta de poeira foi necessário buscar lugares na residência que se observasse o acúmulo deste material. O local que se mostrou mais apropriado foi dentro de um galpão onde eram armazenados materiais e maquinarias pequenas utilizadas na manutenção diária da propriedade. Amostrou-se em frestas de janelas e degraus de escadas guardadas por muito tempo sem movimentação. Com o cuidado para que não se observasse, ao menos a olho nu, a presença de outros materiais que não fossem provenientes da poeira típica encontrada diariamente na casa.

Todas as amostras foram catalogadas e armazenadas em uma caixa térmica para transporte até o laboratório e análise em Belo Horizonte. Posteriormente as amostras de água foram armazenadas em uma geladeira, enquanto solo e poeira foram armazenadas em armários para posterior preparo delas.

4.3 Metodologia

4.3.1 Tratamento preliminar de amostras

As amostras de solo passaram por processo de secagem à temperatura ambiente, espalhadas em bandejas e deixadas em capela de exaustão, até massa constante. Depois foram peneiradas, com o uso de uma peneira de aço inox com granulometria de 2mm.

As amostras de água não necessitaram etapa de decomposição antes da leitura no ICP-MS porque eram amostras límpidas.

A matriz de poeira indoor não passou por tratamentos anteriores a análise devido à baixa quantidade de amostra coletada e o fato da amostra já se apresentar em granulometria fina e homogênea.

As amostras de água não passaram por nenhum processo de preparo de amostra.

4.3.2 Digestão ácida assistida por micro-ondas

As matrizes de solo, poeira que fazem parte desse estudo passaram por processos de digestão ácida assistida por micro-ondas, cada uma delas com particularidades específicas. No caso da matriz solo, as alíquotas foram submetidas a um método normatizado da Environmental Protection Agency – EPA 3051A, que consiste em cerca de 0,2500 g de amostra e posterior adição de 9,00 mL de HNO_3 e 3,00 mL de HCl , tais adições sendo realizadas em frascos de PTFE, as amostras coletadas foram analisadas em triplicatas. Com os frascos devidamente fechados as amostras foram submetidas a uma decomposição assistida por radiação micro-ondas, com auxílio do equipamento Milestone ETHOS-UP. O programa de aquecimento seguiu as especificações descritas no método normatizado, sendo assim teve-se

início com uma rampa de aquecimento de 5 minutos até 175 °C e posterior platô nessa mesma temperatura por 10 minutos. Ao fim do processo os frascos foram resfriados e as amostras foram transferidas para tubos falcon de 50,00 mL e aferidas até 25,00 mL.

4.3.3 Preparo das curvas analíticas

As curvas analíticas para análise de metais foram preparadas a partir de soluções estoque de concentrações conhecidas de 100 $\mu\text{g L}^{-1}$ 1000 $\mu\text{g L}^{-1}$ a partir de um material de referência certificado multielementar de concentração 50 mg L^{-1} , em HNO_3 3,6% e HCl 1,2%, para ser condizente com a diluição realizada nas amostras. As concentrações utilizadas para a curva analítica foram: 0,0; 2,0; 4,0; 10,0; 20,0; 40,0; 80,0; 120,0; 200,0 $\mu\text{g L}^{-1}$, compreendendo os seguintes metais: Li, Be, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Pb e U. Aliado a isso preparou-se uma solução de padrão interno de Rh a partir de um padrão monoelementar de 1000 mg L^{-1} , a solução preparada ao final tinha-se uma concentração conhecida de 5 mg L^{-1} .

Para a análise das amostras de água as concentrações utilizadas para a curva analítica foram: 0,0; 0,50; 1,00; 5,00; 10,00; 15,00; 20,00; 25,00; 45,00; 65,00; 85,00; 105,00 $\mu\text{g L}^{-1}$ para os seguintes metais: Li, Be, Al, V, Cr, Mn, Fe, Co, Ni, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Pb e U. Aliado a isso preparou-se uma solução de padrão interno de Rh a partir de um padrão monoelementar de 1000 mg L^{-1} , a solução preparada ao final tinha-se uma concentração conhecida de 5 mg L^{-1} .

4.3.4 Diluição das amostras

Após a digestão assistida por micro-ondas, as amostras de solo e poeira foram centrifugadas e o sobrenadante transferido para um tubo falcon limpo e descontaminado de 50 mL. Uma alíquota de 1,40 mL foi retirada e transferida para um

tubo falcon limpo e descontaminado de 15,00 mL, posteriormente adicionou-se 0,084 mL de padrão interno de Rh de 30 mg L⁻¹ de forma que a concentração se encontrasse em um ponto intermediário da faixa linear de trabalho da curva preparada para as amostras de solo e poeira. Por fim aferiu-se o volume das amostras com 12,516 mL de uma solução de HNO₃ 3,6% e HCl 1,2%.

As amostras de água não passaram por nenhum processo de diluição, uma alíquota de 10,00 mL foi transferida para um tubo falcon limpo e descontaminado de 15,00 mL e adicionou-se 0,010 mL de padrão interno de Rh a 5 mg L⁻¹, de forma que a concentração do padrão interno encontrasse em um ponto intermediário da faixa linear de trabalho da curva preparada para as amostras de água. Ambas as matrizes após esse processo foram submetidas a análise instrumental via ICP-QQQ.

4.3.5 Instrumentação analítica

As análises das matrizes pós digestão assistida por micro-ondas foram realizadas via técnica instrumental denominada espectrometria de massas por plasma indutivamente acoplado do tipo triplo quadrupolo (ICP-QQQ). Os parâmetros da instrumentação foram otimizados de acordo com especificações do fabricante bem como com condições previamente validadas em análises anteriores realizadas no laboratório, com o intuito de garantir estabilidade, sensibilidade, seletividade e precisão na análise. Os isótopos definidos nessa análise foram: ⁷Li, ⁹Be, ²⁷Al, ⁵¹V, ⁵²Cr, ⁵⁵Mn, ⁵⁸Fe, ⁵⁹Co, ⁶⁰Ni, ⁶⁵Cu, ⁶⁴Zn, ⁷⁵As, ⁸²Se, ⁹⁵Mo, ¹⁰⁷Ag, ¹¹⁴Cd, ¹²¹Sb, ¹³⁶Ba, ²⁰⁸Pb, ²³⁸U. A tabela 2 abaixo, indica os parâmetros instrumentais do ICP-QQQ para a determinação dos metais nas amostras.

Tabela 2 - Parâmetros instrumentais do ICP-QQQ para determinação de metais

Parâmetros instrumentais	Condições operacionais
Nebulizador	Mira Mist
Nebulização câmara	Scott double-pass (Quartzo)
Tocha	Tocha de quartzo, 2,5 mm de diâmetro
Sample e skimner cone	Ni
Tubos Tygon®	1,02 milímetros
Potência da Radiofrequência (W)	1550
Fluxo do gás de nebulização (L.min⁻¹)	1,07
Fluxo o gás de plasma (L.min⁻¹)	15,0
Fluxo do gás auxiliar (L.min⁻¹)	0,90
Tempo(s) de enxágue	10
Velocidade da bomba peristáltica (rps)	0,5
Tempo (s) de aspiração da amostra	30
Tempo de estabilização (s)	20
Modo da célula de colisão/Reação	[He]
Vazão He (mL.min⁻¹)	4,5

Fonte: Autoral, 2026.

A análise de mercúrio nas amostras de solo foi realizada em um Analisador Direto de Mercurio (DMA - Direct Mercury Analyzer). Foram medidas massas próximas a 0,1500 g e as condições de aquecimento consistiram em uma rampa de 30 segundos até 200 °C, posterior platô de 01:30 segundos em 200 °C, rampa de aquecimento de 30 segundos até atingir uma temperatura de 650 °C e posterior platô de 02:30 segundos em 650 °C.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 Avaliação do método realizado

Tabela 3 - Avaliação do método, metais analisados, linearidade, precisão em porcentagem, recuperação em porcentagem e valores de limite de detecção (LD) e limite de quantificação (LQ) em µg/g

Metais	Linearidade (R ²)	Precisão DPR (%)	Recuperação (%)	LD (µg/g)	LQ (µg/g)
⁷ Li	0,9992	22,53	85,04	0,41	1,37
⁵¹ V	0,9996	2,51	100,91	0,39	0,31
⁵² Cr	0,9999	2,14	79,05	0,49	1,64
⁵⁵ Mn	0,9995	2,07	90,36	0,83	2,76
⁵⁹ Co	0,9998	2,97	89,25	0,01	0,02
⁶⁰ Ni	0,9998	2,93	93,83	0,21	0,7
⁶⁵ Cu	0,9999	2,05	81,22	0,07	0,22
⁶⁴ Zn	0,9998	3,84	84,78	13,03	43,45
⁷⁵ As	0,9996	1,35	92,28	0,07	0,23
⁹⁵ Mo	0,9997	3,5	**	0,03	0,09
¹⁰⁷ Ag	0,9998	5,16	94,73	0,03	0,11
¹¹⁴ Cd	0,9999	6,05	**	0,05	0,18
¹²¹ Sb	0,9997	3,01	92,87	2,28	7,61
¹³⁸ Ba	0,9999	3,69	94,43	0,09	0,29
²⁰⁸ Pb	0,9998	4,6	102,7	0,58	1,93
²³⁸ U	0,9999	2,96	**	0,003	0,01

Fonte: Autoral, 2026

A partir da tabela 3, é possível realizar uma análise do método previamente validado no laboratório em que o presente estudo foi executado. O método em questão foi o EPA 3051A, ao verificarmos os valores de linearidade do método, verifica-se que os valores foram satisfatórios de acordo com as exigências do laboratório, em que a linearidade obteve valores de 0,999 para todos os isótopos analisados.

Os valores de precisão para todos os isótopos foram abaixo de 6%, com exceção do Lítio, indicando que para análises posteriores esse elemento deve ser otimizado para a análise instrumental. Para os valores de recuperação dos elementos certificados no material de referência certificado (TILL-3), as recuperações variaram de 79% a 103%, indicando que os valores para as recuperações foram satisfatórios.

Para os valores de limite de detecção e limite de quantificação os valores em µg/g foram satisfatórios de acordo com os parâmetros do laboratório, com exceção do elemento Zn, em que se obteve valores de LD e LQ elevados, todavia tais valores encontrados são menores do que o valor de prevenção de acordo com a CONAMA 420/2009.

Tais parâmetros indicam que o método previamente validado, desempenhou-se de forma adequada para a determinação dos isótopos definidos para o estudo.

5.2 Determinação de elementos potencialmente tóxicos em matrizes de solo e poeira

A resolução CONAMA 420/2009 “dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas”, para o trabalho em questão adotou-se o VP – Valor de Prevenção, tal valor descrito pela resolução como sendo “a concentração de valor limite de determinada substância no solo, tal que ele seja capaz de sustentar as suas principais funções”. A CONAMA 420/2009 também estipula valores de investigação para solos agrícolas, industriais e residenciais

Os elementos determinados tanto na matriz solo, quanto na matriz poeira via ICP-QQQ foram: Li, Be, Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Pb e U. A tabela 4 dispõe sobre as concentrações médias e o desvio padrão em µg/g dos elementos determinados em cada uma das amostras de solo e a tabela 5 dispõe

sobre as concentrações médias e desvio padrão em $\mu\text{g/g}$ dos elementos determinados em cada uma das amostras de poeira coletadas no trabalho.

Tabela 4 - Médias e desvios padrões das concentrações dos elementos em µg/g obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de solo - médias e desvio padrões de Hg em µg/g obtidos via DMA e valores de prevenção para os elementos certificados de acordo com a CONAMA 420/2009

Amostra	Li	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Cd	Sb	Ba	Pb	U	Hg
SOLO 1	0,55 ± 0,13	0,15 ± 0,21	311 ± 25	1071 ± 99	243 ± 107	4,8 ± 1,2	126,7 ± 19,9	46,3 ± 6,4	27,4 ± 5,1	120,0 ± 18,9	0,40 ± 0,22	1,51 ± 0,13	0,07 ± 0,01	2,62 ± 0,08	41 ± 29	23,1 ± 9,3	1,61 ± 0,11	31,1 ± 0,3
SOLO 2	<LD	0,16 ± 0,16	297 ± 22	1052 ± 107	202 ± 143	5,2 ± 1,8	113,6 ± 16,3	43,3 ± 4,2	23,7 ± 4,5	124,3 ± 17,4	0,54 ± 0,16	1,49 ± 0,15	0,06 ± 0,01	2,31 ± 0,23	38 ± 45	17,4 ± 6,5	1,64 ± 0,09	27,4 ± 0,2
SOLO 3	<LD	0,19 ± 0,00	298 ± 5	1021 ± 13	145 ± 11	4,1 ± 0,3	119,9 ± 4,2	46,3 ± 2,3	27,4 ± 1,7	134,5 ± 6,0	0,44 ± 0,05	1,51 ± 0,03	0,07 ± 0,01	2,37 ± 0,07	12 ± 3	13,2 ± 0,6	1,62 ± 0,03	29,0 ± 3,0
SOLO 4	0,73 ± 0,39	0,30 ± 0,19	296 ± 7	1075 ± 50	191 ± 47	6,8 ± 2,8	130,0 ± 4,6	48,2 ± 2,3	31,4 ± 2,5	128,8 ± 1,5	0,57 ± 0,12	1,54 ± 0,03	0,06 ± 0,01	6,62 ± 3,51	18 ± 6	17,1 ± 2,1	1,57 ± 0,02	33,0 ± 7,0
SOLO 5	1,35 ± 0,69	0,56 ± 0,33	238 ± 9	777 ± 51	333 ± 28	4,0 ± 0,4	81,5 ± 2,8	49,8 ± 0,3	54,1 ± 0,8	92,1 ± 2,8	0,83 ± 0,30	1,36 ± 0,02	0,13 ± 0,01	<LD	40 ± 1	14,4 ± 0,3	1,66 ± 0,04	34,0 ± 0,5
SOLO 6	0,57 ± 0,32	0,23 ± 0,16	279 ± 5	898 ± 2	141 ± 11	3,3 ± 0,1	89,6 ± 5,9	44,6 ± 2,1	25,8 ± 1,2	111,7 ± 0,9	0,57 ± 0,04	1,55 ± 0,05	0,07 ± 0,01	2,34 ± 0,19	9 ± 2	12,9 ± 0,6	1,72 ± 0,02	40,0 ± 0,7
VP CONAMA 420/2009	-	-	-	75,0	-	25,0	30,0	60,0	300,0	15,0	5,0	30,0	1,3	2,0	150,0	72,0	-	0,5

Fonte: Autoral, 2026

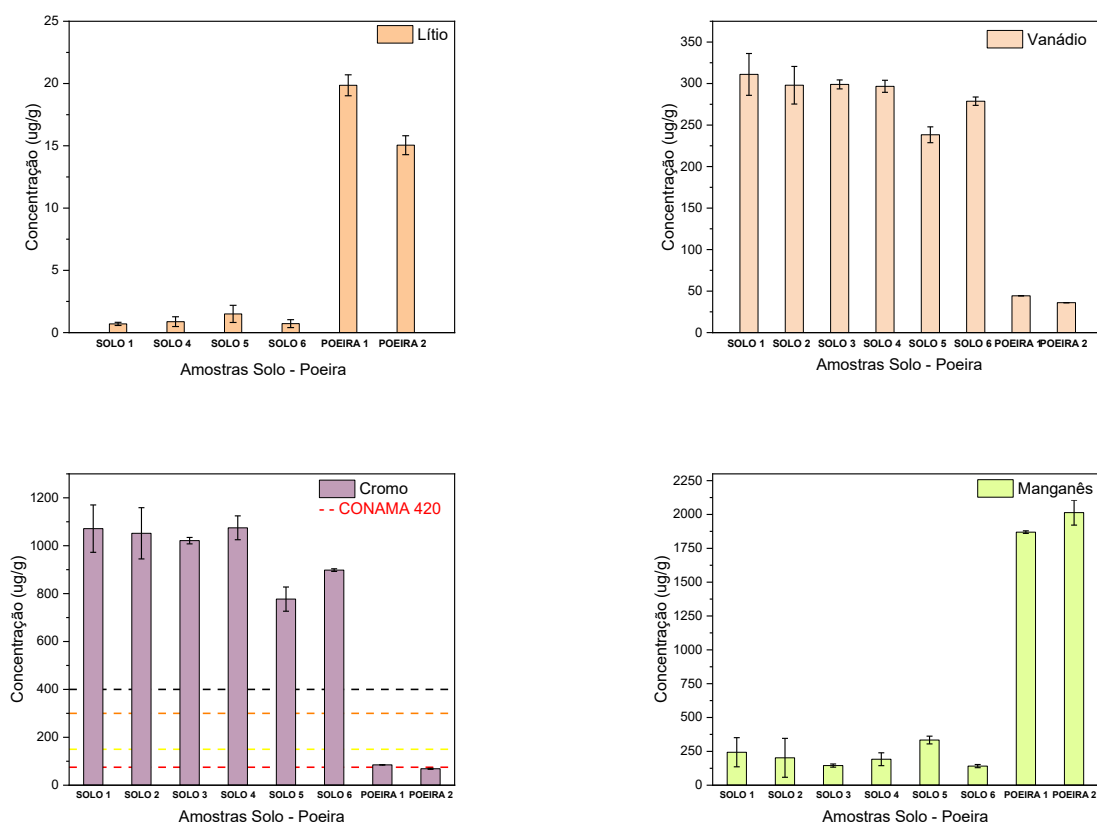
Tabela 5 - Médias e desvios padrões das concentrações dos elementos em µg/g obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de poeira

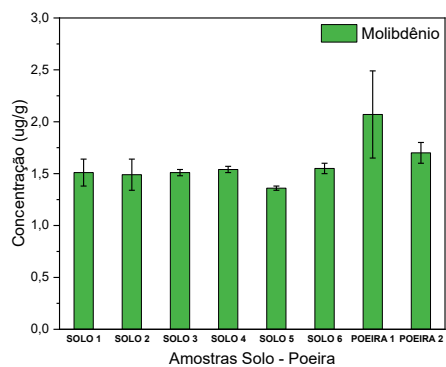
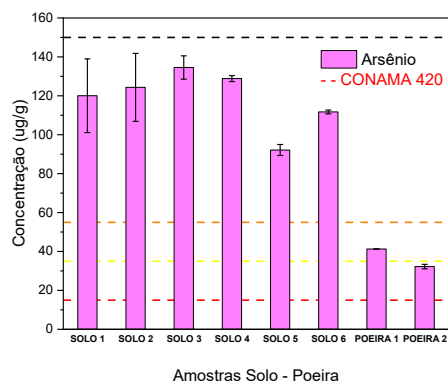
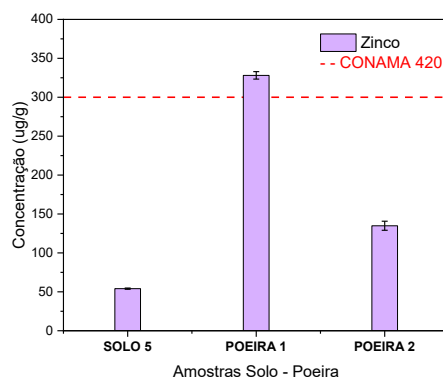
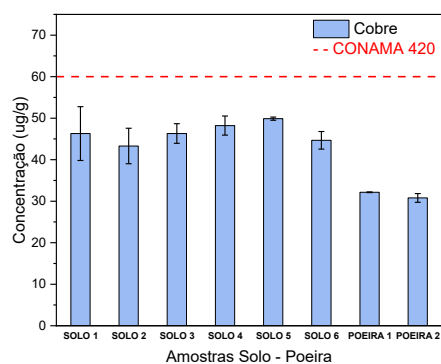
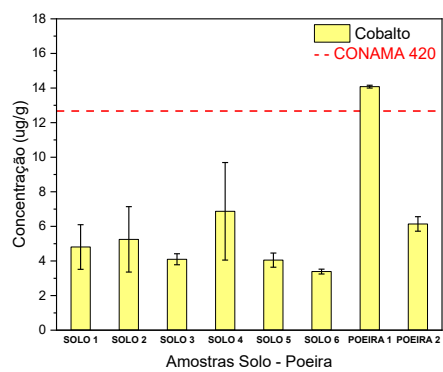
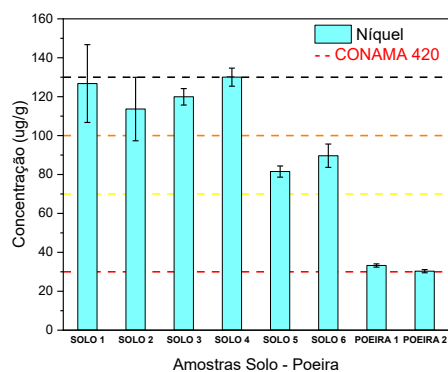
Amostra	Li	Be	V	Cr	Mn	Co	Ni	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sb	Ba	Pb	U	Hg
POEIRA 1	19,86 ± 0,81	0,85 ± 0,21	44 ± 1	85 ± 1	1869 ± 9	14,0 ± 0,1	33,2 ± 0,8	32,1 ± 0,1	328,1 ± 4,7	41,2 ± 0,1	0,70 ± 0,23	2,07 ± 0,42	0,259 ± 0,011	0,589 ± 0,011	4,18 ± 0,09	176 ± 1	2,5 ± 0,1	2,50 ± 0,03	X
POEIRA 2	15,05 ± 0,85	1,17 ± 0,16	36,09 ± 1	69 ± 2	2013 ± 92	6,1 ± 0,4	30,3 ± 0,8	30,7 ± 1,0	134,8 ± 5,8	32,2 ± 1,1	0,72 ± 0,01	1,70 ± 0,10	0,063 ± 0,008	0,253 ± 0,030	3,56 ± 0,17	207 ± 11	2,1 ± 0,1	2,1 ± 0,01	X

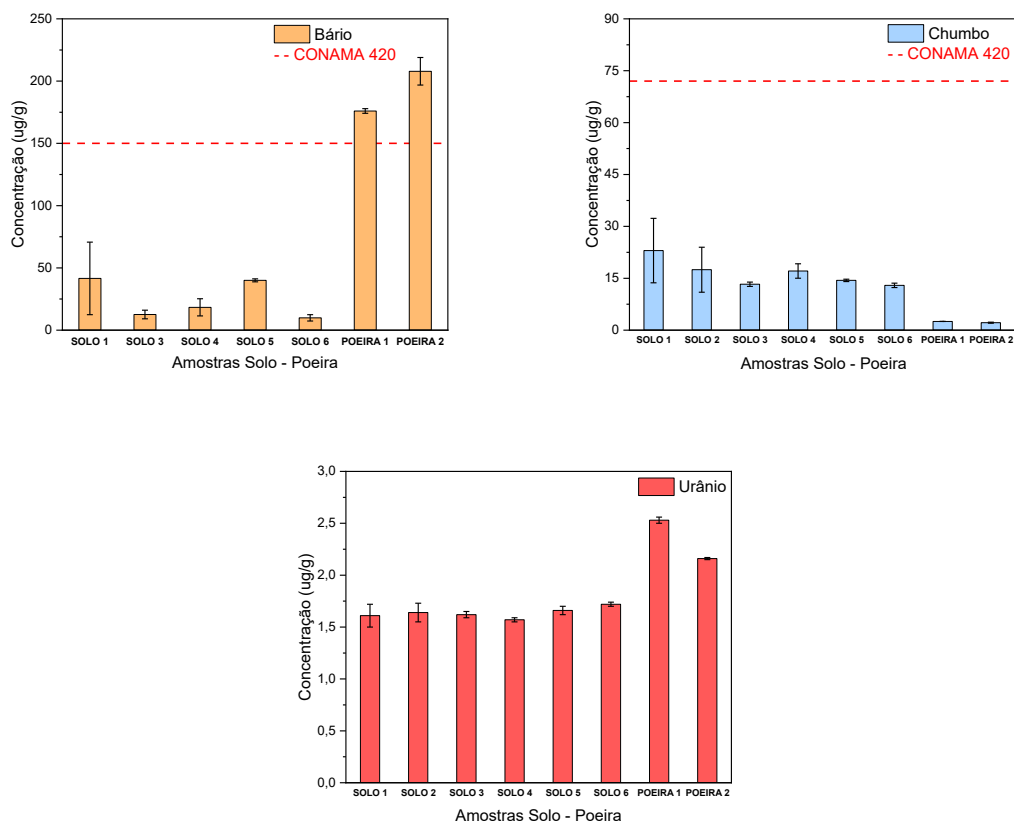
Fonte: Autoral 2026

Para melhor visualização dos dados, foram elaborados gráficos contendo as concentrações dos respectivos elementos nas amostras, os elementos selecionados para a análise gráfica foram aqueles que obtiveram um valor maior do que o limite de quantificação calculado para o respectivo elemento, isso na amostra de interesse. A Figura 7, demonstra os gráficos para cada um dos elementos contendo o desvio padrão, além do valor de prevenção determinado na resolução CONAMA 420/2009, quando compreende o elemento, primeiro para as amostras de solo e posteriormente para as amostras de poeira. Para amostras cujo elemento ultrapassou o valor de prevenção, adicionou-se os valores de investigação agrícola (tracejado amarelo), residencial (tracejado laranja) e industrial (tracejado preto).

Figura 7 - Gráficos com as concentrações médias de cada elementos nas amostras, desvios padrões e Valor de Prevenção, Valor de investigação para solos agrícolas, residenciais e industriais de acordo com a Resolução CONAMA 420, de 28 de dezembro de 2009







Fonte: Autoral, 2026

Dos elementos estudados, destacam-se 3 que atingiram concentrações acima do valor de prevenção estabelecido pela resolução CONAMA 420/2009, são eles o Níquel, Cromo e Arsênio. A CONAMA 420/2009, também estabelece limites de investigação para solos agrícolas, residenciais e industriais, para esses elementos somente Cromo excedeu todos os limites, enquanto Níquel e Arsênio somente não excederam o valor de investigação para solos industriais.

Um estudo realizado por (DE SOUZA *et al*, 2014) destaca a geoquímica de diversos solos ao longo do estado de Minas Gerais, alguns solos estudados nesse artigo apresentaram concentrações de Ni iguais a 54,2 µg/g e de Cr em concentrações próximas a 203 mg/kg, ambos valores acima do valor de prevenção estabelecido pela CONAMA 420. Entretanto tal estudo não apresenta concentrações similares às encontradas no presente trabalho para os elementos Ni e Cr. Essas elevadas

concentrações podem ser justificadas pela natureza do solo ou por uma influência da poeira que é gerada pela atividade minerária e sua deposição, ao longo dos anos, nesse solo, promovendo um enriquecimento de alguns elementos. Observa-se também que as concentrações médias obtidas para todos os pontos de coleta foram relativamente similares.

Outro ponto relevante em relação ao Cromo é sua origem estar possivelmente relacionada ao desgaste asfáltico e de componentes veiculares. Um estudo realizado em 2024 por Wagner e colaboradores, avaliando a composição e fontes da poeira oriunda da estrada, de pneus e de componentes veiculares. E foram encontradas concentrações de Cromo oriundas do pneu variando de 1 a 18 mg/Kg e concentrações desse elemento oriundo do desgaste de freios próxima a 2200 mg/Kg (WAGNER, 2024). Esse último valor similar ao encontrado no presente estudo, indicando que uma possível fonte desse elemento pode estar sendo oriunda do tráfego veicular de caminhões pesados ao fundo da propriedade.

Para o arsênio em específico, um estudo realizado nas regiões do Quadrilátero Ferrífero no ano de 2008 por Eleonora Deschamps, apresentou concentrações de As em solo e poeira doméstica. No caso da cidade de Santa Bárbara, mais especificamente em Santana do Morro, encontraram-se concentrações de As variando de 21 µg/g a 28 µg/g, concentrações próximas às encontradas nas amostras de poeira do presente estudo, que variaram de 32 a 41 µg/g. O solo também foi avaliado, na cidade de Nova Lima, no bairro Galo Velho, concentrações de 170 µg/g de As foram quantificadas em amostras de solo, o que está de acordo com as amostras de solo do presente trabalho, em que as concentrações de As, variaram de 92 a 134 µg/g.

Isso demonstra que o As presente na poeira está em concentrações menores comparadas às concentrações no solo, o que pode ser explicado pela composição granulométrica do material que gera a poeira. Visualmente e segundo as informações dos moradores, é possível inferir que a fonte da poeira doméstica coletada é oriunda da atividade minerária.

As principais fontes de poeira são, em geral, tráfego intenso de veículos em grandes centros urbanos (geram uma poeira preta rica em fuligem), solos e atividades

antrópicas, como por exemplo construções e atividades minerárias. Nesse caso a atividade minerária e os solos podem ser considerados como primeiro e segundo contribuintes, respectivamente. Durante a coleta e segundo relato dos moradores o tráfego de caminhões na área minerária acontece durante as 24 hs do dia. No caso do solo (que seria o próprio solo da propriedade), ele poderia também estar gerando uma poeira enriquecida nos elementos de sua própria composição e nos elementos que são depositados nele pela poeira da atividade minerária.

Para o mercúrio analisado nas amostras de solo via DMA, tais concentrações encontradas, estão bem abaixo do Valor de Prevenção determinado pela resolução CONAMA 420/2009 (0,5 mg/kg), as amostras do presente trabalho tiveram uma variação em média de 0,02 a 0,04 mg/kg. Infelizmente não havia amostra suficiente para fazer as determinações de Hg na poeira, conforme explicado na metodologia e, portanto, não foi possível saber se haveria um enriquecimento ou empobrecimento deste importante elemento do solo para essa matriz.

Uma análise de enriquecimento/empobrecimento dos demais elementos determinados foi realizada nas amostras de solo e poeira. A razão das concentrações de um determinado metal na poeira pelo solo, demonstrando quanto um determinado elemento está enriquecido em uma matriz e conseqüentemente empobrecido em outra, ou que a diferença nas concentrações não represente um valor representativo para tal análise. O fator de enriquecimento pode ser calculado a partir da equação 1 descrita abaixo.

Equação 1: Razão das concentrações de um determinado metal na poeira pela concentração do mesmo metal no solo

$$\text{Razão das concentrações de um metal na poeira pelo solo} = \frac{\text{Concentração média Poeira}}{\text{Concentração média Solo}}$$

A Tabela 6 apresenta os valores dessa razão para cada um dos elementos estudados, valores acima de 1 indicam enriquecimento de determinado elemento na poeira, valores menores do que 1 tem-se o empobrecimento do elemento na poeira,

se o valor do cálculo ficar próximo de 1, quer dizer que esse fenômeno não ocorre para aquele elemento em questão.

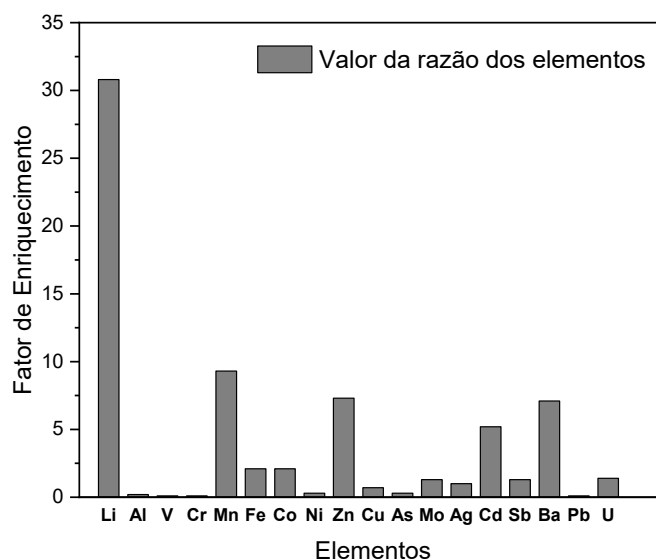
Tabela 6 - Valores das razões para cada um dos elementos estudados

Elemento químico	Valor da razão
FE - Lítio	30,8
FE - Alumínio	0,2
FE - Vanádio	0,1
FE - Cromo	0,1
FE - Manganês	9,3
FE - Ferro	2,1
FE - Cobalto	2,1
FE - Níquel	0,3
FE - Zinco	7,3
FE - Cobre	0,7
FE - Arsênio	0,3
FE - Molibdênio	1,3
FE - Prata	1,0
FE - Cádmio	5,2
FE - Antimônio	1,3
FE - Bário	7,1
FE - Chumbo	0,1
FE - Urânio	1,4

Fonte: Autoral, 2026

Aliado a isso para melhor visualização, elaborou-se um gráfico contendo os elementos e o valor da razão das concentrações para os respectivos elementos para cada um deles Figura 8, e uma Tabela 7, com um resumo dos dados.

Figura 8 - Gráfico dos elementos pelo valor da razão da concentração do metal na poeira sobre a concentração do metal no solo



Fonte: Autoral, 2026

A Tabela 7 abaixo, reúne de forma simplificada quais elementos sofreram processos de enriquecimento/empobrecimento, que sofreram pouco ou nenhuma alteração nas matrizes de solo e poeira.

Tabela 7 - Enriquecimento/empobrecimento dos elementos nas amostras de solo e poeira

Enriquecimento/empobrecimento	Elemento (valor da razão)
Enriquecimento	Li (30), Mn(9), Zn(7), Ba(7), Cd(5)
Empobrecimento	Al, V, Cr, Ni, Cu, As, Pb
Sem ou pouca alteração	Fe, Co, Mo, Ag, Sb e U

Fonte: Autoral, 2026

Os dados do gráfico e da Tabela mostram que os elementos que se apresentam com as mais altas concentrações nos solos não são necessariamente os que

apresentam maiores concentrações na poeira. Neste caso apenas o Mn que é bastante abundante no solo também apresentou alta concentração na poeira. Isso pode ser explicado pelo fato de a fonte mais importante que gera a poeira não é o solo ou então que há uma distribuição das concentrações dos elementos de acordo com a granulometria, ou seja, partículas menores e talvez aerodinâmicas que compõem o solo e/ou o rejeito de minério têm uma composição diferente das partículas maiores, de forma que uma segregação de tamanhos de partículas do(s) material(ais) de origem defina a composição da poeira.

5.3 Determinação de elementos potencialmente tóxicos em matrizes de água

Com relação aos resultados obtidos da determinação dos metais e metaloides por ICP-QQQ, após análise e tratamentos estatísticos, eles foram comparados a Portaria 888 do ministério da saúde. Tal portaria dispõe sobre os “procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade”. Para o presente trabalho, levou-se em consideração o VMP – Valor Máximo Permitido de determinado elemento em uma amostra.

Os elementos determinados na matriz água via ICP-QQQ foram: Li, Be, Al, V, Cr, Mn, Fe, Ni, Co, Cu, Zn, As, Se, Mo, Ag, Cd, Sb, Ba, Pb e U. A Tabela 8 abaixo, mostra os resultados obtido.

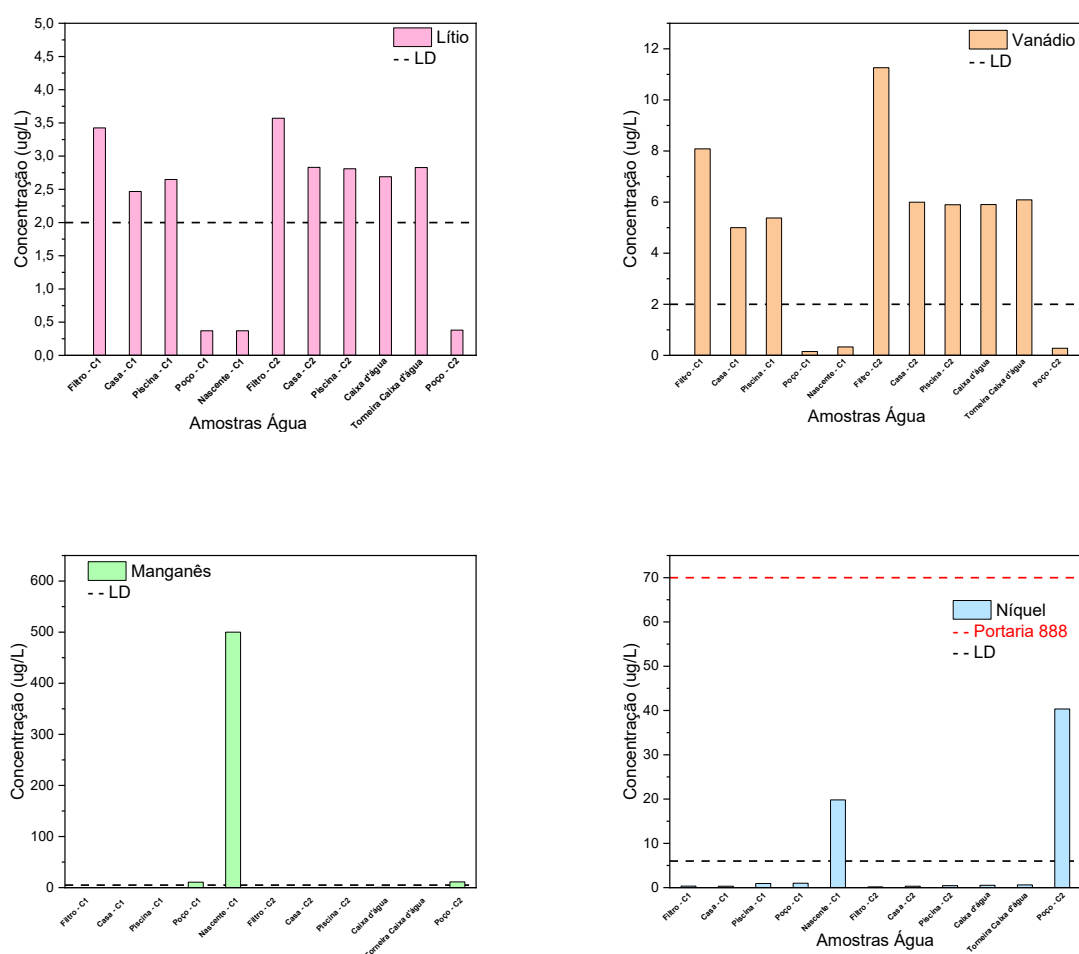
Tabela 8 - Valores das concentrações dos elementos em µg/L obtidos via análise ICP-QQQ nas amostras de água e VMP dos elementos certificados Portaria 888/2021 em µg/L

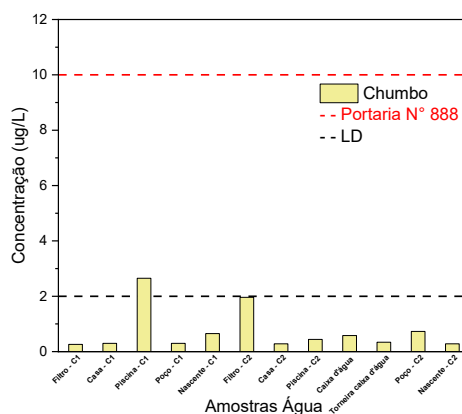
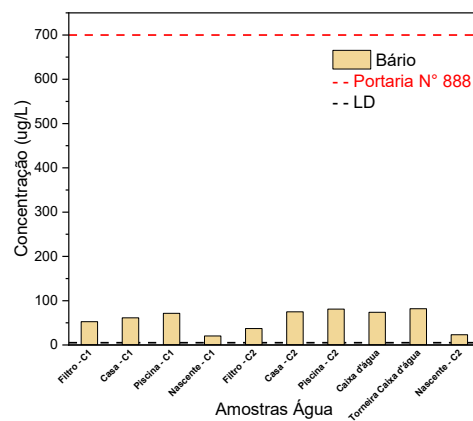
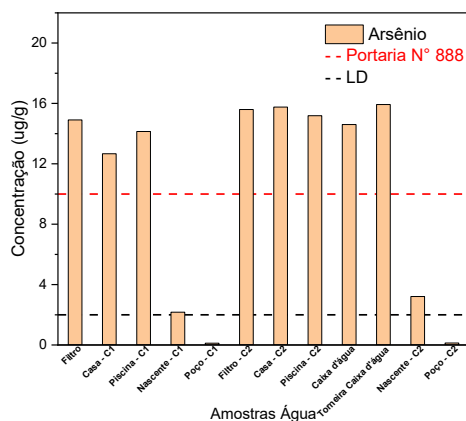
Amostra	Li	Be	Al	V	Cr	Mn	Ni	Co	Cu	Zn	As	Se	Mo	Ag	Cd	Sb	Ba	Pb	U
Filtro - C1	3,43	<LD	<LD	8,08	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	14,9	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	52,67	<LD	<LD
Casa - C1	2,47	<LD	<LD	5,00	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	12,7	<LD	<LD	49,35	<LD	<LD	61,34	<LD	<LD
Piscina - C1	2,65	<LD	<LD	5,38	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	14,1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	71,51	2,65	<LD
Poço - C1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	10	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Nascente - C1	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	499	19,80	<LD	<LD	<LD	2,2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	20,29	<LD	<LD
Filtro - C2	3,57	<LD	<LD	11,26	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	15,6	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	37,22	<LD	<LD
Casa - C2	2,83	<LD	<LD	6,00	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	15,8	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	74,92	<LD	<LD
Piscina - C2	2,81	<LD	<LD	5,90	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	15,2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	81,07	<LD	<LD
Caixa d'água	2,69	<LD	<LD	5,90	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	14,6	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	79,82	<LD	<LD
Torneira Caixa d'água	2,83	<LD	<LD	6,09	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	15,9	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	81,84	<LD	<LD
Poço - C2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	11	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD
Nascente - C2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	578	40,35	<LD	<LD	<LD	3,2	<LD	<LD	<LD	<LD	<LD	23,14	<LD	<LD
VMP – 888/2021	-	-	-	-	50,0	-	70,0	-	2000,0	-	10,0	40,0	-	-	3,0	6,0	700,00	10,0	30,0

Fonte: Autoral, 2026

Para melhor visualização dos dados, foram elaborados gráficos contendo as concentrações dos respectivos elementos nas amostras, os elementos selecionados para a análise gráfica foram aqueles que obtiveram um valor maior do que o limite de detecção para o respectivo elemento, isso na amostra de interesse. A Figura 9, demonstra os gráficos para cada um dos elementos em $\mu\text{g/L}$ nas amostras do estudo.

Figura 9 - Gráficos com as concentrações em $\mu\text{g/L}$ de cada elemento nas amostras, valor do limite de detecção da análise e valor máximo permitido de acordo com a Portaria GM/MS N° 888, de 4 de maio de 2021





Fonte: Autoral, 2026

Dos elementos estudados, destaca-se o arsênio, que excedeu os limites de potabilidade de acordo com a Portaria 888, do ministério da saúde. O mesmo estudo citado anteriormente (Deschamps, *et al*, 2008), também realizou análises de arsênio em água na região de Minas Gerais.

Em Brumal, uma das regiões de coleta do estudo conduzido, as concentrações de as variaram de 3 a 15 µg/L, valores similares aos obtidos no presente estudo, em que as amostras de água coletada obtiveram uma variação de As entre 2 a 15 µg/L. Importante ressaltar que no presente trabalho, as amostras que obtiveram concentrações menores foram as do poço e a da nascente, em que os residentes não utilizam para consumo. Ressalta-se ainda que, uma vez observados os valores altos

desse metaloide na água utilizada para consumo, foi realizada uma segunda coleta das mesmas amostras e os valores foram confirmados.

As amostras com concentrações que excederam o valor máximo permitido da portaria, são as que os moradores consomem, tanto para beber e cozinhar, quanto para lavagem dos alimentos e irrigação da propriedade.

Aliado a isso, o loteamento do bairro recebe o fornecimento dessa mesma água oriunda de um reservatório elevado, que faz a captação de um poço artesiano, tal água que não possui um tratamento prévio, indicando que pode ser uma possível fonte desse elemento.

6 CONCLUSÃO

Os resultados obtidos nesse trabalho, demonstraram que a amostragem realizada desempenhou um papel importante. O planejamento e posterior amostragem possibilitou a identificação de uma fonte de exposição a contaminantes inorgânicos as quais os residentes estão expostos, que é a água utilizada para consumo, banho e recreação. Aliado a isso a elaboração da amostragem contribui no direcionamento de novos estudos relacionados a matriz de poeira e alimentos.

Os resultados para as amostras de solo indicaram valores acima da CONAMA 420 para os elementos arsênio, cromo e níquel, podendo ser justificada pela possível composição natural do solo ou pela deposição da poeira ao longo dos anos nessa propriedade o que pode corroborar para o enriquecimento de elementos no solo. Tais resultados indicam uma situação de atenção em relação a qualidade ambiental da área avaliada.

A poeira por sua vez retrata informações importantes sobre o comportamento dos metais nessa matriz, a avaliação de Enriquecimento/empobrecimento dos metais indica que não há uma relação direta dos metais presentes no solo para os metais presentes na poeira, o que pode estar relacionado com a granulometria distinta dessas amostras. Sendo assim pode-se associar esse enriquecimento/empobrecimento aos mecanismos de transporte que o particulado está sujeito. Devido a distância de 735 metros da propriedade para a área de mineração tal observação é relevante, devido ao tráfego intenso de maquinário e a atividade de extração por si só, ou aliado a remobilização que o próprio solo da propriedade pode estar sujeito.

Os resultados observados das análises de água permitem concluir que pode estar havendo um consumo frequente de água considerada potável com concentrações de arsênio acima de valores recomendados para potabilidade, o que figura uma situação de preocupação. Seria recomendado um monitoramento das concentrações desse metaloide nessa água e ainda estudos planejados para se atribuir, de forma assertiva, a fonte desse metaloide, considerado de alta toxicidade, para essa matriz.

Recomenda-se que trabalhos futuros contemplem uma análise sistemática da granulometria das amostras e sua composição, para que seja possível a diferenciação das amostras de solo e poeira, acarretando numa análise mais assertiva dos metais presentes na poeira e no solo o que auxiliaria no entendimento se o motivo é a granulometria das amostras, as fontes dos metais, ou uma relação desses dois fatores.

Recomenda-se também a análise dos alimentos que são consumidos na propriedade, como ovos, hortaliças e frutas.

Fica claro, portanto, que os resultados obtidos corroboram e demonstram a relevância de um monitoramento ambiental na região, além de um acompanhamento amplo, que contemple, solo, águas, material particulado, alimentos e biológico, principalmente de residentes aos arredores de áreas minerárias.

REFERÊNCIAS

AMIG. *Itatiaiuçu (MG)*. Disponível em: <https://amig.org.br/associado/itatiaiuçu-mg/>. Acesso em: 10 nov. 2025.

BALCAEN, Lieve; BOLEA-FERNANDEZ, Eduardo; RESANO, Martín; VANHAECKE, Frank. Inductively coupled plasma e Tandem mass spectrometry (ICP-MS/ MS): A powerful and universal tool for the interference-free determination of (ultra)trace elements e A tutorial review. **Analytica Chimica Acta**, [S. l.], p. 1-13, 3 set. 2015. DOI <https://doi.org/10.1016/j.aca.2015.08.053>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S000326701501065X?via%3Dihub>. Acesso em: 25 jun. 2026.

CETESB; ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. Guia Nacional de Coleta e Preservação de Amostras: água, sedimento, comunidades aquáticas e efluentes líquidos. 2. ed. São Paulo: CETESB; Brasília: ANA, 2023. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/guia-nacional-de-coleta-e-preservacao-de-amostras/>. Acesso em: 15 nov. 2025.

DA SILVA, Fábio. **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. Segunda edição. ed. rev. [S. l.: s. n.], 2014. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/handle/doc/330496>. Acesso em: 27 jun. 2026.

DESCHAMPS, Eleonora; MATSCHULLAT, Jörg. **Arsênio antropogênico e natural - Um estudo em regiões do Quadrilátero Ferrífero**. 1. ed. [S. l.: s. n.], 2007.

DE SOUZA, José *et al.* Geochemistry and spatial variability of metal(loid) concentrations in soils of the state of Minas Gerais, Brazil. **Science of the Total Environment**, [S. l.], p. 1-12, 18 set. 2014. DOI 10.1016/j.scitotenv.2014.09.098. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S004896971401420X>. Acesso em: 19 maio 2026.

DOS SANTOS VERGILIO, C. *et al.* Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tailing dam failure worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). *Science of the Total Environment*, [S. l.], p. 1-12, 23 nov. 2020. DOI <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143697>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969720372284>. Acesso em: 19 nov. 2025.

FILHO, Lucio *et al.* Spatial distribution, potential sources and geochemical baseline of Fe and potentially toxic elements in stream sediments in Quadrilátero

Ferrífero, Brazil. **Applied Geochemistry**, [S. l.], p. 1-17, 22 jun. 2025. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2025.106483>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292725002069?via%3Dihub>. Acesso em: 28 abr. 2026.

G. S. e Marczylo, T., The Use o Pb Isotope Ratios to Determina Environmental Sources of High Blood Pb Concentrations in Children: A Feasibility Study in Georgia, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19, 15007, 2022. Acesso em: 20 mar. 2026.

KRUG, Francisco; ROCHA, Fábio. Preparo de amostras assistido por radiação micro-ondas. *In: MÉTODOS de preparo de amostras para análise elementar*. [S. l.: s. n.], 2019. Disponível em: <https://pt.scribd.com/document/558055747/Metodos-de-Preparo-de-Amostras-Francisco-Krug>. Acesso em: 27 abr. 2026

Laycock, A.; Chenery, S.; Marchant, E.; Crabbe, H.; Saei, A.; Ruadze, E.; Leonardi, LI, Xinyang; WU, Longhua; ZHOU, Jiawen; LUO, Yongming; ZHOU, Tong; LI, Zhu; HU, Pengjie; CHRISTIE, Peter. Potential environmental risk of natural particulate cadmium and zinc in sphalerite- and smithsonite-spiked soils. *Journal of Hazardous Materials*, Amsterdam, v. 429, p. 128313, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2022.128313>. Acesso em: 05 dez. 2025.

MACHADO, Iran; FIGUEIROA, Silvia. Mining history of Brazil: a summary. **Mineral Economics**, [S. l.], p. 1-13, 27 jan. 2022. DOI <https://doi.org/10.1007/s13563-021-00293-0>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s13563-021-00293-0>. Acesso em: 27 abr. 2026

MATUSIEWICZ, Henryk. Sample Preparation for Inorganic Trace Element Analysis. **Physical Sciences Reviews**, [S. l.], p. 1-39, 1 maio 2017. DOI DOI10.1515/psr-2017-8001. Disponível em: <https://www-degruyterbrill-com.ez27.periodicos.capes.gov.br/document/doi/10.1515/psr-2017-8001/html>. Acesso em: 22 abr. 2026.

NOGUEIRA, Angerson. ICP-MS Espectrometria de Massas com Plasma Indutivamente Acoplado. [S. l.: s. n.], 2023. *E-book*.

PARAGUASSÚ, Larissa *et al.* Impacts of mining in artificial lake of Iron Quadrangle- MG: past marks and changes of the present. *Environmental Earth Sciences*, [S. l.], p. 1-10, 27 fev. 2019. DOI <https://doi.org/10.1007/s12665-019-8158-7>. Disponível em: <https://link.springer.com/article/10.1007/s12665-019-8158-7>. Acesso em: 17 nov.2025.

PREFEITURA MUNICIPAL DE Itatiaiuçu (MG). Dados demográficos. Itatiaiuçu, MG, 05 jun. 2023. Disponível em: <https://www.itatiaiuçu.mg.gov.br/detalhe-da-materia/info/dados-demograficos/6484>. Acesso em: 10 nov. 2025

REIMANN, Clemens *et al.* GEMAS: Establishing geochemical background and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied Geochemistry**, [S. l.], p. 1-17, 16 fev. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2017.01.021>. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0883292716304577?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 2 abr. 2026

REZENDE, V. L. A mineração em Minas Gerais: uma análise de sua expansão e os impactos ambientais e sociais causados por décadas de exploração. *Sociedade & Natureza*, v. 28, n. 3, p. 375–384, 2016. DOI <https://doi.org/10.1590/1982-451320160304>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/sn/a/t88hDp8F66Rpt5FjQBDQFdn/abstract/?lang=pt>. Acesso em: 10 nov. 2025

RIOS, Camila *et al.* Journal of Environmental Management. Revegetation of mining- impacted sites with a tropical native grass: Constraints of climate seasonality and trace-element accumulation, [S. l.], p. 1-12, 9 nov. 2022. DOI <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2022.116655>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0301479722022289>. Acesso em: 16 nov. 2025.

SKOOG, Douglas; HOLLER, F. James; NIEMAN, Tomothy. Espectrometria de Massa Atômica. *In*: PRINCÍPIOS de Análise Instrumental. [S. l.: s. n.], 2002. SMITH, Frank; ARSENAULT, Edward. Microwave-assisted sample preparation in analytical chemistry. **Talanta**, [S. l.], p. 1-62, 23 jan. 1996. DOI 10.1016/0039-9140(96)01882-6. Disponível em: https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/0039914096018826?getft_integrator=clarivate&pes=vor&utm_source=clarivate. Acesso em: 26 abr. 2026.

UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY (EPA). Method 3051A: Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, Soils, and Oils. Washington, D.C.: U.S. EPA, 2007. 30 p. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3051a.pdf>. Acesso em: 16 nov. 2025

WAGNER, Stephan; FUNK, Cristopher; MÜLLER, Kathrin; RAITHEL, David. The chemical composition and sources of road dust, and of tire and road wear particles? A review. **Science of the Total Environment**, [S. l.], p. 1-11, 13 mar. 2024. DOI 10.1016/j.scitotenv.2024.171694. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/38485005/>. Acesso em: 28 jun. 2026.

WINDMÖLLER, Cláudia; SANTOS, Regis; ATHAYDE , Maycon; PALMIERI, Helena. Distribution and speciation of mercury in sediments from gold mining sites in iron quadrangle. **Química Nova**, [S. l.], p. 1-7, 2 jul. 2007. DOI <https://doi.org/10.1590/S0100-40422007000500007>. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/qn/a/LddtBc6jsG8q8GFzvrHGnFN/?lang=pt>. Acesso em: 4 mar. 2026.

YUN, Sung-Wook *et al.* Effect of farmland type on the transport and spatial distribution of metal (loid)s in agricultural lands near an abandoned gold mine site: Confirmation of previous observations. *Journal of Geochemical Exploration*, [S. l.], p. 129-137, 12 jul. 2017. DOI <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.004>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0375674217301036>. Acesso em: 18 nov. 2025

ZAMOTEV, IV; Ivanov, IV; Mikheev, PV; Belobrov, VP, 2017, Eurasian Soil Science, Transformation and Contamination of Soils in Iron Ore Mining Areas (a Review), [S. l.], p. 1-14, 3 nov. 2017. DOI 10.1134/S1064229317030127. Disponível em: https://link.springer.com/content/pdf/10.1134/S1064229317030127.pdf?utm_source=clarivate&getft_integrator=clarivate. Acesso em: 04 dez. 2025.