

A contaminação por arsênio nos solos e nas águas subterrâneas no Estado de Minas Gerais, Brasil: fontes, riscos à saúde, estratégias de mitigação

Arsenic contamination in soils and groundwater in the State of Minas Gerais, Brazil: Sources, Health Risks, Mitigation Strategies

Contaminación por arsénico en suelos y aguas subterráneas en el Estado de Minas Gerais, Brasil: fuentes, riesgos para la salud, estrategias de mitigación

Recebido: 14/02/2022 | Revisado: 21/02/2022 | Aceito: 28/02/2022 | Publicado: 27/03/2022

Isadora Evangelista Martins de Souza

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4983-5642>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: isadora.souza@unifei.edu.br

Giovanna Sales Santana

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7182-2496>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: giovannasantana@unifei.edu.br

Douglas Peterson Munis

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9505-505X>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: douglasilva@unifei.edu.br

Grazielle Assis Carneiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-8120-9858>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: graziassis22@hotmail.com

José Augusto Costa Gonçalves

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1659-0896>
Universidade Federal de Itajubá, Brasil
E-mail: jaucosta@unifei.edu.br

Resumo

O arsênio (As), é considerado um contaminante ambiental, podendo ser encontrado na água, no solo, no ar e em alimentos. A origem do arsênio pode ser natural ou antrópica. As fontes naturais desse elemento são os minerais, rochas, solos e sedimentos que contém o arsênio em sua composição; as fontes antrópicas provêm da agricultura considerando o uso indevido de pesticidas, herbicidas, dos rejeitos de determinadas atividades minerárias, do refino de metais não ferrosos, além da queima de carvão mineral. Em Minas Gerais uma importante fonte de contaminação por arsênio são as atividades de mineração. Entre os impactos negativos, grande preocupação está justamente relacionada ao arsênio, que é altamente tóxico e está presente em águas de abastecimento humano e solos de Minas Gerais. Este trabalho objetiva o inventário e mapeamento das áreas impactadas pelas contaminações dos solos e das águas subterrâneas pelo arsênio. Toda pesquisa foi realizada a partir de dados obtidos dos órgãos ambientais estaduais e, elaboração de mapas representativos das contaminações no Estado. As maiores contaminações por arsênio se encontram na região do Quadrilátero Ferrífero e no município de Paracatu, locais destacados pela mineração de ferro e de ouro. As concentrações de arsênio informadas nos estudos consultados, nas águas variaram de 0,1 a 2.980 $\mu\text{g.L}^{-1}$, já nos solos e sedimentos, os valores vão de 0,14 mg.kg^{-1} a 37 mg.kg^{-1} . Ter conhecimento da presença, das fontes, das vias de exposição, dos riscos à saúde provenientes da ingestão e do contato com o arsênio, é de extrema relevância.

Palavras-chave: Mineração; Fontes de contaminação; Risco a saúde; Mapeamento.

Abstract

Arsenic (As) is considered an environmental contaminant and can be found in water, soil, air and food. The origin of arsenic can be natural or anthropic. The natural sources of this element are minerals, rocks, soils and sediments that contain arsenic in their composition; Anthropogenic sources come from agriculture, considering the improper use of pesticides, herbicides, waste from certain mining activities, refining of non-ferrous metals, in addition to the burning of mineral coal. In Minas Gerais, an important source of arsenic contamination is mining activities. Among the negative impacts, great concern is precisely related to arsenic, which is highly toxic and is present in human supply waters and soils in Minas Gerais. This work aims at the inventory and mapping of the areas impacted by the contamination of soils and groundwater by arsenic. All research was carried out from data obtained from state

environmental agencies and elaboration of maps representing contamination in the state. The largest arsenic contaminations are found in the Quadrilátero Ferrífero region and in the municipality of Paracatu, places highlighted by the mining of iron and gold. The arsenic concentrations reported in the consulted studies in the water ranged from 0.1 to 2,980 $\mu\text{g.L}^{-1}$, while in the soils and sediments, the values ranged from 0.14 mg.kg^{-1} to 37 mg.kg^{-1} . Knowing the presence, sources, exposure routes, health risks from ingestion and contact with arsenic is extremely important.

Keywords: Mining; Contamination sources; Health risk; Mapping.

Resumen

El arsénico (As) se considera un contaminante ambiental y se puede encontrar en el agua, el suelo, el aire y los alimentos. El origen del arsénico puede ser natural o antrópico. Las fuentes naturales de este elemento son los minerales, rocas, suelos y sedimentos que contienen arsénico en su composición; Las fuentes antropogénicas provienen de la agricultura, considerando el uso indebido de pesticidas, herbicidas, desechos de ciertas actividades mineras, refinación de metales no ferrosos, además de la quema de carbón mineral. En Minas Gerais una fuente importante de contaminación por arsénico son las actividades mineras. Entre los impactos negativos, la gran preocupación está precisamente relacionada con el arsénico, que es altamente tóxico y está presente en las aguas y suelos de abastecimiento humano en Minas Gerais. Este trabajo tiene como objetivo el inventario y mapeo de las áreas impactadas por la contaminación de suelos y aguas subterráneas por arsénico. Toda la investigación se realizó a partir de datos obtenidos de las agencias ambientales estatales y la elaboración de mapas que representan la contaminación en el estado. Las mayores contaminaciones de arsénico se encuentran en la región del Quadrilátero Ferrífero y en el municipio de Paracatu, lugares destacados por la extracción de hierro y oro. Las concentraciones de arsénico reportadas en los estudios consultados en el agua oscilaron entre 0,1 y 2980 $\mu\text{g.L}^{-1}$, mientras que en los suelos y sedimentos los valores oscilaron entre 0,14 mg.kg^{-1} y 37 mg.kg^{-1} . Conocer la presencia, las fuentes, las rutas de exposición, los riesgos para la salud por la ingestión y el contacto con el arsénico es extremadamente importante.

Palabras clave: Minería; Fuentes de contaminación; Riesgo de salud; Cartografía.

1. Introdução

O estado de Minas Gerais se destaca por suas reservas minerais, com algumas das maiores jazidas, províncias e distritos minerais do Brasil. Há no estado uma variedade de minerais, especialmente na região do Quadrilátero Ferrífero, como minério de ferro, ouro, esmeralda, manganês, etc. Historicamente, há muitos anos as atividades de exploração de minérios ocorrem em todo território mineiro, e como toda e qualquer atividade humana, causa algum tipo de impacto sobre o meio ambiente, os quais podem ser menosprezados (Roeser & Roeser, 2013).

Nas últimas décadas, os impactos negativos sobre o meio ambiente devido ao aumento das atividades de mineração, principalmente de ferro, cresceram significativamente. Entre os impactos negativos oriundos da mineração pode-se citar a contaminação por arsênio. Em várias partes do mundo e em algumas localidades no Brasil, têm sido mensurados elevados teores de arsênio (As) total em águas superficiais e subterráneas, solos e em rejeitos presentes em áreas de mineração (Gonçalves, 2011).

Registros e estudos sobre a contaminação por As desses compartimentos, tem buscado relacionar as atividades de mineração ou fontes naturais desse elemento e seus efeitos na saúde humana e no meio ambiente. E uma das primeiras ações a ser tomada pelo órgão ambiental competente é ter conhecimento e informações sobre as áreas contaminadas pelo elemento, e a partir dessa ação, traçar planos com objetivo de garantir a segurança da área, (Silva, 1995).

Em suma, a disponibilidade dos metais pesados depende da presença do elemento na solução do solo, a qual é governada pela composição e pela reação dos sistemas, pelas condições de oxirredução e pela cinética das reações, que dependem de características do solo e da tendência em formar compostos precipitados insolúveis e coprecipitados com outros minerais a formar complexos com matéria orgânica e adsorver outros minerais.

As áreas de mineração, em particular, são drasticamente alteradas e, nesse contexto, a avaliação da contaminação dos solos é o primeiro passo para o adequado gerenciamento das áreas degradadas.

Teixeira et al. (2020), afirmam que a contaminação por arsênio nas águas, sedimentos e solos brasileiros é um fenômeno natural relacionado à composição do solo brasileiro, que está se tornando um problema ambiental devido às atividades antrópicas. De acordo com Bundschuh et al. (2020), durante as últimas duas décadas, a presença de arsênio em

ambientes naturais recebeu finalmente o reconhecimento como um problema ambiental global e de saúde. O As é um contaminante ambiental encontrado no ar, águas e alimentos, e as fontes de contaminação podem ser naturais e/ou antropogênicas. É encontrado principalmente em rochas ricas em minérios metálicos não-ferrosos como cobre, chumbo e ouro, e disseminado em atividades vulcânicas. Altos teores de As oriundos da lixiviação de rochas e solos têm sido encontrados nas águas, sendo esta a razão dos problemas de contaminação pelo elemento em diversas regiões (Castilhos et al., 2020).

Segundo Gonçalves et al. (2010), a mobilização do As no meio ambiente se dá através da combinação de eventos que incluem processos naturais como a meteorização das rochas, emissões vulcânicas e atividades biológicas, bem como processos antropogênicos, uso de pesticidas e herbicidas, combustíveis fósseis, atividades de mineração.

Até a poucos anos, o As não estava entre os constituintes que são rotineiramente analisados nas águas de consumo, porque as informações sobre a sua distribuição não eram bem conhecidas como as de outros constituintes. Por isso a sua presença nas águas superficiais e subterrâneas, utilizadas para o consumo humano, constitui uma grande ameaça para a saúde (Gonçalves et al., 2010). Diante disso, a Organização Mundial da Saúde estabeleceu que para a água se tornar potável, ela não deve conter mais de 10 partes por bilhão de arsênio, ou seja a concentração de $10 \mu\text{g.L}^{-1}$.

A Resolução nº 357, de 17/03/2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA), que classifica as águas superficiais, estabelece limites máximos para a concentração de arsênio total que variam de 0,01 a 0,14 mg.L^{-1} , de acordo com a natureza e finalidade de uso da água. A Portaria de Consolidação nº 5 de 28 de setembro de 2017, do Ministério da Saúde, em seu Anexo XX, estabelece que a concentração de As total presente na água para consumo humano deve ser inferior a 0,01 mg.L^{-1} . Entretanto, a concentração total de arsênio não discrimina qual a concentração máxima a ser tolerada para as espécies de As^{3+} e As^{5+} , que são as espécies mais tóxicas de arsênio (Farias et al., 2012).

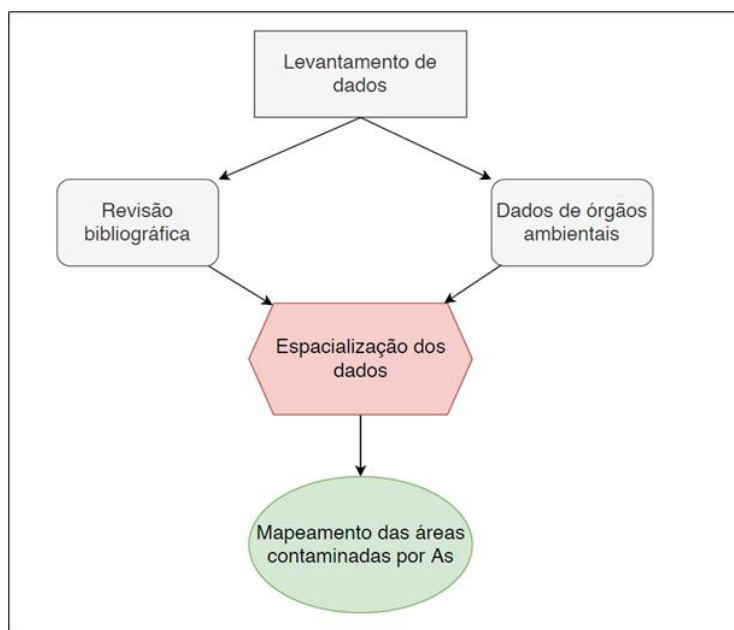
Visto a importância e os efeitos deletérios sobre a saúde humana e o meio ambiente do arsênio, este trabalho tem por objetivo apresentar informações sobre as áreas contaminadas no Estado de Minas Gerais, bem como as fontes de contaminação, os riscos à saúde e as formas de mitigação, por meio de pesquisa bibliográfica e a bancos de dados de órgãos ambientais do Estado.

Em Minas Gerais, em 2010 foi instituído o Programa Estadual de Gestão de áreas contaminadas (COPAM, 2010) com o objetivo de aperfeiçoar o gerenciamento das áreas contaminadas, estabelecer diretrizes e procedimentos para a proteção da qualidade do solo e das águas subterrâneas sob responsabilidade da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM), cuja função é executar a política de proteção, conservação e melhoria da qualidade ambiental, na gestão da qualidade do ar, do solo e dos resíduos sólidos além de atuar na prevenção e correção da poluição ambiental provocada pelas atividades industriais, minerárias e de infraestrutura (Minas Gerais, 2008).

2. Metodologia

A metodologia utilizada para a execução deste trabalho é mostrada no fluxograma da Figura 1.

Figura 1 - Fluxograma Metodológico.



Fonte: Autores (2020).

Este estudo se desenvolveu a partir de uma revisão integrativa da literatura, nas seguintes etapas: Identificação do tema, especificação dos critérios para aceitação ou não dos estudos publicados; definição das informações a serem extraídas dos estudos publicados; avaliação e análise crítica dos estudos; interpretação dos resultados e síntese do conhecimento. A busca foi realizada nos meses de fevereiro a agosto de 2021, nas bases de dados: Bases de Dados em Recursos Hídricos e Geociências nas Plataformas da Secretaria de Meio Ambiente do estado de Minas Gerais e em periódicos nacionais e internacionais. A aquisição dos dados e informações foi realizada em duas etapas: revisão da produção bibliográfica e a compilação dos dados assentados em plataformas de instituições e órgãos ambientais estatais.

Para fins de adequação e uniformização dos dados adquiridos, as coordenadas geográficas utilizadas foram em graus decimais no sistema SIRGAS 2000.

O mapeamento das áreas contaminadas, foi realizado com auxílio do software QuantumGIS (Qgis) e, como resultado obteve-se mapas com os pontos de contaminação reunidos por meio da tabela da FEAM e a revisão bibliográfica. O mapa de calor foi elaborado utilizando um raio de 0,4°, com Datum SIRGAS 2000.

3. Resultados e Discussão

No Brasil, a origem do As nas águas superficiais, subterrâneas e solo está em sua maioria associada às atividades antropogênicas, sobremaneira aquelas relacionadas à mineração (Teixeira et al., 2020).

O estado de Minas Gerais destaca-se como um dos principais fornecedores de metais, como o ouro, ferro, manganês entre outros. Mais da metade da produção bruta de ouro do Brasil em 2019 teve origem no Estado (BRASIL, 2020). A região do Quadrilátero Ferrífero é a mais importante do país quando se fala no potencial de exploração do ouro. Na região, o ouro está associado em minerais como a arsenopirita, que contém arsênio, onde há elevada concentração deste elemento decorrente da extração histórica do ouro, tendo sido liberado para os solos, atmosfera e águas superficiais e subterrâneas (Figueiredo et al. 2005). Na região, as principais fontes de arsênio natural são oriundas dos depósitos auríferos sulfetados; e as antrópicas, relacionadas às pilhas de rejeitos, solos e sedimentos contaminados (Borba et al, 2004).

A extração do ouro se configura como uma das principais formas de contaminação por arsênio no Estado, visto que

este metal comumente está associado com arsenetos de ferro, cobre, níquel (arsenopirita), quartzo, carbonatos, sulfetos, óxidos de ferro, silicatos de ferro, magnésio, cálcio, vanádio e cromo (Lobato & Costa, 2018).

Entretanto, fontes naturais de contaminação por arsênio foram registradas por Gonçalves et al. (2010) que identificou a presença desse elemento em águas subterrâneas em Ouro Preto, MG, decorrentes do processo de intemperismo das rochas que contém em sua composição sulfetos que, durante o processo de oxidação há liberação do As para o meio ambiente.

A resolução CONAMA 420/2009 lista as diretrizes básicas para o gerenciamento das áreas contaminadas, como a geração e disponibilização de informações ficando sob responsabilidade do órgão ambiental competente a identificação das áreas suspeitas de contaminação e a investigação daquelas onde já existirem indícios de contaminação. Compete ao órgão ambiental ainda o diagnóstico das áreas contaminadas e posterior intervenção para eliminação do perigo ou a sua redução assegurando ainda o monitoramento das ações colocadas em curso para reverter a situação da área contaminada para níveis toleráveis (CONAMA, 2009).

Além do levantamento de áreas contaminadas realizado pela FEAM, alguns estudos foram desenvolvidos no estado ao longo dos anos, com o intuito de investigar a ocorrência de arsênio no solo e nas águas subterrâneas, em diversos locais pelo estado, Quadro 1.

Quadro 1 - Ocorrências de As nos solos e nas águas subterrâneas em Minas Gerais.

Referências	Município	Atividade	Meio Impactado	Concentração de As	
				Água ($\mu\text{g.L}^{-1}$)	Solo (mg.kg^{-1})
Borba, 2004	Ouro Preto	Fonte natural - oxidação natural	Água subterrânea	<2<2980	-
	Mariana	Fonte natural - oxidação natural	Água subterrânea	<2<2980	-
Gonçalves et al., 2007	Ouro Preto	Mineração do ouro	Água subterrânea	<9<224	-
Campos et al., 2013	Rosário	Adubação	Solo		<0,14<9,3
Bidone et al., 2014	Paracatu	Mineração do Ouro	Água subterrânea	13.21 \pm 12.38	-
Castilhos et al., 2015	Paracatu	Mineração do ouro	Água subterrânea, solo	10	-
Ferreira et al., 2016	Paracatu	Mineração do ouro	Sedimentos		3,401
Santos e Dani, 2016	Paracatu	Mineração do ouro	Água subterrânea	Águas superficiais: <15<26	<35<37
				Águas subterrâneas: <12<16	
				Águas subterrâneas: <0,1<1	
Castilhos et al., 2020	Paracatu	Mineração do ouro	Água subterrânea, solo	0,2	-

Fonte: Autores (2020).

A mineração do ouro é a principal fonte antropogênica de contaminação por arsênio, verificou-se que 72,72% dos estudos, a identificam como fonte de contaminação das águas subterrâneas, solos e sedimentos por As. A concentração do As verificada nos estudos nas águas varia de 0,1 a 2.980 $\mu\text{g.L}^{-1}$, já nos solos e sedimentos, os valores vão de 0,14 a 37 mg.kg^{-1} .

Borba et al. (2004), desenvolveram um trabalho buscando melhor compreender a distribuição geoquímica do arsênio em sedimentos e águas superficiais, e discutir suas prováveis fontes e potenciais riscos de contaminação ambiental nas três regiões mais importantes de produção de ouro do Quadrilátero Ferrífero. De acordo com os autores, a região possui uma grande anomalia natural de arsênio relacionada aos depósitos de ouro mesotérmicos encontrados no cinturão de pedras verdes do Rio das Velhas. As principais fontes de contaminação antropogênica do arsênio, são relacionadas ao patrimônio ambiental como solo contaminado, descarte de rejeitos e minas antigas, além dos sedimentos presentes nos cursos de água, resultantes de três séculos de atividades de mineração, (Christoforo & Leão, 2009). Borba et al., 2004 investigaram a presença de As em águas subterrâneas de aquíferos, sob influência de rochas portadoras de mineralizações auríferas, de alguns pontos das regiões de Ouro Preto e Mariana. Verificou-se grandes variações das concentrações de As encontradas, que podem indicar que a heterogeneidade hidrogeoquímica da água subterrânea na área estudada pode ocorrer em distâncias que variam de centenas ou de apenas alguns metros, o que pode ser encontrado também em outros locais do QF que possuam contexto geológico semelhante.

Gonçalves et al. (2007), apresentou um estudo hidrogeoquímicos das águas subterrâneas que servem como fonte de abastecimento ao município de Ouro Preto. Verificou-se que as concentrações de arsênio nos pontos monitorados variou hidrológica e sazonalmente. Nos períodos chuvosos, foram encontradas maiores concentrações de As. Costa et al. (2010), apresentaram resultados quanto a concentração de arsênio em o objetivo do em depósitos sedimentares de planícies de inundação e terraços aluviais existentes no Ribeirão do Carmo com o intuito de compreender o controle do ambiente deposicional na acumulação de arsênio, através do estudo de fácies estratigráficas.

Campos et al., (2013), avaliaram o teor total e a adsorção de As na ausência e presença dos ânions fosfato e sulfato em seis diferentes classes de solos do estado de Minas Gerais, Brasil. Os seis solos estudados apresentaram teores naturais entre $0,14 \pm 0,1$ mg.kg⁻¹ (GX - Gleissolo Háptico) e $9,3 \pm 1,0$ mg.kg⁻¹ (LVd - Latossolo Vermelho Distrófico). Já Bidone et al. (2016), avaliaram as concentrações de As total em água potável no Morro do Ouro, no município de Paracatu. A concentração de arsênio estava geralmente abaixo do limite de detecção ($<0,5$ µg.L⁻¹). As maiores concentrações foram encontradas nas proximidades instalações de mineração e antigas áreas de mineração artesanal ao redor a mina.

Outros estudos devem ser considerados como o de Eleutério (1997), encontrando em sedimentos de corrente no Rio do Carmo, teores de arsênio de $620,0$ µg.g⁻¹ no verão e 1.268 µg.g⁻¹ no inverno. Mattschullat et al., (2000), nos municípios de Nova Lima e Santa Bárbara, no Quadrilátero Ferrífero, ao estudar as concentrações de As em urina de crianças com idade entre 7 a 12 anos, constataram a contaminação humana por As em concentrações entre 2 a 106 µg.L⁻¹, sendo que 22% das crianças apresentaram concentrações superiores a 40 µg.L⁻¹. Pimentel (2001), analisou em Ouro Preto, águas provenientes de antigas minas de ouro e nascentes tendo obtido teores de As entre $0,07$ a $2,30$ mg.L⁻¹.

Considerando a legislação de alguns países e a brasileira no que tange ao valor máximo admissível para qualquer tipo de uso do solo, verifica-se que na Alemanha os valores de referência do As em solos, para intervenção em parques infantis, áreas residenciais, parques/áreas de lazer, área de comércio e indústria são de 25, 50, 125 e 140 mg.kg⁻¹ respectivamente. Na legislação brasileira os valores de referência são de 15 mg.kg⁻¹ de As em solos em situação de prevenção e 35, 55 e 150 mg.kg⁻¹ para solos de áreas agrícolas, residenciais e industriais respectivamente em situação de investigação (CONAMA 2009). Em Pernambuco, os valores de referência de As nos solos obtidos em alguns estudos, são de $0,43$ mg kg⁻¹, $0,36$ mg kg⁻¹ e $0,52$ mg kg⁻¹ na Zona da Mata, na região do Agreste e do Sertão, respectivamente. Para os solos de Minas Gerais, os valores de referência encontrados para As variaram entre $3,8$ a $50,6$ mg kg⁻¹ (Caires 2009). Em São Paulo, o valor referência de As nos solos é de $3,5$ mg kg⁻¹, valor de alerta é de 15 mg.kg⁻¹, valores para intervenção em áreas agrícolas, em áreas residências e áreas industriais, são 25, 50 e 100 mg.kg⁻¹ respectivamente (CETESB 2005). O Quadro 2 apresenta as informações sobre áreas de contaminação confirmadas por arsênio em municípios de Minas Gerais.

Quadro 2 - Áreas contaminadas e remediadas por arsênio em Minas Gerais, sob gerenciamento da FEAM.

Município	Nº de áreas	Atividade	Fonte de contaminação	Meio impactado
Nova Lima	7	Atividades Minerárias	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Betim	4	Refino de petróleo	Acidente; Vazamento ou Infiltração	Água subterrânea
Três Marias	3	Indústria Metalúrgica	Descarte/Disposição de Resíduos	Solo
Betim	3	Refino de petróleo	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Paracatu	2	Lavra a céu aberto	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea
Paracatu	2	Indústria Metalúrgica	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Ouro Preto	2	Metalurgia de não-ferrosos	Descarte/Disposição de Resíduos,	Água subterrânea; Solo
Nova Lima	1	Lavra subterrânea	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
João Monlevade	1	Siderurgia	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Água superficial
Confins	1	Aeroporto	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Araguari	1	Fabricação de bebidas	Vazamento ou Infiltração	Água subterrânea; Solo
Belo Horizonte	1	Revenda de combustíveis	Vazamento ou Infiltração	Água subterrânea; Solo
Contagem	1	Indústria Metalúrgica	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Uberaba	1	Indústria Química	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea
Itaiaçu	1	Indústria Química	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Ibirité	1	Refino de petróleo	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Pedro Leopoldo	1	Refino de óleo lubrificante	Descarte/Disposição de Resíduos	Solo
Nova Lima	1	Depósito de Resíduos Sólidos	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Conselheiro Lafaiete	1	Indústria Metalúrgica	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Governador Valadares	1	Indústria Metalúrgica	Descarte/Disposição de Resíduos	Água subterrânea; Solo
Araxá	1	Atividades Minerárias	Vazamento ou Infiltração	Solo

Fonte: Autores (2020) modificado de FEAM (2019).

As principais atividades responsáveis pela contaminação por arsênio no Estado são: atividades minerárias, indústrias metalúrgicas e refino de petróleo. O descarte e a disposição de resíduos são as principais fontes de contaminação. Ainda, o município de Nova Lima, inserido no Quadrilátero Ferrífero, é o que apresenta o maior número de áreas contaminadas declaradas.

3.1 Mapeamento das Áreas Contaminadas por As em Minas Gerais

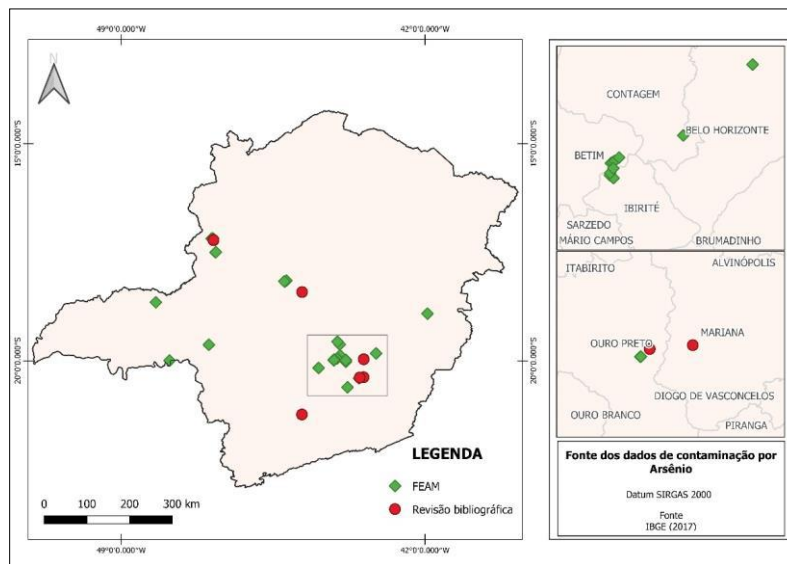
As áreas com maior abrangência dos estudos levantados pelos pesquisadores são Paracatu e Ouro Preto, listadas 4 e 2 vezes respectivamente, na listagem de controle da FEAM, que aponta como principais atividades de mineração de lavra a céu aberto, com tratamento a úmidos minerais e a metalurgia.

Municípios como Nova Lima, Betim, Belo Horizonte, Confins, Contagem, Uberaba, Três Marias, Conselheiro Lafaiete e Araxá não constaram em nenhum estudo enumerado pelos autores; entretanto, rios como o das velhas (Nova Lima, Belo Horizonte, Confins, Contagem) e rio Paraopeba (Betim, Conselheiro Lafaiete) correspondem as áreas mais recorrentes com estudo sobre contaminação de arsênio em águas superficiais e subterrâneas.

Verificou-se que 59% das áreas contaminadas por As listadas pela FEAM, tem origem nas atividades da mineração ou correlatas, como metalurgia e lavra à céu aberto ou subterrânea. Dos estudos listados pelos autores, 61,5% (8 dos 13) estudos associam a contaminação pelo arsênio oriundo de atividades da mineração.

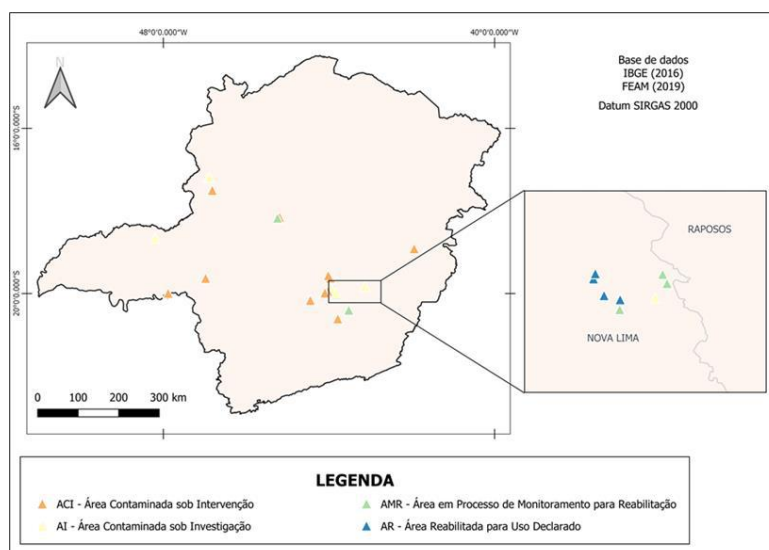
A Figura 2, mostra os casos de contaminação, por localidade, sob controle da FEAM e dos estudos traçados pelos pesquisadores. Observa-se que há uma concentração de casos diagnosticados pela FEAM na região metropolitana de Belo Horizonte; já os estudos concentram-se na região das minas: Ouro Preto, Mariana.

Figura 2 - Mapa da fonte de dados de contaminação por arsênio.



Fonte: Autores (2020).

Figura 3 - Distribuição espacial das áreas contaminadas por As sob controle da FEAM.



Fonte: Autores (2020).

O Quadro 3 reúne um compilados dos dados observados na revisão bibliográfica e disponibilizados pela FEAM, e a partir dela, foi possível elaborar um mapa de calor, dos locais em Minas Gerais contaminados por arsênio, conforme a Figura 4.

Quadro 3 - Áreas contaminadas por arsênio em Minas Gerais.

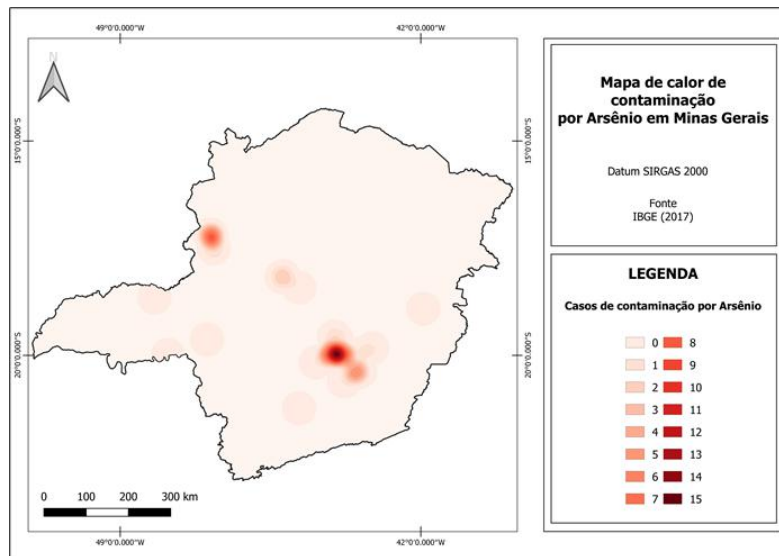
Município	Nº de áreas	Atividade	Meio impactado
Paracatu	10	Lavra a céu aberto/Metalurgia/Mineração do Ouro	Água subterrânea; Solo
Nova Lima	9	Lavra subterrânea/Depósito de Resíduos Sólidos	Água subterrânea; Solo
Betim	7	Refino de petróleo	Água subterrânea; Solo
Ouro Preto	5	Metalurgia de não-ferrosos/Mineração do ouro	Água subterrânea; Solo
Três Marias	3	Indústria Metalúrgica	Solo
João Monlevade	1	Siderurgia	Água subterrânea; Água superficial
Confins	1	Aeroporto	Água subterrânea; Solo
Araguari	1	Fabricação de bebidas, inclusive alcólicas	Água subterrânea; Solo
Belo Horizonte	1	Postos revendedores de combustíveis e afins	Água subterrânea; Solo
Contagem	1	Indústria Metalúrgica	Água subterrânea; Solo
Uberaba	1	Indústria Química	Água subterrânea
Itatiaiuçu	1	Indústria Química	Água subterrânea; Solo
Ibirité	1	Refino de petróleo	Água subterrânea; Solo
Pedro Leopoldo	1	Rerrefino de óleo lubrificante usado	Solo
Conselheiro Lafaiete	1	Indústria Metalúrgica	Água subterrânea; Solo
Governador Valadares	1	Indústria Metalúrgica	Água subterrânea; Solo
Araxá	1	Atividades Minerárias	Solo
Mariana	1	Fonte natural - oxidação natural	Água subterrânea

Fonte: Autores (2020).

A Figura 4, mostra os maiores focos de contaminação por arsênio. Foram mapeados os casos diagnosticados pela FEAM e os identificados pelas pesquisas da revisão bibliográfica. Os locais que possuem a coloração mais escuras possuem um máximo de 15 pontos de concentração por Ar, enquanto a cor mais clara representa 0 pontos de contaminação espalhados pelo estado.

Destaca-se neste mapa dois focos maiores de concentração, um na região do quadrilátero ferrífero em conjunto com a região metropolitana de Belo Horizonte, e outro na região noroeste, nos arredores da cidade de Paracatu.

Figura 4 – Mapa de calor de contaminação por Arsênio em MG.



Fonte: Autores (2020).

Ambas as regiões com maior incidência de contaminação por arsênio, se destacam pelas atividades minerárias de ouro e de ferro, entre outras.

3.2 Riscos da contaminação por As à saúde

A toxicidade das diversas espécies de arsênio decresce na seguinte ordem: compostos de As (3^+) inorgânicos, compostos As (5^+) inorgânico, composto As (3^+) orgânico, Composto As (5^+) orgânico, sendo o As (3^+) inorgânico cerca de 60 vezes mais tóxico que o As (5^+) inorgânico (Andrade e Rocha, 2018). Dessa forma, o As inorgânico é considerado a forma mais tóxica desse elemento, representando um elevado risco para o ser humano. A forma mais comum de exposição humana a tal elemento, se dá através de água contaminada, a ingestão de plantas e animais contaminados, por meio da bioacumulação e, inclusive a inalação de gases e ingestão de pó. A intoxicação por arsênio pode resultar em efeitos tóxicos, agudos ou crônicos, relativos a exposições curtas ou longas, respectivamente, ocasionando diferentes patologias (Borba et al., 2004).

Os efeitos patológicos causados pelo As inorgânico são complexos e ainda não totalmente conhecidos.

De acordo com Silva et al. (2010), a suscetibilidade individual às doenças relacionadas com a contaminação arsenical difere grandemente entre indivíduos, e essa diferença tem sido atribuída a variações interindividuais no metabolismo do As capazes de afetar a retenção e a distribuição de seus metabólitos tóxicos. Ainda, que as patologias associadas à contaminação arsenical variam desde lesões na pele até vários tipos de câncer, doenças cardiovasculares (hipertensão e aterosclerose), desordens neurológicas, distúrbios gastrointestinais, doenças renais e hepáticas, efeitos reprodutivos, etc.

Os sintomas da toxicidade aguda por arsênio podem se apresentar de forma diferente da toxicidade crônica, a depender da extensa metabolização após a ingestão. Na intoxicação aguda, os efeitos são, sobretudo, sobre o tubo digestivo (ação direta no caso de ingestão), secundariamente, sobre o fígado, rins e músculos cardíacos. Já na intoxicação crônica, atua principalmente sobre o tegumento e sobre os nervos periféricos (polineurite arsênicas) por sua afinidade com o sistema nervoso (Andrade & Rocha, 2018).

3.3 Formas de Mitigação de Áreas Contaminadas por As

Segundo Andrade e Rocha (2018), existe a necessidade de uma maior disseminação de técnicas para remoção do arsênio, sendo que algumas delas são de grande facilidade operacional, como o uso de microrganismos capazes de oxidar o elemento em condições de pH neutro, tais como as ferrobactérias, ou a assimilação de arsênio por algas, ou técnicas como adição de cal ou outros meios na água contaminada.

Dados os efeitos da exposição ao arsênico, as tecnologias de remediação são de fundamental importância. Alguns estudos utilizaram diferentes técnicas visando a remediação de solos contaminados por arsênio. Coelho e Teixeira (2020), empregaram a técnica de lavagem de solos (soil washing), utilizando extratos com biossurfactantes (BS), visando promover a mobilização do As em solo de mina de ouro abandonada na região do Quadrilátero Ferrífero. Na pesquisa, foram identificadas culturas mistas de bactérias, MPBR e MPCB, capazes de produzir extratos de BS com potencial para a biorremediação de solos contaminados com As. Os extratos de BS removeram o As facilmente solúvel e trocável, ligado a carbonatos e fracamente e fortemente adsorvido

Já Silva et al. (2010), avaliaram o a dessorção do arsênio de solo (com a técnica de remediação ex situ) de área próxima à disposição de resíduo perigoso, com fosfato e o tratamento do efluente gerado pela dessorção. O fracionamento mostrou que a diminuição do pH aumentou a retenção do arsênio. O diidrogenofosfato de potássio $0,4 \text{ mol L}^{-1}$ mostrou-se eficiente na remoção por dessorção do arsênio presente no solo contaminado, conseguindo dessorver cerca de 70% deste elemento em pH 6,2. O cloreto férrico foi mais eficiente que o sulfato de alumínio para a remoção por coagulação, do arsênio do efluente da lavagem do solo.

4. Conclusão

A contaminação das águas subterrâneas e superficiais, solos e sedimentos por As no Estado de Minas Gerais é oriunda, principalmente das atividades de mineração, sendo reportado contaminação natural em Ouro Preto. O conhecimento dessas áreas é substancial para gerenciamento desses locais pelo órgão ambiental competente.

Os riscos associados ao contato com o elemento arsênio, seja através da ingestão de águas contaminadas, da inalação de partículas ou ingestão de alimentos contaminados sobre a saúde e o meio ambiente são motivos para controle das áreas contaminadas, buscando sua reabilitação ou recuperação, garantindo a segurança da área e contanto humano.

Os estudos da contaminação por arsênio têm expandido seu escopo, buscando relacionar a exposição ao As e os possíveis efeitos sobre a saúde, através de estudos epidemiológicos, abordando uma metodologia interdisciplinar.

A confirmação de um local contaminado pelo órgão ambiental é fundamental para iniciar as ações conjuntas com o setor privado, principal responsável pela contaminação por arsênio para garantir a estabilidade da área e buscar sua recuperação.

A especialização dos dados de contaminação, assim como a centralização dos dados de contaminação são importantes para maior transparência e acesso à informação, devido a seriedade deste poluente.

Dada a importância do tema e a relevância dos problemas de saúde pública oriundos das contaminações dos solos e das águas subterrâneas por As, sugere-se novos estudos e pesquisas sistematizadas no território mineiro visando o refinamento dos procedimentos e metodologias na identificação e mapeamentos das fontes poluidoras.

Referências

- Andrade, D.; & Rocha, M. (2018). A toxicidade do arsênio e a sua natureza. *Revista Acadêmica Oswaldo Cruz*, 3,10.
- Bidone, E. D. Castilhos, Z.; Cesar, R.; Santos, M. C.; Sierpe, R. & Ferreira, M. (2016). Hydrogeochemistry of arsenic pollution in watersheds influenced by gold mining activities in Paracatu (Minas Gerais State, Brazil). *Environmental Science and Pollution Research*, 23, 9, 8546–8555.

Bidone, E. D.; Castilhos, Z. C.; Maddock, J. E.; Santos, M. C. B.; Silva, R. S. V.; Cesar, R. G. & Bertolino, L. C. (2014). Arsenic in soils and sediments from Paracatu, MG, Brazil. In: International Congress on Arsenic in the Environment, 5, Buenos Aires, Argentina. 1, 113-115.

Borba, R. P.; Figueiredo, B. R. & Cavalcante, J. A. (2004). Arsênio na água subterrânea em Ouro Preto e Mariana, Quadrilátero Ferrífero (MG). Revista Escola de Minas, 57, 1, 45-51.

BRASIL. (2020). Anuário mineral brasileiro: principais substâncias metálicas. Agência Nacional de Mineração - ANM.

Bundschuh, J.; Armienta, M. A.; Simfors, N. M.; Alam, M. A.; López, D. L.; Quezada, V. D.; Dietrich, S.; Schneider, J.; Tapia, J.; Sracek, O.; Castillo, E.; Parra, L. M. M.; Espinoza, M. A.; Guimarães, L. R.; Sosa, N. N.; Niazi, N. K.; Tomaszewska, B.; Allende, K. L.; Bieger, K.; Alonso, D. L.; Brandão, P. F. B.; Bhattacharya, P., Litter, M. I. & Ahmad, A. (2020). Arsenic in Latin America: New findings on source, mobilization and mobility in human environments in 20 countries based on decadal research 2010-2020, Critical Reviews. Environmental Science and Technology. <https://doi.org/10.1080/10643389.2020.1770527>.

Caires, S. M. (2009). Determinação dos teores naturais de metais pesados em solos do Estado de Minas Gerais como subsídio ao estabelecimento de Valores de Referência de Qualidade, 304p (Tese de Doutorado) UFV, Viçosa.

Campos, M. L. (2013). Teor de arsênio e adsorção competitiva arsênio/fosfato e arsênio/sulfato em solos de Minas Gerais, Brasil. Ciencia Rural, 43, 6, 985-991.

Castilhos, Z. C.; De Capitani, E.M.; Jesus, I.M.; Bidone, E.D.; Zamboni, W.M.; Silva, L.I.D.; Carneiro, M.C.; Ferreira, A.P.; Lima, M. O. & Faial, K. C. F. (2015). Avaliação da contaminação ambiental por arsênio em Paracatu - MG: uma abordagem interdisciplinar. XXVI Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa Poços de Caldas-MG.

Castilhos, Z. C.; De Capitani, E. M.; Jesus, I. M.; Bidone, E. D.; Mello, W. Z.; Lima, M. O.; Faial, K. R. F.; Mataveli, L. R. V.; Arauz, L. J.; Silva, L. I. D.; Ferreira, A. P.; Távora, R. S. & Mertens, F. (2020). Avaliação Da Contaminação Ambiental Por Arsênio E Estudo Epidemiológico Da Exposição Humana Em Paracatu-MG - Brasil. Fronteiras: Journal of Social, Technological and Environmental Science, 9, 1, 186-211. <https://doi.org/https://doi.org/10.21664/2238-8869.2020v9i1.p186-211>.

CETESB (2005). Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. Decisão de diretoria Nº 195-2005. São Paulo, 4p.

Christóforo, C. & Leão, M. M. D. (2009). Caracterização temporal do arsênio nos cursos d'água da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, MG, Brasil, ao longo de uma década (1998 - 2007). Revista Ambiente e Água, 4, 3, 54-66.

Coelho, R. S. & Teixeira, M. C. (2020). Biorremediação de solos contaminados com arsênio por meio de lavagem de solo usando biossurfactantes. Engenharia Sanitária e Ambiental, 25, 4, 543-553. <https://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522020197400>

CONAMA. (2019). Resolução No 420, De 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre os critérios e valores orientadores de qualidade do solo e estabelece as diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>.

COPAM. (2010). Conselho Estadual de Política Ambiental. COPAM. Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH-MG nº02, 08 de setembro de 2010. Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas, Minas Gerais.

Farias, J. S.; Milani, M. R.; Niencheski, L. F. H. & Paiva, M. L. (2012). Especificação química de arsênio inorgânico no estuário da Laguna dos Patos (RS, Brasil). Quimica Nova, 35, 7.

Ferreira, M. M.; Sá, A. R. C.; Sambasiva, R. P.; Castilhos, Z. C. & Calmano, W. (2016). Teores de Arsênio em sedimentos superficiais do córrego Rico, P. Centro de Tecnologia Mineral. <<http://www.cetem.gov.br/images/programas/paracatu/Teores-de-arsenio-em-sedimentos-superficiais-do-Corrego-Rico-Paracatu-MG.pdf>>.

Figueiredo, B. R.; Borba, R. P. & Angélica, R. S. (2005). Arsênio no Brasil e exposição humana. Geologia Médica: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente, 64-70.

Gonçalves, J.A.C. (2010). Hidrogeoquímica do Arsênio e de Outros Constituintes Inorgânicos Presentes nas Águas Subterrâneas da Cidade de Ouro Preto-MG. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 15, 4, 89-104.

Gonçalves, J. A. C. (2011). A contaminação natural por arsênio em solos e águas subterrâneas na área urbana de Ouro Preto (MG). Tese de Doutorado, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Gonçalves, J. A. C. (2007). Arsenic in the groundwater of Ouro Preto (Brazil): Its temporal behavior as influenced by the hydric regime and hydrogeology. Environmental Geology, 53, 4, 785-793.

Lobato, L. M. & Costa, M. A. (2018). Recursos minerais de Minas Gerais: Ouro. Recursos minerais de Minas Gerais on line: síntese do conhecimento sobre as riquezas minerais, histórica geológica, e meio ambiente e mineração de Minas Gerais. p 50-73.

Matschullat, J.; Borba, R. P.; Deschamps, E.; Figueiredo, B. F.; Gabrio, T. & Schwenk, M. (2000). Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil. Applied Geochemistry, 15: 181-190.

MINAS GERAIS. (2008). Decreto no 44.819 de 12 de maio de 2008. Contém o Estatuto da Fundação Estadual do Meio Ambiente - FEAM. Minas Gerais.

Pimentel, H. S. (2001). Caracterização Geoquímica da Contaminação das Águas na Serra de Ouro Preto, Minas Gerais. Dissertação de Mestrado. Departamento de Geologia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto.

Roeser, H. M. P. & Roeser, P. A. (2013). O Quadrilátero Ferrífero - Mg, Brasil: Aspectos Sobre Sua História, Seus Recursos Minerais E Problemas Ambientais Relacionados. Geonomos, 18, 1, 33-37.

Santos, M. J. & Dani, S. U. (2016). Contaminação ambiental e do compartimento humano pelo arsênio liberado pela mineração de ouro em Paracatu, MG. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia e Ambiental.

Silva, O. P. (1995). A mineração em Minas Gerais: passado, presente e futuro. *Geonomos*, 3, 1, 77–86.

Silva, W. G. P.; Sobrinho, N. M. B. A. & Mazur, N. (2010). Uso de fosfato para remoção de arsênio de solo contaminado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, 14, 1, 101-106. <https://dx.doi.org/10.1590/S1415-43662010000100014>

Teixeira, M. C. (2020). Arsenic contamination assessment in Brazil – Past, present and future concerns: A historical and critical review. *Science of the Total Environment*, 730, 138-217.