

AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA APLICADA À MINERAÇÃO

F. DE M. VASCONCELOS¹, M. P. QUEIROZ², N. A. F. S. COUTINHO³, H. C. FERREIRA⁴Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos Ltda^{1,2,3,4}ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7029-2817>¹flavio.vasconcelos@hidrogeoeng.com.br¹

Submetido 18/08/2021 - Aceito 21/10/2021

DOI: 10.15628/holos.2022.12915

RESUMO

A avaliação de risco à saúde humana foi realizada na região de Pilar-GO seguindo a metodologia da U.S. EPA e da CETESB. Foram realizadas análises químicas de solo, água superficial e subterrânea, sedimento e de peixes por laboratórios acreditados pela ISO/IEC 17.025. As substâncias químicas de interesse identificadas foram: As, Cr, Ni, Pb, Al e Cd. Porém elas foram classificadas como sendo de origem natural, confirmado por estudo de

background geoquímico ambiental realizado na área. Os moradores da região e os trabalhadores da mineradora foram entrevistados, de modo que a caracterização do risco permitiu concluir que somente o elemento cromo, é potencialmente responsável por causar risco carcinogênico à saúde aos moradores adultos da área rural, pelo manuseio do solo e pela ingestão de vegetais, porém sem influência do empreendimento.

PALAVRAS-CHAVE: avaliação de risco, saúde humana, mineração, toxicidade

HUMAN HEALTH RISK ASSESSMENT APPLIED TO MINING

ABSTRACT

The human health risk assessment was carried out in the Pilar-GO region, following the methodology of the U.S. EPA and by CETESB. Chemical analyzes of soil, surface and groundwater water, sediment and fish were carried out by laboratories accredited by ISO / IEC 17,025. The chemical substances of interest identified were: As, Cr, Ni, Pb, Al and Cd. However, they were classified as being of natural origin, confirmed by an environmental geochemical background study carried out in the area.

The habitants of this region and the workers of the mining company were interviewed, so that the risk characterization allowed someone to conclude that only the chemical element chromium is potentially responsible for causing carcinogenic health risk to adult residents of the rural area, for handling the soil and for ingestion of vegetables, but without the influence of the enterprise.

KEYWORDS: human health, risk assessment, mining, toxicity

1 INTRODUÇÃO

De acordo com o relatório da Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM) de Inventário de Áreas Contaminadas de Minas Gerais, em 2020 havia um total de 678 registros de áreas contaminadas e reabilitadas, das quais pode-se destacar que cerca de 70% têm como fonte postos de combustível e 28,1% foram contaminadas por metais, principalmente chumbo, arsênio, alumínio, níquel e outros (Fundação Estadual do Meio Ambiente [FEAM], 2008). Atividades minerárias podem ser fontes potenciais de contaminação de metais, principalmente devido à Drenagem Ácida de Mina (DAM), ou Drenagem Ácida de Rocha (DAR) (International Network for Acid Prevention [INAP], 2004).

Houve um grande crescimento da preocupação ambiental no mundo todo a partir da década de 70, e legislações foram desenvolvidas com o objetivo de minimizar os impactos causados pela atividade antrópica (WEISS, 2008). Esses impactos podem oferecer risco tanto a saúde humana quanto a saúde de seres ecológicos. No início deste milênio, a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB) investiu muito em estruturar um arcabouço legal para a gestão de áreas contaminadas.

A legislação brasileira na última década avançou significativamente no sentido de equacionar o desenvolvimento da gestão de áreas contaminadas através de um procedimento lógico e racional. A Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) nº 420, de 28 de dezembro de 2009 está alinhada com as normas internacionais que também tratam dessa (BRASIL, 2009). As etapas dos processos da gestão de passivos ambientais vão desde identificação de áreas suspeitas até a intervenção, sendo a avaliação de risco uma parte fundamental (CETESB, 2001). Para que exista risco de ocorrências de efeitos adversos, alguns questionamentos importantes deverão ser respondidos: 1) Quem são os receptores? 2) Quais são os contaminantes? e 3) Como ocorre a exposição?

Neste contexto, o presente trabalho objetivou realizar um estudo de avaliação de risco à saúde humana no empreendimento de mineração de ouro da Equinox Gold em Pilar de Goiás, localizado ao norte do estado. Utilizou-se como base de dados, os resultados do programa de monitoramento ambiental disponibilizados pela Equinox Gold, estudo geração de drenagem ácida e de background geoquímico realizados pela Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos [HIDROGEO] (2020a; 2020b).

2 METODOLOGIA

A unidade da Equinox Gold, deste estudo, localiza-se no município de Pilar de Goiás, no quadrante NW do Estado de Goiás. O município de Pilar de Goiás está localizado a 250km da capital Goiânia, situada entre as coordenadas 14°47'05" S, 49°34'44" W, e o seu acesso se faz pela rodovia estadual GO-154. A Avaliação de Risco à Saúde Humana foi realizada conforme ao estabelecido no guia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos e da CETESB (*United States Environmental Protection Agency* [U.S. EPA], 1898; CETESB, 2001). As etapas do estudo estão

descritas a seguir consistem na formulação do problema, análise da exposição, análise dos efeitos e caracterização do risco.

2.1 Formulação do problema

Com o objetivo de se realizar a formulação do problema foi concebido um modelo conceitual da área de interesse em mapa que representaria as fontes potenciais, o meio físico onde estas estão inseridas, as vias de ingresso de possíveis contaminantes e os receptores existentes na área. A partir da elaboração deste modelo conceitual foi então realizada a formulação do problema. Durante a formulação do problema os seguintes aspectos do estudo foram caracterizados:

- Identificação da contaminação;
- Usos da área (rural, urbana, industrial, entre outros);
- Seleção dos receptores (crianças, adultos, trabalhadores, entre outros);
- Seleção das Substâncias Químicas de Interesse (SQI);
- Seleção das vias de exposição;
- Elaboração do modelo conceitual.

Inicialmente foram identificadas as fontes de contaminação e SQI através dos resultados dos trabalhos de avaliação potencial de drenagem ácida de mina e lixiviação de metais (HIDROGEO, 2020a) e *background* geoquímico (HIDROGEO, 2020b), nos quais os procedimentos de coleta, preservação e análise das amostras de pilha de estéril, barragem de rejeitos, solo, água superficial, água subterrânea, sedimento, flora terrestre e fauna aquática seguiram as normas pertinentes para cada matriz.

Os dados de monitoramento fornecidos foram inseridos na plataforma de monitoramento e gerenciamento ambiental AQUATEC, por meio da qual foi possível: visualizar a localização dos pontos de monitoramento, juntamente com a adequação às normas no próprio mapa, realizar análise crítica dos resultados e gerar gráficos de série histórica e análise estatística. A seleção dos receptores, identificação de uso da área e das vias de exposição foram realizadas por meio de reconhecimento do local e aplicação de questionários para:

- Superficiais área rural da Área de Influência Direta (AID);
- Residentes da área urbana da AID;
- Trabalhadores da área industrial.

As entrevistas foram realizadas pelos técnicos da Hidrogeo e da Equinox Gold nos dias 16, 19 e 20 de maio de 2020. O número de casas visitadas, número de moradores abrangidos pelo estudo e informações solicitadas estão dispostas na Tabela 1.

Tabela 1: Informações gerais dos questionários aplicados para análise de exposição.

Entrevistados	Nº de questionários	Nº de adultos	Nº de crianças	Informações
Residentes em área rural	27	67	16	Tempo e frequência de exposição ao solo, água subterrânea, água superficial, sedimento, taxa e frequência de alimentação de culturas caseiras de hortaliças, raízes, carne e frutas
Residentes em área urbana	9	22	7	Tempo e frequência de exposição ao solo, água subterrânea, água superficial, sedimento, taxa e frequência de alimentação de culturas caseiras de hortaliças, raízes, carne e frutas
Trabalhadores industriais	71	71	-	Tempo e frequência de exposição ao solo e inalação de partículas

Por fim, com as informações citadas acima compiladas, foi consolidado o modelo conceitual inicialmente concebido. De forma, que foi possível quantificar a existência ou não de risco à saúde humanos dos receptores em questão.

2.2 Análise da exposição

Uma vez identificadas as substâncias químicas de interesse (SQI's), a partir da avaliação dos resultados do banco de dados de monitoramento ambiental e de estudos ambientais com as normas de qualidade (BRASIL, 2009; HIDROGEO, 2020a; BRASIL, 2005; ANVISA, 2013; BRASIL, 2008; BRASIL, 2012) foi realizada a análise da exposição dos receptores.

Foram realizados cálculos de ingresso de potenciais contaminantes por meio da ingestão e contato dérmico com a água, ingestão e contato dérmico com o solo, e inalação de partículas presentes no ar. As equações utilizadas para cálculo da dose de ingresso específicas estão apresentadas no Manual de Gerenciamento de Águas Contaminadas da CETESB (CETESB, 2001). As concentrações de cada SQI obtidas a partir de análise de amostras de solo, sedimento, água superficial, água subterrânea, flora terrestres e fauna aquática também foram utilizadas para o cálculo da dose de ingresso.

2.3 Análise dos efeitos

As doses de referência e fatores de carcinogenicidade de cada SQI foram compiladas a partir das seguintes fontes de dados:

- Sistema Integrado de Informações de Risco (U.S. EPA, 1987);
- Tabelas de Resumo de Avaliação de Efeitos à Saúde (U.S. EPA (1985);
- Agência para Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças (Agency for Toxic Substances and Disease Registry [ASTDR], 2020); e

- Escritório de Critérios Ambientais e Avaliações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 1993).

2.4 Caracterização do risco

Foram utilizados os resultados das etapas anteriores para a caracterização do risco à saúde humana em duas categorias de compostos químicos: 1- compostos químicos carcinogênicos e 2- compostos químicos não carcinogênicos.

No caso de risco carcinogênico, na Equação 4 a seguir está descrito como é realizado o cálculo do risco para cada SQI pela planilha. Para a legislação brasileira, assume-se um risco aceitável como abaixo de 1×10^{-5} por habitante, ou seja, 1 pessoa a cada 100.000 habitantes.

$$\text{Risco} = I_n \times \text{SF} \quad (4)$$

Onde, I_n é a dose de ingresso para o cenário de exposição “n” e SF é o fator de carcinogenicidade.

Para risco de ocorrência de efeitos não carcinogênicos, calcula-se o quociente de perigo (HQ), descrito na Equação 5 a seguir. O valor deve ser menor que 1 para que seja um risco aceitável.

$$\text{HQ} = \frac{\text{dose diárias estimada } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg.dia}}\right)}{\text{dose de referência } \left(\frac{\text{mg}}{\text{kg.dia}}\right)} \quad (5)$$

Os cálculos de risco carcinogênico e HQ para solo, água subterrânea e ingestão de alimentos foram realizados por meio das planilhas da CETESB para avaliação de risco à saúde humana. Já para água superficial, as doses de ingressos calculadas pelas Planilhas foram aplicadas nas equações apresentadas acima. Os resultados foram avaliados criticamente com relação às incertezas de análise, cenários de exposição, peculiaridade da área de estudo, entre outros.

3 RESULTADOS E DISCUSSÕES

3.1 Formulação do problema

As principais fontes de contaminação foram identificadas como sendo as pilhas de estéril, o rejeitoduto, a barragem de rejeitos e a própria geologia local. Neste último caso estaria associado a concentrações naturalmente de metais encontradas neste ambiente. As pilhas de estéril e a barragem de rejeito são fontes potenciais que expõem com maior probabilidade os trabalhadores do empreendimento em questão.

As substâncias químicas de interesse identificadas foram: arsênio, cromo, níquel, chumbo, alumínio e o cádmio. Estas foram identificadas considerando as normas ambientais nacionais (BRASIL, 2009; HIDROGEO, 2020a; BRASIL, 2005; ANVISA, 2013; BRASIL, 2008; BRASIL, 2012). Os resultados da análise do banco de dados estão apresentados na etapa a seguir de exposição dos receptores.

Tendo como base o reconhecimento das áreas de uso e as entrevistas realizadas com os moradores da AID do empreendimento e com os trabalhadores da Equinox Gold, as vias de exposição consideradas para essa avaliação foram: 1) contato dérmico de trabalhadores da Equinox Gold com esse material geológico; 2) inalação de pó de trabalhadores da Equinox Gold durante trabalho que haja levantamento de poeira; 3) contato dérmico de moradores com o solo de suas casas; 4) inalação de pó de moradores durante atividades com solo; 5) contato dérmico com a drenagem que recebe aporte de efluentes provenientes dessas fontes potenciais de contaminação; 6) ingestão de água dessas drenagens; 7) ingestão de culturas caseiras de foliáceas/estruturais e tuberosas; 8) contato dérmico com água subterrânea influenciada pela lixiviação de metais e; 9) ingestão da água desses poços.

Considerando essas informações obtidas na etapa de formulação do problema, os modelos conceituais para a pilha dos Atalas, pilha da Pista, pilha da Grota e barragem de rejeitos estão apresentados na Figura 1. Além disso, na Figura 2 está apresentado o modelo conceitual na forma de fluxograma para as pilhas de estéril, que foram as fontes com maior potencial de exposição das SQIs aos receptores.

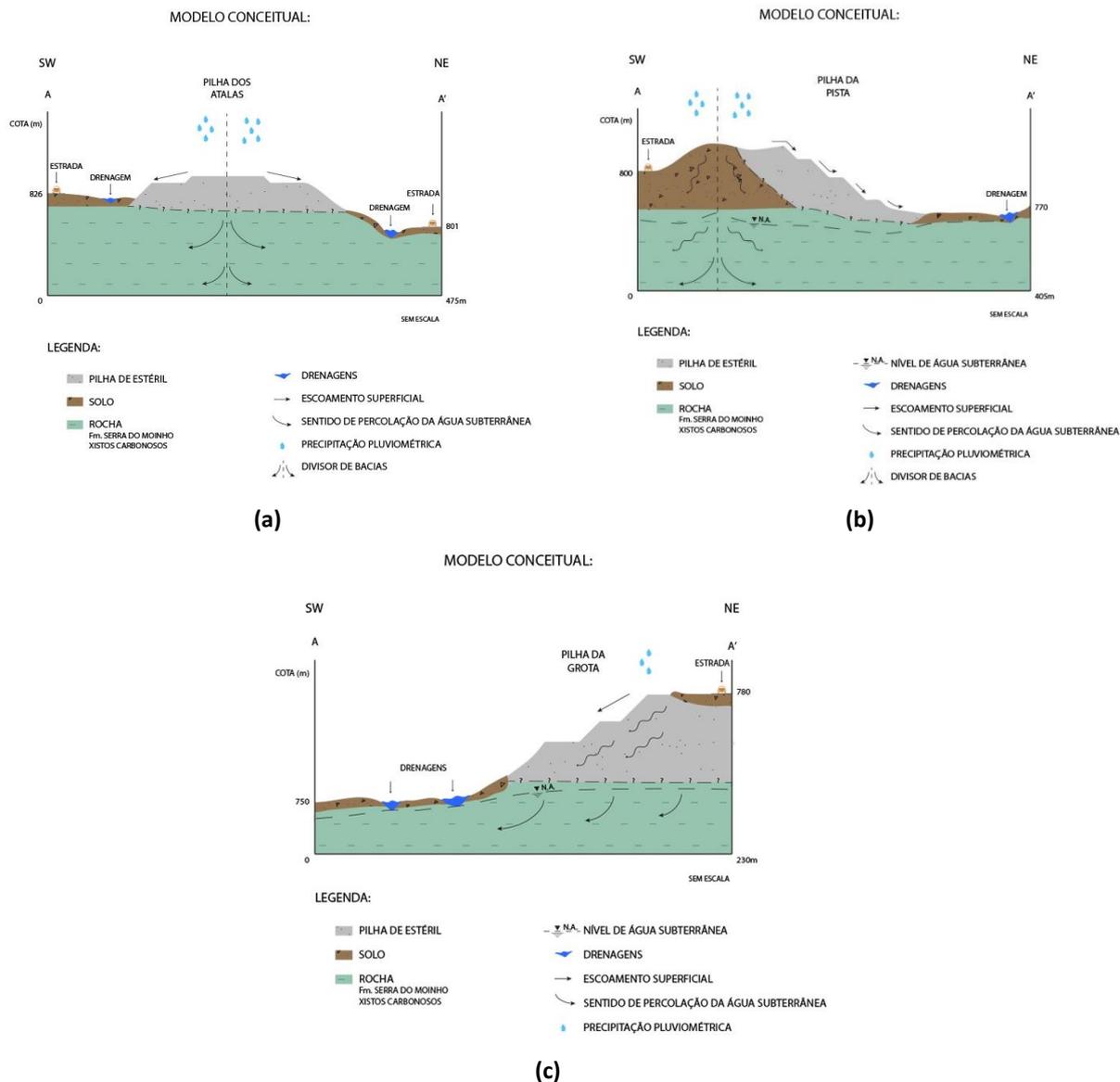


Figura 1: Modelo conceitual da pilha dos Atalas (a), da Pista (b) e da Grota (c) em perfil SW - NE.

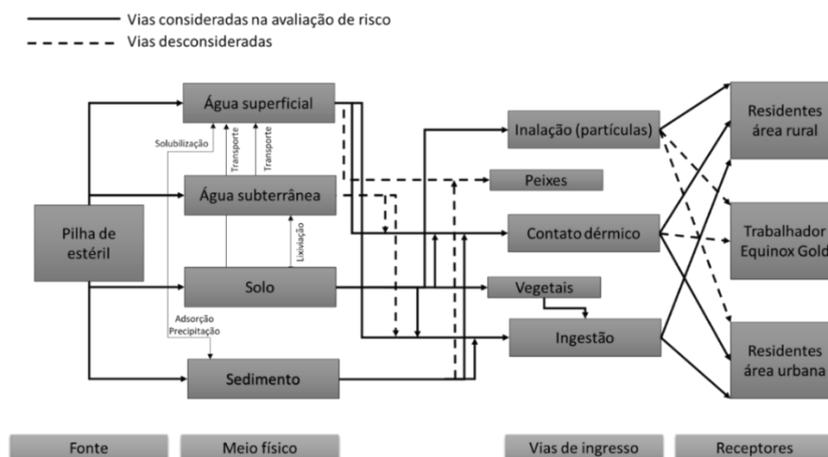


Figura 2: Modelo conceitual em fluxograma de pilhas de estéril.

A pilha dos Atalas fica em um divisor de duas sub-bacias do córrego Gaspar que por sua vez desagua no rio Vermelho em ponto a jusante da entrada da área industrial da Equinox Gold e muito a jusante da cidade de Pilar de Goiás GO. Portanto essa pilha não tem nenhum potencial de contaminação de residentes dessa cidade. Os receptores que estão expostos a esta são trabalhadores e superficiários residentes próximos ao córrego Gaspar.

Já a pilha da Pista, apresenta escoamento que deságua diretamente no rio Vermelho na altura da entrada da planta industrial. Ainda sim essa drenagem está a jusante da cidade de Pilar de Goiás GO e, portanto, nenhum residente da cidade está exposto a alguma contaminação dessa pilha.

A mesma dinâmica de escoamento superficial se aplica à pilha da Grotta. O escoamento superficial é potencialmente responsável por carrear as SQIs para a drenagem que desagua no córrego Gaspar e, portanto, os receptores da pilha dos Atalas são os mesmos da pilha da Grotta.

No caso da barragem de rejeito, localiza-se a cerca de 2,0 Km a sudeste da planta industrial da Equinox Gold. Os receptores que, porventura, estariam expostos a esta potencial fonte de contaminação seriam os trabalhadores da Equinox Gold que frequentam esse local. Como a barragem é impermeabilizada não se verifica valores elevados em poços subterrâneos e nem na água superficial. Dessa forma, os residentes rurais não estão submetidos a nenhum risco desta fonte potencial de contaminação.

Alguns caminhos de exposição apresentados no fluxograma foram desconsiderados com base na análise dos resultados obtidos ao longo do estudo, como a baixa concentração dos parâmetros analisados nas amostras de peixe, o uso de água subterrânea no dia a dia dos entrevistados e o uso de EPIs por parte dos trabalhadores da Equinox Gold.

3.2 Análise da exposição

A seguir, apresenta-se a análise de exposição de cada tipo de receptor considerado nesse estudo, em relação às fontes potenciais de contaminação já apresentadas. Tendo em vista que o

background natural do solo da área rural é rico em cromo e arsênio, os receptores foram divididos em: trabalhadores da Equinox Gold, residentes da cidade de Pilar de Goiás/GO, superficiários da área rural à montante do empreendimento, superficiários da área rural à jusante do empreendimento e superficiários da área rural à jusante da barragem de rejeitos.

Para cada uma dessas categorias foi considerado um período de exposição ao contaminante considerando a sua rotina de vida, se aplicável. Essas informações foram obtidas a partir das entrevistas realizadas em campo.

3.2.1 *Trabalhadores da Equinox Gold*

Os possíveis meios de contato dos trabalhadores da Equinox Gold com as fontes de contaminação se dão através de trabalhos nas pilhas de estéril, barragem de rejeitos e o próprio solo nas operações da planta e da pilha, porém, a exposição dos trabalhadores ao risco é baixa devido ao intenso trabalho da empresa em reforçar o uso de EPI's adequados à cada atividade, como foi confirmado pelos questionários. São realizados periodicamente exames de saúde ocupacional nos trabalhadores, os quais possuem uma série histórica que podem corroborar a baixa exposição ao risco dos trabalhadores.

3.2.2 *Residentes da cidade de Pilar de Goiás*

Para os moradores de área urbana, a única fonte de contaminação seria devido a geologia local que deriva um solo rico em algumas SQIs e em áreas antigas de garimpo, tal como a Cachoeira do Ogó, que também estão sob a influência da geologia local.

Os questionários realizados com os moradores de Pilar de Goiás permitiram constatar que o ingresso das SQIs pode ocorrer através do contato direto com água superficial e sedimento, além da ingestão de peixes. Os valores das médias dos tempos (horas/dia) e frequências (dias/ano) de exposição aos meios físicos e as médias de taxa (kg/dia) e frequência (dias/ano) de alimentação foram obtidos pelo questionário aplicado à população. Também foram utilizados os dados de taxa de alimentação presentes na planilha da CETESB obtidos de estudos do IBGE.

Algumas SQIs estão apresentadas a seguir e foram utilizados para a quantificação do risco associado a estes.

Água superficial: Os 4 pontos de contato com água superficial são: Cachoeira do Ogó, Rio das Pedras, 3 quedas e Borrachinha. Para fins de quantificação do risco, utilizou-se a mediana ($0,035 \text{ mg L}^{-1}$) da série histórica de arsênio dissolvido para o ponto P3 Rio Vermelho, que se localiza nas proximidades da Cachoeira do Ogó, apresentada no Parecer Técnico (HIDROGEO, 2020b). Este ponto apresentou série histórica de maior concentração e caracteriza-se por ser uma área de antigo garimpo localizada a montante da mineração, portanto sem nexo causal com a atividade da mineradora. Foi utilizada o parâmetro dissolvido para que se tenha uma estimativa do risco mais próxima da realidade em termos de biodisponibilidade e efeito tóxico, tendo em vista que a fração dissolvida representa com mais acuracidade a concentração da substância factível de se encontrar biodisponível no meio ambiente em questão.

Sedimento: A exposição às SQI no sedimento também ocorre durante a recreação em água superficial. Para utilização no cálculo da dose de ingresso foram selecionados dois pontos nas proximidades da Cachoeira do Ogó e os resultados de análise estão apresentados na Tabela 2. Em negrito estão marcados os resultados acima dos valores máximos permitidos (VMP) pela norma CONAMA 454/2012 para sedimentos, nível II (BRASIL, 2012). Essas concentrações estão mais associadas ao background geoquímico ambiental que pode ser considerado elevado nesta região em que opera a Equinox Gold Pilar, uma vez que esses dois pontos estão localizados à montante da mineradora e próximos da cachoeira do Ogó (U.S. EPA, 1989).

Tabela 1: Resultados de análises química de sedimento dos pontos próximos à área urbana (em mg kg⁻¹) e os valores máximos permitidos (VMP) segundo a norma CONAMA 454/2012 (BRASIL, 2012).

Ponto	As	Pb	Cu	Cr	Cd	Hg	Ni	Zn
VMP	17	91,30	197,00	90,00	3,50	0,486	35,90	315,00
SDM02	170	12,76	40,88	149,44	4,40	<0,5	75,67	89,22
SDM03	370	16,41	43,23	156,44	1,16	<0,5	112,74	73,20

Para o cálculo foi utilizado o valor de 50% da média dos valores dos dois pontos para cádmio e níquel, devido ao percentual biodisponível para esses metais e de 20% e 80% da média de cromo para Cr(VI) e Cr(III), respectivamente em relação ao cromo total. Para arsênio utilizou-se 10% do valor da média de arsênio. Mesmo considerando esse fracionamento nos metais a avaliação ainda pode ser considerada conservadora pois a literatura geoquímica apresenta valores ainda mais baixos de biodisponibilidade e de bioacessibilidade (SHAHID *et al.*, 2017; CIMINELLI *et al.*, 2018). Também foram utilizados valores de taxa de ingestão de sedimento durante a recreação para adultos e crianças iguais a 50 e 25 mg dia⁻¹, respectivamente.

Peixes: Os resultados de análise de filé de *Astyanax spp* (Lambari) tiveram resultados acima do permitido pela Resolução - RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013 (ANVISA, 2013) apenas para chumbo, marcados em negrito. Vale ressaltar, porém, que os intervalos de confiança para esses resultados foram altos, o que confere incerteza à análise. As médias e intervalos de confiança (IC) dos resultados para filé a jusante do empreendimento (FJU), filé na área do empreendimento (FAE) e filé a montante do empreendimento (FMO) estão apresentados na Tabela 3. Para o cálculo da dose de ingresso foi utilizada a média desses valores.

Tabela 2: Médias e intervalo de confiança dos resultados de análise química de filé do peixe de água doce *Astyanax spp* (em mg kg⁻¹) e os valores máximos permitidos (VMP) segundo a RDC nº 42 (ANVISA, 2013).

Parâmetro	As	Pb	Cu	Cr	Cd	Ca	Fe	Mg	Mn	Ni	Zn	
VMP	1,0	0,30	-	-	0,05	-	-	-	-	-	-	
FJU	Média	0,4	0,63	3,76	1,0	0,2	619,44	12,81	192,64	1,05	1,0	13,78
	IC	6,83E-17	0,29	0,64	-	3,41E-17	583,12	3,81	18,69	0,20	-	5,48
FAE	Média	0,4	0,61	7,59	1,0	0,2	465,52	15,22	223,52	1,0	1,0	8,56
	IC	6,83E-17	0,29	3,06	-	3,41E-17	187,62	6,96	23,86	-	-	3,78
FMO	Média	0,4	0,60	5,70	1,0	0,2	483,89	14,21	192,55	1,0	1,0	7,87
	IC	6,83E-17	0,33	3,59	-	3,41E-17	642,37	4,64	34,90	-	-	4,87

Vale ressaltar que todos os resultados de cádmio estiveram abaixo do limite de quantificação ($0,2 \text{ mg kg}^{-1}$), o qual é superior ao valor máximo permitido pela resolução ($0,05 \text{ mg kg}^{-1}$).

3.2.3 Superficiais da área rural à montante da Equinox Gold

Os questionários realizados com os residentes da área rural à montante permitiram constatar que o ingresso das SQIs pode ocorrer, potencialmente através do solo. Essa avaliação é localizada e o risco neste caso está associado ao background natural do solo da região à montante da mineradora que é mais rico em cromo total (HIDROGEO, 2020a).

Os valores das médias dos tempos (horas/dia) e frequências (dias/ano) de exposição aos meios físicos e as médias de taxa (kg/dia) e frequência (dias/ano) de alimentação, também foram obtidos pelo questionário aplicado aos receptores em questão.

Solo: As principais formas de contato dos residentes da área rural com o solo são por meio de recreação no terreiro (crianças), jardinagem, agricultura, capina e cuidados com hortas e pomares (adultos).

Os resultados de análise química de solo dos pontos localizados à montante da Equinox Gold estão apresentados na Tabela 4. Em negrito estão marcados resultados acima do Valor de Investigação (VI) estabelecido pela norma CONAMA 420/2009 para área residencial (BRASIL, 2011).

Tabela 4: Resultados de análises química de solo dos pontos da área rural (em mg kg^{-1}) e os valores de investigação (VI) segundo a norma CONAMA 420/2011 (BRASIL, 2011).

Ponto	VI	P1	P3	P9	P27.1	P27.2
pH em CaCl_2	-	5,09	-	4,13	4,21	-
Al	-	556,46	437,78	560,22	273,96	243,82
Sb	10	<1,0	<1,0	<1,0	<1,0	
As	55	5,5	82	36	6,38	4,51
B	-	30,55	26,24	39,76	10,33	9,18
Ba	500	60,7	121,25	50,81	16,49	14,7
Pb	300	12,36	27,27	13,53	15,8	14,65
Co	65	3,64	8,16	3,22	<1	<1
Cu	400	29,83	55,07	34,85	14,28	24,76
Cr	300	409,03	317,93	122,2	6,62	6,33
Cd	8	0,36	1,05	1,6	<0,5	<0,5
Ca	-	490	850	110	150	20
Fe	-	516,14	360,81	266,69	77,33	76,91
Mg	-	410	1.020	284	410	290
Mn	-	55,76	32,01	420,37	99,51	77,62
Hg	36	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5	<0,5
Mo	100	1,06	<1	<1	<1	<1
Ni	100	87,48	85,33	19,24	2,51	2,03

Ponto	VI	P1	P3	P9	P27.1	P27.2
Ag	50	<1	<1	<1	<1	<1
Se	-	<1	<1	<1	<1	<1
V	-	97,47	118,04	37	26,01	23,51
Zn	1.000	209,07	178,96	167,75	123,95	76,96

Para a utilização da fração de arsênio bioacessível, foi utilizado o percentual de 10% da mediana dos resultados de arsênio e 20% e 80% da mediana do cromo biodisponível (50% da concentração de cromo total) para Cr(VI) e Cr(III), respectivamente (SHAHID *et al.*, 2017; CIMINELLI *et al.*, 2018).

Água superficial: Os 4 pontos de coleta de amostras de água superficial são: Cachoeira do Ogó, Cachoeirinha, Rio Vermelho e Represas.

Com isso, utilizou-se a mediana (0,009 mg L⁻¹) das séries históricas de arsênio dissolvido para os pontos do Rio Vermelho, incluindo o ponto nas proximidades da Cachoeira do Ogó, que apresentaram valores acima do permitido para arsênio total. Esse valor foi aplicado para a avaliação de risco à saúde humana dos moradores na região da mina e pilha de estéril.

Na análise dos dados de séries históricas, o parâmetro manganês total também apresenta valores acima do permitido, porém os resultados de manganês dissolvido foram abaixo do limite de quantificação, logo, não foram utilizados.

Água subterrânea: Na Tabela 5 estão apresentados os valores máximos permitidos (VMP) da norma CONAMA 396/2008 (Água subterrânea - Consumo humano) (BRASIL, 2008) comparados com os valores de background geoquímico (AT) obtidos por meio de estudo realizado pela HIDROGEO (2020a).

Tabela 5: Valores de background geoquímico de água subterrânea, obtidos por estudo da HIDROGEO (2020a), comparados com os VMPs segundo a norma CONAMA 396/2008 (BRASIL, 2008).

Parâmetro	Unidade	VMP	AT – background geoquímico
Chumbo total	mg L ⁻¹	0,01	0,01
Cobalto total	mg L ⁻¹	-	<0,005
Ferro total	mg L ⁻¹	0,3	0,21
Manganês total	mg L ⁻¹	0,1	0,01
Níquel total	mg L ⁻¹	0,02	<0,005
Alumínio total	mg L ⁻¹	0,2	0,31

Para sedimentos e peixes, foram utilizados os valores de concentração apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

3.2.4 Superficiais da área rural à jusante da Equinox Gold

A análise dos questionários realizados com os residentes da área rural à jusante da Equinox Gold e os resultados de análise química permitiram constatar que o ingresso das SQIs se dá potencialmente através de água subterrânea e ingestão de peixes.

Os valores das médias dos tempos (horas/dia) e frequências (dias/ano) de exposição aos meios físicos e as médias de taxa (kg/dia) e frequência (dias/ano) de alimentação, foram obtidos pelo questionário.

Os resultados de análise de água subterrânea e peixes utilizados estão apresentados nas Tabelas 5 e 3, respectivamente.

3.3 Análise dos efeitos e caracterização dos riscos

As SQIs consideradas para a caracterização do risco foram arsênio, níquel, cádmio, chumbo, alumínio e cromo. Na Tabela 6 apresenta-se a análise dos efeitos com os valores de dose de ingresso de referência e fator de carcinogenicidade para cada SQI, obtidas a partir das referências citadas (U.S. EPA, 1987; U.S. EPA, 1985; ASTDR, 2020; U.S. EPA, 1993).

Tabela 6: Valores de dose de ingresso de referência e fator de carcinogenicidade de cada SQI, obtidas a partir das referências citadas (U.S. EPA, 1987; U.S. EPA, 1985; ASTDR, 2020; U.S. EPA, 1993).

SQI	Dose de referência (RfD; NC)			Fator de carcinogenicidade (SF)		
	Ingestão	Inalação	Dérmico	Ingestão	Inalação	Dérmico
	RfDo (mg/kg-dia)	RfDi (mg/kg-dia)	RfDd (mg/kg-dia)	Sfo (mg/kg-dia) ⁻¹	Sfi (mg/kg-dia) ⁻¹	Sfd (mg/kg-dia) ⁻¹
Arsênio inorgânico	3,00E-04	4,29E-06	3,00E-04	1,50E+00	1,51E+01	1,50E+00
Níquel (Sais solúveis)	2,00E-02	2,57E-05	8,00E-04	-	9,10E-01	-
Cádmio	1,40E-01	1,43E-05	1,40E-01	-	-	-
Chumbo	3,60E-03	-	3,60E-03	-	-	-
Alumínio	1,00E+00	1,43E-03	1,00E+00	-	-	-
Cromo (VI)	3,00E-03	2,86E-05	7,50E-05	5,00E-01	2,94E+02	2,00E+01
Cromo (III)	1,50E+00	-	-	-	-	-

C: carcinogênico; NC: não carcinogênico.

3.3.1 Residentes da cidade de Pilar de Goiás-GO

Os SQIs identificados para os residentes da cidade de Pilar de Goiás/GO foram arsênio, níquel, cádmio e cromo. Verifica-se que os valores de risco carcinogênico e quociente de perigo (HQ) potencialmente ocasionados pela exposição de adultos e crianças às SQI estão dentro dos valores aceitáveis de risco, atingindo valores de HQ para crianças de até 0,3 para arsênio inorgânico e risco carcinogênico de até aproximadamente 5,00E-06. Portanto, as concentrações observadas, não representam risco à saúde dos moradores da área urbana da cidade de Pilar de Goiás.

3.3.2 Superficiais da área rural à montante da Equinox Gold

Os receptores localizados a montante da mineradora, estão mais suscetíveis a concentração natural de metais e arsênio que ocorrem nesta região. Mesmo assim, foi

quantificado o risco associado a estes elementos. Para os residentes em área rural desta área foram identificadas as SQIs arsênio, níquel, cádmio, chumbo, alumínio e cromo. Com isso, os valores de risco carcinogênico e quociente de perigo potencialmente ocasionados pela exposição às SQI estão apresentados na Figura 4.

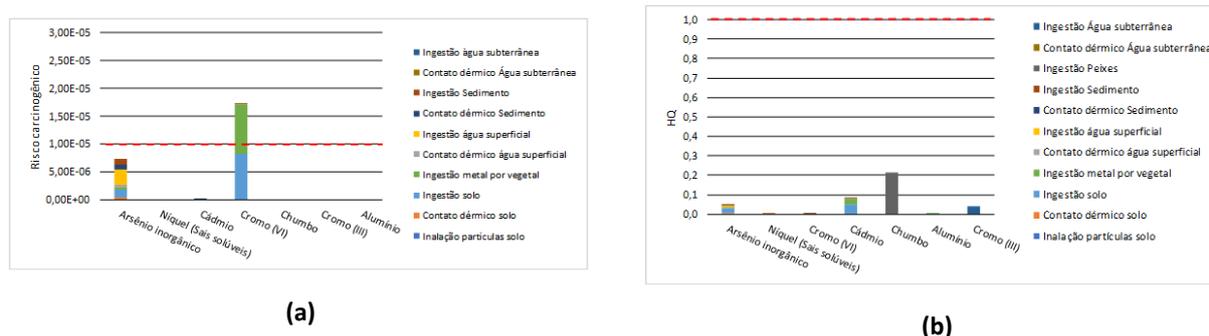


Figura 4: Gráficos de risco carcinogênico (a) para adultos e coeficiente de perigo (b) para crianças para residentes em área rural à montante do empreendimento.

Pode-se observar na Figura 8 que somente para o cromo ocorreu o risco carcinogênico, associado à ingestão de partículas de solo e vegetais cultivados no local. Todos os demais metais e metalóides não apresentaram risco significativo. O risco associado ao cromo presente no solo na região foi evidenciado no relatório de background geoquímico. O cromo está presente de forma natural na região, logo, não é influenciado pelas atividades da Equinox Gold (HIDROGEO, 2020a).

3.3.3 Superficiais da área rural à jusante da Equinox Gold

Para os residentes em área rural foram identificadas as SQIs alumínio na água subterrânea e chumbo para ingestão de *Astyanax spp* (Lambari). As duas SQIs geram um risco aceitável de até 0,24 ocasionado pelo chumbo e, portanto, não oferecem perigo à saúde humana de superficiais da área rural à jusante da Equinox Gold de Pilar.

3.3.4 Superficiais da área rural à jusante da barragem de rejeitos

Para os residentes em área rural foram identificadas as SQIs chumbo e níquel. Os valores de coeficiente de risco potencialmente ocasionados pela exposição às SQI foram mais intensos para adultos, atingindo valores de até 0,5 principalmente devido à presença de chumbo.

Logo, as concentrações observadas não representam risco à saúde dos moradores da área rural à jusante da barragem de rejeitos.

3.4 Análise das incertezas

A escolha dos valores de concentração das SQIs para este estudo se deu de forma bastante objetiva e conservadora. Inicialmente utilizou-se as normas ambientais de referência (BRASIL, 2009; HIDROGEO, 2020a; BRASIL, 2005; ANVISA, 2013; BRASIL, 2008; BRASIL, 2012) e sempre utilizando um percentual maior para a dosagem de cada substância.

Por exemplo, ao se utilizar 10% do valor de concentração do arsênio total do solo foi uma premissa conservadora, visto que os valores do metal bioassimilável costumam ser < 5% do valor do arsênio total (CIMINELLI *et al.*, 2018). A utilização de 50% da concentração biodisponível e de 20% do cromo total do solo como cromo hexavalente (Cr(VI)) também é conservador visto que no solo a fração biodisponível sempre é menor que 50% e com a presença de matéria orgânica no solo é muito provável que esse percentual seja bem inferior a 20% (SHAHID *et al.*, 2017).

A avaliação da série histórica de monitoramento da Equinox Gold de Pilar serviu para validar os dados obtidos em campo para esse estudo e para se obter a mediana utilizada na dosagem do SQI no receptor de interesse. Dessa forma, o estudo aqui apresentado pode ser considerado como atual e representativo de uma situação de risco à saúde humana na AID da operação da Equinox Gold de Pilar.

3.5 Gerenciamento do risco

Em função dos resultados aqui apresentados e considerando que somente o cromo, entre todas as SQIs identificadas nesse estudo, apresentou risco à saúde humana acima do permitido para adultos localizados dentro da área deste estudo. Desta forma, recomenda-se que seja realizada uma investigação geoquímica do percentual preciso de biodisponibilidade do cromo no solo e de sua especiação de forma que esse risco seja mais precisamente mensurado.

4 CONCLUSÃO

A análise de risco à saúde humana foi realizada seguindo os procedimentos indicados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (U.S. EPA, 1989) e pela CETESB (2001).

As fontes de contaminação inicialmente identificadas foram as pilhas de estéril, barragem de rejeitos e a geologia local a partir da geração de solo com valores elevados de metais traço e arsênio. Foi realizada a aplicação de questionários nos moradores da região e nos trabalhadores da Equinox Gold para caracterizar o cotidiano desses receptores e utilizar dados reais no cálculo do risco por meio da planilha disponibilizada pela CETESB para essa finalidade.

Após a realização da avaliação de risco à saúde humana aqui apresentada foi possível identificar que a área de maior risco dentro da Área de Influência Direta (AID) da mineradora está localizada a montante da Equinox Gold. Dessa forma, esta não está relacionada com a atividade deste empreendimento e sim com o background geoquímico daquela região, em especial. As substâncias químicas de interesse (SQIs) identificadas foram: arsênio, cromo, níquel, chumbo, alumínio e o cádmio. Estas foram identificadas considerando as normas ambientais nacionais (BRASIL, 2009; HIDROGEO, 2020a; BRASIL, 2005; ANVISA, 2013; BRASIL, 2008; BRASIL, 2012) e os valores máximo permitido (VMP) pela ANVISA para concentração de metais em filé de peixe.

O arsênio e o cromo se encontram presentes no solo da região devido a geologia local que é rica nesses elementos. Estudo de background geoquímico realizado recentemente nesta região comprovam essa conclusão (HIDROGEO, 2020a). A mesma afirmativa pode ser utilizada para justificar a presença de alumínio na água subterrânea. Já a presença de arsênio, cromo, cádmio e

níquel nos sedimentos das drenagens está associada ao processo erosivo de rochas ricas nesses elementos traço. Da mesma forma, o chumbo em filé de peixe deriva desse ambiente geoquimicamente mais rico nesses elementos, uma vez que foi encontrada concentrações muito similares em toda a AID, ou seja, a montante e a jusante do empreendimento da Equinox Gold (HIDROGEO, 2020b).

Todos as SQIs mencionadas acima foram submetidas à avaliação de risco à saúde humana seguindo critérios rígidos e conservadores aplicados nesta avaliação. O resultado desse estudo pode concluir que o elemento traço cromo presente em solo de áreas a montante da Equinox Gold apresenta um risco à saúde humana aos adultos, considerando a metodologia aqui utilizada. O risco se dá principalmente por meio da ingestão de partículas de solo que ocorre naturalmente pelo manuseio deste e pela ingestão de metais presentes nos vegetais cultivados na região. Esse resultado é conservador e significa que essa via de contaminação pelo cromo pode ser mais bem investigada por meio de um estudo geoquímico do percentual preciso de biodisponibilidade do cromo no solo e de sua especiação. Dessa forma, será possível mensurar o risco mais precisamente e, se necessário, encaminhar para ações de gestão do risco.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Fundação Estadual do Meio Ambiente (2020). Inventário de Áreas Contaminadas de Minas Gerais: 2020. FEAM: Belo Horizonte, Minas Gerais.
- WEISS, E. B. (2011). The evolution of international environmental law. **Japanese Yearbook of international law**, 54, 1-27.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2007). Decisão de Diretoria nº 103/2007/C/E, de 22 de junho de 2007, a elaboração de planilhas para avaliação de risco em áreas contaminadas sob investigação. CETESB: São Paulo.
- International Network for Acid Prevention (2009). Global Acid Rock Drainage Guide (GARD). INAP: Skellefteå, Sweden.
- BRASIL (2009). Resolução CONAMA n.º 420. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 249, 30 dez.
- Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (2001). Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2 ed. CETESB: São Paulo.
- United States Environmental Protection Agency (1989). Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A). U.S. EPA: Washington, DC.
- Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos (2020a). Estudo de Background Geoquímico da Equinox Unidade de Pilar de Goiás/GO. HIDROGEO: Belo Horizonte, 65p.



- Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos (2020b). Parecer Técnico do Potencial de Drenagem Ácida de Mina. HIDROGEO: Belo Horizonte, 53p.
- BRASIL (2005). Resolução CONAMA n.º 357, (2005). Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005.
- Agência Nacional de Vigilância Sanitária (2013). Resolução n. 42. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 ago. 2013. Seção 1, p. 33-35.
- BRASIL (2008). Resolução CONAMA nº 396. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 07 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68.
- BRASIL (2012). Resolução CONAMA nº 454. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 nov. 2012. Seção 1, p. 66.
- United States Environmental Protection Agency (1987). Health Effects Assessment Summary Tables (Heast). U.S. EPA: Washington, D.C.
- United States Environmental Protection Agency (1985). Integrated Risk Information System (IRIS). U.S. EPA: Washington, D.C.
- Agency for Toxic Substances and Disease Registry (2020). Toxicological Profiles. ASTDR: Atlanta, Georgia.
- United States Environmental Protection Agency (1993). Environmental Criteria and Assessment Office (ECAO-Cin). U.S. EPA: Washington, D.C.
- SHAHID, M, SHAMSAD, S., RAFIQ, M., KHALID, S., BIBI, I., NIAZI, N. K., DUMAT, C. & RASHID, M.I. (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. **Chemosphere**, 178, 513-533.
- CIMINELLI, V. S. T., ANTÔNIO, D. C., CALDEIRA, C. L., FREITAS, E. T. F., DELBEM, I. D., FERNANDES, M. M., GASPARNON, M. & NG, J. C. (2018). Low arsenic bioaccessibility by fixation in nanostructured iron (Hydr)oxides: Quantitative identification of As-bearing phases. **J. of Hazard. Mater**, 353, 261-270.

COMO CITAR ESTE ARTIGO:

Vasconcelos, F. de M., Queiroz, M. P., Coutinho, N. A. F. S., & Ferreira, H. C. (2022). AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA APLICADA À MINERAÇÃO. *HOLOS*, 4. Recuperado de <https://www2.ifrn.edu.br/ojs/index.php/HOLOS/article/view/12915>

F. DE M. VASCONCELOS

Dr. Vasconcelos é hidrogeólogo e geoquímico ambiental nas operações no Brasil da HidroGeo Engenharia



& Gestão de Projetos Ltda, formado em geologia na UnB em 1992 e possui mestrado e doutorado em Ciências e Engenharia Ambiental pela Colorado School of Mines nos E.U.A. em 1997 e 2000. Realizou dois pos-doc sendo o primeiro em 2001 na Universidade de Delaware, na área de biodisponibilidade de metais em corpos receptores e o segundo em 2003 na UFMG estudando a mobilidade do arsênio em ambientes de mineração. Foi consultor sênior de empresas de engenharia Canadenses, Americanas e Brasileiras nos últimos anos. Ele tem mais de 27 anos de experiência nas disciplinas e áreas técnicas de hidrogeologia, hidrogeoquímica, destino e transporte de metais no meio ambiente, tratamento de efluente e reabilitação de sites para as indústrias de mineração na América do Sul. Ele é especialista nas seguintes áreas: projetos de gerenciamento de resíduos de mineração, caracterização de rochas residuais, avaliação de drenagem de rochas ácidas, previsão da qualidade da água; controle de lixiviados de resíduos de minas e tratamento de efluente de mineração, biodisponibilidade de metais, gestão de efluentes, avaliação ecológica e de riscos ambientais e no fechamento de minas. Em 2009 lançou o livro técnico em Avaliação da Qualidade da Água – Base Tecnológica para Gestão Ambiental em português com outros dois limnologistas seniores, ele tem uma vasta experiência em hidrogeologia, avaliação de sítios, estudos geoquímicos ambientais e avaliação de riscos. Desde 2028 é Presidente da Associação Brasileira de Águas Subterrâneas do núcleo de Minas Gerais (ABAS-MG).

E-mail: flavio.vasconcelos@hidrogeoeng.com.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0002-7029-2817>

M. P. QUEIROZ

Graduado em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestrando com projeto de dissertação relacionado com modelagem geoquímica de transporte de contaminantes metálicos em solo. Tem experiência em monitoramento e gestão de recursos hídricos, avaliação de risco ecológico e à saúde humana, modelagem geoquímica com o software PHREEQC e modelagem de descarte de efluente com o software CORMIX.

E-mail: marcelopq@ufmg.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0003-0917-4982>

N. A. F. S. COUTINHO

Técnica em Mineração e Engenheira de Minas pelo Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais, Mestrado em Engenharia Metalúrgica, Materiais e de Minas Pela Universidade Federal de Minas Gerais. Experiência de 2 anos em laboratório de Processamento Aquoso. Experiência em análise de caracterização mineral (Difração de raios-X, Fluorescência de raios-x, Mineral Liberation Analyses, ICP-OES, Espectroscopia Raman, Área superficial específica e granulometria). Desenvolveu estudos de: investigação preliminar e confirmatória na área de lagoas sanitárias da Copasa em Abaeté-MG; projetos de amostragem de rejeitos e resíduos de mineração para análise de contaminação por drenagem ácida de mina e lixiviação de metais; plano de fechamento de mina; estudos de background geoquímico em áreas de mineração; projetos gestão de recursos hídricos, avaliação de risco ecológico e à saúde humana; programa de monitoramento de gestão de recursos hídricos e programa de gestão de drenagem ácida.

E-mail: nathalia.sales@hidrogeoeng.com.br

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-7464-4149>

H. C. FERREIRA

Graduado em Química pela Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG). Mestrando em química



ambiental na área de transporte de contaminantes em solo pela UFMG. Experiência em laboratório de análises físico-químicas e microbiológicas. Possui experiência em projetos de gestão de resíduos e recursos hídricos, gerenciamento de áreas contaminadas, tratamento de efluentes e utilização de softwares de modelagem como CORMIX e PHREEQC.

E-mail: hairtoncf@outlook.com

ORCID ID: <https://orcid.org/0000-0001-6797-545X>

Editor(a) Responsável: Francinaide de Lima Silva Nascimento/ Elenice M Schons Silva

Pareceristas *Ad Hoc*: Mauro Froes Meyer e Ana Paula Duarte



Recebido: 18 de agosto de 2021

Aceito: 21 de outubro de 2021

Publicado: 28 de dezembro de 2022

