

AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA APLICADA À MINERAÇÃO

Marcelo Pereira Queiroz, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos
Flávio de Moraes Vasconcelos, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos
flavio.vasconcelos@hidrogeoeng.com.br
Marcos Rogério Palma, Pilar de Goiás Desenvolvimento Mineral/Equinox Gold
Denner Dias Ribeiro, Pilar de Goiás Desenvolvimento Mineral/Equinox Gold
Augusto César Fonseca Saraiva, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos
Ítalo Machado Corrêa, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos
Hairton Costa Ferreira, Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos

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,

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

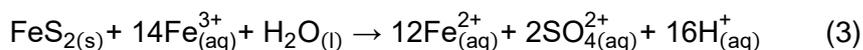
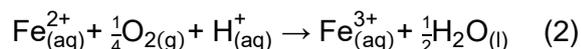
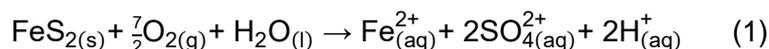
Human health, risk assessment, mining, toxicity.

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 [1]. No relatório ainda é ressaltado que “*é importante o desenvolvimento de trabalhos que visem orientar e divulgar as boas práticas para prevenir contaminações e riscos futuros*” (p. 19).

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 [2]. 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. Em 2007 lançou um documento para que os empreendedores conseguissem quantificar o risco de contaminação humana de áreas impactadas [3].

Atividades minerárias podem ser fontes potenciais de contaminação de metais, principalmente devido à Drenagem Ácida de Mina (DAM), ou Drenagem Ácida de Rocha (DAR) [4]. Esse processo ocorre quando há exposição de minerais sulfetados à umidade e oxigênio, gerando sulfato, íons H^+ e ferro como principais produtos, como representado nas equações químicas 1-3 a seguir:



Esse processo pode ser acelerado por ação de bactérias e um fator agravante é a variedade de minerais sulfetados existentes, como arsenopirita ($FeS_2 \cdot FeAs$), pirrotita ($Fe_{1-x}S$), galena (PbS), millerita (NiS), esfalerita (ZnS) e a própria pirita (FeS_2 ; principal responsável pela DAR), que resultam também na mobilização de metais traço e metalóides tóxicos ao meio ambiente. Após o processo esses compostos podem ser dissolvidos como íons livres ou complexos, precipitar como sulfatos de cálcio, óxidos, hidróxidos ou carbonatos, podem ser quelados por ácidos orgânicos, adsorvidos em superfície ou co-precipitados com outras fases sólidas [5].

Concentrações de metais em solo, água superficial e água subterrânea também podem ser de gênese natural devido à geologia local. Nesse caso, faz-se necessário a determinação dos valores de *background* geoquímico ambiental de uma determinada área industrial.

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 CONAMA n° 420, de 28 de dezembro de 2009 está alinhada com as normas internacionais que também tratam dessa questão [6]. O fluxograma a seguir (Figura 1) foi produzido pela CETESB, já em 2001, e nele estão apresentadas as etapas e processos envolvidos na gestão de passivos ambientais, desde a identificação de áreas suspeitas até a intervenção [7].

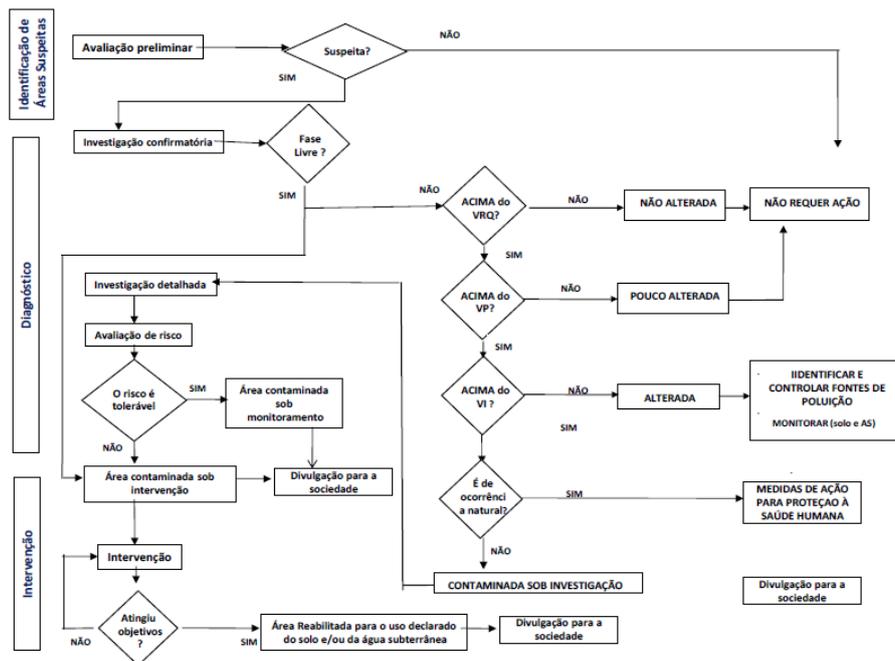


Figura 1 - Fluxograma de manual de gerenciamento de áreas contaminadas.

Como pode-se observar na figura, extraída da CETESB, após a investigação detalhada indica-se realizar a avaliação de risco. O objetivo é identificar se a exposição dos receptores (i.e., seres humanos) às Substâncias Químicas de Interesse (SQI), considerando os cenários de ocupação que representem a realidade do local (cenário atual), acarreta risco tolerável ou não aos receptores em questão. 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 [9, 10].

METODOLOGIA

A unidade da Equinox Gold, deste estudo, localiza-se no município de Pilar de Goiás, no quadrante NW do Estado de Goiás (Figura 2). 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.

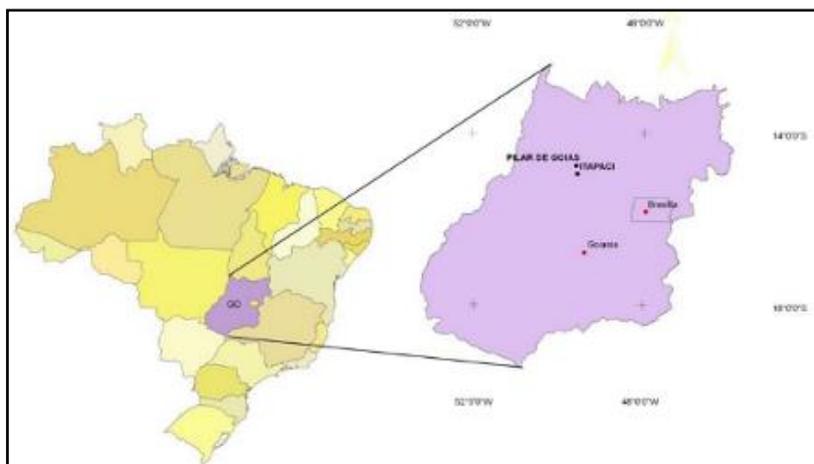


Figura 2 - Mapa com a localização dos municípios de Pilar de Goiás e Itapaci – GO.

A Avaliação de Risco à Saúde Humana foi realizada conforme ao estabelecido no guia da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (do inglês United States Environmental Protection Agency – US EPA) e da CETESB [7, 8]. As etapas do estudo estão descritas a seguir e consistem na formulação do problema, análise da exposição, análise dos efeitos e caracterização do risco.

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 [9] e *background* geoquímico [10], realizados pela empresa HIDROGEO.

O estudo de potencial de drenagem ácida de mina e lixiviação de metais consistiu na coleta de 48 amostras das pilhas de estéril e 10 amostras do material depositado na barragem de rejeitos. As amostras foram analisadas segundo as metodologias MABA, NAG, SPLP e ABNT NBR 10.006:2004, pelo laboratório CAMPO de Paracatu/MG, acreditado pela ISO/IEC 17.025.

O *background* geoquímico de metais nos solos, águas superficiais e águas subterrâneas foi desenvolvido a partir do planejamento e da coleta de amostras nas áreas de baixo impacto antrópico e representativas de concentrações naturais dos compostos químicos de interesse.

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.

Além disso, foi realizada uma campanha de coleta de amostras de: solo, sedimento, água superficial, água subterrânea e fauna aquática.

A amostragem de solo foi realizada em 32 pontos por meio de trado holandês conforme o estabelecido na norma da ABNT NBR 7250 - Identificação e Classificação de Amostras Obtidas em Sondagem de Simples Reconhecimento dos Solos [11] e ABNT NBR 9603 - Sondagens a Trado [12]. Antes da coleta, a superfície do local a ser amostrado foi limpa, para retirada a camada mais superficial do solo. O horizonte a ser caracterizado é o horizonte B do solo.

Entre cada estação de coleta, o material foi lavado com água deionizada a fim de evitar a contaminação cruzada das amostras. Após a coleta, o material foi peneirado em peneira de 2 mm, homogeneizado e pesado. Em seguida o material foi devidamente identificado e enviado para laboratório certificado com a ISO/IEC 17.025/2017 para determinação das concentrações dos elementos inorgânicos preconizados pela Resolução do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) n.º 420, de 28 de dezembro de 2009 [6]. Os resultados foram então comparados com a mesma norma.

Foram coletadas 10 amostras de água superficial, sendo 9 em pontos diferentes e uma duplicata como controle de qualidade. Os procedimentos de coleta, amostra e preservação foram conforme estabelecidos nas normas ABNT NBR 9898 - Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores [13] e ABNT NBR 9897 – Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores [14] por técnicos de laboratório acreditados pela ISO/IEC 17.025/2017 com balde de inox de 15 a 30 cm da lâmina de água.

Foram determinadas as concentrações dos elementos inorgânicos preconizados pela Resolução CONAMA n.º 357, de 17 de março de 2005 [15]. Os resultados das análises foram, então, comparados com a mesma legislação.

Foram coletadas 30 amostras do peixe de água doce *Astyanax spp* (Lambari) localizadas à montante, na área de exploração e à jusante do empreendimento. As coletas foram realizadas de 15 a 17 de maio de 2020 com rede de pesca. Todas as amostras foram etiquetadas individualmente e mantidas congeladas para determinação dos parâmetros preconizados pela Resolução - RDC nº 42, de 29 de agosto de 2013 [16].

Os tecidos investigados foram o fígado e o filé, amplamente usados em avaliações dessa natureza. Como filé entende-se uma porção muscular isenta de sangue, pele e escamas. A dissecação para a obtenção das amostras foi executada por técnico devidamente habilitado para a tarefa, totalizando 60 Amostras.

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:

- Superficiários 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, a seguir.

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 compiladas, foi consolidado o modelo conceitual inicialmente concebido, de forma que foi possível quantificar a existência ou não de risco à saúde dos receptores em questão.

Análise da exposição

Uma vez identificadas as SQI, a partir da avaliação dos resultados do banco de dados de monitoramento ambiental e de estudos ambientais com as normas de qualidade [6, 9, 15-18] foi realizada a análise da exposição dos receptores.

Para caracterização da exposição foram utilizadas as médias dos tempos (horas/dia), frequências (dias/ano e eventos/dia) de exposição aos meios físicos, obtidos através dos questionários e as concentrações das SQI nos meios físicos obtidos dos trabalhos realizados pela Hidrogeo.

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 [7].

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, por meio da aplicação, da planilha da CETESB [3].

Análise dos efeitos

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

- Sistema Integrado de Informações de Risco [19],
- Tabelas de Resumo de Avaliação de Efeitos à Saúde [20],
- Agência para Substâncias Tóxicas e Registro de Doenças [21] e
- Escritório de Critérios Ambientais e Avaliações da Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos [22].

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 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.

$$Risco = I_n \times SF \quad (4)$$

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. O valor deve ser menor que 1 para que seja um risco aceitável.

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

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. 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.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Formulação do problema

As principais fontes de contaminação foram identificadas como sendo as pilhas de estéril, o rejeitoduto, a barragem de rejeitos e a geologia local. As pilhas de estéril e a barragem de rejeito são fontes potenciais que expõem com maior probabilidade os trabalhadores do empreendimento em questão. A geologia local, responsável pelo *background* geoquímico ambiental mais elevado em relação as normas legais, também foi considerada na avaliação de risco à saúde humana.

As substâncias químicas de interesse identificadas foram: arsênio, cromo, níquel, chumbo, alumínio e o cádmio. Estas foram identificadas considerando as normas ambientais nacionais [6, 9, 15-18]. 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 foleáceas/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 3. Além disso, na Figura 4 está apresentado o modelo conceitual na forma de fluxograma para as pilhas de estéril, que foram as fontes com maior potencial de exposição das SQI aos receptores.

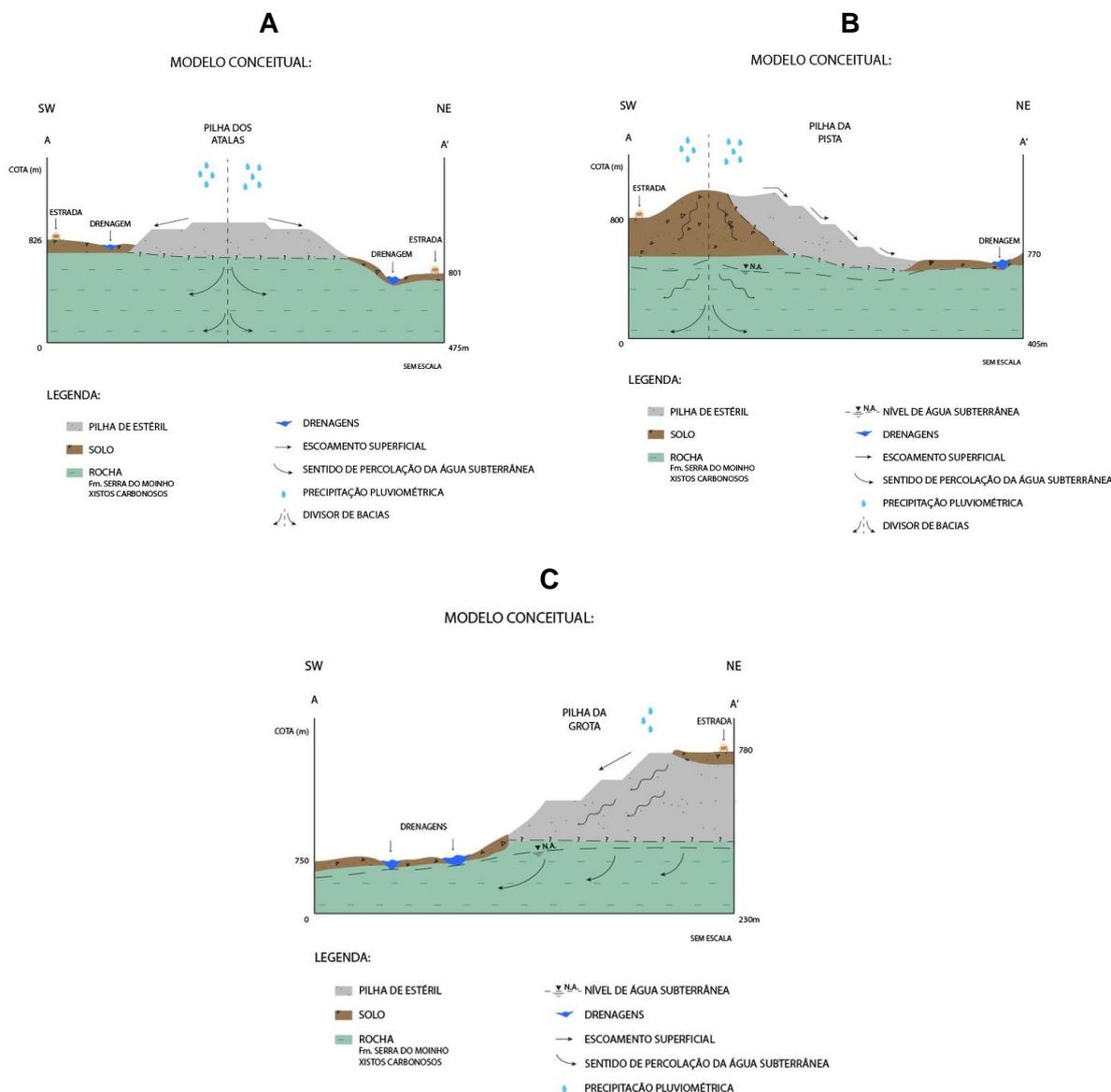


Figura 3 - Modelo conceitual da pilha dos Atalas (A), da Pista (B) e da Grota (C) em perfil SW - NE.

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 Grota. O escoamento superficial é potencialmente responsável por carrear as SQI para a drenagem que desagua no córrego Gaspar e, portanto, os receptores da pilha dos Atalas são os mesmos da pilha da Grota.

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.

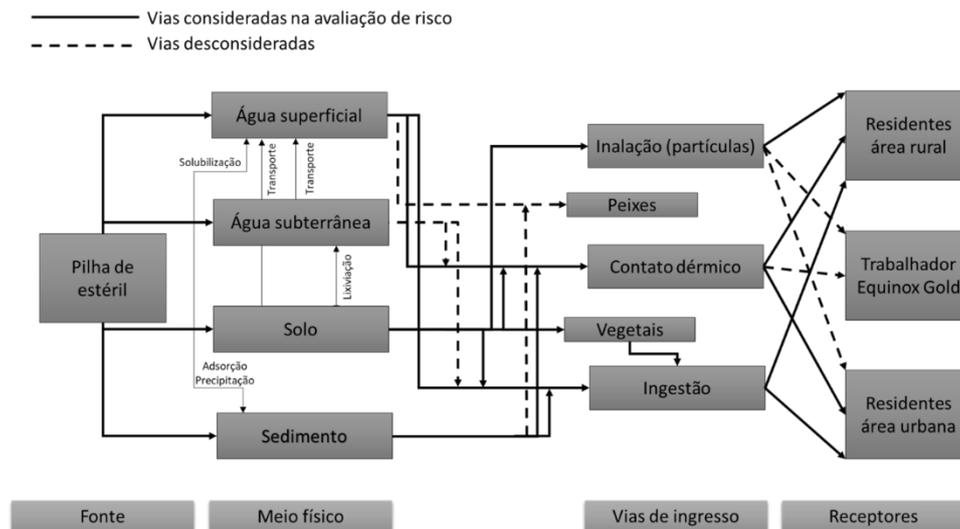


Figura 4 - Modelo conceitual em fluxograma de pilhas de estéril.

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 EPI por parte dos trabalhadores da Equinox Gold.

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.

➤ 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 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.

➤ 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 SQI 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 SQI 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 SQI 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 mg/L) 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 (Figura 5) [10]. 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 nexos causal com a atividade da mineradora.

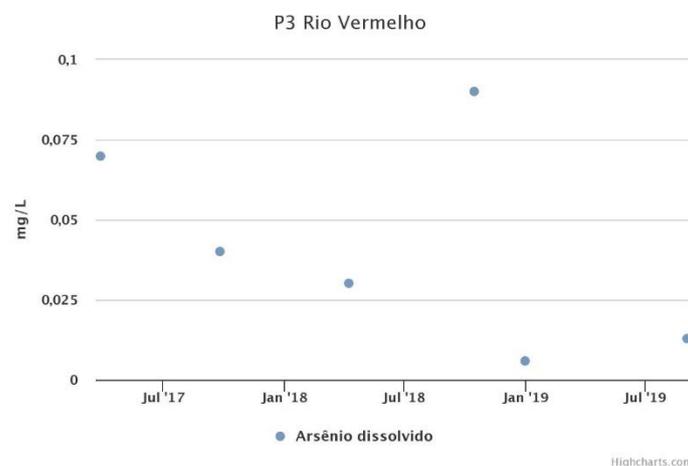


Figura 5 - Série histórica de dados de arsênio dissolvido em água superficial para o ponto P3 Rio Vermelho.

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 [18]. 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 [8].

Tabela 2 - Resultados de análises química de sedimento dos pontos próximos à área urbana (em mg/kg) e os valores máximos permitidos (VMP) segundo a norma CONAMA 454/2012 [18].

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 [23, 24]. Também foram utilizados valores de taxa de ingestão de sedimento durante a recreação para adultos e crianças iguais a 50 e 25 mg/dia, 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 [16] 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 3 - Médias e intervalo de confiança dos resultados de análise química de filé do peixe de água doce *Astyanax spp* (em mg/kg) e os valores máximos permitidos (VMP) segundo a RDC nº 42 [16].

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 mg/kg), o qual é superior ao valor máximo permitido pela resolução (0,05 mg/kg).

- 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 [9].

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 nas Tabelas 4 e 5. Em negrito estão marcados resultados acima do Valor de Investigação (VI) estabelecido pela norma CONAMA 420/2009 para área residencial [6].

Tabela 4 - Resultados de análises química de solo dos pontos da área rural (em mg/kg) e os valores de investigação (VI) segundo a norma CONAMA 420/2011 [6].

Ponto	pH em CaCl ₂	Al	Sb	As	B	Ba	Pb	Co	Cu	Cr	Cd
VI	-	-	10,0	55,00	-	500,00	300,00	65,00	400,00	300,00	8,00
P1	5,09	556,46	<1,0	5,50	30,55	60,70	12,36	3,64	29,83	409,03	0,36
P3	-	437,78	<1,0	82,00	26,24	121,25	27,27	8,16	55,07	317,93	1,05
P9	4,13	560,22	<1,0	36,00	39,76	50,81	13,53	3,22	34,85	122,20	1,60
P27.1	4,21	273,96	<1,0	6,38	10,33	16,49	15,80	<1	14,28	6,62	<0,5
P27.2	-	243,82		4,51	9,18	14,70	14,65	<1	24,76	6,33	<0,5

Tabela 5 - Resultados de análises química de solo dos pontos da área rural (em mg/kg) e os valores de investigação (VI) segundo a norma CONAMA 420/2011 [6] (continuação).

Ponto	Ca	Fe	Mg	Mn	Hg	Mo	Ni	Ag	Se	V	Zn
VI	-	-	-	-	36,0	100,00	100,00	50	-	-	1.000
P1	490	516,14	410	55,76	<0,5	1,06	87,48	<1	<1	97,47	209,07
P3	850	360,81	1.020	32,01	<0,5	<1	85,33	<1	<1	118,04	178,96
P9	110	266,69	284	420,37	<0,5	<1	19,24	<1	<1	37,00	167,75
P27.1	150	77,33	410	99,51	<0,5	<1	2,51	<1	<1	26,01	123,95
P27.2	20	76,91	290	77,62	<0,5	<1	2,03	<1	<1	23,51	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 [23, 24].

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) 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 6 estão apresentados os valores máximos permitidos (VMP) da norma CONAMA 396/2008 (Água subterrânea - Consumo humano) [17] comparados com os valores de *background* geoquímico (AT) obtidos por meio de estudo realizado pela Hidrogeo [9].

Tabela 6 - Valores de *background* geoquímico de água subterrânea, obtidos por estudo da Hidrogeo [9], comparados com os VMPs segundo a norma CONAMA 396/2008 [17].

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

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

- 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 6 e 3, respectivamente.

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 7 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 [19-22].

Tabela 7 - Valores de dose de ingresso de referência e fator de carcinogenicidade de cada SQI, obtidas a partir das referências citadas [19-22].

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	-	-	-

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
Chumbo	3,60E-03	-	3,6E-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.

➤ Residentes da cidade de Pilar de Goiás-GO

As SQI 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 (Figura 6).

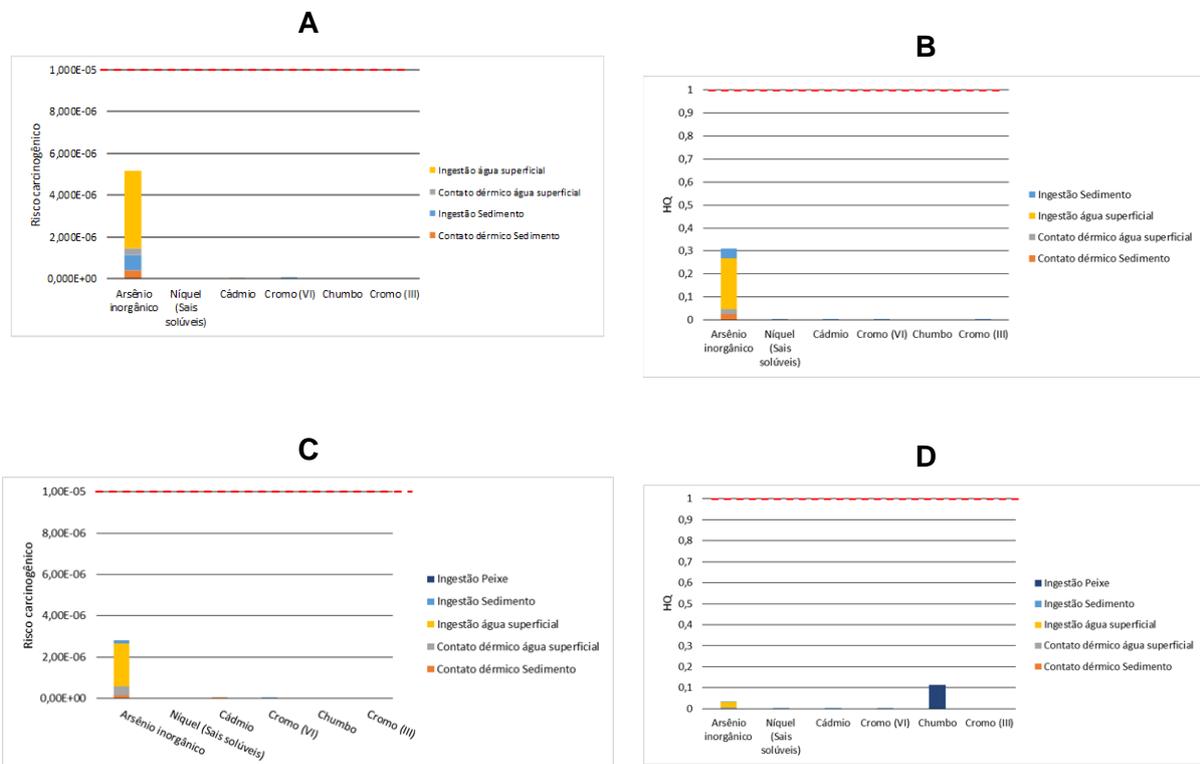


Figura 6 - Gráficos de risco carcinogênico (A, C) e coeficiente de perigo (B, D) para crianças (A, B) e adultos (C, D) residentes em área urbana.

Pode-se observar nas tabelas e gráficos acima que o risco associado a ingestão de peixe, contato com a água superficial e sedimento não tiveram valores acima de 1,00E-05 para as SQI carcinogênicas e menos que 1,0 para o quociente de perigo de (HQ), para as SQI não carcinogênicas. Portanto, as concentrações observadas, não representam risco à saúde dos moradores da área urbana da cidade de Pilar de Goiás.

➤ Superficialírios 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 SQI 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 7.

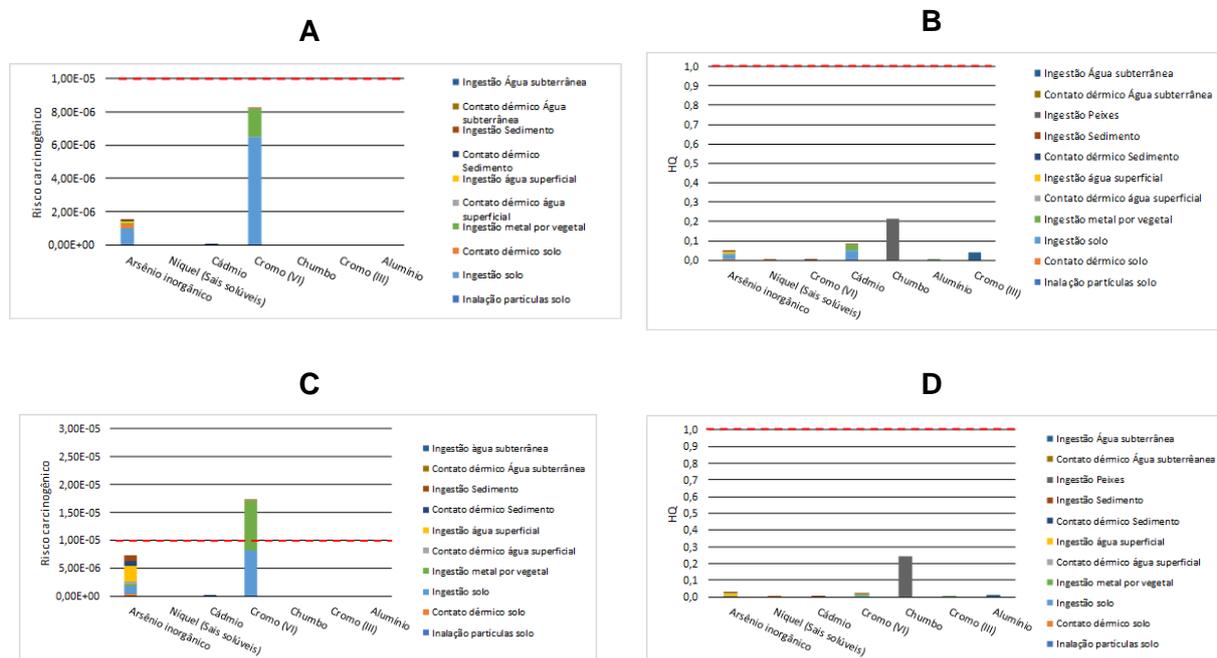


Figura 7 - Gráficos de risco carcinogênico (A, C) e coeficiente de perigo (B, D) para crianças (A, B) e adultos (C, D) residentes em área rural à montante da Equinox Gold.

Pode-se observar na Figura 7 que somente para o cromo ocorreu o risco carcinogênico, associado à ingestão 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 [9].

➤ Superficiais da área rural à jusante da Equinox Gold

Para os residentes em área rural foram identificadas as SQI alumínio na água subterrânea e chumbo para ingestão de *Astyanax spp* (Lambari). As duas SQI geram um risco aceitável e, portanto, não oferecem perigo à saúde humana de superficiais da área rural à jusante da Equinox Gold de Pilar. Como esses elementos são não carcinogênicos o cociente de perigo (HQ) ficou bem abaixo de 1,0 (Tabela 8).

Tabela 8 - Estimativa de avaliação de risco para adultos residentes em área rural à montante da Equinox Gold.

SQI	Efeito	Peixes	Água subterrânea	
		Ingestão	Contato dérmico	Ingestão
Chumbo	C	-	-	-
	NC	0,24	-	-
Alumínio	C	-	-	-
	NC	-	3,84E-05	1,04E-02

C: carcinogênico; NC: não carcinogênico.

➤ Superficiais da área rural à jusante da barragem de rejeitos

Para os residentes em área rural foram identificadas as SQI chumbo e níquel. Os valores de coeficiente de risco potencialmente ocasionados pela exposição às SQI estão apresentados na Figura 8.

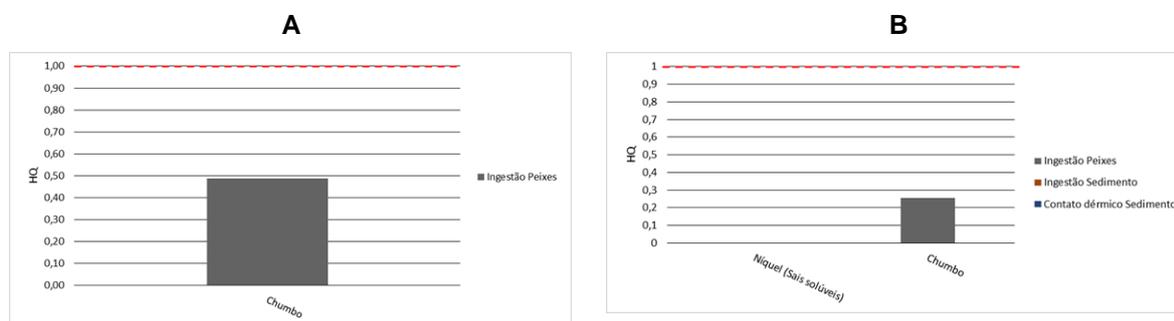


Figura 8 - Gráficos de coeficiente de risco para crianças (A) e adultos (B) residentes em área urbana.

Pode-se observar que os riscos associados ao contato com sedimento e ingestão de peixes não tiveram valores acima de 1,0 para o quociente de perigo (HQ), logo as concentrações observadas não representam risco à saúde dos moradores da área rural à jusante da barragem de rejeitos.

Análise das incertezas

A escolha dos valores de concentração das SQI para este estudo se deu de forma bastante objetiva e conservadora. Inicialmente utilizou-se as normas ambientais de referência [6, 9, 15-18] 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 [24].

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% [23].

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.

Gerenciamento do risco

Em função dos resultados aqui apresentados e considerando que somente o cromo, entre todas as SQI identificadas nesse estudo, apresentou risco à saúde humana acima do permitido para adultos localizados dentro da área deste estudo, 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.

CONCLUSÃO

A análise de risco à saúde humana foi realizada seguindo os procedimentos indicados pela Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos [8] e pela Companhia Ambiental do Estado de São Paulo [7].

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 (SQI) identificados foram: arsênio, cromo, níquel, chumbo, alumínio e o cádmio. Estas foram identificadas considerando as normas ambientais nacionais [6, 9, 15-18] 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 [9]. 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 [10].

Todos as SQI 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 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.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] FEAM (2020). Inventário de Áreas Contaminadas de Minas Gerais. Disponível em: <<http://www.feam.br/-qualidade-do-solo-e-areas-contaminadas/inventario-e-lista-de-areas-contaminadas>>.

[2] Weiss, E. B. (2011). The evolution of international environmental law. Japanese Yearbook of international law. v. 54, p. 1-27.

[3] CETESB (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.

- [4] International Network for Acid Prevention (INAP) (2009). Global Acid Rock Drainage Guide (GARD). International Network for Acid Prevention. Skellefteå, Sweden.
- [5] MEND PROGRAM (2009). Environment Canada. Prediction Manual for Drainage Chemistry from Sulphidic Geologic Materials. Mend, Report 1.20.1.
- [6] BRASIL (2009). CONAMA. Resolução n. 420. Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 249, 30 dez.
- [7] CETESB (2001). Manual de gerenciamento de áreas contaminadas. 2 ed. São Paulo: CETESB.
- [8] U.S. EPA (1989) Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A). United States Environmental Protection Agency, Washington, DC.
- [9] HIDROGEO (2020). Estudo de *Background* Geoquímico da Equinox Unidade de Pilar de Goiás/GO. Belo Horizonte: Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos, 65p.
- [10] HIDROGEO (2020). Parecer Técnico do Potencial de Drenagem Ácida de Mina. Belo Horizonte: Hidrogeo Engenharia e Gestão de Projetos, 53p.
- [11] ABNT, NBR 7250 (1982). Identificação e descrição de amostras de solos obtidas em sondagens de simples reconhecimento de solos. Rio de Janeiro.
- [12] ABNT, NBR 9603 (2015). Sondagem a trado – procedimento. Rio de Janeiro.
- [13] ABNT, NBR 9898 (1987). Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro.
- [14] ABNT, NBR 9897 (1987). Planejamento de amostragem de efluentes líquidos e corpos receptores. Rio de Janeiro.
- [15] BRASIL (2005). CONAMA. Resolução n. 357, (2005). Diário Oficial da União: República Federativa do Brasil, Poder Executivo, Brasília, DF, n. 53, 18 mar. 2005.
- [16] ANVISA (2013). Resolução n. 42. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 30 ago. 2013. Seção 1, p. 33-35.
- [17] BRASIL (2008). Resolução nº 396. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 07 abr. 2008. Seção 1, p. 64-68.

[18] BRASIL (2012). Resolução nº 454. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília, DF, 08 nov. 2012. Seção 1, p. 66.

[19] U.S. EPA (1987). Health Effects Assessment Summary Tables (Heast). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

[20] U.S. EPA (1985). Integrated Risk Information System (IRIS). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

[21] ASTDR (2020). Toxicological Profiles. U.S. Department of Health and Human Services, Atlanta, Georgia.

[22] U.S. EPA (1993). Environmental Criteria and Assessment Office (ECAO-Cin). U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.

[23] Shahid, M. *et al* (2017). Chromium speciation, bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system: A review. *Chemosphere* – 178, 513-533.

[24] Ciminelli, V. S. T *et al* (2018). Low arsenic bioaccessibility by fixation in nanostructured iron (Hydr)oxides: Quantitative identification of As-bearing phases. *J. of Hazard. Mater.* 353, 261-270.