



UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO
ESCOLA DE MINAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA



TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

**ANÁLISE DO RISCO TOXICOLÓGICO E SUA IMPLICAÇÃO NO
PLANEJAMENTO TERRITORIAL: ESTUDO DE CASO DO ARSÊNIO E DO
CÁDMIO NO ALTO DO RIO DAS VELHAS**

Mikhaela Saliveros Alderete

MONOGRAFIA nº 378

Ouro Preto, novembro de 2020

**ANÁLISE DO RISCO TOXICOLÓGICO E SUA
IMPLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL:
ESTUDO DE CASO DO ARSÊNIO E DO CÁDMIO NO
ALTO DO RIO DAS VELHAS**



FUNDAÇÃO UNIVERSIDADE FEDERAL DE OURO PRETO

Prof.^a Dr.^a Cláudia Aparecida Marlière de Lima

Vice-Reitor

Prof. Dr. Hermínio Arias Nalini Júnior

Pró-Reitora de Graduação

Prof.^a Dr.^a Tânia Rossi Garbin

ESCOLA DE MINAS

Diretor

Prof. Dr. Issamu Endo

Vice-Diretor

Prof. Dr. José Geraldo Arantes de Azevedo Brito

DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA

Chefe Prof. Edison Tazava

MONOGRAFIA

Nº 378

ANÁLISE DO RISCO TOXICOLÓGICO E SUA IMPLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL: ESTUDO DE CASO DO ARSÊNIO E DO CÁDMIO NO ALTO DO RIO DAS VELHAS

Mikhaela Saliveros Alderete

Orientador

Prof.º Dr.º César Falcão Barella

Co-Orientadora

Adivane Terezinha Costa

Monografia do Trabalho de Conclusão de curso apresentado ao Departamento de Geologia da Escola de Minas da Universidade Federal de Ouro Preto como requisito parcial para avaliação da disciplina Trabalho de Conclusão de Curso – TCC 402, ano 2020/1.

SISBIN-SISTEMA DE BIBLIOTECA E INFORMAÇÃO

- A361a Alderete, Mikhaela Saliveros.
Análise do risco toxicológico e sua implicação no planejamento territorial [manuscrito]: estudo de caso do arsênio e do cádmio no Alto do Rio das Velhas. / Mikhaela Saliveros Alderete. - 2020.
98 f.: il.: color., gráf., tab., mapa.
- Orientador: Prof. Dr. César Falcão Barella. Coorientadora: Profa. Dra. Adivane Terezinha Costa.
Monografia (Bacharelado). Universidade Federal de Ouro Preto. Escola de Minas. Graduação em Engenharia Geológica .
1. Geoquímica ambiental. 2. Água - Contaminação. 3. Solos - Manejo.
I. Barella, César Falcão. II. Costa, Adivane Terezinha. III. Universidade Federal de Ouro Preto. IV. Título.

CDU 550.4:631.4

Ficha de Aprovação

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

TÍTULO: ANÁLISE DO RISCO TOXICOLÓGICO E SUA IMPLICAÇÃO NO PLANEJAMENTO TERRITORIAL:
ESTUDO DE CASO DO ARSÊNIO E DO CÁDMIO NO ALTO RIO DAS VELHAS

AUTORA: MIKHAELA SALIVEROS ALERETE

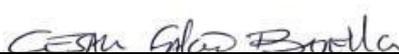
ORIENTADOR: Cesar Falcão Barella

CO-ORIENTADORA: Adivane Terezinha Costa

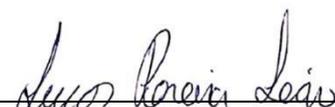
Aprovada em: 03 de novembro de 2020

BANCA EXAMINADORA:

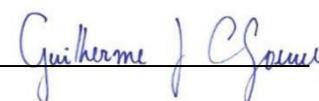
Prof. Dr. Cesar Falcão Barella

 DEAMB/UFOP

Prof. Dr. Lucas Pereira Leão

 DEGEO/UFOP

Prof. Dr. Guilherme José Cunha Gomes

 DEAMB/UFOP

Ouro Preto, 03/11/2020

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais por terem se doado completamente para que eu sempre tivesse as melhores oportunidades e opções, sempre acreditando e me apoiando em todas as situações. Esta conquista dedico a vocês.

Cecilia, Emilio e Irini por serem além de irmãos os meus melhores amigos, sempre ao meu lado torcendo para o meu melhor.

Agradeço ao Fabio por todo amor e companheirismo.

Agradeço aos idealizadores deste trabalho, Vicq por ajudar com a doação dos dados, Lucas e Adivane por me guiarem e estarem a disposição para ajudar a qualquer momento, César por todo conhecimento compartilhado, paciência e ajuda.

A Sociedade Excursionista e Espeleológica (SEE) deixo minha eterna gratidão por ser um ambiente de grandes amizades e aprendizados.

Aos meus amigos de Ouro Preto, em especial Bia, Gio, Nil e Vanessa. Ao meu lar em Ouro Preto, república Tropicália, agradeço por todo amor, apoio e amizade nessa trajetória.

Por fim a Universidade Federal de Ouro preto e ao Departamento de Geologia, pelo ensino gratuito e de qualidade, em especial aos professores Edgar, Maria Silvia e Isaac. Agradeço também aos técnicos e profissionais terceirizados que cuidam e colaboram diariamente com o funcionamento do departamento.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 APRESENTAÇÃO.....	1
1.2 LOCALIZAÇÃO.....	2
1.3 OBJETIVOS.....	4
1.4 JUSTIFICATIVA.....	4
2 CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL.....	7
2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	7
2.2 ESTRATIGRAFIA.....	8
2.2.1 Embasamento.....	9
2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas.....	9
2.2.3 Supergrupo Minas.....	10
2.2.4 Grupo Itacolomi.....	12
2.3 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO.....	12
3 GEOQUÍMICA AMBIENTAL E MAPEAMENTO GEOQUÍMICO.....	15
3.1 CONCEITOS GERAIS.....	15
3.2 INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW).....	16
3.3 KRIGAGEM.....	17
3.4 METAIS POTENCIALMENTE TÓXICOS.....	19
3.4.1 Arsênio.....	19
3.4.2 Cádmio.....	19
4 AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA.....	21
4.1 AVALIAÇÃO DO RISCO TOXICOLÓGICO.....	21
4.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO.....	21
4.3 ANÁLISE DE TOXICIDADE.....	23
4.4 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO.....	25
5 METODOLOGIA.....	29
5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	29
5.2 LEVANTAMENTO DE BANCO DE DADOS.....	29
5.3 PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA.....	30
5.3.1 Métodos interpoladores.....	30
5.3.2 Elaboração dos mapas de Risco Toxicológico.....	30
5.3.3 Correlação de bases cartográficas.....	32

5.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS.....	32
6 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	35
6.1 MODELO GEOESTATÍSTICO.....	33
6.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA.....	37
6.3 ANÁLISES FUTURAS.....	41
7 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	51
ANEXOS.....	57

INDÍCE DE FIGURAS

Figura 1.1: Alto do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Raphael Vicq Ferreira da Costa).....	2
Figura 1.2: Relação do uso e ocupação do solo com os municípios.....	3
Figura 1.3: Evolução do uso e ocupação do solo de 1987 até 2017 (Mapbioma).....	4
Figura 2.1: Mapa geológico simplificado para o Cráton São Francisco com destaque para o Quadrilátero Ferrífero (Modificado de Alkimim & Marshak 1998).....	7
Figura 2.2: Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero (Modificada de Alkmim & Marshak 1998).....	8
Figura 3.1: Representação gráfica do semivariograma (Modificado de Camargo <i>et al.</i> 2004).....	18
Figura 4.1: Etapas da avaliação de risco à saúde humana.....	21
Figura 4.2: Curva Dose-Resposta (Modificada de ATSDR 2005).....	24
Figura 4.3: Fator de incerteza e fator de modificação representado na Curva de Dose-Resposta (Modificado de USEPA 1989).....	25
Figura 5.1: Fluxograma ilustrando as etapas de elaboração de mapa de risco e de coeficiente de perigo.....	32
Figura 6.1: Relação do erro predito e mensurado com base na concentração do arsênio (a) e cádmio (b).....	36
Figura 6.2: Relação espacial do erro predito com mensurado segundo a concentração do arsênio (a) e cádmio (b).....	38
Figura 6.3: Mapa de Coeficiente de perigo do arsênio para adultos e crianças.....	41
Figura 6.4: Mapa de Coeficiente de perigo do cádmio para adultos e crianças.....	42
Figura 6.5: Risco carcinogênico do arsênio para adulto e criança.....	43
Figura 6.6: Relação dos índices de risco do arsênio (a) e perigo do cádmio (b) com a distância de pontos de abastecimento de água superficial.....	44
Figura 6.7: Regiões da área de estudo em que se tem requerimento de lavra com	

destaque para as zonas que estão na fase de concessão de lavra.....	45
Figura 6.8: Risco carcinogênico do As para adulto (a) e criança (b) em região de concessão de lavra.....	46
Figura 6.9: Risco carcinogênico atual do arsênio para adulto (a) e risco carcinogênico do arsênio para adulto projetado para concessão de lavra DNPM (b).....	47
Figura 6.10: Risco carcinogênico do arsênio atual para criança (a) e risco carcinogênico do arsênio para criança projetado para concessão de lavra DNPM (b).....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 3.1 : Cálculo e classificação do índice de dependência espacial segundo Guimarães 2004.....	18
Tabela 4.1 : Taxa de ingestão de água considerando padrões da população (Modificado de CETESB 2001).....	23
Tabela 6.1 : Valores de IDE, assimetria e curtose dos elementos As e Cd.....	35
Tabela 6.2 : Parâmetros comparáveis dos métodos IDW e Krigagem ordinária.....	36
Tabela 6.3 : Relação da litologia com as concentrações do Arsênio.....	39
Tabela 6.4 : Relação da litologia com as concentrações do Cádmiio.....	39
Tabela 6.5 : Valores máximos de coeficiente de perigo e risco carcinogênico.....	44

Resumo

A caracterização de uma área contaminada é de grande importância para que se possa compreender as consequências da relação do homem com o meio ambiente. Em razão disso, buscou-se compreender o que a interferência antrópica pode ocasionar no Quadrilátero Ferrífero, visto que é uma região com evidências de extração minerária desde do fim do século XVII até o tempo presente, e, somado a isso, esta região vem sofrendo uma crescente expansão demográfica. Sendo assim, ressalta-se a importância do estudo de uso e ocupação territorial para que seja possível analisar o impacto ambiental na região devido ao seu desenvolvimento, bem como compreender as consequências de exposição dos indivíduos a elementos potencialmente tóxicos. Nesse contexto, o presente trabalho apresenta a análise do risco toxicológico devido a ingestão de água contaminada por arsênio e cádmio na bacia hidrográfica do Alto Rio das Velhas. Para isso, foi necessário a utilização de ferramentas de geoprocessamento para realizar a junção de distintas bases cartográficas para obter como produto final um mapa de risco toxicológico para os elementos traço analisados (arsênio e cádmio). Após isso, buscou-se averiguar as atividades realizadas nas porções que apresentaram riscos toxicológicos mais elevados, afim de investigar a conexão entre o manejo do solo e o dano à saúde humana. Dessa maneira, os resultados demonstraram que o manejo agrícola foi o responsável por apresentar maiores danos a saúde. Além disso, o arsênio foi a substância que apresentou maiores danos, sobretudo para as regiões de Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos e Ouro Preto, ao passo que o cádmio apresentou riscos mais elevados nas zonas de Nova Lima, Raposos, Itabirito e Ouro Preto. Ademais, o trabalho buscou verificar tendências futuras de uso do solo na região, e, por meio de bases cartográficas de concessão de lavra pode-se prever e calcular o risco toxicológico. Ao averiguar a oscilação do risco na região considerando as atividades minerárias futuras, foi verificado que há uma tendência de diminuição de risco nestas áreas, sendo que o risco total se mostrou referente apenas ao risco carcinogênico do arsênio e ao coeficiente de perigo para o arsênio na faixa etária dos adultos.

Palavras chave: Contaminação de água superficial, Risco toxicológico, Manejo do solo.

Abstract

The characterization of a contaminated area is of great importance in order to understand the consequences of man's relationship with the environment. As a result, we sought to understand what anthropic interference can cause in the Quadrilátero Ferrífero, since it is a region with evidence of mining extraction from the end of the 17th century to the present time, and, in addition, this region has been suffering growing demographic expansion. Thus, the importance of the study of territorial use and occupation is emphasized so that it is possible to analyze the environmental impact in the region due to its development, as well as to understand the consequences of exposure of individuals to potentially toxic elements. In this context, the present work presents the analysis of the toxicological risk due to the ingestion of water contaminated by arsenic and cadmium in the hydrographic basin of the Alto Rio das Velhas. For this, it was necessary to use geoprocessing tools to join different cartographic bases to obtain as a final product a toxicological risk map for the trace elements analyzed (arsenic and cadmium). After that, we tried to investigate the activities carried out in the portions that presented higher toxicological risks, in order to investigate the connection between soil management and damage to human health. In this way, the results showed that agricultural management was responsible for the greatest damage to health. In addition, arsenic was the substance that showed the greatest damage, especially for the regions of Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos and Ouro Preto, while cadmium presented higher risks in the areas of Nova Lima, Raposos, Itabirito and Ouro Preto. In addition, the work sought to verify future trends in land use in the region, and, through cartographic bases of mining concession, toxicological risk can be predicted and calculated. When investigating the fluctuation of risk in the region considering future mining activities, it was found that there is a tendency to decrease risk in these areas, with the total risk being shown referring only to the carcinogenic risk of arsenic and the hazard coefficient for arsenic in age group of adults.

Key words: Surface water contamination, Toxicological risk, Soil management.

1.1 APRESENTAÇÃO

A Constituição da República Federativa do Brasil, promulgada em 1988, estabelece, em seu artigo 225, que a sadia qualidade de vida da população está vinculada a manutenção de um meio ambiente equilibrado (Brasil 1988). Dessa forma, a conservação do meio ambiente é importante para garantir, às gerações atuais e futuras, a manutenção da saúde dos indivíduos que se relacionam naquele meio. Logo, é crescente o interesse em preservar os bens naturais e aprimorar o estudo nas mais diversas áreas que se correlacionam com a área ambiental, dentre as quais pode-se citar a de geoquímica ambiental e de análise toxicológica de substâncias químicas, ambas foco dessa pesquisa.

A geoquímica ambiental é um tema que engloba as anomalias químicas encontradas em sistemas naturais, em sua maioria suscitadas por atividades antrópicas, e sua influência na biota e na vida humana (Carvalho 1989), sendo uma tarefa cercada de incertezas a determinação de padrões considerados naturais em sistemas antropizados. A análise toxicológica envolve, dentre outros estudos, a pesquisa sobre o nível de toxicidade das substâncias químicas, as formas de ingresso dessas substâncias no organismo humano e o efeito deletério sobre a saúde, sendo saúde definida, segundo a OMS (1984), como um estado de completo bem-estar físico, mental e social, e não apenas a ausência de doença.

A garantia desse direito universal esbarra muitas vezes na incompreensão do território onde vivemos, o que decorre da falta de aptidão entre a capacidade de suporte do meio e o desenvolvimento das atividades humanas econômicas e sociais, implicando no uso não racional e sustentável dos recursos disponíveis. Essa falta de controle, que pode ser contornada com instrumentos legais, como, por exemplo, o Zoneamento Ambiental, pode ser evidenciada no nosso dia a dia, com a ocupação inadequada de áreas susceptíveis a processos geodinâmicos ou vulneráveis hidrogeologicamente, mas também pode ser pensada do ponto de vista geoquímico ou toxicológico.

Isso se torna evidente quando são analisadas as pesquisas realizadas ao longo do Quadrilátero Ferrífero, uma região de relevante interesse mineral localizada no centro-sul do estado de Minas Gerais, junto a borda sul do Cráton São Francisco (Almeida 1977). Essa região tem uma história extrativo-mineral que remonta ao final do século XVII, sobretudo, com a exploração do ouro e do ferro. Dessa forma, o efeito danoso e poluidor da atividade minerária na região é histórico, o que tem contribuído negativamente para fatores ambientais de risco (Oliveira 1999), na medida em que aumenta as anomalias geogênicas e antropogênicas existentes, podendo expor a população a elementos tóxicos. Nessa região, a concentração elevada de compostos altamente tóxicos é atestada por uma diversidade de trabalhos (CPRM 2010; Assunção & Cunha 2009; Borba *et al.* 2000; Eleutério 1997; Parra *et al.* 2012; Gonçalves

& Lena 2013; Costa 2007; Vicq 2015), envolvendo várias substâncias químicas (As, Pb, Zn, Cu, Cd, Co, Cr, Ni, Li, etc.) e sistemas ambientais (Água superficial e subterrânea, solo, sedimento de corrente, etc.).

Sendo assim, é importante a compreensão da distribuição de elementos químicos ao longo do território, principalmente os de elevada periculosidade. Dessa forma, este trabalho busca fazer uma investigação da água superficial do Alto Rio das Velhas para o arsênio e cádmio, com foco na análise do risco toxicológico existente devido a ingestão desta água, buscando adequar as atividades humanas a esse cenário e minimizar a exposição da população a elementos que podem ser prejudiciais à saúde.

1.2 LOCALIZAÇÃO

A área foco de estudo diz respeito ao Alto Rio das Velhas, localizado na região central do Quadrilátero Ferrífero (Figura 1.1).

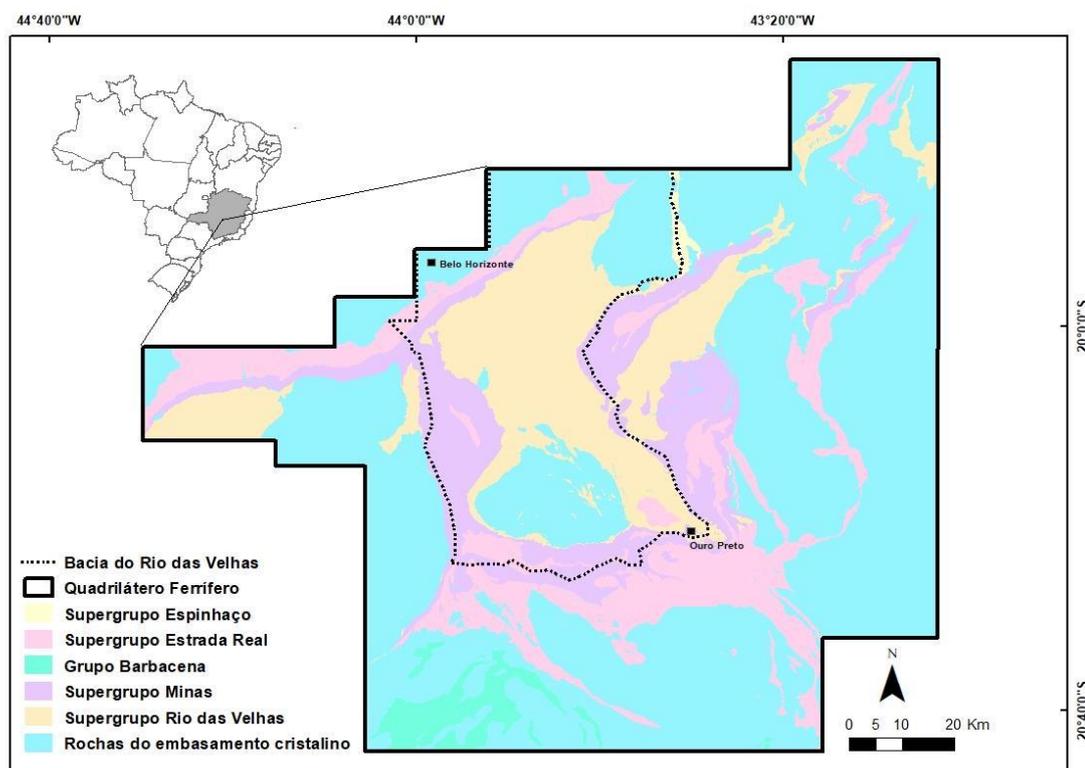


Figura 1.1:Alto do Rio das Velhas no Quadrilátero Ferrífero (Fonte: Mapa geológico do Quadrilátero Ferrífero 2019).

A Bacia Hidrográfica do Alto Rio das Velhas, inserida na porção central do estado de Minas Gerais, teve sua ocupação marcada pela exploração desenfreada de seus recursos naturais, o que resultou em processos de erosão, poluição e degradação que ocorrem até os dias atuais. Além disso, essa região teve um surto de industrialização e urbanização na década de 1960, acarretando em um aumento da

densidade demográfica nas áreas urbanas (Raposo *et al.* 2011). Com isso, esta bacia integra aproximadamente 4,5 milhões de habitantes e 51 municípios, sendo que, dentre eles, destaca-se 10% da região metropolitana de Belo Horizonte (RMBH) (Polignano *et al.* 2001). Mas especificamente a cabeceira da área de estudo é composta por 9 municípios: Belo Horizonte, Caeté, Sabará, Rio Acima, Santa Luzia, Nova Lima, Raposos, Itabirito e Ouro Preto, e, tendo em vista a subdivisão do manejo do solo (Mapbioma 2017), tem-se que 58% compõe uma área de Formação natural florestal e não florestal, 22% vale ao uso agropecuário, 6% a zona urbana, 1 % não é detectado e 13% a zona industrial-mineração (Figura 1.2).

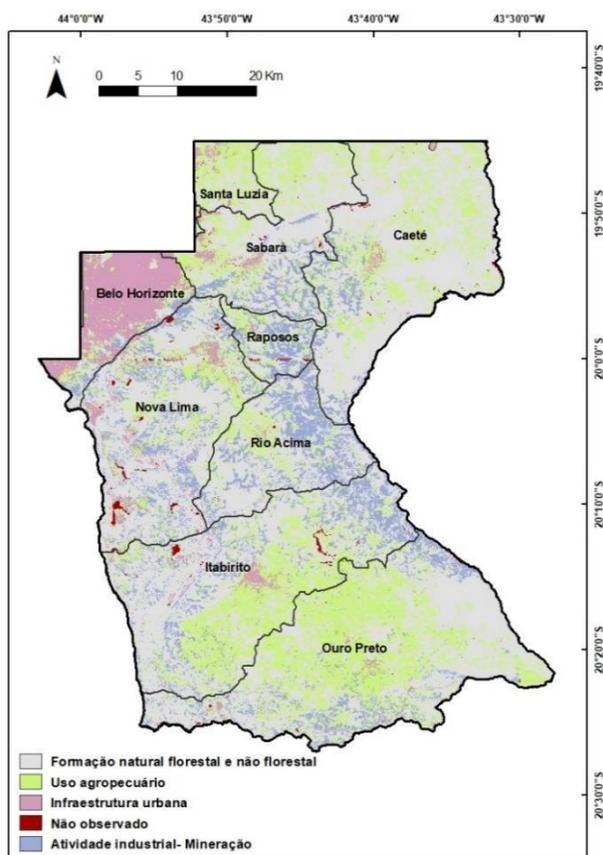


Figura 1.2: Relação do uso e ocupação do solo com os municípios (Mapbioma 2017).

A bacia passou por muitas modificações territoriais nos últimos anos, sendo que pouco mais de 50% do seu território corresponde a formações naturais. O maior uso antrópico corresponde ao uso agropecuário, seguindo por atividades industriais e urbanas (Mapbioma 2017). As maiores alterações associadas ao uso e ocupação do solo estão relacionadas ao uso agropecuário, que diminuiu 17%, e à infraestrutura urbana, que aumentou cerca de 11%. Ainda, de 1987 a 2017, as atividades industriais/de mineração diminuíram 7% na região e as formações naturais florestais e não florestais aumentaram em torno de 9% (Figura 1.3).

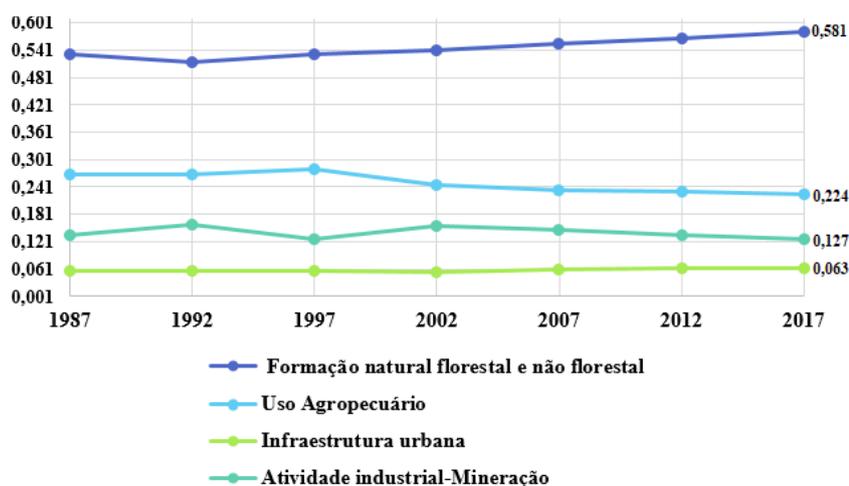


Figura 1.3: Evolução do uso e ocupação do solo de 1987 até 2017 (Mapbioma).

1.3 OBJETIVOS

O presente trabalho tem como finalidade avaliar o risco toxicológico da exposição da população ao arsênio e cádmio encontrados em águas fluviais de superfície da cabeceira da bacia hidrográfica do Alto Rio das Velhas.

Destaca-se como objetivos específicos:

- Construção de mapas geoquímicos de isovalores para os elementos metálicos estudados;
- Análise temporal do uso e ocupação do solo e da taxa de exposição aos elementos investigados;
- Análise espacial do risco toxicológico da área de estudo em função da evolução do uso e ocupação do território;
- Comparação das informações produzidas com parâmetros normatizados pela legislação brasileira.

1.4 JUSTIFICATIVA

Tendo em vista os diversos ramos de estudo possíveis da geologia, a geologia médica, é o único que estabelece uma relação da geoquímica ambiental com os danos à saúde humana, ou seja, interpreta a interferência da disposição regional de elementos químicos, sobretudo metais pesados, associando-os com a contaminação artificial ou natural (Scarpelli 2003) e suas consequências derivadas. Este tema,

por sua vez, adquire grande relevância no Brasil, já que o país apresenta clima tropical, e, por isso, há um maior fracionamento de elementos químicos e acumulação de níveis tóxicos. Além disso, por ser uma nação em desenvolvimento, grande parte dos indivíduos dependem de fonte localizada de água e alimento e, por isso, alterações químicas neste meio são mais relevantes para o cotidiano das pessoas (Cortecci 2006).

Sendo assim, a importância desta pesquisa incide na compreensão da distribuição de elementos traços no meio ambiente, bem como o efeito toxicológico dessas substâncias nas diferentes formas de uso e ocupação do solo. Dessa forma, este trabalho visa, de forma preliminar, investigar, por meio de uma macro análise, a exposição da população a elementos em função dos seus hábitos e verificar as atividades que mais contribuem para a exposição da população ao risco toxicológico, fomentando o uso racional e sustentável dos recursos ambientais como preconizam alguns princípios ambientais.

Alderete, M. S. 2020, Análise do Risco toxicológico e sua implicação no planejamento territorial...

CONTEXTO GEOLÓGICO REGIONAL

2.1 CONTEXTO GEOTECTÔNICO

O Quadrilátero Ferrífero é uma região que inclui dois componentes tectônicos: o Cráton São Francisco (CSF) e a Faixa Brasileira Araçuaí (Almeida 1977) (Figura 2.1). O CSF é a porção que foi formada no final do Ciclo Transamazônico próximo de 2,0 Ga (Barbosa & Barbosa 2017), e, após o Paleoproterozóico, os terrenos não sofreram mudanças significativas. A Faixa Araçuaí é uma das Faixas Orogênicas Brasileanas, isto é, uma região no entorno do CSF (Pedrosa-Soares *et al.* 2001) e que, durante a Orogênese Brasileira, sofreu movimentos epigenéticos que resultou em cinturões de dobramentos (Almeida 1977).

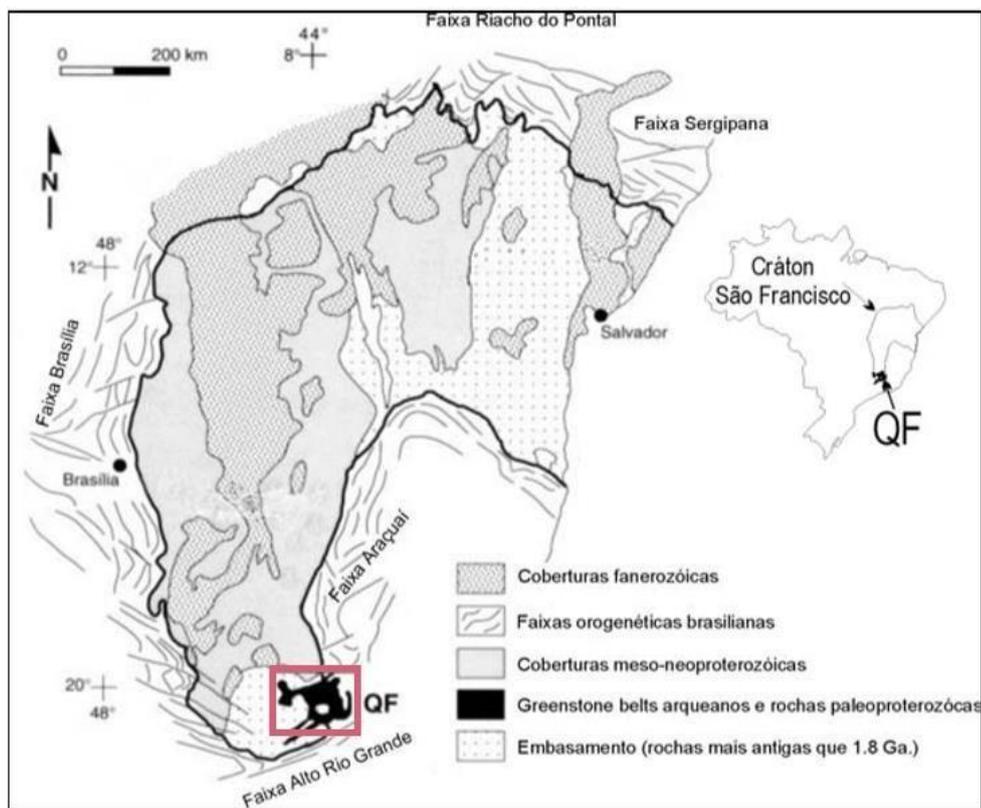


Figura 2.1: Mapa geológico simplificado para o Cráton São Francisco com destaque para o Quadrilátero Ferrífero (Modificado de Alkmim & Marshak 1998).

2.2 ESTRATIGRAFIA

A região do Quadrilátero Ferrífero contém as unidades estratigráficas mais antigas do Cráton São Francisco, com idades variando do Arqueano ao Proterozóico. Primeiramente, tem-se um embasamento cristalino datados de 2,9-3,2 Ga (Carneiro *et al.* 1995), após isso, há a deposição de três unidades supracrustais: Supergrupo Rio das Velhas com idade máxima de 2,8 Ga Ba (Schrank & Machado 1996b); Supergrupo Minas com idade de 2,0 Ga a 2,5 Ga (Renger *et al.* 1995) e o Grupo Itacolomi com idade de 2,0 Ga (Machado *et al.* 1996) (Figura 2.2).

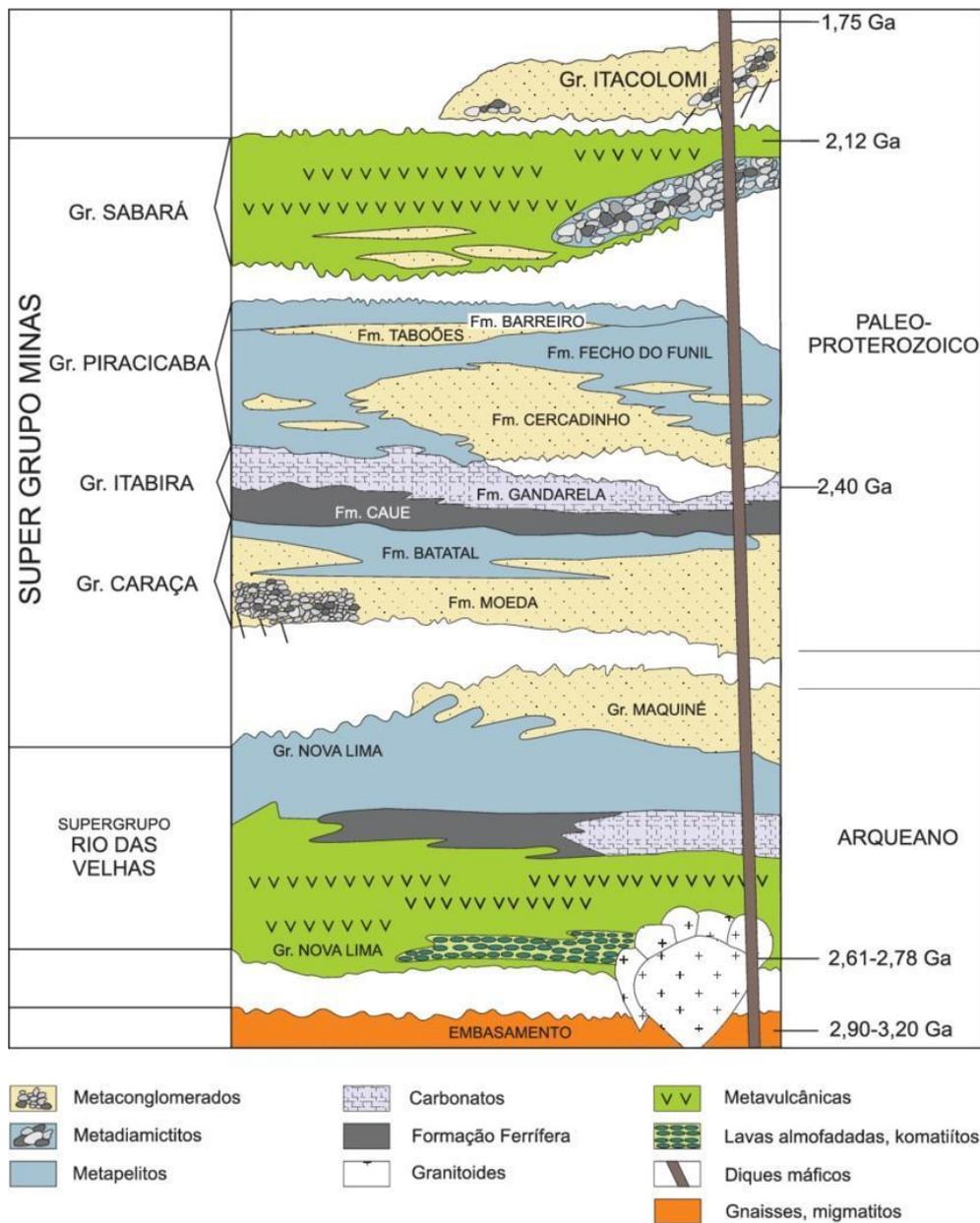


Figura 2.2: Estratigrafia do Quadrilátero Ferrífero (Modificada de Alkmim & Marshak 1998).

2.2.1 Embasamento

As rochas do embasamento são constituídas, principalmente, por ortognaisses com bandas leucocráticas e mesocráticas, de composição tonalítica e granodiorítica, que apresentam traços de fusão parcial (migmitização) (Hasui *et al.* 2012), essas rochas, por sua vez, perfazem os complexos Caeté, Bonfim, Bação e Belo Horizonte (Herz 1970). A banda mesocrática é rica em plagioclásio e biotita, apresentando textura lepidoblástica. Já a leucocrática contém, predominantemente, plagioclásio, quartzo e microclínio, com textura granoblástica (Lana *et al.* 2013). Além do mais, intrusões de leucogranitos, veios aplíticos e diques de pegmatitos são bastante comuns nesses gnaisses, ocorrendo, também granitos que estão associados a extensos corpos ígneos, com uma foliação pouco desenvolvida (Farina *et al.* 2016).

2.2.2 Supergrupo Rio das Velhas

O Supergrupo do Rio das Velhas é unidade supracrustal mais antiga, datado do arqueano. As rochas que perfazem esta unidade são metavulcânicas e metassedimentares típicas de uma sequência do greenstone belt do Arqueano, caracterizadas por rochas máficas e ultramáficas (Dorr 1969). Além disso, também contém sedimentos de fundo oceânico com influência de cinzas e detritos vulcânicos. Isto, por sua vez, é percebido devido a estruturas conhecida como pillow-lavas, que são formadas quando há rápido esfriamento do magma devido um contraste de temperatura, ou seja, formaram-se quando o magma basáltico é lançado no fundo marinho (Hasui *et al.* 2012). Estas rochas sofreram processos orogênicos, ocasionando em alterações hidrotermais, e metamorfismos da fase xisto verde até baixo anfíbolito (Zucchetti *et al.* 2000), com isso, os basaltos e sedimentos geraram diversos tipos de xistos (Hasui *et al.* 2012).

O Supergrupo Rio das Velhas foi dividido por Dorr (1969) em dois grupos: Nova Lima e Maquiné.

Grupo Nova Lima

O Grupo Nova Lima é a unidade que está localizada na base do Supergrupo Rio das Velhas e, além disso, é constituído por um conjunto de rochas originalmente vulcânicas e sedimentares, aos quais sofreram um metamorfismo de baixo grau. Pode-se realçar rochas ultrabásicas, como metaperidotitos, serpentinitos e esteatitos, e rochas básicas, como o basalto. Também pode-se ter rochas vulcânicas, que, em geral são komatiitos, basaltos toleíticos, rochas vulcanoclásticas e, raramente, vulcânicas félsicas. Enquanto que as rochas sedimentares são, sobretudo, metapelitos, formação ferrífera bandada, sedimentos químicos sílico carbonáticos e quartzitos (Hasui *et al.* 2012).

Grupo Maquiné

O Grupo Maquiné se encontra no topo do Supergrupo Rio das Velhas, e, de acordo com Dorr (1969), o contato entre o Grupo Maquiné e Grupo Nova Lima é tanto gradual quanto marcado por zonas de falhas. Dorr (1969) descreveu este grupo como uma sequência do tipo molassa, isto é, uma combinação clástica composta por conglomerados e arenitos com 2000m de espessura, sendo que, nota-se uma sucessão ascendente crescente de arenitos, enriquecido em quartzo e conglomerado em direção ao topo.

Além disso, o Grupo Maquiné se subdivide em duas Formações: Casa Forte (Gair 1962), que é a de topo, e Palmital (O'Rourke 1957), a basal. Esta separação foi feita devido a interpretações em relação ao ambiente, pois a Formação Palmital foi depositada em um ambiente marinho, ao passo que a Formação Casa Forte é interpretada como leques submarinos (Dorr 1969).

2.2.3 Supergrupo Minas

O Supergrupo Minas é um pacote de 6000m de espessura de rochas clásticas e químicas (Alkimin & Marshak 1998). Este Supergrupo, por sua vez, foi depositado em uma bacia, e, por ser uma unidade mais jovem, teve sedimentos oriundos da erosão do Complexo granito-gnaíssico e do Supergrupo Rio das Velhas (Hasui *et al.* 2012). Além disso, a sedimentação desta bacia deriva de uma sedimentação continental e, posteriormente, marinha. Com isso, teve a formação de arenitos, conglomerados, pelitos, rochas carbonáticas e formação ferrífera bandada. Vale ressaltar, que inicialmente, esta sedimentação deu-se em ambiente anóxico e, a posteriori, tem-se registro de atividades de organismos marinhos capazes de realizar a fotossíntese, tais como algas e bactérias, o que foi essencial para a precipitação das formações ferríferas (Hasui *et al.* 2012). Após este processo de sedimentação, ocorreu dois eventos geológicos ligados a orogenia, o evento Transamazônico entre 2,1 e 1,8 Ba (Hurley *et al.* 1967), e o evento Brasileiro entre 0,7 e 0,45 Ga Ma, estes, por sua vez, são os responsáveis por gerar cadeias de montanhas de grande extensão e, além disso, transformaram as rochas sedimentares em metamórficas.

O Supergrupo Minas pode ser subdividido em três unidades: Grupo Caraça, Grupo Itabira e Grupo Piracicaba (Hasui *et al.* 2012).

Grupo Caraça

É uma unidade clástica basal marcada por um começo de rifteamento, demarcando, assim, a Formação Moeda (Dorr 1969). Esta unidade, por sua vez, é constituída por quartzitos com intercalações de filito e níveis conglomeráticos, onde, estes metaconglomerados podem ter

a presença de ouro, pirita detrítica e urânio (Renger *et al.* 1988). Acima da Formação Moeda, tem-se um limite transicional em que passa a ter a Formação Batatal (Wallace 1965). Esta Formação demarca uma evolução de um rifteamento para uma margem passiva (Alkimim & Marshak 1998), isto é, tem-se uma sedimentação de ambiente marinho para ambiente de costa (Moraes 1985). Dessa forma, é formada por filitos sericíticos, podendo ser carbonosos ou ferruginosos (Hasui *et al.* 2012). Além disso, pode-se ter uma espessura de 30m a 200m na região ocidental e central da Serra do Curral (Dorr 1969).

Grupo Itabira

O Grupo Itabira é resultado da evolução de uma transgressão marinha em que favoreceu uma sedimentação química rica em ferro (Dorr 1969). Com isso, deu-se, aproximadamente, 350 m da Formação Cauê, composto por itabiritos (formação ferrífera bandada). Estes itabiritos são quartzo ou dolomitos associados com corpos lenticulares de hematita (Machado *et al.* 1996). Vale ressaltar que a Formação Cauê é atualmente a unidade mais importante economicamente do QF, sendo um depósito de óxido de ferro rico em hematita (Rosiere *et al.* 2008). Acima desta formação tem-se a Formação Gandarela, com 600 m de espessura (Machado *et al.* 1996), constituída, sobretudo, por mármore dolomíticos, itabiritos e filitos (Hasui *et al.* 2012) com estruturas estromatolíticas preservadas (Souza & Miller 1984).

Grupo Piracicaba

O Grupo Piracicaba é composto por 1300m de metassedimentos que apresentam areias ricas em quartzo de granulometria fina e bem selecionada, aos quais, acendem para filitos e filito grafitoso (Dorr 1969). A unidade basal deste grupo é a Formação Cercadinho, caracterizada pela alternância de quartzitos com filitos ferruginosos. Logo acima tem-se filitos quartzosos, filitos dolomíticos e lentes de dolomito, que representam a Formação Fecho do Funil. E, por fim, tem-se as Formações Taboões e Barreiras, as quais ocorrem de forma restrita e compreendem ortoquartzitos e filitos grafitosos, respectivamente (Hasui *et al.* 2012).

Grupo Sabará

O Grupo Sabará é a unidade do topo do Supergrupo Minas, além disso, é a mais espessa, compreendendo 3,5 km de espessura, sendo uma sequência de metapelitos, grauvacas, conglomerados líticos e diamictitos (Reis *et al.* 2002). Estas rochas são interpretadas como sedimentos sin-orogênicos (Barbosa 1979), resultado de uma colisão de arco magmático e a bacia do cráton SF durante a orogenia do Riachão (Alkmim & Martins-Neto 2012). Esta formação, formada durante a inversão da margem passiva do Supergrupo Minas, é interpretada como sendo representada por depósitos turbidíticos de leques submarinos (Alkmim & Martins-Neto 2012).

2.2.4 Grupo Itacolomi

O Grupo Itacolomi é uma unidade que se encontra nos limites do QF, com destaque na porção sul de Ouro Preto (Hasui *et al.* 2012). As rochas deste grupo abrangem 2km de espessura de grãos médios a grossos de metarenitos, metaconglomerados e filitos (Alkmim & Martins-Neto 2012). Além disso, tem-se evidências de estruturas sedimentares primárias como marcas de ondas e estratificações cruzadas, as quais exibem mudanças abruptas laterais das fácies sedimentares (Hasui *et al.* 2012). Estas características sugerem que o Grupo Itacolomi representa a interface entre um depósito marinho e continental (Machado *et al.* 1996).

2.3 EVOLUÇÃO GEOLÓGICA DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO

O estudo da geologia do Quadrilátero Ferrífero originou-se por meio de mapeamentos realizados pelo *United States Geological Survey (USGS)* e Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM), entre o período de 1946 e 1962 (Dorr II 1969), e, a partir disso surgiram diversos estudos em relação a esta região. Dessa forma, tendo em vista a complexidade estrutural da área, foram propostas inúmeras interpretações de modelos de evolução cinemática, tais como Drake & Morgan 1980, Ladeira & Viveiros 1984, Chemale Jr *et al.* 1991, Chauvet *et al.* 1994 e Marshak & Alkmim 1989.

Entretanto, Marshak & Alkmim (1989) explicam o arcabouço estrutural do QF de uma forma mais complexa envolvendo eventos de contração e extensão, onde destacam-se três conjuntos de estruturas contracionais com vergências distintas, sendo, cronologicamente denominado de evento D1 (Orogenia Transamazônica), D2 (Orogenia Uruçuano) e D3 (Orogenia Brasileiro), e uma estrutura extensional (DE) ao qual ocorreu entre os eventos D2 e D3.

Sendo assim, o primeiro evento, a orogênese Transamazônica, datada de 2.1 Ga, ocasionou estruturas de vergência NE-SW. O resultado dessa deformação foram zonas de cisalhamento dúctil e dúctil-rúptil em locais onde existiam contatos entre TGG's e rochas supracrustais, chegando a condições de fácies xisto verde alto, além disso a deformação dúctil deste evento foi a responsável pela formação da Sinclinal Gandarela e Anticlinal de Conceição. Após isso, ocorreu alterações em níveis crustais rasos no evento D2, onde houve o redobramento da xistosidade D1, gerando dobras normais com clivagens de orientações E-W. Este evento propiciou a disposição dos sinclinais Moeda e Dom Bosco em torno do Complexo do Bação. Por conseguinte, teve-se o evento DE responsável pela formação da bacia do Espinhaço, desse modo, identificou-se falhas normais, indicadores cinemáticos e intrusão de diques máficos. Por fim, tem-se a orogênese Brasileira, que ocorreu por volta de 580-560 Ma (Alkmim & Noce

2006). Este evento apresenta caráter compressional, em que resultou na formação do supercontinente Gondwana, exibindo empurrões com vergência para W e transcorrências (Hasui *et al.* 2012), tal como pode ser observado no flanco leste do sinclinal Moeda, onde tem-se o Complexo Bação cavalgado sobre as rochas do Supergrupo Minas. A consequência deste evento foram estruturas de crenulação associada a clivagens, além de dobras abertas e fechadas, ambas com direção N-S (Alkmim & Marshak 1998).

GEOQUÍMICA AMBIENTAL E MAPEAMENTO GEOQUÍMICO

3.1 CONCEITOS GERAIS

O estudo da geoquímica, previamente, consistia no conhecimento sobre os elementos químicos da Terra em relação ao espaço e ao tempo (Mason 1971). Dessa forma, a interação de dois ambientes geoquímicos distintos e a conduta dos elementos químicos regem um ciclo conhecido como ciclo geoquímico (Rohde 2004). Estes ambientes, por sua vez, são definidos como profundo e superficial, sendo o primeiro a zona inferior da crosta continental e oceânica, onde há processos magmáticos e metamórficos, e o segundo, onde predominam processos de erosão e sedimentação sob baixas pressões e temperaturas (Carvalho 1995; Licht 1998). É no ambiente superficial que ocorrem as alterações químicas derivadas das atividades humanas e, em vista disso, o estudo da geoquímica pode ser ampliado, resultando na geoquímica ambiental.

O estudo de geoquímica ambiental pode levar em consideração alguns fatores, tais como, afinidade geoquímica, mobilidade química e background. A afinidade geoquímica é a divisão dos elementos químicos em classes de acordo com o seu comportamento de migração (Goldschmidt 1937), o qual é dependente também de fatores externos, tal como condições ambientais. A mobilidade química é a capacidade com que um elemento é disperso em um ambiente (Levinson 1974). Esta mobilidade é regida, sobretudo, pela solubilidade dos minerais em diferentes condições de pH e Eh do meio (Dold 1999). Por fim, o background geoquímico é o responsável pelas concentrações naturais dos elementos químicos em um dado material, tais como rochas, solos ou água (Plumlee 1999).

Para aprimorar o estudo referente à geoquímica ambiental, pode-se fazer uso do mapeamento geoquímico, que consiste em uma ferramenta utilizada com o intuito de evidenciar a distribuição espacial de elementos químicos em locais não amostrados. Esse tipo de abordagem contribui para auxiliar a análise de diversos estudos relacionados, como, por exemplo, a exploração mineral e a identificação de valores anômalos (Caritat *et al.* 2007) e a geologia médica. Afim de gerar esses mapas de isovalores e estimar a concentração a partir de amostras coletadas em campo, é de suma importância estimar a densidade de amostragem, ou seja, a distância das amostras, a partir das quais é possível aplicar diversos modelos de análise estatística. Este processo, conhecido como interpolação, permite uma previsão das variáveis em locais que não foram coletadas medidas (Gomes *et al.* 2007). Dentre os métodos existentes de interpolação, ressalta-se o Inverso Ponderado da Distância (IDW) e a Krigagem, ambos de grande utilização e aplicabilidade no contexto do mapeamento geoquímico (Gardiman *et al.*

2012; Lucas *et al.* 2014; Toro & Melo 2009; Silva *et al.* 2008; Jakob & Young 2016). O primeiro pondera pesos de acordo com as distâncias, ou seja, quanto mais próximo do ponto a ser estimado, maior é o peso a ser atribuído (Alvarenga *et al.* 2010), ao passo que a Krigagem realiza a análise espacial por meio de uma função semivariograma, isto é, uma definição matemática entre a variância de pares de pontos e a sua respectiva distância (Journel & Huijbregts 1978).

Dessa forma, a realização de um estudo geoquímico pode propiciar informações sobre a geologia e vice-versa, permitindo compreender a distribuição de elementos principais, metais pesados e elementos traço nos sistemas analisados, bem como as interações entre esses elementos e o meio onde estão inseridos. Essa análise, quando auxiliada por um mapa geoquímico de isovalor, pode evidenciar a distribuição espacial das concentrações, ressaltando os locais com maior ou menor disponibilidade dos elementos investigados e, conseqüentemente, com maior ou menor exposição da população em função dos hábitos praticados.

3.2 INVERSE DISTANCE WEIGHT (IDW)

A Ponderação do Inverso das Distâncias é um método rápido, pois a definição dos pesos para a ponderação linear é feita de uma maneira simplista. Primeiramente, determina-se os valores nos pontos interpolados usando uma combinação linear ponderada dos pontos amostrados e, com isso, atribui-se o peso de cada ponto, sendo este peso o inverso de uma função da distância (Marcuzzo *et al.* 2011). A fórmula de cálculo deste método é representado pela Equação (3.1).

$$Z = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{Z_i}{h_{ij}^b}}{\sum_{i=1}^n \frac{1}{h_{ij}^b}} \quad \text{Eq. 3.1}$$

Onde Z é o valor interpolado para o nó do reticulado; n se refere a quantidade de pontos amostrados utilizados na interpolação; Z_i é o valor (resíduo) do ponto amostrado vizinho ao nó; b é o expoente de ponderação e h_{ij} é a distância entre o nó da grade e o valor do ponto amostrado.

Vale ressaltar que, segundo Mello (2003), o uso do expoente dois é o mais adequado para gerar bons resultados. Além disso, este expoente é considerado baixo e, por isso, resalta anomalias locais (Landim 2000), o que dependendo do objetivo da análise pode ser interpretado como uma desvantagem. Esse processo é conhecido como “*bull eyes*” e está relacionado a formação de círculos concêntricos na região de elevadas concentrações (Jakob & Young 2016; Grinstead *et al.* 2006). Devido ao uso do expoente dois ser mais comum, o IDW é conhecido também como Inverso do Quadrado da Distância (IQD).

3.3 KRIGAGEM

Esta metodologia se diferencia da interpolação por média móvel ponderada devido a análise espacial a partir de semivariogramas, além de apresentar uma menor variância (Vicente 2004). Segundo Landim (2000), essa abordagem metodológica não é recomendada quando o número de pontos amostrados disponíveis para interpolação é inferior a trinta. Dentre os algorítmicos conhecidos tem-se a krigagem simples, da média, universal e ordinária (Yamamoto *et al.* 2013), sendo o último o estimador utilizado neste trabalho.

A krigagem ordinária é o método de estimação linear que objetiva apresentar um erro residual nulo (Lima 2000). Com o objetivo de representar quantitativamente a variação do fenômeno regionalizado no espaço, o equacionamento dessa abordagem conta com o ajuste de um semivariograma experimental, fazendo uso de um modelo matemático considerado representativo do evento investigado (Landim 2003). É usual o ajuste dos seguintes modelos teóricos: modelo esférico, modelo exponencial e modelo gaussiano (Camargo *et al.* 2004).

O semivariograma apresenta três fundamentos que precisam ser analisados: efeito pepita, patamar e o alcance (Figura 3.1). O efeito pepita, também chamado de variância aleatória, representa os erros derivados das microvariações, e, quanto mais próximo de zero for o efeito pepita, menor a variabilidade, isso significa dizer que se tem pequenas oscilações em curtas distâncias, ou seja, a amostragem é suficiente para a variabilidade espacial (Yamamoto *et al.* 2013). No entanto, este efeito pode representar também os erros de medição, por isso, um efeito pepita alto não se justifica somente pela divergência entre as distâncias (Isaaks & Srivastava 1989). O alcance é uma medida de distância que representa a correlação espacial das amostras, isto é, a partir desse ponto em diante as amostras começam a ser independentes, transparecendo o nível de homogeneização do método (Isaaks & Srivastava 1989). O patamar reflete o ponto do semivariograma em que se inicia a perda de estrutura espacial, ou seja, equivalente ao seu alcance. Dessa forma, deste ponto em diante a variância da diferença entre pares de amostras torna-se aproximadamente constante (Camargo *et al.* 2004).

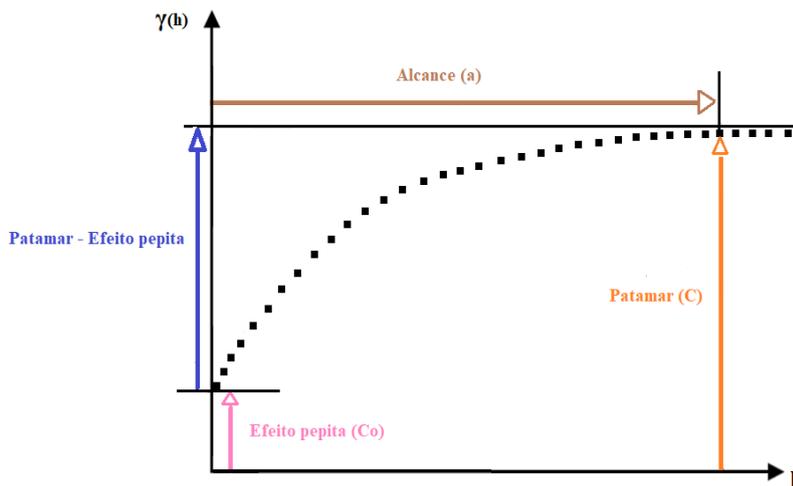


Figura 3.1: Representação gráfica do semivariograma (Modificado de Camargo *et al.* 2004).

Para verificar a aplicabilidade do método de krigagem pode-se fazer uso do índice de dependência espacial (IDE), também denominada grau de aleatoriedade, dividindo-se o efeito pepita pelo patamar (Guimarães 2004) (Tabela 3.1). Quanto menor o efeito pepita em relação ao patamar, menor a variância e maior é a confiança da estimativa, além disso, denomina-se efeito pepita puro quando os valores de patamar e efeito pepita são análogos, isto indica que as diferenças entre os valores medidos são aleatórias (Sturaro 2015) e, com isso, nesse caso não há estudo semivariográfico, portanto, deve-se utilizar outro método de interpolação (Landim 2006).

Tabela 3.1: Cálculo e classificação do índice de dependência espacial segundo Guimarães (2004).

$IDE = \frac{\text{Efeito Pepita}}{\text{Patamar}}$	Dependência espacial fraca	Dependência espacial moderada	Dependência espacial forte
	$IDE \geq 0,75$	$0,25 < IDE < 0,75$	$IDE \leq 0,25$

Cabe ressaltar que o uso da krigagem exige uma análise exploratória preliminar com o objetivo de verificar a normalidade dos dados e, caso necessário, realizar possíveis transformações para remodelar a distribuição de frequência. Existem dois parâmetros que estão diretamente ligada a normalidade do dados: assimetria e curtose. A assimetria é a comparação da média e mediana, onde valores baixos indicam pouca desconformidade entre estes padrões, já a curtose retrata a dispersão dos valores em torno da média (Yamamoto & Landim 2013). Apesar dessa etapa ser rotineira, a normalidade não é uma obrigatoriedade do método, mas é um atributo importante, visto que tem como objetivo reduzir a diferença entre valores discrepantes e, com isso, garantir maior credibilidade ao uso do método (Cressie 1991; Yamamoto & Landim 2013; Vieira & Neto 1995).

3.4 METAIS POTENCIALMENTE TÓXICOS

Os metais pesados, também chamados de metalóides, são aqueles elementos que apresentam peso específico maior que 5 g/cm^3 (Tan 2000), além de que são considerados elementos traço por serem comumente encontrados em poucas partes por milhão (apud Mattiazzo Prezoto 1994). Entretanto, alguns autores (Amaral 1993; Martins 2005; apud Duffus 2002) abrangem este conceito de metal pesado e integra os elementos associados a contaminações e poluições nesta classe. Visto isso, destaca-se para este trabalho os seguintes metais pesados:

3.4.1 Arsênio

O Arsênio (As) é o elemento principal de mais de duzentas classes minerais existentes na natureza, concentrado, primordialmente, em áreas mineralizadas, sendo os sulfetos, sulfoarsenatos e arsenatos os mais comuns (Borba 2002). Além disso, este elemento pode ser encontrado como impureza em minerais como pirita (FeS_2) e galena (PbS). Entretanto, embora este elemento tenha uma origem natural, ele pode ser associado a algumas atividades antrópicas, tais como: preservação de madeiras, pesticidas e inseticidas, rejeitos originados da mineração e das atividades de refino de metais não ferrosos (sólidos e gasosos), tintas e tubos fluorescentes (Fergusson *et al.* 1990).

O Arsênio ocorre naturalmente como compostos orgânicos e inorgânicos em diversos estados de oxidação, sobretudo, pentavalente (As^{+5}) e trivalente (As^{+3}). O arsênio inorgânico é apontado como o metal mais letal ao homem, sendo que o arsênio trivalente é 60 vezes mais tóxico do que o pentavalente (Mabuchl 1979). De forma geral, o contato com o arsênio ocorre devido ao consumo de águas contaminadas, absorção dérmica, ingestão de partículas de solo e inalação de gases (WHO 2001). A ingestão de água contaminada, uma das formas mais intensas de ingresso da substância no organismo, é considerada uma intoxicação predominantemente crônica, podendo ocasionar diversos tipos de câncer, passíveis de atingir o fígado, os rins, a bexiga, a próstata, os pulmões e a pele (ATSDR 2000). Além dos problemas derivados da intoxicação crônica, a intoxicação aguda pelo As pode ocasionar problemas como: disfunções cardiovasculares e no sistema circulatório vascular (Simeonova & Luster 2004), diabetes mellitus, abortos espontâneos e doenças respiratórias (WHO 2001).

3.4.2 Cádmio

O Cádmio (Cd) é um elemento raro e não ocorre na natureza na forma pura, contudo, forma alguns complexos como ânions, nitratos, sulfatos, thiosulfatos, amônia e cianeto. Além disso, é o primordial formador do mineral grinoquita, um sulfeto de cádmio. De forma geral, este mineral está associado a minérios de zinco, sobretudo a galena e esfarelita, sendo encontrado como pequenos fragmentos no solo (Dana 1978). A concentração deste elemento na superfície pode estar associada tanto a fontes naturais, tais como atividades vulcânicas ou transporte de partículas do solo por meio do vento,

quanto por origem antrópica, devido ao seu uso em fertilizantes, fabricação de baterias, cimentos e plásticos (Pernía *et al.* 2008).

O Cd é um elemento que apresenta determinadas controvérsias em relação a sua toxicidade, apesar de ser classificado como substância cancerígena pela Agência Internacional para Pesquisa do Câncer (IARC 1993), o EPA (1989), o discrimina entre substância não carcinogênica e carcinogênica de acordo com a sua forma de contato, sendo a inalação deste elemento considerada como carcinogênica, no entanto, a ingestão de água ou alimentos contaminados é tido como prejudicial, porém não carcinogênico para seres humanos. Este contato, por sua vez, é agravado devido a sua similaridade iônica com outros elementos, como o zinco (Zn^{+2}) e cálcio (Ca^{+2}), pois, dessa forma, o Cd substitui o Zn de enzimas proteicas encontradas nos rins, intestino e fígado e, além disso, é capaz de relocar o cálcio dos ossos, gerando a doença de Itai-Itai (Duarte *et al.* 2000). Sendo assim, o Cd pode estar associado a câncer nos rins e trato urinário, fígado ou estômago e câncer de próstata (Roels *et al.* 1981).

AVALIAÇÃO DE RISCO À SAÚDE HUMANA

4.1 AVALIAÇÃO DO RISCO TOXICOLÓGICO

A avaliação do risco toxicológico pode ser compreendida como a medida da probabilidade de efeitos adversos (Conway 1982) devido a exposição a uma substância química em um cenário particular (Jayjock 1998). Seu estudo é basicamente composto por três fases principais (Smith 1991): Avaliação da exposição, que busca entender e quantificar o ingresso da substância química no organismo humano; análise da toxicidade, que objetiva investigar a toxicidade da substância em questão; e caracterização do risco, qual avalia a ocorrência e a magnitude dos danos à população (Figura 4.1).

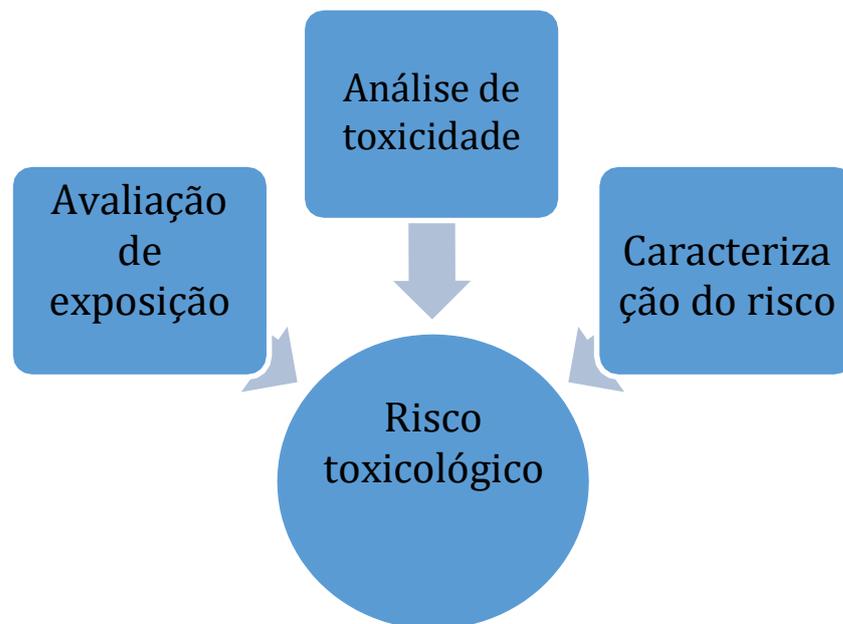


Figura 4.1: Etapas da avaliação de risco à saúde humana.

4.2 AVALIAÇÃO DA EXPOSIÇÃO

A avaliação da exposição é um método que visa determinar o tipo, a intensidade e a periodicidade da exposição humana a substâncias químicas presentes no meio físico (Davis & Masten 2016). Sua determinação é proporcional ao tempo de exposição à substância química de interesse, podendo fazer referência a diferentes períodos temporais, que podem envolver contatos duradouros ao longo de anos ou eventos isolados com duração limitada de horas ou dias (Maximiano *et al.* 2014). Logo, a determinação da exposição a uma substância química está relacionada à caracterização dos cenários de exposição e à quantificação do ingresso.

A caracterização dos cenários de exposição objetiva traçar o caminho das substâncias químicas de interesse até a região em que há a primeira população eventualmente exposta. O cenário de exposição deve ser analisado de acordo com os seguintes critérios: área fonte da substância, substância química de interesse, caminhos de exposição, receptores potenciais, pontos de exposição e vias de ingresso (Maximiano *et al.* 2014).

Compreendido como a exposição ocorre em um ambiente, deve-se quantificar o ingresso, isto é, estimar a quantidade de contaminante que ingressa no organismo humano. Este cálculo é genericamente realizado por meio da Equação (4.1) (USEPA 1989).

$$I = C \cdot \frac{IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad \text{Eq 4.1}$$

Onde, I é ingresso ou quantidade de contaminante que ingressa no organismo humano por um caminho de exposição (mg/kg.dia), C é a concentração do contaminante no meio (mg/l ou mg/kg), IR é a taxa de contato com o meio focado (l/dia ou kg/dia), EF é a frequência de exposição (dias/ano), ED é a duração de exposição por ano, AT é o período de exposição (dias) e BW é o peso corporal (kg).

Contudo, o cálculo de ingresso leva em consideração o caminho de exposição (água, ar, solo ou sedimento) e a via de ingresso. Dessa forma, a equação genérica pode ser modificada dependendo do meio onde a contaminação ocorreu, dos hábitos envolvidos na zona de contaminação, o que permite inferir diferentes vias de ingresso (consumo, inalação e contato dérmico). Sendo assim, tendo em vista uma região de água contaminada, o cálculo do ingresso segue a seguinte Equação (4.2).

$$I = C_w \cdot \frac{IR \cdot EF \cdot ED}{BW \cdot AT} \quad \text{Eq 4.2}$$

Onde, C_w é a concentração do contaminante na água (mg/l).

Levando em consideração padrões da população para um estudo genérico de risco, no Brasil a taxa de ingestão de água pode ser encontrada em Cetesb (2001), a qual leva em consideração a diferenciação entre idades (adulto e criança), cenários (industrial, residencial e agrícola) e tempo de exposição, tal como na Tabela 4.1.

Tabela 4.1: Taxa de ingestão de água considerando padrões da população (Modificado de CETESB (2001)).

PARÂMETRO	FONTE	INDUSTRIAL		RESIDENCIAL		AGRÍCOLA	
		ADULTO	CRIANÇA	ADULTO	CRIANÇA	ADULTO	CRIANÇA
IR (l/dia)	CETESB, 2001	1	0,5	1	1	2	1
EF (dias/ano)	CETESB, 2001	288	5	365	365	365	365
ED (ano)	CETESB, 2001	25	6	24	6	58	6
BW (kg)	CETESB, 2001	60	15	60	15	60	15
Atn (dias)	EPA,1997	12775	12775	12775	12775	12775	12775
Atc (dias)	EPA,1997	25550	25550	25550	25550	25550	25550

4.3 ANÁLISE DE TOXICIDADE

A análise toxicológica é o estudo que engloba as propriedades dos elementos químicos que serão prejudiciais à saúde humana, levando em conta um receptor, ligado a um evento de exposição específico (Maximiano *et al.* 2014). Esta análise, de acordo com a CETESB (2001), se fragmenta em duas etapas: identificação do perigo toxicológico e avaliação da curva dose-resposta. O primeiro está relacionado com a divisão das substâncias químicas em carcinogênicas e não carcinogênicas para a saúde humana, analisando, assim se há ou não efeito adverso. Já a avaliação da curva dose-resposta é uma distribuição de frequência acumulada entre a estatística da dose da substância ingerida e o efeito prejudicial à saúde em eventos exposição (Davis & Masten 2016). Ou seja, a curva de dose-resposta (Figura 4.2) representa determinação da relação entre a magnitude da exposição e a probabilidade de ocorrência de efeitos adversos à saúde (NRC & NAE 1983).

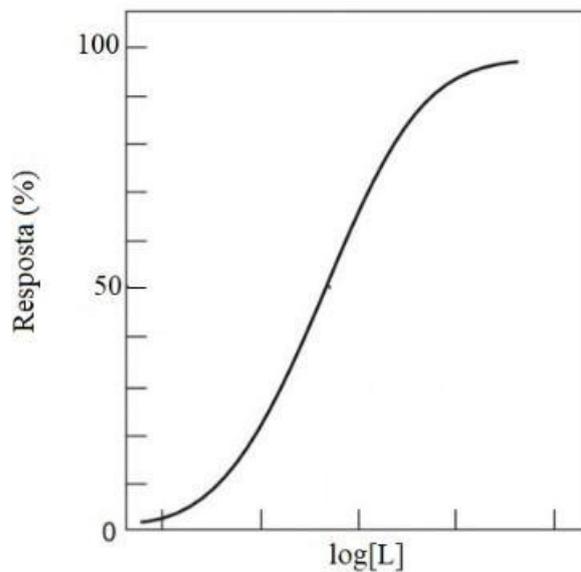


Figura 4.2: Curva Dose-Resposta (Modificada de ATSDR 2005).

A toxicidade pode ser classificada em determinados órgãos como aguda, subaguda e crônica. Neste caso, as substâncias carcinogênicas são tidas como crônicas (Davis & Masten 2016), com isso, supõe-se que não há uma dose abaixo da qual o risco seja zero, isto é, não existe um nível sem um efeito adverso observado (Davis & Masten 2016). De acordo com a Agência de Proteção Ambiental dos Estados Unidos (1989), é possível representar as substâncias carcinogênicas em uma curva dose-resposta, sendo que tal curva passa pela origem e a inclinação informa a relação entre a dose e o resultado carcinogênico, conhecido como o fator de carcinogenicidade (SF), sendo, expresso em mg/ kg.dia.

Já as substâncias não carcinogênicas apresentam uma dose em que não se nota efeito colateral (NOAEL - No Observed Adverse Effect Level), isto é, existe um nível de exposição em que não há aumentos estatísticos ou biológicos significativos na frequência ou gravidade dos efeitos adversos. Logo, o NOAEL é considerado o maior nível de exposição sem efeito adverso (WHO 1997). A partir do NOAEL é possível se determinar uma dose de referência para as substâncias não carcinogênicas (USEPA 1989), a chamada dose de referência (RfD). Todavia, o equacionamento da dose de referência pode fazer uso do LOAEL (Lowest Observed Adverse Effect Level). O LOAEL é o menor nível de exposição em que há aumentos estatísticos ou biológicos significativos na frequência ou na gravidade dos efeitos adversos, sendo considerado o nível mínimo de efeito adverso observado (USEPA 1989). Portanto, a dose de referência é resultado da divisão do NOAEL ou do LOAEL, por fatores de segurança (Davis & Masten 2016) demonstrado na Equação (4.3).

$$RfD \left(\frac{mg}{Kg.dia} \right) = \frac{LOAEL \text{ (ou NOAEL)}}{F11.F12.F1n.FM} \quad \text{Eq 4.3}$$

Onde, $F1i$ ($i = 1, 2, \dots, n$) corresponde ao Fator de Incerteza, e o FM faz referência ao Fator de Modificação (Figura 4.3). Os fatores de incerteza representam a redução decimal (1/10) de RfD nos seguintes casos (Crump 1984): (i) Proteção de subpopulações sensíveis (Ex: Idosos, Crianças); (ii) Extrapolação do estudo de Dose-Resposta de animais para humanos; (iii) Utilização do NOAEL determinado a partir de uma exposição subcrônica para a determinação da RfD Crônica; e (iv) Utilização do LOAEL ao invés do NOAEL. O Fator de Modificação, usualmente igual a 1, pode variar de 0 até 10 e reflete um julgamento profissional qualitativo da existência de incertezas adicionais associadas à análise em questão (USEPA 1989).

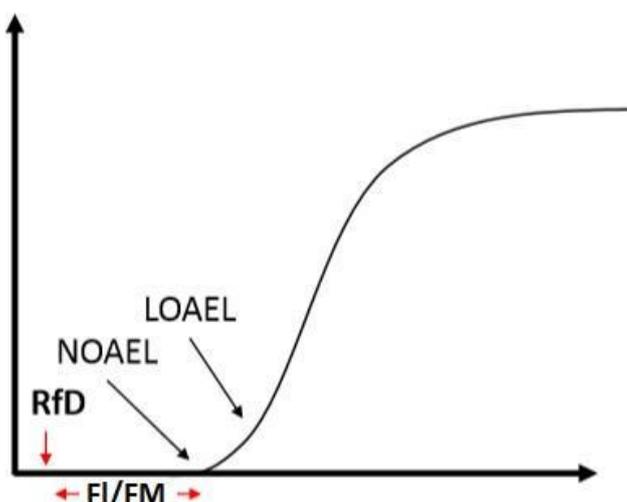


Figura 4.3: Fator de incerteza e fator de modificação representado na Curva de Dose-Resposta (Modificado de USEPA 1989).

4.4 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO

A caracterização do risco é a etapa final da análise de risco, realizada após o estudo da exposição e a análise da toxicidade. Nesta fase, o principal objetivo é a quantificação do efeito adverso sob a saúde humana, e para isso, deve-se segregar as substâncias químicas carcinogênicas e não carcinogênicas, levar em consideração os diversos cenários de exposição existentes e as substâncias químicas envolvidas (Maximiano *et al.* 2014).

Tendo em vista a existência de um cenário singular de exposição a uma determinada substância carcinogênica, a quantificação do efeito adverso ocorre pelo cálculo do risco carcinogênico segundo a Equação (4.4) (USEPA 1989).

$$Risco_{in} = I_n \times SF_n \quad \text{Eq 4.4}$$

Onde, $Risco_{in}$ é o risco carcinogênico da substância química n no cenário i , I_n é o ingresso para a substância n medido em mg /kg. dia e SF_n é o fator de carcinogenicidade da substância química em mg/kg.dia. Caso este risco carcinogênico seja maior que 0,01 é recomendado a utilização de outra equação para o seu cálculo, Equação (4.5) (USEPA 1989).

$$Risco_{in} = 1 - exp (-I_n \times SF_n) \quad \text{Eq 4.5}$$

Além disso, na existência de múltiplos cenários de exposição, bem como de diferentes substâncias carcinogênicas, a estimativa do risco toxicológico é equacionada pela soma dos riscos individuais, levando-se em consideração as especificidades das substâncias e dos cenários de exposição conforme a Equação (4.6).

$$Risco_T = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^m Risco_{in} \quad \text{Eq 4.6}$$

Onde, $Risco_T$ é risco toxicológico total derivado do computo geral das diversas vias de exposição e substâncias carcinogênicas, i ($i = 1, 2, \dots, m$) é o número de cenários possíveis e n ($n = 1, 2, \dots, m$) é o número de substâncias químicas envolvidas na análise.

O resultado dessa análise revela a possibilidade de um indivíduo desenvolver câncer como consequência da exposição a substâncias potencialmente carcinogênicas e/ou a diversas vias de exposição. Dessa forma, um risco de 10^{-5} indica a probabilidade de 1 chance em 100.000 de um indivíduo desenvolver câncer (CONAMA 420).

Por sua vez, a caracterização do risco para as substâncias não carcinogênicas envolve a determinação coeficiente de risco não carcinogênico. Além disso, pode-se apresentar variações em seus cálculos de quantificação, levando em consideração as múltiplas exposições e substâncias químicas de interesse. Dessa forma, tendo em vista um contexto mais simples, a Equação (4.7) pode ser empregada para um cenário de exposição e uma única substância química.

Eq 4.7

$$QR_{in} = \frac{I_n}{RfD}$$

Onde, QR_{in} é o coeficiente de perigo para a substância química não carcinogênica n para o cenário i , I_n é o ingresso para a substância n medido em mg /kg. dia e RfD_n é a dose de referência da substância química não carcinogênica n em mg/kg.dia. Da mesma forma, caso haja diversos cenários de exposição e mais de uma substância química, a Equação (4.8) deve ser adotada.

$$QR_T = \sum_{i=1}^m \sum_{n=1}^m QR_{in} \quad \text{Eq 4.8}$$

Onde, QR_T é coeficiente de perigo total derivado do computo geral das diversas vias de exposição e substâncias não carcinogênicas, i ($i = 1, 2, \dots, m$) é o número de cenários possíveis e n ($n = 1, 2, \dots, m$) é o número de substâncias químicas envolvidas na análise. Ao contrário do risco carcinogênico, o coeficiente de perigo não representa um resultado probabilístico (USEPA 1989). Dessa forma, quando $QR > 1$, isto é, $I_n > RfD_n$, existe perigo de ocorrência de efeitos adversos não carcinogênicos sobre a saúde humana.

CAPÍTULO 5

METODOLOGIA

O presente trabalho é uma computação de dados previamente coletados por Vicq (2015) em bacias hidrográficas de terceira ordem da região do QF. Dessa forma, este capítulo compõe-se das prévias de estudo e as técnicas utilizadas para a fase de tratamento de dados em SIGs (Sistema de Informações Geográficas), ao qual é o ramo da geotecnologia conhecido como geoprocessamento, responsável por um conjunto de práticas com o objetivo de gerar novos dados ou informações espaciais (Zaidan 2017).

5.1 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este trabalho, em primeira instância, foi baseado na compreensão e relação das anomalias geológicas existentes na região do Quadrilátero Ferrífero com a sua respectiva ocupação ao longo dos anos. Para isso, primeiramente, foi preciso compreender a evolução geotectônica do Cráton São Francisco, para que se tivesse uma melhor compreensão da sua estratigrafia. Nesta fase os trabalhos de Door (1969) e Alkmim & Marshak (1998) foram essenciais. Feito isso, buscou-se estudos realizados na região sobre anomalias de elementos traço, com o intuito de se entender a hidroquímica local, ressaltando-se como primordiais os trabalhos de Borba (2002), Euletério (1997), Vicq (2015), Costa (2007) e Atlas Geoquímico da Bacia do Rio São Francisco (CPRM-Serviço Geológico do Brasil). Em razão disso, optou-se por trabalhar com dois metais tóxicos que são facilmente encontrados na região, sendo ambos relacionados a proximidades de mineralizações auríferas associado a veios sulfetados (Borba *et al.* 2002), além disso, o cádmio é encontrado em associação com as rochas carbonato- quartzo xistos e sericita xistos do Grupo Nova Lima (Vicq 2015) e está presente nos minerais albita e ilmenita (Reimann e Caricat 1998), ao passo que o arsênio é oriundo da dissolução da arsenopirita (Smedley & Kinniburgh 2002). Após a escolha das substâncias de análise foram realizados estudos à respeito de risco toxicológico, dessa forma, baseou-se no Human Health Evaluation Manual (EPA 1989) para definir o tipo de efeito adverso ocasionado pela ingestão de água contaminada pelo arsênio e pelo cádmio. Por fim, utilizou-se o Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas CETESB (2001) para desenvolver o cálculo do risco para distintos uso e ocupação do solo, faixa etárias e para substâncias carcinogênica e não carcinogênicas.

5.2 LEVANTAMENTO DE BANCO DE DADOS

A organização do banco de dados em ambiente SIG contou com a contribuição de imagens de satélite, informações sobre toxicidade e exposição e dados hidroquímicos. O inventário de imagem LANDSAT do MAPBIOMAS objetivou obter informações sobre o uso e ocupação do solo da área estudada. Os dados hidroquímicos foram derivados de Vicq (2015), sendo composto por 142 dados de análises geoquímicas de arsênio e 183 de Cd.

Ainda, baseado nos dados disponíveis na EPA (1989) e CETESB (2001) um banco de dados foi organizado com informações alfanuméricas sobre doses de referência (RfD), Fatores de Carcinogenicidade (SF) e Fatores de Ingresso para as substâncias químicas de interesse e o respectivo uso e ocupação do solo. Além disso, vale ressaltar que para a avaliação do risco carcinogênico utilizou-se o único parâmetro de análise existente na legislação brasileira e disponível na Resolução CONAMA 420/2009 (Brasil, 2009). Essa resolução refere-se somente a água subterrânea e considera tolerável um risco de 1 a cada 100.000 indivíduos desenvolver câncer.

5.3 PRODUÇÃO CARTOGRÁFICA

Essa fase contou com a produção de modelos hidroquímicos a partir da interpolação das informações referentes às amostras pontuais de água superficial derivadas de Vicq (2015). A definição da técnica de interpolação (Krigagem, Inverso Ponderado da Distância, etc.) dependeu da análise e distribuição das amostras e dos testes realizados durante a produção dos mapas de isovalores.

Para os diferentes tipos de uso e ocupação da Bacia Hidrográfica ao longo do período temporal considerado, serão estimados os valores de ingresso das substâncias químicas no organismo humano, sendo posteriormente determinado o coeficiente de risco e o risco carcinogênico.

5.3.1 Métodos interpoladores

A geoestatística é um relevante instrumento para estudos que envolvem recursos hídricos (Zhou *et al.* 2011), no entanto, existem diversos métodos de interpolação de tal forma que, a eficiência da técnica é dependente da disposição e quantidade de amostras (Aranoff 1989). Sendo assim, em diversos trabalhos tem-se a comparação da eficiência da aplicação da krigagem (Creutin & Obled 1982; Tabios & Salas 1985; Warrick *et al.* 1988) e do IDW (Wollenhaupt *et al.* 1994; Gotway & Hartford 1996) demonstrando a variabilidade da qualidade da aplicação em relação ao tipo de pesquisa. Dessa forma, buscando um resultado mais competente para a detecção de valores anômalos de metais pesados (arsênio e cádmio) na porção da bacia hidrográfica do Rio das Velhas que abrange o QF testou-se os métodos IDW e Krigagem Ordinária para 142 amostras de arsênio e 183 amostras de cádmio coletadas em água superficial por Vicq (2015). Algumas métricas de erro foram utilizadas na seleção dos melhores modelos para o As e Cd: Erro quadrático médio (RQM), que representa a raiz quadrada da diferença média entre os valores preditos e mensurados ao quadrado; porcentagem do erro absoluto médio (EAM (%)), que é a média de variação em porcentagem entre os valores preditos e o mensurados; erro médio (EM), que é a soma dos resultados derivados da subtração entre os valores preditos e mensurados, sendo que o sinal indica a tendência em superestimar (valores positivos) ou subestimar (valores negativos) a predição e a média da porcentagem do erro, em que fornece a porcentagem média em que o valor mensurado diverge do módulo do erro médio.

5.3.2 Elaboração dos mapas de Risco Toxicológico

A produção do mapa de risco toxicológico para ambos os metais pesados de análise (As e Cd) contou com o auxílio de bases cartográficas do Mapbioma de uso e ocupação do solo, valores padrões do CETESB (2001) e dados de concentração dos metais pesados . As metodológicas de produção estão esquematizadas abaixo (Figura 5.1).

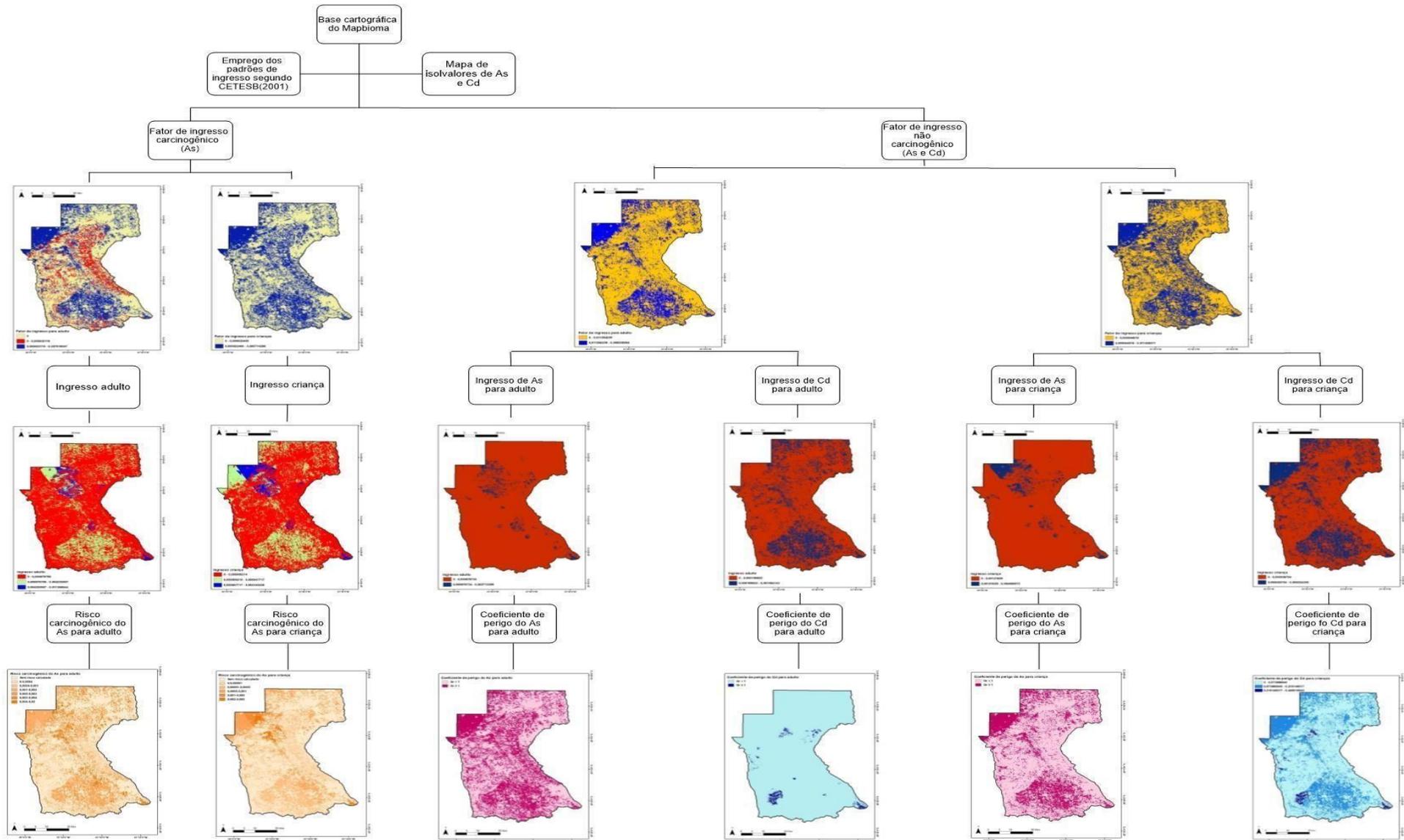


Figura 5.1: Fluxograma ilustrando as etapas de elaboração de mapa de risco e de coeficiente de perigo.

Primeiramente, foi analisada cartograficamente a exposição das pessoas na área de estudo através cálculo do ingresso no organismo humano das substâncias investigadas. Esse produto foi confeccionado a partir da base cartográfica do Mapbioma, dos mapas de isovalores derivados dos dados hidrogeoquímicos coletados por Vicq (2015) e os padrões de ingresso da CETESB (2001) (Tabela 4.1), os quais variam de acordo com a faixa etária (adultos e crianças) e o uso e ocupação do solo (uso agrícola, urbano e industrial). Os resultados do ingresso foram divididos segundo os efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos. Os mapas foram elaborados no *software* ArcGis 10.2, a partir da Equação 4.2 (USEPA 1989). Após isso, para se obter os mapas de risco toxicológico, foi necessário um estudo preliminar da toxicidade do arsênio e do cádmio em relação à ingestão de água contaminada, todavia, vale ressaltar que a água fluvial de análise não é utilizada para consumo em toda a área da bacia. Segundo a USEPA (1989), a ingestão de água contaminada por cádmio não apresenta risco carcinogênico conhecido, no entanto, pode ocasionar outros riscos à saúde humana e, por isso, determinou-se o coeficiente de perigo através da dose de referência ($RfD = 5 \times 10^{-4}$ mg/kg.dia). Já a ingestão de água contaminada por arsênio pode ocasionar efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos, deste modo, a USEPA (1989) considera como dose de referência (RfD) para casos não carcinogênico 3×10^{-4} mg/kg.dia e como fator de carcinogenicidade (SF) 1,5 mg/kg.dia. Sendo assim, para as substâncias carcinogênicas estabeleceu-se uma relação entre o ingresso e o fator de carcinogenicidade (SF) padrão (Equação 4.4 e 4.5), e para as não carcinogênicas o coeficiente de perigo foi determinado pela relação do ingresso com a dose de referência (RfD) (Equação 4.7).

5.3.3 Correlação de bases cartográficas

Realizado a confecção dos mapas de risco, uma investigação temporal da variabilidade do risco toxicológico foi proposta em função dos possíveis usos futuros do solo na região. Desse modo, os dados referentes às concessões de lavra do DNPM (IGAM 2020) foram empregados, e, com isso, calculou-se o risco segundo o padrão industrial e, projetou-se qual serão os resultados no meio ambiente e para a saúde humana, sendo assim, averiguou-se a oscilação do risco quantitativamente e espacialmente. Por fim, buscou-se compreender para qual região atual estas mudanças estão previstas e, com isso, utilizou-se ferramentas para que comparasse as áreas em comum e, dessa forma, pudesse interpretar melhor em qual região estas transformações vão prevalecer.

5.4 INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Com o desenvolvimento das etapas anteriores, foi possível observar onde o risco poderá ser considerado aceitável/inaceitável. Ainda, os diferentes modelos de risco toxicológico, gerados em função das diferentes formas de ocupação do solo da bacia, permitiram entender como essas modificações tornaram as pessoas mais ou menos expostas as substâncias químicas ao longo do tempo. Por fim, foi possível desenvolver um paralelo entre o estudo realizado e a necessidade desse tipo de abordagem ser levada em consideração no zoneamento ambiental de territórios com concentrações anômalas de substâncias químicas.

CAPÍTULO 6

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este capítulo compreende a interpretação dos dados gerados em ambiente SIG, envolvendo o mapeamento geoquímico, a análise de uso e ocupação do solo e o cálculo do ingresso das substâncias químicas de interesse no organismo, a fim de mensurar quantitativamente o risco toxicológico para o arsênio e o cádmio na região da bacia hidrográfica do Rio das Velhas, bem como examinar espacialmente a relação entre os índices de risco destes metais com o manejo do solo e, por fim, specular tendências de transformações futuras na região e os respectivos danos.

6.1 MODELO GEOESTATÍSTICO

Como explicitado anteriormente, testou-se a krigagem ordinária e IDW. Primeiramente, foi aplicada a krigagem para 142 amostras de arsênio e 183 amostras do elemento cádmio. Dessa forma, a primeira etapa de avaliação consistiu na verificação de dependência espacial dos dados (efeito pepita/patamar). O arsênio revelou uma dependência espacial forte ($\leq 25\%$) e o cádmio uma dependência moderada ($0,25 < IDE < 0,75$). Após isso, foi realizada a análise exploratória dos dados, onde o arsênio apresentou um histograma com assimetria positiva, e, por isso, foi necessário aplicar a transformação log para alterar a frequência amostral. O cádmio foi analisado sem nenhuma transformação. Os valores de IDE, assimetria e curtose são apresentados na Tabela 6.1.

Tabela 6.1: Valores de IDE, assimetria e curtose dos elementos As e Cd.

	IDE (Pepita/Patamar)		Assimetria		Curtose	
	As	Cd	As	Cd	As	Cd
Krigagem Ordinária	16,43841	51,190767	1,7841	2,7796	5,1048	12,064

O modelo exponencial foi o modelo que melhor representou o semivariograma experimental dentre todos os testes realizados durante a interpolação, sendo definido para ambas as substâncias, cinco e dois pontos como o número máximo e mínimo de pontos amostrais que foram interpolados. Por fim, algumas métricas de erro foram utilizadas para comparar as metodologias de interpolação (Tabela 6.2), revelando a ligeira superioridade dos modelos produzidos com a técnica do Inverso Ponderado da Distância (IDW).

Este método é um interpolador mais simples, onde a sua aplicação é dependente de dois parâmetros principais: a potência com que cada ponto influência na interpolação e o número de pontos amostrais que serão utilizados para interpolar. Sendo assim, obteve-se produtos mais relevantes com o

uso do peso dois e interpolando no mínimo dois pontos amostrais e no máximo cinco. Os resultados dos erros do IDW para o As e o Cd são apresentados na Tabela 6.2.

Tabela 6.2: Parâmetros comparáveis dos métodos IDW e krigagem ordinária.

	RQM		EAM (%)		EM		Média da % do EM	
	As	Cd	As	Cd	As	Cd	As	Cd
Krigagem Ordinária	69,29	2,21	0,35	0,01	-1	-0,29	36,45	14,33
IDW	53,69	2,18	0,29	0,01	1	0	28,59	11,48

Tendo em vista a análise preliminar realizada entre os dois métodos interpoladores, optou-se por prosseguir o trabalho com o IDW. Sendo assim, dentre os dados gerados por este método interpolador, os gráficos da Figura 6.1 demonstram a relação entre os valores preditos (P) e mensurados (M) de acordo com a concentração das substâncias químicas, onde a curva cinza representa o modelo ideal ($P = M$) e a reta azul simboliza a tendência do gráfico.

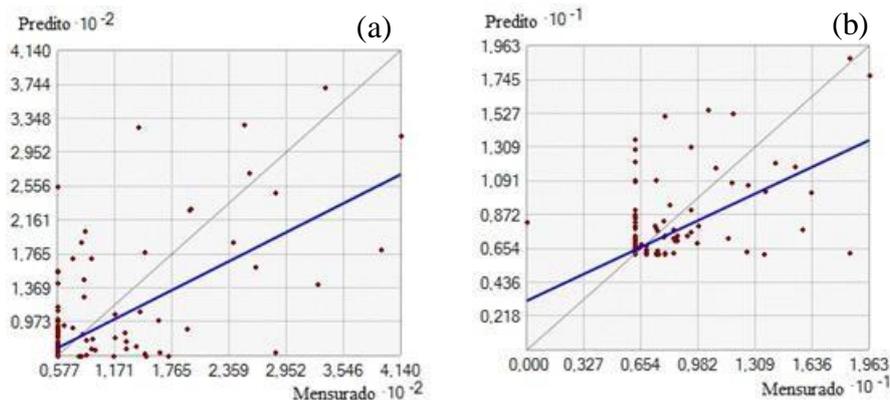


Figura 6.1: Relação do erro predito e mensurado com base na concentração do arsênio (a) e cádmio (b).

Dessa forma, analisando o gráfico obtido para o arsênio, constata-se que, de forma geral, a reta azul está abaixo da reta cinza, e, por isso, o valor mensurado é maior que o predito, o que equivale dizer que existe uma tendência de subestimação da predição. Todavia, como o grau de ajuste da curva de regressão não é substancial, outras métricas podem agregar maior confiabilidade à análise da tendência dos dados. Dessa maneira, em complementação pode-se analisar o Erro Médio (EM), que é a média dos erros individuais. Para o Arsênio, o EM foi igual a +1. Dessa forma, nota-se que há uma ligeira superestimação identificada, a qual se opõe ao resultado gráfico, e, por isso, fez-se necessário uma análise complementar. Esta, por sua vez, buscou averiguar individualmente os valores de subestimação e superestimação e a porcentagem do erro em cada ponto. Com isso, ao verificar as amostras de arsênio notou-se que as maiores proporções dos dados equivalem a um modelo próximo ao ideal e a valores superestimados, representando 33% e 46%, respectivamente. Desse modo, para os valores

superestimados pode-se perceber uma heterogeneidade de intervalos e, por isso, optou-se por analisá-los de forma compartimentada em três frações distintas de erro (P-M). Dessa maneira, a primeira porção de avaliação do intervalo de erro (0 mg/l -20 mg/l) representa a maior proporção dos dados superestimados (50%), onde tem-se efeitos mais próximos de um modelo ideal, e, com isso, porcentagem do erro absoluto mais baixos (Anexo 1). O segundo intervalo de erro, ainda que mais abrangente (20 mg/l - 80 mg/l), agrupa pontos amostrais que expõem porcentagens de erro absoluto, em sua maioria, superiores a 50% (Anexo 2). Por fim, tem-se os valores extremos, onde há apenas 8 pontos excepcionais (80 mg/l - 198 mg/l), os quais exibem um exorbitante erro absoluto (Anexo 3).

Já os pontos subestimados representam 20% do total amostrado, sendo que dentre estes valores notou-se que apenas 35% são valores discrepantes (-87 mg/l até -220 mg/l), os quais expõem uma abrangência de valores de porcentagem de erro absoluto alternando de 24% até 78% (Anexo 4). Sendo assim, pode-se inferir que nesse caso específico, a tendência positiva observada é a predominante ao longo da bacia, já que a maioria das amostras estão superestimando o resultado da predição, 79% das amostras se produziram um modelo próximo ao ideal para alguns pontos e superestimado para outros. Entretanto, pode-se inferir que o resultado gráfico não expôs esta tendência devido a existência de 7% dos dados extremos subestimados, os quais podem estar mascarando o resultado final gráfico. Considerando o mesmo gráfico para o cádmio, pode-se inferir que as amostras com concentrações inferiores a 0,654 µg/l apresentaram uma superestimação da predição (P>M), enquanto que as amostras com concentrações superiores a 0,654 µg/l apresentaram valores mensurados superiores aos preditos, caracterizando uma tendência de subestimação. Analisando o valor do Erro Médio encontrou-se o valor nulo, ratificando a existência equilibrada de alternâncias entre as subestimações e superestimações dos valores preditos. Ao analisar as particularidades de cada ponto pode-se constatar que 32% dos dados produziram um modelo próximo ao ideal e 48% produziram resultados ligeiramente superestimados. Ao avaliar o intervalo (2 mg/l -7 mg/l) de erro médio superestimação notou-se que os pontos enquadrados nesta classe apresentam maior porcentagem de erro absoluto e correspondem a 20% do total superestimado (Anexo 5). Já para as amostras subestimadas, notou-se que 66% tem elevado porcentagem de erro absoluto (Anexo 6).

Somado a este resultado gráfico é possível analisar a distribuição espacial dos erros individuais, evidenciando a tendência do modelo em subestimar ou superestimar os intervalos de valores de concentração medidos em laboratório (Figura 6.2). Analisando a distribuição dos pontos de arsênio verifica-se uma predominância amostras nas concentrações variando de 0,0577 mg/l a 0,0758 mg/l e de 0,0758 mg/l a 0,1178 mg/l. A primeira faixa de valores representa a maior proporção dos superestimados inclusos na faixa de erro variando de 20 mg/l-80 mg/l. A classe de erros de 80 mg/l -198 mg/l evidenciou uma abrangência nos dois intervalos de concentração citados. Além disso, nota-se uma tendência de superestimação concentrada na porção leste da bacia, em especial na porção sudeste, que concentra 75%

dos pontos com predição extremamente superestimada. Já para os pontos subestimados, visualmente é possível verificar uma concentração da porção centro-oeste, sendo que os valores mais discrepantes não apresentam uma uniformidade na sua disposição, estando espacializados aleatoriamente. Todavia, para os extremos de subestimação tem-se uma dominância em áreas com concentração variando de 0,1178 mg/l até 0,1779 mg/l e 0,2645 mg/l até 0,4139 mg/l, as quais abrigam também pontos extremos superestimados. Para o cádmio, os pontos com erros que fazem referência aos extremos subestimados localizam-se na porção do modelo que abriga as maiores concentrações previstas (0,0122 mg/l - 0,1963 mg/l). Os pontos com geraram erros excepcionais de superestimação predominam no intervalo de concentração 0,0046 mg/l - 0,0071 mg/l. Em outras palavras, existe no modelo produzido a partir da interpolação dos dados de Cd a tendência dos elevados valores estarem subestimados e os baixos valores estarem superestimados. No que diz respeito à disposição espacial dos pontos subestimados e superestimados, não foram observadas tendências ou concentrações em certas porções do mapa.

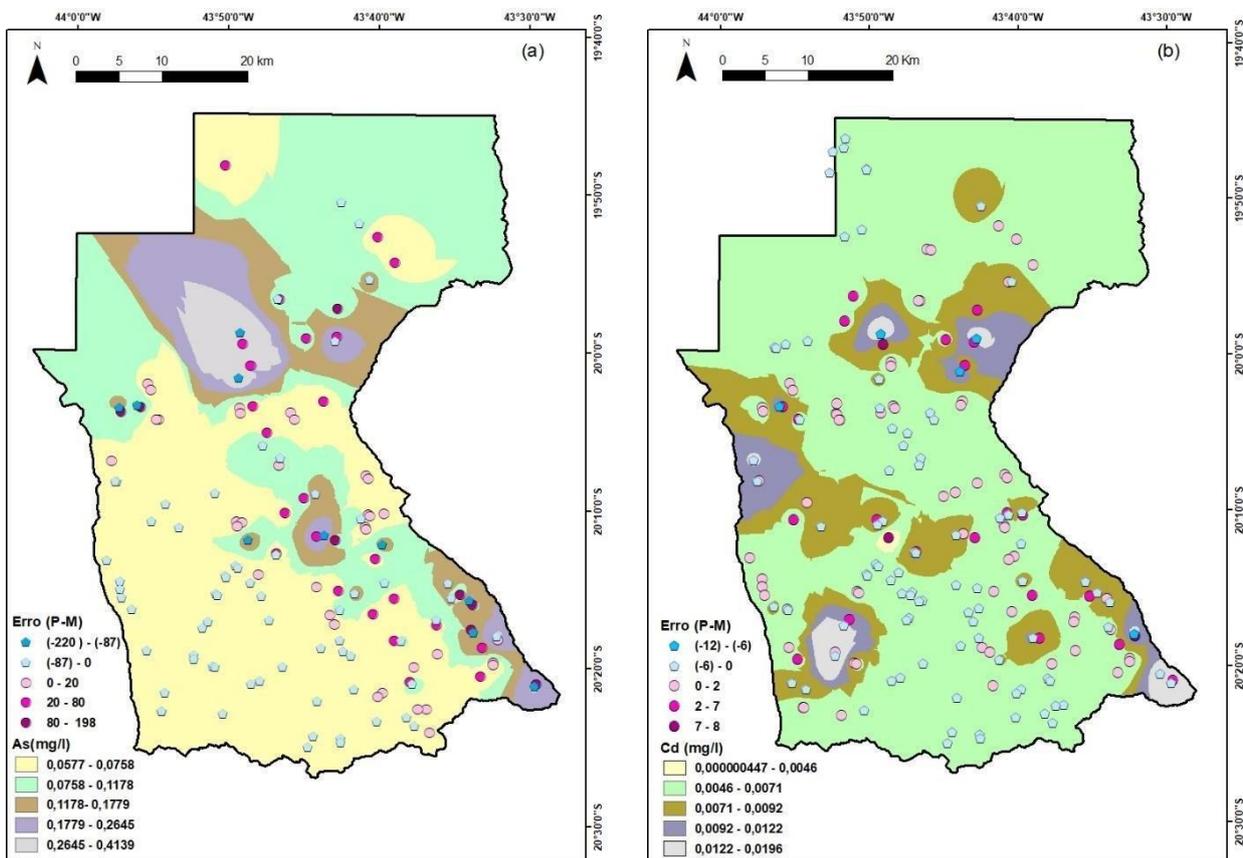


Figura 6.2: Relação espacial do erro predito com mensurado segundo a concentração do arsênio (a) e cádmio (b).

Ainda, em termos de análise de concentração pode-se correlacionar espacialmente as zonas de maiores concentrações com a litologia local. Sendo assim, notou-se que, tanto para o As quanto para o cádmio, as maiores concentrações se relacionam, sobretudo, com os grupos Nova Lima, ocupando

uma porcentagem de 70% (Tabela 1) e 41 % (Tabela 2) de área, respectivamente. Essa tendência, por sua vez, pode ser explicada pela existência de zonas de mineralizações auríferas sulfetadas intrudidas neste Grupo (Borba *et al.* 2002).

Tabela 6.3: Relação da área (m²) em cada Grupo com as concentrações do Arsênio.

GRUPO	0,057 - 0,2324 (mg/l)	0,2324 - 0,4140 (mg/l)	Relação da porcentagem da litologia com as maiores concentrações de As
Piracicaba	267311064,5	2087583,075	1,6
Caraça	63833429,88	3947471,632	3,0
Itabira	194282456	7169694,057	5,3
Não se aplica	907588049,9	8433,130307	0,01
Sabará	257053311,5	2434874,714	1,8
Indiviso	5173342,119	0	0
Quebra Osso	63915461,24	12930288,7	9,6
Nova Lima	786950587,6	94572956,5	70,4
Maquiné	244783873,5	10861871,83	8,1
Tamanduá	665450,646	318925,6552	0,2
Itacolomi	52898,72647	0	0

Tabela 6.4: Relação da área (m²) em cada Grupo as concentrações do Cádmio.

GRUPO	0 - 0,008544 (mg/l)	0,008544 - 0,019627 (mg/l)	Relação da porcentagem da litologia com as maiores concentrações de Cd
Piracicaba	251652274,8	17746372,76	5,9
Caraça	56651469,46	11129432,06	3,7
Itabira	158210891,1	43241258,97	14,4
Não se	860150158,6	47446324,4	15,8
Sabará	257087044	2401142,193	0,8
Indiviso	5173342,119	0	0
Quebra Osso	61557251,35	15288498,6	5,1
Nova Lima	758259545	123263232,5	41,0
Maquiné	216362691,1	39283054,26	13,1
Tamanduá	104264,1565	880112,1447	0,3
Itacolomi	52898,72647	0	0

6.2 CARACTERIZAÇÃO DO RISCO À SAÚDE HUMANA

O efeito toxicológico de substâncias químicas no organismo pode ser entendido como um resultado adverso à saúde humana, o qual é dividido em carcinogênico e não carcinogênico. A depender desta classificação, esse efeito pode ser quantificado através da determinação do risco carcinogênico ou do coeficiente de perigo, respectivamente. Dessa forma, para simplificar a apresentação dos resultados, dividiu-se os mapas de risco para o arsênio e cádmio, contudo, ainda que exista esta segregação, a contabilidade do risco toxicológico é oriunda da soma do risco para os efeitos carcinogênicos e não carcinogênicos. Por isso, a inexistência de risco para um dado elemento químico não assegura que tal localidade é desprovida de um risco toxicológico. Sendo assim, analisou-se os riscos para as substâncias químicas individualmente por faixa etária. Primeiramente, analisando os coeficientes de perigo gerados para ambas substâncias, verifica-se que o coeficiente de perigo para o arsênio em adultos e crianças revelou valores superiores a 1, o que pressupõe a existência de efeitos adversos não carcinogênicos à saúde humana. O mapa referente ao coeficiente de perigo em adultos para essa substância evidenciou que 41 % da região de análise tem-se valores superiores a 1 (Figura 6.3), ao passo que o mapa do coeficiente de perigo para as crianças retrata que 29% da área de estudo evidencia valores dessa natureza (Figura 6.3). O cádmio, no entanto, expôs resultados mais amenos, exibindo valores acima do aceitável apenas para os adultos em apenas 2,2% da área. Para crianças o valor máximo de coeficiente de perigo do Cd foi 65% inferior a 1, sugerindo a inexistência de efeitos adversos não carcinogênicos à saúde humana (Figura 6.4). Além disso, ao conferir o tipo de atividade desenvolvida nas localidades com coeficiente de perigo acima de 1, constatou-se que, para ambos metais pesados e faixa etárias, o uso agropecuário representou-se mais problemático (Anexo 7). Para o arsênio na fase adulta e infantil a área que apresentou efeitos adversos não carcinogênicos à saúde humana correspondeu, respectivamente, a 54% e 78% da região, e, para o cádmio representou toda a região com valores superior a 1.

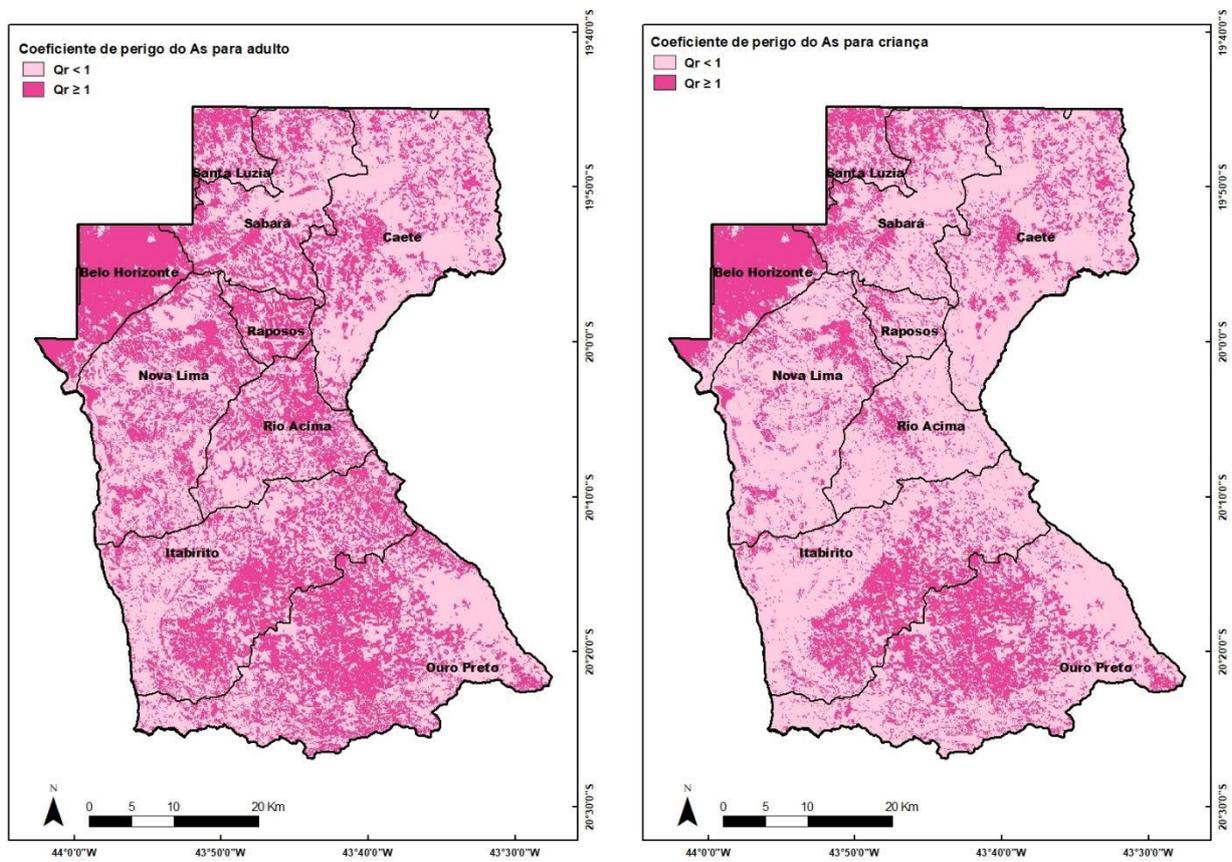


Figura 6.3: Mapa de Coeficiente de perigo do arsênio para adultos e crianças.

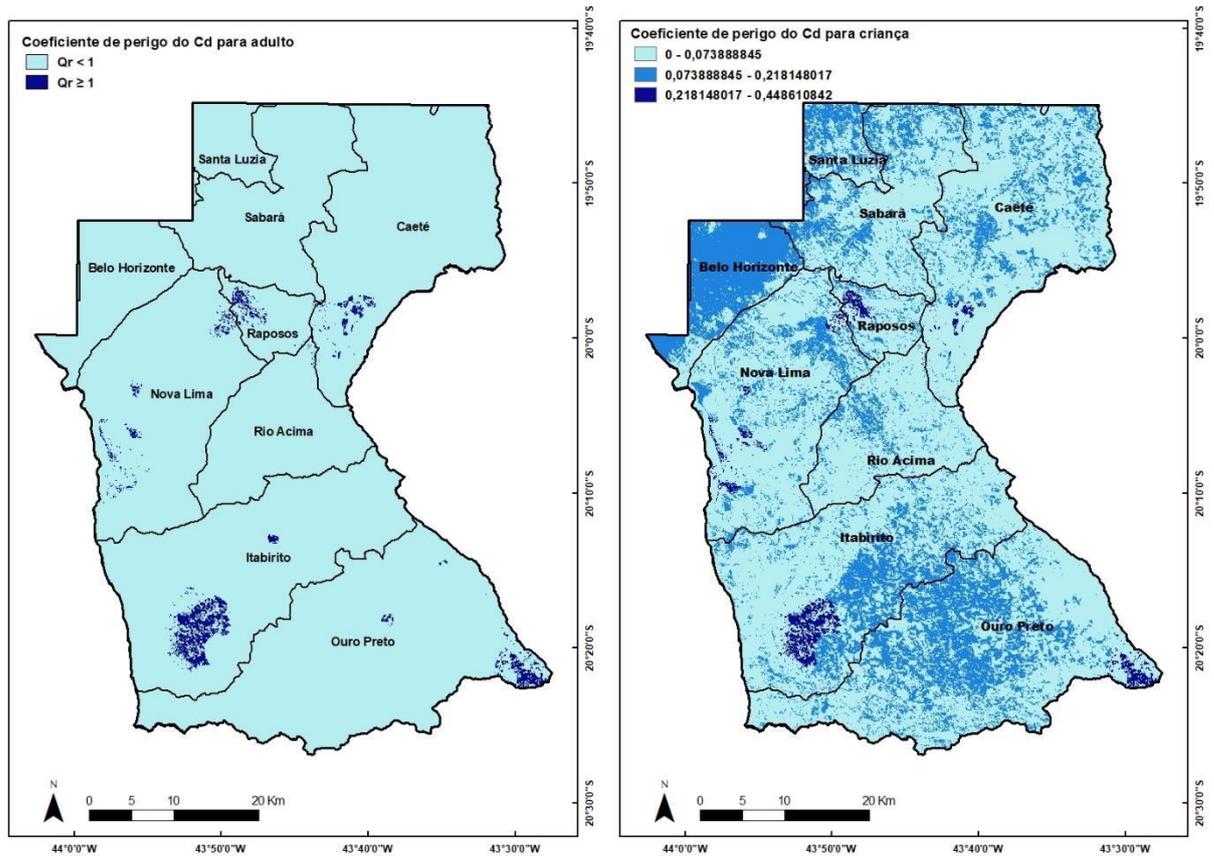


Figura 6.4: Mapa de Coeficiente de perigo do cádmio para adultos e crianças.

Ao se tratar de risco carcinogênico, obteve-se mapas apenas para o arsênio, e, ao averiguá-los, notou-se a existência de valores de risco extremamente elevados, sobretudo para a faixa etária dos adultos. Para essa faixa etária, foi verificada que as duas maiores classes de risco (0,003 - 0,004 e 0,004 - 0,02) somadas representam 10% da área de estudo, ao passo que 12,4% do território integra o intervalo de risco de 0,002 - 0,003, 7% integra o intervalo de risco de 0,001 - 0,002, 6,3% integra o intervalo de risco de 0,0004 - 0,001 e, por fim, tem-se uma área equivalentes a 5,3% no menor risco, variando de 0 - 0,0004 (Figura 6.5). Em outras palavras, toda a região onde o cálculo do risco foi efetuado, isto é, 41% da localidade, os valores encontrados foram superiores a 10^{-5} para a faixa etária de adultos, nível considerado tolerável para substâncias carcinogênicas pela Resolução CONAMA 420 (Brasil 2009). Para os cálculos envolvendo o grupo das crianças, 29% da região mostrou-se acima desta grandeza (10^{-5}), sendo que 4% da área integra o intervalo de risco de 0,001 - 0,003, 11% integra o intervalo de risco de 0,00001 - 0,0005 e 14% integra o intervalo de risco de 0,0005 - 0,001 (Figura 6.5). Além disso, em correspondência ao coeficiente de perigo, notou-se que, para o risco carcinogênico, os maiores índices

também estavam relacionadas às atividades agrícolas, que correspondem a 100% e 52% do território nos os cálculos envolvendo adultos e crianças (Anexo 8).

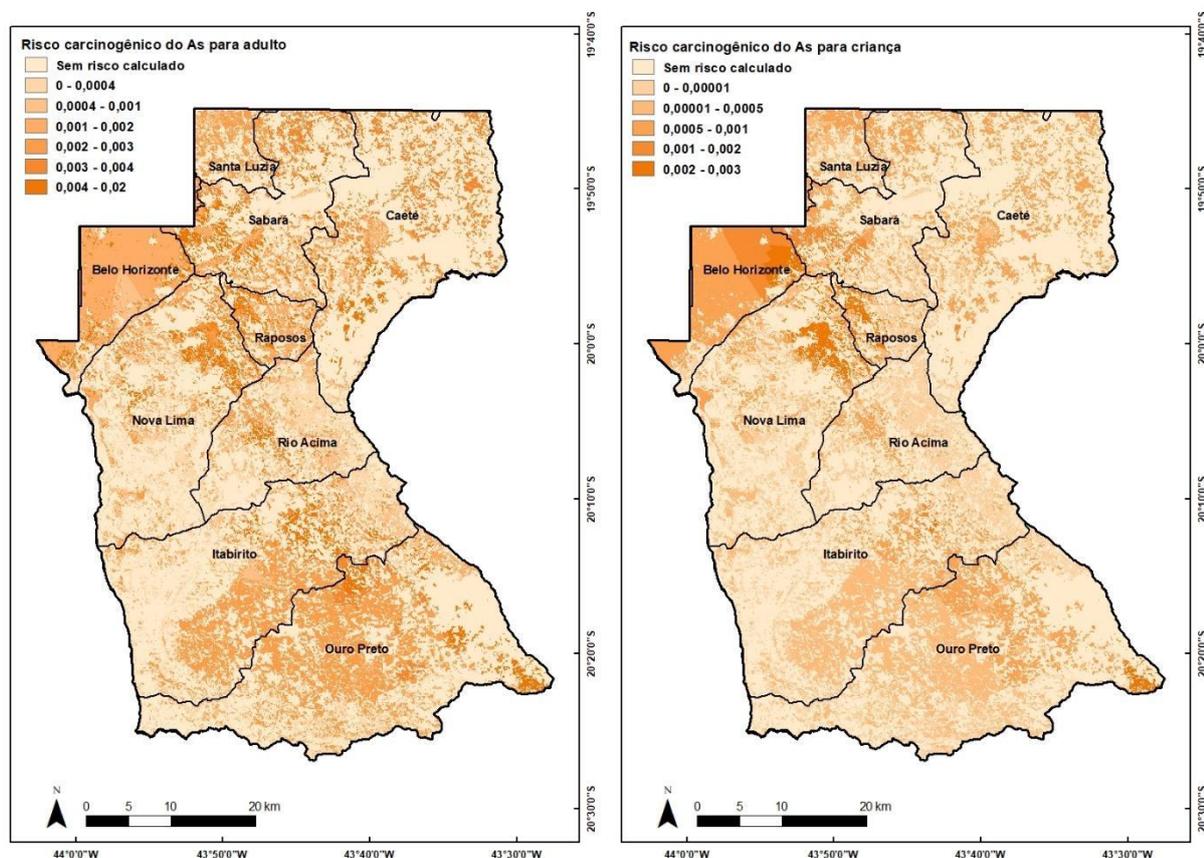


Figura 6.5: Risco carcinogênico do arsênio para adulto e criança.

Sendo assim, pode-se observar (Tabela 6.5) que a análise dos riscos toxicológicos para o As e o Cd, a exceção do coeficiente de perigo do cádmio para crianças, apresentam valores que podem, em maior ou menor grau, comprometer a saúde humana caso haja a ingestão de água. Ao somar o coeficiente de perigo do cádmio e do arsênio para crianças nota-se, entretanto, um valor aproximado de 16 vezes superior ao considerado tolerável para o efeito não carcinogênico (Brasil 2009). Para adultos, o coeficiente de perigo total, isto é, acumulado do As e do Cd, é mais que 77 vezes o recomendado. Já o risco de carcinogenicidade reflete apenas a ingestão do arsênio, já que o cádmio não apresenta nenhum valor consagrado de fator de carcinogenicidade para a ingestão de água.

Tabela 6.5: Valores máximos de coeficiente de perigo e risco carcinogênico.

	Coeficiente de perigo (Q_r)		Risco carcinogênico		Coeficiente de perigo Total (Q_i)	
	Adulto	Criança	Adulto	Criança	Adulto	Criança
Arsênio	75,711	15,6643	0,017035	0,003524	77,87929	15,70916
Cádmio	2,16829	0,448611	-			

Risco carcinogênico segundo CONAMA 420 (Brasil 2009): 10^{-5}

Q_r (USEPA 1989) : < 1

Somado aos resultados já apresentados, buscou-se fazer uma análise do risco carcinogênico e do coeficiente de perigo, ambos máximos, em relação à outorga de águas superficiais para abastecimento. Com isso, aplicou-se raios variando de 10 até 2000m de distância dos pontos de abastecimento de água superficial, e observou-se que tanto para os coeficientes de perigo do cádmio e do arsênio, quanto para o risco carcinogênico do As, tem-se valores mais abrandados conforme à proximidade dos pontos de outorga (Figura 6.6), independente da faixa etária (Anexo 9).

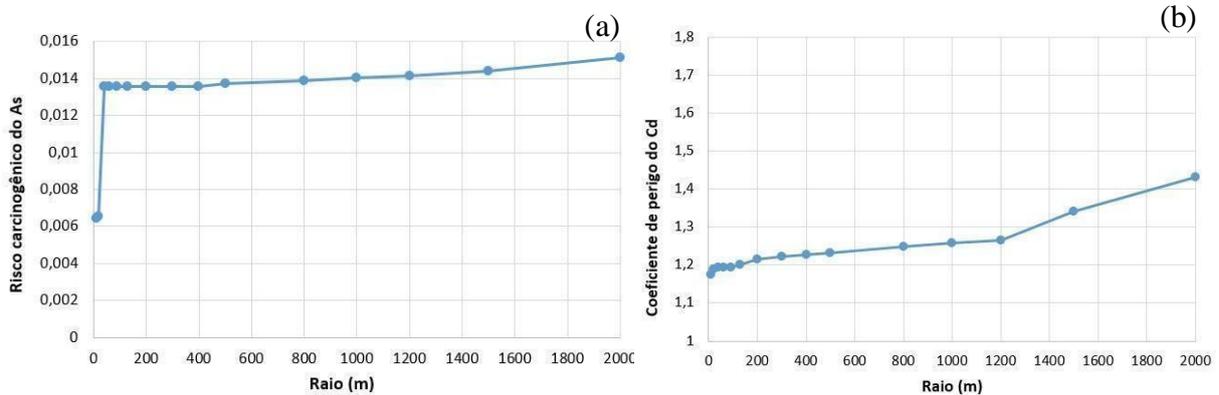


Figura 6.6: Relação dos índices de risco do arsênio (a) e perigo do cádmio (b) com a distância de pontos de abastecimento de água superficial.

6.3 ANÁLISES FUTURAS

Tendo em vista os resultados apresentados, buscou-se compreender como as alterações do uso do solo local poderiam afetar a saúde humana ao longo da área de estudo. Nessa perspectiva, foi realizada uma avaliação do risco toxicológico de futuras áreas industriais de mineração representadas pelas delimitações das áreas de concessão de lavra (DNPM 2020) (Figura 6.7).

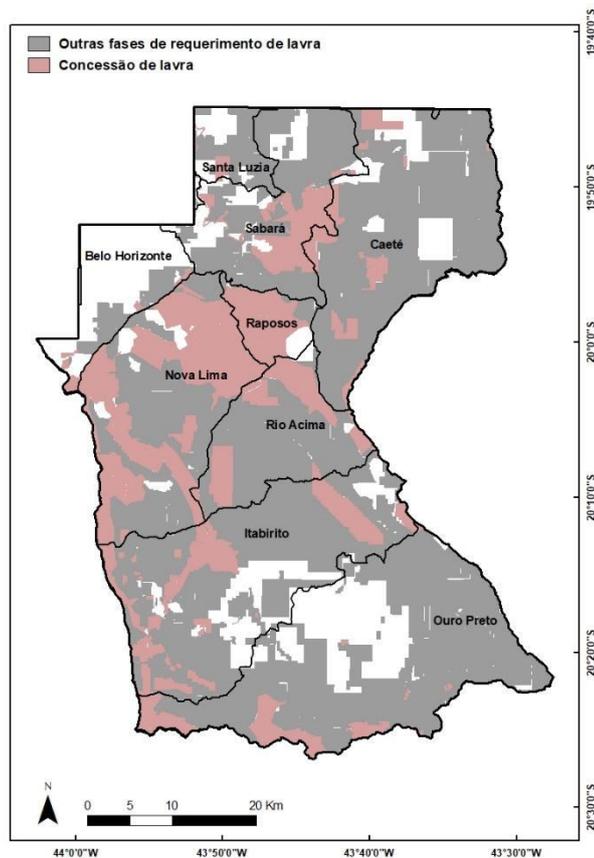


Figura 6.7: Regiões da área de estudo em que se tem requerimento de lavra com destaque para as zonas que estão na fase de concessão de lavra (Fonte: DNPM 2020).

Dessa forma, caso sejam licenciadas essas atividades minerárias, as zonas de concessões de lavra ocuparão 62% da região de formação natural florestal e não florestal, 14% da área de uso agrícola atual e 5% da região de infraestrutura urbana. Para o arsênio, quase toda a área das concessões de lavra teria riscos acima de 10^{-5} , limiar considerado tolerável para água subterrânea contaminada aos olhos da Resolução CONAMA 420/2009 (Brasil 2009). A faixa etária mais prejudicada seria a dos adultos (Figura 6.8), onde 6% da região apresentaria risco carcinogênico compreendida entre os dois intervalos mais graves (0,002 - 0,003 / 0,001 - 0,002) e 19% apresentaria valores mais amenos, variando de 0 - 0,001. Para as crianças, o maior risco carcinogênico compreenderia 13% da área de estudo, variando de 0,00001 - 0,00002 (Figura 6.8). Ao analisar o coeficiente de perigo, verificou-se que para o As em adultos seria superior a 1 em toda a região compreendida pelas concessões de lavra, o que significa dizer que o ingresso do As no organismo humano seria superior à Dose de Referência previamente estabelecida. Todavia, para crianças não se tem valores de coeficiente de perigo superiores a 1 para essa faixa etária, da mesma forma que não foram observados danos à saúde humana para o cádmio.

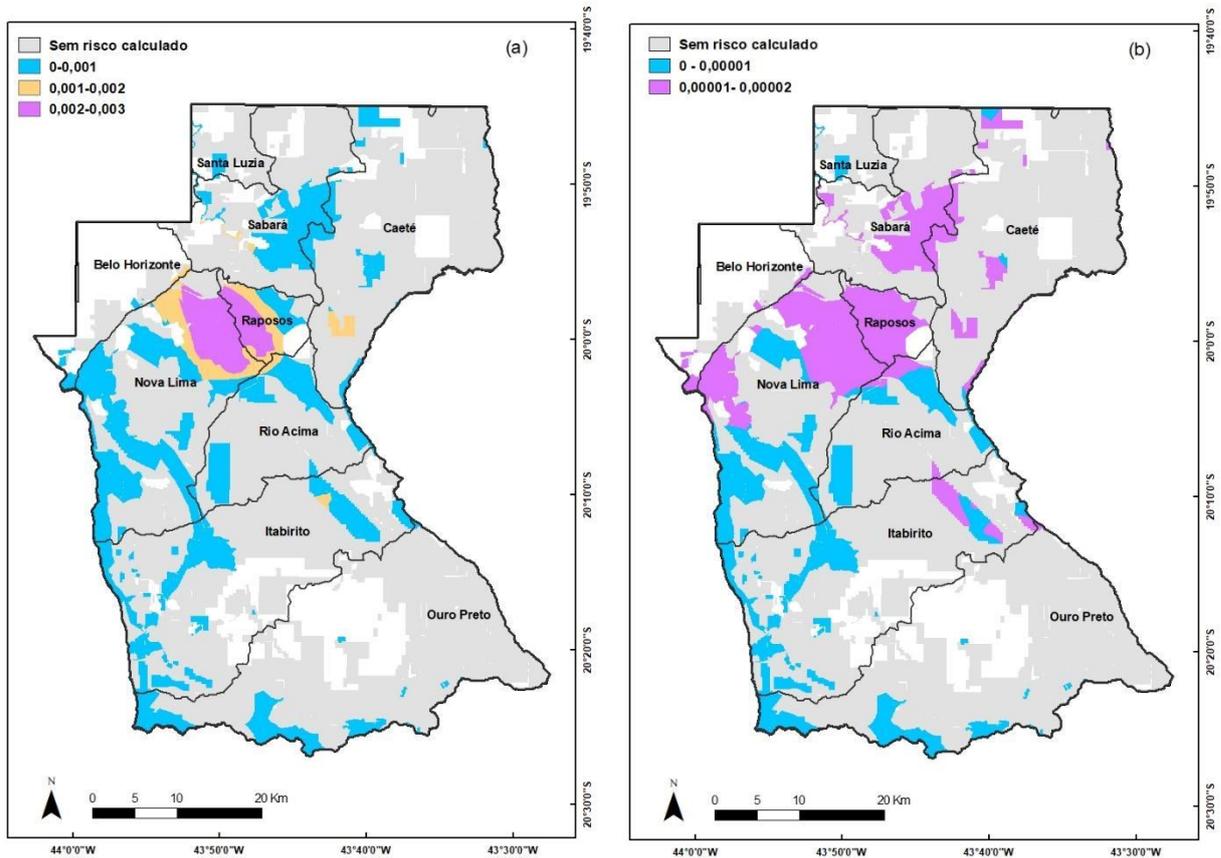


Figura 6.8: Risco carcinogênico do As para adulto (a) e criança (b) em região de concessão de lavra.

Comparativamente ao cenário anterior, pode-se notar que nas áreas em comum em que foi calculado o risco há uma diminuição ao dano para ambas faixas etárias e substâncias químicas de análise. Sendo que, nesta projeção futura apenas o arsênio demonstraria danos à saúde humana, todavia, tal como no mapa de risco anterior observa-se que a os maiores índices equivalem a região de Nova Lima e Raposos, porém, para este novo manejo do solo tem-se o risco carcinogênico do As com uma diminuição de 75% para adultos (Figura 6.9) e 99% para as crianças (Figura 6.10).

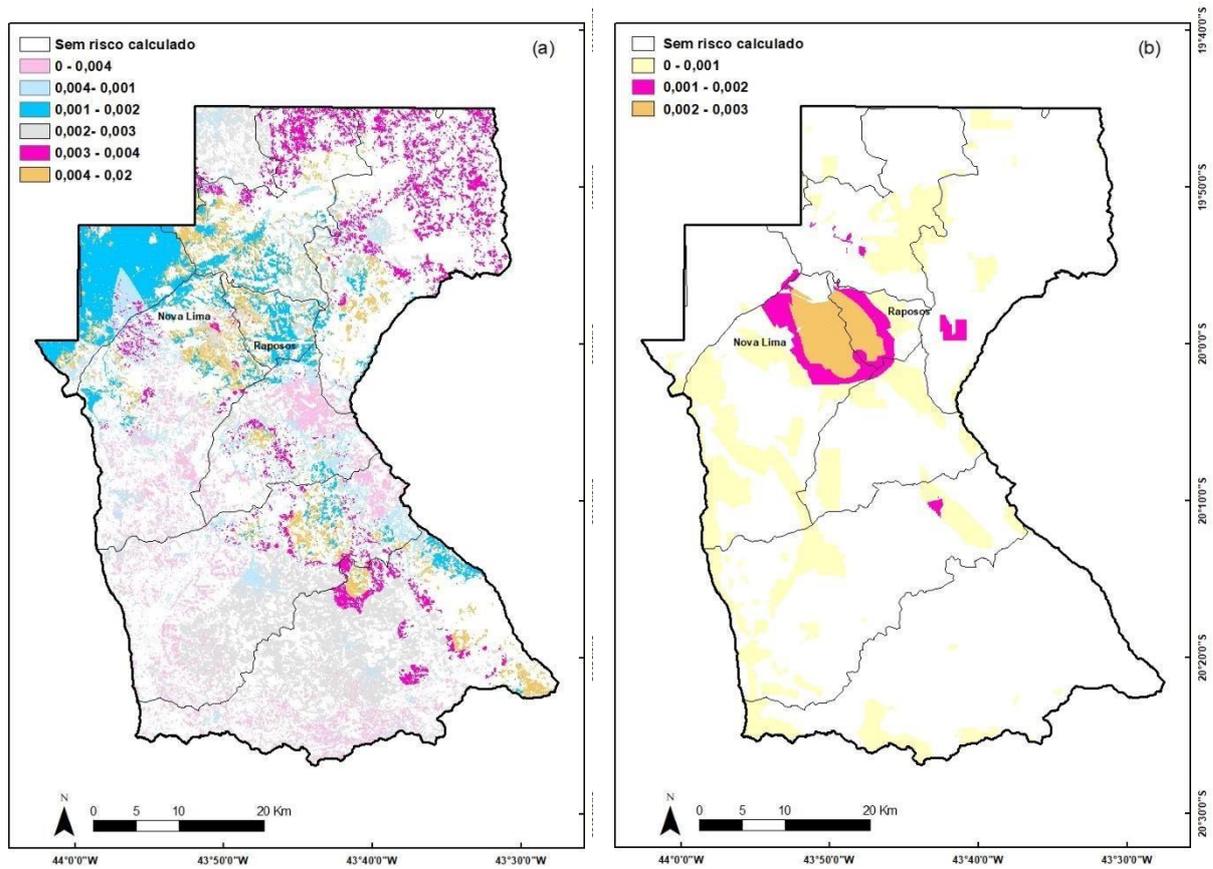


Figura 6.9: Risco carcinogênico atual do arsênio para adulto (a) e risco carcinogênico do arsênio para adulto projetado para concessão de lavra DNPM (b).

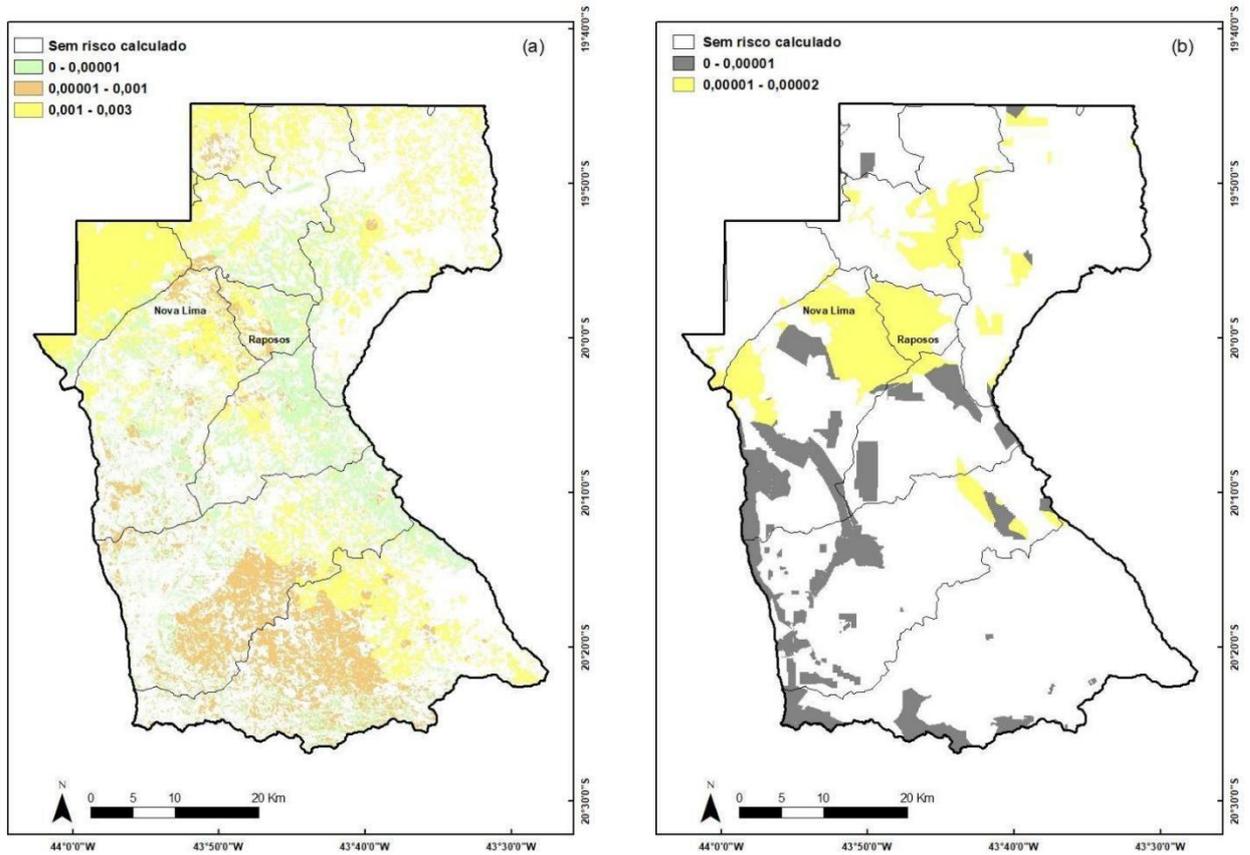


Figura 6.10: Risco carcinogênico do arsênio atual para criança (a) e risco carcinogênico do arsênio para criança projetado para concessão de lavra DNPM (b).

CAPÍTULO 7

CONCLUSÃO

A integração dos dados coletados por Vicq (2015), geoprocessamento e bases cartográficas pré-existentes foram essenciais para que a avaliação do risco toxicológico devido a ingestão de água superficial na região da bacia hidrográfica do Rio das Velhas se tornasse viável. Além disso, ressalta-se a importância da escolha dos elementos traço de análise devido ao seu histórico problemático na região do QF, sobretudo para o arsênio, e devido a sua ocorrência natural oriunda da dissociação e oxidação de minerais na região. Sendo assim, pode-se concluir que o risco toxicológico na região sofre grande influência da ingestão de água com arsênio, visto que demonstrou valores extremos em ambas faixas etárias e tipos de exposição, ao passo que para o cádmio somente a faixa etária dos adultos demonstrou valores acima do recomendado. Além disso, em termos espaciais notou-se que as áreas mais problemáticas para o arsênio são as regiões de Belo Horizonte, Nova Lima, Raposos e Ouro Preto, ao passo que para o cádmio as zonas de Nova Lima, Raposos, Itabirito e Ouro Preto. Todavia, visto que o risco é proporcional a concentração da substância de interesse, e sabendo que a região tem um caráter predominante superestimado para as amostras de arsênio e cádmio, é possível induzir que a região apresenta um risco carcinogênico e não carcinogênico possivelmente menor que o estimado. Ressalta-se, dessa forma, a necessidade de um maior nível de detalhamento em algumas zonas, com destaque para a porção norte de Nova Lima e Leste de Itabirito e Ouro Preto. Além desta quantificação do risco, pode-se notar que o manejo agrícola é o que mais causa danos à saúde humana na região.

Por fim, ao projetar futuras modificações em função das áreas de concessões de lavra, trabalhou-se com suposições e tendências de alterações. Cabe ressaltar que as localidades de ocupação destas concessões de lavra são, primordialmente, para a zona de formação natural florestal e não florestal. Sendo assim, tendo em vista que não foi calculado o risco toxicológico para esta área, já que não apresenta padrões CETESB (Brasil 2009), já era esperado que o risco projetado nesta transformação seria distinto. Dessa forma, ao correlacionar as áreas em que se calculou o risco pode-se notar que o manejo industrial para as zonas de concessão causaria uma redução do risco toxicológico carcinogênico e não carcinogênico, sendo que para o cádmio não ofereceria mais danos à saúde humana. No entanto, deve-se refletir sobre outros aspectos frente a estas alterações, isto é, a transformação para um meio industrial afeta diretamente o aumento da população, acarretando também em uma alteração demográfica. Sendo assim, pode-se inferir que esta alteração do uso do solo pode promover outras modificações não estimadas, por isso, tornar o risco maior do que o projetado.

À vista dos produtos cartográficos sobre risco toxicológico na região e a previsão futura de utilização da área de estudo (atividades minerárias), foi possível perceber a importância do estudo do planejamento territorial na região. Entretanto, vale ressaltar que este estudo deve ser feito de forma integrada, isto é, considerar risco atual na região e verificar as possíveis alterações decorrentes deste novo uso do solo. Sendo assim, ressalta-se a importância do zoneamento ambiental estadual na região de pesquisa para que haja um monitoramento do manejo do solo, e, dessa forma, maior controle sobre os impactos no meio ambiente. Além disso, é essencial que as práticas da população regional sejam estudadas, visto que existem outras formas de ingestão de água, tal como recreação e uso caseiro, e, por isso, o risco toxicológico pode ser ainda mais grave. Sendo assim, para que seja garantido qualidade de água para a população deve-se compreender a interação homem e meio e os manejos mais maléficos, pois, dessa forma a fonte de contaminação é investigada e, com isso, pode ser mitigada ou resolvida.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alkmim F. F. & Noce C. M. 2006. Outline of the geology of the Quadrilátero Ferrífero. In: Alkmim F. F. & Noce C. M. (eds.). The Paleoproterozoic Record of the São Francisco Craton. IGCP 509 Field workshop, Bahia and Minas Gerais, Brazil. Field Guide & Abstracts, p.114.
- Alkmim F.F. & Martins-Neto M.A. 2012. Proterozoic first-order sedimentary sequences of the São Francisco craton, eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, **33**:127-139.
- Alkmim, F. F., & Marshak, S. 1998. Transamazonian orogeny in the Southern Sao Francisco craton region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. *Precambrian Research*, **90**:29-58.
- Almeida, F.F.M. 1977. O Cráton do São Francisco. *Revista Bras. Geociências*, **7**: 349–364.
- Alvarenga, L.H.V.; Pinto, A.L.R.; Silva, S.T.; Altoé, T.F.; Morais, V.A.; Mello, J.M. 2010. Comparação de procedimentos de amostragem na precisão de Inventário Florestal em fragmento de Floresta Estacional Semidecidual. In: Congresso de Pós Graduação da UFLA. Lavras, Anais, v. 19, p. 6.
- Amaral Sobrinho, N. M. B. 1993. *Interação dos metais pesados de resíduos siderúrgicos com um solo podzólico vermelho-amarelo*. PhD Thesis. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 163 p.
- Aranoff, S. 1989. *Geographic information systems: a management perspective*. Ottawa, WDL Publications, 294 p.
- Assunção, J. C.; Cunha, S. B. 2009. Relações entre o Crescimento Urbano Desordenado e a Qualidade das Águas Fluviais na Cidade do Rio de Janeiro. In: Simpósio Brasileiro de Geografia Física Aplicada, Viçosa/MG, p. 1-14.
- ATSDR-Agency for Toxic Substance and Disease Registry.2000. *Toxicological Profile for Arsenic*. Atlanta, Geórgia.
- ATSDR-Agency for Toxic Substance and Disease Registry.2005. *Public Health Assesment Guidance Manual*. Atlanta, Geórgia.
- Barbosa, A.L.M. 1979. Variações de fácies na Série Minas. *Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia*, Núcleo Minas Gerais, **1**:89–100.
- Barbosa, J.S.F., Barbosa, R.G. 2017. The Paleoproterozoic Eastern Bahia Orogenic Domain. In: U.G. Cordani et al. (eds.), *São Francisco Craton, Eastern Brazil, Regional Geology Reviews*, 57-69 p.
- Borba R. B. 2002. *Arsênio em ambiente superficial: Processos geoquímicos naturais e antropogênicos em uma área de mineração aurífera*. Dissertation, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Campinas 169 p.
- Borba, R.P.; Figueiredo, B.R.; Rawllins, B. G.; Matchullat, J. 2000. Arsenic in water and sediment in the Iron Quadrangle, Minas Gerais state, Brasil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 554-557.
- Brasil. Constituição 1988. *Constituição da República Federativa do Brasil*. Brasília, DF: Senado Federal. Art 225.
- Camargo, E. C. G., Fucks, S. D., Câmara, G. 2004. *Análise espacial de superfícies*. Brasília, Análise espacial de dados geográficos. Planaltina: Embrapa Cerrados, 79-122 p.
- Caritat P. de, Lech M., Mcpherson A., Phillips D. 2007. National Geochemical Survey Of Australia: Outline Of A New Proposal. *Geoscience Australia*.
- Carneiro, M.A., Noce, C.M., Teixeira, W. 1995. Evolução tectônica do Quadrilátero Ferrífero sob o ponto de vista da Geocronologia. *Revista da Escola de Minas*, **48**: 264–274.
- Carvalho, C. N. 1989. Geoquímica ambiental: conceitos, métodos e aplicações. *Geochemica Brasiliensis*, **1**: 17- 22.
- Carvalho, I. G.1995. *Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos*. Salvador: Bureau Gráfica e Editora, 239 p.

CETESB-Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental. 2001. *Manual de Gerenciamento de Áreas Contaminadas*. São Paulo.

Chauvet, A., Faurre, M., Dossin, I., Charvet, J. 1994. A three-stage structural evolution of the Quadrilátero Ferrífero consequences for Neoproterozoic age and the formation of gold concentrations of the Ouro Preto area, Minas Gerais, Brazil. *Precambrian Research*, **68**: 139–167.

Chemale, F., Jr., Rosiére, C.A., Endo, I. 1991. Evolução Tectônica do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais - Um modelo. *Pesquisas*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, **18**: 104–127.

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente. 2009. Resolução N° 420, de 28 de Dezembro de 2009.

Conway, J., & Sloane, N. 1982. Fast quantizing and decoding and algorithms for lattice quantizers and codes. *IEEE Transactions on Information Theory*, **28**: 227-232.

Cortecchi, G. 2006. *Geologia e saúde*. Tradução Wilson Scarpelli. PGAGEM. São Paulo. Disponível em: <http://www.cprm.gov.br/publique/media/geosaude.pdf> . Acesso em outubro de 2019.

Costa, A. T. 2007. *Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais*. PhD Thesis. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.

Creutin, J.D., Obléd, C. 1982. Objective analysis and mapping techniques for rainfalls fields: An objective comparison. *Water Resources Research*, **18**: 413-431.

Crump, K. S. 1984. A new method for determining allowable daily intakes. *Toxicological Sciences*, **4**: 854-871.

Dana, J. D. 1978. *Manual de mineralogia*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 642 p.

Davis, M.L; Masten,S.J. 2016. *Princípios de Engenharia Ambiental*. Porto Alegre. AMGH.

Dold B. 1999. *Mineralogical and geochemical changes of copper flotation tailings in relation on their original composition and climatic settings – implications for acid mine drainage and element mobility*. PHd Thesis, Université de Genève. Geneva, 230 p.

Dorr, J.V.N. II. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. U.S. Geological Survey Professional Paper, **641**:1-110.

Drake, A.A., Morgan, B.A. 1980. *Precambrian plate tectonics in the Brazilian shield; evidence from the pre-Minas rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. U.S. Geological Survey Professional Paper.

Duarte, R. G. S., Pasqual, A. 2000. Avaliação do cádmio (Cd), chumbo (Pb), níquel (Ni) e zinco (Zn) em solos, plantas e cabelos humanos. *Energia na Agricultura*, **15**: 46-58.

Duffus, J. H. 2002. " Heavy metals" a meaningless term? (IUPAC Technical Report). *Pure and applied chemistry*, **74**:793-807.

Eleutério, L. 1997. *Diagnóstico da situação ambiental da cabeceira da Bacia do Rio Doce MG, no âmbito das contaminações por metais pesados, em sedimentos de fundo*. Dissertation, DEGEO/EM/UFOP, Ouro Preto.

Farina, F., Albert, C., Dopico, C. M., Gil, C. A., Moreira, H., Hippertt, J. P., Lana, C. 2016. The Archean–Paleoproterozoic evolution of the Quadrilátero Ferrífero (Brasil): Current models and open questions. *Journal of South American Earth Sciences*, **68**: 4-21.

Fergusson, D. M., Horwood, L. J., Shannon, F. T. 1990. Early solid feeding and recurrent childhood eczema: a 10-year longitudinal study. *Pediatrics*, **86**: 541-546.

Gair, J. E. 1962. *Geology and ore deposits of the Nova Lima and Rio acima quadrangles, Minas Gerais, Brazil*. Geological Survey Professional Paper, p. 4-40.

Gardiman, B. S., Magalhães, I. A. L., de Freitas, C. A. A., Cecílio, R. A. 2012. Análise de técnicas de interpolação para espacialização da precipitação pluvial na bacia do rio Itapemirim (ES). *Ambiência*, **8**: 61-71.

Goldschmidt, V.M.1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *Journal of Chemical Society*, **140**: 655-673.

Gomes, N. M.; Faria, M. A.; SILVA, A. M.; Mello, C. R., Viola, M. R. 2007. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo associados ao uso e ocupação da paisagem. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental*, **11**:427–435.

- Gonçalves, J. A. C., de Lena, J. C. 2013. Avaliação de risco à saúde humana por contaminação natural de arsênio nas águas subterrâneas e nos solos da área urbana de Ouro Preto (MG). *Revista do Instituto de Geociências*, **13**: 145-158.
- Gotway, C.A.; Hartford, A.H. 1996. Geostatistical methods for incorporating auxiliary information in the prediction of spatial variables. *Journal of Production Agriculture*, **1**: 17-39.
- Grinstead, B., Koschan, A., Page, D., Abidi, M. A. 2006. Model building for simulation and testing under uncertain conditions. *In: Modeling and Simulation for Military Applications*. International Society for Optics and Photonics, p. 98-109.
- Guimarães, E. C. 2004. *Geoestatística básica e aplicada*. Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia.
- Hasui, Y., Carneiro, C.D.R., Almeida, F.F.M., Bartorelli, A..2012. *Geologia do Brasil*. São Paulo. Beca.
- Herz, N. 1970. Gneissic and igneous rocks of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *U.S. Geological Survey Professional Paper*, **641-B**:1-58.
- Hurley,P.M., Almeida, F.F.M.,Melcher,G.C., Cordani, U.G., Rand, J.R., Kawashita, K., Vandomos, P., Pinson, W.H., Fairbairn, H.W. 1967. Test of continental drift by comparision of radiometric ages. *Science*, **157**: 495–500.
- Iarc. International Agency for Research on Cancer. Beryllium, cadmium, mercury and exposures in the glass manufacturing industry. 1993. *IARC Monographs on the Evaluation of Carcinogenic Risk of Chemicals to Humans*, **58**: 444.
- Instituto Mineiro de Gestão de águas (IGAM): Mapas e bases cartográficas. IDE-Sisema. Disponível em <http://idesisema.meioambiente.mg.gov.br/> . Acessado 9 de set de 2020.
- Isaaks, E.H., Srivastava, R.M. 1989. *An introduction to applied geostatistics*. New York, Oxford University Press, 561 p.
- Jakob, A. A. E., & Young, A. F. 2016. O uso de métodos de interpolação espacial de dados nas análises sociodemográficas. *Anais*, p. 1-22.
- Jayjock, M. A. 1998. Risk assessment of contact allergens. *American Journal of Contact Dermatitis*, **9**: 155-161.
- Journel, A.G.; Huijbregts, C.J.1978.*Mining geostatistics*. London, Academic Press, 600 p.
- Ladeira, E.A., Viveiros, J.F.M. 1984. Hipútese sobre a estruturação do Quadrilátero Ferrífero com base nos dados disponíveis. *Boletim. Sociedade Brasileira de Geologia*, Núcleo de Minas Gerais **4**: 1–14.
- Lana, C., Alkmim, F.F., Armstrong, R., Scholz, R., Romano, R., Nalini, H.A. 2013. The ancestry and magmatic evolution of Archaean TTG rocks of the Quadrilátero Ferrífero province, southeast Brazil. *Precambrian Research*, **231**: 157-173
- Landim, P. M. B. 2000. *Introdução aos métodos de estimação espacial para confecção de mapas*. Rio Claro, UNESP.
- Landim, P. M. B. 2006. *Sobre geoestatística e mapas*. Rio Claro, Terrae Didatica, **2**, p. 19-33.
- Landim, P.M.P. 2003. *Análise estatística de dados geológicos*. Rio Claro, UNESP, 253 p.
- Levinson, A.A. 1974. *Introduction to exploration geochemistry*. Calgary. Applied Publishing, 612 p.
- Licht, O.A.B.1988. *Prospecção Geoquímica: princípios, técnicas e métodos*. Rio de Janeiro. CPRM, 216 p.
- Lima, E.R.V. 2000. *Análise espacial de indicadores da erosão do solo através de técnicas estatísticas e de geoprocessamento com apoio do modelo EUPS*. PhD Thesis, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 296 p.
- Lucas, T. P. B., Plec, D., Abreu, M. L., Parizzi, M. G. 2014. Identificação de interpoladores adequados a dados de chuva a partir de parâmetros estatísticos. *Revista Brasileira de Climatologia*, **13**.
- Mabuchl, K., Lilienfeld, A. M., Snell, L. M. 1979. Lung Cancer among Pesticide Workers Exposed to Inorganic Arsenicais. *Archives of Environmental Health*, **34**: 312-320.
- Machado, N., Schrank, A., Noce, C.M., Gauthier, G. 1996. Ages of detrital zircon from Archean-Paleoproterozoic sequences Implications for Greenstone Belt setting and evolution of a Transamazonian foreland basin in Quadrilátero Ferrífero, southeast Brazil. *Earth and Planetary Science Letters* **141**: 259-276.
- Manson, B.H. 1971. *Princípios de Geoquímica*, São Paulo, Ed. Polígono S.A., p. 403.

- Mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero 1: 150.000. Disponível em: <https://qfe2050.ufop.br/news/mapa-geol%C3%B3gico-do-quadril%C3%A1tero-ferr%C3%ADfero-vers%C3%A3o-2019> . Acessado em 17 de fev de 2020.
- Mapbiomas Brasil: Uso e cobertura do solo. Disponível em: <https://plataforma.mapbiomas.org/>. Acessado 10 de set de 2019.
- Marcuzzo, F. N., Andrade, L. R., Melo, D. C. R. 2011. Métodos de Interpolação Matemática no Mapeamento de Chuvas do Estado do Mato Grosso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, **4**: 793-804.
- Marshak, S., Alkmim, F. F. 1989. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. *Tectonics*, **8**: 555-571.
- Martins, C. M. 2005. *Rastreamento geoquímico de possíveis contaminações remanescentes de minerações de pirita no município de Ouro Preto, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais*. PhD Thesis. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto
- Mattiazzo-Prezotto, M. E. 1994. *Comportamento de cobre, cádmio, crômio, níquel e zinco adicionados a solos de clima tropical em diferentes valores de pH*. Dissertation, ESALQ. Universidade de São Paulo, Piracicaba, 197 p.
- Maximiano, A. M. S; Moraes, S.L; Teixeira, C.E. 2014. *Gerenciamento de áreas contaminadas*. São Paulo, IPT e BNDS, p. 35-81.
- Mello, C. R. de.; Lima, J. M.; Silva, A. M.; Mello, J. M.; Silva, M. S. 2003. Krigagem e inverso do quadrado da distância para interpolação dos parâmetros da equação de chuvas intensas. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, **27**: 925-933.
- Moraes, M.A.S. 1985. Reconhecimento de fácies sedimentares em rochas metamórficas da região de Ouro Preto (MG). In: Sociedade Brasileira de Geologia. *Simpósio Geol. Minas Gerais*, Belo Horizonte, p. 84-93.
- Nrc, N., Nae, I. 1983. *Safety of existing dams: evaluation and Improvement*. Washington, DC.
- Oliveira M. R. 1999. Investigação da Contaminação por Metais Pesados no Sedimento de Corrente e Água do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais e Arredores. Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, Dissertação de Mestrado, 180 p.
- O'Rourke, J. F., Patton, H., & Bradley, R. 1957. Fundamental limitations of radiophosphorus counting methods used for detection of intraocular neoplasm. *AMA archives of ophthalmology*, **57**: 730-738.
- Parra, R. R., Roeser, H. M. P., Leite, M. G. P., Nalini Jr, H. A., Guimarães, A. T. A., Pereira, J. C., & Friese, K. 2012. Influência antrópica na geoquímica de água e sedimentos do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, **21**: 36-49.
- Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M., Pinto, C.P. 2001. The Araçuaí-West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanland assembly. *Precambrian Research*, **110**: 307-323.
- Pernía B., Sousa A. D. E., Reyes R., Castrillo M. 2008. Biomarcadores de contaminación por cadmio en plantas. *Interciencia*, **33**: 112-119.
- Plumlee G. S. 1999. The environmental geology of mineral deposits. The environmental geochemistry of ore deposits. *Reviews in Economic Geology*, **6**: 71-116.
- Polignano, M.V.; Polignano, A.H.; Lisboa, A.L.; Alves, A.T.G.M.; Machado, T.M.M.; Pinheiro, A.L.D.; Amorim, A.2001. *Uma viagem ao projeto Manuelzão e à bacia do Rio das Velhas – Manuelzão vai à Escola*. Belo Horizonte, Coleção Revitalizar.
- Raposo, A. A., de Paula Barros, L. F., Júnior, A. P. M. 2011. O uso de taxas de turbidez da bacia do alto rio das Velhas–Quadrilátero Ferrífero/MG–como indicador de pressões humanas e erosão acelerada. *Revista de Geografia*, **27**: 34-50.
- Reimann C. Caritat P. de .1998. Chemical elements in the environment: Factsheets for the geochemist and environmental scientist. Springer, Heidelberg; 398 p.
- Reis, L.A., Martins-Neto, M.A., Gomes, N.S., Endo, I. 2002. A bacia de antepaís paleoproterzóica Sabará, Quadrilátero Ferrífero, MG. *Revista Brasileira de Geociências*, **32**: 43- 58.
- Renger, F.E., Noce, C.M., Romano, A.W., Machado, N.,1995. Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, **2** :1-11.
- Renger, F.E., Silva, R.M.P., Suckau, V.E. 1988. Ouro nos conglomerados da Formação Moeda, Sinclinal de Gandarela, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Congresso Brasileiro de Geologia, p 44- 57.
- Roels, H. A., Lauwers, R. R., Buchet, J. P., & Bernard, A. 1981. Environmental exposure to cadmium and

renal function of aged women in three areas of Belgium. *Environmental research*, **24**:117-130.

- Rohde, G. M. 2004. *A geoquímica ambiental*. In: *Geoquímica ambiental e estudos de Impacto*. São Paulo. Signus, 36-45 p.
- Rosiere, C.A., Spier, C.A., Rios, F.J., Suckau, V.E. 2008. The itabirites of the Quadrilátero Ferrífero and related high-grade iron ore deposits: an overview. *Reviews in Economic Geology*, **15**: 223-254.
- Scarpelli, W. 2003. Introdução à geologia médica. Disponível em http://www.cprm.gov.br/pgagem/resumo_pales.pdf. Acessado 18 de maio de 2020.
- Schrank, A., Machado, N., 1996b. Idades UePb em monazitas e zircões do distrito aurífero de Caeté, da Mina de Cuiabá e do Depósito de Carrapato, Quadrilátero Ferrífero (MG). In: 39th Congresso Brasileiro de Geologia, Salvador, Anais, v. 6, p. 473-475.
- Silva, S. D. A., Souza Lima, J. S. D., Souza, G. S. D., Oliveira, R. B. D. 2008. Avaliação de interpoladores estatísticos e determinísticos na estimativa de atributos do solo em agricultura de precisão. *Idesia*, **26**: 75-81.
- Smedley, P. L.; Kinniburgh, D. G. 2002. A review of the source, behaviour and distribution of arsenic in natural waters. *Applied Geochemistry*, **17**: 517-568.
- Smith, E. 1991 *Chemical risks to human health and the environment: identification and quantification*. Geneva. IPCS/WHO, 15 p.
- Souza, P.C., Miller, G. 1984. Primeiras estruturas algais comprovadas na Formação Gandarela, Quadrilátero Ferrífero. *Revista Escola de Minas*, **2**: 161-198.
- Sturaro, J. R. 2015. *Apostila de geoestatística básica*. Rio Claro, UNESP, 34 p.
- Tabios, G.Q. & Salas, J.D. 1985. A comparative analysis of techniques for spatial interpolation of precipitation. *Water Res. Bull*, **21**: 365-380.
- Tan, K. H. 2000. *Environmental soil science*. New York, Marcel Dekker, 452 p.
- Toro, G. A., & Melo, C. E. 2009. Aplicación de métodos de interpolación geoestadísticos para la predicción de niveles digitales de una imagen satelital con líneas perdidas y efecto sal y pimienta. *Tecnura*, **12**: 55-67.
- USEPA-- United States Environmental Protection Agency. 1989. *Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual (Part A)*. Washington, EPA.
- Vicente, J. 2004. *Estudo comparativo de métodos geoestatísticos aplicados em agricultura de precisão*. Dissertation, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, São Paulo, 163 p.
- Vicq, R.F.C. 2015. Mapeamento Geoquímico e estabelecimento de valores de referência (Background) de sedimentos fluviais do quadrilátero Ferrífero. PhD Thesis. Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto
- Vieira, S. R., Neto, F. L. 1995. Variabilidade Espacial do Potencial de Erosão das Chuvas do Estado de São Paulo. *Bragantia*, **54**: 405-412
- Viglio E.P., Cunha F.G. 2010. *Atlas Geoquímico da Bacia do Rio das Velhas*. Belo Horizonte, CPRM, 15 p.
- Viglio, E. P., Cunha, F. G. D. 2018. *Atlas geoquímico da bacia do Rio São Francisco: Minas Gerais*. Belo Horizonte, CPRM.
- Wallace, R.M. 1965. *Geology and mineral resources of the Pico de Itabirito district*. U.S. Geological Survey Professional Paper, p. 68.
- Warrick; A.W.; Zhang, R.; Harris, M.K., Myers, D.E. 1988. *Direct comparisons between kriging and other interpolation-Validation of flow and transport models for the unsaturated zone*. New Mexico, p. 254-326.
- Wollenhaupt, N.C.; Wolkowski, R.P.; Clayton, M.K. 1994. Mapping soil test phosphorus and potassium for variable-rate fertilizer application. *Journal of Production Agriculture*, **7**: 441-448.
- World Health Organization 1997. *Risk Management and Food Safety*. Rome, FAO/WHO Consultation.

World Health Organization 2001. *United Nations Synthesis Report on Arsenic in Drinking water*. Geneva, World Health Organization.

World Health Organization.1984. *Health promotion: a discussion document on the concept and principles: summary report of the Working Group on Concept and Principles of Health Promotion, Copenhagen*.

Yamamoto, J., Landim, P. 2013. *Geoestatística. Conceitos e Aplicações*. São Paulo, Editora Oficina de Textos.

Zaidan, R.T. 2017. Geoprocessamento conceitos e definições. *Revista de Geografia – PPGeo - UFJF*. Juiz de Fora, **7**: 195-201.

Zhou, Z.; Zhang, G.; Yan, M. & Wang, J. 2011. Spatial variability of the shallow groundwater level and its chemistry characteristics in the low plain around the Bohai Sea, North China. *Environmental Monitoring and Assessment*, **184**: 3697-3710.

Zucchetti, M., Lobato, L.M., Baltazar, O.F. 2000. Volcanic and volcanoclastic features in Archean rocks and their tectonic environment, Rio das Velhas Greenstone Belt, Quadrilátero Ferrífero, MG. Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, **30**: 388-39

ANEXOS

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro absoluto
12	57,7	63,52404	5,824	10,0936581
13	57,7	62,3758	4,6758	8,103644359
14	57,7	63,2994	5,5994	9,704326957
15	57,7	62,36399	4,664	8,083173034
16	57,7	64,9515	7,2515	12,56758839
17	57,7	73,9475	16,2475	28,15858594
18	57,7	59,73524	2,0352	3,527286566
24	57,7	62,65896	4,959	8,594377017
25	57,7	63,17221	5,4722	9,483897319
26	57,7	60,71732	3,0173	5,229315121
40	57,7	58,20405	0,504	0,873568529
42	57,7	70,26581	12,5658	21,77782611
48	57,7	69,52008	11,8201	20,48540327
51	57,7	65,91943	8,2194	14,24512026
52	57,7	67,23926	9,5393	16,53251069
53	57,7	58,12964	0,4296	0,744613592
54	57,7	58,16844	0,4684	0,811849785
59	57,7	57,87999	0,18	0,311947388
60	57,7	59,2531	1,5531	2,691674243
63	57,7	64,57412	6,8741	11,91355909
64	57,7	63,25824	5,5582	9,632989026
68	57,7	67,66428	9,9643	17,26911693
71	57,7	74,90653	17,2065	29,82067376
76	57,7	65,66134	7,9613	13,797816
77	57,7	71,12872	13,4287	23,27334359
79	57,7	59,3956	1,6956	2,93864243
82	57,7	60,01043	2,3104	4,004207595
83	57,7	59,92903	2,229	3,863141882
92	57,7	66,04667	8,3467	14,46563524
93	57,7	61,15366	3,4537	5,985549487
95	57,7	58,14557	0,4456	0,772210147
96	57,7	59,85908	2,1591	3,741912099
99	72,6	90,93346	18,3335	25,25269928
134	257	270,8934	13,8934	5,405985571

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro absoluto
0	57,7	85,61443	27,9144	48,37856825
1	57,7	92,52165	34,8217	60,34948644
2	57,7	81,02417	23,3242	40,42317484
11	57,7	116,0731	58,3731	101,1665234
22	57,7	79,37641	21,6764	37,56743145
23	57,7	111,423	53,723	93,1075085
33	57,7	93,70126	36,0013	62,39386738
65	57,7	97,76026	40,0603	69,42853106
69	57,7	88,3009	30,6009	53,03448272
70	57,7	79,96749	22,2675	38,59182962
72	57,7	85,83067	28,1307	48,75332711
78	57,7	89,14002	31,44	54,48876604
91	57,7	101,3614	43,6614	75,66961068
94	57,7	83,37936	25,6794	44,50494954
97	57,7	97,78329	40,0833	69,46843505
98	64,8	93,26503	28,465	43,92751404
105	84,2	146,9756	62,7756	74,55536436
106	84,6	127,6221	43,022	50,85348664
111	92,6	170,9985	78,3985	84,66360699
123	147,5	178,5426	31,0426	21,04581521
130	194,7	227,8725	33,1725	17,03775881
131	196,2	230,0269	33,8269	17,24100727
133	251	327,9335	76,9335	30,65078116
139	335	371,245	36,245	10,81941654

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro Absoluto
121	142	324,6518	182,6518	128,6280095
49	57,7	156,0335	98,3335	170,4220411
50	57,7	142,7794	85,0794	147,4512971
66	57,7	256,0099	198,3099	343,6913797
67	57,7	156,5723	98,8723	171,3558705
100	73,4	172,2093	98,8093	134,6176235
102	81,6	190,9891	109,3891	134,055312
107	86,4	202,7057	116,3057	134,6130683

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro absoluto
124	148,2	60,58496	-87,615	59,11945764
125	148,8	57,7	-91,1	61,22311828
127	163,5	62,31721	-101,1828	61,88549908
128	173	57,7	-115,3	66,64739884
129	192	89,82218	-102,1778	53,21761558
135	263,2	161,4443	-101,7557	38,66099074
137	283,5	62,66337	-220,8366	77,89651772
138	328	141,3066	-186,6934	56,91870936
140	393	181,2721	-211,7279	53,87477996
141	414	314,1518	-99,8482	24,11793312

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro absoluto
31	6	8	2	33,52095694
40	7	11	4	48,44692819
42	10	15	5	48,98846384
43	6	11	5	76,73879514
44	6	9	2	39,1329675
46	6	14	7	119,7725487
66	12	15	3	28,65429714
70	6	9	2	37,16197178
72	8	15	7	90,43383469
87	6	8	2	30,02200364
90	6	8	2	26,47643104
96	6	11	5	75,55611185
100	6	9	3	41,32003973
115	9	13	4	39,66858297
129	6	9	3	45,49432553
137	6	8	2	32,98431582
152	6	12	6	95,85098512
161	6	13	7	108,8858097
177	6	9	3	41,39568365

FID	Mensurado	Predito	Erro (P-M)	% do erro absoluto
0	7,48	6,456214	-1	13,68697277
1	8,62	7,410966	-1	14,02591949
4	8,37	7,222639	-1	13,70801757
5	6,84	6,76787	-0,07213	1,054535992
10	7,38	6,2	-1	15,98915989
15	7,52	6,2	-1	17,55319149
34	7,9	6,2	-2	21,51898734
39	7,9	7,381099	-0,518901	6,568366097
41	16,3	10,16964	-6	37,60959458
45	18,48	6,249837	-12	66,18053472
67	15,37	11,87031	-3	22,76959904
71	15,79	7,809885	-8	50,53904138
74	6,82	6,394886	-0,425114	6,233341424
78	9,82	7,990033	-2	18,63510679
81	9,41	7,628254	-2	18,93460218
88	8,38	6,315394	-2	24,63729904
89	7,92	6,291425	-2	20,5628139
95	9,42	9,071165	-0,348835	3,703133
97	11,52	7,249892	-4	37,06690994
98	8,58	7,065896	-2	17,64689915
99	9,72	6,912008	-3	28,8888094
116	13,63	10,24116	-3	24,86310093
118	19,63	17,70794	-2	9,791458146
128	7,83	7,274811	-0,555189	7,090540468
132	6,8	6,521133	-0,278867	4,100982095
138	8,47	7,112717	-1	16,02459008
153	12,6	6,381166	-6	49,35582869
154	11,74	10,8402	-0,899802	7,664416108
156	12,64	10,67722	-2	15,52836554
160	13,57	6,2	-7	54,3109801
163	7,38	6,234982	-1	15,51514895
169	7,37	6,279108	-1	14,80179246
172	6,83	6,230724	-0,599276	8,774179294
174	8,36	7,803289	-0,556711	6,659221971
176	9,19	7,394172	-2	19,54111292
180	14,26	12,08483	-2	15,25362179

Classificação	Qr < 1 (As adulto)	Qr ≥ 1 (As adulto)
Formação natural florestal e não florestal	1701383273	0
Uso agropecuário	0	656818953,8
Infraestrutura urbana	0	185088810,7
Não observado	12838290,92	0
Atividade industrial- Mineração	0	372280537,4

Classificação	Qr < 1 (As criança)	Qr ≥ 1 (As criança)
Formação natural florestal e não florestal	1701383273	0
Uso agropecuário	0	656818953,8
Infraestrutura urbana	0	185088810,7
Não observado	12838290,92	0
Atividade industrial- Mineração	372280537,4	0

Classificação	Qr < 1 (Cd)	Qr ≥ 1 (Cd)
Formação natural florestal e não florestal	1701383273	0
Uso agropecuário	608000329,1	48818624,7
Infraestrutura urbana	185088810,7	0
Não observado	12838290,92	0
Atividade industrial- Mineração	372280537,4	0

Risco carcinogênico As para adulto	Classificação	Sem risco calculado	0-0,001	0,001-0,002	0,002-0,003	0,003-0,02
	Formação natural florestal e não florestal	1701383273	0	0	0	0
	Uso agropecuário	0	0	0	424512279,9	232306673,9
	Infraestrutura urbana	0	35880669,51	141778553,4	7385122,204	44.465,60
	Não observado	12838290,92	0	0	0	0
	Atividade industrial-Mineração	0	232324306,8	133761713	6194517,534	0

Risco carcinogênico do As para criança	Classificação	Sem risco calculado	0-0,00001	0,00001-0,0005	0,0005-0,001	0,001-0,002	0,002-0,003
	Formação natural florestal e não florestal	1701383273	0	0	0	0	0
	Uso agropecuário	0	0	267242066,2	327597979,8	21270224	40808684
	Infraestrutura urbana	0	0	30245805,17	97532218,59	37952920	19357867
	Não observado	12838290,9	0	0	0	0	0
	Atividade industrial-Mineração	0	346.202.232	25078305,5	0	0	0

	Risco carcinogênico máx		Buffer (m)
	Adulto	Criança	
As	0,006463	0,001337	10
	0,006549	0,001355	20
	0,013552	0,002823	40
	0,013552	0,002823	60
	0,013552	0,002823	90
	0,013552	0,002823	130
	0,013557	0,002824	200
	0,01358	0,002829	300
	0,013581	0,002829	400
	0,013743	0,002863	500
	0,013863	0,002888	800
	0,014008	0,002919	1000
	0,014129	0,002944	1200
	0,014378	0,003	1500
0,015118	0,003152	2000	
Mudança(%)	233,8968	235,6809	

	Qr máx		Buffer (m)
	Adulto	Criança	
As	28,7265	5,95341	10
	29,1052	6,02177	20
	60,6409	12,5464	40
	60,6409	12,5464	60
	60,6409	12,5464	90
	60,6409	12,5464	130
	60,6673	12,5519	200
	60,7707	12,5733	300
	60,7743	12,574	400
	61,5032	12,7248	500
	62,046	12,8371	800
	62,6976	12,9719	1000
	63,2439	13,0849	1200
	64,3661	13,3333	1500
67,703	14,0075	2000	
Mudança(%)	235,6813	235,2853	

	Qr máx		Buffer (m)
	Adulto	Criança	
Cd	1,17419	0,242935	10
	1,18991	0,246188	20
	1,19274	0,246775	40
	1,19274	0,246775	60
	1,19274	0,246775	90
	1,20113	0,248509	130
	1,21455	0,251285	200
	1	0,252982	300
	1	0,253965	400
	1	0,254757	500
	1	0,258295	800
	1	0,260045	1000
	1	0,261921	1200
	1,33995	0,27723	1500
	1,43214	0,296304	2000
Mudança(%)	121,9683	121,9684	