



Mapeamento de índices geoquímicos multielementares para detecção de contaminações ambientais por metais potencialmente tóxicos e fósforo na região do Quadrilátero Ferrífero – MG

Multielement geochemical indices mapping for detecting environmental contamination by potentially toxic metals and phosphorus in the Iron Quadrangle region – MG

Erick Márcio de Oliveira Pereira*¹
Iago Silva Rebouças¹
Rafaela de Fátima Ferreira Vasconcelos¹
Gustavo Filemon Costa Lima²
Eduardo Duarte Marques^{3,4}
Ana Rita Gonçalves Neves Lopes
Salgueiro¹

¹ Universidade Federal do Ceará
Departamento de Geologia
Campus do Pici – Bloco 912
Fortaleza - CE - Brasil
CEP - 60440-554

² Centro de Desenvolvimento da Tecnologia Nuclear
Av. Pres. Antônio Carlos, 6627 s/n
Pampulha, Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP - 31270-901

³ Serviço Geológico do Brasil
Divisão de Geoquímica (DIGEOQ)
Avenida Brasil, 1731
Belo Horizonte - MG - Brasil
CEP - 30140-002

⁴ Universidade Federal Fluminense
Instituto de Química
Programa de Pós-Graduação em Geociências
(Geoquímica)
Outeiro São João Baptista s/n
Centro - Niterói - RJ - Brasil
CEP - 24020-141

*Autor Correspondente: erickmopereira@gmail.com

Copyright

This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.



DOI:10.21715/GB2358-2812.202640001

RESUMO

Os mapeamentos geoquímicos vêm sendo utilizados em diferentes países e para diferentes objetivos, sendo uma ferramenta de extrema importância para a identificação das características geoquímicas do ambiente. Este trabalho está localizado especificamente nas folhas: Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI), Igarapé (SF-23-X-A-III) e Ouro Preto (SF-23-A-II) totalizando uma área de 8700 km². O objetivo geral desta pesquisa consiste na produção de índices ambientais para sete elementos com potencial toxicidade ambiental e humana, sendo eles: arsênio, cádmio, cromo, chumbo, níquel, zinco e fósforo. Foram utilizadas 589 amostras de sedimentos fluviais ativos coletadas durante o projeto “Geoquímica do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno” executado pela SBGEO – Serviço Geológico do Brasil. O tratamento dos dados foi realizado a partir de técnicas de estatística descritiva univariada e os dados foram separados de acordo com a localização por unidade geológica. Como resultado, foram produzidos três mapas de índices geoquímicos multielementares, três mapas de índice de risco ecológico potencial e três mapas de grau de contaminação modificado, comparando-os com valores de *background* regionais e globais previamente conhecidos. As comparações com valores de *background* regionais e globais apresentaram resultados anômalos que não correspondem às características geoquímicas naturais do Quadrilátero Ferrífero. Dessa forma, os resultados mais representativos foram obtidos a partir da utilização de valores de *background* local, definidos com base nas unidades geológicas da área de estudo.

Palavras chaves: Sedimentos de Corrente, Índices Geoquímicos, Qualidade Ambiental

ABSTRACT

Geochemical mapping has been used in different countries for different purposes and is an extremely important tool for identifying the geochemical characteristics of the environment. This work is specifically located on the map sheets: Belo Horizonte (SE-23-Z-C- VI), Igarapé (SF-23- X-A-III) and Ouro Preto (SF-23- A-II) totaling an area of 8,700 km². The general aim of this research is to produce environmental indices for seven elements with potential environmental and human toxicity, namely: arsenic, cadmium, chromium, lead, nickel, zinc and phosphorus. A total of 589 active stream sediment samples collected during the project “Geochemistry of the Iron Quadrangle and its Surroundings” carried out by SBGEO - Geological Service of Brazil were used. The data was processed using univariate descriptive statistical techniques and the dataset was separated according to geological units. As a result, three maps of multielement geochemical indices, three maps of ecological potential risk index and three maps for the modified degree of contamination, comparing them with already known regional and global background values. Comparisons with regional and global background values produced anomalous results that are not consistent with the natural geochemical characteristics of the Iron Quadrangle. Therefore, the most representative results were obtained using local background values, defined based on the geological units of the study area.

Keywords: Stream Sediments, Geochemical Indices, Environmental Quality

1 INTRODUÇÃO

Os processos naturais e as atividades humanas estão modificando continuamente a composição química de nosso ambiente. Portanto é de extrema importância e aplicabilidade determinar as concentrações e distribuições espaciais dos elementos químicos na superfície da terra e compreender seus efeitos na saúde ambiental e humana (DARNLEY *et al.*, 1995). A intensa diversificação do uso e ocupação do solo e a industrialização, que promovem descargas de diferentes espécies químicas alóctones ao ambiente natural, podem influenciar diretamente na sua concentração e dispersão ocasionando alteração dos teores elementares naturais encontrados em uma área.

A região do Quadrilátero Ferrífero (QF) possui características particulares pelos seus aspectos naturais e geológicos, já conhecidos mundialmente, os quais levam a uma grande diversidade de minérios, tais como, ouro, prata, ferro, manganês e grafita, sendo considerada, por isso, uma região com imenso patrimônio geoambiental. Além disso, também se constitui como uma das áreas de maior concentração populacional do Estado e um dos pilares econômicos de Minas Gerais e do Brasil (VICQ, 2015). Em ambientes sem influência das atividades humanas, a geoquímica do solo se relaciona quase que exclusivamente a fatores geológicos. Em zonas urbanas os parâmetros naturais se somam a diversificados agentes

antrópicos, produzindo um quadro geoquímico mais complexo. Neste contexto o mapeamento geoquímico dos solos, dos sedimentos e das águas permitem, entre outros produtos, definir zonas anômalas (áreas enriquecidas e/ou empobrecidas) em um elemento, ou em um conjunto de elementos (elementos potencialmente tóxicos - PTE, por exemplo), e inferir ou até mesmo identificar os agentes causadores, permitindo a estruturação de métodos remediadores e de monitoramento (CICCHELA *et al.*, 2008).

A construção de uma base ambiental em contextos geoquímicos é uma tarefa desafiadora, principalmente quando se busca apresentar informações que evidenciem problemas de contaminação. A variabilidade litológica e geológica das regiões pode resultar em valores anômalos ou atípicos, quando analisados em contextos geoquímicos e antrópicos diversos. Por essas razões, é notável a necessidade de se criar mecanismos e padronizar as técnicas de avaliação ambiental.

O objetivo geral dessa pesquisa é a identificação, através de índices geoquímicos multielementares, de zonas ambientalmente suscetíveis relativamente aos valores de concentração de 7 elementos com potencialidades tóxicas conhecidas na Região das Folhas Igarapé, Ouro Preto e Belo Horizonte. São eles: As, Cd, Cr, Ni, P, Pb, Zn e P.

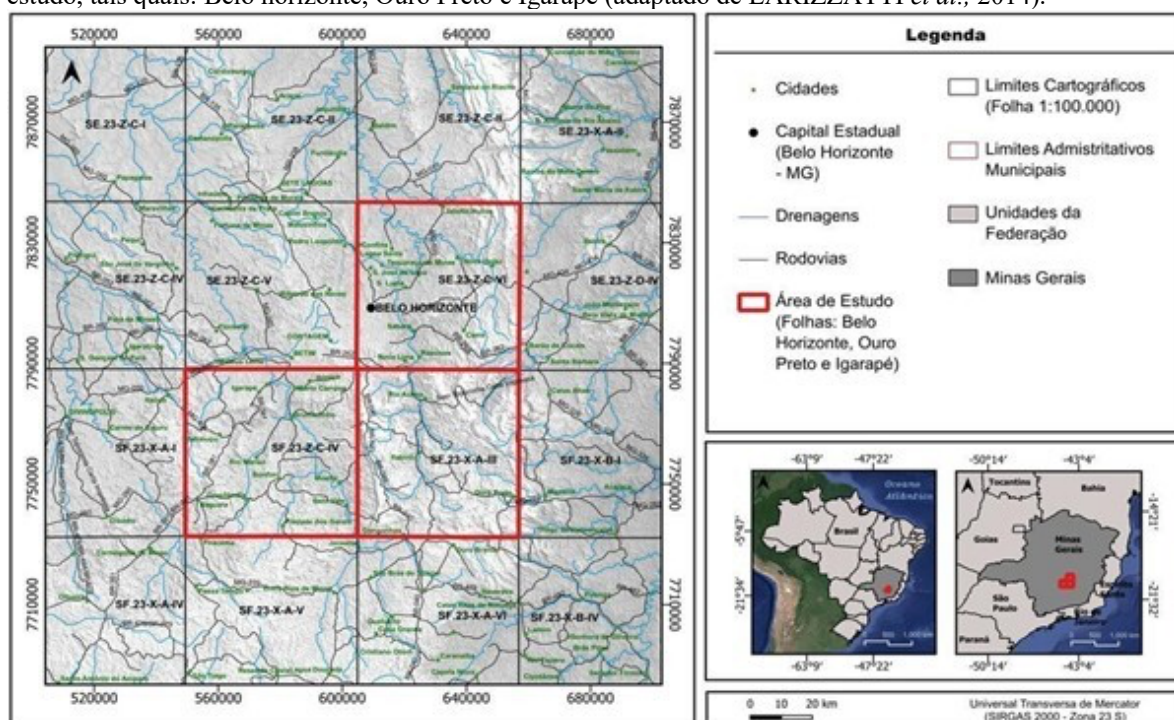
1.1 ÁREA DE ESTUDO

O Quadrilátero Ferrífero é uma formação geológica que possui um formato semelhante a um quadrado, abrangendo uma área de cerca de 7000 km². Essa região abrange a antiga capital de Minas Gerais, Ouro Preto, localizada a sudeste, e a atual capital, Belo Horizonte, situada a noroeste (ROESER; ROESER 2010). Segundo informações do censo de 2022 do IBGE, o Quadrilátero Ferrífero engloba, total ou parcialmente, 35 municípios: Barão de Cocais, Belo Horizonte, Belo Vale, Betim, Brumadinho, Caeté, Catas Altas, Congonhas, Conselheiro Lafaiete, Ibirité, Igarapé, Itabira, Itabirito, Itatiaiaçu, Itaúna, Jeceaba, João Monlevade, Mariana, Mário Campos, Mateus Leme, Moeda, Nova Lima, Ouro Branco, Ouro Preto, Raposos, Rio Acima, Rio Manso, Rio

Piracicaba, Sabará, Santa Bárbara, Santa Luzia, São Gonçalo do Rio Abaixo, São Joaquim de Bicas e Sarzedo. A população estimada dessa região é de 4.419.130 habitantes.

A área de estudo focalizada pela presente pesquisa, é delimitada pelas folhas cartográficas de Belo Horizonte (SE-23-Z-C-VI), Igarapé (SF-23-X-A-III) e Ouro Preto (SF-23-A-II), todas na escala de 1:100.000, cobrindo uma extensão total de 8.700 km². Vale salientar que as folhas destacadas em vermelho nos mapas apresentados ao longo deste tópico representam a área de interesse deste trabalho, sendo o principal foco das análises e discussões. A Figura 1 ilustra o mapa de localização regional, com ênfase nas folhas geológicas que compõem a área estudada.

Figura 1. Mapa de Localização da área do Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno. Destaque em vermelho para as folhas SE-23-Z-C- VI, SF-23-X-A-III e SF-23-A-II que compõem a área de estudo, tais quais: Belo horizonte, Ouro Preto e Igarapé (adaptado de LARIZZATTI *et al.*, 2014).



1.2 CARACTERIZAÇÃO GEOAMBIENTAL

A geomorfologia da região, conforme MACHADO e SILVA (2010), é caracterizada por uma grande diversidade de unidades, incluindo as Depressões do Espinhaço, as Depressões do Alto Médio Rio São Francisco, o Planalto Centro Sul Mineiro, os Planaltos do Leste de Minas, o Quadrilátero Ferrífero, as Serras do Espinhaço Centro Meridional e as Formas Agradacionais Atuais e Subatuais Interioranas, permitindo uma compreensão detalhada das características fisiográficas, composicionais e morfológicas da área. Essa diversidade reflete também a complexidade dos solos da região, que são influenciados pela geologia local e pelos processos ambientais. Ainda conforme os mesmos autores a pedogênese está associada à produção de sedimentos e aos processos geoquímicos da área, com as principais unidades pedológicas sendo Cambissolos, Latossolos, Podzólicos e Solos Litólicos.

Do ponto de vista socioeconômico a exploração mineral possui imensa importância na região, especialmente no Quadrilátero Ferrífero, conforme ressaltado por COELHO (2017). Essa atividade remonta ao período colonial e persiste até os dias atuais, sendo responsável por um alto grau de intervenção ambiental. Pode-se destacar a extração de ferro,

ouro, argilas raras e águas minerais como os principais insumos explorados na região. No contexto ambiental, temos na área do estudo, de acordo com MACHADO e SILVA (2010), 38 unidades de conservações divididas entre unidades federais e estaduais, estando as mesmas separadas entre as de uso sustentável e as de proteção integral.

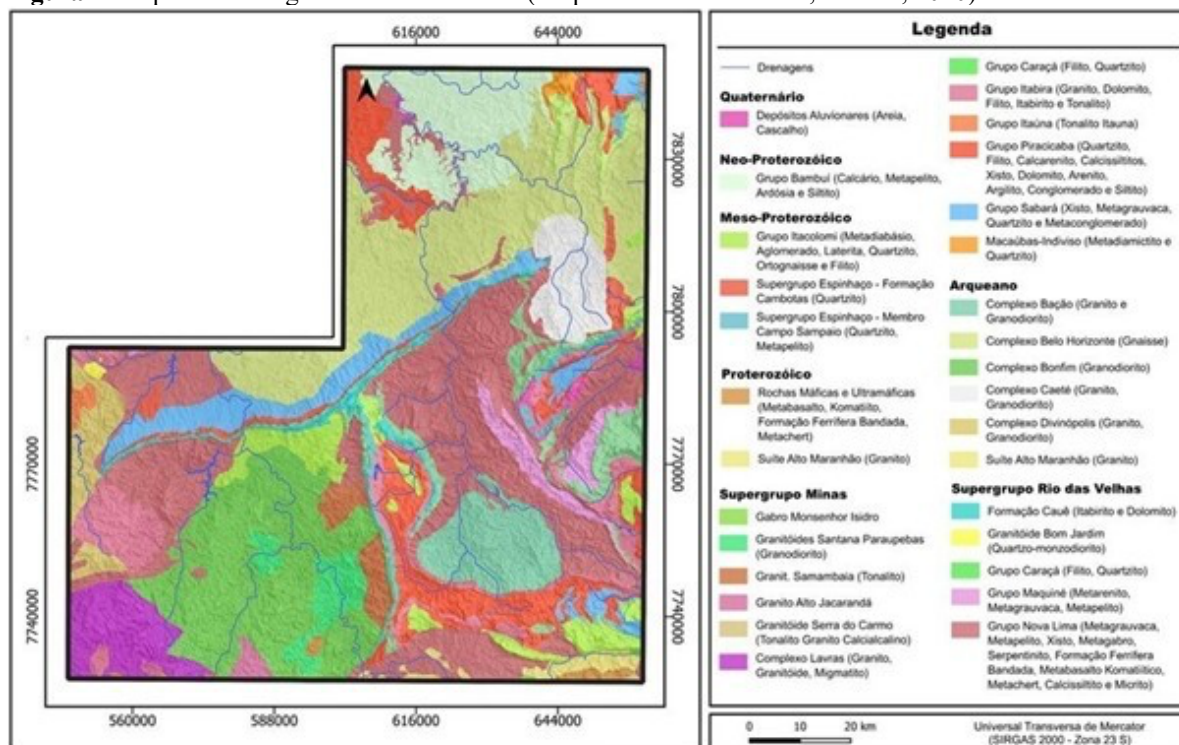
Em relação à caracterização geológica da área de estudo, o QF está localizado no extremo sul do Cráton do São Francisco (CSF) e constitui, com o Cinturão Mineiro, exposições do orógeno paleoproterozoico nessa unidade cratônica (TEIXEIRA *et al.*, 2000). No CSF, esses terrenos paleoproterozoicos estão expostos em uma complexa associação com unidades arqueanas e bordejados por cinturões neoproterozóicos (ALKMIM; MARSHAK, 1998). Ainda de acordo com BEZERRA (2014), “a região é constituída por quatro grandes unidades litoestratográficas” da base para o topo: (1) – terrenos granito-gnáissicos arqueanos; (2) – sequências vulcanossedimentares arqueanas; (3) – sequências de coberturas sedimentares e vulcanossedimentares proterozóicas; (4) – coberturas sedimentares recentes.

A geologia do Quadrilátero Ferrífero (Figura 2) desempenha um papel fundamental

na organização dos resultados e na distribuição dos valores geoquímicos nos sedimentos, especialmente para PTE e fósforo. A diversidade geológica compreende rochas e estruturas que influenciam diretamente a concentração e dispersão desses elementos. A presença de formações ricas em minérios, como itabiritos e quartzitos, associada a processos tectônicos e intempéricos, criaram ambientes

geoquímicos que estão refletidos na concentração espacial dos metais tóxicos e do fósforo. Entender essa dinâmica é vital para a análise de padrões geoquímicos, identificação de potenciais fontes de contaminação e avaliação os impactos ambientais, destacando a importância da geologia como base para estudos ambientais e de prospecção mineral na região

Figura 2. Mapa litoestratigráfico da área estudo (adaptado de MACHADO; SILVA, 2010).



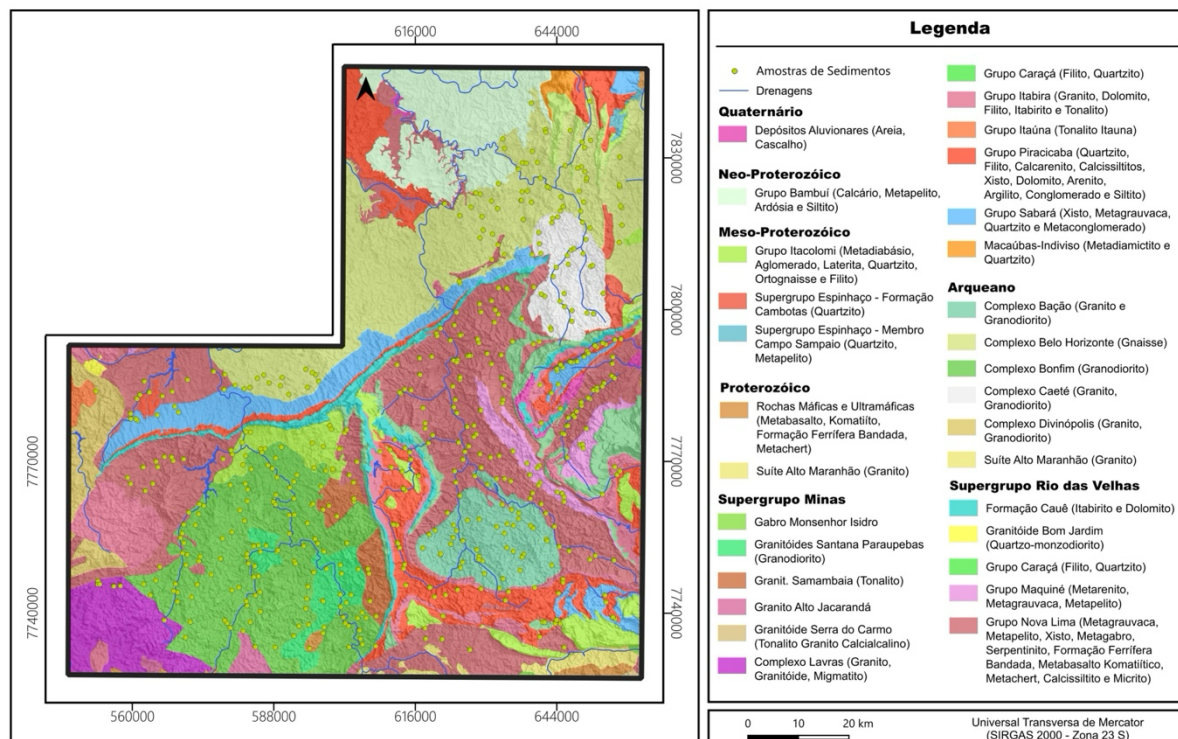
2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 PROJETO DE MAPEAMENTO DO QUADRILÁTERO FERRÍFERO E SEU ENTORNO

O mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno foi realizado pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) com apoio financeiro do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC), com o objetivo de analisar a distribuição de 43 elementos em diferentes matrizes ambientais, sendo elas solo, água e sedimentos fluviais ativos. O levantamento incluiu a coleta de 5563 amostras, sendo 3662 de sedimentos ativos de corrente e 1026 de concentrado de bateia, distribuídas por áreas de drenagem entre 10 e 30 km². As amostras foram planejadas com base na rede de drenagem da região, com uma densidade de amostragem aproximada de 1 amostra a cada 12 km².

A escolha dos sedimentos ativos de corrente como matriz amostral deste trabalho se deu pela maior densidade de amostragem em relação a outras matrizes no projeto, que abrangem uma área de 45.000 km² e permitindo uma análise detalhada da geoquímica regional. Para a área de estudo foram selecionadas amostras de sedimentos fluviais ativos, distribuídas em três folhas (Ouro Preto, Igarapé e Belo Horizonte), cobrindo uma área de aproximadamente 10.762,92 km² (Figura 3). Este levantamento foi crucial para a compreensão da distribuição geoquímica na região, facilitando a análise de processos ambientais e geológicos no Quadrilátero Ferrífero e nas áreas adjacentes.

Figura 3. Mapa litoestratigráfico da área estudo, mostrando a distribuição das amostras de sedimento (adaptado de MACHADO; SILVA 2010).



2.2 SELEÇÃO E TRATAMENTO DOS DADOS

De posse dos resultados analíticos das 589 amostras foi montado um banco de dados que levou em consideração, além dos critérios locais, os elementos de interesse, como As, Cd, Cr, Ni, Pb, Zn e P, além de elementos normalizadores como Al, Fe, Mn, Ca e Mg. Na sequência, foi realizado o tratamento estatístico dos dados. Os dados brutos e de grande amplitude foram transformados em log (base 10), buscando a normalidade dos dados. Para cada variável calculou-se a média, mínimo, máximo e desvio padrão e foi elaborado o *box plot* (Figura 4), que representa o intervalo interquartil (25% - 75%), as medianas e *outliers*. Em seguida foi utilizada a técnica de representação da estatística bivariada (Matriz de Correlação de Pearson) entre os elementos, cuja significância foi definida em ($p < 0,05$). Todas as análises estatísticas foram realizadas no Software Statistica 12.

O cálculo dos valores de *background* foi efetuado utilizando a metodologia MAD - *Median Absolute Deviation*, (REIMANN *et al.* 2005). Esse procedimento foi realizado utilizando ferramentas de estatística descritiva, permitindo calcular a média, mediana, desvio padrão e distribuição estatística das amostras. Os dados foram transformados logaritmicamente para minimizar os efeitos de *outliers* e facilitar a normalização da distribuição, além de ser aplicado o teste de normalidade Shapiro-Wilk para verificar a aproximação dos dados à distribuição normal.

A seguir na Tabela 1, são apresentados os valores dos *backgrounds* globais (*UCC-Upper Crust Continental*), regionais com base na área total do projeto (ATP) e os valores locais com base nas litologias (por unidade geológica - UG) para os elementos selecionados.

Tabela 1 - Comparação dos valores de referência para a crosta continental superior - UCC (WEDEPOHL, 1995), ATP e as Unidades Geológicas do Quadrilátero Ferrífero para toda a área de estudo (PEREIRA 2018) (UCC - Upper Continental Crust; ATP - Área Total do Projeto; SGRV - Supergrupo Rio das Velhas; SGM - Supergrupo Minas; BA - Complexo Bação; BH - Complexo Belo Horizonte e BN - Complexo Bonfim).

Elementos (ppm)		As	Cd	Cr	Ni	P	Pb	Zn
Global	UCC	2,00	0,10	35,0	18,6	700	17,00	52,0
Regional	Geral (ATP)	5,00	0,03	43,2	16,8	260	15,96	29,7
	SGRV	21,4	0,06	128,8	50,3	300	12,65	37,7
	SGM	07,0	0,06	42,4	21,1	260	9,71	22,4
Litologias	BA	06,1	0,02	35,9	08,4	170	19,45	20,7
Locais	BH	01,0	0,02	14,8	06,1	180	15,49	23,2
	BN	01,6	0,03	33,6	11,9	280	20,28	31,5

2.3 ÍNDICES GEOQUÍMICOS

Os índices geoquímicos multielementares são ferramentas importantes no que tange a análise ambiental de uma região. Pode-se destacar, entre eles, o Grau de Contaminação Modificado (GCM) que quantifica a

concentração de elementos potencialmente tóxicos em relação a valores de referência, e o Índice de Risco Potencial Ecológico (IRPE), que avalia o risco ecológico associado à presença de contaminantes.

2.3.1 GRAU DE CONTAMINAÇÃO MODIFICADO (GCM)

O Grau de Contaminação Modificado é utilizado na avaliação ambiental de matrizes amostrais, tais como sedimentos e solos. Sua aplicação ocorre principalmente em análise de metais tóxicos e permite avaliar descargas e poluições de fontes antrópicas, sendo importante na avaliação dos índices de risco em uma área (LOSKA *et al.*, 1997). De acordo com LIMA (2020) e ABRAHIM; PARKER (2008) foi proposta uma nova fórmula algébrica para cálculo, que define, em escala quantitativa, um valor único para o grau de contaminação dada uma área de estudo, de acordo com a formulação seguinte:

$$mC_d = \frac{\sum_{i=1}^n CF_i}{n}$$

Onde:

mCd= Grau de Contaminação Modificado

Cf = O fator de contaminação de cada elemento analisado;

n = Número de elementos analisados

A Tabela 2 apresenta a relação que classifica os valores obtidos em uma área no contexto do grau de contaminação modificado.

Tabela 2 - Comparação do *background* UCC, ATP e com as Unidades Geológicas do QF (UG). (LIMA, 2020, ABRAHIM; PARKER 2008)

Intervalos de classificação	Nível categórico
mCd < 1	Nula a muito baixo grau de contaminação
1,5 ≤ mCd < 2	Baixo grau de contaminação
2 ≤ mCd < 4	Moderado grau de contaminação
4 ≤ mCd < 8	Alto grau de contaminação
8 ≤ mCd < 16	Muito alto grau de contaminação
16 ≤ mCd < 32	Extremo grau de contaminação
mCd > 32	Ultra extremo grau de contaminação

2.3.2 ÍNDICE DE RISCO POTENCIAL ECOLÓGICO (IRPE)

De acordo com LI *et al.* (2008) esse índice objetiva o fornecimento de uma estimativa de risco no que se refere à existência de contaminantes e sua

concentração, sendo muito aplicado para a gestão ambiental de áreas. Estes valores para o IRPE foram calculados, considerando diferentes valores de *background* de

referência. Assim como o índice de contaminação modificado, suas referências foram os valores de *background* elementar do UCC, da ATP e das unidades geológicas individualizadas. Para o seu cálculo utilizou-se a equação:

$$IRPE = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n (T_r^i * CF_i)$$

Onde:
Tr: Fator de Resposta a Toxicidade de um determinado metal, sendo o mesmo tabelado, conforme valores a seguir: As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2), Cu (5), Mo (5), Mn (1), Ni (5), Pb (5), Ti (1) U (2) e Zn (1);
CF: é o fator de contaminação para cada metal poluente considerado

Tabela 3 - Comparação do *background* UCC, ATP e com as Unidades Geológicas do QF (UG) (HAKANSON (1980))

Valores	Descrição
< 150	Baixo Risco
150 – 300	Risco Moderado
300 - 600	Alto Risco
> 600	Risco Extremo

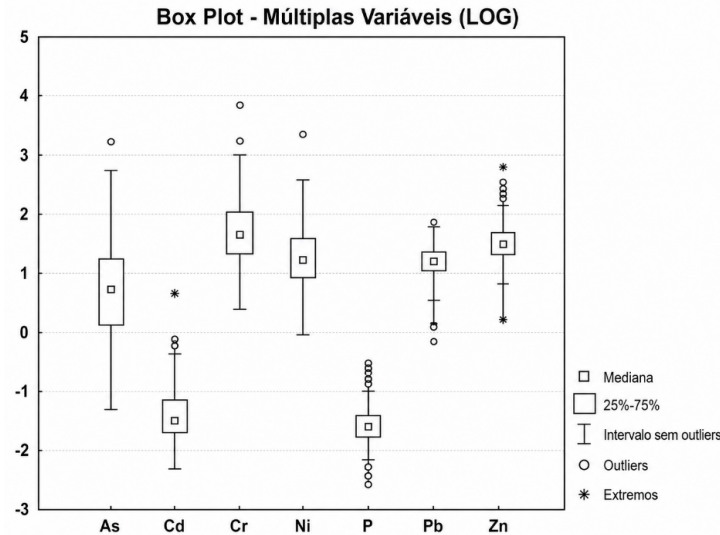
3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DESCRITIVA DOS DADOS

A Figura 4 e a Tabela 4 apresentam respectivamente os *box plots* e os resultados da estatística descritiva para os elementos pautados nessa pesquisa, após a transformação

logarítmica. A variação do Eixo Y é de -3 a 3 o que remete à ordem de grandeza dos dados produzidos.

Figura 4 – *Box plot* dos dados dos teores dos elementos em sedimentos do Quadrilátero Ferrífero, transformados logaritmicamente.



As correlações mais fortes e estatisticamente significativas ($p < 0,05$) obtidas foram, Ni-Cr (0,974), Zn-Cd (0,769) e Zn-Pb (0,503). No que se refere ao elemento As suas correlações são moderadas à fortes com os elementos Zn, Ni, Cd, enquanto com o Pb a correlação se mostrou

mais baixa (0,165). O elemento P apresenta correlações moderadas com Zn (0,316) e Pb (0,300). Conjuntamente os resultados sugerem a existência de dois grupos principais de elementos correlacionados (Cr-Ni-Cd-Zn-As) e (P-Zn-Pb).

Tabela 4 - Estatística Descritiva dos Dados dos teores dos elementos em sedimentos do Quadrilátero Ferrífero. Valores em ppm

Variáveis	Amostras	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	Desvio padrão
As	589	20,258	4,900	0,050	1.665,000	79,295
Cd	589	0,062	0,030	0,005	4,100	0,180
Cr	589	107,178	43,300	3,000	7.003,500	318,436
Ni	589	39,216	16,800	1,200	2.238,300	103,131
P	589	0,030	0,026	0,004	0,257	0,019
Pb	589	16,680	15,830	2,110	71,380	8,899
Zn	589	38,409	28,600	3,200	662,800	42,385

Tabela 5 - Matriz de Correlação dos dados de teores dos elementos analisados em sedimentos do Quadrilátero Ferrífero.

	As	Cd	Cr	Ni	P	Pb	Zn
As	1						
Cd	0.187	1					
Cr	0.117	0.094	1				
Ni	0.208	0.125	0.974	1			
P	0.130	0.095	0.045	0.089	1		
Pb	0.165	0.359	0.170	0.207	0.316	1	
Zn	0.313	0.769	0.198	0.258	0.300	0.503	1

3.2 GRAU DE CONTAMINAÇÃO MODIFICADO (GCM)

As unidades que apresentaram os maiores níveis de contaminação foram o Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte, Grupo Nova Lima e Grupo Piracicaba. Os municípios que apresentaram os maiores focos no GCM foram Nova Lima, Raposos, Sabará e Itabirito (Figura 5).

Os resultados confirmam a hipótese de que a escolha do valor de *background* influencia o comportamento das manchas de contaminação. Se avaliarmos de forma comparativa as referências de Upper Continental Crust (UCC), Área Total do Projeto (ATP) e os valores de *background* das unidades geológicas locais (UG), o UCC apresenta marcadores de contaminação mais extensos e de maior intensidade, seguido pelo *background* baseado na ATP, enquanto o mapa baseado nos *backgrounds* geológicos locais (UG) expõem

valores menores e mais razoáveis. Isso evidencia a importância de se utilizar valores de *background* compatíveis com a realidade geoquímica da área, uma vez que referências generalistas, como UCC e ATP, superestimam os resultados ao ignorar o enriquecimento elementar natural da região.

No Quadrilátero Ferrífero, esse efeito é ainda mais visível, dada sua condição de província geoquímica, estando enriquecida em diversos elementos. Enquanto UCC e ATP classificam áreas com graus de contaminação "ultra extremo" e "extremo", o mapa baseado nos *backgrounds* locais UG, possuem limiar máximo classificado somente como "alto grau", ademais a isso seus marcadores são menos extensos e com concentrações menores (Gráfico 1).

Figura 5 - Comparativo do GCM com diferentes valores de *background* - (Unidade Geológicas x UCC x ATP)

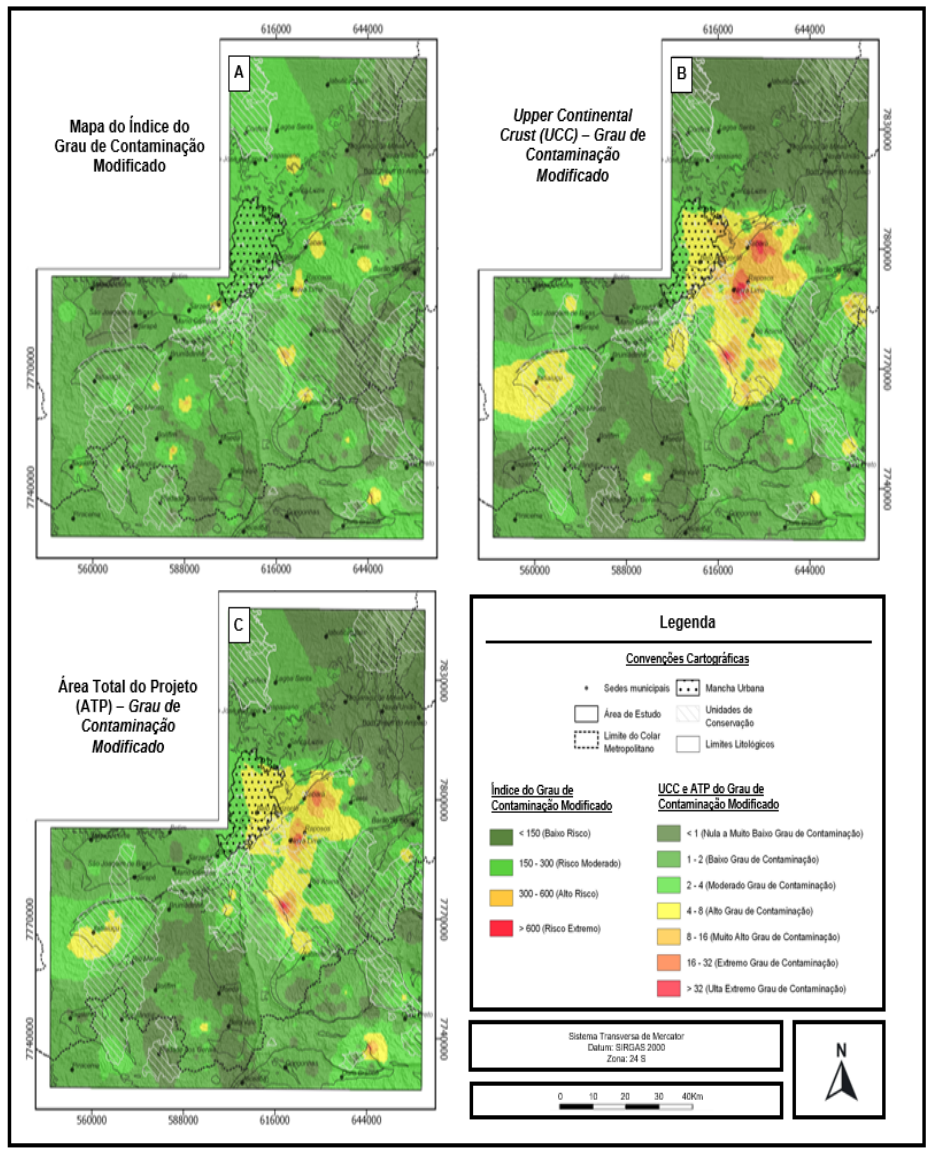
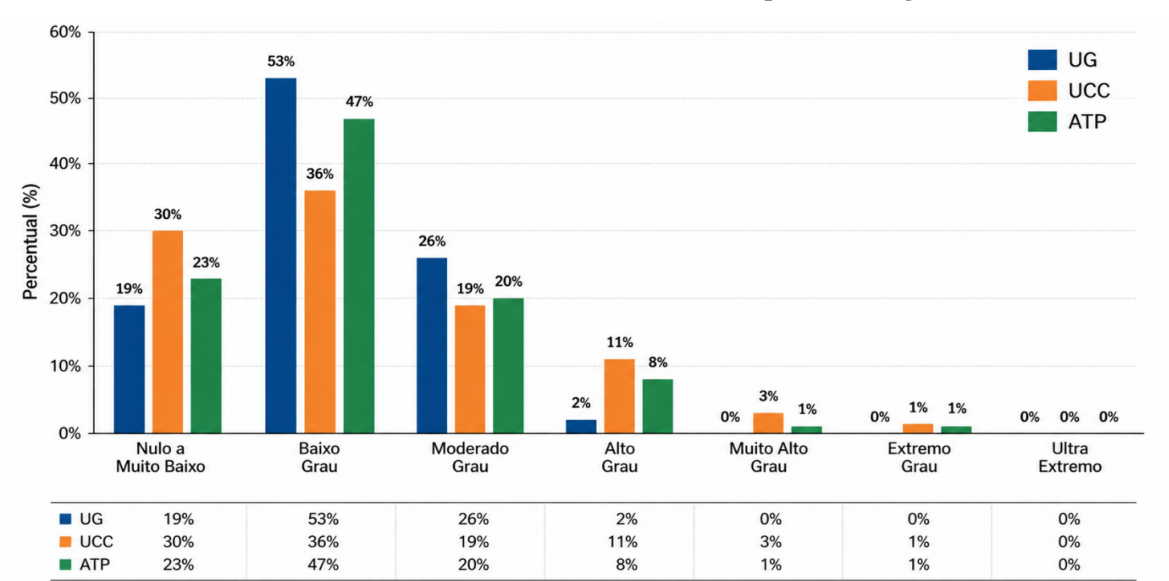


Gráfico 1 - Distribuição dos valores de GCM nos diferentes tipos de *background*.



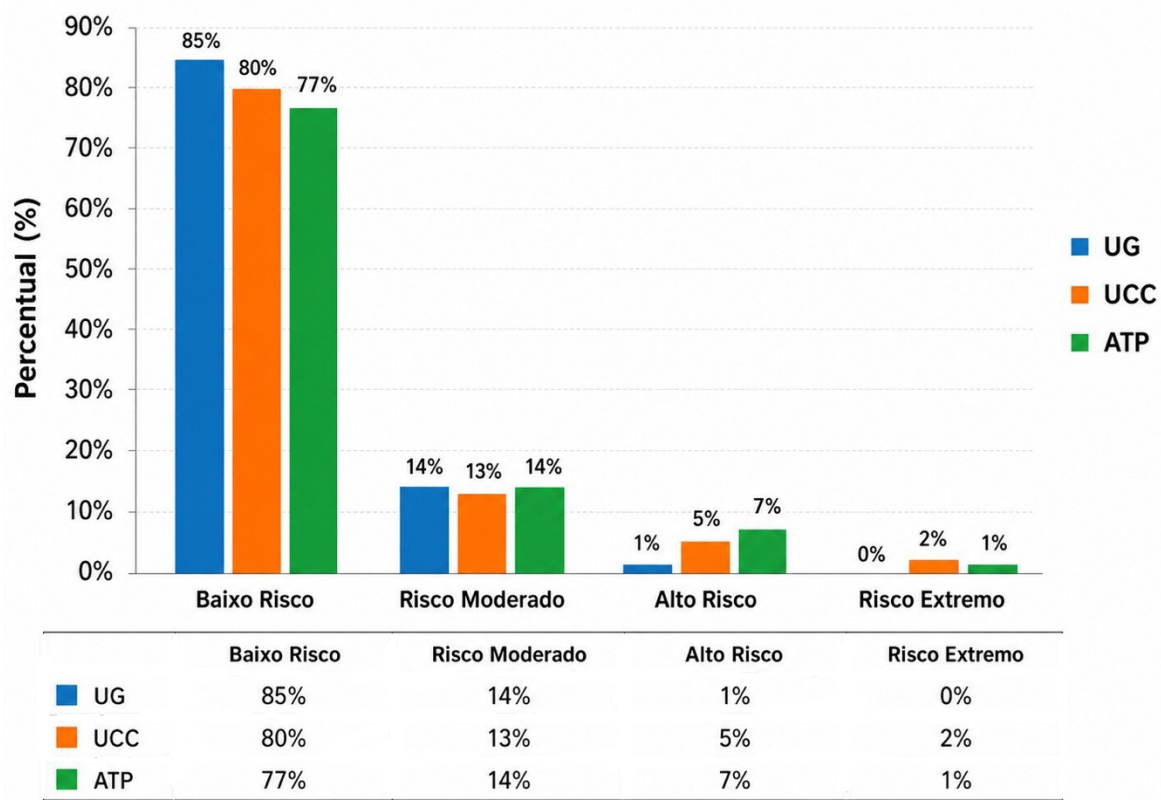
3.3 ÍNDICE DE RISCO POTENCIAL ECOLÓGICO

Os resultados do Índice de Risco Ecológico Potencial (IRPE) seguem algumas tendências similares aos resultados obtidos no contexto do Grau de Contaminação Modificado (GCM), apresentando padrões de comportamento próximos. O mapa baseado no UCC exibe marcadores de risco mais extensos e intensos, seguidos pelo ATP, enquanto o mapa com *backgrounds* das unidades geológicas locais (UG) apresentaram valores com risco mais baixo. Nota-se, da mesma forma, que os marcadores de risco

diminuem em extensão e intensidade quando comparado aos *backgrounds* globais e regionais (Figura 6).

O Gráfico 2 resume comparativamente os valores de risco obtidos para cada contexto de *background*. Sendo assim os valores de UG concentram a maioria dos dados em limiares de riscos mais baixos, atingindo no máximo 1% em "Alto Risco". Os mapas baseados em UCC e ATP alcançam classificações de "Alto Risco" e "Risco Extremo" com distribuições mais amplas e disseminadas.

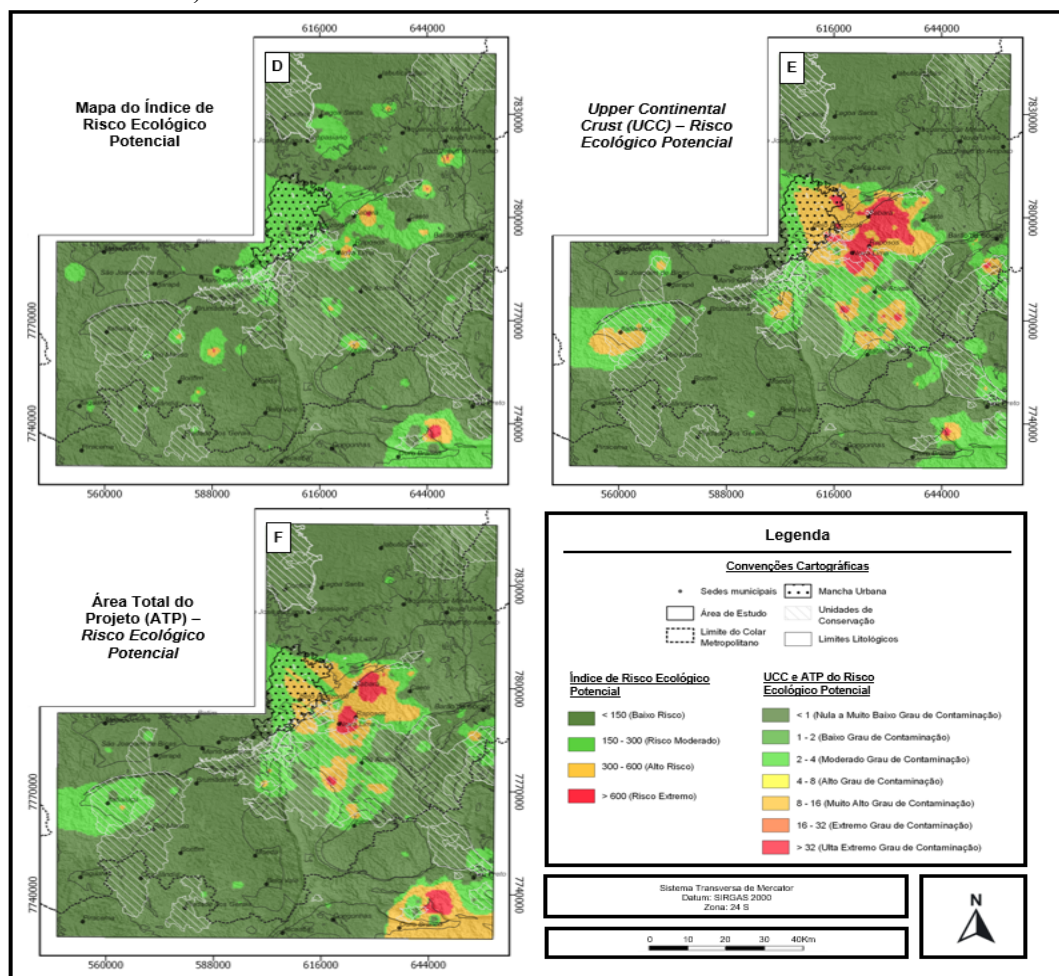
Gráfico 2 - Distribuição dos valores de GCM nos diferentes tipos de *background*



As áreas com maior risco, classificadas como "Risco Extremo", estão localizadas na região central e sudeste do mapa, ocorrendo dentro do contexto geológico do Grupo Nova Lima e Grupo Piracicaba. As unidades com os níveis mais altos foram o Complexo Bação, Complexo Bonfim, Complexo Belo Horizonte, Grupo Nova Lima, Formação Cauê, Grupo

Sabará e Grupo Piracicaba. As porções mais extensas e com classificações mais altas foram identificadas nos mapas que utilizaram UCC e ATP como referência, enquanto os *backgrounds* locais resultaram em classificações menos severas. Os municípios com ocorrência dos valores mais altos de IRPE foram Nova Lima, Raposos, Sabará e Ouro Branco.

Figura 6 - Comparativo IRPE com diferentes valores de *background* (Unidade Geológica X UCC X ATP)



4 DISCUSSÕES

Em relação aos aspectos geoquímicos da área, de maneira generalizada, os elementos químicos, principalmente os metais no Quadrilátero Ferrífero encontram-se enriquecidos em relação à média global. Isso se deve ao fato da região se comportar como província geoquímica e/ou metalogênica para muitos deles. Tal observação é possível a partir das análises dos dados fornecidos pela estatística univariada que, aplicados a este trabalho, nos forneceram valores de *background* regionais e locais. Nesse sentido é importante discutir a relação dos sedimentos de corrente com a individualização dos cálculos de *background* por unidades que foram aplicados neste trabalho, apesar desta matriz teoricamente não ser a mais adequada para esse tipo de análise. Com a

separação litológica foi perceptível a eficiência da mesma em simular melhor a realidade geológica local, considerando a densidade e a escala das amostras na região. Isso reforça a hipótese de que valor de referência para definir contaminação antrópica é função do arcabouço geológico. A influência externa nos resultados é mínima quando comparada com a interpretação do comportamento dos valores locais (unidades geológicas) em relação aos valores regionais (área total do projeto). Esta lacuna comparativa pode ser explicada com base na diversidade litológica e tamanho da área de estudo, partindo do princípio de que os sedimentos de corrente tendem a representar toda área de uma bacia (o que é verdade, mas neste caso com ressalvas devido à escala), gerando

resultados abrangentes deixando de considerar tendências e distribuições elementares locais de suma importância para este estudo.

No que se refere aos índices geoquímicos, podemos discutir as características e eficiência dos mesmos para a definição de valores em uma região. Os resultados do trabalho revelaram que os índices multielementares, o Grau de Contaminação Modificado e o Índice de Risco Ecológico Potencial (IREP), calculados com base nos *backgrounds* de

referência oriundo das unidades geológicas, (e não de valores regionais como no caso do ATP e globais como ocorre com o UCC), apresentaram bons resultados e com comportamentos e distribuição similares.

No caso do GCM os valores tiveram forte influência nos Complexos Graníticos Gnáissicos, dentre eles o Supergrupo Rio da Velhas, enquanto no IRPE os dados apresentam influências relevantes também nas regiões de ocorrências dos BIF's do Supergrupo Minas por meio da Formação Cauê.

5 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE) e toda sua equipe pela infraestrutura e apoio técnico durante a construção do trabalho, à CAPES, ao Serviço Geológico do Brasil pelo fornecimento dos dados geoquímicos e ao Programa de Pós-Graduação em

Geologia da Universidade Federal do Ceará por possibilitar o desenvolvimento dessa pesquisa. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

6 REFERÊNCIAS

- ABRAHIM, G. M. S.; PARKER, R. J. Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary. **Environmental Monitoring and Assessment**, 136, 227-238, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>.
- ALKMIM, F. F.; MARSHAK, S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90(1-2), 29-58, 1998. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0301-9268\(98\)00032-1](https://doi.org/10.1016/S0301-9268(98)00032-1).
- BEZERRA, D. P. **Quadrilátero Ferrífero – MG: Fatores condicionantes do relevo**. 2014. Dissertação (Mestrado em Geografia) - Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2014
- CICCHELLA, D.; DE VIVO, B.; LIMA, A.; ALBANESE, S.; FEDELE, L. Urban geochemical mapping in the Campania region (Italy). **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, 8(1), 19-29, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1144/1467-7873/07-147>.
- COELHO, T. Mineração e dependência no Quadrilátero Ferrífero. **Revista Intratextos**, 3(1), 128-146, 2012. DOI: <https://doi.org/10.12957/intratextos.2012.3140>.
- DARNLEY, A. G.; BJORKLUND, A.; BOLVIKEN, B.; GUSTAVSSON, N.; KOVAL, P. V.; PLANT, J. A.; STEENFELT, A.; TAUCHID, M.; XUEJING, X.; GARRETT, R. G.; HALL, G. E. M. **A global geochemical database for environmental and resource management**. 19. ed. Paris: UNESCO, 1995. 122 p.
- HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control: a sedimentological approach. **Water Research**, 14(8), 975-1001, 1980. DOI: [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8).
- LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. **Mapeamento geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno**. Rio de Janeiro: CPRM, 2014. 208 p.
- LI, X.; LI, Y.; LIU, C.; ZHAO, Z.; ZHAO, Y. Assessment of the potential ecological risk of heavy metals in sediments from the Pearl River Delta, South China. **Environmental Pollution**, 155, 274-281, 2008.

- LIMA, G. F. C. **Análise geoquímica de metais tóxicos em sedimentos de corrente na represa da Cemig – Três Marias/MG: distribuição e influência dos processos naturais e antropogênicos.** 2020. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.
- LOSKA, K.; WIECHUŁA, D.; KUSI, I.; PELCZAR, J. Use of enrichment and contamination factors together with geoaccumulation indexes to evaluate the content of Cd, Cu, and Ni in the Rybnik water reservoir in Poland. **Water, Air, and Soil Pollution**, 93(1-4), 347-365, 1997.
- MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. (Orgs.). **Geodiversidade do estado de Minas Gerais.** Belo Horizonte: CPRM, 2010. 131 p. + 1 DVD. Programa Geologia do Brasil. Levantamento da Geodiversidade.
- PEREIRA, E. M. O. **Aplicação do mapeamento geoquímico para a avaliação de contaminações ambientais no Quadrilátero Ferrífero – MG.** 2018. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geologia) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Departamento de Geologia, Fortaleza, 2018.
- REIMANN, C; FILZMOSER, P; GARRET, R. G. Background and threshold: Critical Comparison of methods of determination. **Sci. of Tot. Env.** 346 (1-3), 1-16, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv/2004.11.023>
- ROESER, H. M. P.; ROESER, P. A. O Quadrilátero Ferrífero – MG/Brasil: aspectos sobre sua história, seus recursos naturais e sua história. **Geonomos, Ouro Preto**, 18(1), 31-37, 2010. DOI: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v18i1.67>.
- TEIXEIRA, W.; SABATÉ, P.; BARBOSA, J.; NOCE, C. M. Archean and Paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton, Brazil. In: CORDANI, U. G.; MILANI, E. J.; THOMAZ FILHO, A.; CAMPOS, D. A. (eds.). **Tectonic evolution of South America.** Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, 2000. p. 101-137.
- VICQ, R. F. C. **Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero.** 2015. 228 p. (Tese Doutorado em Engenharia Geológica) – Departamento de Engenharia Geológica, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2015.
- WEDEPOHL, K. H. The composition of the continental crust. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, 59,1217–1232. 1995.