

ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS E ÍNDICES DE POLUIÇÃO EM SOLOS E SEDIMENTOS DO GARIMPO DE SERRA PELADA, BRASIL

RENATO ALVES TEIXEIRA^{1*}; EDNA SANTOS DE SOUZA¹ & ANTONIO RODRIGUES FERNANDES¹

Recibido: 29-12-16

Recibido con revisiones: 12-04-17

Aceptado: 25-04-17

RESUMO

A exploração mineral é uma das principais fontes de contaminação dos solos por elementos potencialmente tóxicos (EPTs). O objetivo foi avaliar os teores totais e disponíveis de boro (B) estrôncio (Sr) e vanádio (V) em solos de Serra Pelada e inferir sobre a contaminação por estes elementos. Os teores totais e disponíveis foram extraídos com água régia e ácido clorídrico, respectivamente. A determinação foi feita por espectrometria de emissão ótica com plasma acoplado indutivamente. Foram calculados o fator de contaminação (FC), fator de enriquecimento (FE) e o índice de carga poluente (ICP). Os teores totais e disponíveis encontrados são altos, o que foi atribuído principalmente ao material de origem. O V foi o elemento com maior FE (7,8), o que mostra que a ação antrópica a partir das atividades de garimpagem causou o enriquecimento das áreas com este elemento. O FC também foi maior para V, chegando a 3,40 no sedimento retirado da mina. O elevado FE indica que houve enriquecimento por EPTs nos solos de Serra Pelada devido as atividades antropogênicas. A partir dos valores do FC e do ICP infere-se que houve contaminação dessas áreas, o que pode representar risco ao ecossistema circundante e a população que habita a região.

Palavras chave. Metais pesados, mineração, garimpo.

POTENTIALLY TOXIC ELEMENTS AND INDEX OF POLLUTION IN SOILS AND TAILINGS OF SERRA PELADA, BRAZIL

ABSTRACT

Mineral exploration is one of the main sources of soil contamination by potentially toxic elements. The objective was to evaluate the total and available levels of boron (B), strontium (Sr), and vanadium (V) in soils of Serra Pelada and infer if these soils were contaminated by these elements. The total contents were extracted with aqua regia in digester block, the content availability were extracted with 0.5 mol L⁻¹ hydrochloric acid, the determination was made by optical emission spectrometry with inductively coupled plasma (ICP OES). The contamination factor (FC), enrichment factor (EF) and the pollutant load index (PLI) were calculated. V was the element with the highest EF 7.8, which showed that human action from the mining activities caused the enrichment with this element in the area. The FC was also higher for V, reaching 3.40 in sediment removed from the mine. On average the index pollution load (PLI) showed that there was contamination in the area by metals. The FC and the PLI showed that there was contamination of these areas by the studied elements, which may represent a risk to the surrounding ecosystem and the population inhabiting the region.

Key words. Heavy metals, mining, gold-digging.

1. Universidade Federal Rural da Amazônia, Brasil

* Autor de contacto: alves.agro@gmail.com

INTRODUÇÃO

Em áreas de mineração artesanal Au é recorrente a ocorrência de danos ambientais como o assoreamento e desvio de rios, o desmatamento, a degradação da paisagem e a destruição do habitat e da vida aquática (Mol & Ouboter, 2004). Além disso, a atividade de mineração é uma importante fonte de contaminação por elementos potencialmente tóxicos (EPTs), a partir da geração de efluentes, da poeira emitida e da disposição de rejeitos e estéreis que podem contaminar o solo e a água (Rashed, 2010).

O garimpo de Serra Pelada, localizado na província mineral de Carajás, Pará, Brasil, foi a primeira reserva de extração artesanal de ouro (Au) do Brasil. Descoberto em 1980 foi o local da maior corrida de Au da era moderna (Veiga & Hinton, 2002). Durante 4 anos cerca de 80 mil homens trabalharam e extraíram aproximadamente 90 t de Au.

A mina entrou em colapso em 1984 e a área da cava encontra-se atualmente inundada. No entorno da mina se formou uma vila de produtores com pequenos cultivos de culturas alimentares como a mandioca (*Manihot sculenta*), oleícolas, principalmente couve (*Brassica oleracea* L.), alface (*Lactuca sativa*), pimentão (*Capiscum annium*) e também pastagens com a predominância de gramíneas do gênero *Brachiaria*.

A exploração mineral de Au em escala artesanal emprega técnicas rudimentares. Geralmente é feita por trabalhadores com grande limitação financeira e sem nenhuma formação técnica sobre como mitigar os impactos causados por essa atividade ao ambiente e a sua saúde (Spiegel & Veiga, 2010). Isto pode levar a exposição e consequente solubilização de minerais contendo EPTs, dos quais boro (B), estrôncio (Sr) e vanádio (V).

O material de origem do solo de Serra Pelada é composto principalmente por carbono amorfo, quartzo, sericita, caulinita, hematita, goethita, óxidos de manganês, traços de turmalina, hematita, carbonatos, clorita e magnetita. Além destes ocorrem relíquias de sulfetos primários como, pirita, calcopirita, arsenopirita, covelita, bornita, galena, sulfetos de níquel e níquel-cobalto-cobre (Tallarico *et al.*, 2000). Estas características apontam para ocorrência de diversos EPTs, que com a disposição em pilhas de rejeito podem ter sido acumulados e enriquecidos em superfície. Alguns destes minerais contém na sua estrutura uma série de elementos potencialmente tóxicos (EPTs), como, por exemplo a turmalina, rica em B.

O objetivo foi avaliar os teores totais e disponíveis de B, Sr e V em solos de Serra Pelada e inferir sobre a possível contaminação por estes elementos e sobre a relação destes elementos com os demais atributos químicos do solo.

MATERIAL E MÉTODOS

Serra Pelada está localizada na província mineral de Carajás, no estado do Pará na margem leste da Amazônia brasileira sob as coordenadas geográficas 56°50,543'S e 49°38'44,795"W. Foram escolhidas sete áreas amostrais conforme o uso atual dado pelos moradores e conforme a disposição do rejeito e do estéril feita pelos garimpeiros. Foram realizadas coletas em sete áreas (A): A1 - área sem deposição de rejeito e/ou estéril; A2 - área de depósito de rejeito e/ou estéril; A3 - área com pilha de estéril (sedimentos retirados da mina, na qual não foi feita extração de Au pelos garimpeiros); A4 - área com pilha de rejeito, denominada pelos garimpeiros de curimã, na qual houve extração de Au; A5 - sedimento retirado do lago da cava da mina; A6 - área com sistema agroflorestal-SAF, formada há aproximadamente sete anos, cultivado atualmente com banana (*Musa* spp), cupuaçu (*Theobroma grandiflorum*) e cacau (*Theobroma cacao*), essa área tem sido afetada pela atividade garimpeira a partir da recorrente prática de mobilização e reprocessamento de rejeito retirado da cava da mina ou das pilhas de rejeito nas áreas residenciais A7 - área de mata ciliar não impactada durante o processo de extração artesanal de Au, constituindo-se no tratamento referência.

Foi utilizado trado holandês de aço inoxidável em todas as coletas, para evitar contaminação. Foram coletadas 10 amostras simples de solos para constituir uma amostra composta, nas profundidades de 0,00-0,20 m e 0,20-0,40 m. Em cada área de coleta foram feitas três amostras compostas. As amostras foram secas ao ar e peneiradas em peneira de 2 mm, homogeneizadas e armazenadas em potes de polipropileno até as análises.

Os teores totais foram extraídos por água régia (HCl + HNO₃) em proporção de 3:1 segundo o método preconizado por McGrath & Cunliffe (1985). Os teores disponíveis foram extraídos por ácido clorídrico (HCl) 0,5 mol L⁻¹, segundo Tedesco *et al.* (1995).

A determinação de B, Sr e V foi feita por espectrometria de emissão óptica com plasma acoplado indutivamente (ICP-OES). Os atributos físicos e químicos dos solos foram obtidos conforme Embrapa (2011). O carbono total e o nitrogênio total foram determinados por combustão via seca. O K foi extraído por Mehlich 1 e determinado por fotometria de chama. O Ca, o Mg e o Al foram extraídos KCl e determinados por titulação. O pH, em potenciômetro, na relação solo:água de 1:2,5. O carbono orgânico total-COT pela oxidação com K₂Cr₂O₇ e titulação com sulfato ferroso amoniacal. A matéria orgânica foi estimada com

base no C orgânico total x 1,722. Os teores de óxidos de Si, Al, Fe, Mn e Ti foram extraídos com H_2SO_4 . Os óxidos de Fe, Al e Mn foram determinados por espectrometria de absorção atômica, o Ti por colorimetria e o Si por gravimetria em seguida foram calculados os índices Ki e Kr.

A avaliação da contaminação dos solos por EPT foi feita utilizando o fator de enriquecimento (FE), o fator de contaminação (FC) e o índice de carga poluente (PLI). Estes índices foram calculados utilizando os teores de referência os encontrados na área de mata ciliar (P7), uma vez que os valores de referência de qualidade que normalmente são utilizados, não foram estabelecidos ainda para o estado do Pará. Além disso, Serra Pelada está situada em um veio hidrotermal, uma das principais fontes de EPT, indicando a ocorrência de elevados valores naturais, consequentemente valores de referência mais elevados para a região. O FE foi calculado conforme a equação 1:

$$FE = \frac{X1/Y1}{X2/Y2} \quad 1)$$

Onde, X1 é a concentração do elemento no solo ($mg\ kg^{-1}$), Y1 é a concentração de Fe na amostra ($mg\ kg^{-1}$), X2 é a concentração do elemento no P7 e Y2 a concentração de Fe no P7. FE < 1 indica que não há enriquecimento, FE > 1 < 3 indicam baixo enriquecimento, FE > 3 < 5 enriquecimento moderado, > 5 < 10 enriquecimento moderadamente grave, > 10 < 25 enriquecimento grave, > 25 < 50 o enriquecimento é muito grave, > 50 o enriquecimento é extremamente grave (Sakan *et al.*, 2009).

O FC foi obtido pela da razão entre a concentração do elemento potencialmente tóxico no solo e o valor de referência de qualidade aqui substituído pela concentração no P7, obtido pela equação 2:

$$FC = \frac{[C]_{EPT}}{[C]_{P7}} \quad 2)$$

Onde FC é fator de contaminação, [C]EPT é a concentração do elemento potencialmente tóxico no ponto amostrado e [C]P7 é a concentração do EPT no ponto 7. Os FC foram interpretados de acordo com o sugerido por Hankanson (1980) onde: FC < 1 sem contaminação; FC > 1 < 3 indica contaminação moderada; FC > 3 < 6 indicam a áreas com considerável contaminação, FC > 6 indicam áreas altamente contaminadas.

O índice de carga poluente (PLI) de cada ponto de coleta foi obtido através da raiz enésima da multiplicação dos FC de todos os metais utilizando a equação 3:

$$PLI = (FC1 \times FC2 \times FC3 \times FC4 \times \dots \times FCn)^{\frac{1}{n}} \quad 3)$$

Quando PLI < 1 indica não contaminação por elementos potencialmente tóxicos, de outro modo, quando PLI > 1 há poluição por metais pesados.

Foi usado análise multivariada de redundância (RDA em inglês) para avaliar as relações entre EPTs e os atributos do solo argila, nitrogênio total, carbono total, óxidos de alumínio, ferro, manganês e titânio, pH e a capacidade de troca de cátions. Para isso foi utilizado o software Canoco 5.0 (versão teste). Os $p < 0,05$ foram considerados para indicar o nível de significância estatística.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O pH dos solos e dos sedimentos de Serra Pelada variou entre 4,1 e 6,9 (Tabela 1). Os menores valores de pH foram observados na floresta e na área de sistema agroflorestal (SAF), na camada de 0 a 0,2 m foi de 4,2 e 5,5, respectivamente. Estes valores são semelhantes aos observado em Latossolos, sob floresta nativa, em outras regiões do estado do Pará, cuja média foi de 4,61 (Birani *et al.*, 2015). O baixo pH encontrado está diretamente associado as condições de intemperismo intenso que em conjunto com arápida e contínua decomposição da matéria orgânica (MO) causam a liberação de íons H^+ e, por conseguinte a acidificação do solo (Sousa *et al.*, 2007).

Por outro lado, nas pilhas de rejeito e estéril, no sedimento retirado da mina e nas margens foi observado pH mais elevado, isto está relacionado a ocorrência de minerais carbonáticos (Tallarico *et al.*, 2000). O processo de dissolução de minerais carbonáticos consome íons H^+ e geram espécies aquosas de carbonato, elevando o pH do solo (Lindsay *et al.*, 2015). Na Bolívia, em área de mineração artesanal de Au, foi encontrado pH variando entre 4,6 e 4,9, o que foi atribuído a ausência de minerais carbonáticos no solo (Faz *et al.*, 2014).

Nas pilhas de rejeito, estéril, no sedimento da mina e na margem o teor de MO e nitrogênio total (NT) é baixo, isto está relacionado a recente exposição deste rejeito e a possível alta concentração de elementos potencialmente tóxicos (EPT) que impossibilitam a colonização por espécies vegetais pioneiras.

Os teores de MO encontrados nas áreas de floresta e SAF, de 12,9 e 11, 3 $g\ kg^{-1}$ respectivamente, estão no intervalo esperado para solos do estado do Pará de 5,6 e 18,1 $g\ kg^{-1}$ obtido por Birani *et al.* (2015), em 46 Latossolos em área de floresta e 6,5 a 14,1 $g\ kg^{-1}$ para 26 Argissolos. Os teores de MO presentes nos solos de Serra Pelada se aproxima mais ainda aos observados por Souza *et al.* (2015),

Tabela 1. Atributos químicos dos solos e sedimentos de Serra Pelada.

Table 1. Chemical attributes of soils and sediments of Serra Pelada.

Áreas de coleta	Atributo do solo (0,0-0,2 m)												
	pH	¹ MOS	Argila	² SiO ₂	³ Al ₂ O ₃	⁴ Fe ₂ O ₃	⁵ TiO ₂	⁶ MnO	⁷ Ki	⁸ Kr	⁹ CTC	¹⁰ CT	¹¹ NT
	g kg ⁻¹			5					cmol _c dm ³		(%)	(%)	
Margem 1	6,1	2,5	380	2,2	3,3	3,6	0,4	2,0	1,13	0,66	1,30	0,17	0,02
Margem 2	6,5	10,5	391,5	17,7	14,4	12,4	2,4	0,90	2,08	1,34	3,60	0,72	0,05
Pilha de estéril	5,7	2,7	267,3	11,6	11,3	3,9	0,7	0,90	1,75	1,43	1,20	0,18	0,02
Pilha de rejeito	7,1	1,9	256	1,0	2,0	8,8	2,4	0,8	0,85	0,22	1,30	0,18	0,01
Mina	6,9	1,3	103	1,2	3,7	26,0	6,6	1,4	0,45	0,08	1,40	0,09	0,01
SAF	5,5	11,3	380	27,9	22,1	10,6	2,0	0,6	2,15	1,64	5,50	0,77	0,09
Floresta	4,2	12,9	464	20,7	17,1	8,8	1,6	0,04	2,06	1,55	2,50	0,71	0,08

Áreas de coleta	Atributo do solo (0,2-0,4 m)												
	pH	¹ MOS	Argila	² SiO ₂	³ Al ₂ O ₃	⁴ Fe ₂ O ₃	⁵ TiO ₂	⁶ MnO	⁷ Ki	⁸ Kr	⁹ CTC	¹⁰ CT	¹¹ NT
	g kg ⁻¹			5					cmol _c dm ³		(%)	(%)	
Margem 1	6,7	0,8	330	1,7	2,5	2,7	0,5	4,1	1,14	0,68	1,10	0,07	0,04
Margem 2	6,2	2,8	370	18,1	13,3	9,7	3,5	0,5	2,32	1,58	6,20	0,18	0,02
Pilha de estéril	5,9	3,1	246	10,4	9,2	4,1	0,5	0,8	1,92	1,49	1,18	0,19	0,02
Pilha de rejeito	6,9	1,8	228	1,0	3,2	8,8	3,1	0,8	0,54	0,19	1,30	0,11	0,00
Mina	6,6	2,0	98,4	2,7	4,6	16,3	5,3	0,8	1,00	0,31	1,30	0,12	0,01
SAF	6,0	2,5	301,3	30,8	22,5	8,9	2,3	0,3	2,32	1,85	5,20	0,19	0,03
Floresta	4,2	6,3	458,2	16,2	14,7	7,3	1,3	0,04	1,87	1,42	1,82	0,39	0,06

¹Matéria orgânica do solo ²Óxido de silício ³Óxido de alumínio ⁴Óxido de ferro ⁵Óxido de titânio ⁶Óxido de manganês ⁷Ki ⁸Kr ⁹Capacidade de troca de cátions ¹⁰Carbono total ¹¹Nitrogênio total

que avaliaram 135 amostras de sete classes de solos sob área de floresta na região da transamazônica no Pará (8,9 e 10,1 g kg⁻¹).

Os teores totais e disponíveis B, Sr e V, variaram entre os pontos de coleta para as duas profundidades avaliadas (Fig 1). O estado do Pará não possui valores de referência de qualidade (VRQ) para estes elementos, o que dificulta qualquer ação de monitoramento e tomada de decisão em relação a possíveis impactos ambientais.

Os teores totais de B variaram entre 72 e 205 mg kg⁻¹, teor superior ao estabelecido como VRQ para o estado de Minas Gerais de 1,5 mg kg⁻¹ (Mello & Abrahão, 2013) e para os teores observados em nível mundial que varia entre 10 e 100 mg kg⁻¹ (Kabata Pendias, 2011). Os elevados teores de B encontrados no solo de Serra Pelada está relacionado a turmalina, mineral presente no material geológico (Cabral *et al.*, 2002).

Os teores disponíveis de B variaram de 0,7 a 10 mg kg⁻¹, na camada superficial, e de 0,2 a 6 mg kg⁻¹ na camada subsuperficial. Teores mais elevados de B na camada de superfície estão relacionados ao maior teor de MO. O B forma complexos e quelatos com os grupos funcionais da

MO, o que reduz as perdas por lixiviação (Lima *et al.*, 2007). Em solos ácidos a MO é o atributo do solo que mais influência na mobilidade e disponibilidade de B no solo (Kabata-Pendias, 2011). Após a mineralização da MO o B é liberado para a solução do solo, e pode ser adsorvido nos coloides orgânicos ou perdidos por erosão e lixiviação, levando a contaminação de recursos hídricos (Kabata-Pendias, 2011).

Os teores de Sr variaram entre 7,8 e 27,7 mg kg⁻¹ (Fig 1). Estes valores estão abaixo dos teores mundiais, que variam entre 130 e 240 mg kg⁻¹ (Kabata Pendias, 2011). Baixos teores nos solos estudados se devem ao elevado grau de intemperismo dos solos amazônicos. Em Mariana, Minas Gerais, foi constatado teores de 10 mg kg⁻¹ (Corrêa, 2006), abaixo dos valores obtidos em Serra Pelada, principalmente para camada superficial.

Os teores totais de V variaram entre 3,0 e 251,4 mg kg⁻¹ a média mundial é de 129 mg kg⁻¹, podendo variar entre 69 e 320 mg kg⁻¹ (Kabata Pendias, 2011). Os teores de V no solo têm estreita relação com a rocha matriz. Serra Pelada está alicerçada sobre um veio hidrotermal e, na área de influência do garimpo é verificada uma forte predominância

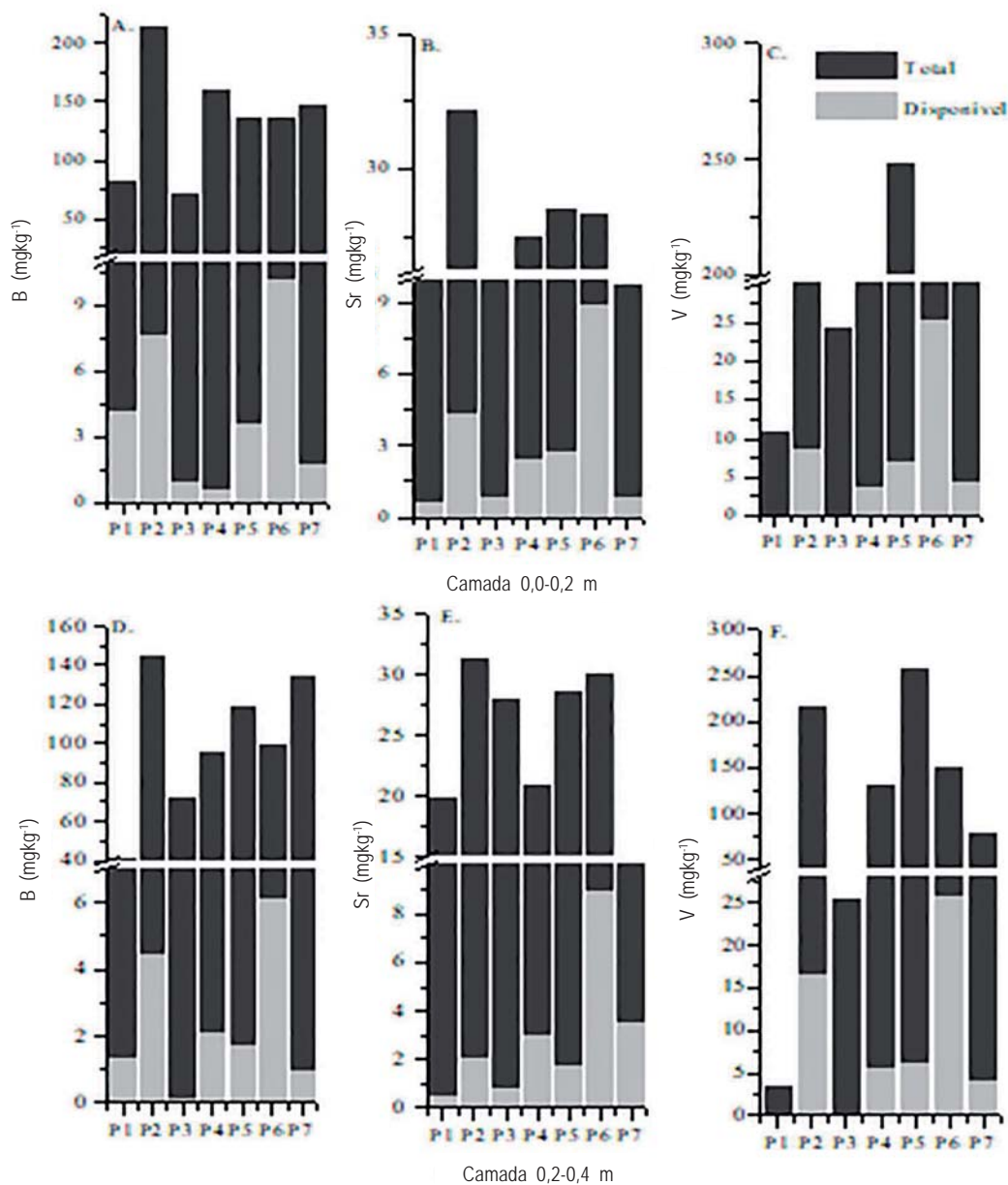


Figura 1. Teores totais e disponíveis de B, Sr e V, na camada de 0 a 0,2 m (A, B e C) e na camada de 0,2- 0,4 m (D, E e F).

Figure 1. Total and available B, Sr and V contents in the 0 to 0.2 m (A, B and C) and in the of 0.2-0.4 m soil layers.

de rochas vulcânicas (Almada & Villas, 1999), o que explica as elevadas concentrações. Em solos de Minas Gerais, Mello & Abrahão (2013), relataram teores médios de V no solo de 129 mg kg⁻¹.

Os teores disponíveis de V no solo variaram de 0,2 a 26 mg kg⁻¹, sendo o teor mais elevado na área de SAF (Fig 1c e Fig 2c). Diferentemente de outros pontos onde foram depositados rejeito ou estéril, o SAF proporcionou maior

proteção ao solo, mantendo maior teor de MO, o que pode ter diminuído as perdas por erosão e lixiviação do V, justificando os altos teores neste agroecossistema.

A relação entre os atributos e propriedades de solo e os teores totais e disponíveis de EPTs foram analisados pela análise de redundância (RDA). O primeiro e segundo eixo da RDA explicaram 76 e 14%, respectivamente, da variação total (Fig 2). Os teores totais de Sr, V e B correlacionaram

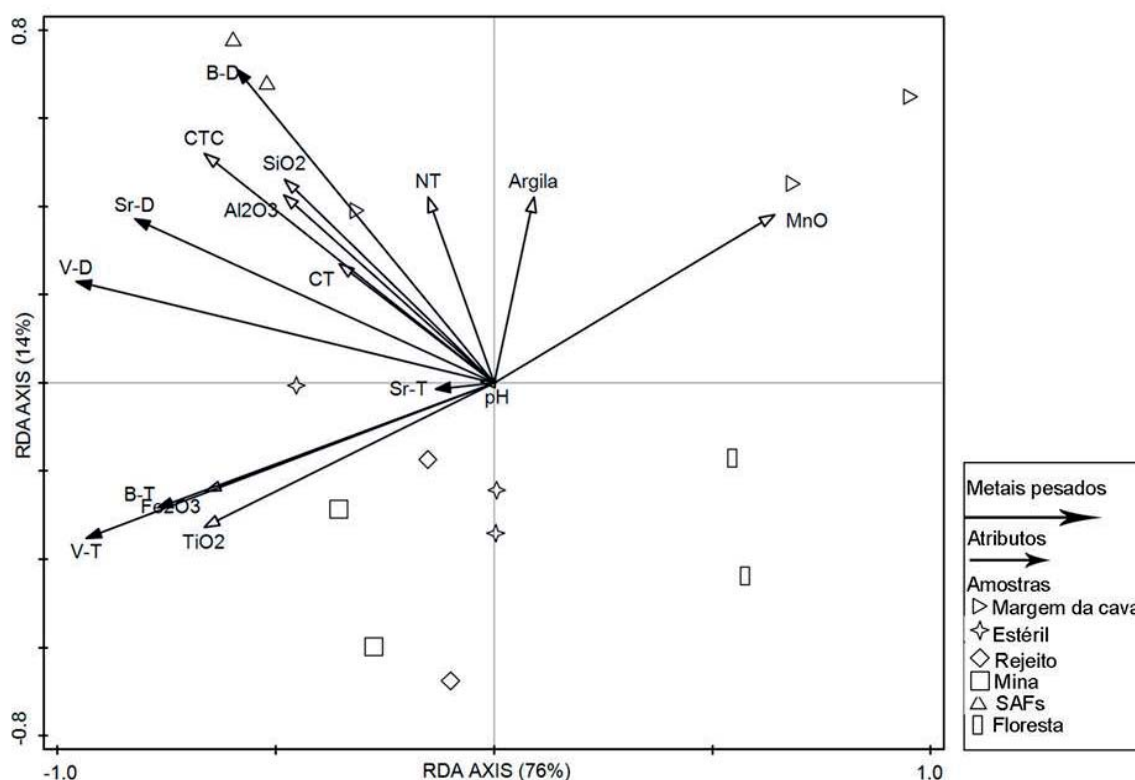


Figura 2. Análise de redundância entre os teores totais e disponíveis de elementos potencialmente tóxicos e os atributos do solo.
 Figure 2. Redundancy analysis between total and available potentially toxic element content and soil attributes.

entre si e com os óxidos de Fe e Ti e ao pH (Fig 2). A correlação entre Sr, V e B pode estar relacionado ao fato desses metais competirem pelos sítios de adsorção nos óxidos, bem como o maior teor desses metais nessa fração do solo (Agnieszka & Barbara, 2012). Em regiões tropicais os óxidos de Fe são componentes importantes na sorção de EPTs no solo, devido a sua abundância (Rieuwerts, 2007).

Correlação positiva entre pH e os teores totais na área de estudo, estão relacionadas aos valores de pH, que acima de 6,0 contribuem para a adsorção de metais na fase sólida, o que reduza disponibilidade e mobilidade no solo (Rieuwerts, 2007), aumentando os teores totais. A correlação negativa entre os teores disponíveis e o pH indica que a liberação desses metais para o ambiente vai ocorrer se as condições do meio se tornarem ácidas (Isen *et al.*, 2013).

Os teores disponíveis apresentaram relação entre si e com a CTC (Fig 2). Esse resultado indica que a variação nos teores disponíveis estar relacionada a capacidade sortiva

das propriedades do complexo sortivo. A biodisponibilidade de metais no solo depende das suas formas físico-químicas, a forma iônica, ligado ao carbono orgânico ou a adsorvida nas superfícies dos óxidos e argilominerais (Dipu & Kumar, 2013). Os óxidos compõem a fração argilosa dos solos e quanto maior o teor de argila maior a adsorção de metais (Gäbler *et al.*, 2009). A CTC em solos tropicais é formada principalmente pela superfície específica dos óxidos. A ausência de correlação entre o CO e os metais pode estar relacionada a heterogeneidade no teor de CO entre as áreas estudadas.

Houve enriquecimento de V, variando entre baixo e moderadamente grave, sobretudo nas pilhas de estéril (Tabela 2). O enriquecimento por B é considerado baixo, sendo o maior valor de 1,31, na pilha de rejeito, apesar dos altos teores totais encontrados, o que está relacionado as elevadas concentrações mesmo na área de floresta, devido ocorrência de turmalina. O enriquecimento por Sr também foi baixo em todos os pontos amostrados (Tabela 2).

Tabela 2. Fator de enriquecimento (FE) de B, V e Sr em solos de Serra Pelada.
Table 2. Enrichment factor (EF) of B, V and Sr in soils of Serra Pelada.

Áreas de coleta	FE (0-0,2 m)		
	B	V	Sr
Margem 1	1,08	3,79	0,24
Margem 2	1,31	2,93	1,07
Pilha de estéril	1,00	5,91	0,54
Pilha de rejeito	1,44	3,74	2,12
Sedimento da mina	0,94	3,06	2,77
SAF	0,95	2,43	1,76
Áreas de coleta	FE (0,2-0,4 m)		
	B	V	Sr
Margem da cava 1	0,87	7,08	0,12
Margem da cava 2	0,88	3,08	2,20
Pilha de estéril	1,01	6,39	0,62
Pilha de rejeito	1,01	3,24	2,42
Sedimento da mina	0,81	3,14	3,00
SAF	0,96	3,66	2,24

O fator de contaminação (FC) encontrado para B foi considerado moderado, cujos os valores variaram entre $> 1 < 3$, (Tabela 3). Isto pode estar relacionado ao alto teor de B também na área de referência, 144,69 e 132,74 mg kg^{-1} , na camada de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente (Tabela 3).

O FC para V em todos os pontos amostrados indica que houve contaminação e que esta variou de moderada, $FC > 1 < 3$, a consideravelmente contaminada, $FC > 3 < 6$. Os maiores FCs foram observados na margem 2 do garimpo, 3,18 em superfície e 3,71 e na profundidade de 02-0,4 m (Tabela 3).

Tabela 3. Fator de contaminação (FC) e índice de carga poluente (ICP) para B, V e Sr em solos de Serra Pelada.

Table 3. Contamination factor and pollutant load index for B, V and Sr in soils of Serra Pelada.

Áreas de coleta	FC (0-0,2 m)			ICP
	B	V	Sr	
Margem 1	0,53	1,86	0,12	0,04
Margem 2	1,42	3,18	1,16	1,75
Pilha de estéril	0,49	2,88	0,26	0,12
Pilha de rejeito	1,10	2,86	1,62	1,69
Mina	0,91	2,95	2,67	2,38
SAF	0,87	2,22	1,60	1,03
Áreas de coleta	FC (0,2-0,4 m)			ICP
	B	V	Sr	
Margem da cava 1	0,30	2,44	0,04	0,01
Margem da cava 2	1,06	3,71	2,66	3,48
Pilha de estéril	0,54	3,43	0,33	0,21
Pilha de rejeito	0,70	2,25	1,68	0,88
Mina	0,88	3,40	3,36	3,34
SAF	0,70	2,68	1,64	1,03

Em superfície, o índice de carga de poluente variou de 0,04 a 1,75, enquanto que na profundidade de 0,2-0,4 m variou de 0,01 a 3,48 (Tabela 3). Em média, foram encontrados valores de PLI de 1,17 e 1,49 nas profundidades de 0-0,2 m e 0,2-0,4 m, respectivamente. Esses resultados indicam que existe poluição para B, V e Sr na área em ordem decrescente: mina > margem 2 > pilha de rejeito > SAF > pilha de estéril > margem 1, em superfície. Na profundidade de 0,2-0,4 m a ordem é a seguinte: margem 2 > mina > SAF > pilha de rejeito > pilha de estéril > margem 1.

CONCLUSÕES

A diversidade mineral e as diferentes formas de uso do solo possibilitam que os atributos do solo variem em ampla escala de valores em Serra Pelada o que dificulta a adoção de medidas de remediação da área. No entanto o nível de contaminação da área exige uma ação imediata de remediação, assim como o estabelecimento valores de referência de qualidade para solos da província mineral de Carajás. O teor total de Be V é alto em toda a área de estudo, o que se deve a formação geológica local. Houve enriquecimento e contaminação da área por B, Sr e V. A maior contaminação ocorreu na área da cava da mina e na margem, seguidas pelas pilhas de rejeito e estéril.

BIBLIOGRAFIA

- Agnieszka, J & G Barbara. 2012. Chromium, nickel and vanadium mobility in soils derived from fluvio-glacial sands. *J Hazard Mater.* 237-238: 315-322.
- Almada, COM & RN Villas. 1999. O depósito Bahia: Um possível exemplo de depósito de sulfeto vulcanogênico tipo besshi arqueano em Carajás. *Rev. Bras. Geociências* 29: 579-592.
- Birani, SM; AR Fernandes; AMS Braz; AJS Pedroso & LRF Alleoni. 2015. Available contents of potentially toxic elements in soils from the eastern Amazon. *Chemie der Erde.* 75: 143-151.
- Cabral, RF; B Lehmann; R Kwitko & CHC Costa. 2002. The Serra Pelada Au-Pd, Pt deposit, Carajás mineral province northern Brazil reconnaissance mineralogy and chemistry of very high grade palladian gold mineralization. *Econ geol.* 97: 1127-1138.
- CONAMA- Conselho nacional de meio Ambiente, Brasil. Resolução n° 420/2009. Disponível: online at < <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620> > Acessado em 16 janeiro 2015.
- Corrêa, TL. 2006. Bioacumulação de metais pesados em plantas nativas a partir de suas disponibilidades em rochas e sedimentos: O efeito na cadeia trófica. Ouro Preto: UFOP, 143p. Tese de Mestrado.
- Dipu, S & AA Kumar. 2013. Distribution of mercury and other trace metals in the sediments of Cochin estuary (a Ramsar site), Kerala, India. *Environ Monit Assess.* 185: 6333-6341.
- Embrapa. Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes. 1 ed, Brasília, 2011, 230p.
- Faz, A; R Zorzoza; A Muñoz & JA Acosta. 2014. Metals and metalloids in primary gold mining districts of Western Bolivia: antropogenic and natural sources. 2014. *Environ Earth Sci.* 71: 5027-5036.
- Gäbler, HE; K Glüh; A Bahr & J. Utermann. 2009. Quantification of vanadium adsorption by German soils. *Journal of geochem explor.* 103: 37-44.
- Isen, H; H Altudang & CS Keskin. 2013. Determination of Heavy Metal Contamination in Roadside Surface Soil by Sequential Extraction. 2013. *Pol J Environ Stud.* 22: 1381-1385.
- Kabata-Pendias, A. 2011. Trace Elements in Soils and Plants. 4 ed, Boca Raton, CRC Press, 534p.
- Lima, JCPS; CWA Nascimento; JGC Lima & MA Lira Junior. 2007. Níveis críticos e tóxicos de boro em solos de Pernambuco determinados em casa de vegetação. *R Bras Ci Solo* 31: 73-79.
- Lyndsay, MBJ; MC Moncour; JG Bain; JL Jambor; CJ Ptacek & DW Blowes. 2015. Geochemical and mineralogical aspects of sulfide mine tailings. *Appl Geochem.* 57: 157-177.
- Mcgrath, SP & CH Cunliffe. 1985. A simplified method for the extraction of metals Fe, Zn, Cu, Ni, Cd, Pb, Cr, Co and Mn from soils and sewage sludges. *J Sci Food Agr.* 36: 784-798.
- Mello, JWV & WAP Abrahão. 2013. Valores de referência de qualidade para elementos traço nos solos de Minas Gerais e Espírito Santo: os bastidores de uma experiência. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Solos contaminados no Brasil o desafio de definir valores de referência. Boletim informativo. 38:40. Disponível em: http://www.sbcs.org.br/wpcontent/uploads/2013/05/boletim_sbcs_I_2013_otimizado.pdf. Acesso: 02 de fevereiro de 2015.
- Rashed MN. 2010. Monitoring of contaminated toxic and heavy metals, from mine tailings through age accumulation, in soil and some wild plants at Southeast Egypt. *J Hazard Mater.* 178: 738-746.
- Rieuwerts, JS. 2007. The mobility and bioavailability of trace metals in tropical soils: a review. *Chem Spec bioavailab.* 19: 75-85.
- Spiegel, SJ & MM Veiga. 2010. International guidelines on mercury management in small-scale gold mining. *J Clean Produc.* 184: 375-385.
- Souza, ES; AR Fernandes; LLL Sabino; AMS Braz & LRF Alleoni. 2015. Potentially toxic elements (PTEs) in soils from the surroundings of the Trans-Amazonian Highway, Brazil. *Environ Monit Assess.* 187: 4074-4094.
- Tallarico, FHB; CR Coimbra & CCH Cravo. 2000. The Serra Leste sediment-hosted Au-(Pd-Pt) mineralization, Carajás Province. *Rev. Bras. Geociências* 30: 226-229.
- Tedesco, MJ; SJ Volweiss & H Bohnen. 1985. Análise de solo, plantas e outros materiais. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; (Boletim técnico, 5).
- Veiga, MM & JJ Hinton. 2002. Abandoned artisanal gold mines in the Brazilian Amazon: A legacy of mercury pollution. *Nat resour forum* 26: 15-26.