

Comportamento geoquímico de alguns elementos vestigiais na envolvente das Minas de S. Domingos, Alentejo: áreas da Tapada e do Telheiro

Geochemical behavior of trace elements in the surroundings of Mina de S. Domingos, Alentejo: Tapada and Telheiro sites

M.T Tavares¹, M. M. Abreu², M.M. Vairinho³, A.J. Sousa¹ & L. Quental³

RESUMO

A actividade mineira em S. Domingos cessou há mais de quarenta anos, porém, ainda hoje, o antigo parque mineiro é fonte de dispersão de elementos vestigiais potencialmente contaminantes que se acumulam nos sedimentos e nos solos a jusante da zona de exploração.

O presente trabalho teve como objectivo a avaliação da contaminação dos solos e sedimentos na área de confluência das ribeiras de S. Domingos e do Mosteirão. Para este estudo foram seleccionadas duas áreas de amostragem, uma de referência, que se prevê não contaminada (Tapada) e outra, a jusante da Mina de S. Domingos, afectada pela exploração mineira (Telheiro).

Para a caracterização dos solos e sedimentos determinou-se na fracção <2 mm o pH (H₂O), o conteúdo em carbono orgânico e o ferro livre total. Foram também realizadas análises químicas multielementares para determinação dos teores totais dos elemen-

tos maiores Al, Ca, K, Mg, Na e P, e dos elementos menores e vestigiais As, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb, S, Sb, Zn e U. Os resultados foram analisados utilizando métodos estatísticos univariados e multivariados, e foram estimados os mapas de dispersão dos elementos através de técnicas geoestatísticas.

Na área do Telheiro alguns solos e sedimentos apresentaram pH extremamente ácido (um mínimo de 2,66) e teores muito elevados de elementos vestigiais relacionados com a mineralização (As, Pb, Sb e Hg), sendo as zonas adjacentes à ribeira de S. Domingos, veículo da drenagem ácida, as mais afectadas. Na Tapada não foram encontrados solos contaminados. A análise multivariada dos dados indica uma associação entre o As, Pb e Sb e entre o Cu e o Zn.

ABSTRACT

Even though the mining activity in S Domingos finished more than forty years

¹ Instituto Superior Técnico, Universidade Técnica de Lisboa (TULisbon), Av. Rovisco Pais 1040-001, Lisboa, e-mail: teresaagt@yahoo.com; ajsousa@ist.utl.pt; ² Instituto Superior de Agronomia, Universidade Técnica de Lisboa (TULisbon), Tapada da Ajuda, 1349-017 Lisboa, e-mail: manuelaabreu@isa.utl.pt; ³ Dept. de Prospecção de Minérios Metálicos, INETI, Estrada da Portela, Zambujal Apartado 7586, 2721-866 Alfragide, e-mail: mv_100@hotmail.com; lidia.quental@ineti.pt

ago, the mining site is still a source of polluting trace elements for soils and sediments downstream the open pit. The present work aims to evaluate the contamination of these soils and sediments. Therefore two sampling areas were selected: one, assumed as non-contaminated (Tapada), is used to access the reference values of the chemical variables for this region, and the other, downstream from the mining site, is affected by the mining activity (Telheiro).

The soils and sediments were characterised on the <2 mm fraction, by pH (H₂O), organic carbon and free iron oxides content. A total multi element analysis was done on the same fraction. Univariate and multivariate statistics were performed, as well as geochemical mapping using geostatistical interpolation methods.

In Telheiro some samples had high levels of trace elements (mainly As, Pb, Sb, and Hg) and very low pH values (minimum 2.66), this is particularly obvious in the samples collected close to the acid mine drainage. In Tapada no contaminated soils were found. The multivariate analysis showed an association between As, Pb and Sb and between Cu and Zn

INTRODUÇÃO

A área mineira de São Domingos, localizada no Baixo Alentejo a 60 km a SE de Beja, integra-se na Faixa Piritosa Ibérica, uma importante Província Metalogenética de sulfuretos maciços polimetálicos. São aí conhecidos trabalhos pré-romanos e romanos, para exploração de Au, Cu e Ag, principalmente no *gossan* resultante da oxidação de sulfuretos maciços (Sequeira, 1884; Allan, 1965). A exploração em larga escala foi iniciada no século XIX no *gossan* e nos sulfuretos maciços,

ultrapassando os cem anos de actividade. Para além do Cu, pelo qual foi explorada, a mineralização de S. Domingos era rica em outros elementos vestigiais graves para o ambiente como Sb, As, Hg, Pb e Zn. Durante a exploração, o minério útil constituiu apenas uma pequena parte do volume de rochas extraído, os restantes materiais, também ricos em elementos químicos potencialmente contaminantes e em sulfuretos ficaram depositados em escombrelas próximas do local de extracção. A meteorização destes materiais e consequente mobilização dos elementos contidos nas fases sólidas contribui ainda hoje para a contaminação dos solos e das águas da região (Quental *et al.*, 2002a; 2002b). Este processo é ainda agravado pela existência de linhas de água de drenagem ácida que causam a acidificação dos solos e das águas, aumentando a mobilidade e a toxicidade dos elementos vestigiais (Dudka & Adriano, 1997; Shum & Lavkulich, 1999; Soucek *et al.*, 2000).

O cobre abunda em rochas máficas e intermédias ocorrendo aí sob a forma de sulfuretos simples e complexos. Estes minerais são facilmente solubilizados, especialmente em meio oxidante e ácido libertando assim o cobre para o meio. Ao nível dos solos o cobre estabelece ligações químicas de diferente natureza com os componentes orgânicos e inorgânicos podendo ser aí imobilizado. Os valores médios de Cu em solos não contaminados situam-se entre 6 a 60 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias & Pendias, 1985) e em solos contaminados podem atingir até 2020 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias, 2001). O cobre é um micronutriente essencial para animais e plantas, porém quando presente em concentrações elevadas nos solos, torna-se tóxico, causando por vezes danos nas raízes das plantas ou mesmo a sua morte (Baker, 1990).

A distribuição do arsénio pelos principais tipos de rochas é relativamente uniforme, variando geralmente a sua concentração entre 0,5 e 2,5 mg kg⁻¹. A presença do arsénio nos solos está frequentemente associada a vários tipos de depósitos metálicos, sendo considerado um elemento pista em prospecção geoquímica. Em diferentes tipos de solos não contaminados, de várias regiões do mundo, o teor médio de As varia entre 1 a 95 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias & Pendias, 1992). Este elemento pode formar compostos muito tóxicos porém, as formas que geralmente assume nos solos não são as mais graves e, ao contrário de muitos outros elementos, forma complexos orgânicos geralmente menos tóxicos do que os inorgânicos. A sua toxicidade depende também do seu estado de oxidação (Batista, 2003).

A concentração de chumbo nos solos está fortemente relacionada com a composição das rochas subjacentes apresentando valores médios mundiais de 25 mg kg⁻¹ (Batista, 2003). Os problemas associados ao Pb nos solos dependem da mobilidade e disponibilidade das formas em que o elemento se encontra, as quais, por sua vez, são função da fonte e quantidade de Pb, da mineralogia, conteúdo em matéria orgânica, textura do solo e ainda do factor tempo (Berti *et al.*, 1997). O chumbo é, de entre os metais pesados, considerado o menos móvel.

O mercúrio na crosta terrestre encontra-se associado a rochas sedimentares, particularmente aos xistos mais ricos em matéria orgânica, sendo a sua concentração nas rochas magmáticas, em geral, muito baixa. Durante a meteorização das rochas o Hg é pouco mobilizado, podendo ficar retido nos solos, sobretudo por formação de complexos orgânicos e por precipitação na forma metálica ou com o enxofre

reduzido. Este elemento é considerado pouco tóxico quando se encontra sob formas inorgânicas, no entanto este metal é facilmente transformado na sua forma mais tóxica, o metil mercúrio, que ao contrário do Hg inorgânico, é facilmente absorvido pelos organismos. O metil mercúrio é uma neuro-toxina que provoca vários desarranjos do foro neurológico, sendo por vezes mortal (Moore, 2000).

Os teores de antimónio nos solos são geralmente superiores aos presentes no seu material originário, variando entre 0,05 e 9,5 mg kg⁻¹ (Kabata-Pendias & Pendias, 1992). Este elemento pode ser, nos solos, parcialmente adsorvido pelos minerais argilosos, óxidos de Fe e de Al ou formar complexos com a matéria orgânica. Relativamente à mobilidade do antimónio nos solos, Kabata-Pendias & Pendias (1992) classificam-no como sendo moderadamente móvel, apesar de outros autores lhe atribuírem mobilidade elevada (Alloway, 1990).

O teor de zinco nas rochas varia desde 10 mg kg⁻¹ em rochas sedimentares até 120 mg kg⁻¹ em rochas magmáticas básicas, apresentando nos solos não contaminados médias de concentração entre 17 e 125 mg kg⁻¹ (Batista, 2003). Quando comparado com outros metais pesados o zinco é um elemento muito solúvel tendo sido a sua disponibilidade nos solos relacionada positivamente com o conteúdo total em Zn, matéria orgânica, teor em argila e capacidade de troca catiónica e, negativamente com o CaCO₃, pH e com a saturação em catiões (Adriano, 1986; Kabata-Pendias & Pendias, 1992).

O presente estudo teve como objectivo a avaliação da contaminação dos solos e sedimentos numa área afectada pela exploração mineira de S. Domingos, situada na confluência das ribeiras de S. Domingos e do Mosteirão, utilizando

como referência uma área considerada não contaminada.

CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Geologicamente, a área de estudo corresponde a uma sequência vulcânica, incluída no Complexo Vulcano Sedimentar (CVS) de orientação WNW-ESE, com o qual estão relacionados os depósitos de sulfuretos maciços polimetálicos da Faixa Piritosa Ibérica (FPI) (Oliveira & Silva, 1990). A vegetação dominante nesta região é a esteva (*Cistus ladanifer*), o *Cistus monspeliensis* e o rosmaninho (*Lavandula sampaiana*). Nas margens e nos sedimentos da linha de drenagem ácida é identificada a urze (*Erica andevalensis*) e em escombrelas de natureza variada também se identificou outra espécie de urze, a *Erica australis*. Em algumas zonas encontram-se plantações de eucalipto (*Eucalyptus camaldulensis*).

A área da Tapada (TAP) localiza-se junto a um dos reservatórios que serviam para fornecimento de água à exploração mineira (Tapada Grande), e que é hoje utilizado para recreio. Supõe-se que esta área não esteja contaminada, uma vez que se encontra a montante da exploração mineira e da drenagem ácida, não estando directamente relacionada com qualquer outra actividade de processamento ou transporte de minério.

A área do Telheiro, a jusante da corta da mina, dos tanques de cementação e das fábricas de enxofre, abrange a zona de confluência da Ribeira do Mosteirão com a Ribeira de S. Domingos, por onde corre a linha de drenagem ácida. Na vertente da margem esquerda da Ribeira de S. Domingos foi construído um sistema que elevava as águas ácidas, provenientes da exploração, e as distribuía pela vertente com a finalidade de promover a sua evaporação e minimizar

deste modo o lançamento de efluentes ácidos no Rio Chança, situado a jusante (Abreu *et al.*, 2001).

MATERIAIS E MÉTODOS

Amostragem dos solos e sedimentos

Na área da Tapada foram colhidas trinta e quatro amostras superficiais de solos desenvolvidos sobre as litologias da zona: Complexo Vulcano-Sedimentar e formação Filito-Quartzítica (Oliveira & Silva, 1990). Os solos amostrados distribuem-se ao longo de dois perfis longitudinais, paralelos entre si e perpendiculares às formações litológicas (p0TAP e p1TAP), e ainda em locais intermédios (piTAP) de forma a assegurar a representatividade de cada litologia com um mínimo de três amostras de solo. Os solos são delgados e incipientes, apresentando um teor elevado de elementos grosseiros resultantes da desagregação das rochas de substrato.

No Telheiro foram definidos trinta e dois pontos de amostragem e colhidas trinta e sete amostras superficiais, e em alguns casos sub-superficiais de solos e sedimentos. Os sedimentos foram colhidos na Ribeira de S. Domingos, na Ribeira do Mosteirão e na confluência destas duas ribeiras, os solos foram colhidos nas margens e nas vertentes dos vales de cada uma destas linhas de água.

Os locais de amostragem foram georeferenciados com equipamento GPS RTK de dupla frequência TRIMBLE, de precisão centimétrica, utilizando os vértices geodésicos mais próximos e os parâmetros oficiais fornecidos pelo IPCC, para conversão de coordenadas em diferentes sistemas de projecção geográfica: *datum* WGS84 e Lx, e rectangulares UTM e Hyford Gauss Nacional (Sousa, 2001).

Caracterização dos solos e sedimentos

A fracção terra fina (<2 mm) das amostras de solo e sedimentos foi caracterizada em função dos seguintes parâmetros: pH, ferro livre (*FeMJ*) e carbono orgânico (*C_{org}*). O pH foi determinado numa suspensão solo/água na proporção de 1:2,5 (p/v), e as leituras realizadas com potenciómetro de vidro. O ferro livre foi extraído pelo método de Mehra & Jackson (1960) e determinado por espectrometria de absorção atómica, e o carbono orgânico foi determinado por combustão por via seca, em aparelho de Ströhlein (Póvoas & Barral, 1992). A análise química multielementar foi efectuada no laboratório Actlabs (Canadá) com 5% de repetições analíticas, tendo sido os elementos determinados por INAA (Instrumental Neutron Activation Analysis) e ICP (Inductively Coupled Plasma) após digestão ácida (HF, HClO₄, HNO₃ e HCl).

Análise dos dados e cartografia geoquímica

Na análise estatística univariada foram calculados o mínimo, média, máximo, mediana e coeficiente de variação. Dada a grande quantidade de variáveis implicadas neste estudo, recorreu-se à análise em componentes principais (ACP). A análise

em componentes principais permite resumir em poucos factores grande parte da variabilidade dos dados (Sousa, 2000) facilitando a percepção de algumas relações existentes entre as variáveis, entre os indivíduos e entre ambos.

Para interpretar os processos geoquímicos envolvidos na dispersão dos poluentes, foi estudada a distribuição espacial dos factores obtidos na ACP utilizando métodos geoestatísticos (Soares, 2000; Sousa, 2000; Vairinho, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Nos Quadros 1 e 2 e 3 são apresentados alguns estatísticos básicos relativos à caracterização dos solos e à análise química multielementar.

A homogeneidade do pH e dos teores em Fe livre na Tapada contrastam com a sua heterogeneidade no Telheiro, sugerindo situações críticas de contaminação em alguns locais do Telheiro. O teor em carbono orgânico é nos solos e sedimentos de ambos os locais relativamente baixo, o que está de acordo com as características climáticas e de vegetação da zona em estudo.

Os elementos maiores apresentam valores dentro da mesma ordem de grandeza nos solos e sedimentos das duas áreas de estudo não se registando valores anómalos quando

QUADRO 1 - Estatística descritiva das características químicas dos solos e sedimentos na Tapada e no Telheiro

	área	média	mediana	mínimo	máximo	coef. variação
pH (H ₂ O)	Tapada	5,82	5,78	5,09	6,68	0,06
	Telheiro	4,65	4,50	2,66	7,40	0,29
<i>C_{org}</i> (g kg ⁻¹)	Tapada	15,39	15,40	5,30	38,70	0,42
	Telheiro	16,20	17,10	1,90	57,80	0,77
<i>FeMJ</i> (g kg ⁻¹)	Tapada	11,91	11,74	2,48	23,32	0,45
	Telheiro	26,49	15,24	3,30	85,47	0,78

QUADRO 2 - Estatística descritiva dos elementos maiores (g kg^{-1})

	área	média	mediana	mínimo	máximo	coef. variação
Al	Tapada	3,66	3,61	2,60	2,52	0,16
	Telheiro	4,37	4,38	3,07	6,14	0,15
Ca	Tapada	0,20	0,15	0,04	0,68	0,75
	Telheiro	0,20	0,13	0,03	2,08	1,71
K	Tapada	1,61	1,60	0,74	2,54	0,30
	Telheiro	1,54	1,42	1,07	2,16	0,20
Mg	Tapada	0,41	0,33	0,15	1,07	0,49
	Telheiro	0,35	0,41	0,08	0,73	0,51
Na	Tapada	0,89	0,86	0,32	2,22	0,54
	Telheiro	1,42	1,44	0,73	1,98	0,18
P	Tapada	0,03	0,02	0,01	0,04	0,28
	Telheiro	0,04	0,03	0,01	0,19	0,02

comparados com as rochas a partir dos quais se originaram.

Os elementos vestigiais na Tapada apresentam pouca variabilidade e teores considerados normais para as litologias (Kabata-Pendias & Pendias, 1992) a partir das quais se desenvolveram os solos. No Telheiro, o enxofre, arsénio, chumbo, antimónio e mercúrio atingem valores muito elevados que contrastam com o fundo geoquímico da Tapada. Verifica-se porém, que os valores elevados de mercúrio se restringem aos sedimentos da linha de drenagem ácida. O cobre e o zinco, apesar de estarem claramente mais concentrados no Telheiro do que na Tapada, não atingem naquele local valores tão importantes pois foram elementos extraídos do minério em zonas a montante da área de estudo. Os valores de crómio, manganês e urânio são, no Telheiro, da mesma ordem de grandeza ou mesmo inferiores aos que se encontram na Tapada o que leva a crer que estes elementos não estejam relacionados com a mineralização.

Os resultados da análise em componen-

tes principais e os mapas obtidos na cartografia dos factores 1 e 2 desta análise são apresentados nas Figuras 1 a 7.

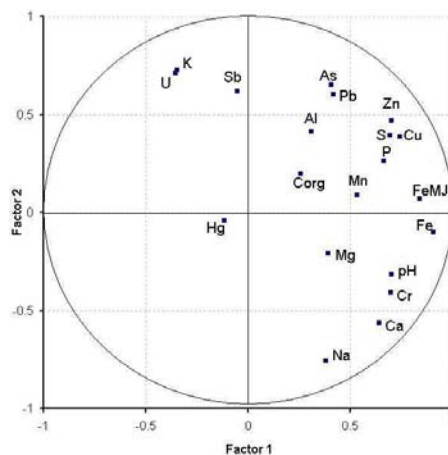


Figura 1 – Projecção das variáveis nos factores 1 e 2 da ACP com as amostras da Tapada

Na Tapada, o factor 1 da ACP (Figura 1), com 32,7% de variabilidade dos dados, representa fundamentalmente o Fe livre (FeMJ) e o Fe total, que nesta área se

encontram fortemente correlacionados. Esta correlação poderá ser explicada por não haver na Tapada escombrelas nem escórias que são materiais muito ricos em ferro, e também pela ausência de drenagem ácida, a qual condiciona a forma em que o Fe se encontra nos solos e nos sedimentos. Também positivamente correlacionados com o Fe estão o pH, Cr, P, S, Cu e Zn. O factor 2, que representa 22,3% da variabilidade dos dados, revela uma oposição entre solos mais ricos em K e U, provavelmente provenientes de litologias tais como rochas vulcânicas félsicas enriquecidas em U e solos mais ricos em Na e Ca que poderão estar associados a rochas

intermédias e/ou máficas da região (Abreu *et al.*, 2004).

Cartografando os factores 1 e 2 (Figuras 2 e 3), é possível estabelecer uma relação entre a geoquímica dos solos e a litologia sobre a qual estes se desenvolveram. A distribuição espacial do factor 1 mostra uma provável associação com rochas vulcânicas básicas, nas quais os teores em Cu, Cr, Fe e Mn são geralmente mais elevados, contrastando com as rochas ácidas (Abreu *et al.*, 2004). No factor 2 os elementos correlacionados Sb, As, Pb e Zn poderão representar pequenas concentrações dispersas de sulfuretos nas rochas aflorantes na área da Tapada.

QUADRO 3 - Estatística descritiva de elementos menores e vestigiais na Tapada e no Telheiro

	área	média	mediana	mínimo	máximo	coef. variação
Fe (g kg ⁻¹)	Tapada	2,71	2,73	1,02	5,22	0,38
	Telheiro	5,68	4,90	1,56	15,10	0,53
Mn (g kg ⁻¹)	Tapada	0,97	0,77	0,18	3,31	0,73
	Telheiro	0,45	0,43	0,02	1,14	0,82
S (g kg ⁻¹)	Tapada	0,01	0,01	0,00	0,04	0,57
	Telheiro	0,62	0,37	0,02	2,81	1,18
As (mg kg ⁻¹)	Tapada	21,51	18,80	7,40	77,60	0,63
	Telheiro	1727,09	277,00	28,00	15900,00	1,62
Cr (mg kg ⁻¹)	Tapada	66,26	65,00	13,00	292,00	0,75
	Telheiro	75,49	75,00	49,00	100,00	0,17
Cu (mg kg ⁻¹)	Tapada	27,29	25,31	8,94	78,44	0,56
	Telheiro	104,22	50,31	7,64	690,74	1,29
Hg (mg kg ⁻¹)	Tapada	0,57	0,50	0,50	3,00	0,75
	Telheiro	29,32	0,50	0,50	420,00	2,77
Pb (mg kg ⁻¹)	Tapada	64,50	51,70	22,02	256,69	0,67
	Telheiro	1000,65	156,11	47,16	7315,18	1,69
Sb (mg kg ⁻¹)	Tapada	5,39	3,10	1,50	19,70	0,96
	Telheiro	236,12	68,90	3,50	2400,00	1,98
U (mg kg ⁻¹)	Tapada	3,75	3,90	0,25	5,80	0,32
	Telheiro	2,03	2,20	0,25	5,00	0,70
Zn (mg kg ⁻¹)	Tapada	63,09	57,15	26,93	212,26	0,51
	Telheiro	140,69	88,74	17,29	494,95	0,87

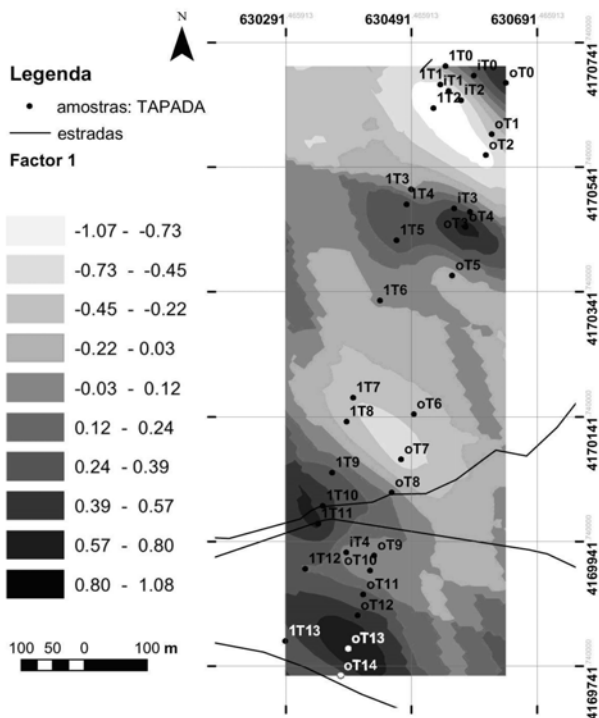


Figura 2 – Cartografia do factor 1 da ACP das amostras da Tapada por krigagem normal. Correlação positiva com: Fe, FeMJ, Ca, Cr, pH, Zn, Cu, S, P, e Mn Modelo do variograma: 0.22*esférico (137.4)+0.13*pepita

Na Figura 4 está representado o gráfico com a projecção das variáveis no factor 1 (que representa 38% de variabilidade) e no factor 2 (que representa 19% de variabilidade) da ACP das amostras do Telheiro.

O factor 1 evidencia uma forte correlação do Mn, Mg e pH (Figura 4), que poderá reflectir as zonas menos contaminadas onde o pH é mais elevado. Esta afirmação é reforçada pela oposição do S, Pb, As, Sb, K e Hg, elementos associados à mineralização e ainda o FeMJ correspondente aos óxidos de ferro bem representados nos solos e sedimentos e que resultam da precipitação do Fe³⁺, como óxidos ou oxi-hidróxidos, mobilizado, tal

como outros elementos, pelas águas ácidas (Dudka & Adriano, 1997; Shum & Lavkulich, 1999; Soucek *et al.*, 2000).

O cobre e o zinco encontram-se independentes dos elementos anteriores e correlacionados entre si pois, tal como já foi referido, foram nas áreas limítrofes da corta da mina sujeitos a separação a partir do minério. O fósforo, cálcio e Corg também estão bem representados neste gráfico. Este grupo de elementos é fortemente influenciado pela amostra T24 (Figura 5) correspondente a um solo antrópico, e encontra-se numa posição intermédia entre o factor 1 e o factor 2, ficando positivamente correlacionado tanto com o Cu e o Zn como com o Mg, Mn e pH.

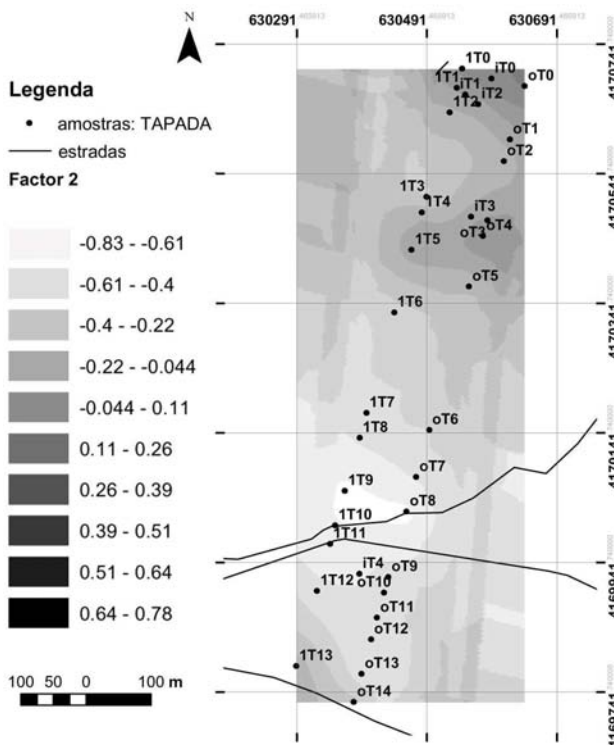


Figura 3 - Cartografia do factor 2 da ACP das amostras da Tapada por krigagem normal. Correlação positiva com: K, U, Sb, As, Pb e Zn; Correlação negativa com: Na e Ca; Modelo do variograma: $0.0777 * \text{esférico} (150, 77.323, 100.0) + 0.14154 * \text{pepita}$

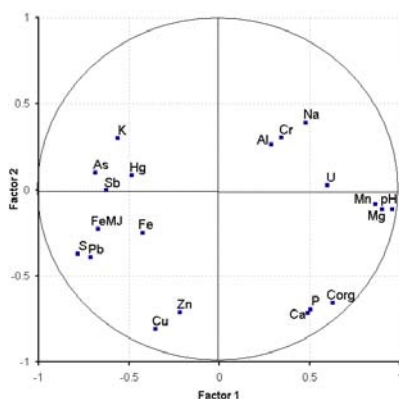


Figura 4 - Projecção das variáveis nos factores 1 e 2 da ACP com as amostras do Telheiro

A distribuição espacial dos factores (Figura

5 e 6) mostra que os elementos vestigiais ligados à mineralização se encontram sobretudo nos sedimentos da drenagem ácida e na vertente esquerda do vale desta linha de água (à direita na Figura 5). São excepção o Cu e o Zn, que aparecem mais concentrados numa amostra, constituída por materiais de escambreira e escória colhida junto à antiga linha de caminho-de-ferro (T33), hoje estrada e, juntamente com o Ca, P e Corg, nos solos antrópicos (T24 e T25). O urânio, o magnésio e o manganês estão associados a solos menos contaminados (T1, T2, T28, T29B e T30), com pH mais elevado, colhidos na vertente direita da linha de drenagem ácida (Ribeira de S. Domingos) e para além da linha de caminho de ferro (Figuras 5 e 6).

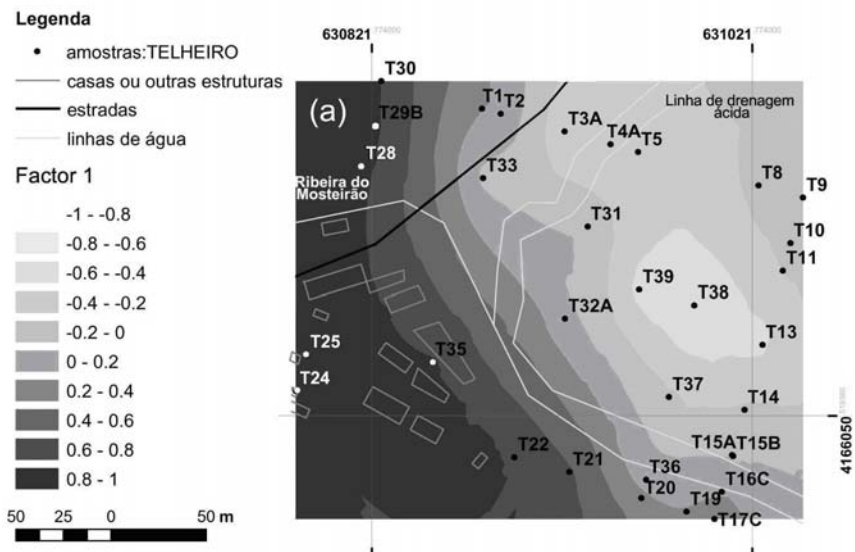


Figura 5 - Cartografia do factor 1 da ACP com as amostras do Telheiro por krigagem normal. Correlação positiva: pH, Mg, Mn, U, C_{org}, P, Ca. Correlação negativa: S, Pb, Fe, Mn, As, Sb, K, Hg. Modelo do variograma: 0.09772*esférico (210,150, 352.0)+0.076652*pepita

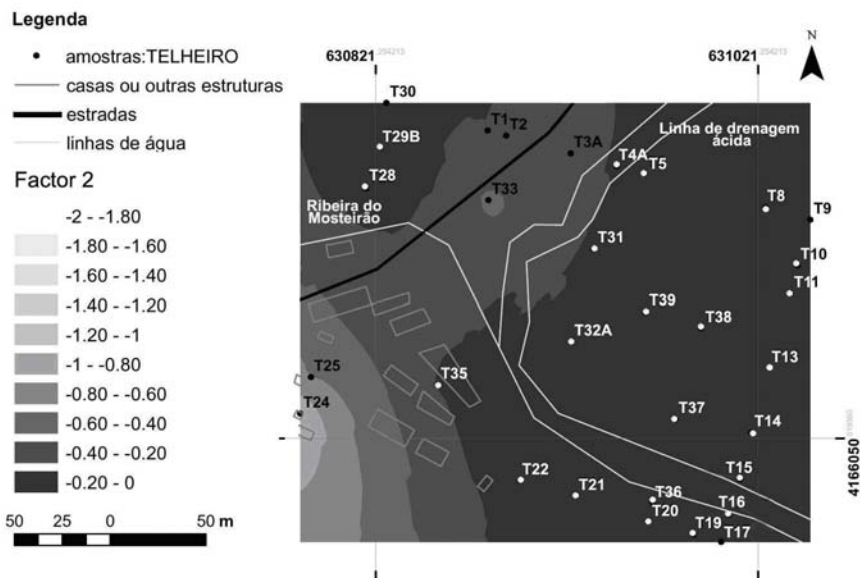


Figura 6 - Cartografia do factor 2 da ACP com as amostras do Telheiro por krigagem normal. Correlação negativa: Cu, Zn, Ca, P e C_{org}. Modelo do variograma: 0.35328*esférico (210,151.15,354.9)+0.31*pepita.

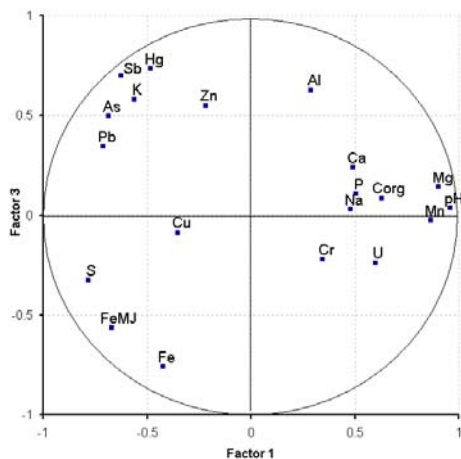


Figura 7 – Projecção das variáveis nos factores 1 e 3 da ACP com as amostras do Telheiro

No factor 3, que explica 17% da variabilidade dos dados (Figura 7), o Zn aproxima-se do grupo do Pb, As, Sb, Hg e K, que por sua vez aparece oposto ao Fe. Este factor é fortemente influenciado pela amostra T39 que corresponde a um sedimento de cor branca resultante da alteração do xisto pela passagem das águas residuais da exploração no processo de evaporação das águas, referido anteriormente. Esta amostra atinge no Telheiro os valores máximos de As, Hg e Sb (respectivamente, 15900, 420 e 2400 mg kg⁻¹), e valores mínimos de Fe e U (respectivamente, 15,6 g kg⁻¹ e abaixo do limite de detecção). Apresenta também teores elevados de Pb e Zn, e teores relativamente baixos de Cu e S. O empobrecimento em Cu e Fe neste sedimento poderá estar relacionado com o processo de extracção do cobre por cementação no qual estes dois elementos precipitavam juntos.

CONCLUSÕES

A análise em componentes principais conjugada com a cartografia geoquímica, efectuada através de métodos de interpola-

ção geoestatística (krigagem normal), confirmou ser uma metodologia importante para a interpretação dos dados geoquímicos permitindo identificar algumas associações dos elementos no meio e caracterizar a sua dispersão.

Na área da Tapada, os teores dos elementos estudados reflectem o fundo geoquímico dos solos de acordo com as litologias aflorantes a partir das quais se desenvolveram, não apresentando contaminação decorrente da actividade mineira.

Na área do Telheiro a composição química dos solos é função dos materiais sobre os quais se desenvolveram (escórias, escomboreiras e rochas de substrato). Os sedimentos apresentam, de um modo geral, pH ácido e níveis muito elevados de elementos vestigiais dos quais se referem o Pb, As, S, Sb e Hg, reveladores da contaminação das águas de drenagem ácida que continuam a assegurar a dispersão destes elementos.

O comportamento do Hg nos solos e sedimentos do Telheiro parece ser condicionado pela actividade microbiana, que promove a sua oxidação e volatilização nos solos, mas não nos sedimentos ao longo da linha de drenagem ácida. Quanto ao U, presente nos solos desenvolvidos sobre as litologias do encaixante onde ocorre, parece ser totalmente solubilizado e mobilizado pelas águas ácidas não deixando vestígios nos sedimentos.

Por fim, note-se que este estudo foi baseado em análises dos teores totais dos elementos nos solos. Porém, a especiação e a avaliação das formas disponíveis (solúveis e no complexo de troca) destes elementos nos solos e/ou sedimentos constitui uma informação imprescindível quando se pretende prever com alguma certeza qual o seu destino a curto e médio prazo e obter uma correcta avaliação dos riscos ambientais envolvidos em zonas contaminadas.

BIBLIOGRAFIA

- Abreu, M. M., Joaquim, C., Tavares, M. T., Quental, L. & Vairinho, M. M. 2001. Impacto da Exploração da Mina de São Domingos nos Solos e Sedimentos da Área do Telheiro, Alentejo. *Livro de Resumos do 1º Congresso Nacional das Ciências do Solo*. Encontro Anual da SPCS. ISA, Lisboa.
- Abreu, M. M., Tavares, M. T., Vairinho, M. M., Joaquim, C. & Quental, L. 2004. Geoquímica comparada dos solos da área mineira de São Domingos, Alentejo: Fundo geoquímico versus zona de exploração. *Revista de Ciências Agrárias*, **XXVII** (1): 301-313.
- Adriano, D. C. 1986. *Trace Elements in Terrestrial Environment*. Springer-Verlag New York Inc.
- Allan, J. C. 1965. A Mineração em Portugal na Antiguidade. *Boletim de Minas*, **2**(3): 139-175.
- Alloway, B. J. 1990. Soil Processes and Behaviour of metals. In: B. J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils* (2ª ed), pp. 7-28. Blackie Academic & Professional, Ipswich, R.U.
- Baker, D. E. 1990. Copper. In: B.J. Alloway (ed.) *Heavy Metals in Soils* (2ª ed), pp. 151-176. Blackie Academic & Professional, Ipswich, R.U.
- Batista, M. J 2003. *Comportamento de elementos químicos no sistema rocha-solo-sedimento-planta na área mineira de Neves Corvo: Implicações Ambientais*. Tese para obtenção do grau de Doutor em Geociências, Universidade de Aveiro.
- Berti, W. R., Cunningham, S. D. & Jacobs, L. W., 1997. Sequential chemical extraction of trace elements: development and use in remediating contaminated soils. In: R. Prost (ed.) *Contaminated Soils*, pp. 121-131. Les colloques 85, INRA, Paris.
- Dudka, S. & Adriano, D. C. 1997. Environmental impacts of metal ore mining and processing: a review. *Journal Environmental Quality*, **26**: 590-602.
- Gaspar, O. 1998. História da Mineração dos Depósitos de Sulfuretos Maciços Vulcanogénicos da Faixa Piritosa Portuguesa. *Boletim de Minas*, **35** (4). Lisboa.
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. 1985. *Trace Elements in Soils and Plants* (1ª ed.) CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. & Pendias, H. 1992. *Trace Elements in Soils and Plants* (2ª ed.) CRC Press.
- Kabata-Pendias, A. 2001. *Trace Elements in Soils and Plants* (3ª ed.) CRC Press, Florida, USA.
- Mehra, O. P. & Jackson, M. L. 1960. Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clay Minerals*, **7**: 317-327.
- Moore, C. J. 2000. *A Review of Mercury in the Environment*. Office of Environmental Management, Marine Resources Division, Department of Natural Resources South Carolina, EUA.
- Oliveira, J. T. & Silva, J. B. 1990. Notícia Explicativa da Carta Geológica à escala 1:50000 folha 46D –Mértola. *Serviços Geológicos de Portugal*.
- Póvoas, I. & Barral, M. F. 1992. Métodos de análise de solos. *Comunicações do Instituto de Investigação Científica Tropical, Série de Ciências Agrárias* (10). Ministério do Planeamento e da Administração do Território.
- Quental, L., Abreu, M. M., Oliveira, V., Sousa, P., Batista, M. J., Brito, G., Vairinho, M., Sousa, J. & Martins, L. 2002a. Imagens hiperespectrais para avaliação e monitorização ambiental em áreas mineiras: resultados preliminares do projecto MINEO na Mina de São Domingos, Alentejo. In: J.Brandão

- (ed.), pp. 583-594. *Actas do Congresso Internacional sobre Património Geológico e Mineiro*. Museu Geológico e Mineiro de Lisboa, Beja.
- Qental, L., Bourguignon, A., Sousa, A. J., Batista, M. J., Brito, G., Tavares, M. T., Abreu, M. M., Vairinho, M. & Cottard, F. 2002b. *MINEO Southern environment test site. Contamination/impact mapping and modeling* - Final report for European Commission. (<http://www.brgm.fr/mineo>).
- Sequeira, P. V. C. 1884. Notícia sobre o estabelecimento mineiro de S.Domingos. *Revista de Obras Públicas e Minas*, **14-15**: 1883-1884.
- Shum, M. & Lavkulich, L. 1999. Speciation and solubility relationships of Al, Cu, and Fe in solutions associated with sulphuric acid leached mine waste rock. *Environmental Geology*, **38** (1): 59-68
- Soares, A. 2000. *Geoestatística para as Ciências da Terra e do Ambiente*, IST PRESS, Lisboa.
- Soucek, D. J., Cherry, D. S. & Trent, G. C. 2000. Relative acute toxicity of acid mine drainage water column and sediments to *Daphnia magna* in the Puckett's Creek Watershed, Virginia, USA. *Archive of Environmental Contamination and Toxicology*, **38**: 305-310.
- Sousa, A. J. 2000. *Análise geoestatística de dados*. CVRM/ Centro de Geossistemas. IST, UTL, Lisboa.
- Sousa, P. 2001. *Relatório das acções desenvolvidas no âmbito do projecto MINEO*. Relatório Interno do IGM. Alfragide.
- Vairinho, M. M. 2000. *Desenvolvimento de sistemas de integração de dados na prospecção de recursos minerais*. Tese de Doutoramento. IST, UTL. Lisboa.