

## **Distribuições espaciais de concentração em Cu, Zn, Pb e Co apresentadas por sedimentos de corrente na Zona Sul Portuguesa; implicações para a prospecção mineral**

### ***Spatial distributions of Cu, Zn, Pb and Co contents in stream sediments of the South Portuguese Zone; implications for mineral exploration***

Ricardo Feliciano<sup>1</sup>, António Mateus<sup>1</sup>, João Xavier Matos<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Departamento de Geologia e CeGUL, Faculdade de Ciências da Universidade de Lisboa, C6, Piso 4, 1749-016 Lisboa

<sup>2</sup> Laboratório Nacional de Energia e Geologia, I.P., Rua Frei Amador Arrais, 39, Apartado 104, 7801-902 Beja

**feliciano.ricardo@gmail.com, amateus@fc.ul.pt, joao.matos@ineti.pt**

#### **Resumo**

Os conteúdos em Cu, Zn, Pb e Co obtidos para 4230 amostras de sedimentos de corrente colhidos ao longo de toda a Zona Sul Portuguesa apresentam distribuição espacial heterogénea e assimétrica, para além de comportamento multifractal. Os valores de fundo regional obtidos a partir do estudo das variações “*log área versus log concentração*” são  $45 \pm 1$  ppm,  $8 \pm 3$  ppm,  $16 \pm 1$  ppm e 17 ppm para o Zn, Pb, Cu e Co, respectivamente. Os valores de fundo local, ainda que enfiem de maior imprecisão, cifram-se em  $455 \pm 100$  ppm para o Zn e  $83 \pm 3$  ppm para o Co, posicionando-se entre 1921 e 2465 ppm para o Pb e em torno de 1059 ppm para o Cu. Todas as anomalias geoquímicas detectadas sobrepõem-se a áreas que enquadram mineralizações conhecidas, com excepção da que se define para o Co, posicionada sobre a Formação de Mira, a SW da Faixa Piritosa Ibérica. A projecção dos índices de alteração/mineralização AI e CCPI revela-se coerente com os demais resultados.

**Palavras-chave:** Sedimentos de corrente; Distribuições espaciais de valores de concentração em metais; Faixa Piritosa Ibérica; Zona Sul Portuguesa

#### **Abstract**

The Cu, Zn, Pb and Co contents displayed by 4230 stream sediment samples collected along the whole South Portuguese Zone show heterogeneous and asymmetric spatial distributions, besides multifractal behaviour. The regional thresholds obtained through the analysis of the “*log area versus log concentration*” are  $45 \pm 1$  ppm,  $8 \pm 3$  ppm,  $16 \pm 1$  ppm and 17 ppm for Zn, Pb, Cu and Co, respectively. The local threshold values, although relatively ill defined, are  $455 \pm 100$  ppm for Zn and  $83 \pm 3$  ppm for Co, ranging between 1921 and 2465 ppm for Pb, and being around 1059 ppm for Cu. All the geochemical anomalies detected by means of this approach overlay areas that host well-known ore-forming systems, with the exception of the Co anomaly sited over the Mira Formation, south-westwards of the Iberian Pyrite Belt. Plotting of AI and CCPI alteration/mineralization indexes show strong consistency with erstwhile results.

**Key-words:** Stream sediments; Spatial distributions of metal concentration values; Iberian Pyrite Belt; South Portuguese Zone

#### **1. Introdução**

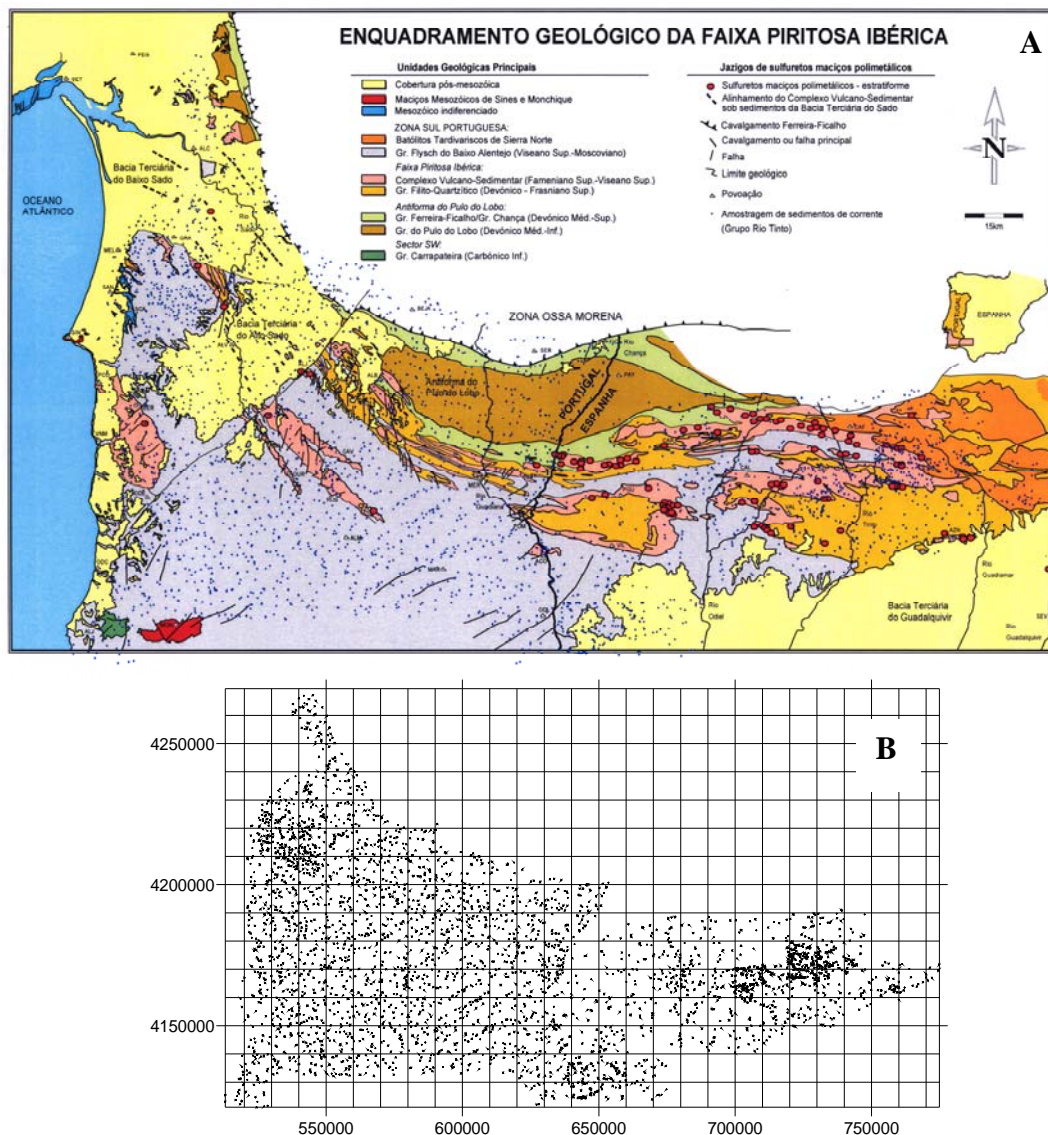
A análise mineralógica de sedimentos de corrente corresponde a uma técnica comum em prospecção mineral, porque acessível e particularmente útil na abordagem a regiões amplas, dissecadas por sistemas fluviais capazes de transportar carga sólida significativa (e.g. Moon *et al.*, 2006). A aplicação desta técnica não é, contudo, isenta de crítica, em especial quando se procura estabelecer correlações e extrapolações fidedignas entre diferentes pontos de amostragem. Quando a análise mineralógica dos sedimentos de corrente é substituída pela respectiva composição química total, a incerteza na interpretação aumenta, facto que tem penalizado severamente a exploração desta última abordagem de prospecção como alternativa à geoquímica de solos. O presente trabalho procura responder a algumas das questões que frequentemente se colocam na interpretação das

distribuições espaciais de valores de concentração elementar em sedimentos de corrente. Para o efeito recorre ao exame dos conteúdos em Cu, Zn, Pb e Co apresentados por sedimentos de corrente colhidos em 4230 estações distribuídas pela Zona Sul Portuguesa (em Portugal e Espanha), incluindo o Grupo Pulo do Lobo, a Faixa Piritosa Ibérica (FPI) e o Grupo Flysch do Baixo Alentejo (e.g. Oliveira *et al.*, 2006, Fig. 1). Os resultados obtidos são, assim, passíveis de validação pela simples confrontação com os numerosos dados disponíveis para a FPI, importante província mineira europeia que se espalha por  $\approx 12500$  km<sup>2</sup> e inclui mais de 2500 Mt de sulfuretos de metais básicos, repartidos por cerca de 90 depósitos (e.g. Leistel *et al.*, 1998; Carvalho *et al.*, 1999). Adicionalmente, os conteúdos em vários elementos maiores (Si, Al, Mg, Fe, Ca, K, Na) nos mesmos sedimentos de corrente foram considerados com

vista a testar a aplicação ao caso presente dos índices de alteração/mineralização vulgarmente utilizados na caracterização de domínios rochosos hospedeiros de

mineralização de sulfuretos maciços vulcanogénicos (e.g. Large *et al.*, 2001).

**Fig. 1:** (A) Mapa geológico simplificado da Zona Sul Portuguesa e principais ocorrências de sulfuretos maciços vulcanogénicos da Faixa Piritosa Ibérica (pontos vermelhos). Os pontos azuis representam a amostragem de sedimentos de corrente; Geologia *ad. Oliveira et al.* (2006), *ref. inc.*. (B) Distribuição espacial dos 4230 pontos de amostragem que serve de base aos mapas de isolinhas apresentados subsequentemente (coordenadas UTM em metros).



## 2. Metodologia

Os dados analíticos utilizados no presente estudo foram obtidos em campanhas de prospeção mineral conduzidas nos anos 90 pelo Grupo Rio Tinto na FPI (Portugal e Espanha), referenciados no primeiro caso em relatórios técnicos da Soc. Mineira Rio Artezia referentes às áreas de pesquisa de Melides, Grândola-Alcácer, Serra Branca, Pomarão-Odeleite, Ourique e Odemira (Arquivo LNEG). Após validação da georreferenciação de cada ponto amostrado, procedeu-se à listagem ordenada dos valores de concentração e ao exame da estatística descritiva de cada

distribuição. A verificação do comportamento multifractal das distribuições de concentração em Zn, Pb, Cu e Co teve por base o trabalho de Gonçalves (2001) e foi realizada em ambiente MATLAB®, modelando o espectro  $\alpha - f(\alpha)$  para diferentes áreas de acordo com o método dos momentos (Halsey *et al.*, 1986) e corrigindo o efeito de aresta. Os valores de fundo (regionais e locais) que permitem destacar as concentrações verdadeiramente anómalas, foram calculados subsequentemente aplicando o modelo concentração-área proposto por Cheng *et al.* (1994).

A interpolação necessária à construção dos mapas de isolinhas fundamentou-se no *kriging* ordinário dos valores de concentração, recorrendo ao programa SURFER 8<sup>®</sup>. Os variogramas experimentais foram ajustados a modelos teóricos, permitindo obter informações sobre a variabilidade espacial e a anisotropia das distribuições.

### 3. Resultados

#### 3.1 Estatística descritiva

A Tabela I sumariza os resultados obtidos, permitindo uma percepção global da heterogeneidade das distribuições de concentração em análise e respectivos graus de assimetria.

**Tabela I:** Síntese da estatística descritiva para as distribuições de concentração dos metais considerados

Elemento	Zn	Pb	Cu	Co
Nº amostras (*)	4230	4227	4227	4214
Mínimo (ppm)	2	3	1	2
Máximo (ppm)	6809	28097	2332	700
Média (ppm)	83	46	37	17
Mediana (ppm)	61	23	25	15
1º quartil (ppm)	41	16	17	7
3º quartil (ppm)	88	34	38	22
Variância	32841	201621	6337	273
Desvio padrão	181	449	80	17
Coef. variação	2	10	2	1
Assimetria	22	58	16	18
Curtose	645	3608	346	706

(\*) A diferença para o total de 4230 corresponde aos pontos de amostragem em que a concentração se encontra abaixo do limite de detecção do método analítico utilizado (2 ppm para o Cu e 3 ppm para os restantes metais).

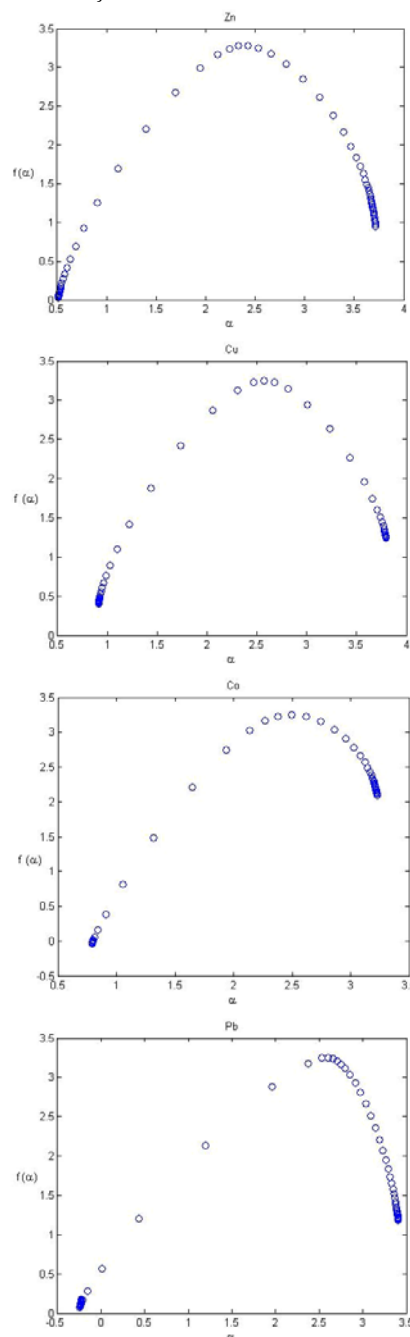
Os valores máximos para todos os metais são significativamente altos. A média é sempre superior à mediana, sugerindo a presença de distribuições não normais. Os valores do 3º quartil são substancialmente inferiores aos máximos das distribuições, denotando a possibilidade de existirem áreas caracterizadas por concentrações anómalas. A distribuição de Co apresenta coeficiente de variação igual a 1; para as distribuições de Cu e Zn, este coeficiente toma valor 2 e para a de Pb valor 10. Valores deste coeficiente acima da unidade evidenciam o carácter disperso das distribuições; assim, o valor extremo obtido para o Pb poderá ser explicado pelo facto do máximo da distribuição ser muito superior ao valor imediatamente abaixo (3268 ppm); tal discrepância poderá resultar de um erro analítico ou, simplesmente, denunciar um efeito (não representativo) de pepita. Também os valores da variância são muito elevados para todos os metais. O desvio padrão e a assimetria para as distribuições de Pb e Zn posicionam-se acima das obtidas para o Cu e o Co, facto que se

pode explicar de forma equivalente à indicada para o coeficiente de variação do Pb.

#### 3.2 Comportamento multifractal

A Fig. 2 ilustra os espectros  $\alpha - f(\alpha)$  obtidos para cada um dos metais e as Tabelas II e III os valores  $\tau(q)$  para um dado intervalo de  $q$  com a incerteza expressa em  $2\sigma$ .

**Fig. 2:** Espectros multifractais para as distribuições de concentração em análise.



Estes espectros traduzem bem o comportamento multifractal das distribuições de concentração em

estudo; no caso do Pb, o facto da amostragem incluir menor conjunto de valores para o intervalo  $\alpha$  considerado, explica a razão pela qual o primeiro ramo da curva apresenta maior dispersão.

**Tabela II:** Valores de  $\tau$  com incerteza expressa em  $2\sigma$  para o Pb e Zn;  $-2.8 \leq q \leq 2.9$  e intervalo de 0.3.

q	Pb		Zn	
	$\tau$	$2\sigma$	$\tau$	$2\sigma$
-2.8	-11.173	0.051	-11.702	0.070
-2.5	-10.253	0.047	-10.652	0.062
-2.2	-9.351	0.043	-9.621	0.053
-1.9	-8.468	0.039	-8.618	0.045
-1.6	-7.602	0.035	-7.651	0.037
-1.3	-6.754	0.032	-6.729	0.030
-1	-5.922	0.029	-5.859	0.024
-0.7	-5.104	0.026	-5.040	0.020
-0.4	-4.301	0.024	-4.264	0.017
-0.1	-3.512	0.021	-3.523	0.015
0.2	-2.738	0.018	-2.810	0.014
0.5	-1.991	0.019	-2.123	0.015
0.8	-1.313	0.030	-1.466	0.018
1.1	-0.817	0.049	-0.850	0.021
1.4	-0.593	0.073	-0.298	0.024
1.7	-0.556	0.098	0.167	0.026
2	-0.589	0.123	0.539	0.030
2.3	-0.647	0.149	0.836	0.036
2.6	-0.715	0.174	1.083	0.043
2.9	-0.786	0.199	1.299	0.052

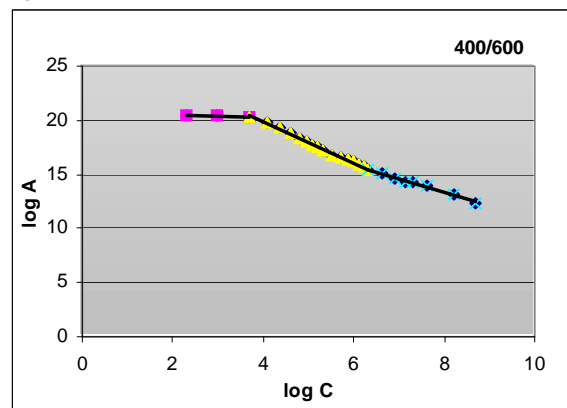
**Tabela III:** Valores de  $\tau$  com incerteza expressa em  $2\sigma$  para o Cu e Co;  $-2.8 \leq q \leq 2.8$  e intervalo de 0.4.

q	Cu		Co	
	$\tau$	$2\sigma$	$\tau$	$2\sigma$
-2.8	-11.997	0.081	-11.304	0.053
-2.4	-10.544	0.067	-10.062	0.048
-2	-9.136	0.054	-8.837	0.042
-1.6	-7.798	0.044	-7.637	0.036
-1.2	-6.552	0.035	-6.471	0.031
-0.8	-5.394	0.029	-5.347	0.026
-0.4	-4.3	0.024	-4.273	0.022
0	-3.252	0.02	-3.252	0.020
0.4	-2.242	0.019	-2.278	0.020
0.8	-1.281	0.021	-1.349	0.021
1.2	-0.398	0.027	-0.464	0.025
1.6	0.365	0.035	0.360	0.031
2	0.993	0.044	1.088	0.039
2.4	1.514	0.055	1.680	0.049
2.8	1.971	0.067	2.144	0.061

### 3.3 Cálculo dos valores de fundo

O cálculo dos valores de fundo para cada distribuição de concentração foi realizado através da análise de variações “log área versus log concentração”; o gráfico patente na Fig. 3 exemplifica o procedimento para uma das janelas utilizadas na caracterização do comportamento do Zn. Ensaíram-se variações log-log para várias janelas (áreas), seleccionando-se os espaçamentos 250×500 m, 400×600 m, 200×600 m e 100×200 m, com excepção do Cu para o qual foram ensaiadas apenas três janelas com espaçamentos 100×200 m, 500×1000 m e 50×100 m (mercê dos constrangimentos impostos pela respectiva distribuição de concentração). Tal permite estimar a incerteza no cálculo dos valores de fundo em função das áreas seleccionadas. No caso presente, a incerteza associada ao fundo regional para cada metal revelou-se bastante aceitável, o mesmo não acontecendo com muitos dos fundos locais, traduzindo dificuldades acrescidas na discriminação de anomalias de relativa pequena dimensão e teor elevado com base numa rede de amostragem melhor adequada à caracterização geral da região.

**Fig. 3:** Log área – log concentração para o Zn com base na janela 400×600 m. Assinalam-se as rectas de ajustamento aos diferentes grupos de pontos (separados por quebras de linearidade); o fundo regional corresponde à solução numérica resultante da intersecção as duas primeiras rectas; o fundo local obtém-se pela intersecção da segunda recta com a terceira.



O fundo regional cifra-se em  $45 \pm 1$  ppm para o Zn,  $8 \pm 3$  ppm para o Pb,  $16 \pm 1$  ppm para o Cu e 17 ppm para o Co. O fundo local para o Zn (acima do qual se deverão posicionar as anomalias com maior significado para a prospecção mineral) estima-se em  $455 \pm 100$  ppm; para o Co tal acontece a partir de  $83 \pm 3$  ppm. Resultados aceitáveis de fundo local para o Pb (1921 e 2465 ppm) apenas foram obtidos quando as janelas apresentavam espaçamentos de 250×500 m e de 400 × 600 m; para o Cu somente se aceitou um valor de fundo local (1059 ppm), tomando a janela 100×200 m. Para as restantes janelas (200×600 m e 100×200 m no caso do Pb e 500×1000 m e 50×100 m no caso do Cu) as distribuições logA-



logC não conduzem a resultados geologicamente plausíveis (*i.e.* as soluções numéricas encontradas para o fundo local não têm qualquer significado geoquímico).

### 3.4 Variogramas

A Tabela IV dá conta do modelo teórico utilizado como referência na análise dos variogramas experimentais para cada metal, resumindo também os valores admitidos pelos diferentes parâmetros (efeito de pepita, alcance e patamar) no melhor ajustamento obtido; referem-se ainda a direcção do eixo maior da elipse que caracteriza a anisotropia da distribuição de valores, bem como a sua razão axial.

**Tabela IV:** Parâmetros dos modelos de variograma ensaiados para os elementos considerados.

	Modelo	Efeito pepita	Alcance	Patamar	Anisotropia	
					Razão	Direcção (Azimute)
Zn	Wave	20000	13500	85000	2.5	135°
Pb	Wave	145000	22400	185900	2.5	135°
Cu	Wave	5650	11700	7100	2.2	135°
Co	Wave	198	700	170	2.5	130°

Foram ensaiados vários modelos teóricos, mas apenas para o modelo *Wave* (*Hole Effect*) se conseguiram ajustamentos aceitáveis. Este modelo reflecte bem o efeito de escala; como a região amostrada é muito extensa e caracterizada por alinhamentos geológicos intercalados composicionalmente distintos, o comportamento do variograma em onda tende a reflectir padrões de concentração interpostos. Ou seja, áreas da região amostrada contendo concentrações elevadas em um determinado metal, apresentam boa correlação entre pares de pontos; esta correlação perde-se com o afastamento progressivo aquelas áreas (1ª onda). Aumentando a distância ao ponto inicial, poderá atingir-se outra área com concentrações elevadas no mesmo metal, voltando a haver correlação entre pontos (2ª onda), e assim sucessivamente.

A análise dos variogramas experimentais permite verificar que o ajustamento, junto à origem, é melhor para as distribuições de concentração em Cu e Co do que para a de Zn; para todos estes casos, o ajustamento entre os variogramas teórico e experimental deixa de se verificar a partir de alcances compreendidos entre 45000 e 50000. O variograma experimental obtido para o Pb segue de perto o modelo teórico ao longo de todo o seu espectro; este comportamento e o facto do alcance e patamar serem bastante elevados, reflecte a natureza particular da distribuição de concentração do Pb, em boa medida influenciada pela relativa imobilidade deste metal em ambiente supergénico. As distribuições de con-

centração examinadas manifestam ainda anisotropia significativa, com direcção azimutal 130°-135° e razão axial variável entre 2.2 e 2.5. O efeito de pepita é elevado em todas as distribuições de concentração, assumindo particular relevo na de Pb.

### 3.5 Mapas de anomalias

Os mapas de isolinhas obtidos para o Zn, Pb, Cu e Co patentes na Fig. 4 apenas consideram os valores de concentração acima dos calculados para o fundo regional. Todos os mapas apresentam duas áreas de anomalias bem evidentes, com excepção do Co que manifesta uma única anomalia a SW, com forte anisotropia orientada NW-SE. Tendo em conta que se tratam de dados geoquímicos para sedimentos de corrente, o significado e interpretação destas áreas anómalas deve contemplar os efeitos que potencialmente decorrem da dispersão supergénica sobre cada um dos metais relativamente às formações geológicas que, por erosão, lhes dão origem. Acrescem a estes efeitos os que decorrem da evolução experimentada pelos grandes volumes de resíduos mineiros gerados na FPI ao longo do tempo, desde a época Romana e sobretudo a partir do séc. XIX (*e.g.* Matos e Martins 2006). Não obstante estas dificuldades, a simples sobreposição dos mapas de isolinhas ao mapa geológico permite desde logo validar a metodologia adoptada na caracterização das distribuições espaciais de concentração, revelando que as principais áreas anómalas correspondem, grosso modo, aos domínios aflorantes das unidades que compõem a FPI, com particular destaque para o Complexo Vulcano-sedimentar (CVS).

As anomalias zincíferas mais extensas e de maior intensidade (Fig. 4A) localizam-se a NW, formando um alinhamento NW-SE que inclui as áreas mineiras de Caveira, Lousal e Aljustrel e onde as concentrações em Zn aumentam no sentido SE (sector jusante de Aljustrel). No domínio E da FPI ocorre um outro conjunto de anomalias zincíferas, a mais importante das quais coincide com a área enquadrante do depósito espanhol de San Telmo.

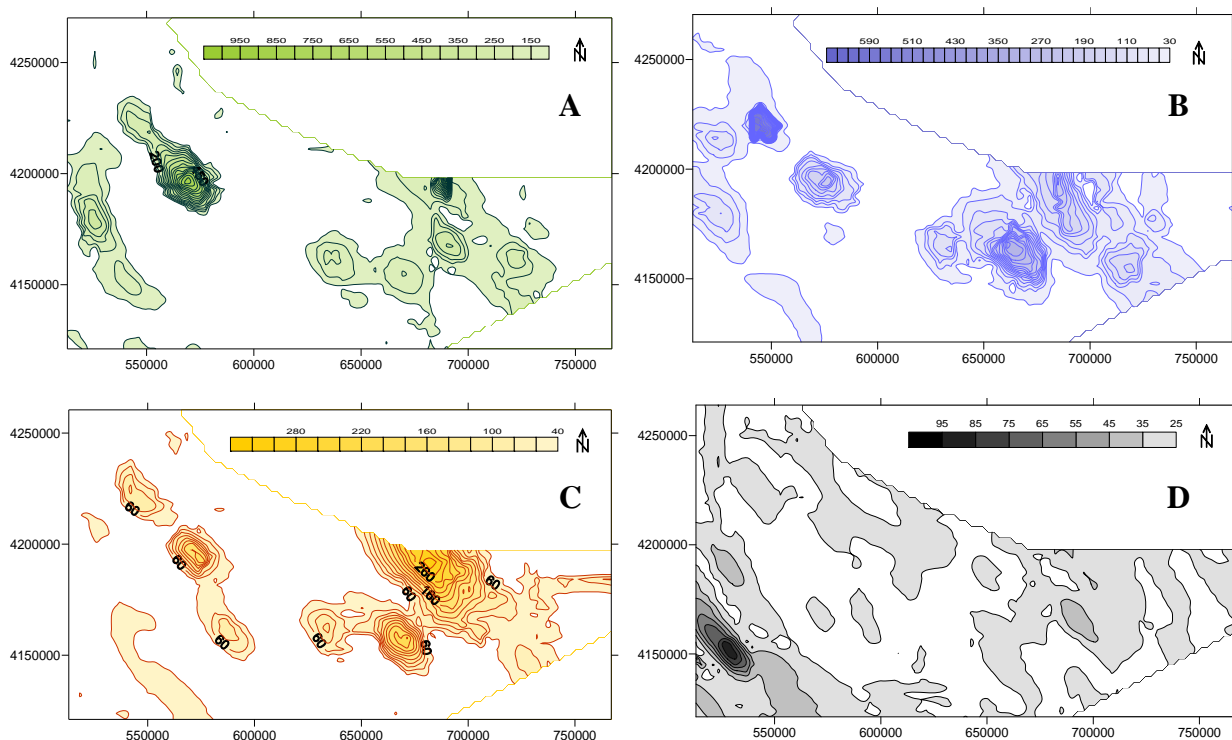
As principais anomalias de Pb (Fig. 4B) localizam-se também ao longo do eixo Caveira-Lousal-Aljustrel, mas agora centradas sobre as duas extremidades; a anomalia mais intensa, com valor máximo igual a 604 ppm, sobrepõe-se ao couro mineiro de Caveira. No domínio E da FPI identificam-se, igualmente, outras anomalias, embora menos intensas e cobrindo uma área mais vasta; a anomalia que encerra os maiores valores de concentração justapõe-se às mineralizações do sector norte e este do anticlinal de Puebla de Gusmán, representadas respectivamente pelas minas de Cabezas de Pasto, Herrerias, Lagunazo e Tharsis.

As anomalias de Cu (Fig. 4C) seguem de perto as de Pb. No domínio NW da FPI, a anomalia de Cu mais intensa posiciona-se sobre a área envolvente de

Aljustrel. Em Espanha, as concentrações mais elevadas em Cu voltam a sobrepor-se aos sectores norte e este do anticlinal de Puebla de Guzmán, muito embora as anomalias localizadas a NNE e associadas às minas de San Telmo e La Zarza sejam dignas de nota. Tendo em conta que se tratam de sedimentos de corrente e que, no sector transfronteiriço e espanhol da FPI, os principais cursos de água fluem de norte para sul, é de considerar a dispersão de sedimentos neste sentido. Também não é de excluir eventuais anomalias associadas a formações geológicas da Zona de Ossa Morena, situadas a norte da região estudada. Anomalias em Cu de menor intensidade delimitam as áreas hospedeiras de estruturas filonianas mineralizadas, como Brancanes e Porteirinhos em Portugal e La Ratera em Espanha. A única anomalia em Co digna de referência apresenta anisotropia NW-SE vincada e circunscreve-se

a uma área na região de Odemira, localizada a SW da FPI (Fig. 4D). Esta anomalia sobre põe-se claramente à Formação de Mira, de origem sedimentar e inserida no Grupo *Flysch* do Baixo Alentejo (e.g. Oliveira *et al.* 2006). Nesta região ocorrem vários filões doleríticos com extensão e espessura variável que se dispõem ao longo de zonas de falha NNE-SSW, sendo síncronos do grande filão da Messejana; localmente, os filões são cortados por falhas de direcção NW-SE (Ribeiro *et al.*, 1987). Não se conhecem mineralizações cobaltíferas nesta área, muito embora se identifiquem algumas ocorrências epigenéticas e filonianas sem valor económico com Cu (Gomesianas e Horta do Açoreiro) ou Pb (Torgal) dominantes (Matos e Rosa, 2001). Importa, pois, proceder à investigação detalhada desta anomalia de Co, confirmando-a ou infirmo-a.

Fig. 4: Isolinhas de concentração para o Zn (A), Pb (B), Cu (C) e Co (D); escala em ppm e coordenadas UTM

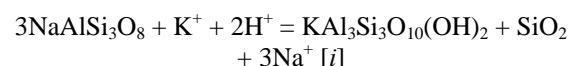


#### 4. Índices de alteração / mineralização

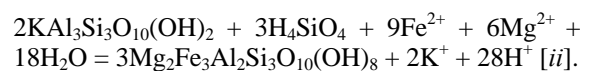
Com o propósito de caracterizar em termos geoquímicos o padrão de alteração hidrotermal de rochas vulcânicas associadas a massas de sulfuretos maciços e distinguir esta da alteração diagenética, Large *et al.* (2001) sugeriram uma representação gráfica que projecta o índice de alteração (AI) *versus* e o índice de clorite – carbonato – pirite (CCPI). O índice AI é dado pela razão de concentrações seguinte:

$$AI = \frac{100(K_2O + MgO)}{(K_2O + MgO + Na_2O + CaO)}$$

Este índice quantifica a intensidade de cloritização e sericitização que, na sua essência, se expressam pelas reacções seguintes, respectivamente:



e



A substituição da albite por sercite ([i]) tipifica ambientes distais à descarga hidrotermal minerali-

zante, enquanto a cloritização ([ii]) caracteriza domínios proximais. A reacção [i] envolve perda de  $\text{Na}_2\text{O}$  e ganho de  $\text{K}_2\text{O}$ , enquanto a reacção [ii] traduz perda de  $\text{K}_2\text{O}$  e ganho de  $\text{FeO}$  e  $\text{MgO}$ ; em ambos os casos,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  permanece constante. A utilização *per se* do índice AI enferma de várias limitações, desde logo porque não toma em consideração a neoformação de carbonatos, nem permite separar os domínios com alteração clorítica ou sericitica dominantes; justifica-se assim a necessidade de introduzir o índice CCPI, obtido pela razão de concentrações seguinte:

$$\text{CCPI} = \frac{100(\text{MgO} + \text{FeO})}{(\text{MgO} + \text{FeO} + \text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O})}$$

O índice CCPI, mais adequado à caracterização de ambientes próximos à descarga hidrotermal mineralizante, traduz o aumento em  $\text{MgO}$  e  $\text{FeO}$  resultante da cloritização e a perda de  $\text{Na}_2\text{O}$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , tal como indica a equação [ii]. A sua utilização *per se* apresenta, contudo, uma importante limitação, mercê da sensibilidade revelada à variação composicional primária das rochas vulcânicas em função do seu grau de diferenciação (para discussão cuidada do assunto veja-se Large *et al.*, 2001).

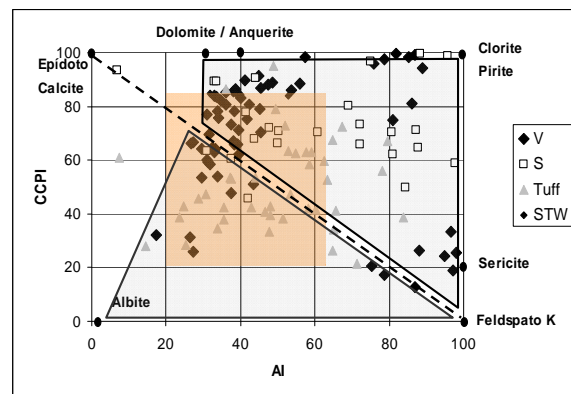
#### 4.1 Formações geológicas constituintes da FPI

Tentando perceber as tendências gerais de composição manifestadas pelas rochas constituintes das principais formações geológicas da região em estudo, interpretando-as à luz de transformações mineralógicas síncronas de alteração diagenética ou hidrotermal/mineralizante, projectaram-se vários conjuntos de dados geoquímicos em gráficos AI – CCPI (Fig. 5); para o efeito utilizaram-se análises de referência listadas em Barriga (1983), Munhá (1981), Carvalho *et al.* (1999) e Relvas (2000).

Os resultados obtidos permitem concluir que: (1) as rochas de natureza vulcânica definem várias tendências geoquímicas, em boa medida traduzindo efeitos imputáveis ao contraste composicional estabelecido entre a rocha e o fluido com que interactuou, bem como a diferentes razões água/rocha (os metavulcanitos máficos revelam tendência no sentido da carbonatização; os de carácter félsico registam tendência para a sericitização forte, potassificação moderada e albitização incipiente); (2) o conjunto indiferenciado de rochas metavulcânicas que se confinam ao domínio de alteração forte/extrema (denunciado por cloritização ou piritização intensa) representa situações adjacentes a mineralização; (3) as rochas metavulcanoclásticas apresentam tendências quer no sentido da alteração diagenética (potassificação e albitização), quer no sentido da alteração hidrotermal (cloritização); e (4) as rochas metassedimentares evidenciam tendência mal definida (decorrente do número reduzido de amostras?) no sentido da serici-

zitação e cloritização. Daqui se deprende que, independentemente da composição original da rocha, existem duas tendências geoquímicas fundamentais: uma hidrotermal (por vezes também mineralizante), denunciada por valores AI e CCPI que se projectam para a direita da diagonal do gráfico patente na Fig. 5; outra que traduz o efeito conjugado da diagénese e metassomatismo oceânico, revelada por índices AI e CCPI que se projectam para a esquerda da diagonal do gráfico referido.

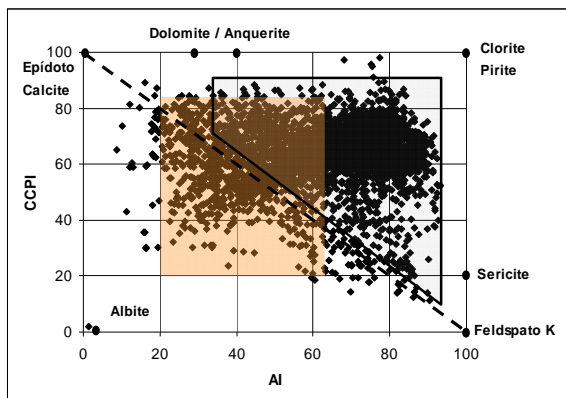
**Fig. 5:** Tendências geoquímicas apresentadas por metavulcanitos (V), metassedimentos (S) e metavulcanoclásticas (Tuff e STW) da FPI, discriminadas em função dos índices AI e CCPI. Composições globais influenciadas por actividade hidrotermal significativa posicionam-se à direita da diagonal; as que traduzem modificações ocorridas durante a diagénese e metassomatismo oceânico situam-se predominantemente à esquerda da diagonal. Composições incólumes ou incipientemente modificadas circunscrevem-se ao rectângulo rosado. Para referência, projectam-se ainda as composições ideais dos minerais que, usualmente, transcrevem estas transformações.



#### 4.2 Sedimentos de corrente

Admitindo que as formações geológicas da Zona Sul Portuguesa representam a principal fonte dos sedimentos de corrente colhidos nas 4230 estações consideradas, calcularam-se os índices AI e CCPI para estes últimos (Fig. 6). Nesta base, verifica-se que parte significativa dos sedimentos de corrente analisados denuncia tendências de alteração hidrotermal moderada a forte; a ausência de valores extremos sugere a inexistência de fontes sedimentares próximas a massas de sulfuretos maciços (*i.e.* a erosão de domínios rochosos adjacentes a minérios não constitui fonte preponderante dos sedimentos de corrente amostrados). Muitas das amostras analisadas marcam também tendências composicionais herdadas de processos metassomáticos/diagenéticos distintos dos que se associam à metalogénese, nomeadamente, tendência para a potassificação e albitização.

Fig. 6: Tendências geoquímicas apresentadas pelos sedimentos de corrente colhidos na Zona Sul Portuguesa.



#### 4.3 Distribuição espacial dos índices AI e CCPI

A representação espacial dos índices de alteração AI (Fig. 7) e CCPI (Fig. 8) para os sedimentos de corrente toma apenas os valores superiores a 60, pois só a partir destes é possível definir sem grande ambiguidade a importância relativa dos efeitos resultantes da alteração hidrotermal. A interpolação entre pontos amostrados com AI e CCPI > 60 foi realizada com base na técnica de *kriging* ordinário.

Fig. 7: Distribuição espacial de AI > 60.

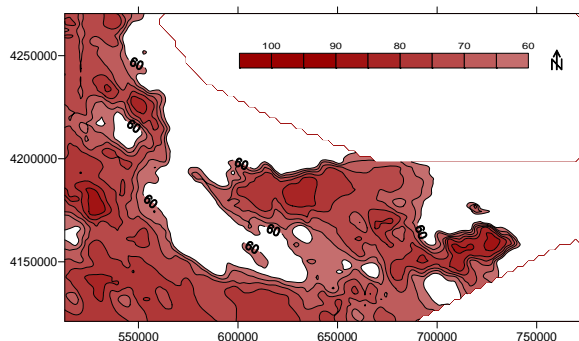
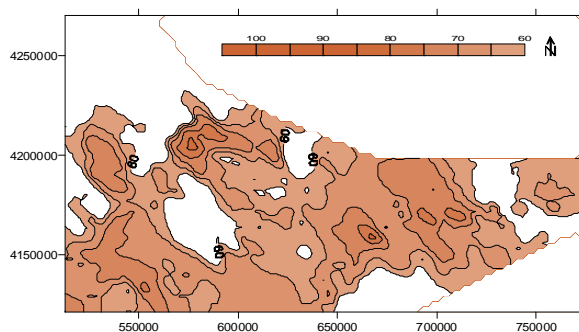


Fig. 8: Distribuição espacial de CCPI > 60.



Em termos gerais verifica-se, uma vez mais, a existência de uma boa correspondência entre áreas anómalas (com AI e CCPI > 80) e domínios aflorantes das unidades lito-estratigráficas que compõem a FPI,

com particular destaque para o CVS. Uma análise interpretativa mais detalhada pode, contudo, ser realizada tomando a distribuição espacial admitida pelo índice CCPI, uma vez que este caracteriza melhor as tendências geoquímicas denunciadoras de alteração hidrotermal mineralizante (aumento de MgO e FeO como consequência da abundância relativa de clorite e/ou pirite). Com efeito, o mapa patente na Fig. 8 permite distinguir duas áreas francamente anómalas de entre as que apresentam valores CCPI relativamente elevados: uma a NW e outra a E da região amostrada, tal como nas distribuições espaciais de concentração em Zn, Pb e Cu. Na área a NW ocorrem duas anomalias com índice CCPI elevado: a que se posiciona mais a Norte tem direcção de anisotropia NW-SE e sobrepõe-se, grosso modo, à área de Lousal-Caveira; a outra, sem direcção de anisotropia evidente, corresponde sensivelmente à área de Aljustrel. No sector espanhol da região amostrada, as anomalias definidas pela projecção do índice CCPI apresentam maior dispersão e cobrem uma área mais vasta; em termos gerais, contudo, elas justapõem-se à área hospedeira das mineralizações associadas ao CVS da estrutura de Puebla de Guzmán (sectores norte e este) e do alinhamento Calañas – Zalamea – Rio Tinto – Rio Jarama.

#### 5. Discussão

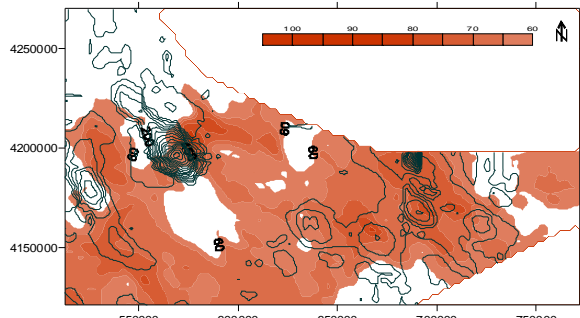
Os resultados obtidos são bastante animadores quanto à possibilidade de utilizar em prospecção mineral as composições químicas totais dos sedimentos de corrente, desde que se salvaguardem os necessários cuidados no tratamento das várias distribuições de concentração elementar. Não se afigura, pois, mera coincidência o facto das anomalias definidas para o Zn, Pb e Cu revelarem fortes consistências entre si e, em conjunto, justaporem-se às áreas que hospedam os principais sistemas mineralizantes da FPI. Esta correspondência espacial é também verificada para as projecções dos valores admitidos pelos índices AI e CCPI, sugerindo que também estes podem ser usados na caracterização de sedimentos de corrente em campanhas de prospecção direccionadas para jazigos de sulfuretos maciços. Neste caso, porém, o índice CCPI parece ser o que melhor discrimina as áreas (-fonte de sedimentos) afectadas por alteração hidrotermal pronunciada (eventualmente acompanhada por mineralização). A análise conjugada da distribuição espacial do índice CCPI e dos mapas geoquímicos para os diferentes metais (Figs. 9 a 12) merece, contudo, alguns comentários.

Com excepção do Co, a sobreposição entre valores CCPI elevados e as anomalias apresentadas pelos restantes metais em apreço revela-se mais precisa no domínio oriental da região amostrada. Efectivamente, na área envolvente de Aljustrel, a distribuição de concentração para o Zn, Pb e Cu desloca-se ligeiramente para SW, em relação à área que apresenta

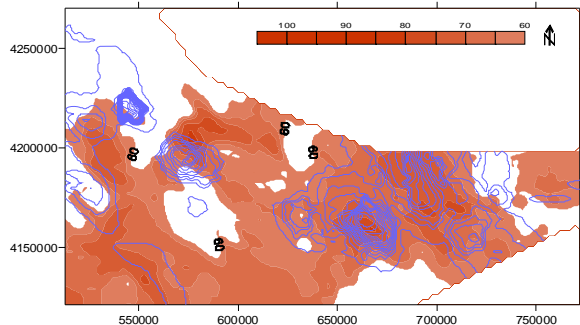


maior valor CCPI. Enquanto que, para a área de Lousal-Caveira, as distribuições de concentração nos diversos metais, desloca-se para NE da área que apresenta maior valor daquele índice.

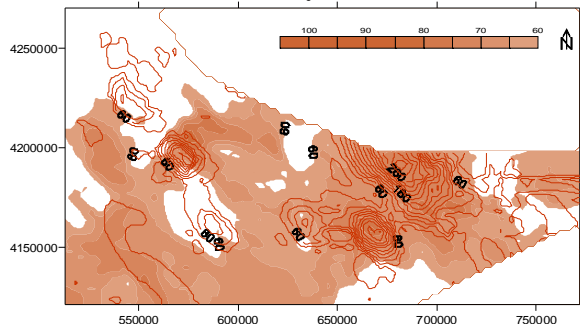
**Fig. 9:** Distribuição espacial do índice de alteração CCPI e isolinhas de concentração em Zn.



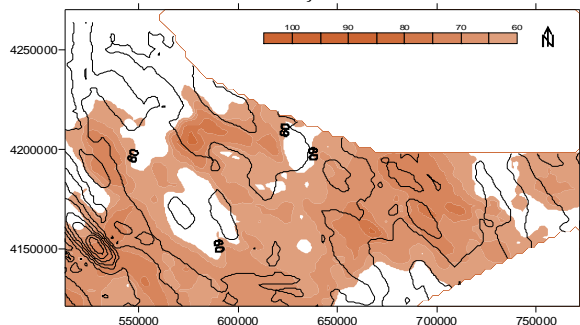
**Fig. 10:** Distribuição espacial do índice de alteração CCPI e isolinhas de concentração em Pb.



**Fig. 11:** Distribuição espacial do índice de alteração CCPI e isolinhas de concentração em Cu.



**Fig. 12:** Distribuição espacial do índice de alteração CCPI e isolinhas de concentração em Co.



Tal reflecte em parte o padrão de drenagem destes sítios mineiros, assim como a distribuição de resíduos mineiros aí observada. Na área de Cercal, as concentrações anómalas em Zn e Pb distribuem-se por uma área com valores CCPI < 60. Ocorrem ainda áreas com valor CCPI elevado, tanto a NE como a SE, não sendo possível identificar (sem o estudo detalhado da rede de drenagem) qual o sentido de deslocação das distribuições de concentração metalífera relativamente à distribuição espacial do índice CCPI. Ainda assim, a justaposição obtida pode ser considerada aceitável e positiva, tendo em conta: (1) a natureza da rede de amostragem; (2) o tipo de materiais analisados e as ambiguidades intrinsecamente relacionadas com a localização das fontes que lhes deram origem; e (3) as incertezas inerentes quer à análise química, quer ao tratamento estatístico dos seus resultados.

## 6. Conclusões

As distribuições espaciais de valores de concentração elementar em sedimentos de corrente podem ser utilizadas com sucesso em prospecção mineral desde que se observem uma série de requisitos. A abordagem proposta no presente trabalho, envolvendo a caracterização estatística usual das distribuições de concentração, recomenda a determinação objectiva dos valores de fundo regional (e local) com base no estudo prévio do seu comportamento multifractal. Estes balizam inferiormente as classes de valores excepcionais, cuja distribuição espacial poderá conduzir à delimitação de áreas anómalas. O procedimento a adoptar nesta delimitação envolve o exame prévio do respectivo variograma, *i.e.* a análise da semi-variância em função das distâncias entre pontos amostrados (ou, por outras palavras, a análise da continuidade espacial da variável regionalizada [concentração] através das diferenças entre os valores medidos em diferentes pontos). Nesta análise, todos os pares possíveis são examinados; quando a distância entre pares é pequena, os pontos sob comparação são muito semelhantes, pelo que o valor da semi-variância é reduzido (efeito de pepita); à medida que aumenta a distância entre os pontos sob comparação, maior é a semi-variância, até que, a partir de determinada distância (alcance), esta estabiliza num determinado valor (patamar) que é igual à variância dos dados da amostragem, significando que já não existe correlação entre os pares de dados considerados para aquela distância. Uma vez demonstrada a existência de correlação espacial entre os valores de concentração, a produção de mapas geoquímicos segue uma rotina comum de interpolação (*kriging*), assumindo que a distância entre pontos da amostragem pode ser usada na explicação da variação no espaço.

A abordagem ao problema foi testada com sucesso na Zona Sul Portuguesa, recorrendo à análise das distribuições de concentração em Cu, Zn, Pb e Co apresentados por sedimentos de corrente colhidos em 4230 estações. Estas distribuições são heterogêneas e assimétricas, e apresentam comportamento multifractal. Os valores de fundo regional obtidos a partir do estudo das variações “log área versus log concentração” são  $45 \pm 1$  ppm,  $8 \pm 3$  ppm,  $16 \pm 1$  ppm e 17 ppm para o Zn, Pb, Cu e Co, respectivamente. Os valores de fundo local, embora mais imprecisos, cifram-se em  $455 \pm 100$  ppm para o Zn e  $83 \pm 3$  ppm para o Co, posicionando-se entre 1921 e 2465 ppm para o Pb e em torno de 1059 ppm para o Cu. Os variogramas obtidos para as diferentes distribuições de concentração revelam ajustamento aceitável ao modelo *Wave*; todas as distribuições apresentam forte anisotropia com direcção azimutal  $130^\circ$ - $135^\circ$  e razão axial variável entre 2.2 e 2.5. Os mapas de isoconcentração traçados apresentam várias anomalias que, em regra, se sobrepõem a áreas hospedeiras de sistemas mineralizantes conhecidos da FPI, com excepção do Co que apresenta uma única anomalia a SW daquela faixa mineira.

As principais formações geológicas da FPI revelam dois grandes grupos de tendências geoquímicas que, independentemente da natureza original da rocha, transcrevem efeitos conjugados de metassomatismo oceânico e diagénese ou de actividade hidrotermal. Parte significativa dos sedimentos de corrente analisados denuncia tendências de alteração hidrotermal moderada a forte; muitos registam também tendências composicionais herdadas de processos diagenéticos/metassomáticos. A projecção espacial dos valores AI e CCPI obtidos em conjunto com os mapas geoquímicos delimita áreas hospedeiras das mineralizações que tipificam a FPI.

#### Agradecimentos

São devidos agradecimentos a Mário A. Gonçalves (FCUL) pelo apoio no processamento de dados. O presente trabalho é uma contribuição do projecto METALTRAVEL (POCI/CTE-GEX/61700/2004).

#### Referências bibliográficas

Barriga, F.J.A.S. (1983). Hydrothermal metamorphism and ore genesis at Aljustrel, Portugal. PhD Thesis, Univ. Western Ontario, Ontario, Canada.

Carvalho D., Barriga F.J.A.S., Munhá J. (1999). Bimodal-Siliciclastic Systems - The Case of the Iberian Pyrite Belt In: Barrie T., Hannington M. (eds.) Volcanic-Associated Massive Sulfide Deposits: Processes and Examples in Modern and Ancient Settings. *Reviews in Econ. Geol.* 8: 375-408.

Cheng Q., Agterberg F.P., Ballantyne S.B., (1994). The separation of geochemical anomalies from background by

fractal methods. *Journal of Geochemical Exploration*; 51: 109 - 130

Gonçalves M.A., (2001). Characterization of Geochemical distribution using multifractal models. *Mathematical Geology*; 33, 1: 41 – 62

Halsey T.C., Jensen M.H., Kadanoff L.P., Procaccia I., Shraiman B.I. (1986). Fractal measures and their singularities: the characterization of strange sets. *Phys. Rev. A.*, 32(2): 1141-1151.

Large R.R., Gemmel B., Paulick H. (2001). The alteration box plot: A simple approach to understanding the relationship between alteration mineralogy and litho-geochemistry associated with volcanic-hosted massive sulfide deposits. *Econ. Geol.* 96 (5): 957 – 971.

Leistel J.M., Marcoux E., Thiéblemont D., Quesada C., Sánchez A., Almodóvar G.R., Pascual E., Sáez R. (1998). The volcanic-hosted massive sulphide deposits of the Iberian Pyrite Belt. *Mineral. Deposita* 33: 2-30.

Matos J.X., Rosa C. (2001). Diagnóstico preliminar de minas abandonadas – área Sul. *Rel. Int. IGM*, Lisboa.

Matos, J.X.; Martins, L. (2006) Reabilitação ambiental de áreas mineiras do sector português da Faixa Piritosa Ibérica: estado da arte e perspectivas futuras. IGME, *Bol. Geol. y Min. España*, 117(2): 289-304.

Moon C.J., Whateley M.K.M., Evans A.M. (2006). Introduction to mineral exploration. Blackwell Publishing Ltd, Oxford.

Munhá J. (1981). Igneous and metamorphic petrology of the Iberian Pyrite Belt volcanic rocks. PhD Thesis Univ. Western Ontario, Ontario, Canada.

Oliveira, J.T.; Relvas, J.M.R.S.; Pereira, Z.; Matos, J.X.; Rosa, C.J.; Rosa, D.; Munhá, J.M.; Jorge, R.C.G.S.; Pinto, A.M.M. (2006) O Complexo Vulcano-Sedimentar da Faixa Piritosa: estratigrafia, vulcanismo, mineralizações associadas e evolução tectonoestratigráfica no contexto da Zona Sul Portuguesa. In Dias R, Araújo A., Terrinha P, e Kulberg JC (eds.), *Geologia de Portugal no contexto da Ibéria*, Univ. Évora, Portugal: 207-244.

Oliveira, J.S. (1997) – Algumas reflexões com enfoque na problemática dos riscos ambientais associados à actividade mineira. *Est. Not. Trab. IGM*, t. 39, pp.3-26.

Ribeiro A., Oliveira J., Ramalho M., Ribeiro M.L., Silva L. (1987). Notícia explicativa da folha 48–D, Bordeira, Carta Geológica de Portugal, 1:50000. Serviços Geológicos de Portugal, Lisboa.

Relvas J. (2000). Geology and metallogenesis at the Neves Corvo deposit, Portugal. Dissertação de Doutoramento, Univ. de Lisboa, Lisboa, Portugal.