

AValiação DE RESERVAS POR MÉTODOS COMPUTACIONAIS: UM ESTUDO DE CASO NA MINA DE CANOAS 2 (PR) *

RITA PARISI CONDE** & JORGE KAZUO YAMAMOTO**

ABSTRACT ORE RESERVE ESTIMATION BY COMPUTATIONAL METHODS: A CASE STUDY IN CANOAS 2 MINE (PR) Ore reserves of Pb, Zn, and Ag were estimated for the Canoas 2 mine (State of Paraná), using computational methods: inverse weighted distance adapted for block estimation and ordinary kriging. They were applied to diamond drill core samples averaged for the mineralized zone in order to compute the reserves and grades of Pb, Zn, and Ag. The same parameters for neighborhood and quadrant search were applied to estimate the blocks by each method. The results for reserves and grades were very similar for both methods. Hence, the method of inverse weighted distance for block estimation produces results very close to those obtained by ordinary kriging, showing that the former is a valid approximation for ore reserve estimation and that the fitted spherical semivariogram is consistent with this deposit.

Keywords: Inverse weighted distance, Ordinary Kriging, Geostatistics, Ore reserve evaluation, Canoas 2 mine

RESUMO Reservas minerais de Pb, Zn e Ag da Mina de Canoas 2 (Estado do Paraná) foram estimadas usando métodos computacionais; inverso da potência da distância adaptado para avaliação de blocos e krigagem ordinária. Estes métodos foram aplicados em amostras de testemunhos de sondagem a diamante, compostos para o intervalo mineralizado, a fim de calcular as reservas e os teores de Pb, Zn e Ag. Os mesmos parâmetros para vizinhança e pesquisa por quadrante foram aplicados para estimar os blocos pelos métodos citados. Assim, o método do inverso da potência da distância para avaliação de blocos produz resultados muito próximos àqueles obtidos pela krigagem ordinária, mostrando que o primeiro método é uma aproximação válida para avaliação de reservas e que o semivariograma esférico ajustado é compatível com este depósito.

Palavras-chave: Inverso da Potência da Distância, Krigagem Ordinária, Geoestatística, Avaliação de Reservas, Mina de Canoas 2.

INTRODUÇÃO Este trabalho apresenta um estudo comparativo entre os métodos computacionais comumente empregados em avaliação de reservas: inverso da potência da distância e geoestatístico (krigagem ordinária). Tais métodos baseiam-se na determinação de teores em pequenas unidades do depósito, denominadas blocos de cubagem. Portanto, o depósito é dividido em blocos de cubagem, de dimensões compatíveis com a densidade de informações, os quais compõem o modelo tridimensional de blocos de jazida. Os métodos computacionais são empregados no cálculo do teor médio associado ao bloco de cubagem. Assim, calculado o teor médio determina-se a reserva do bloco de cubagem. Repetindo-se o procedimento para todos os blocos e integrando-se os resultados obtém-se a reserva procurada.

Para fins de comparação de resultados entre os métodos computacionais, estes foram aplicados ao cálculo de reservas de Pb, Zn e Ag da Mina de Canoas 2, município de Adrianópolis, PR.

MÉTODOS COMPUTACIONAIS O método da ponderação pelo inverso da potência foi efetivamente o primeiro desenvolvido para utilização em computadores, já que envolve operações aritméticas difíceis de processar manualmente.

Os métodos geoestatísticos de estimativa foram desenvolvidos na década de 70 e são genericamente denominados de krigagem. Tais métodos baseiam-se na Teoria das Variáveis Regionalizadas.

Método da Ponderação pelo Inverso da Potência da Distância (IPD) Este método foi, seguramente, o primeiro método analítico para interpelação de valores de variáveis de interesse em pontos não amostrados. Segundo Philip & Wat-

son (1987), este método foi descrito pela primeira vez por Weaver (1964). É amplamente utilizado para interpelação de malhas regulares, para fins de contorno automático de dados geológicos. Os programas comerciais mais recentes de avaliação de reservas incluem o método da ponderação pelo inverso da potência, juntamente com a krigagem ordinária.

Este método é baseado no fato que teores de amostras de furos vizinhos em relação a um determinado ponto ou bloco do depósito, são proporcionais ao inverso das respectivas distâncias elevadas a uma potência. Assim, para efeito de avaliação de reservas, o teor médio (ou qualquer outra variável) de um bloco é calculado por interpelação, a partir dos valores obtidos na sua vizinhança. Portanto, amostras de furos próximos contribuirão com grande peso, em detrimento das amostras de furos distantes, com peso pequeno. A equação geral para interpelar o teor de um ponto ou bloco do depósito no sistema de coordenadas (x, y, z) é:

$$T = \frac{\sum_{i=1}^n T_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$

onde:

T_i é o teor da i -ésima amostra localizada no ponto (x_i, y_i, z_i) ; w_i é o ponderador igual ao inverso de uma potência da distância entre a i -ésima amostra e o ponto a ser interpelado; n é o número de pontos do subconjunto.

* Desenvolvido com apoio da FAPESP (Processos nº 92/1460-7 e 92/1459-9)

** Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Caixa Postal 11348, CEP 05422-970, São Paulo, SP, Brasil, Fax (011) 818-4207, e-mail: rconde@usp.br e jkyamamo@usp.br

O ponderador w_i é calculado como:

$$W_i = \frac{1}{d_i^p} \quad (2)$$

onde:

p é a potência;
 d_i é a distância entre a i -ésima amostra de coordenadas (x_i, y_i, z_i) e o ponto a ser estimado com coordenadas (x, y, z) .

A distância d_j é calculada como:

$$d_i = \left[(x_i - x)^2 + (y_i - y)^2 + (z_i - z)^2 \right]^{1/2} \quad (3)$$

Portanto, a primeira decisão a tomar é a escolha da potência. Sabe-se que potência baixa tende a suavizar os valores extremos, enquanto a elevada, tende a realçá-los.

A figura 1, reproduzida de Barnes (1980), ilustra como atua a potência da distância na interpelação de teores entre dois pontos adjacentes de amostragem. Observa-se que com o aumento da potência da distância, a interpelação de teores entre dois pontos passa do princípio das mudanças graduais ($p=1$) para o princípio dos pontos mais próximos ($p>10$). Assim, sugere-se o uso de uma potência igual a dois, pois esta produz uma interpelação intermediária entre os princípios das mudanças graduais e dos pontos mais próximos.

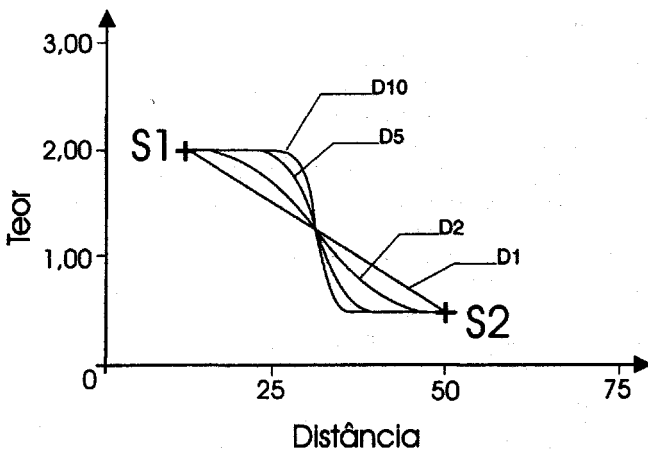


Figura J - Efeito da função do inverso da potência da distância na interpelação de teores entre dois pontos adjacentes de amostragem, segundo Barnes (1980).

Figure 1 -Effect of inverse of weighted distance function for grade interpolation between two sampling points, after Barnes (1980).

Com relação ao número de amostras de furos vizinhos recomenda-se não utilizar um número excessivamente pequeno, com o risco da interpolação resultar em valor semelhante ao do ponto mais próximo e, nem excessivamente grande, com o risco da interpolação resultar num valor bastante suavizado, semelhante ao teor médio do depósito. Frequentemente, utiliza-se de 4 a 8 amostras, com a ressalva de que as distâncias envolvidas sejam analisadas amostra a amostra, evitando assim a utilização de amostras muito distantes do ponto a ser interpelado, visto que pouco contribuíram na interpolação, mesmo que exista alguma correlação geológica.

A ponderação pelo inverso da potência da distância pode ser utilizada tanto para estimar pontos, como blocos, na avaliação de reservas.

Na avaliação pontual, os blocos de lavra ou de cubagem são estimados em relação ao centro dos mesmos, o que causa um problema, pois a característica encontrada no centro do bloco é estendida para todo o domínio, acompanhada de um erro de estimativa proporcional ao tamanho do bloco. Além disso, no caso particular de uma malha regular de sondagem, com blocos de lavra centrados nos furos de sondagem, o resultado não diferirá daquele da aplicação do método dos polígonos, com o mesmo problema de superestimação de reservas, quando os teores são altos, e na subestimação, quando os teores são baixos.

Assim, Yamamoto (1996) propõe a adaptação deste método para avaliação de blocos, para evitar os problemas de enviesamento dos resultados da utilização do inverso da potência da distância na avaliação de blocos de reservas. Esta adaptação foi baseada no princípio da krigagem de bloco, ou seja, o bloco é subdividido em pequenos subblocos, para os quais os ponderadores são determinados e depois compostos para o bloco original, como descreve-se a seguir:

O teor médio associado ao bloco é calculado como:

$$T = \sum_{i=1}^n T_i \cdot \bar{w}_i \quad (4)$$

onde: \bar{w}_i é a média dos ponderadores entre a i -ésima amostra e todos os subblocos.

O bloco deve ser subdividido em nsb subblocos, observando os máximos recomendados por Journel & Huijbregts (1978, pág.97).

Inicialmente os ponderadores para as n amostras são calculados para cada subbloco, ou seja, para o k -ésimo subbloco tem-se:

$$W_{i,k} = \left[(1/d_{i,k}^p) / \left(\sum_{j=1}^n 1/d_{j,k}^p \right) \right], \quad \text{para } i=1, n \quad (5)$$

Observe-se que os pesos calculados conforme a equação (5), já são normalizados, i.e. a soma dos pesos é igual a um.

A distância entre a i -ésima amostra e o k -ésimo subbloco é computada como:

$$d_{i,k} = \left[(x_i - xb_k)^2 + (y_i - yb_k)^2 + (z_i - zb_k)^2 \right]^{1/2} \quad (6)$$

O ponderador médio da i -ésima amostra pode ser calculado como a média aritmética do i -ésimo peso em todos os nsb subblocos, como segue:

$$\bar{w}_i = \sum_{k=1}^{nsb} W_{i,k} / nsb \quad (7)$$

Métodos Geoestatísticos Os métodos geoestatísticos de avaliação de reservas, ou simplesmente geoestatística, foram desenvolvidos graças aos estudos do engenheiro de minas Georges Matheron, na França, no final da década de 50 e início da década de 60. Estes métodos estão fundamentados na Teoria das Variáveis Regionalizadas, formalizada por Matheron, a partir de estudos práticos desenvolvidos por Daniel G. Krige no cálculo de reservas nas minas de ouro do Rand, África do Sul.

A geoestatística é a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos a problemas da Ciências da Terra e pode ser

utilizada em diversas áreas, tais como: geologia pura (análise de elementos traços em rochas metamórficas), pesquisa mineral (análise de dados geoquímicos de pesquisa), para traduzir a geologia para modelos usados em engenharia, determinação do tipo de amostragem, estimativa espacial e temporal, simulação, e na análise de riscos e quantificação de reservas (Annels 1991).

O procedimento para utilização da geoestatística na estimativa de reservas de um depósito mineral pode ser dividido em duas partes (Clark 1979): (1) investigação e modelagem de uma estrutura física e estatística de um corpo mineral pela construção de semi-variograma; (2) processo de estimativa - krigagem - que depende inteiramente dos semi-variogramas da etapa anterior.

O cálculo de um teor médio para um bloco da jazida, a partir dos dados de teores obtidos nos furos de sondagem, é um problema de estimativa que usa as informações dos pontos vizinhos, considerando não somente os teores, mas também a posição espacial relativa dos mesmos. A krigagem proporciona uma estimativa linear ótima, bem como o cálculo da variância ou erro de krigagem.

Como todas as técnicas estatísticas, a geoestatística baseia-se em conceitos probabilísticos. As técnicas da estatística clássica assumem que todas as amostras são aleatórias e independentes de uma distribuição de probabilidade simples. Esta suposição é chamada estacionaridade. Sua aplicação não envolve conhecimento da posição atual das amostras ou da relação entre amostras, que pode ser uma informação valiosa no quadro global do depósito (Clark 1979).

Ainda segundo essa autora, a geoestatística assume que a distribuição das diferenças nos teores entre dois pontos amostrados é a mesma para todo o depósito, e depende somente da distância entre eles e da orientação dos pontos. Em outros termos, diferenças nos teores do depósito devem ser consistentes, não constantes, ou seja, hipótese intrínseca ou quase-estacionariedade.

Segundo Royle (1979), os principais argumentos para o uso dos métodos geoestatísticos são:

- a geoestatística é completamente baseada na prática de boa avaliação fundamentada em uma teoria racional, em vez de uma avaliação mineira intuitiva praticada anteriormente;
- reconhecimento de que a variação total é parte aleatória, e parte espacial, conduzindo a estimativas que não são enviesadas, e com pequenos erros de estimativa;
- a geoestatística explica por que alguns tipos tradicionais de estimador, como o método dos polígonos, produzem resultados enviesados e que podem ser removidos pelo uso de outros tipos de estimadores (krigagem).

O variograma é a ferramenta básica e permite descrever quantitativamente a variação espacial de um fenômeno regionalizado (Huijbregts 1975), e é uma função que expressa o grau de continuidade de uma variável regionalizada.

A natureza estrutural de um conjunto de dados, assumida pela variável regionalizada, é definida a partir da comparação de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção.

Pontos mais próximos estarão normalmente mais correlacionados que os mais distantes. Em geoestatística, se os pontos são muito correlacionados, a variância das diferenças será menor e vice-versa, e é uma medida da influência de amostras em áreas da vizinhança no depósito. Esta variância quando representada graficamente em função da distância, dá origem ao variograma. A notação matemática para a função variograma é $2\gamma(h)$ e $\gamma(h)$ para a função semivariograma, embora muitos autores denominem esta última simplesmente como função variograma (Clark 1979).

A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos no espaço, separados por uma distância h (Fig. 2), conforme a seguinte equação:

$$2\gamma(h) = E\{[Z(x+h) - Z(x)]^2\} \quad (8)$$

ou em termos computacionais:

$$2\gamma(h) = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n [Z(x+h) - Z(x)]^2 \quad (9)$$

onde:

$2\gamma(h)$ é a função variograma;

n é o número de pares de pontos separados por uma distância h ;

$Z(x+h)$ é o valor da variável regionalizada no ponto $(x+h)$;

$Z(x)$ é o valor da variável regionalizada no ponto x .

A função variograma $2\gamma(h)$ pode ser expressa em termos da variância $C(0)$ e da covariância $C(h)$:

$$\gamma(h) = C(0) - C(h) \quad (10)$$

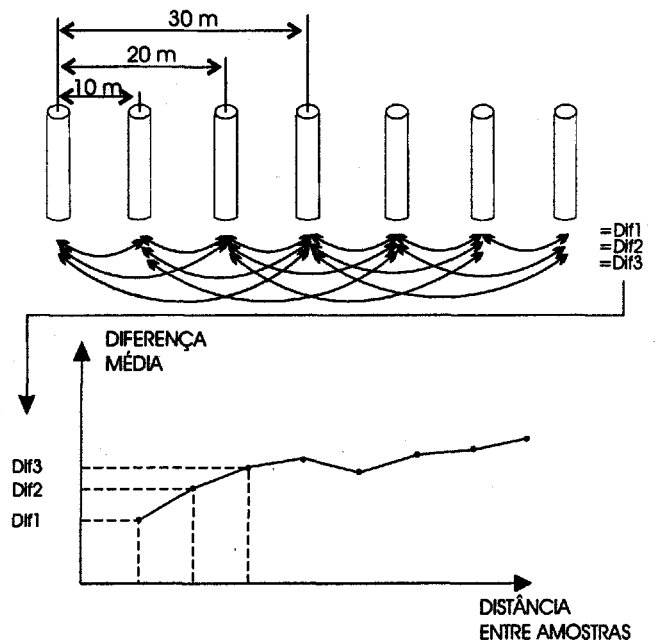


Figura 2 - Esquema de formação dos pares de pontos para elaboração do semivariograma.

Figure 2 - Scheme for finding the sample pairs for semivariogram computation.

Técnicas de estimativa como o IPD (Inverso da Potência da Distância), usam um ponderador médio de valores de amostras para estimar blocos de um depósito. Os ponderadores são uma função do bloco e da geometria da amostragem em relação ao mesmo, bem como de algumas idéias sobre a variação no depósito mineral, mas eles não fazem referência para a variabilidade particular do corpo mineral em estudo. Mais ainda, essas técnicas não permitem uma determinação da confiabilidade das estimativas (Brooker 1979).

Ainda segundo este autor, as técnicas geoestatísticas de estimativa baseadas no estudo da variabilidade espacial do corpo mineral como reflexo de um variograma, são superiores porque permitem o cálculo de uma medida de erro associada

à estimativa, chamada variância de estimativa. É também possível descobrir, para um dado bloco, a configuração de dados que minimize a variância de estimativa. O procedimento que produz o melhor estimador linear não viesado é a krigagem.

A essência de qualquer bom procedimento de estimativa não é simplesmente produzir um número (teor (%), espessura (m)) para um bloco, mas também dar uma idéia quantitativa entre o estimado e o número real.

A krigagem ordinária (KO) é um método que permite estimar o valor desconhecido Z_v associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados $[Z(x_i), i=1, n]$.

O estimador Z^*v pode ser obtido como uma combinação linear dos dados pela equação:

$$Z^*v = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i) \quad (11)$$

Os ponderadores ($\lambda_i, i=1, n$) são obtidos pela resolução de um sistema linear de equações (sistema de krigagem) construído para que a estimativa não seja viesada e que a variância de estimativa ou de krigagem seja mínima.

Segundo Journel & Huijbregts (1978), para que o estimador Z^*v não seja viesado, basta garantir que:

$$E[Z_v - Z^*v] = 0 \quad (12)$$

fazendo que $E[Z_v] = m$ e considerando que:

$$E[Z^*v] = E\left[\sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot Z(x_i)\right] = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot E[Z(x_i)] \quad (13)$$

$$E[Z^*v] = m \cdot \sum_{i=1}^n \lambda_i \quad (14)$$

resultando na condição de não viesamento para Z^*v dada por:

$$\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1 \quad (15)$$

Como em qualquer processo de estimativa, a krigagem procura fazer estimativas com mínima variância.

A variância de estimativa ou variância de krigagem é dada por:

$$\sigma_E^2 = E\left[(Z_v - Z^*v)^2\right] \quad (16)$$

que, desenvolvida matematicamente, origina:

$$\sigma_E^2 = \bar{C}(V, V) - 2 \sum_i \lambda_i \bar{C}(V, v_i) + \sum_i \sum_j \lambda_i \lambda_j \bar{C}(v_i, v_j) \quad (17)$$

onde:

$\bar{C}(V, V)$ é o valor médio da função covariância entre todos os pares de pontos no volume V ;

$\bar{C}(V, v_i)$ é o valor médio da função covariância entre uma amostra v_i e todo o volume V , assim calculada para todas as amostras;

$\bar{C}(v_i, v_j)$ é o valor médio da função covariância entre todos os pares possíveis de amostras v_i e v_j .

O significado de cada um dos termos da equação (17) pode ser melhor entendido observando-se a figura 3.

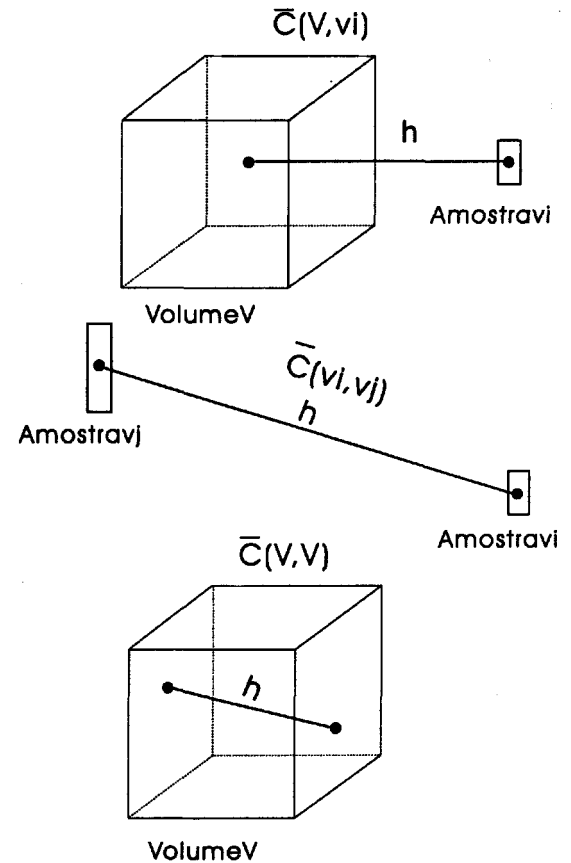


Figura 3 - Significado dos termos da equação (17), segundo Brooker (1979).

Figure 3 - Meaning of equation (17) terms, after Brooker (1979).

O objetivo da krigagem é buscar a melhor estimativa, ou seja, encontrar o mínimo da função variância de estimativa (equação 17). Minimizando-se a variância de estimativa (equação 17) sujeita à condição de não viesamento (equação 15), por meio da técnica dos multiplicadores de Lagrange, chega-se ao sistema de equações de krigagem:

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j \bar{C}(v_i, v_j) - \mu = \bar{C}(v_i, V) \quad \text{para } i=1, n$$

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (18)$$

onde: μ é o multiplicador de Lagrange.

A resolução do sistema de equações de krigagem (equação 18) resulta no conjunto de ponderadores ($\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_n$), que, aplicados na equação (11), permite determinar o teor médio do bloco.

A aplicação da krigagem depende da obtenção satisfatória de variogramas representativos da jazida, que por sua vez é função não só do comportamento espacial da variável em estudo, mas sobretudo, da quantidade de informações (Yamamoto & Bettencourt 1992).

Os procedimentos para realizar estimativa por meio da krigagem ordinária, podem ser resumidos como se segue (Brooker 1979):

- 1) estudo estrutural para determinação do variograma;
- 2) seleção de amostras a utilizar na avaliação de um bloco;
- 3) cálculo do $\bar{\gamma}$ ou \bar{C} (do sistema de equações de krigagem);
- 4) solução do sistema de equações para determinação dos ponderadores que minimizem a variância de krigagem, e
- 5) aplicação destes ponderadores na avaliação do bloco (teor e variância de krigagem).

MINA DE CANOAS 2 A Mina de Canoas 2, município de Adrianópolis (PR), situa-se no Vale do Ribeira, que abrange porções dos estados de São Paulo e Paraná (Fig. 4). A província mineral do Vale do Ribeira, segundo Campanha *et al.* (1987), corresponde à Faixa de Dobramentos Apiaí, sendo limitada a NW-W pelo Maciço de Guaxupé, a S-SE pelo Maciço de Joinville, a W e a SW é recoberta pelas rochas sedimentares da Bacia do Paraná, e, a NE, transiciona para terrenos de médio e alto grau, tornando-se difícil separar rochas supracrustais e embasamento retrabalhado. Neste contexto geológico, a Formação Perau, contém as mineralizações sulfetadas sedimentar-exalativas de Pb-Zn, denominadas tipo Perau. A Formação Perau é composta por metapelitos (ardósias, filitos, xistos) com inúmeras intercalações de rochas metabásicas e metavulcânicas. Subordinadamente ocorrem

quartzitos, carbonates, mármore e metaconglomerados oligomíticos. Entre os diversos outros tipos de intercalações litológicas, destacam-se, como indicadores paleoambientais, níveis de formações ferríferas, camadas de *metachert* e depósitos sulfetados (Campanha *et al.* 1987).

Na Mina de Canoas 2, as principais rochas são quartzitos, xistos anfibolíticos, rochas cálcio-silicáticas, anfibolitos e quartzo-mica-xistos. Ocorrem ainda pequenos diques de metadiabásio.

Os principais sulfetos são galena e esfalerita, subordinadamente pinta e pirrotita e traços de marcassita e calcopirita. O minério apresenta teor médio de 6 % Pb+Zn e 60 g/t Ag.

Com base nos custos operacionais praticados na Mina de Canoas 2 em 1992 e no preço dos metais (Pb e Zn), o teor-de-corte estabelecido pela Plumbum Metalurgia e Mineração S.A. foi de 5 % (Pb+Zn), e utilizado nos estudos desenvolvidos pela autora principal na sua dissertação de mestrado (Conde 1994), da qual deriva este trabalho.

Definido o teor-de-corte, a área de interesse engloba somente os furos positivos, ou seja, cujos teores compostos para espessura mineralizada (composição por litologia) foram maiores ou iguais ao teor-de-corte, e está delimitada na figura 5.

AValiação DAS RESERVAS DE Pb-Zn-Ag Como os métodos computacionais determinam as reservas a partir de blocos de cubagem, a área da Mina de Canoas 2, foi delimitada pelas seguintes coordenadas UTM: (xmin=706880; xmax=707230; ymin=7256130; ymax=7256455) e subdi-

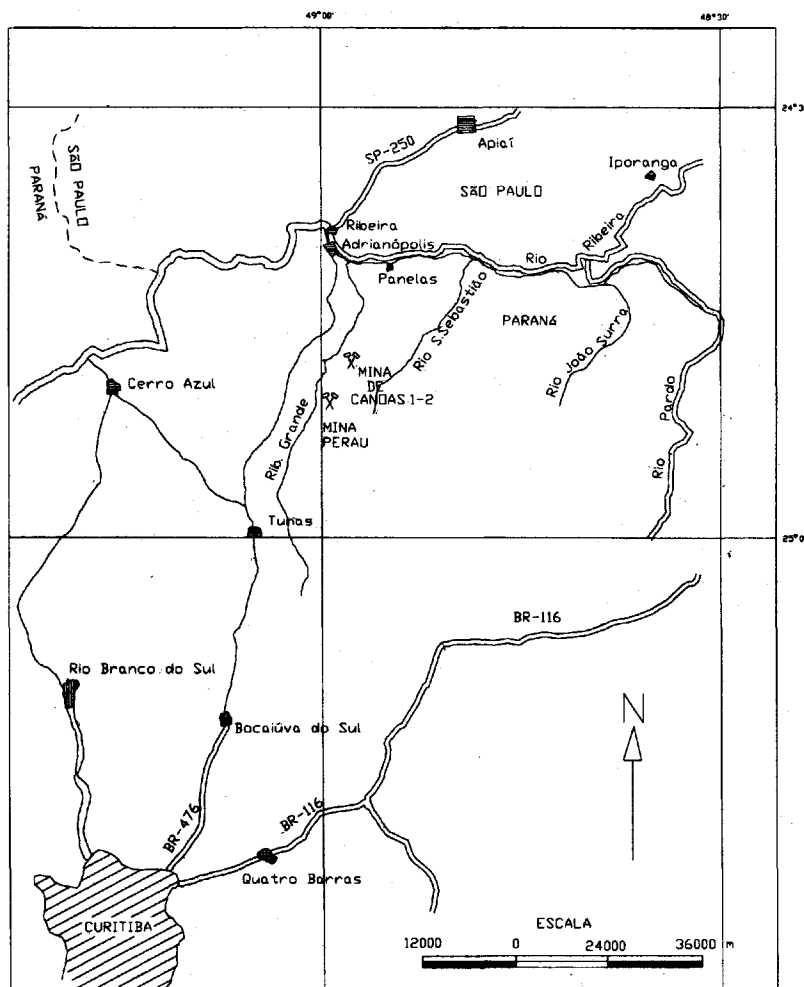


Figura 4 - Mapa de localização da Mina de Canoas 2.
Figure 4 - Location map of Canoas 2 mine.

vidida em blocos de 25 x 25 m, compatíveis com a densidade de informações.

A subdivisão da areada mina em blocos de 25 x 25 metros, definiu a fronteira a partir da intersecção entre a área de interesse e o mapa de blocos (Fig. 5).

Os teores de Pb, Zn, Ag e a espessura, de cada bloco foram estimados aplicando-se os métodos IPD e KO, a partir das sondagens compostas por litologia.

De posse dos resultados, foram calculadas as reservas por bloco para Pb, Zn e Ag. As reservas totais de Pb, Zn e Ag foram obtidas pelo somatório das reservas dos blocos.

Método do Inverso da Potência da Distância (IPD)

Este método foi aplicado com potência igual a 2. Os parâmetros da interpelação foram dois furos mais próximos por quadrante ou no mínimo 3 furos mais próximos, e distância máxima de busca 100 m. As reservas medidas calculadas pelo IPD de Pb, Zn e Ag são apresentadas na Tabela I.

Métodos Geoestatísticos Seguindo o procedimento descrito por Clark (1979), construiu-se semivariogramas em diferentes direções e intervalos (h) e, posteriormente, com os semivariogramas modelados, estimaram-se as reservas de Pb, Zn e Ag utilizando a krigagem ordinária.

O modelo geológico da jazida permitiu calcular semivariogramas nas direções 50° (janela 20°) e 140° (janela de 25°) e utilizadas as distâncias (h) de 25, 50, 100 m.

Aplicando estes parâmetros, apenas a direção 50° com distância de 50 m permitiu obter semivariogramas passíveis de modelagem. Para a aplicação da krigagem ordinária, o depósito foi considerado como isotrópico. Os variogramas foram obtidos por meio do sistema GEOSTAT, de propriedade da Plumbum Mineração e Metalurgia S.A. A figura 6 apresenta os semivariogramas para Pb, Zn e Ag, e a Tabela 2 os dados a eles referentes.

Os semivariogramas foram ajustados ao modelo teórico esférico, resultando nos parâmetros da Tabela 3.

A partir dos parâmetros dos semivariogramas e da configuração dos blocos de cubagem calculou-se a reserva medida da Mina de Canoas 2, aplicando a krigagem ordinária. Os parâmetros de interpelação foram iguais aos adotados no IPD, ou seja, 2 furos mais próximos por quadrante ou no mínimo 3 furos mais próximos, distância máxima de busca 100 m e o bloco original foi subdividido em 4 subblocos.

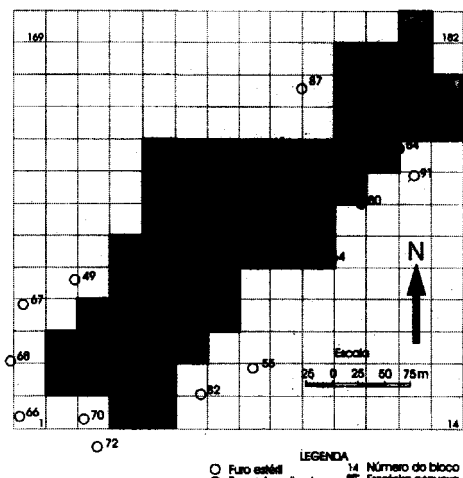


Figura 5 - Configuração dos blocos calculados pelos métodos computacionais (IPD e KO) para o teor-de-corte Pb+Zn - 5% na Mina de Canoas 2.

Figure 5 - Configuration of blocks estimated by computational methods (IPD and OK) for cutoff grade Pb+Zn = 5% of Canoas 2 mine.

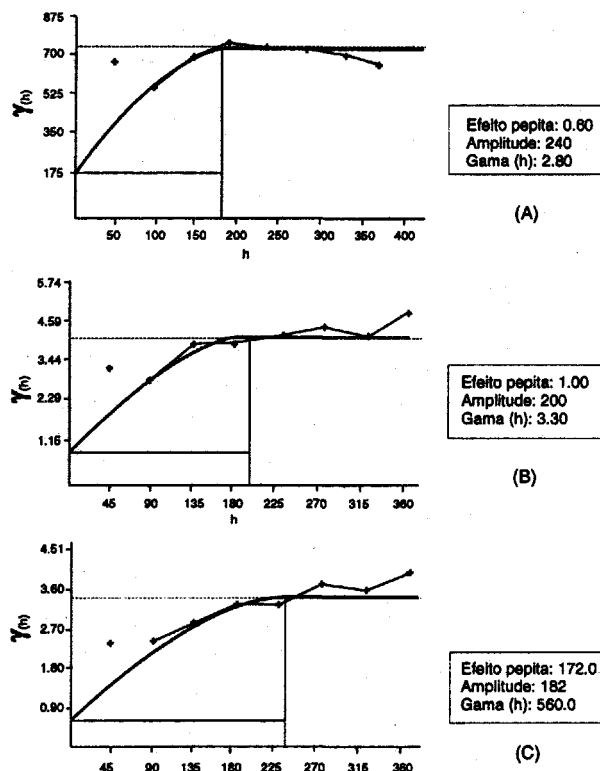


Figura 6 - Semivariogramas obtidos para (A) Pb, (B) Zn e (C) Ag na direção 50° (janela 20°) ajustados pelo modelo teórico esférico.

Figure 6 - Spherical semivariograms fitted for (A) Pb, (B) Zn, and (C) Ag, computed in direction 50° (window 20°).

O semivariograma para a espessura não foi calculado. Em vista disto para o cálculo das reservas por bloco, foram utilizadas as espessuras interpeladas pelo IPD, conforme os resultados apresentados na Tabela 4.

A Figura 7 apresenta os histogramas das distribuições de frequências dos teores obtidos por bloco, estimados pelo IPD e KO, e a Tabela 5 apresenta os parâmetros estatísticos associados. A análise dos parâmetros estatísticos e da forma dos histogramas indica, mais uma vez, que os resultados obtidos por esses métodos estão muito próximos.

CONSIDERAÇÕES FINAIS Comparando as reservas medidas obtidas pelos métodos computacionais (Tabelas I e 4), verifica-se que os valores da reserva medida e teor médio de Pb, Zn e Ag calculados pelo IPD e KO são muito próximos, reforçando que a modelagem dos semivariogramas foi satisfatória e que os parâmetros utilizados pela KO são confiáveis.

A estimativa de bloco, por métodos computacionais, utilizando não somente as amostras situadas em seu interior, minimiza os efeitos de sub ou superestimação de reservas, comuns em métodos convencionais. A KO, neste sentido, é o melhor método, uma vez que caracteriza espacialmente a estrutura da mineralização (variograma), fornece estimativas mais precisas, e define o erro associado, fundamental no planejamento de lavra.

A KO aplicada com parâmetros adequadamente testados e suficiente amostragem é capaz de produzir modelos matemáticos que descrevem a natureza do depósito em avaliação, e oferece estimativas mais precisas e, principalmente, os erros associados. Além disso, os blocos de cubagem gerados permitem uma melhor integração com as informações necessárias ao estudo econômico e planejamento de lavra. No caso do

Tabela 1 - Reservas medidas calculadas pelo IPD de Pb, Zn e Ag (NBE - número de blocos estimados).
Table 1 - Measured reserves of Pb, Zn, and Ag computed by IWD (TC - cutoff grade of Pb+Zn; NBE - number of estimated blocks).

Método	NBE	Minério (t)	TEOR MÉDIO			ESPESS. MÉDIA (m)	RESERVA MEDIDA		
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (ppm)		CHUMBO (t)	ZINCO (t)	PRATA (Kg)
IPD	60	367368,75	3,45	3,82	49,14	3,11	12371,6	13478,48	18315,68

Tabela 2 - Dados dos semivariogramas para Pb, Zn e Ag (direção 50° - janela 20°), da Mina de Canoas 2, PR.
Table 2 - Data of semivariograms for Pb, Zn, and Ag (direction 50° - window 20°), of Canoas 2 mine, PR.

h (m)	Pb		Zn		Ag	
	N.pares	$\gamma(h)$	N.pares	$\gamma(h)$	N.pares	$\gamma(h)$
44,58	195	2,41	182	3,48	168	656,43
93,24	1203	2,43	1106	3,15	998	546,86
139,08	3750	2,88	3648	4,10	3074	686,01
185,33	3364	3,28	3295	4,12	2800	756,32
231,91	4286	3,23	4148	4,34	3591	739,03
279,37	3961	3,73	3889	4,56	3158	731,89
326,44	2976	3,60	2954	4,29	2188	709,82
368,81	650	3,94	650	4,97	320	669,16

Tabela 3 - Parâmetros utilizados para na modelagem dos semivariogramas de Pb, Zn e Ag para a direção 50° (janela de 20°) e intervalo (h) 50 m, da Mina de Canoas 2, PR.

Table 3 - Parameters used for modeling experimental semivariograms of Pb, Zn, and Ag for the direction 50° (window 20°) and lag equal to 50 m, for Canoas 2 mine, PR.

ELEMENTO	Efeito pepita (Co)	Var.espacial (C)	Amplitude (a)
Chumbo	0.60 (%) ²	2.80 (%) ²	240 m
Zinco	1.00 (%) ²	3.30 (%) ²	200 m
Prata	172 (%) ²	560 (ppm) ²	182 m

Tabela 4 - Reservas medidas calculadas pela krigagem ordinária de Pb, Zn e Ag (NBE - número de blocos estimados).
Table 4 - Measured reserves computed by ordinary kriging for Pb, Zn, and Ag (NBE - number of estimated blocks).

Método	NBE	Minério (t)	TEOR MÉDIO			ESPESS. MÉDIA (m)	RESERVA MEDIDA		
			Pb (%)	Zn (%)	Ag (ppm)		CHUMBO (t)	ZINCO (t)	PRATA (Kg)
KO	60	367368,75	3,48	3,85	49,17	3,11	12431,3	13658,15	18390,32

Tabela 5 - Teor médio e variância estatística calculados para os blocos estimados por IPD e KO para teor-de-corte Pb+Zn = 5% na Mina de Canoas 2.

Table 5 - Average grade and variance computed for block estimated by IWD and OK for cutoff grade Pb+Zn = 5% for Canoas 2 mine.

Elemento	IPD		KO	
	Tm	S ²	Tm	S ²
Pb	3,45 (%)	0,56 (%) ²	3,48 (%)	0,60 (%) ²
Zn	3,82 (%)	0,55 (%) ²	3,85 (%)	0,55 (%) ²
Ag	48,89 (ppm)	66,33 (ppm) ²	49,17 (ppm)	66,11 (ppm) ²

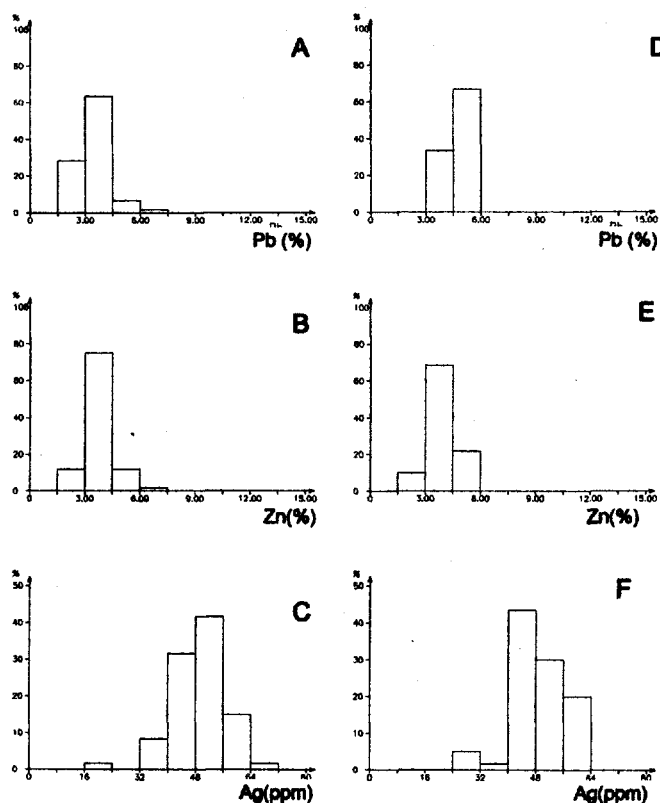


Figura 7 - Histogramas das distribuições de freqüências dos teores de Pb, Zn e Ag calculados pelo IPD (A, B, C) e KO (D, E, F) para o teor-de-corte de Pb+Zn = 5% para a Mina de Canoas 2.

Figure 7 - Histograms of frequency distributions for grades of Pb, Zn, and Ag computed using IWD (A, B, C) and OK (D, E, F) for the cutoff grade of Pb+Zn = 5% of Canoas 2 mine.

depósito em estudo, pôde-se verificar que o IPD, aplicado para avaliação de blocos, produziu resultados muito próximos ao da KO, devido, provavelmente, o caráter regular e contínuo do depósito.

As dificuldades matemáticas da geoestatística certamente existem a um nível teórico e em sofisticadas aplicações, contudo, estas podem ser superadas se a avaliação de reservas for realizada por um profissional com conhecimentos básicos de matemática. A geoestatística não pode substituir bons dados e informações adicionais, nem o julgamento preciso de um profissional que conheça a natureza geológica/tecnológica

do depósito; desta forma, a geoestatística não pode ser utilizada como uma "caixa preta", na ilusão que irá economizar tempo de trabalho.

Agradecimentos À PLUMBUM Mineração e Metalurgia S.A, pela acolhida fornecida durante nossa permanência na Mina de Canoas, pela cessão de testemunhos, mapas e perfis de sondagem, e pelas importantes informações transmitidas pelos geólogos Adalberto Scortegna, Gerson C. Venusso e Normando Queiroga.

REFERÊNCIAS

- ANNELS, A.E. 1991. *Mineral Deposit Evaluation - A practical approach*. Chapman & Hall - London. 436 p.
- BARNES, M.P. 1980. *Computer-Assisted Mineral Appraisal and Feasibility*. New York, Soe. Min. Eng. 167p.
- BROOKER, P.I. 1979. Kriging. *Engineering & Mining Journal*, **180**(9): 148-153.
- CAMPANHA, G.A. da C.; BISTRICHI, C.A.; ALMEIDA, M.A. de 1987. Considerações sobre a organização litoestratigráfica e evolução tectônica da Faixa de Dobramentos Apiaí. In: SIMPÓSIO SUL-BRASILEIRO GEOLOGIA, 3, Curitiba, 1987. *Atas...* Curitiba, SBG, v.2, p.725-742.
- CLARK, I. 1979. The semivariogram - part I. *Engineering & Mining Journal*, **180**(7):90-94p.
- CONDE, R.P. 1994. *Avaliação das reservas de Pb-Zn-Ag do Depósito de Canoas, município de Adrianópolis, PR*. São Paulo. 166p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências - USP).
- HUIJBREGTS, C.J. 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J.C. & McCullagh, M.J. ed. *Display and analysis of spatial data*. New York. John Wiley, p. 38-53.
- JOURNEL, A.G. & HUIJBREGTS, C.J. 1978. *Mining geostatistics*. London. Academic Press. 600 p.
- PHILIP, G.M. & WATSON, F. 1987. How ore deposits can be overestimated through computational methods. In: RESOURCES AND RESERVES SYMPOSIUM, Sydney, 1987. Proceedings... Sydney, THE AUSTRALASIAN INSTITUTE OF MINING AND METALLURGY, p. 49-58.
- ROYLE, A.G. 1979. Why geostatistics? *Engineering & Mining Journal*, **180**(5):92-101.
- WEAVER, R.C. 1964. Re-lative merits of interpolation and approximating functions in the grade prediction problem. Apud Philip, G.M. & Watson, F. 1987. How ore deposits can be overestimated through computational methods.
- YAMAMOTO, J.K. 1996. Inverse weighted distance method for block estimation. *Engineering & Mining Journal* **197**(9):69-72.
- YAMAMOTO, J.K. & BETTENCOURT, J. 1992. *Avaliação de Reservas*. Apostila do curso de pós-graduação. 113p.

Manuscrito A848

Recebido em 27 de junho de 1996

Revisão dos autores em 20 de setembro de 1996

Revisão aceita em 24 de setembro de 1996