

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

REAVALIAÇÃO DOS RECURSOS/RESERVAS MINERAIS
DA MINA DE CAJATI – SP, POR METODOLOGIA
GEOESTATÍSTICA

George de Barros

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto

Monografia de Trabalho de Formatura

SÃO PAULO
1998

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

DEDALUS - Acervo - IGC



30900002811

REAVALIAÇÃO DOS RECURSOS/RESERVAS MINERAIS
DA MINA DE CAJATI – SP, POR METODOLOGIA
GEOESTATÍSTICA

George de Barros

Orientador: Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto



Monografia de Trabalho de Formatura

SÃO PAULO
1998

TF
B277
G.n

Este trabalho é especialmente dedicado ao meu pai (em memória)

AGRADECIMENTOS

Agradeço de maneira especial ao Prof. Dr. Jorge Kazuo Yamamoto pela orientação e apoio inestimável durante todo o progresso deste trabalho.

À Empresa Serrana de Mineração S.A., na figura de seu Engenheiro de Minas Paulo de Oliveira Luz, pelo apoio prestado e paciência dispensada durante todo o período de estágio.

À Prof^a. Dr^a. Lilia Mascarenhas Sant'Agostino pela ajuda e incentivo durante a confecção deste trabalho, além de servir de intermediária quando da negociação do estágio.

Aos pós-graduandos do DGE, geólogos Marcelo Monteiro da Rocha e Sérgio Luis Fabris de Matos pela incomparável ajuda durante todo o trabalho, pela paciência dispensada, pelos momentos de discussão e de descontração. Sem esta ajuda, este trabalho certamente sairia prejudicado.

A todos os formandos de 1998, representados na figura do amigo e colega de trabalho Marcos Dutra Silva (Socró), já que sem ele, o estresse seria inevitável.

A todo o pessoal do IGc, entre alunos, funcionários e professores que durante estes cinco anos conviveram comigo.

E finalmente agradeço à minha mãe Lúcia e meu irmão Marcelo, que souberam ter paciência e me apoiaram durante todo este período na graduação.

ÍNDICE

RESUMO.....	1
ABSTRACT.....	1
1 – Introdução.....	1
2 – Objetivos.....	2
3 – Justificativas.....	2
4 – Análise Estatística.....	3
4.1 – Distribuição de Freqüências.....	3
4.2 – Estatística Descritiva.....	4
4.3 – Intervalo de Confiança da Média.....	5
5 – MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS.....	6
5.1 – Variáveis Regionalizadas.....	7
5.2 – Variograma.....	9
5.3 – Modelos Teóricos de Variogramas.....	13
5.4 – Krigagem.....	14
6 – MINA DE CAJATI.....	16
6.1 – Localização e Acessos.....	16
6.2 – Geologia Regional.....	16
6.3 – Geologia Local.....	18
6.4 – Breve Histórico da Mina.....	20
7 – MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
8 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO.....	22
9 – RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO.....	27
9.1 – Análise Estatística.....	27
9.2 – Análise Geoestatística.....	34
9.3 – Krigagem.....	40
9.4 – Cálculo dos Recursos/Reservas.....	47
9.5 – Modelagem do Corpo Geológico.....	48
10 – INTERPRETAÇÃO / DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	49
11 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	51
12 – REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Variância espacial em função dos intervalos de amostragem para as séries A e B.....	8
Figura 2 – Desenho mostrando a direção do variograma, os passos, a tolerância angular, a largura máxima e a tolerância do passo.....	11
Figura 3 – Variograma típico e suas propriedades.....	12
Figura 4 – Anisotropias : A) geométrica, B) zonal e C) mista.....	12
Figura 5 – Comportamento do variograma na origem : A) parabólico, B) linear, C) efeito pepita e D) efeito pepita puro.....	13
Figura 6 – Modelos de variogramas teóricos.....	14
Figura 7 – Mapa de localização da área.....	16
Figura 8 – Mapa geológico do Complexo Alcalino de Jacupiranga.....	18
Figura 9 – Mapa geológico da Mina de Cajati.....	19
Figura 10 – Mapa de localização da cava atual e da nova área anexada à mineração.....	19
Figura 11 – Histograma de distribuição de freqüências dos teores de P_2O_5	28
Figura 12 – Histograma de distribuição de freqüências dos teores de MgO.....	28
Figura 13 – Histograma de distribuição de freqüências acumuladas para os teores de P_2O_5	29
Figura 14 – Histograma de distribuição de freqüências acumuladas para os teores de MgO.....	29
Figura 15 – Diagrama de dispersão entre os teores de P_2O_5 e MgO.....	30
Figura 16 – Mapa de localização das 3 populações observáveis no conjunto de dados.....	30
Figura 17 – Histogramas de distribuição de freqüências para a área sul.....	31
Figura 18 – Histogramas de distribuição de freqüências para a área central.....	31
Figura 19 – Histogramas de distribuição de freqüências para a área norte.....	32
Figura 20 – Diagrama de dispersão entre P_2O_5 e MgO dos dados da área sul.....	33
Figura 21 – Diagrama de dispersão entre P_2O_5 e MgO dos dados da área central.....	33
Figura 22 – Diagrama de dispersão entre P_2O_5 e MgO dos dados da área norte.....	34
Figura 23 – Variograma experimental do P_2O_5 da área sul, bem como o modelo teórico ajustado.....	35
Figura 24 – Variograma experimental do MgO da área sul, bem como o modelo teórico ajustado.....	35
Figura 25 – Variograma experimental do P_2O_5 da área central, bem como o modelo teórico ajustado.....	36
Figura 26 – Variograma experimental do MgO da área central, bem como o modelo teórico ajustado.....	36

Figura 27 – Variograma experimental do P_2O_5 da área norte, bem como o modelo teórico ajustado.....	36
Figura 28 – Variograma experimental do MgO da área norte, bem como o modelo teórico ajustado.....	37
Figura 29 – Histogramas de erro e Diagrama de Dispersão para a variável P_2O_5 obtidos a partir da validação cruzada dos variogramas.....	38
Figura 30 – Histogramas de erro e Diagrama de Dispersão para a variável MgO obtidos a partir da validação cruzada dos variogramas.....	39
Figura 31 – P_2O_5 estimado por krigagem – nível –50.....	41
Figura 32 – MgO estimado por krigagem – nível –50.....	42
Figura 33 – P_2O_5 estimado por krigagem – nível 0.....	43
Figura 34 – MgO estimado por krigagem – nível 0.....	44
Figura 35 – P_2O_5 estimado por krigagem – nível 50.....	45
Figura 36 – MgO estimado por krigagem – nível 50.....	46
Figura 37 – Modelo tridimensional do corpo carbonatítico.....	48

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Parâmetros estatísticos dos dados, sem a regularização das amostras.....	27
Tabela 2 – Parâmetros estatísticos dos dados, após a regularização das amostras.....	27
Tabela 3 – Parâmetros estatísticos dos dados da área sul.....	31
Tabela 4 – Parâmetros estatísticos dos dados da área central.....	31
Tabela 5 – Parâmetros estatísticos dos dados da área norte.....	32
Tabela 6 – Valores do Erro Médio, Erro Padrão da Média e Variância do Erro Padrão de cada uma das variáveis.....	40
Tabela 7 – Parâmetros de vizinhança utilizados na krigagem.....	41
Tabela 8 – Recurso calculado de cada área e de todo o depósito, bem como seus respectivos teores médios.....	47

REAVALIAÇÃO DAS RESERVAS MINERAIS DA MINA DE CAJATI - SP, POR METODOLOGIA GEOESTATÍSTICA

RESUMO

O presente projeto teve por objetivo a aplicação da técnica geoestatística na reavaliação das reservas minerais da Mina de Cajati (SP).

Para atingir este objetivo, foram realizadas etapas de campo para a coleta de dados, tanto de furos de sondagem como de afloramentos, com o intuito de se aprimorar o modelo tridimensional do depósito, visando uma maior compreensão do minério carbonatítico dentro do zoneamento estrutural do depósito. A partir deste modelo tridimensional, foi feita a reavaliação das reservas de fosfato, utilizando-se a metodologia geoestatística.

ABSTRACT

This project aimed an application of geostatistical technique for the recalculation of mineral reserves of the Cajati Mine (State of São Paulo). In order to read this objective field works were done, us order to collect drill hole data as well as outcross data. These data were used to improve the three-dimensional model of deposit, which allowed a better interpretation of carbonatitic ore within the structural zoning of deposit. From this three-dimensional model, the phosphate ore reserves were recalculated using geostatistics techniques.

1 - INTRODUÇÃO

A avaliação de reservas tem como objetivos principais a melhor estimativa dos teores e tonelagens dos blocos em um corpo de minério, bem como a determinação do erro provável desta estimativa a um certo nível de confiança. Esta estimativa depende fundamentalmente da qualidade, quantidade e da distribuição espacial das amostras e da continuidade do corpo.

A partir deste cálculo, tem-se uma base para todos os estudos de viabilidade técnica e econômica, como, por exemplo, produção anual, vida útil provável da mina, métodos de beneficiamento, além de outros investimentos. Percebe-se então que o cálculo de reservas é de grande importância para o sucesso da mineração, devendo, portanto, esta avaliação ser a mais confiável possível.

Os métodos de avaliação de reservas podem ser divididos em dois grupos: os métodos convencionais, primeiros a serem desenvolvidos para mineração, que utilizam princípios de interpretação, como os conceitos de blocos análogos ou geológicos, blocos de lavra, perfis lineares e analíticos; e os métodos computacionais, que utilizam métodos de interpolação, dentre os quais destacam-se o método da ponderação pelo inverso da potência da distância e os métodos geoestatísticos, genericamente denominados de krigagem.

Estes métodos procuram determinar os valores dos atributos que, aplicados às equações básicas de reservas, fornecem o valor da reserva do depósito.

2 - OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho é a reavaliação das reservas de fosfato na Mina de Cajati (SP), utilizando métodos geoestatísticos, à luz do modelo conceitual adotado nesta jazida.

Deste modo, propõe-se realizar uma revisão dos métodos de avaliação de reservas, que poderá indicar o mais adequado para a área em questão. O método escolhido será então aplicado sobre os dados obtidos a partir do inventário mineral do depósito. A partir daí, os trabalhos de avaliação de reservas e modelagem do depósito serão realizados com base no modelo geológico do depósito, que será interpretado a partir das descrições dos testemunhos de sondagem, afloramentos, frentes de lavra e da consulta bibliográfica especializada sobre a área.

Recentemente, uma região adjacente à atual cava foi alvo de uma nova campanha de pesquisa. Deste modo, ao final deste trabalho, pretende-se chegar a um novo quadro das reservas de fosfato, com a incorporação deste novo depósito ao que está atualmente sendo lavrado.

3 - JUSTIFICATIVAS

O presente trabalho visa a reavaliação das reservas da área em questão, onde serão estimados os teores e tonelagens dos blocos no corpo de minério, servindo estes resultados como base aos estudos de viabilidade técnica e econômica da mina, o que poderá determinar um novo planejamento de lavra.

Como já foi mencionado, o resultado final do trabalho acarretará numa ampliação das reservas atuais, pois uma nova área está sendo incorporada à mineração, sendo que os estudos preliminares de pesquisa mineral desta região mostraram-se bastante satisfatórios quanto à potencialidade deste novo depósito.

4 - ANÁLISE ESTATÍSTICA

Antes de se proceder a análise geoestatística, é recomendável que se realize uma análise estatística dos dados disponíveis e/ou obtidos a partir de composições de furos de sondagem. Esta análise estatística permite determinar o teor médio do depósito e a distribuição de freqüências dos teores. O teor médio nos dá uma noção da viabilidade técnico-econômica do depósito e a distribuição de freqüência permite determinar a porcentagem de teores acima de um determinado teor de corte. Nesta análise, ainda é possível determinar a dispersão dos teores do depósito, relacionados à variabilidade natural, através do coeficiente de variação. Os estudos desta etapa são uma pré-análise da análise geoestatística.

4.1 - Distribuição de Freqüências

A análise estatística começa pelo estudo que descreve como as unidades de uma população estão distribuídas sobre o intervalo amostrado (Yamamoto *et al.*, 1998). Ocorrem dois tipos de distribuição de freqüências : simples ou acumulada.

A distribuição do tipo simples é obtida tabulando-se os dados em intervalos constantes. Os dados assim agrupados podem ser representados graficamente na forma de histograma, onde lança-se os intervalos de medida na abscissa e as freqüências na ordenada.

Para a obtenção de freqüências acumuladas, o procedimento é o mesmo, apenas os dados devem ser agrupados de forma acumulada. Através desta última representação, é possível fazer um pré-estudo de viabilidade técnica ou econômica, dependendo da proporção encontrada acima ou abaixo do teor de corte, que pode inviabilizar o depósito.

Na análise de dados para avaliação de reservas existem duas distribuições importantes a serem consideradas : normal e lognormal.

A distribuição normal ou gaussiana é a mais utilizada em estatística, já que um grande número de variáveis aleatórias ocorrem sob esta forma.

A função que descreve matematicamente esta distribuição é dado por :

$$f(X) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2} \left[\frac{(X-\mu)}{\sigma} \right]^2}$$

onde : $f(X)$ é a função densidade de probabilidade;

X é uma observação;

μ e σ são respectivamente a média e o desvio padrão que definem a forma da curva.

A distribuição normal é a distribuição teórica mais utilizada na prática, pois é matematicamente conveniente trabalhar com ela, já que suas propriedades são bem conhecidas. A maioria das observações seguem uma distribuição normal ou, aproximadamente normal.

A distribuição lognormal é um tipo encontrado em muitos problemas de avaliação de reservas, caracterizando-se por uma distribuição com assimetria positiva, apresentando uma grande quantidade de valores baixos e uns poucos valores altos.

A função densidade de probabilidade desta distribuição é dada por :

$$f(X) = \frac{1}{X\beta\sqrt{2\pi}} e^{-1/2[(\log X - \alpha)/\beta]^2}$$

onde : α é a média dos logaritmos de X ;

β é o desvio padrão dos logaritmos de X em relação à α .

A distribuição lognormal é sempre assimétrica para a direita (assimetria positiva), sendo que o grau de assimetria depende somente do valor de β^2 , que corresponde à variância dos logaritmos das observações (Kock & Link, 1971).

4.2 - Estatística Descritiva

Após conhecer a distribuição de freqüências dos dados, pode-se obter alguns parâmetros estatísticos que a caracterizam, o que permitirá um estudo das propriedades da população em termos do valor médio medido e como os demais valores encontram-se distribuídos em torno deste valor médio (Yamamoto *et al.*, 1998).

Esses parâmetros são a média, a variância e o desvio padrão, o coeficiente de variação, a assimetria e a curtose.

- média : é uma medida de tendência central dos dados, calculada segundo :

$$E(X) = \sum_{i=1}^n X_i P(X_i)$$

onde $P(X_i)$ é a probabilidade associada à ocorrência da i -ésima variável X .

Assumindo que as probabilidades associadas às n variáveis aleatórias são iguais entre si e iguais a $1/n$, teremos :

$$E (X) = \overline{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$$

- desvio padrão : corresponde a raiz quadrada da variância. Possui a mesma unidade da média.

$$Var(X) = S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \left(X_i - \overline{X} \right)^2$$

- coeficiente da variação : outra medida de dispersão, é obtido pela divisão do desvio padrão pela média.

$$CV = \frac{S}{\overline{X}}$$

Como o coeficiente de variação é adimensional, ele é freqüentemente utilizado na comparação de dispersões relativas de valores entre diferentes distribuições.

- assimetria : é a medida do grau de simetria de uma distribuição de freqüências em torno da média. Pode ser positiva se a cauda da distribuição estiver à direita da média e negativa, se a cauda estiver à esquerda. A assimetria positiva é observada na maioria das distribuições de freqüências de variáveis de depósitos minerais com alta variabilidade natural, como depósitos de metais raros, ouro, urânio, etc., que implicam em distribuições lognormais.
- curtose : é a medida do grau de achatamento de uma distribuição em relação a uma distribuição normal. Reflete a dispersão dos valores em torno da média (Spiegel, 1976 *apud* Yamamoto *et al.*, 1998).

4.3 - Intervalo de Confiança da Média

Calculado o teor médio do depósito, pode-se determinar o intervalo de confiança associado ao mesmo, a um determinado nível de confiança.

O intervalo de confiança pode ser calculado a partir da estatística t :

$$t = \frac{\overline{X} - \mu}{S / \sqrt{n}}$$

A distribuição t é simétrica e depende apenas do número de graus de liberdade, que no caso é igual ao número de amostras. Quando o número de graus de liberdade tende ao infinito, a distribuição t tende à distribuição normal.

5 - MÉTODOS GEOESTATÍSTICOS

Os métodos computacionais, ou geoestatísticos, de avaliação de reservas estão fundamentados na Teoria das Variáveis Regionalizadas. Eles foram desenvolvidos no final da década de 50 e início da década de 60, pelo engenheiro de minas Georges Matheron, a partir de estudos pioneiros realizados por Daniel G. Krige, para o cálculo de reservas das minas de ouro do Rand, na África do Sul (Conde, 1994).

A geoestatística é a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos em problemas das Ciências da Terra. Sua utilização é muito ampla, podendo ser aplicada, por exemplo, na determinação de elementos traços em rochas, análise de dados geoquímicos de pesquisa mineral, determinação do tipo de amostragem, estimativa espacial e temporal, simulação, análise de riscos e quantificação de reservas.

Segundo Clark (1979), o procedimento para a avaliação geoestatística de reservas em um depósito mineral pode ser dividido em duas partes :

- investigação e modelagem de uma estrutura física e estatística de um corpo mineral através da semi-variografia; e
- processo de krigagem propriamente dito, que depende exclusivamente dos semi-variogramas elaborados na etapa anterior.

O cálculo de um teor médio para um bloco na jazida, a partir dos dados de teores obtidos nas amostras coletadas ao longo dos furos de sondagem corresponde a um problema de estimativa, que usa as informações dos pontos vizinhos, considerando a posição espacial relativa das amostras, além dos seus teores. A krigagem proporciona uma estimativa linear ótima, bem como o cálculo da variância da krigagem, que corresponde ao erro associado à mesma (Yamamoto & Bettencourt, 1992).

Assim como as técnicas estatísticas, a geoestatística baseia-se em conceitos probabilísticos. Porém, Clark (1979) assume que a distribuição das diferenças nos teores entre dois pontos amostrados é a mesma em todo o depósito, dependendo somente da orientação espacial destes pontos, ou seja, da distância entre eles e da sua orientação. Esta suposição é intitulada hipótese intrínseca ou de quase-estacionaridade.

Segundo Royle (1979), os principais argumentos para o uso da geoestatística seriam:

- 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 do fato que a variação total é parte aleatória, parte espacial, conduzindo a estimativas que não são enviesadas e que possuem pequenos erros de estimativa;
- a geoestatística explica porque alguns tipos tradicionais de estimador produzem estimativas enviesadas - estes estimadores podem ser removidos pelo uso de outros tipos de estimadores (krigagem).

A utilização da geoestatística não pode substituir bons dados e informações adicionais, nem o julgamento de um profissional que conheça a natureza geológica/tecnológica do depósito. Assim, não se deve utilizar a geoestatística com a ilusão de economia de tempo de trabalho.

5.1 - Variáveis Regionalizadas

Considerando duas séries de amostras em diferentes corpos de minérios (Royle, 1979), demonstrar-se-á como as variáveis regionalizadas diferem das clássicas variáveis estatísticas, para as quais se supõem independência :

Série A : 1 7 3 6 2 9 4 8 5 média = 5 e $\sigma^2 = 6,7$

Série B : 1 3 5 7 9 8 6 4 2 média = 5 e $\sigma^2 = 6,7$

Apesar destas duas séries apresentarem o mesmo valor da média e variância, elas representam dois tipos de mineralizações distintas, sendo a primeira mais errática que a segunda.

Deste modo, a análise dos parâmetros estatísticos, neste caso, é de pouca utilidade e não consegue distinguir os dois conjuntos, uma vez que a estatística clássica baseia-se no princípio de independência entre amostras. Amostras obtidas de um depósito mineral estão, de certa forma, relacionadas entre si. Assim, a introdução do conceito de variáveis regionalizadas pela geoestatística tenta resolver estes tipos de problemas.

No exemplo acima, poderia se calcular a soma das diferenças dos quadrados dos valores das amostras, separadas por uma determinada distância. Este valor, dividido pelo número de pares de amostras, dá sentido a uma medida de variância, com significado espacial, pois depende da distância utilizada. Deste modo, calculando-se estas variâncias espaciais para as duas séries acima, teríamos :

Intervalo de amostragem	Variância Espacial A	Variância Espacial B
1	22,00	3,63
2	3,00	12,86
3	23,67	23,83
4	3,80	29,60

A representação destes dados sob uma forma gráfica, lançando-se as variâncias espaciais em função dos intervalos de amostragem, pode ser observada na Figura 1.

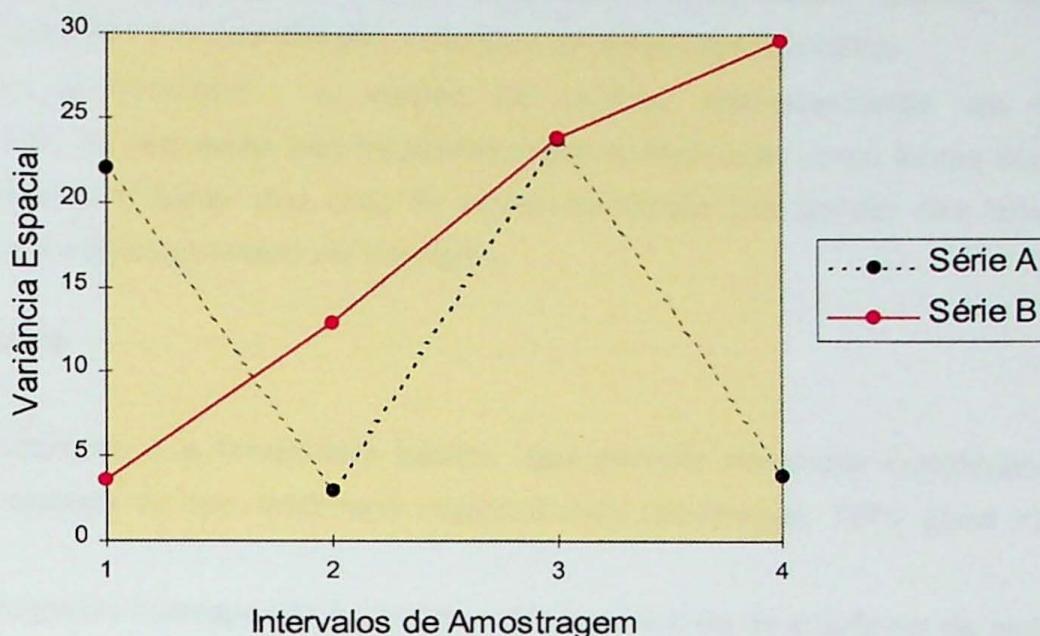


Figura 1 - Variância espacial em função dos intervalos de amostragem para as séries A e B

Por este gráfico, percebe-se que a série A é muito dispersa, enquanto a série B apresenta-se mais uniforme. Nesta última série, as variâncias espaciais aumentam à medida que aumenta a distância entre as amostras. Este comportamento é o desejado para os corpos de minério, dentro de alguma escala de amostragem.

As variáveis regionalizadas representam os valores das variáveis referenciadas geograficamente. Uma variável regionalizada é qualquer função numérica com uma distribuição espacial, que varia de um lugar a outro com continuidade aparente, mas cujas variações não podem ser representadas por uma função determinística (Blais & Carlier, 1968 *apud* Olea, 1975). Em geologia, todas as observações quantitativas realizadas em duas ou três dimensões, sejam elas geoquímicas, geofísicas, sedimentológicas, estruturais, etc., podem ser consideradas como exemplos de variáveis regionalizadas.

Segundo Bubenicek & Haas (1969), as características das variáveis regionalizadas que os métodos estatísticos convencionais não conseguem reconhecer, são :

- localização : uma variável regionalizada é numericamente definida pelo valor de uma função espacial relativa dentro do campo geométrico (depósito). Além disso, estes valores dependem do tamanho da amostra, forma e orientação (suporte amostral);
- suporte : por vezes a variável regionalizada não está definida em um ponto, mas sobre uma área ou volume centrado em um ponto X. À unidade amostral básica sobre a qual a variável é medida chama-se suporte (IPT, 1989);

- continuidade : a variação espacial da variável regionalizada pode ser grande ou pequena, mas deve existir uma certa continuidade ponto a ponto. Esta continuidade, medida pela correlação espacial, pode ser expressa matematicamente por meio do variograma;
- anisotropia : a regionalização pode apresentar anisotropias quando apresentam variações graduais em uma direção e rápidas ou irregulares em outra;
- fenômenos de transição : no campo da variável, particularmente em formações sedimentares, as estruturas são freqüentemente encontradas como lentes superpostas. Estas estruturas formam uma rede de descontinuidades nas bordas das lentes, que é caracterizada como fenômeno de transição.

5.2 - Variograma

O variograma é a ferramenta básica que permite descrever quantitativamente a variação no espaço de um fenômeno regionalizado (Huijbregts, 1975 *apud* Yamamoto, 1991).

O variograma corresponde à variância de uma medida de influência de amostras em áreas vizinhas dentro de um depósito, a partir de valores tomados simultaneamente em dois pontos, segundo uma determinada direção.

A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como sendo a esperança matemática do quadrado da diferença entre os valores de pontos, separados por uma distância h , conforme a equação :

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

ou em termos computacionais :

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

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 variância é conhecida em notação geoestatística como $C(0)$, ou seja, a covariância para distância de separação nula.

Pode-se expressar a função variograma $2\gamma(h)$ em termos de variância $C(0)$ e da covariância $C(h)$, segundo a expressão :

$$2\gamma(h) = 2C(0) - 2C(h)$$

A função $\gamma(h)$, chamada semi-variograma (segundo Clark, 1979, muitos autores utilizam simplesmente o termo função variograma para expressá-la) é vetorial, pois o variograma é calculado em uma direção predefinida. Na prática, são construídos variogramas segundo várias direções na jazida, a fim de se conhecer a estruturação da mineralização. A este processo chamamos análise estrutural. A partir da interpretação do variograma obtém-se parâmetros que descrevem o comportamento espacial das variáveis regionalizadas. Semivariogramas em diferentes direções podem dar valiosas informações sobre a continuidade ou ausência de variação ao longo do depósito.

Observa-se que, à medida que as distâncias aumentam entre os pares de pontos, poucos pares entram nos cálculos, implicando que pontos próximos à origem (pequenas distâncias) serão mais confiáveis do que aqueles a grandes distâncias. Segundo Clark (1979), um ponto importante a ser verificado é o intervalo de amostragem, visto que, por vezes, intervalos de amostragem grandes não são capazes de determinar as estruturas do depósito.

Segundo Landim (1985), para dados que estão irregularmente distribuídos no espaço bidimensional, não é possível, a princípio, encontrar pares de amostras suficientes, com exatamente o mesmo espaçamento h para o cálculo do semivariograma. Para resolver este problema, define-se uma distância de tolerância Δh para o espaçamento h entre os pares de amostras e um ângulo de tolerância $\Delta\alpha$ para a direção considerada. Deste modo, para o cálculo do semivariograma de uma distribuição irregular de pontos, ao longo de uma direção α , considera-se todas as amostras que se encontram no ângulo $\alpha \pm \Delta\alpha$ e, em seguida, classifica-se os pares de amostras em classes de distância $h \pm \Delta h$, $2h \pm \Delta h$, ..., onde h é a distância básica (Figura 2).

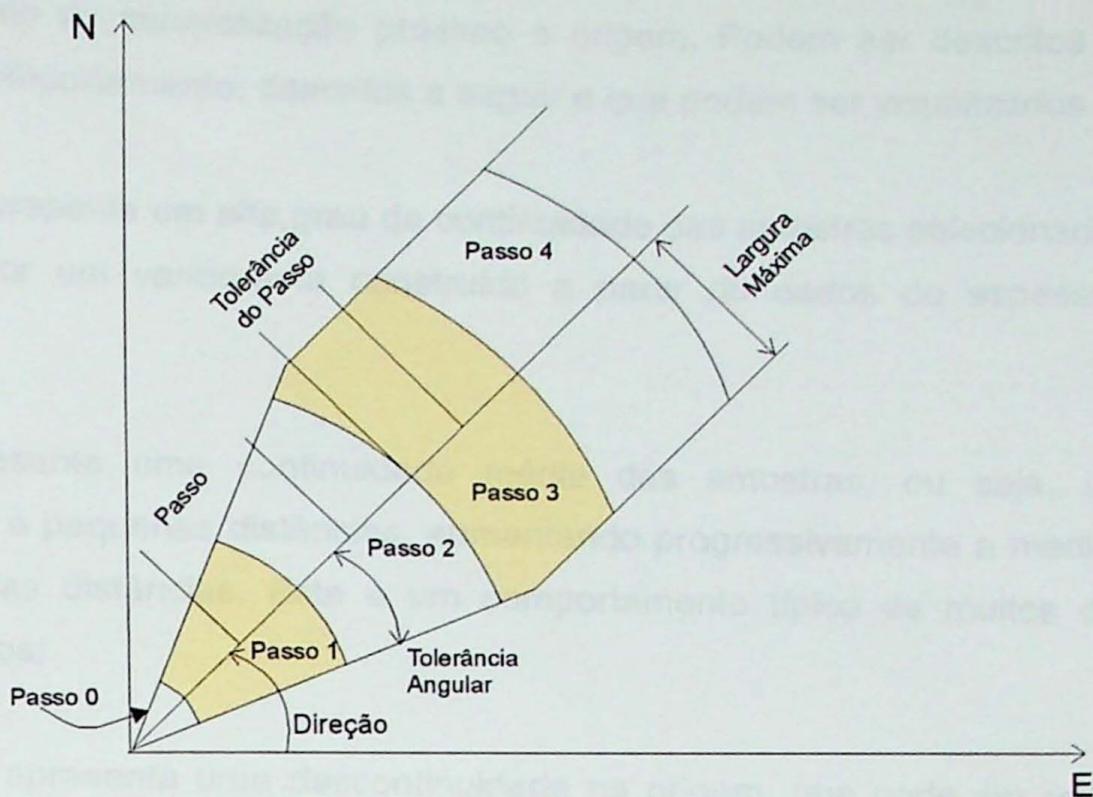


Figura 2 : Desenho mostrando a direção do variograma, os passos, a tolerância angular, a largura máxima e a tolerância do passo (modificado de Pannatier, 1994 *in* Yamamoto & Rocha, 1998)

Na Figura 3, podemos observar um variograma típico, bem como suas propriedades.

As principais propriedades do variograma são :

- patamar : é o valor no qual o variograma estabiliza-se no campo aleatório e é numericamente igual à variância regionalizada;
- amplitude : é a distância a partir da qual as amostras passam a ser independentes. Conforme Matheron (1971 *apud* Yamamoto, 1991), o variograma dá um significado preciso a noção de zona de influência. A amplitude (a) é a distância que separa o campo estruturado do campo aleatório;
- efeito pepita : é o valor da função variograma na origem ($h=0$). Teoricamente este valor deveria ser zero, pois duas amostras tomadas no mesmo ponto deveriam ter os mesmos valores. Devido a erros atribuídos a amostragem e/ou análises, isto não ocorre. Este efeito também é chamado de variância aleatória;
- variância espacial : é a diferença entre a variância “a priori” e o efeito pepita;
- efeito pepita puro : representa a variação espacial de um fenômeno totalmente aleatório, ou seja, de pares de pontos que não apresentam qualquer correlação a pequenas distâncias. Neste caso, não se deve utilizar o método geoestatístico;
- anisotropia : variogramas determinados ao longo de diferentes direções da jazida podem mostrar variações diferentes, indicando anisotropias da jazida. A anisotropia pode ser subdividida em : anisotropia geométrica, quando ocorre variações da amplitude, conforme as direções; anisotropia zonal, quando há variação do patamar, conforme as direções; e anisotropia mista, quando tanto o patamar quanto a amplitude variam conforme as direções (Figura 4);

- comportamento próximo à origem : o grau de continuidade da mineralização é dado pelo comportamento da mineralização próximo à origem. Podem ser descritos quatro tipos básicos de comportamento, descritos a seguir e que podem ser visualizados na Figura 5.

- parabólico : representa um alto grau de continuidade das amostras selecionadas. Pode ser exemplificado por um variograma construído a partir de dados de espessura de uma camada;

- linear : representa uma continuidade média das amostras, ou seja, uma grande homogeneidade à pequenas distâncias, aumentando progressivamente a medida que há o incremento destas distâncias. Este é um comportamento típico de muitos depósitos de minerais metálicos;

- efeito pepita : apresenta uma descontinuidade na origem, que pode ser reflexo de dois fatores - erros de medida na amostragem e micro variabilidades;

- efeito pepita puro : reflete a variação espacial de um fenômeno de transição onde para um dado valor de patamar a amplitude terá um valor infinitesimalmente menor que as distâncias de observação (Journel & Huijbregts, 1978). É de difícil ocorrência em mineralizações, mas sua ocorrência implica na não utilização do método geoestatístico de interpolação .

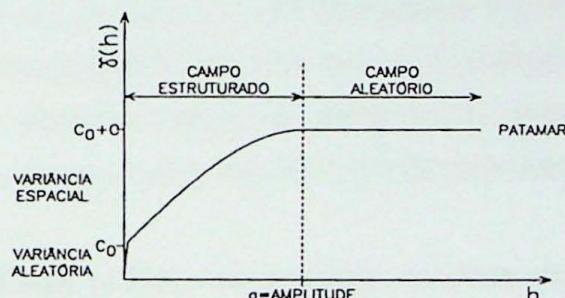


Figura 3 : Variograma típico e suas propriedades (Yamamoto & Bettencourt, 1992)

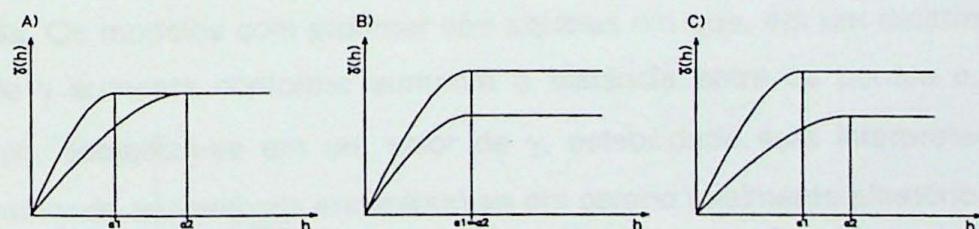


Figura 4 : Anisotropias : A) geométrica, B) zonal e C) mista

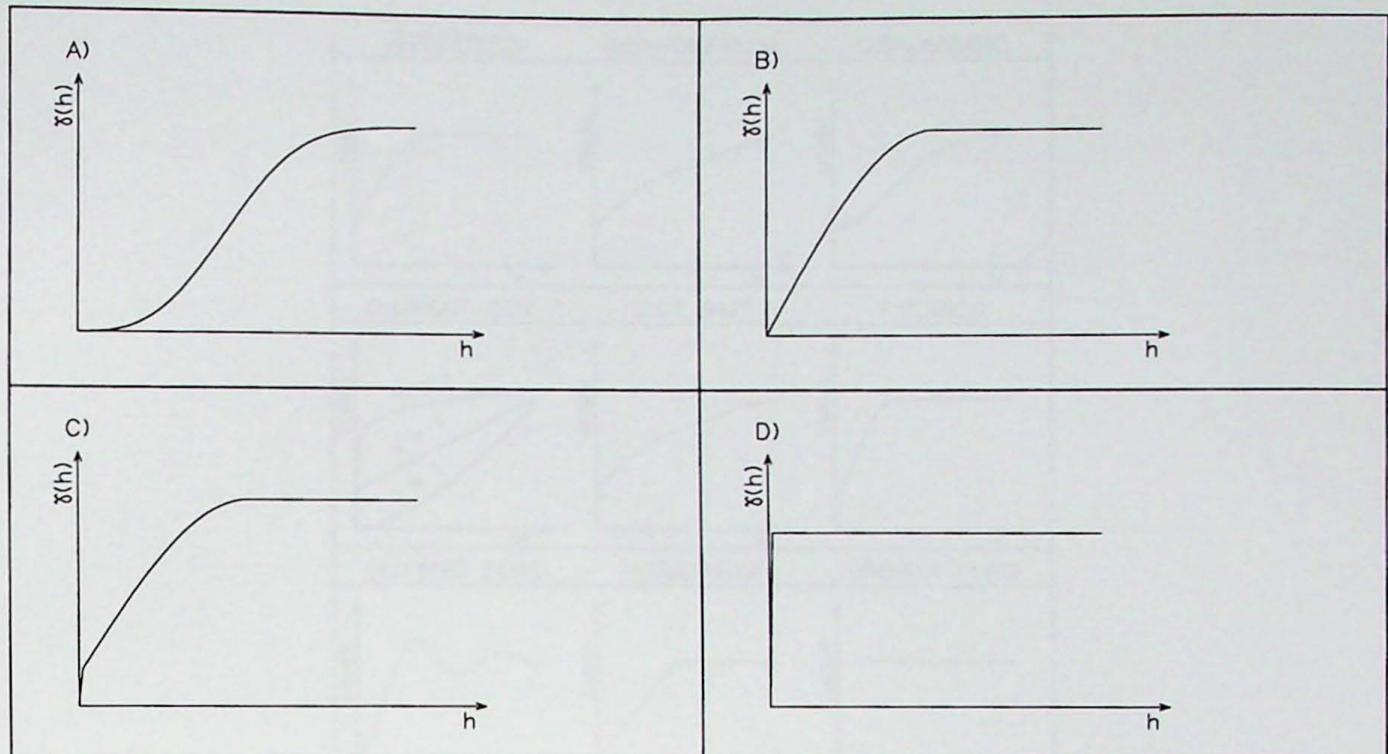


Figura 5 : Comportamento do variograma na origem : A) parabólico, B) linear, C) efeito pepita e D)efecto pepita puro (segundo Bubenicek & Haas, 1969)

5.3 - Modelos Teóricos de Variogramas

Devido ao fato de se querer inferir a estrutura de um depósito e o comportamento das variações de teores em áreas não amostradas a partir de um conjunto de pontos amostrados, deve-se ajustar o semivariograma experimental a um modelo matemático conhecido. Yamamoto (1992) escreve que a correlação do modelo construído ao modelo teórico é feita de maneira interativa, com um programa de computador. O ajuste deste semivariograma experimental a modelos teóricos fornece as informações para se proceder à krigagem.

Segundo Clark (1979), os modelos teóricos de semivariograma são divididos em dois grupos : os modelos sem patamar, onde o valor de γ aumenta com a distância (h) e os modelos com patamar, onde o valor de γ permanece constante a partir de uma determinada distância. Os modelos com patamar são aqueles em que, em um determinado momento, o valor de γ aumenta conforme aumenta a distância entre os pontos e, em um segundo momento, estabiliza-se em um valor de γ , estabilidade esta interpretada como sendo o momento onde as variáveis encontram-se em campo totalmente aleatório. Os modelos mais utilizados são o esférico, ou de Matheron, o exponencial e o Gaussiano. Podem ser citados ainda, o modelo potencial e o logarítmico. A Figura 6 apresenta as equações dos modelos de semi-variogramas citados bem como os seus respectivos gráficos.

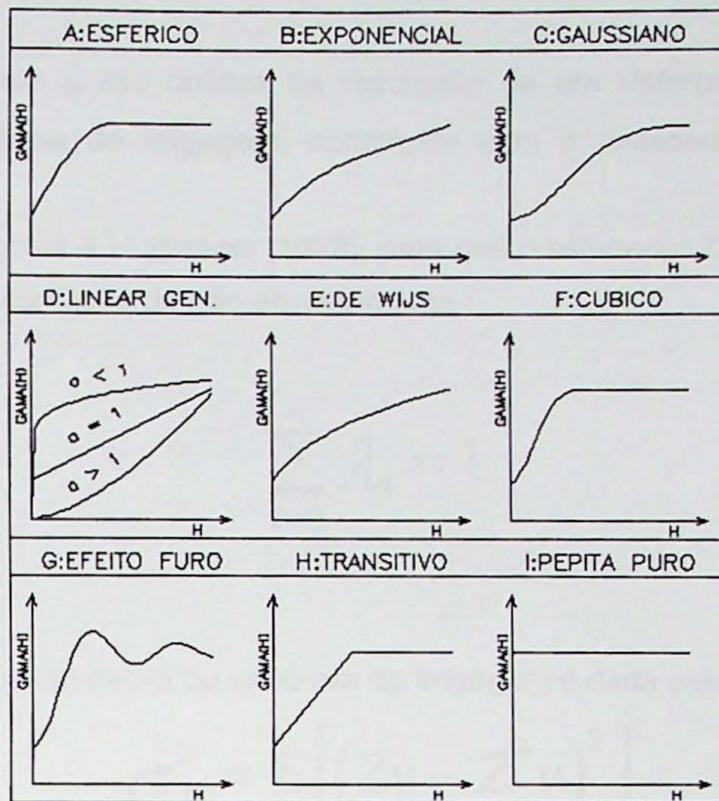


Figura 6 : Modelos de variogramas teóricos

5.4 - Krigagem

Técnicas de estimativa, como o Inverso da Potência da distância, utilizam um ponderador médio de valores de amostras para estimar blocos de um depósito. Os ponderadores são uma função do bloco e da geometria da amostra e de algumas idéias da variação do depósito mineral, mas não fazem referência para a particular variabilidade do corpo mineral em estudo. Além disso, estas técnicas não permitem uma determinação da confiabilidade das estimativas, ou seja, o erro associado, chamado variância de estimativa. Este procedimento, que propicia o melhor estimador linear não enviesado, é conhecido como krigagem (Brooker, 1979).

A krigagem é realizada após a conclusão dos estudos geoestatísticos, que definem um modelo de variograma que servirá na inferência dos valores de variância e covariância que serão utilizados pelos métodos geoestatísticos de interpolação.

Segundo Conde (1994) a krigagem é um método que permite estimar um valor desconhecido Z^*v associado a um ponto, área ou volume, a partir de um conjunto de n dados disponíveis.

O estimador Z^*v é obtido na forma de uma combinação linear dos dados disponíveis, conforme a equação :

$$Z^*v = \sum_{i=0}^n \lambda_i Z(x_i)$$

onde os ponderadores λ_i são obtidos na resolução de um sistema linear de equações, denominado de sistema de krigagem, construído com a finalidade de não enviesar a estimativa.

Conforme Journel & Huijbregts (1978), para que o estimador Z^*v não seja enviesado, basta garantir que a condição de não enviesamento :

$$\sum_{i=0}^n \lambda_i = 1$$

seja satisfeita.

A variância da estimativa ou variância da krigagem é dada pela seguinte equação:

$$\sigma_E^2 = E[(Zv - Z^*v)^2]$$

O objetivo da krigagem é encontrar o conjunto de ponderadores com mínima variância de krigagem.

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

Segundo Brooker (1979), os procedimentos para a realização da krigagem são:

- análise estrutural para determinação do semi-variograma;
- seleção de amostras para serem utilizadas na avaliação de um bloco;
- cálculo do γ do sistema de equações de krigagem;
- solução do sistema de equações visando a obtenção dos melhores ponderadores;
- uso destes resultados no cálculo do bloco a ser estimado e a variância de estimativa associada.

6 - MINA DE CAJATI

6.1 - Localização e Acessos

A Mina de Cajati localiza-se no Sudoeste do Estado de São Paulo, na região conhecida como Vale do Ribeira (Figura 7). Situa-se a aproximadamente oito quilômetros do município de Cajati, o qual dista 229 quilômetros da cidade de São Paulo.

O acesso a este município se dá pelo Km 488 da Rodovia Régis Bittencourt (BR-116), que liga as cidades de São Paulo e Curitiba.

A empresa Serrana de Mineração S.A. é a responsável pela operação do Complexo Industrial de Cajati, onde é lavrado e beneficiado o minério apatítico, proveniente da rocha carbonatítica.

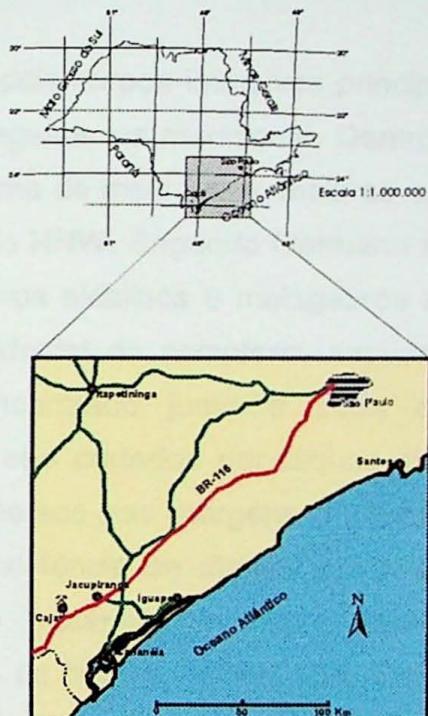


Figura 7 : Mapa de localização da área (modificado de Relatório Interno Serrana)

6.2 - Geologia Regional

A área onde situa-se a Mina de Cajati é constituída por rochas alcalinas englobadas sob a designação genérica de “Complexo Ultramáfico-Carbonatítico de Jacupiranga”, ocorrência brasileira clássica de rochas alcalinas.

A estrutura foi descoberta em 1877 por Bauer e investigada preliminarmente por Derby (1891) e Hussak (1892, 1895). O melhor estudo realizado na região foram os realizados por Melcher (1954, 1966), onde foi sugerida uma origem magmática para os carbonatitos intrusivos nos jacupiranguitos.

Situado próximo às bordas da Bacia do Paraná, em uma região de intensa atividade magmática alcalina e que inclui diversas ocorrências de material carbonatítico. Determinações radiométricas K/Ar e Rb/Sr (Amaral, 1978, Roden *et. al.*, 1985) indicam uma idade aproximada de 131 ± 3 Ma, interpretada por Herz (1977) como correspondendo a um local de um difuso *hot spot* em uma série de juntas tríplices, formadas quando da abertura inicial do Atlântico Sul.

O condicionamento tectônico da intrusão ao Arco de Ponta Grossa, uma estrutura de direção NW-SE e ativa, desde Paleozóico, vem sendo admitida por vários autores (Almeida, 1977; Algarte, 1972; entre outros). Ferreira & Algarte (1979) propuseram a sua associação a um dos quatro lineamentos relacionados àquela estrutura, o de Guapiara.

O Complexo de Jacupiranga exibe forma ovalada, com $10,5 \times 6,7$ Km, segundo NNW e acha-se encaixado em rochas pré-Cambrianas do Grupo Açuengui, com granodioritos a norte e mica xistos ao centro e sul. O mapa geológico do complexo pode ser observado na Figura 8.

A estrutura apresenta dois corpos intrusivos principais, constituídos por dunitos na região setentrional e jacupiranguitos na meridional. Dentro deste último corpo, na porção SW ocorrem ijolitos, sob a forma de meia-lua e, mais ao centro, carbonatitos, sob a forma de um corpo alongado segundo NNW. Segundo Germann *et al.* (1987), rochas de natureza gabróide, incluindo desde gabros alcalinos e melagabros a quartzo monzonitos e quartzo sienitos, afloram na parte ocidental do complexo, enquanto que um enxame de diques (essexíticos e teralitos) é encontrado junto à zona de transição entre dunitos e jacupiranguitos, que também são cortados por diques sieníticos. Veios pegmatíticos de nefelina sienito aparecem dispersos nas margens do complexo. Além destas variedades, Melcher (1966) menciona a existência de diques ijolíticos, monchiquíticos e tinguaíticos, assim como a presença de material proveniente de processos de fenitização nas encaixantes regionais próximo às bordas da intrusão. Em trabalho mais recente, Gaspar (1989) propôs a eliminação do termo "jacupiranguito", considerando-o genericamente um clinopiroxenito.

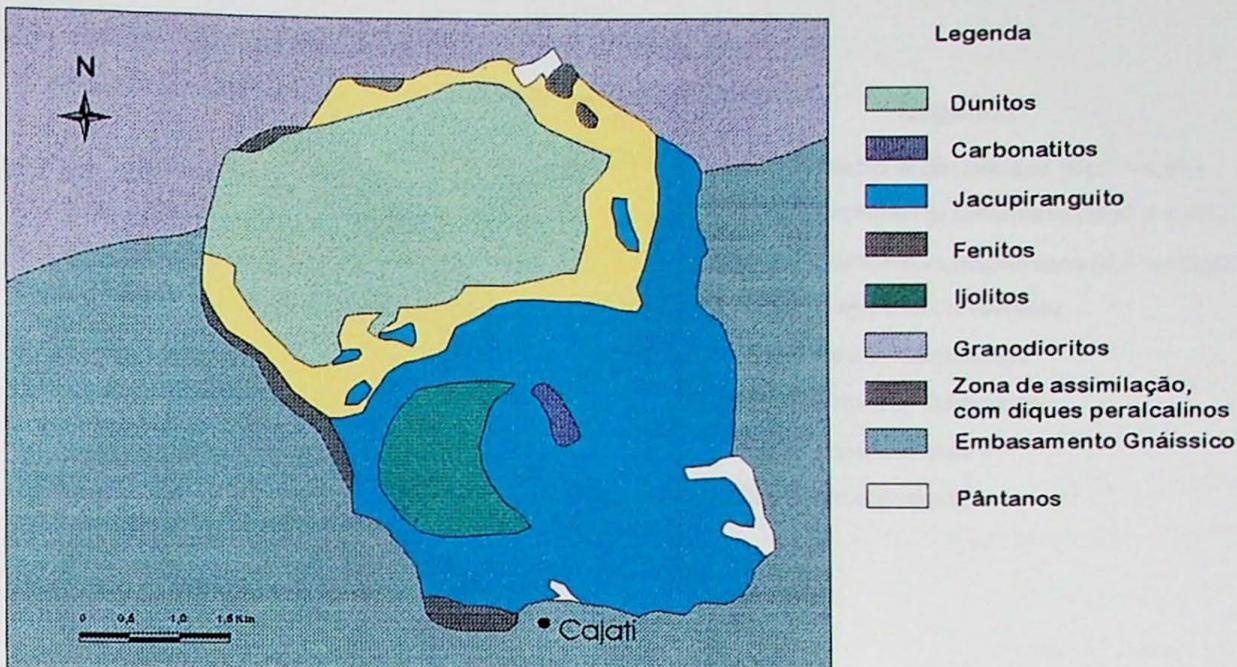


Figura 8 - Mapa geológico do Complexo Alcalino de Jacupiranga (modificado de Germann *et al.* 1987 *apud* Ruperti *et al.* 1992)

6.3 - Geologia Local

Os carbonatitos ocupam a parte levado do Morro da Mina, aflorando em área elíptica com diâmetros aproximados de 1000 m e 400 m. A elevação máxima original da ocorrência era de 225 metros, estando atualmente ao redor de 170 metros acima do nível do mar. Sondagens a diamante revelaram que os carbonatitos estendem-se a profundidades superiores a 400 metros abaixo do nível do mar.

O contato entre jacupiranguitos e carbonatitos mostra zonas de reação, com alternância de bandas milimétricas a decimétricas, ricas em silicatos e carbonatos. No interior do corpo carbonatítico ocorrem xenólitos de jacupiranguitos com diâmetros centimétricos a vários metros. ocorrem numerosos diques constituídos por carbonatos, apatita e magnetita, que em alguns casos, apresentam textura orientada e granulação mais fina que suas encaixantes.

Os principais elementos estruturais dos carbonatitos, como juntas, falhas, diques e estruturas fluidais, dispostos de maneira radial e concêntrica levaram Melcher (1965) a sugerir um corpo intrusivo na parte sul da ocorrência, cortado por sua vez por uma intrusão posterior com centro na parte norte.

Estudo recente (Gaspar, 1989) indica que o carbonatito resultou de 5 intrusões sucessivas que levaram a cinco diferentes tipos de carbonatito, de acordo com feições mineralógicas e petrográficas. A Figura 9 mostra o mapa geológico da Mina de Cajati.

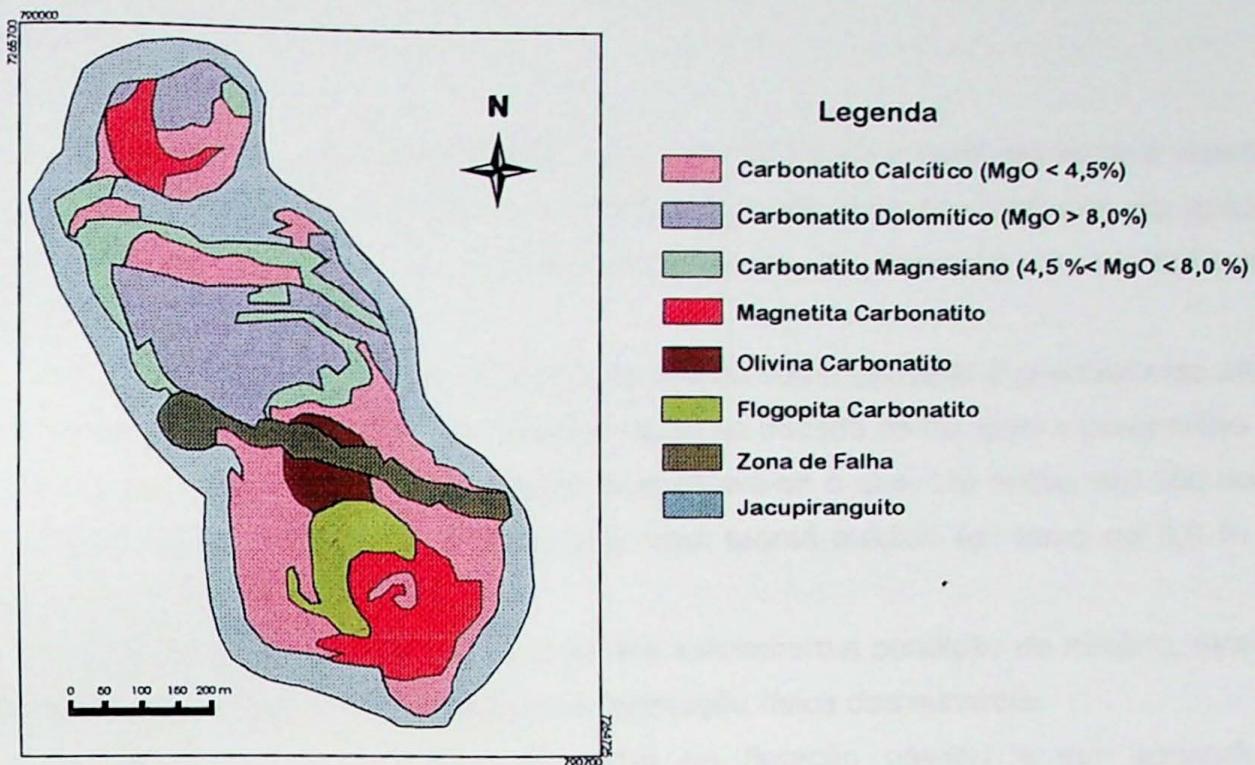


Figura 9 - Mapa geológico da Mina de Cajati (modificado de Ruperti *et. al.*, 1992)

Na Figura 10 pode-se observar a localização da cava atual da mina, bem como a localização da nova área anexada, que foi alvo dos trabalhos de pesquisa mineral, visando a ampliação das reservas.

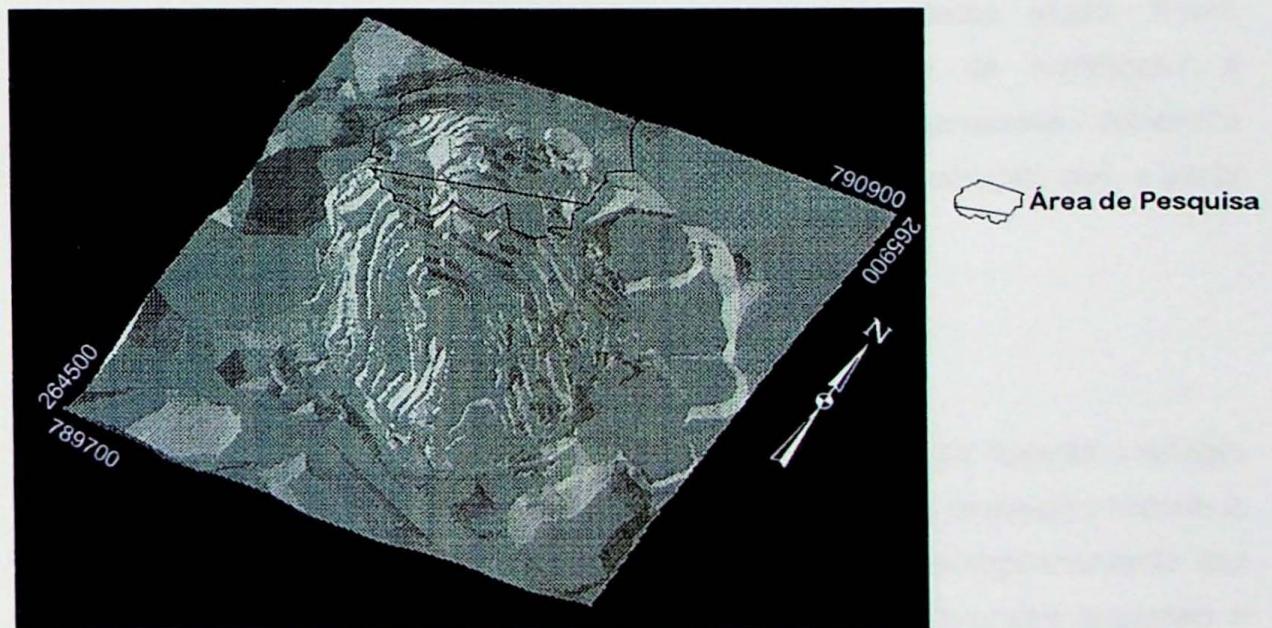


Figura 10 - Mapa de localização da cava atual e da nova área anexada à mineração

6.4 - Breve Histórico da Mina

A produção da Mina de Cajati iniciou-se em 1943 com a lavra de minério residual com altos teores (maiores que 20 % de P_2O_5), que consistia basicamente de apatita, magnetita e alguns argilo-minerais, todos provenientes da dissolução e lixiviação dos minerais carbonatados da rocha.

A base econômica da mina, centrada na apatita como principal e praticamente único mineral de minério, começou a sofrer transformação na década de 60, com a perspectiva de exaustão do material residual. Abaixo deste, encontrava-se o que, até então, era tido como protominério, constituído pelo carbonatito são, com teores médios em torno de 5,5 % de P_2O_5 .

A partir de 1969, o carbonatito e a apatita assumiram a condição de minério, através de processos tecnológicos que permitiram a separação física dos minerais.

Em 1972, o rejeito calcário da usina de flotação passou a ser aproveitado economicamente, tornando-se matéria-prima para a fabricação de cimento no próprio Parque Industrial.

Em 1985, estudos de reavaliação de reservas possibilitaram a sua elevação para mais de 300 milhões de toneladas de carbonatito até a cota -400.

A partir do final da década de 80, com o agravamento da crise na indústria de fertilizantes, procedeu-se a adequação dos chamados subprodutos, através do desenvolvimento de aplicações industriais para os mesmos. Deste modo, foram desenvolvidos mercados para os diferentes produtos originados da exploração e beneficiamento do carbonatito, tais como : calcário para *filler*, argamassas, corretivos agrícolas, bicálcio para alimentação animal, magnetita e brita para construção civil, a partir de áreas extremamente contaminadas com piroxenitos.

7 – MATERIAIS E MÉTODOS

Para a realização deste trabalho foram utilizados os dados obtidos durante o estágio realizado na Empresa Serrana de Mineração S. A. Neste estágio foram realizados trabalhos de campo para o inventário dos dados da pesquisa mineral, além do acompanhamento das sondagens realizadas na área anexa ao atual depósito, que foram descritas seguindo a padronização da Empresa. Estes dados foram utilizados na interpretação geológica, através de perfis geológicos verticais e horizontais.

Todas as quinze sondagens realizadas foram do tipo rotativa a diamante, com diâmetros H, BX e EX (98,8, 59,6 e 37,4 milímetros respectivamente).

A amostragem foi efetuada tomando-se amostras de carbonatito de três metros de comprimento. Para testemunhos com diâmetro H, utilizou-se metade do diâmetro do testemunho, que foram serrados com serra diamantada. Para os demais diâmetros, utilizou-se um quarto do diâmetro do testemunho.

As amostras então foram devidamente preparadas nos laboratórios da Serrana e analisadas por fluorescência de Raios-X, para os elementos P_2O_5 e MgO .

Estes resultados foram anexados ao banco de dados do depósito, que foi coletado já em via magnética, em formatos ASCII e Excel.

Iniciou-se então a formatação deste novo banco de dados para o formato do software ISATIS da Empresa Geovariances, disponível nos laboratórios do Departamento de Geologia Econômica e Geofísica Aplicada do Instituto de Geociências. A análise estatística e geoestatística foram realizadas por meio do Isatis.

Antes da análise estatística, tratou-se de fazer a composição das amostras, utilizando um intervalo de dez metros, correspondente à altura das bancadas existentes na mineração.

A análise estatística consistiu na obtenção das distribuições de freqüência e dos parâmetros estatísticos dos dados.

Na análise geoestatística foram construídos variogramas experimentais direcionais para cada uma das variáveis, visando encontrar possíveis anisotropias. A partir destes variogramas, ajustou-se um modelo teórico que mais se adequasse aos variogramas experimentais.

Para a verificação deste ajuste, realizou-se uma validação cruzada deste novos dados, visando medir a confiabilidade do modelo, além de se fazer uma validação prévia da estimativa. A validação cruzada consiste na retirada de um ponto conhecido, para a sua estimativa, utilizando os parâmetros obtidos através do modelo teórico do variograma ajustado.

A partir desta validação, processou-se a estimativa dos teores através da krigagem ordinária de blocos. Para isso, foi gerado um modelo de blocos do depósito, utilizando os parâmetros utilizados na mineração, como, por exemplo, altura do bloco igual a altura das bancadas.

Como a estimativa é realizada por blocos, exportou-se os dados desta estimativa para uma planilha Excel, onde, aplicando-se a fórmula $R=VDT$, realizou-se a quantificação dos recursos/reservas do depósito.

Paralelamente a estas atividades, foi elaborado o modelo geológico tridimensional do depósito, a partir dos dados de geologia e dos perfis verticais e das seções horizontais elaborados anteriormente.

Os perfis verticais foram elaborados a partir da malha de sondagem proposta para esta área, ficando com espaçamento de 50 metros e, em áreas restritas, construíram-se perfis com espaçamento de 25 metros. As seções horizontais foram elaboradas a partir dos perfis verticais.

Optou-se por um espaçamento de 20 metros entre as seções, iniciando-se na cota 140, indo até a cota zero.

Para a modelagem do corpo, digitalizou-se estes perfis e seções utilizando-se o software Datamine, onde estes dados foram “linkados”, gerando o modelo tridimensional do corpo geológico.

8 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

A seguir, serão detalhadas as atividades desenvolvidas desde o início do projeto, tanto as realizadas na Empresa como as realizadas nos laboratórios do DGE-USP.

- **Revisão Bibliográfica**

Inicialmente, foi realizada uma revisão bibliográfica enfocando a geologia da área em estudo, além de uma revisão nos conceitos de geoestatística e avaliação de reservas, escopo deste trabalho.

Esta revisão levou em conta tanto trabalhos de cunho acadêmico quanto relatórios internos da Empresa Serrana, detentora dos direitos minerários da área.

- **Trabalhos de Campo / Aquisição dos Dados**

Paralelamente à atividade de revisão bibliográfica, foram acompanhados na Empresa os trabalhos de sondagens realizadas em uma área adjacente à mina, sondagens estas que objetivaram um aumento das reservas atualmente conhecidas. Nesta etapa, acompanhou-se desde as discussões para a locação dos furos até a descrição dos testemunhos. Foram realizados e descritos 15 (quinze) furos de sondagem, acompanhados pelo Geólogo João Henrique Grossi Sad, da Geosol Geologia e Sondagem, empresa encarregada da realização das sondagens.

Para esta etapa de amostragem, estabeleceu-se o critério de se fazer amostras contínuas de carbonatito, com comprimento de 3 (três) metros. Como ao longo dos furos ocorriam reduções de diâmetro com o aumento da profundidade, optou-se por amostrar um quarto dos testemunhos com diâmetro H, e metade dos testemunhos com diâmetro BX e EX. Cabe ressaltar que os testemunhos foram serrados com serra diamantada da própria Geosol. As análises químicas destas amostras foram realizadas nos laboratórios da própria Serrana, onde foram analisados os teores de P_2O_5 e MgO , através da técnica de fluorescência de Raios-X.

À medida que foram realizados os furos de sondagem, foram construídos perfis geológicos, utilizando os dados de campo e das descrições dos furos, a fim de se poder elaborar um modelo do corpo geológico desta nova área.

Estes dados foram anexados ao banco de dados da Empresa e compõem o novo banco de dados que será o objeto de estudo deste projeto.

- Análise Estatística

A próxima etapa a ser cumprida foi a análise estatística dos dados, realizadas nos laboratórios do DGE-USP. Nesta etapa, utilizou-se o banco de dados preparado na Empresa, já com os novos dados de sondagem anexados.

A partir da aquisição destes dados, iniciou-se a confecção do arquivo de dados para o Software Isatis, ferramenta utilizada na análise estatística e geoestatística.

Por se tratar de um software novo, a passagem dos dados para o formato deste programa foi a etapa que apresentou a maior dificuldade em todo projeto.

Vencida esta fase, foi feita a análise estatística dos dados. Para isso, foi realizada a regularização das amostras, utilizando um intervalo de dez metros. A regularização é efetuada devido ao fato das análises químicas representarem valores pontuais, amostradas em um determinado ponto X. Como a lavra será realizada em um volume significativamente maior, deve-se conhecer os teores do furo ao longo de uma espessura constante. A regularização, ou ainda, composição das amostras, pode ser realizada ao longo dos furos ou ao longo de espessuras constantes. O intervalo de dez metros foi o escolhido por se tratar da altura das bancadas atualmente existentes na mina. Para isso, foi utilizada a seguinte fórmula de teor composto :

$$TC = \frac{\sum teor * espessura}{\sum espessura}$$

Com estes novos dados, foram calculados alguns parâmetros estatísticos para o P_2O_5 e MgO , as duas variáveis analisadas para a avaliação, a fim de se observar a presença de valores discrepantes ou anômalos, presentes no conjunto de dados.

Deve-se ressaltar que o mineral de minério aproveitado na mineração é a apatita, na qual o P_2O_5 é retirado para a produção de fertilizantes fosfatados. O interesse pelo teor de MgO se dá pelo fato do rejeito carbonatítico ser aproveitado na produção de cimento, no qual o teor de magnésio é um dos limitantes.

Neste mesmo estudo estatístico, foram construídos histogramas e curvas acumulativas das duas variáveis, para se verificar a distribuição de freqüências destes dados. Um outro objetivo tarefa, correspondeu a tentar identificar e separar diferentes populações que por ventura estejam presentes no conjunto dos dados. A presença de duas ou mais populações implica na realização de estudos distintos para cada uma delas.

Na análise realizada, separou-se o conjunto inicial de dados em três regiões distintas, que foram nomeadas, respectivamente Região Sul, Central e Norte. Esta separação levou em conta a análise dos histogramas e curvas acumulativas do MgO.

A seguir, foram calculados os parâmetros estatísticos de cada uma das populações identificadas anteriormente, comprovando a presença de características distintas entre elas. Estes parâmetros são a média, desvio padrão, variância, grau de assimetria e coeficiente de curtose. Procurou-se também observar alguma possível correlação entre os teores de P_2O_5 e MgO, primeiramente na totalidade das amostras e, a seguir, nas sub-populações identificadas.

- Análise Geoestatística

A partir do conhecimento dos parâmetros estatísticos, tratou-se de iniciar a análise geoestatística dos dados. Esta análise é a principal etapa do projeto, pois é a partir dela que serão obtidos os parâmetros que serão utilizados na estimativa dos teores, no processo conhecido por krigagem.

Como foi mencionado no tópico anterior, a partir do momento em que separou-se o conjunto principal de dados em três partes distintas, toda as análises seguintes foram realizadas de forma independente para cada uma das populações.

A primeira tarefa realizada nesta análise foi a construção de variogramas direcionais experimentais. Para isso, foi levado em conta a dimensão da malha de sondagens, que está relacionada à distância h entre os pares de pontos que serão utilizados para a obtenção do variograma.

Neste trabalho, a disposição das sondagens ocorre de forma irregular, resultado de inúmeras fases de pesquisa mineral efetuadas no depósito ao longo dos anos. Com isso, adotou-se uma distância média entre os furos para cada uma das regiões estudadas, afim de facilitar o estudo.

A escolha das direções levou em conta a natureza intrusiva do depósito. Assim, foram escolhidas três direções para a análise : duas contidas no plano horizontal e perpendiculares entre si (D1 e D2) e a terceira contida no plano vertical (D3), ou seja, que analisaria a variabilidade dos dados ao longo do sentido da colocação do corpo intrusivo.

Deste modo, foram obtidos os variogramas experimentais para cada uma das variáveis presentes nas três regiões de análise.

De posse destes variogramas experimentais, tratou-se de fazer o ajuste de um modelo teórico, cujas propriedades são conhecidas.

O ajuste foi realizado levando-se em conta os três variogramas direcionais obtidos para cada uma das variáveis. Primeiramente, procurou-se determinar qual modelo de variograma melhor se ajustaria aos variogramas experimentais. Posteriormente, determinou-se os parâmetros dos variogramas, ou seja, efeito pepita, patamar e amplitude. Neste estudo, foi levado em conta a presença de anisotropias nas diferentes direções estudadas, sendo determinados também, os coeficientes de anisotropia. Ao mesmo tempo em que é realizado o cálculo da estimativa dos teores, é calculado o erro associado a esta estimativa, apresentado sob a forma de histograma de distribuição do erro.

Para se conhecer a confiabilidade destes ajustes, foi realizada a técnica conhecida por validação cruzada. Esta técnica consiste, de maneira geral, na estimativa do teor de um ponto amostrado. Este ponto é retirado do conjunto e estimado a partir dos parâmetros dos variogramas ajustados. Para isso, é adotado um intervalo de confiança, a partir do qual os valores estimados podem ser considerados aceitáveis. Esta validação corresponde a uma estimativa pontual.

Feita esta verificação, pode-se iniciar a estimativa dos teores para todo o depósito, através da krigagem.

- Krigagem Ordinária

Antes de iniciar a estimativa dos teores, foi elaborado um modelo de blocos do depósito, a fim da estimativa ser realizada para cada um dos blocos. As dimensões dos blocos foram determinadas a partir das dimensões dos blocos de lavra atualmente praticados na Mina de Cajati. Assim, as dimensões dos blocos foram assim definidas como 25 m x 25 m x 10 m.

A partir da criação deste modelo, procedeu-se com o processo de krigagem de blocos. Para isso, foram considerados os parâmetros variográficos anteriormente obtidos.

Para a execução da krigagem foram definidos os chamados parâmetros de vizinhança, que irão balizar o processo de estimativa. Estes parâmetros consistem, basicamente, na determinação do número de setores angulares em que será feita a busca de amostras; o número máximo e mínimo e ideal de amostras utilizadas por setor para a estimativa e os raios de busca. Estes raios correspondem aos valores das amplitudes obtidas nos variogramas, representam a distância a partir da qual os dados passam do campo estruturado para o campo aleatório.

Após o cálculo da estimativa dos teores, procedeu-se com a seleção dos valores acima do teor de corte adotado pela Serrana como economicamente viável para a lavra, que corresponde a teores de P_2O_5 maiores que 3 %. Como já foi mencionado, o MgO , não possui um teor mínimo de corte, pois este teor serve apenas para definir a utilização ou não do rejeito carbonatítico na produção de cimento.

Ao realizar o cálculo de estimativa dos teores, o próprio software mostra a variância associada a este cálculo. Deste modo, ao final do trabalho pode-se determinar o erro associado ao número final das reservas.

- Cálculo de Recursos/Reservas

Estimado os teores nos blocos, pode-se agora calcular o volume total de minério da reserva.

O passo seguinte à estimativa dos teores foi a exportação dos dados selecionados para uma planilha Excel. A planilha apresenta o teor estimado do centro de cada bloco. Conhecendo este teor, e sabendo as dimensões do bloco, previamente determinadas quando da construção do modelo de blocos, pode-se calcular o novo recurso/reserva. Para isso, adota-se a seguinte fórmula : $R=VDT$, onde R corresponde aos recursos/reservas; V é o volume do bloco, de dimensões $25 \times 25 \times 10$ m; T é o teor krigado para cada bloco; e D corresponde à densidade aparente do minério, determinado em $2,7$ ton/m³, a partir de ensaios realizados na própria Serrana e adotados nos cálculos da Empresa.

O recurso final corresponderá à soma dos valores dos blocos.

- Modelagem do Corpo de Minério

As atividades que culminaram com a obtenção do corpo de minério modelado tridimensionalmente, iniciaram-se ainda durante o estágio realizado na Empresa Serrana, onde foram acompanhadas as sondagens na área de ampliação da mina.

Como mencionado no item correspondente, após a elaboração de perfis verticais e seções horizontais desta nova área, estas foram passadas para computador através de digitalização, utilizando o software Datamine. Feito isso, iniciou-se o processo de "linkagem" das seções, visando o modelo tridimensional do depósito.

Esta "linkagem" levou em conta informações sobre a geologia do corpo, considerando sua natureza intrusiva.

As dificuldades encontradas nesta etapa merecem ser mencionadas. Por se tratar de um corpo intrusivo, algumas apófises deste corpo principal apresentavam-se descontínuas de uma seção horizontal para outra. Mesmo quando ocorria esta continuidade, a forma dos corpos não eram similares, dificultando, e muito, a ligação das diversas seções.

O modelo geológico do corpo lavrado foi obtido junto à Empresa, cujos trabalhos de interpretação delimitaram o corpo até cota de 400 metros abaixo do nível do mar.

Utilizando o software Vulcan, disponível dos laboratórios do IGc, fez-se a adição destes dois modelos, chegando-se ao novo modelo do corpo carbonatítico.

Deste modo, pode-se visualizar a forma deste novo corpo no espaço, além de já se conhecer os teores, previamente estimados pela krigagem.

9 - RESULTADOS OBTIDOS E DISCUSSÃO

9.1 – Análise Estatística

Os novos dados da área de pesquisa foram anexados ao banco de dados já existente do depósito, constituindo no novo banco, objeto dos estudos seguintes.

Antes de iniciar os cálculos dos parâmetros estatísticos, fez-se a regularização das amostras. Para tanto, foi utilizada a regularização por bancadas, adotando-se uma altura de dez metros, que é atualmente a adotada na lavra.

A Tabela 1, a seguir, mostra os parâmetros estatísticos dos dados sem a regularização. Na Tabela 2 observa-se os novos parâmetros, calculados a partir da regularização.

Tabela 1 : Parâmetros estatísticos dos dados, sem a regularização das amostras

	Média	Desvio Padrão	CV	Assimetria	Curtose
P₂O₅	4,798	1,754	0,365	0,038	3,244
MgO	4,202	2,131	0,507	0,799	3,095

Tabela 2 : Parâmetros estatísticos dos dados, após a regularização das amostras

	Média	Desvio Padrão	CV	Assimetria	Curtose
P₂O₅	4,828	1,652	0,342	0,093	3,364
MgO	4,086	1,855	0,454	0,937	3,441

Nota-se que, após a regularização das amostras, temos um pequeno aumento no valor da média da variável P₂O₅. Em relação ao MgO, nota-se uma pequena diminuição no valor da média. Os valores de desvio padrão para ambas as variáveis sofreram uma diminuição, o que já era esperado, pois a regularização tende a atenuar as variações que ocorrem por causa dos diferentes suportes.

Fazendo-se o histograma de distribuição de freqüências para os dados regularizados, obtém-se o resultado abaixo. Para a construção destes histogramas (Figuras 11 e 12), foram utilizadas 50 classes.

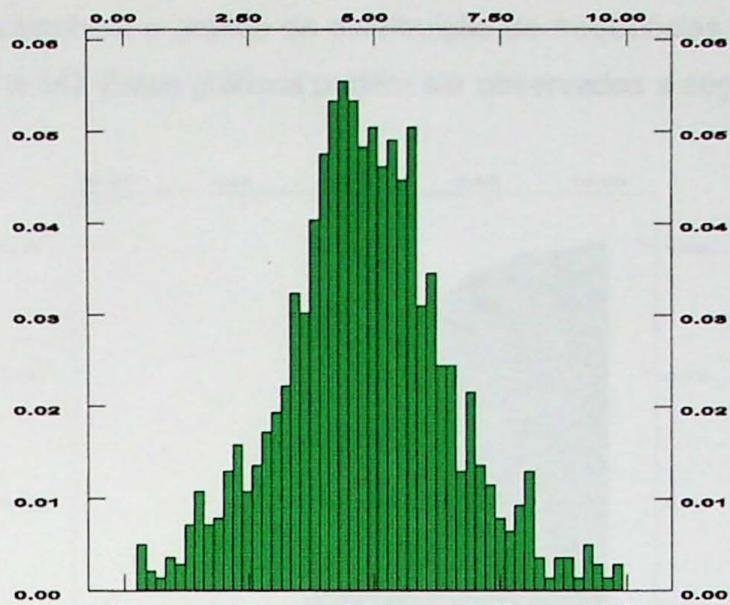


Figura 11 – Histograma de distribuição de freqüências dos teores de P₂O₅

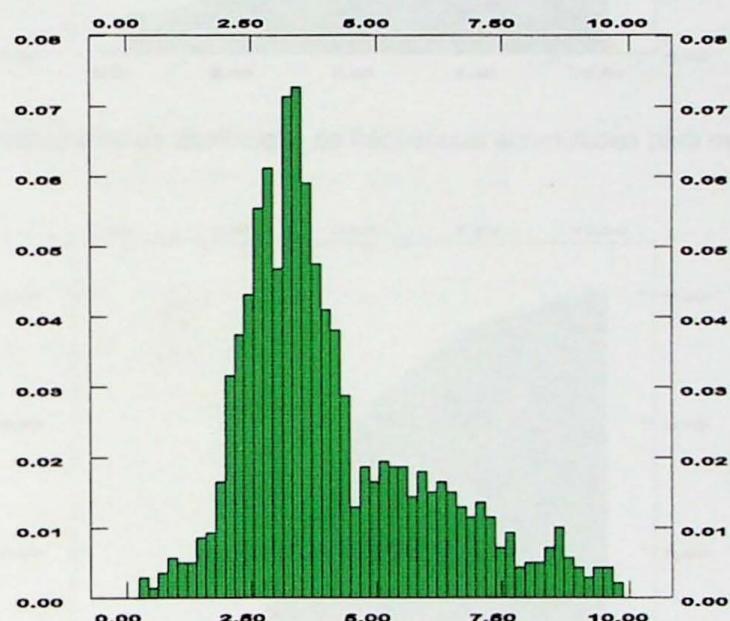


Figura 12 – Histograma de distribuição de freqüências dos teores de MgO

Nota-se pelos histogramas, que a distribuição das freqüências do P₂O₅ obedece a uma distribuição normal, comprovado pelo grau de assimetria, muito baixo (0,093). Já a distribuição dos teores de MgO obedece a uma distribuição lognormal, com assimetria positiva. Neste mesmo gráfico, nota-se que ocorre mais de uma população, que apresentam teores distintos. Esta ocorrência de mais de uma população presente nos teores de MgO será tratada mais adiante.

Analizando estas populações, pode-se perceber que as amostras que a compõem localizam-se em áreas restritas.

Construiu-se também o gráfico de distribuição de freqüências acumuladas para cada variável (Figuras 13 e 14). Estes gráficos podem ser observados a seguir :

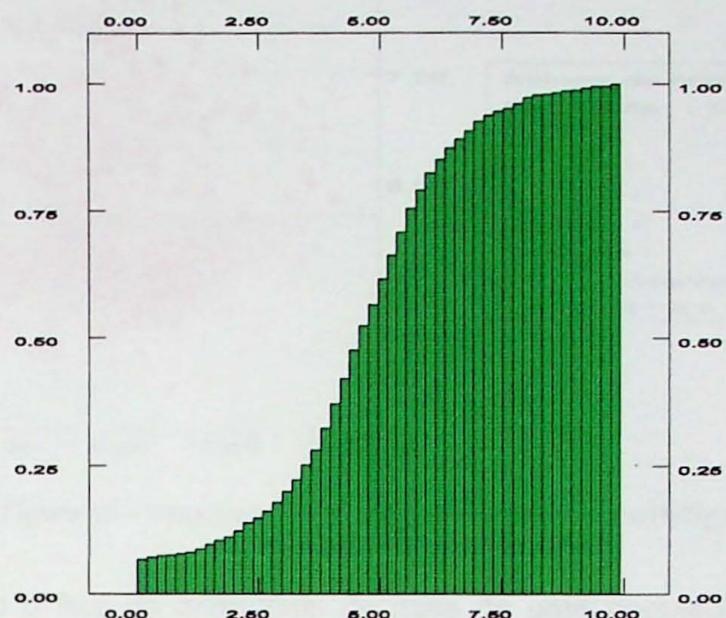


Figura 13 – Histograma de distribuição de freqüências acumuladas para os teores de P₂O₅

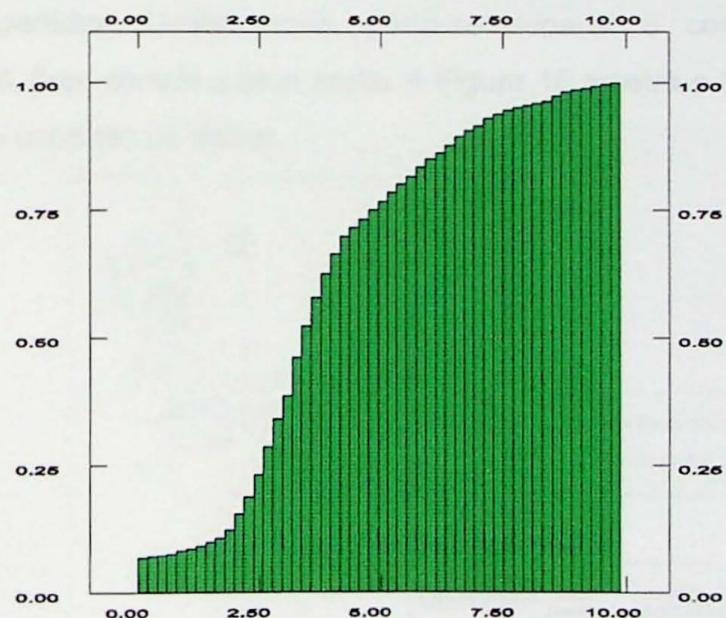


Figura 14 – Histograma de distribuição de freqüências acumuladas para os teores de MgO

A partir destes gráficos, já se pode tirar algumas interpretações preliminares do depósito. O teor médio de P₂O₅ está acima do teor de corte praticado na mineração. Pela Figura 13, observa-se que cerca de 75% dos valores encontram-se acima deste teor de corte.

Em relação à correlação entre estas duas variáveis, P₂O₅ e MgO, pode-se constatar, observando o diagrama da Figura 15, a seguir, que não há correlação entre elas, já que o coeficiente de correlação (0,0247) é praticamente nulo.

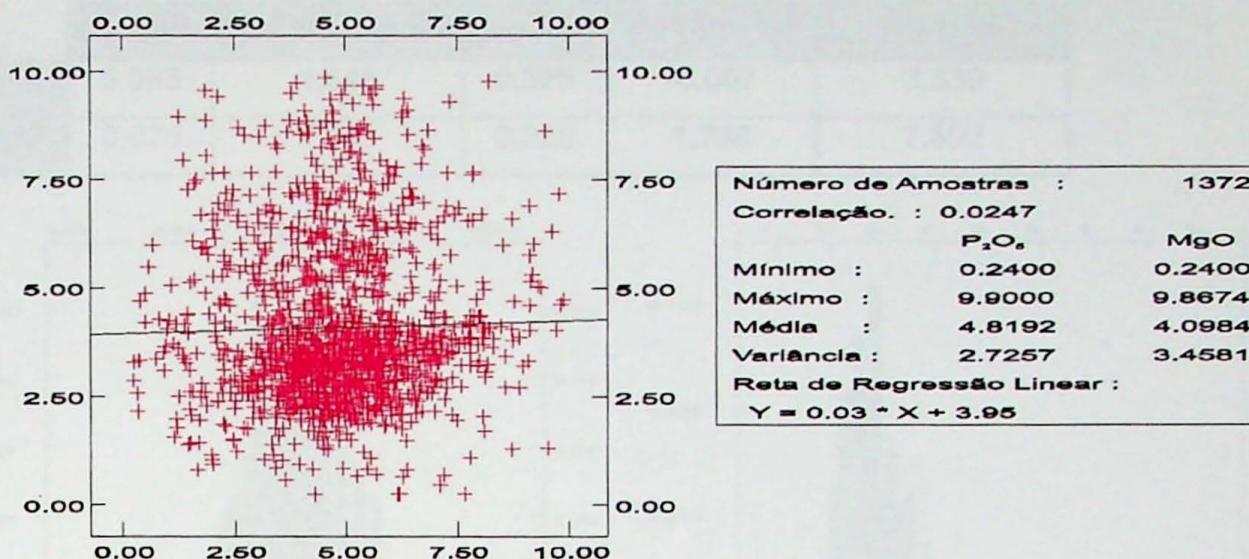


Figura 15 – Diagrama de dispersão entre os teores de P_2O_5 e MgO

Retomando o fato da ocorrência de mais de uma população nos teores de MgO , procedeu-se de maneira a isolar estas subpopulações e tratá-las isoladamente. Isso só foi possível por causa da localização das amostras de cada população, que encontram-se regionalmente separadas. Deste modo, pôde-se separar o conjunto em três partes, nomeadas área sul, área central e área norte. A Figura 16 mostra a localização de cada uma das populações no conjunto de dados.

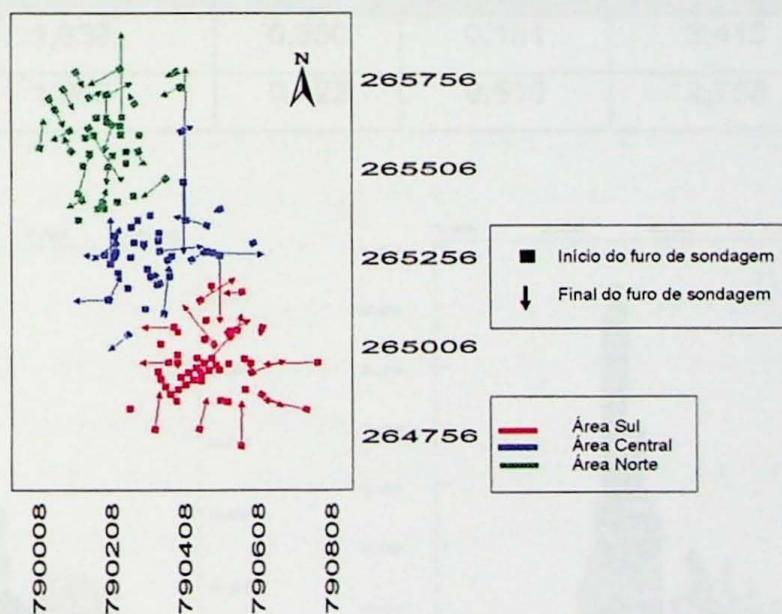


Figura 16 – Mapa de localização das 3 populações observáveis no conjunto de dados.

Construiu-se, para cada setor, o respectivo histograma de distribuição de freqüências, além da obtenção dos seus parâmetros estatísticos descritivos. O resultado pode ser observado nas tabelas e figuras a seguir.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos dos dados para a área sul

	Média	Desvio Padrão	CV	Assimetria	Curtose
P₂O₅	5,063	1,646	0,325	-0,007	3,339
MgO	3,075	1,041	0,339	1,736	7,892

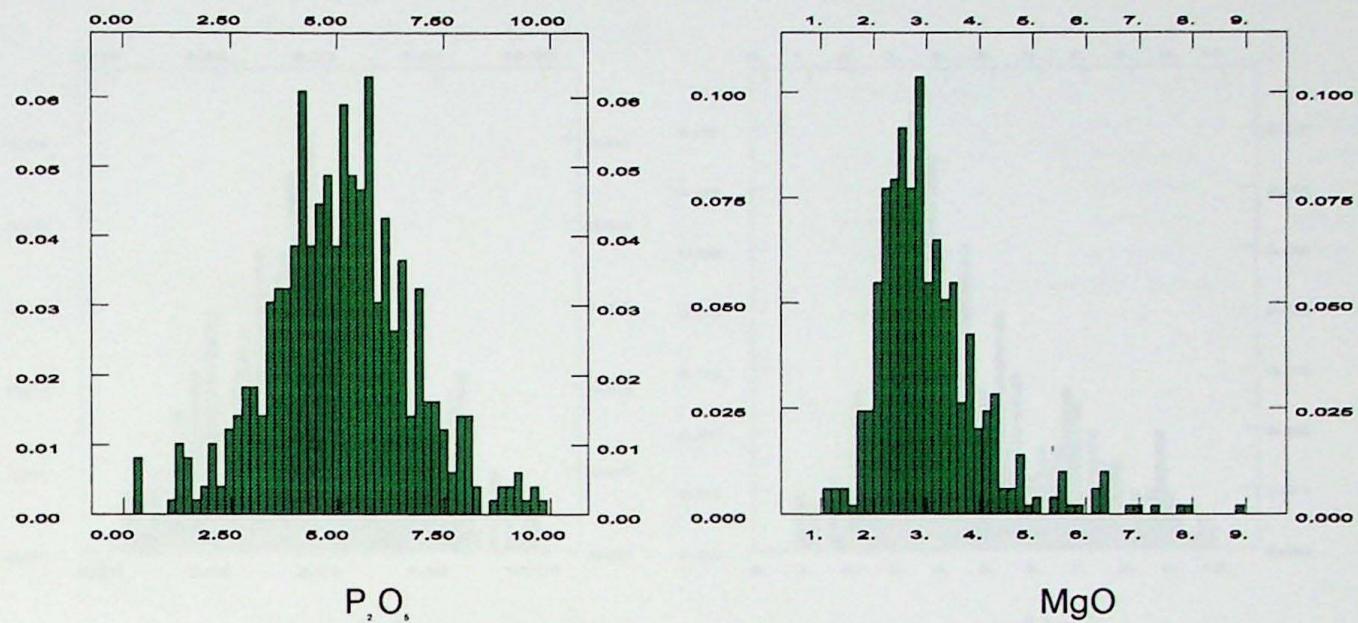


Figura 17 – Histogramas de distribuição de freqüências para a área sul

Tabela 4 – Parâmetros estatísticos dos dados para a área central

	Média	Desvio Padrão	CV	Assimetria	Curtose
P₂O₅	4,685	1,638	0,350	0,151	3,416
MgO	4,661	1,968	0,422	0,519	2,788

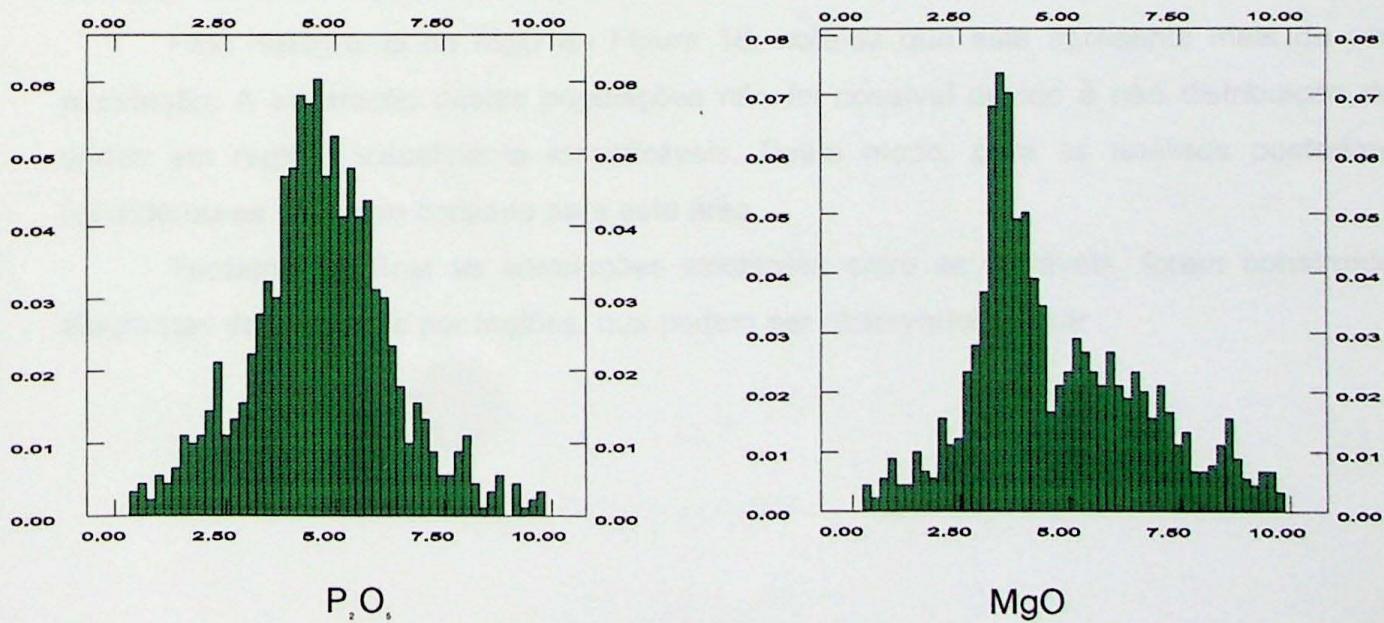


Figura 18 – Histograma de distribuição de freqüências para a área central

Tabela 5 – Parâmetros estatísticos dos dados para a área norte

	Média	Desvio Padrão	CV	Assimetria	Curtose	Curtose
P_2O_5	4,706	1,964	0,417	0,162	2,753	2,753
MgO	4,632	1,934	0,418	0,537	2,724	2,724

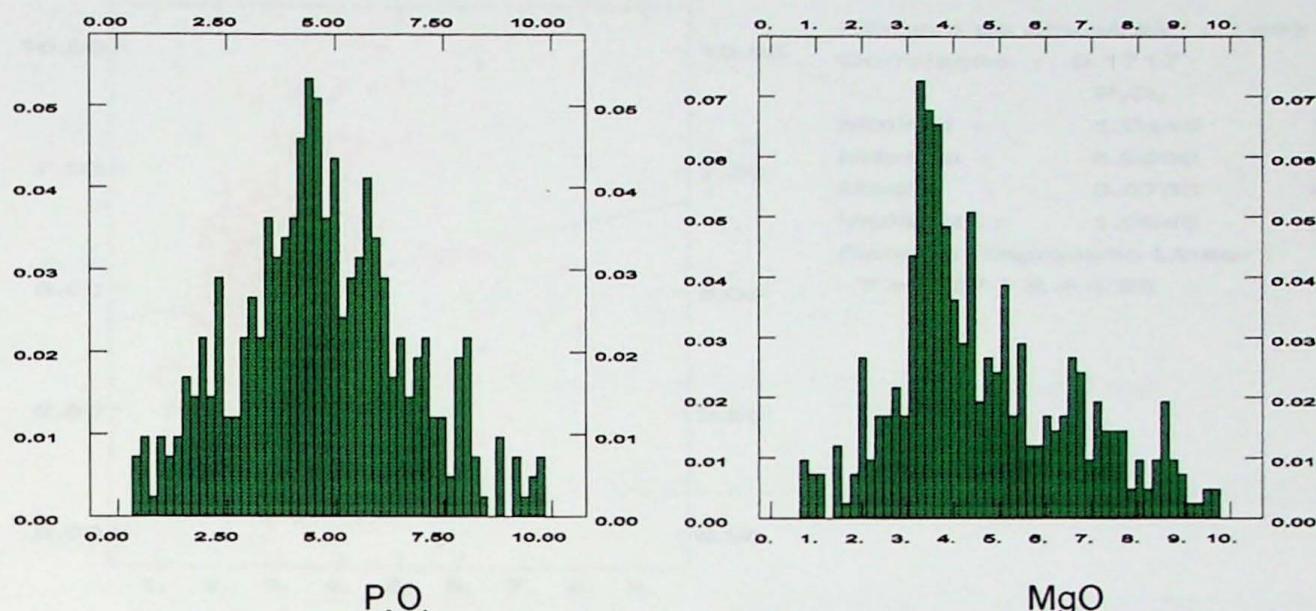


Figura 19 – Histograma de distribuição de freqüências para a área norte

Analizando estes dados, percebe-se que nas três áreas, os teores de P_2O_5 obedecem a uma distribuição normal, enquanto os teores de MgO obedecem a uma distribuição lognormal com assimetria positiva.

Os maiores teores de P_2O_5 encontram-se na área sul, que também apresenta os menores teores de MgO, constituindo-se em um minério mais calcítico.

Pelo histograma do MgO da Figura 18, nota-se que este apresenta mais de uma população. A separação destas populações não foi possível devido à não distribuição dos dados em regiões visualmente identificáveis. Deste modo, para as análises posteriores considerou-se um único conjunto para esta área.

Tentando verificar as correlações existentes entre as variáveis, foram construídos diagramas de dispersão por regiões, que podem ser observados seguir :

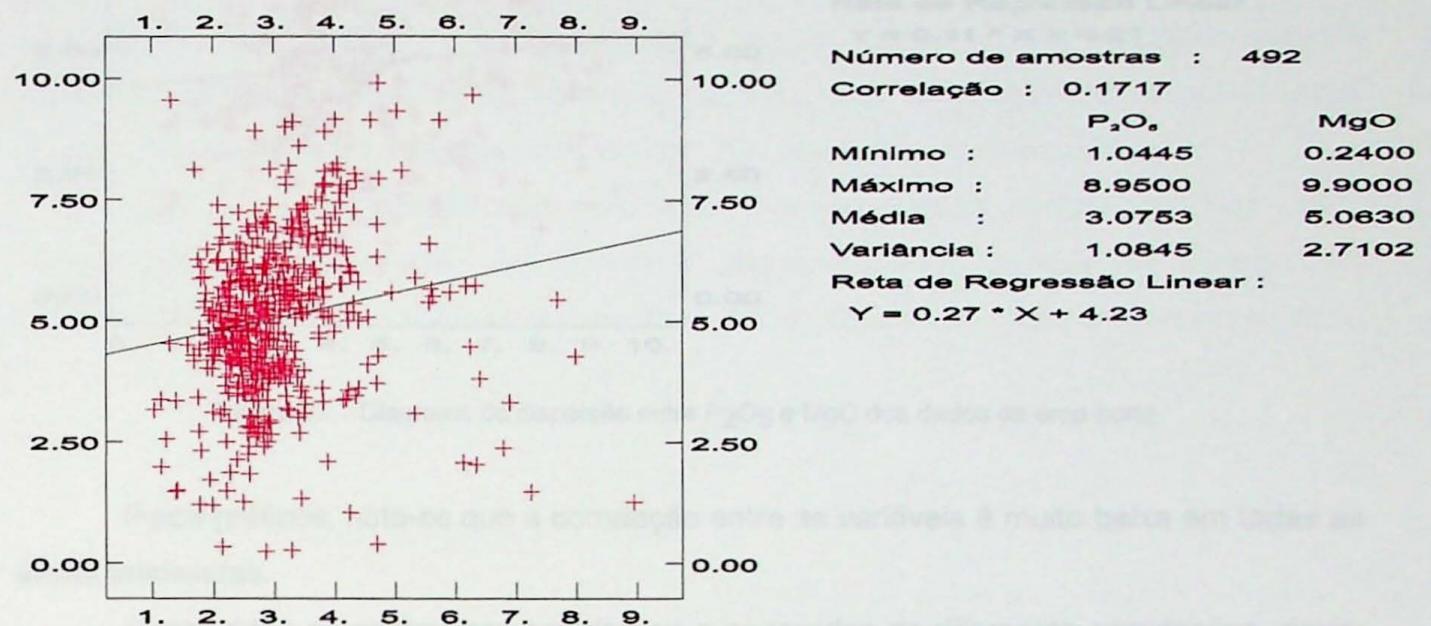


Figura 20 - Diagrama de dispersão entre P_2O_5 e MgO dos dados da área sul

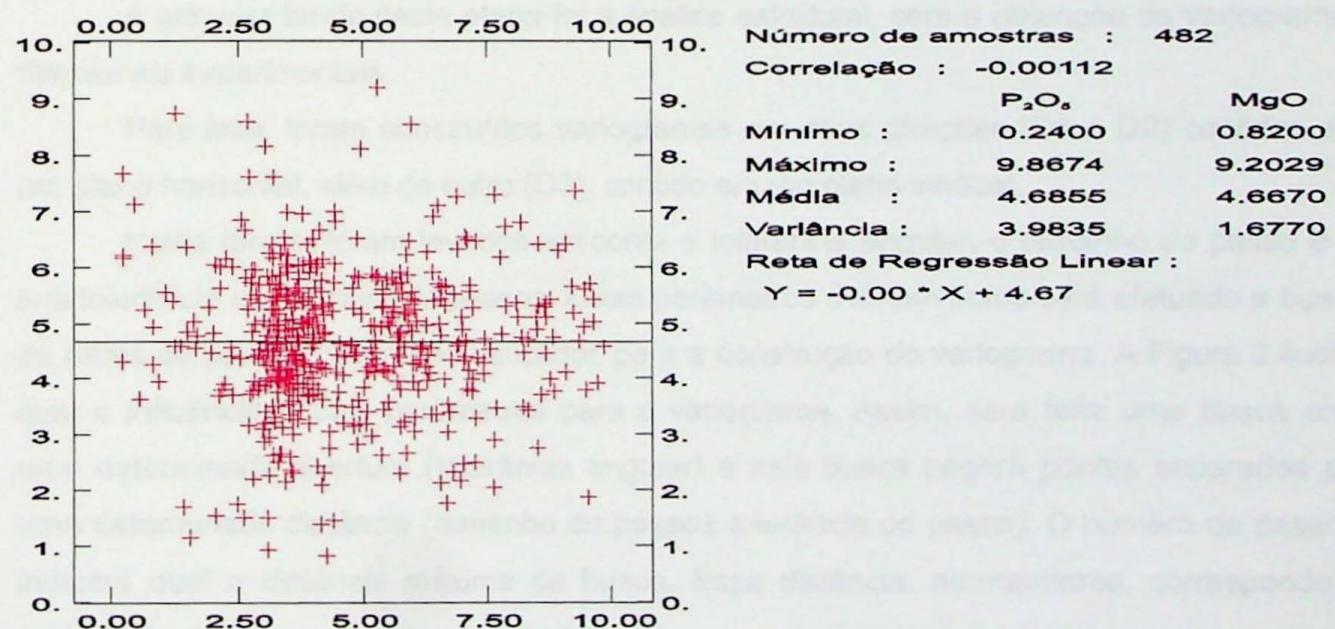


Figura 21 - Diagrama de dispersão entre P_2O_5 e MgO dos dados da área central

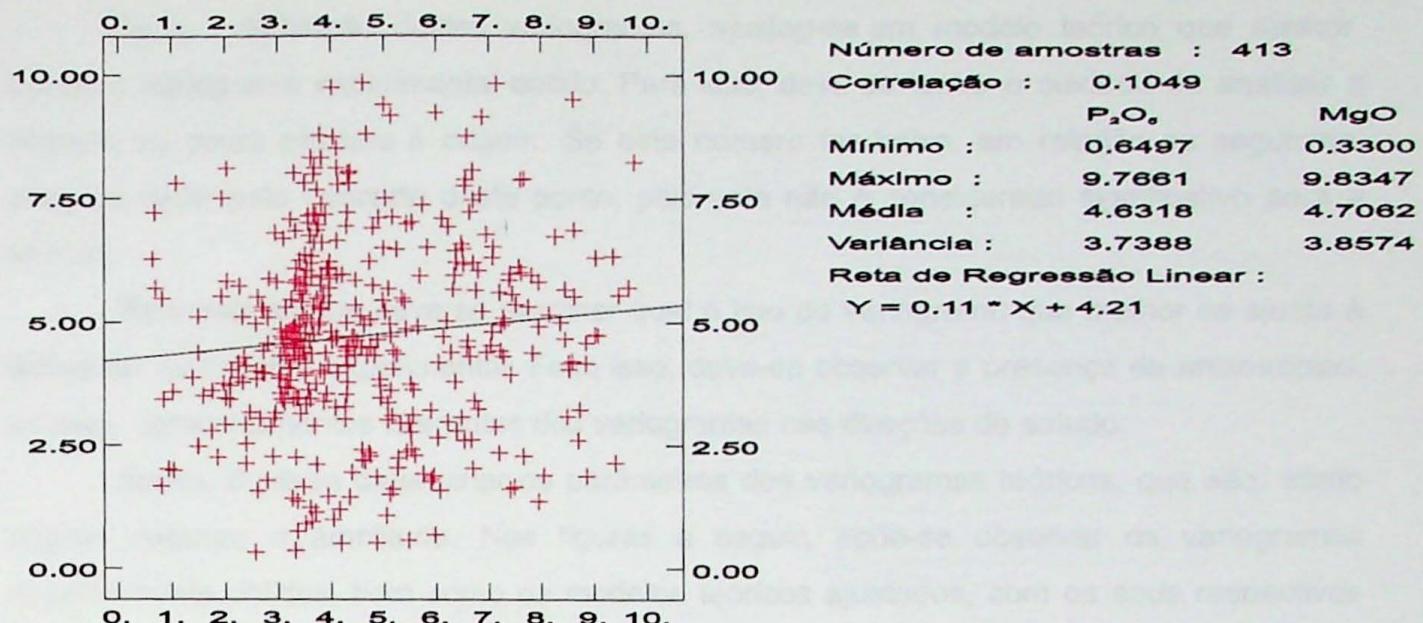


Figura 22 - Diagrama de dispersão entre P₂O₅ e MgO dos dados da área norte

Pelos gráficos, nota-se que a correlação entre as variáveis é muito baixa em todas as áreas analisadas.

Conhecidos os parâmetros estatísticos e separadas as diferentes populações, deve-se agora iniciar a análise geoestatística.

9.2 – Análise Geoestatística

A primeira tarefa desta etapa foi a análise estrutural, com a obtenção de variogramas direcionais experimentais.

Para isso, foram construídos variogramas em duas direções (D1 e D2) contidas em um plano horizontal, além de outro (D3), contido em um plano vertical.

Nesta tarefa, foram levados em conta a tolerância angular, o tamanho do passo e a sua tolerância e o número de passos. Estes parâmetros definem como será efetuada a busca de pares de pontos, que serão utilizados para a construção do variograma. A Figura 2 ilustra qual a influência destes parâmetros para o variograma. Assim, será feita uma busca com uma determinada abertura (tolerância angular) e esta busca pegará pontos separados por uma determinada distância (tamanho do passo \pm tolerância do passo). O número de passos indicará qual a distância máxima da busca. Essa distância, normalmente, corresponde à metade do campo geométrico estudado.

Na prática, costuma-se utilizar como tamanho do passo a distância média entre os furos de sondagem.

Após a obtenção destes variogramas, ajustou-se um modelo teórico que melhor define o variograma experimental obtido. Para isso, deve-se tomar o cuidado de analisar o número de pares próximo à origem. Se este número for baixo, em relação os seguintes, pode-se optar pelo descarte deste ponto, pois este não é considerado significativo para a análise.

Para este ajuste, deve-se escolher qual o tipo de variograma que melhor se ajusta à forma do variograma experimental. Feito isso, deve-se observar a presença de anisotropias, ou seja, comportamentos diferentes dos variogramas nas direções de estudo.

Assim, deve-se determinar os parâmetros dos variogramas teóricos, que são: efeito pepita, patamar e amplitude. Nas figuras a seguir, pode-se observar os variogramas experimentais obtidos, bem como os modelos teóricos ajustados, com os seus respectivos parâmetros.

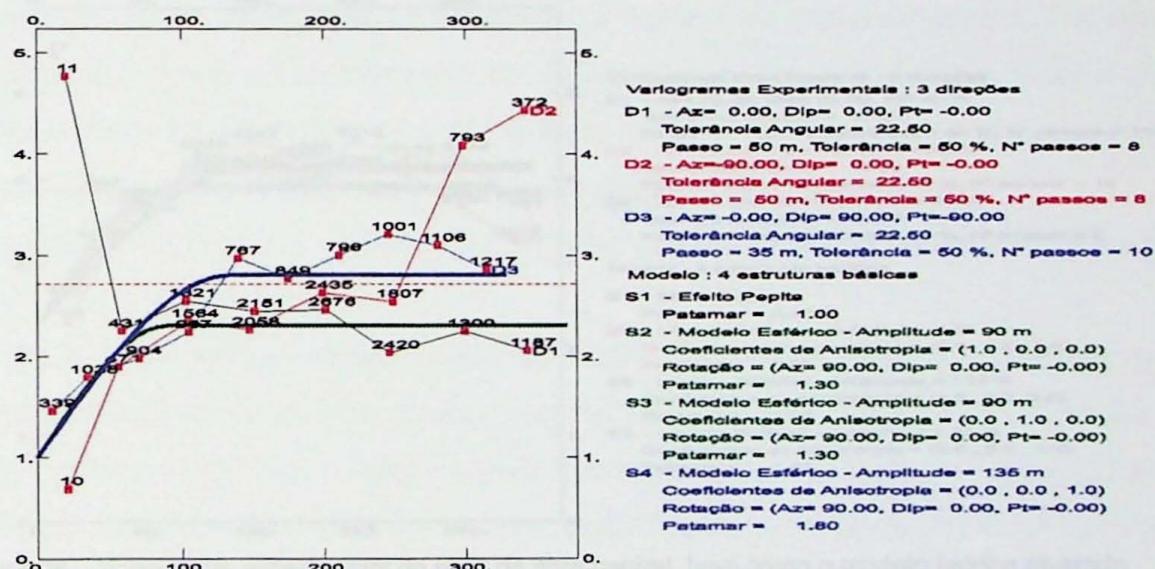


Figura 23 – Varioograma experimental do P₂O₅ da área sul, bem como o modelo teórico ajustado

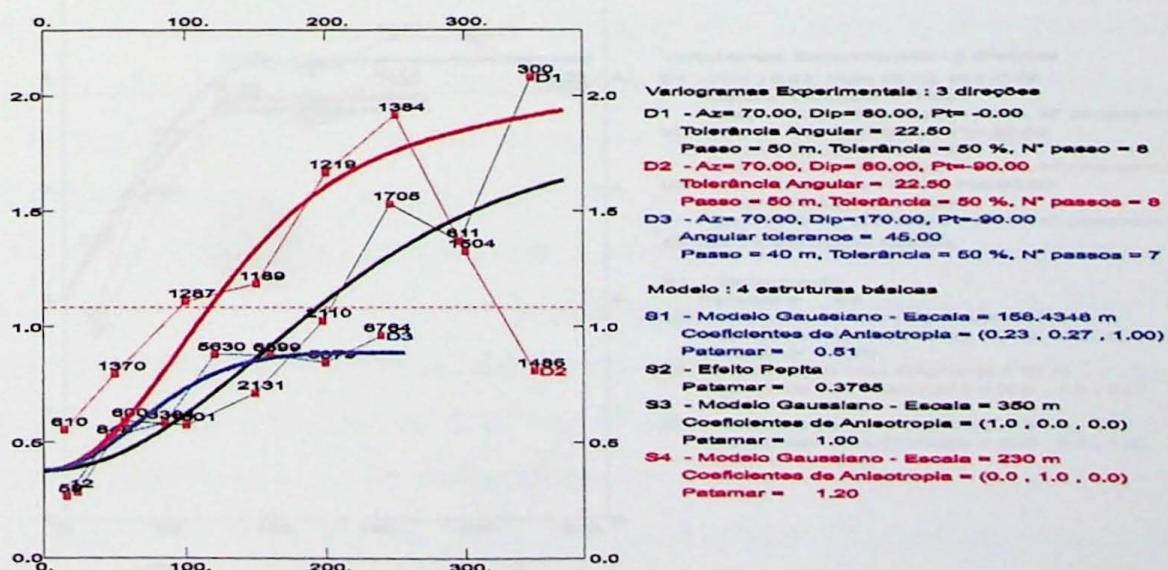


Figura 24 – Variograma experimental do MgO da área sul, bem como o modelo teórico ajustado.

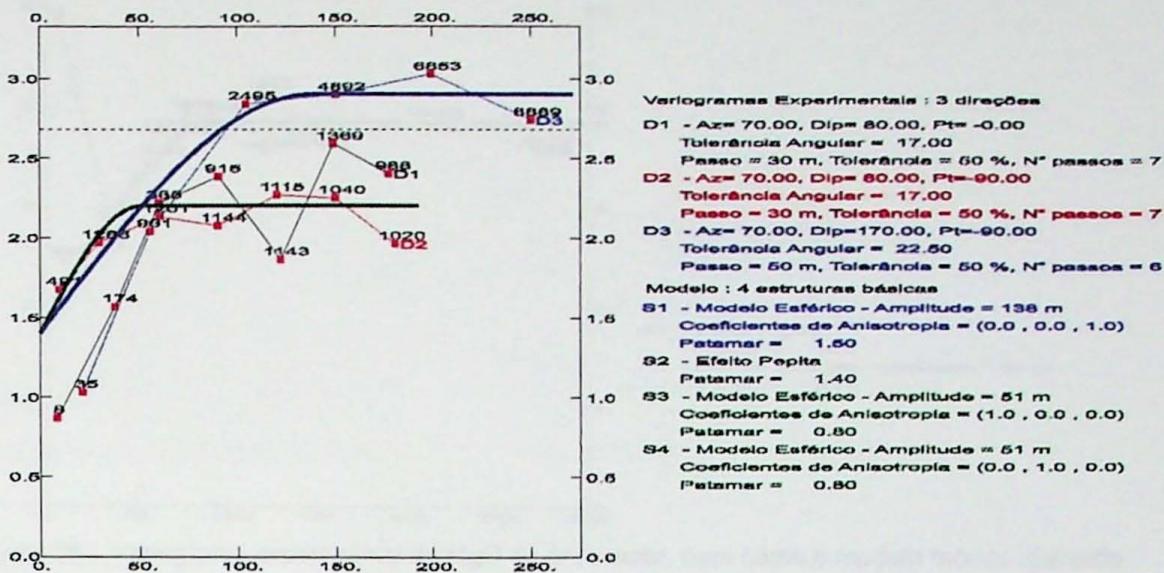


Figura 25 – Variograma experimental do P₂O₅ da área central, bem como o modelo teórico ajustado

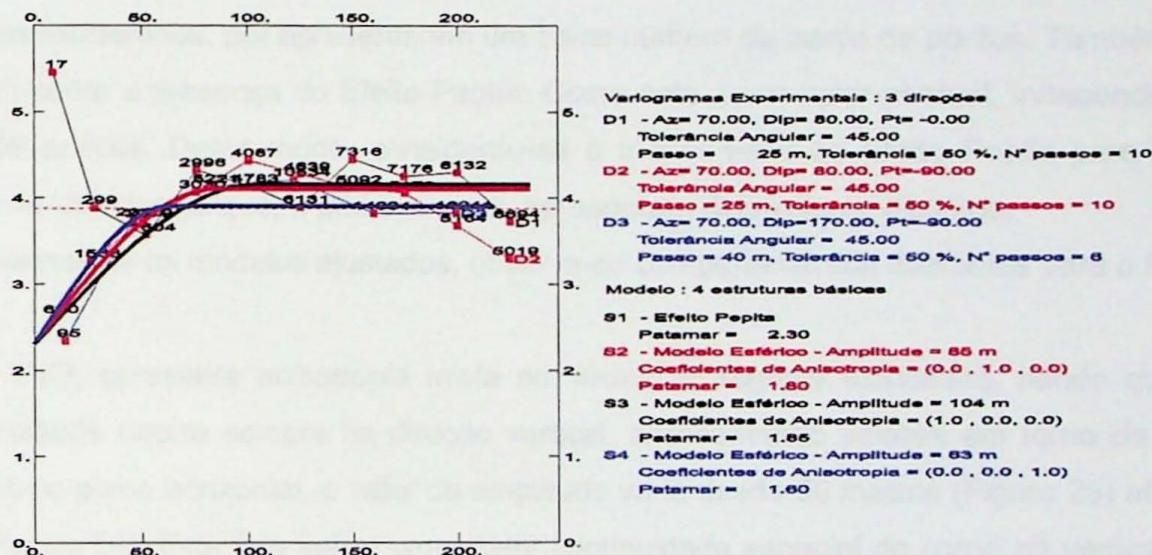


Figura 26 – Variograma experimental do MgO da área central, bem como o modelo teórico ajustado

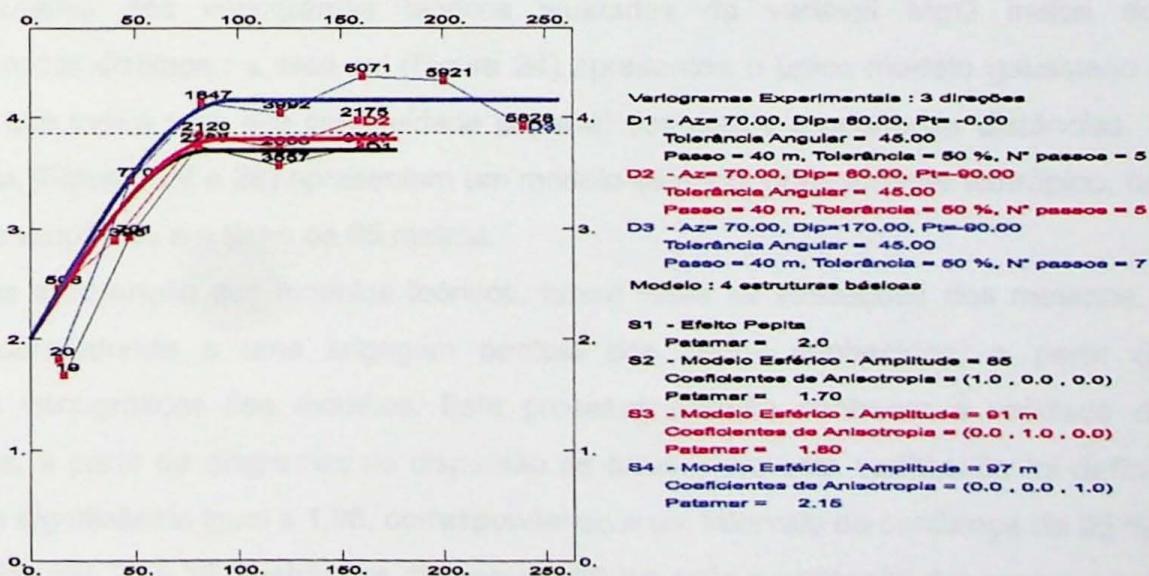


Figura 27 – Variograma experimental do P₂O₅ da área norte, bem como o modelo teórico ajustado

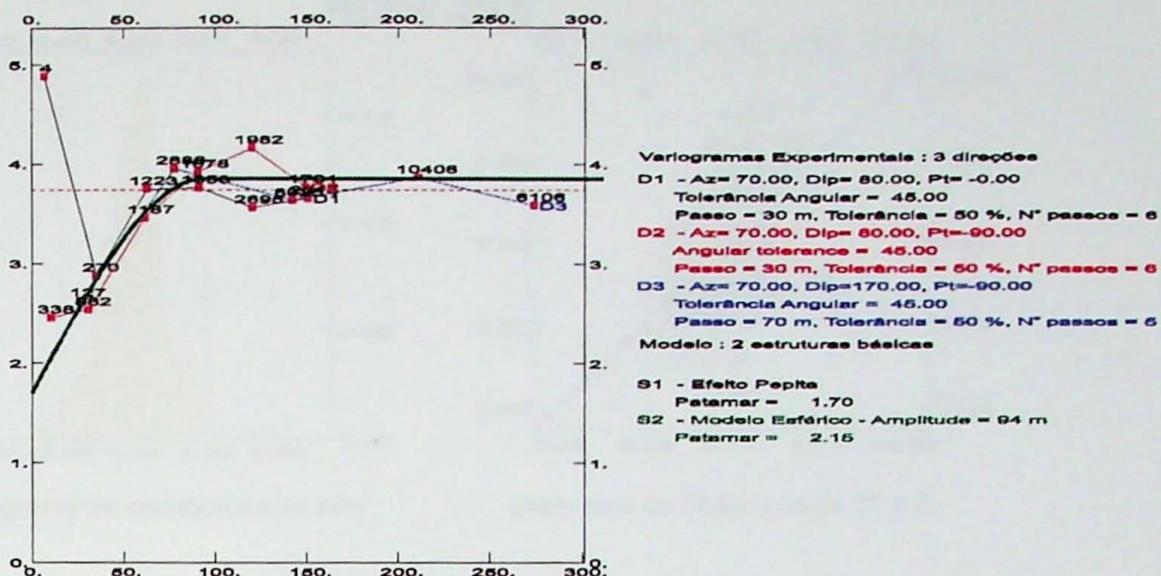


Figura 28 – Variograma experimental do MgO da área norte, bem como o modelo teórico ajustado

Para os ajustes dos modelos teóricos, alguns pontos dos variogramas experimentais foram desconsiderados, por apresentarem um baixo número de pares de pontos. Também foi levado em conta a presença do Efeito Pepita. Como este é um valor pontual, independe da direção de análise. Deste modo, considerou-se o menor valor de Efeito Pepita para dois variogramas direcionais que, à primeira vista, apresentam dois valores distintos.

Analizando os modelos ajustados, observa-se comportamentos diferentes para o P_2O_5 e MgO.

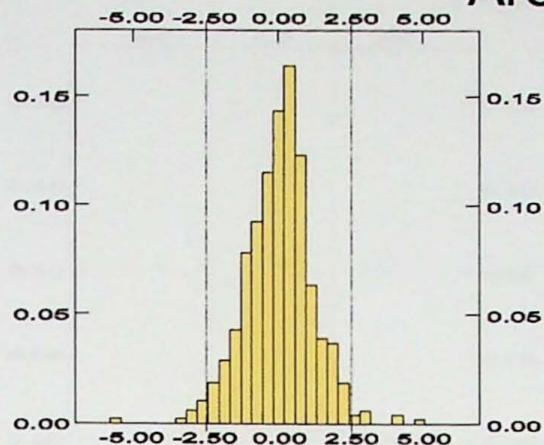
O P_2O_5 apresenta anisotropia mista em todas as regiões estudadas, sendo que a maior amplitude ocorre sempre na direção vertical, apresentando valores em torno de 130 metros. Já no plano horizontal, o valor da amplitude varia desde 50 metros (Figura 25) até 90 metros (Figura 23). Este fato indica uma maior continuidade espacial do corpo na vertical do que na horizontal.

A análise dos variogramas teóricos ajustados da variável MgO indica dois comportamentos distintos: a área sul (Figura 24) apresentou o único modelo gaussiano do depósito o que indica uma alta continuidade espacial dos dados a pequenas distâncias. As outras áreas (Figuras 26 e 28) apresentam um modelo esférico, praticamente isotrópico, com um valor de amplitude em torno de 95 metros.

Após a obtenção dos modelos teóricos, foram feitas as validações dos mesmos. A validação corresponde a uma krigagem pontual dos dados conhecidos, a partir dos parâmetros variográficos dos modelos. Este processo permite conhecer a validade dos variogramas, a partir de diagramas de dispersão de erros. Para esta verificação foi definido um nível de significância igual a 1,96, correspondendo a um intervalo de confiança de 95 %.

As Figuras 29 e 30 mostram os diagramas obtidos após a validação dos variogramas.

Área Sul



Histograma de distribuição de erro

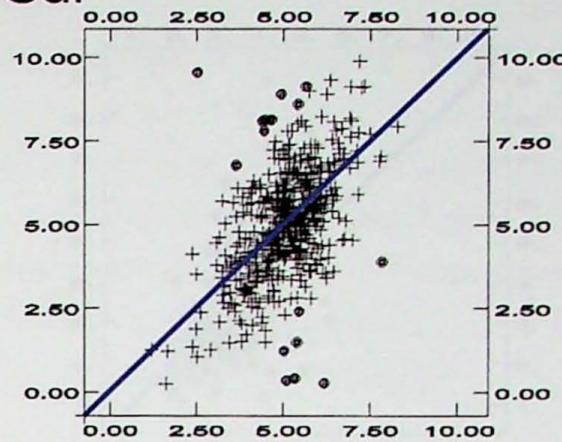
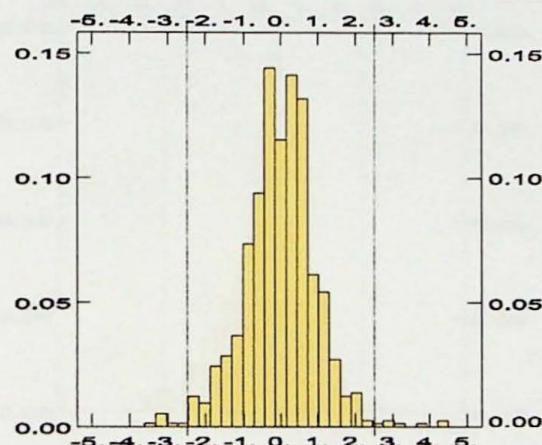


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Área Central



Histograma de distribuição de erro

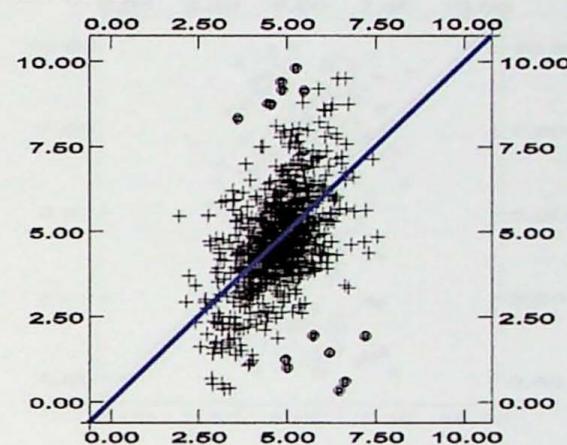
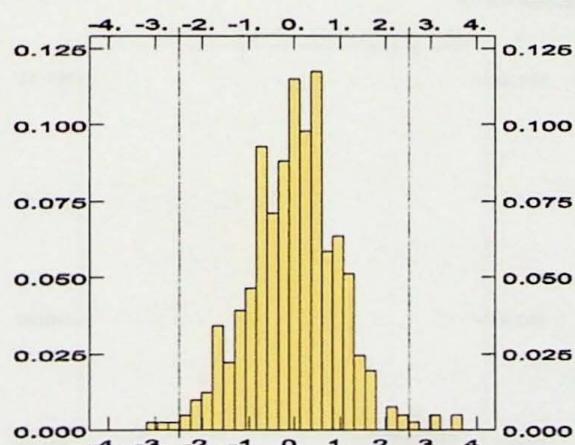


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Área Norte



Histograma de distribuição de erro

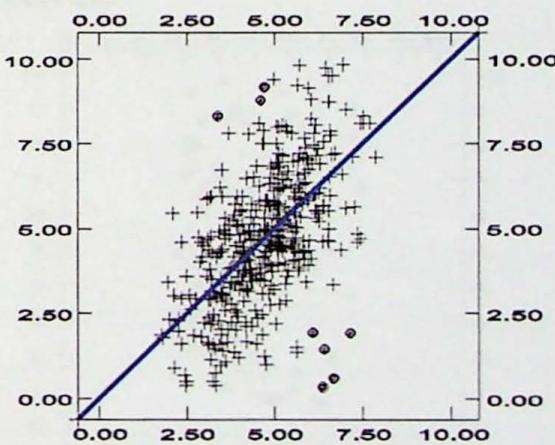
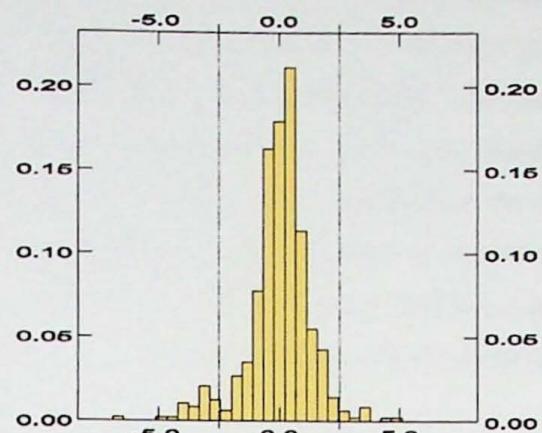


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Figura 29 – Histogramas de erro e Diagrama de Dispersão para a variável P_2O_5 , obtidos a partir da validação cruzada dos variogramas

Área Sul



Histograma de distribuição de erro

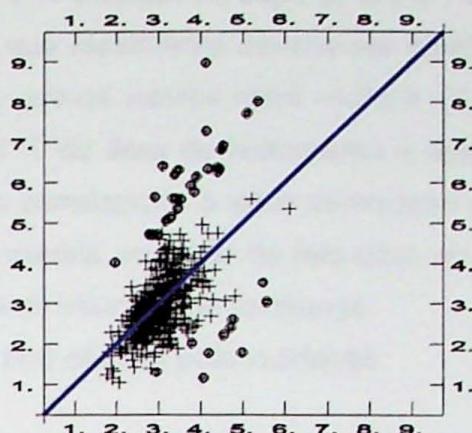
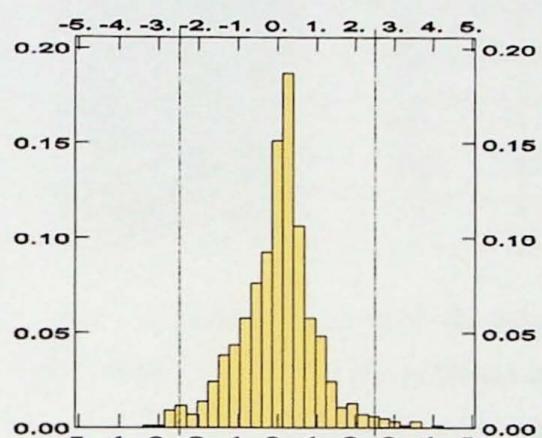


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Área Central



Histograma de distribuição de erro

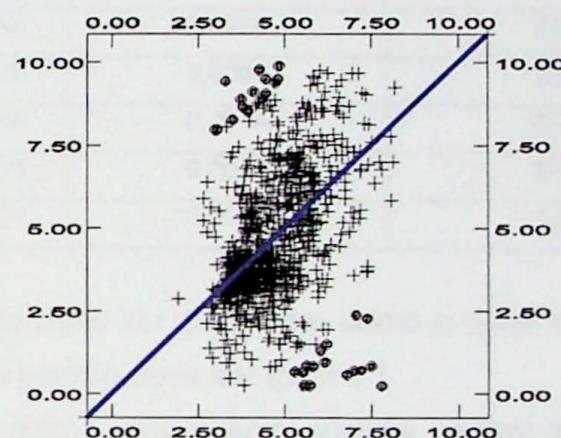
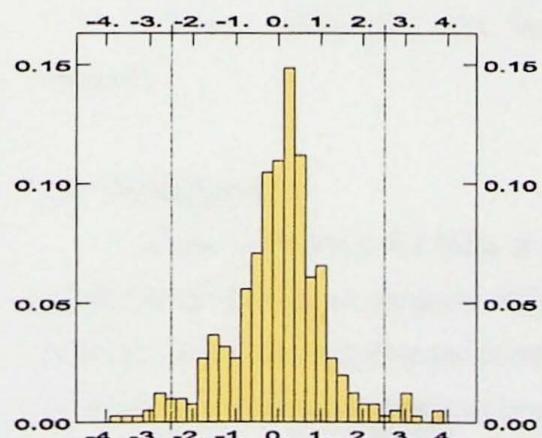


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Área Norte



Histograma de distribuição de erro

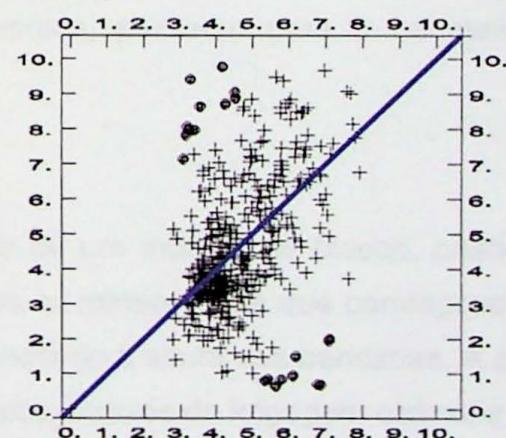


Diagrama de Dispersão de $Z^* \times Z$

Figura 30 – Histogramas de erro e Diagrama de Dispersão para a variável MgO, obtidos a partir da validação cruzada dos variogramas

Estes gráficos avaliam o quanto válido estão os variogramas ajustados. O histograma de distribuição de erro mostra a distribuição do erro padrão, ou seja, $(Z-Z^*)/S^*$, que corresponde à diferença do valor real e do valor estimado, que idealmente deveria ser igual a zero. Definindo um nível de significância de 1,96, garante-se que os valores entre $-1,96$ e $+1,96$ de erro padrão são aceitáveis. Este valor corresponde a 95 % da área do histograma e aparece indicado por linhas pontilhadas. O diagrama de dispersão correlaciona o valor verdadeiro ao valor estimado. A correlação ideal seria a concentração dos pontos ao longo da reta azul, que corresponde a Z igual a Z^* . Os pontos em destaque estão fora do intervalo de confiança.

A Tabela 6 mostra os parâmetros de erro obtidos pela validação.

Tabela 6 – Valores do Erro Médio, Erro Padrão da Média e Variância do Erro Padrão de cada uma das variáveis

Variável	Nº amostras	Erro Médio	Erro Padrão da Média	Variância do Erro Padrão
P_2O_5 – Sul	488	0,0283	0,0214	1,307
MgO – Sul	492	0,0058	0,0074	1,667
P_2O_5 – Central	737	0,0025	0,0009	0,929
MgO – Central	867	0,0016	0,0014	0,970
P_2O_5 – Norte	409	0,0010	0,0012	0,952
MgO – Norte	411	0,0027	0,0011	1,255

Idealmente, o valor do erro médio deve ser zero, bem como o valor do erro padrão da média. Já o valor da variância do erro padrão deve ser igual a 1.

Verifica-se, a partir dos valores acima, que a área norte e central apresentam os menores erros, enquanto que a área sul apresenta os valores de variância do erro padrão mais elevados, mas, ainda assim, aceitáveis. Deste modo, a validação pode ser considerada aceitável.

Feita a validação dos variogramas, partiu-se para a estimativa dos teores do depósito.

9.3 - Krigagem

Esta estimativa foi feita a partir de um modelo de blocos, criado com os mesmos parâmetros de blocos de lavra utilizados na mineração, e que correspondem a 25 X 25 X 10 metros, sendo os dez metros correspondendo à altura das bancadas. A partir deste modelo, foi feita a estimativa dos teores por blocos, através da krigagem ordinária de blocos.

Além dos parâmetros dos variogramas, são definidos os chamados parâmetros de vizinhança, que serão utilizados na busca de amostras para a interpolação. Estes parâmetros são o número de setores angulares em que será dividida a busca, o número mínimo e ótimo de amostras utilizadas por setor e os raios de busca nas diferentes direções. Como valores máximos para estes raios, foram utilizados os valores de amplitude dos respectivos variogramas, que correspondem ao limite do campo estruturado, onde os dados apresentam continuidade espacial.

A Tabela 7 apresenta os parâmetros utilizados para cada área e variável.

Tabela 7 – Parâmetros de vizinhança utilizados na krigagem

Variável	Nº setores angulares	Nº Mínimo de amostras	Nº Ideal de Amostras	Raio de Busca (Direção X)	Raio de Busca (Direção Y)	Raio de Busca (Direção Z)
P ₂ O ₅ – Sul	8	5	2	90 metros	90 metros	140 metros
MgO – Sul	8	2	2	350 metros	230 metros	150 metros
P ₂ O ₅ – Central	8	8	4	40 metros	40 metros	100 metros
MgO – Central	8	8	2	100 metros	85 metros	60 metros
P ₂ O ₅ – Norte	8	8	4	100 metros	90 metros	100 metros
MgO – Norte	8	8	2	100 metros	100 metros	100 metros

O resultado obtido pela krigagem pode ser visualizado nas Figuras 31 à 36, onde são mostrados alguns níveis com os teores estimados.

P₂O₅ estimado por Krigagem Nível -50

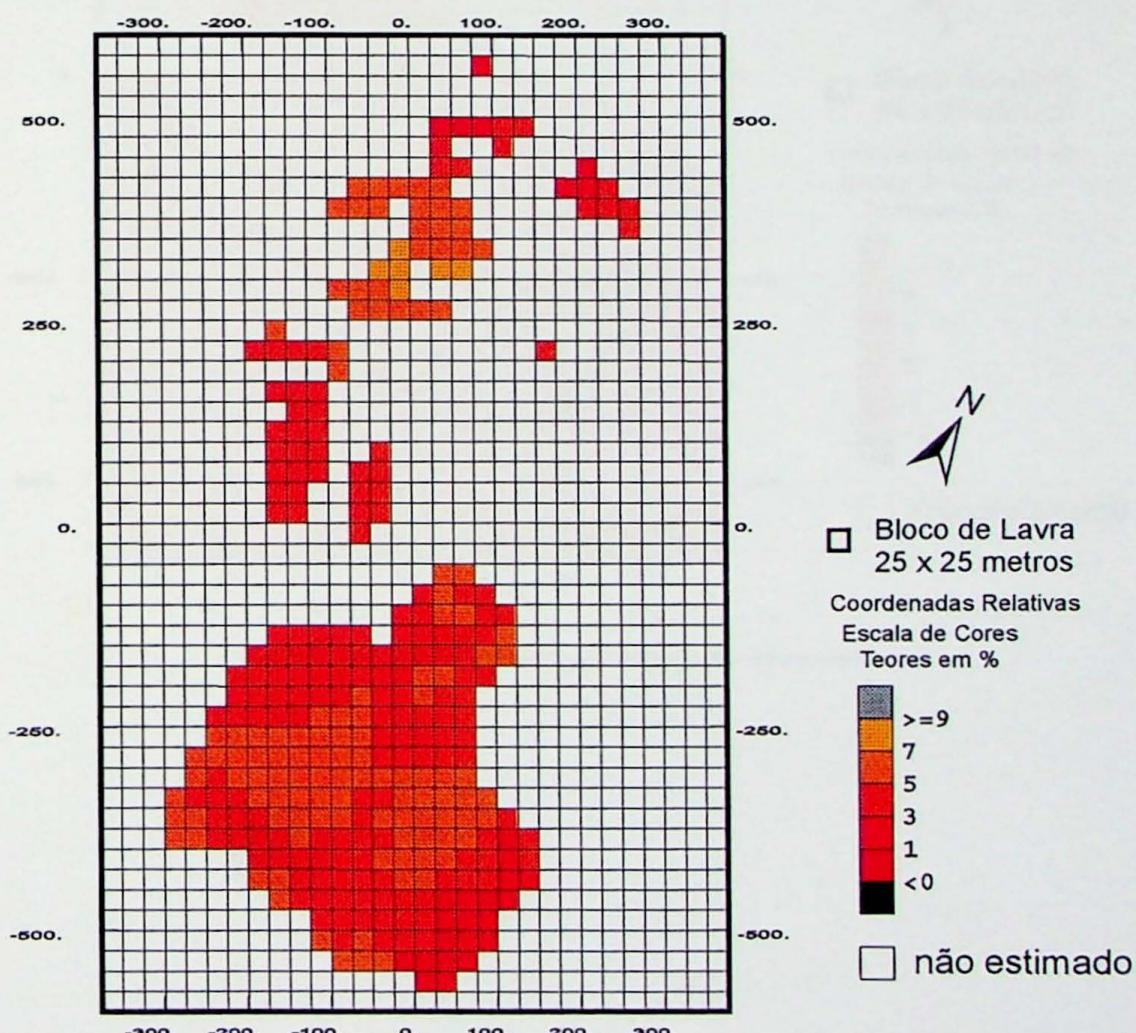


Figura 31 – P₂O₅ estimado por krigagem – nível -50

MgO estimado por Krigagem Nível -50

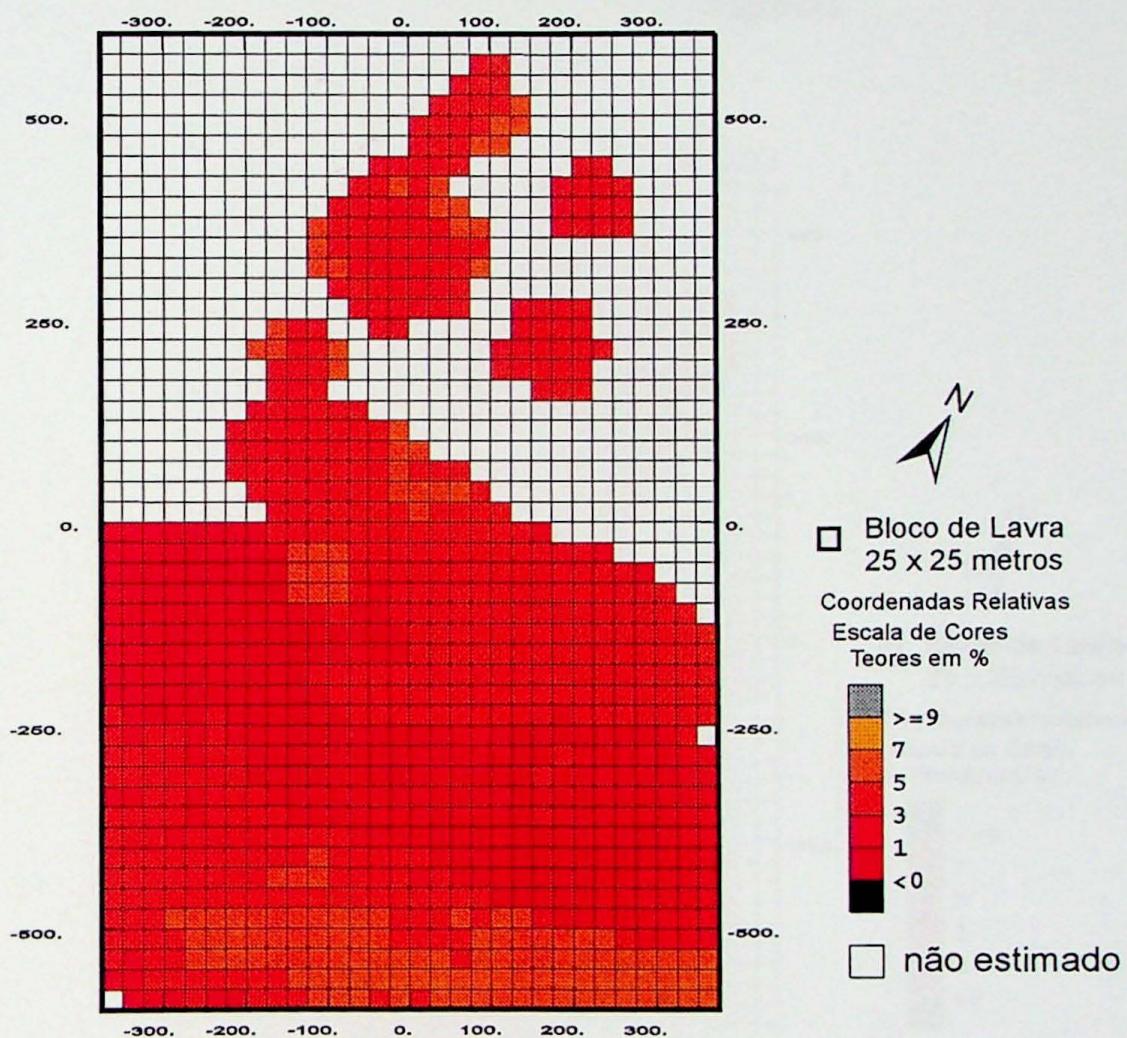


Figura 32 – MgO estimado por krigagem – nível -50

P_2O_5 estimado por Krigagem Nível zero

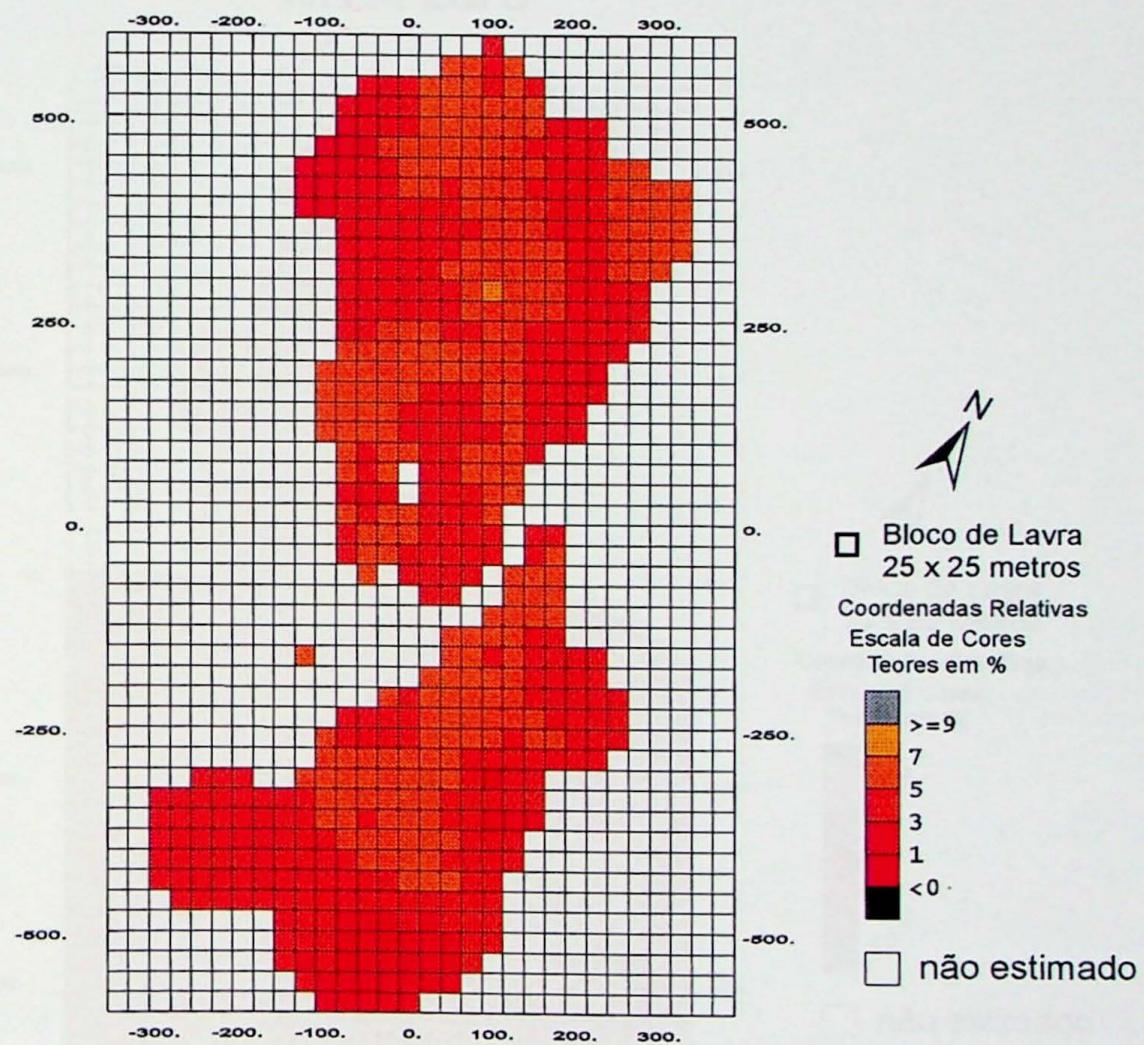


Figura 33 – P_2O_5 estimado por krigagem – nível zero

MgO estimado por Krigagem Nível zero

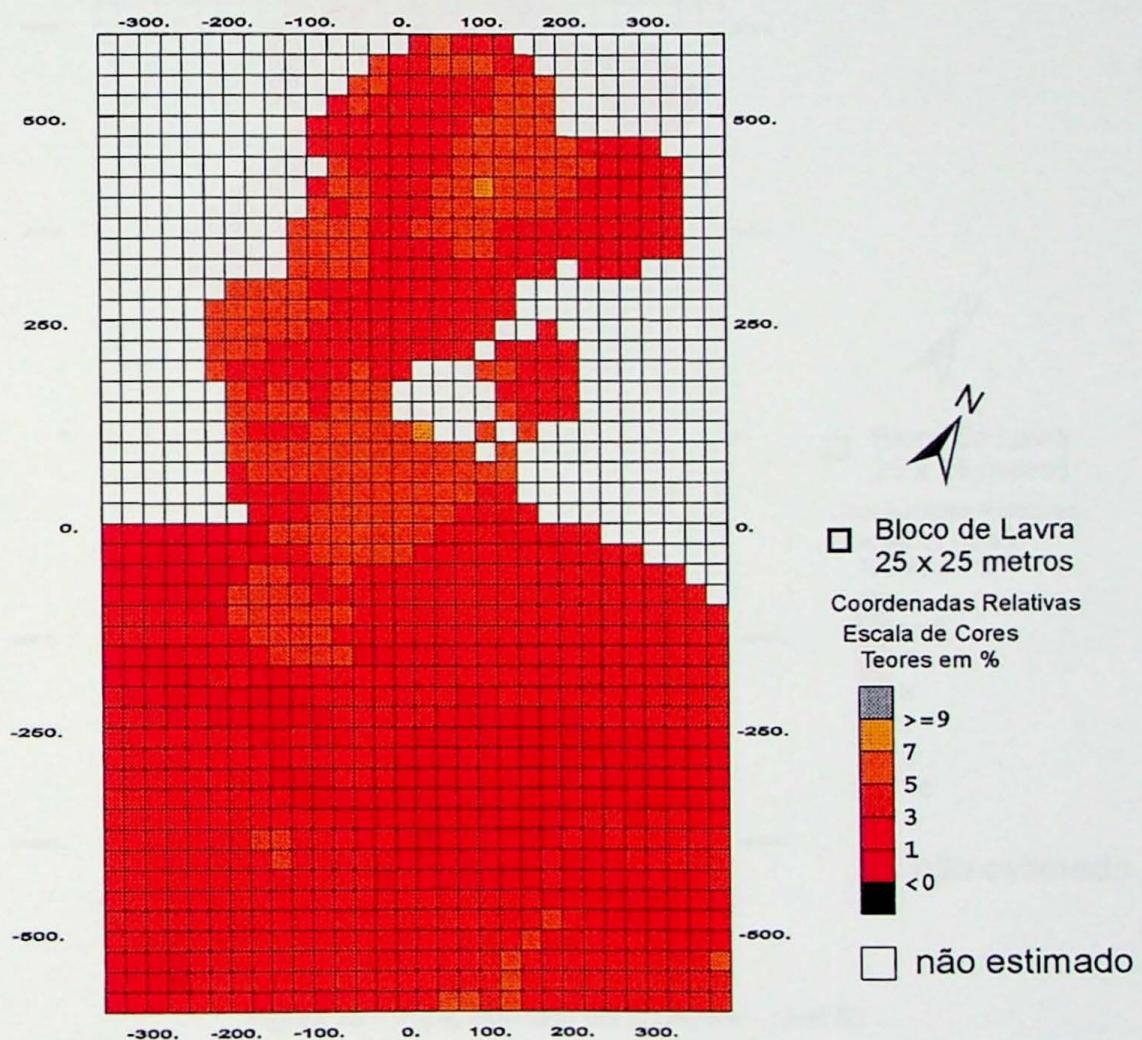


Figura 34 – MgO estimado por krigagem – nível zero

P₂O₅ estimado por Krigagem Nível 50

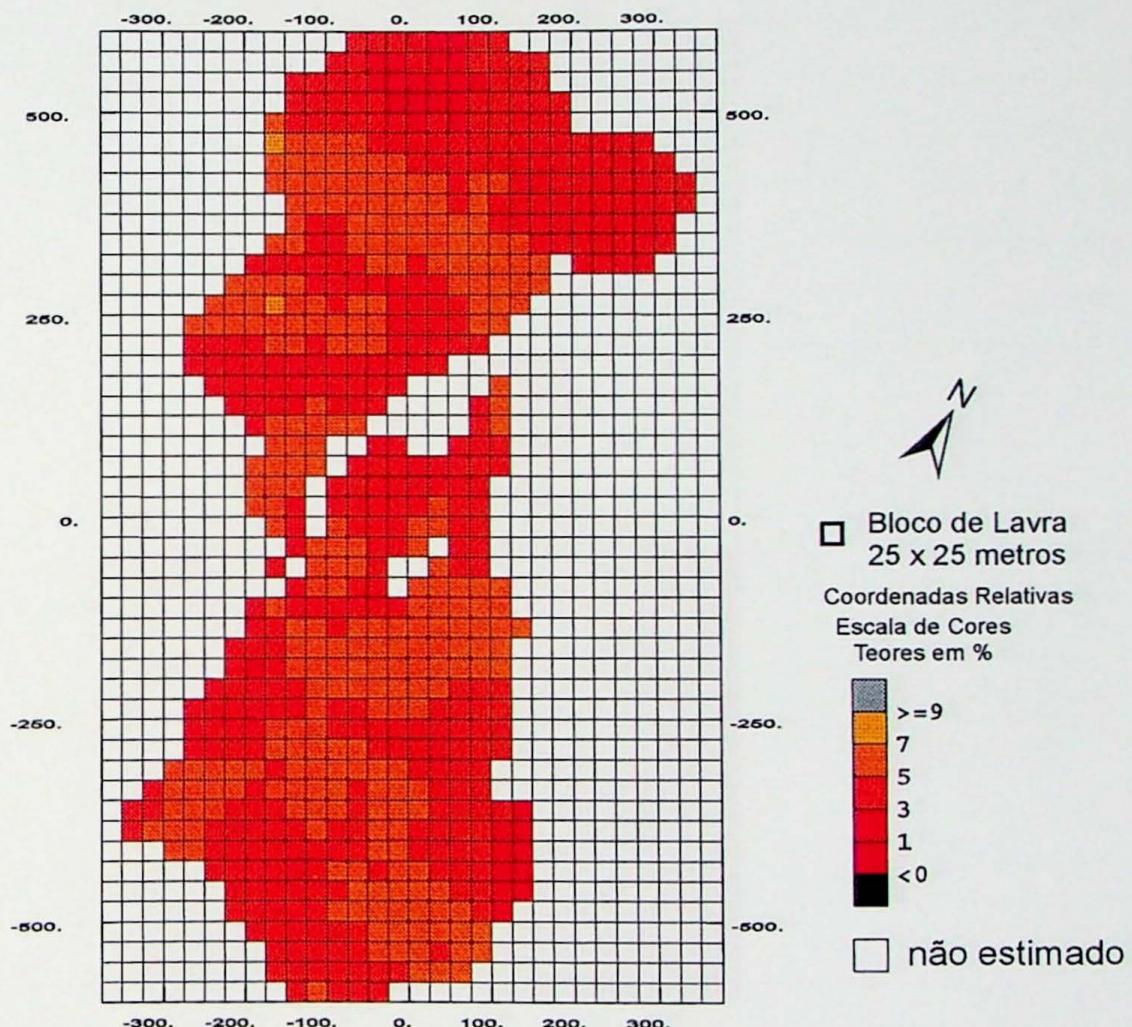


Figura 35 – P₂O₅ estimado por krigagem – nível 50

MgO estimado por Krigagem Nível 50

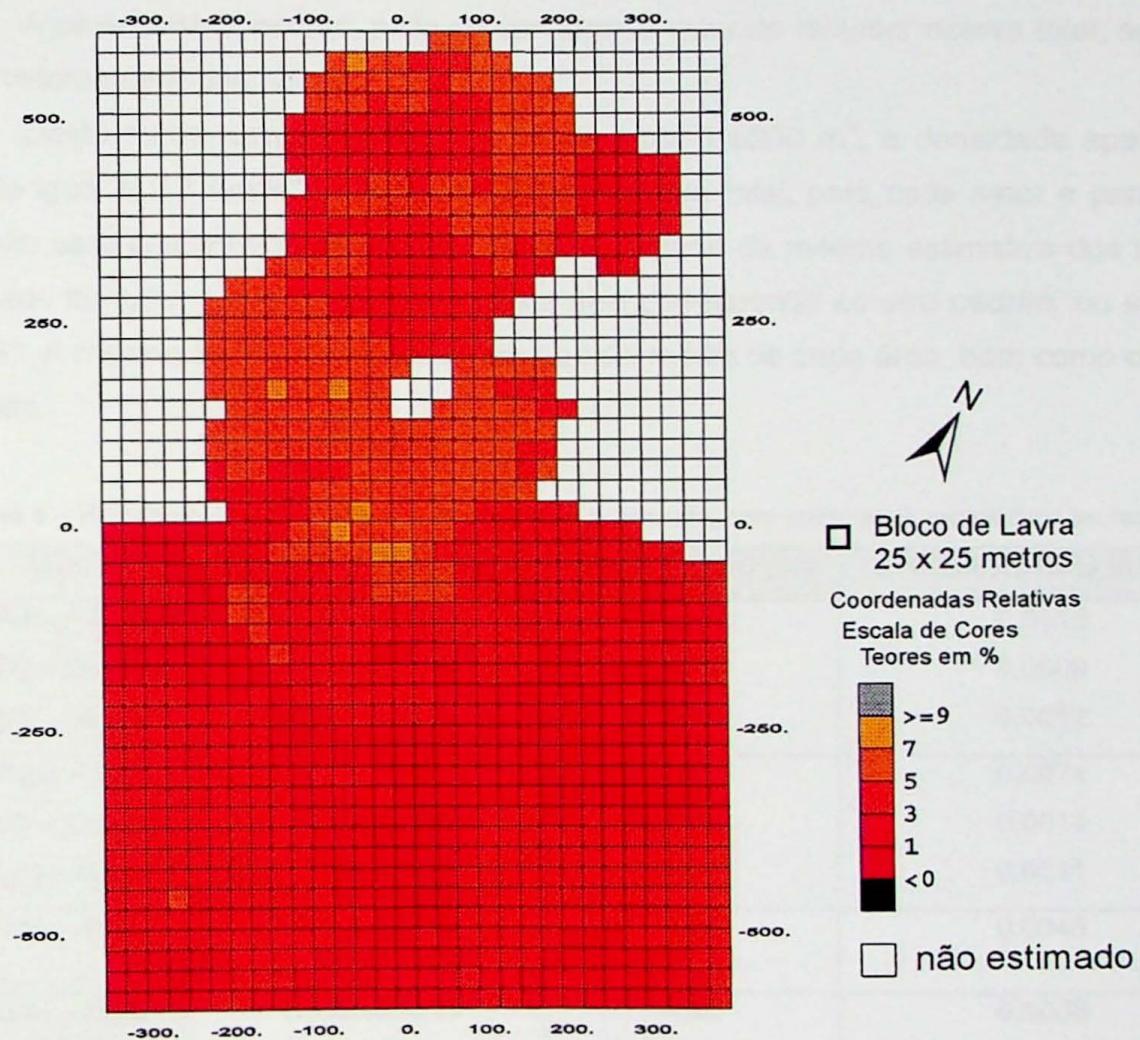


Figura 36 – MgO estimado por krigagem – nível 50

Percebe-se que a área estimada para a variável MgO Sul é bem maior que as demais. Isto ocorreu devido ao tipo de variograma (Modelo Gaussiano) e ao valor da amplitude (em torno de 300 no plano horizontal e 150 metros no plano vertical). Deste modo, os raios de busca são maiores que os demais, abrangendo uma área muito maior.

9.4 – Cálculo dos Recursos / Reserva

Estimados os teores de P_2O_5 e MgO para cada bloco, pode-se agora, determinar o recurso/reserva, através da equação $R = VDT$, sendo V o volume do bloco, D a densidade, igual a 2,7 ton/m³ e T o teor do bloco.

A partir destes valores, pode-se conhecer o valor do recurso/reserva total, somando-se os valores de R dos blocos.

Deste modo, considerando V do bloco igual a 6250 m³, a densidade aparente do minério igual a 2,7 ton/m³, o valor do recurso/reserva total, para cada setor e para todo o depósito será conforme mostrado na Tabela 8. A partir da mesma estimativa dos teores, é calculado também o erro da krigagem. Este erro corresponde ao erro padrão, ou seja, $(Z - Z^*) / S^*$. A mesma tabela apresenta o erro padrão médio de cada área, bem como de todo o depósito.

Tabela 8 – Recurso calculado de cada área e de todo o depósito, bem como seus respectivos teores médios

ÁREA	RECURSO (toneladas)	TEOR MÉDIO (%)	ERRO PADRÃO MÉDIO
P_2O_5 – Sul	7.495.421,9	5,14	0,0115
P_2O_5 – Central	3.611.570,2	4,76	0,0009
P_2O_5 – Norte	6.198.363,3	4,73	0,0012
MgO – Sul	4.616.125	3,17	0,0074
MgO – Central	3.603.213	4,75	0,0014
MgO – Norte	5.982.694	4,57	0,0011
Total - P_2O_5	17.305.355,28	5,12	0,0045
Total – MgO	17.089.686,18	4,03	0,0033

Percebe-se que, embora a área sul apresente os melhores teores de P_2O_5 , apresenta também o maior erro padrão médio, devido a presença do efeito proporcional (Olea, 1991). Comparando-se o teor médio destes valores estimados com os teores médios dos conjuntos de amostras (Tabelas 3, 4, e 5), observa-se que estes são muito próximos, ou seja, os valores médios permanecem constantes, como previsto pelo Teorema do Limite Central (Davis, 1986).

9.5 – Modelagem do Corpo Geológico

A partir de seções horizontais digitalizadas e “linkadas” em Datamine, pode-se obter o modelo geológico do corpo carbonatítico da nova área anexada à mina. A elaboração deste modelo levou em conta os parâmetros da gênese do corpo, bem como suas relações de contato com a encaixante. A adição deste modelo com o anteriormente existente para o restante do corpo foi feita através do software Vulcan. Este modelo pode ser observado na Figuras 37.

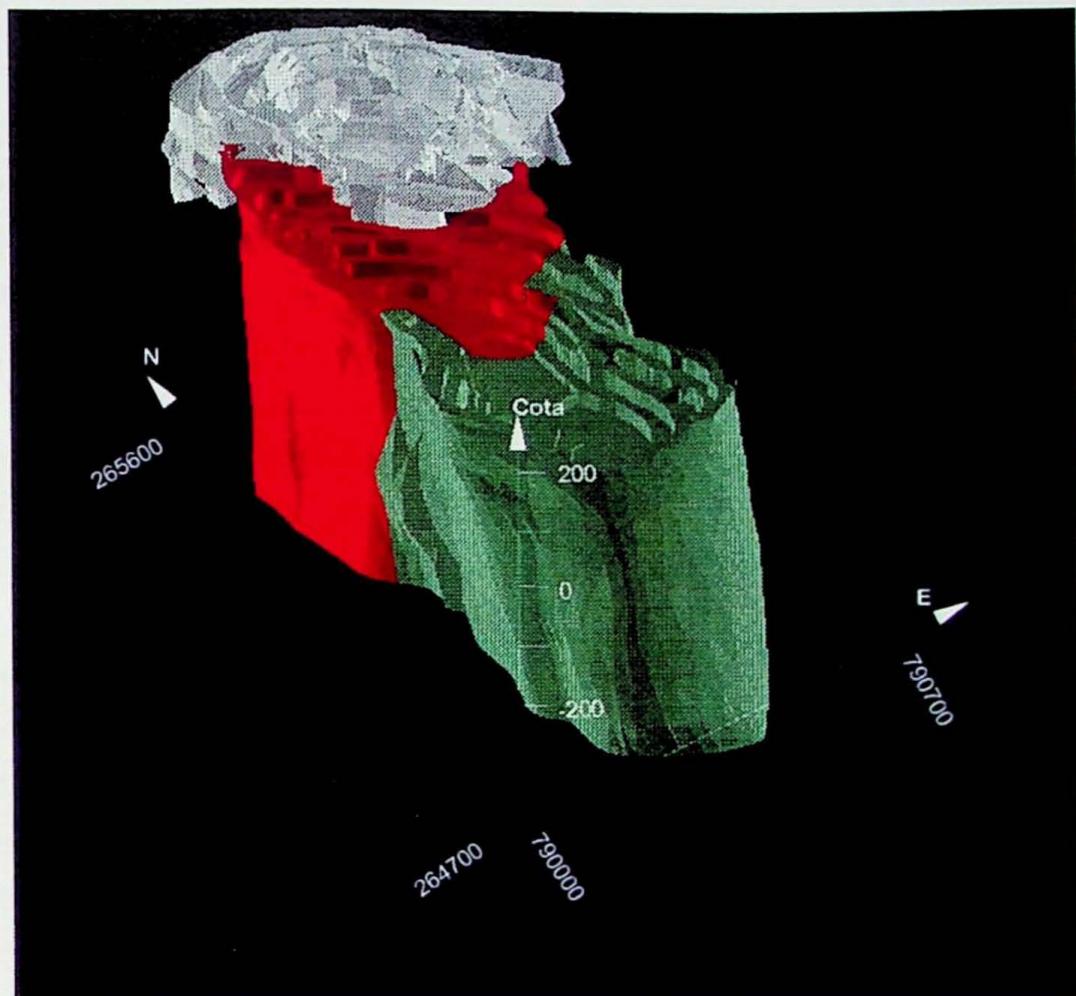


Figura 37 – Modelo tridimensional do corpo carbonatítico (as cores representam as áreas em que o modelo foi dividido para efeito deste estudo)

Por estas figuras, nota-se que o corpo está interpretado até a cota -400 e que, ao que tudo indica, prossegue além desta profundidade, devido à sua natureza intrusiva.

10 - INTERPRETAÇÃO / DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Através dos resultados obtidos, pode-se perceber a importância da análise estatística antes de iniciar a análise geoestatística. Neste trabalho, as análises posteriores foram guiadas pela análise estatística, onde foram reconhecidas três populações de dados. A análise das amostras destas populações indicou que estas pertenciam a regiões geográficas, dentro do depósito, muito bem definidas (Figura 16). A hipótese mais provável para esse comportamento estaria baseada no trabalho de Gaspar (1989), em que o referido autor cita a ocorrência de cinco intrusões sucessivas de carbonatito, com características geoquímicas distintas. A análise dos histogramas da área central e norte também indica a presença de mais de uma população de dados nestas regiões (Figuras 18 e 19). Entretanto, ao contrário das populações identificadas, a distribuição espacial destes dados não permitiu a separação de outras áreas. Além disso, o limiar entre estas duas áreas precisaria de uma melhor definição, o que resultaria em uma análise geoestatística mais adequada.

Nota-se claramente que a área sul foi a melhor delimitada, pois seus histogramas apresentaram as melhores distribuições. Ainda com base no trabalho deste mesmo autor, nesta região ocorre a primeira intrusão, definindo assim, um corpo único, com características químicas diferentes das intrusões posteriores.

Uma verificação bastante interessante está na baixa correlação entre as duas variáveis estudadas, tanto na análise global dos dados, quanto na análise por regiões. Enquanto a distribuição dos teores de MgO varia ao longo do depósito, definindo minérios calcíticos, dolomíticos e magnesianos, a distribuição do P₂O₅ ocorre de forma mais homogênea, caracterizada pela distribuição normal das suas freqüências (Figuras 17, 18 e 19). Este fator está ligado à mineralogia da rocha, já que os carbonatos possuem variações nas suas composições (calcita ou dolomita), enquanto que a apatita constitui-se em um mineral acessório no carbonatito, se encontrando, por assim dizer, disseminado por todo o depósito.

Esta separação foi de vital importância para o prosseguimento do trabalho, pois a partir de cada região definida, foi feito um estudo variográfico distinto.

A análise variográfica permitiu conhecer as anisotropias presentes no depósito. Tem-se dois comportamentos distintos entre os P₂O₅ e MgO.

O P₂O₅ apresenta, em todas as áreas, anisotropia mista, ou seja, modelos de variogramas com amplitude e patamar diferentes para duas direções. Não se estabeleceu nenhuma direção preferencial de estudo variográfico no plano horizontal, mas procurou-se analisar variações presentes entre este plano horizontal e o plano vertical.

Os variogramas obtidos ao longo dos furos (plano vertical) apresentam os maiores valores de amplitude, em relação aos variogramas obtidos no plano horizontal. Isto representa uma maior continuidade espacial das amostras na vertical do que na horizontal, indicando que esta continuidade está relacionada com o sentido da intrusão.

O comportamento do MgO pode ser considerado isotrópico nas áreas norte e central. Na área sul obteve-se um modelo de variograma do tipo gaussiano, que apresenta uma alta continuidade na origem. O próprio valor da amplitude dos variogramas nesta área indica uma alta correlação entre amostras (150 metros em uma direção e 350 metros em outra).

Mas, para poder considerar válidos os parâmetros obtidos nos variogramas, fez-se a validação dos mesmos. Esta validação consiste em uma krigagem pontual, ou seja, retira-se um ponto do depósito, cujo teor é conhecido e, a partir dos dados variográficos, estima-se este ponto pelas demais amostras da vizinhança. Idealmente este valor estimado deveria coincidir com o valor real da amostra. Para medir o quanto o valor estimado difere do real, considera-se o erro padrão $(Z-Z^*)/S^*$. Assim, quanto menor for este erro, melhor será o variograma ajustado.

Neste estudo, percebe-se pelos dados da Tabela 6, que os variogramas podem ser considerados válidos, por apresentarem erros muito baixos.

O resultado positivo da validação permitiu utilizar os variogramas ajustados na krigagem dos teores.

Para esta estimativa, os valores de vizinhança utilizados estão relacionados com os parâmetros variográficos. Os valores máximos dos raios de busca correspondem aos valores de amplitude, já que este valor representa o limite de correlação entre os dados.

A quantidade de amostras utilizadas na busca também é um parâmetro a ser considerado na krigagem. Dependendo da disposição espacial dos dados, diferentes amostras serão utilizadas na estimativa de um bloco, o que pode produzir resultados muito diferentes.

O erro associado à krigagem, para cada uma das variáveis, apresenta valores baixos (conforme Tabela 8), indicando que a estimativa feita no depósito está aceitável.

Alguns níveis com os teores dos blocos estimados (Figuras 32 à 36) foram escolhidos para ilustrar o resultado da estimativa.

Em relação ao modelo geológico gerado, deve-se destacar que apenas cinco furos estendem-se a cotas inferiores a -350 metros. Sendo assim, a extração do modelo para a cota -450 precisaria ser confirmada com novos furos, à medida que o nível inferior da mina avança. Ainda assim, o modelo gerado apresenta-se condizente com o observado em campo, amarrado ao conhecimento da gênese do depósito.

Um ponto que deve ficar claro é o fato da Serrana adotar divisões diferentes para os carbonatitos, a partir dos teores de magnésio. A divisão adotada neste trabalho foi feita a partir da análise estatística, onde observou-se populações de dados concentradas em regiões delimitáveis. Entretanto, a rocha foi denominada simplesmente carbonatito, não levando-se em consideração diferenças mineralógicas que ocorrem no corpo. Como já foi mencionado, o corpo carbonatítico é fruto de cinco intrusões, com características químicas que apresentam diferenças entre si. Um estudo pormenorizado poderia ser realizado para uma melhor caracterização do depósito, evoluindo assim, para uma melhor compreensão da geoestatísticas dos corpos.

11 – CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES FINAIS

Após a conclusão deste trabalho, algumas considerações podem ser feitas.:

Primeiramente, toda análise de dados deve estar baseada em uma boa técnica de amostragem. Deve-se garantir uma tomada de amostras de forma não enviesada, de modo a não distorcer os resultados finais do trabalho, além de uma escolha adequada do suporte amostral.

As análises químicas também devem ser confiáveis pois, assim como na amostragem, podem acarretar na inviabilidade de depósitos potencialmente lavráveis.

Estas duas etapas foram citadas pois, durante o estágio, acompanhou-se todas as etapas de escolha da malha de amostragem e coleta de amostras, além da comparação dos resultados das análises químicas frente às técnicas mais utilizadas (Raios X e via úmida). Pôde-se observar o quão difícil é esta escolha, além da responsabilidade de assumir que a técnica escolhida seja a melhor a ser aplicada no depósito.

Neste trabalho percebe-se a importância de uma análise estatística prévia dos dados ante de se iniciar uma análise geoestatística. O simples cálculo de distribuição de freqüências garantiu a divisão da área estudada, possibilitando um estudo diferenciado para cada sub-região. O simples fato de comportamentos distintos nas populações destas áreas indica o acerto nesta divisão.

Para o estudo geoestatístico, o espaçamento da malha de sondagem é de grande importância, pois em casos extremos, pode-se não se observar estruturas presentes nos dados, devido à diferenças entre a escala da sondagem e a escala das estruturas variográficas. Também a densidade de dados garante uma maior (e melhor) quantidade de informações para a construção dos variogramas.

Neste trabalho, a técnica utilizada, krigagem ordinária de blocos, foi a escolhida, em detrimento à outras, como por exemplo o Inverso da Potência da Distância (IPD), devido ao fato de se poder quantificar o erro associado a esta estimativa. Este parâmetro é de grande importância pois quantifica a estimativa, dando suporte o sucesso dos trabalhos.

Conforme citado no item anterior, poderia ser sugerido para trabalhos futuros, a utilização das técnicas geoestatísticas aplicadas aos diferentes tipos litológicos descritos pelo corpo técnico da Empresa. Esta separação em domínios produziria um resultado de recursos mais adequado aos interesses técnico-econômicos da Empresa. A utilização outros tipos de dados, como por exemplo, dados de pó de perfuratriz, resultariam num melhor conhecimento das reservas. Esta técnica, conhecida por krigagem por furos de desmonte, permitiria também a quantificação de blocos de lavra que seriam lavrados a curto prazo, auxiliando assim, no planejamento da mina.

12 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Algarte, J. P. - 1972. A influência dos arqueamentos cratônicos no condicionamento das alcalinas nos Estados de São Paulo e Paraná. In : Congr. Bras. Geol., XXVI, Belém, 1972. *Anais...* Belém, SBG, v.1, p.65-69.
- Almeida, F. F. M. - 1977. Condicionamento tectônico do magmatismo alcalino mesozóico do Sul do Brasil e Paraguai Oriental. *An. Acad. Bras. Ci.*, 43:835-836.
- Amaral, G. - 1978. Potassium-argon age studies on the Jacupiranga alkaline district, State of São Paulo, Brazil. In : First Int. Symp. Carbonatites, 1. Poços de Caldas, 1978. *Proceedings...* Poços de Caldas. p.297-302.
- Brooker, P. I. - 1979. Kriging. *Eng. & Min. J.*, 180(9):148-153.
- Bubenicek, L. & Haas, A. - 1969. Method of calculation of the iron ore reserves in the Lorraine deposit. In : The decade of digital computing in the mineral industry. The american Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc. New York. p.179-210.
- 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. 175p. (Dissertação de mestrado apresentada ao Instituto de Geociências - USP).
- Davis, J. C. – 1986. *Statistics and Data Analysis in Geology*. New York : wiley.
- Derby, O. A. - 1891. On the magnetite ore districts of Jacupiranga and Ipanema, São Paulo, Brazil. *Amer. J. Sci.*, 41:311-321.
- Ferreira, F. J. F. & Algarte, J.P. - 1979. O comportamento aeromagnetométrico-cintilométrico das principais rochas alcalinas dos Estados de São Paulo e Paraná. In : Simp. Reg. Geol., 2. Rio Claro, 1979. *Atas...* Rio Claro, v.2, p.195-208.
- Gaspar, J. C. - 1989. *Geologie et mineralogie du complexe carbonatique de Jacupiranga, Brésil*. França. 344p. (Tese de Doutoramento. U. E. R. De Sciences Fondamentales et Appliquées, Université d'Orleans).

- Germann, A., Marker, A. Friedrich, G. - 1987. The alkaline complex of Jacupiranga, São Paulo, Brazil. Petrology and genetic considerations. *Zbl. Geol. Paleont.*, 1(7/8):807-818.
- Herz, N. - 1977. Timing of spreading in the South Atlantic : information from Brazilian alkaline rocks. *Bull. Geol. Soc. Amer.*, 88:101-112.
- Hussak, E. - 1892. Ueber Brazilit, ein neues Tanta (Niob) mineral von der eisenmine Jacupiranga. *Neues Jb. Min. Geol. Pal.*, 2:141-159.
- Hussak, E. - 1895. Ueber den Baddeleyt (syn. Brazili) von der eisenmine Jacupiranga in São Paulo. *Tschermaks Min. Petr. Mitt.* P.395-411.
- Instituto de Pesquisas Tecnológicas (IPT) - 1989. Estudo e implementação de novas técnicas e desenvolvimento de programas em geoestatística : aplicações em geologia. São Paulo, IPT. 98p. (IPT Relatório 27.799).
- Journel, A. G. & Huijbregts, C. J. - 1978. *Mining geoestatistics*. London, Academic Press. 600p.
- Koch Jr, G. S. & Link, R. F. - 1971. *Statistical Analysis of Geological Data*. New York, Dover Publ. V. I, 375p.
- Landim, P. M. B. - 1985. Introdução a Geoestatística. Laboratório de Geomatématica. Publicação Didática nº 3. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Campus de Rio Claro. UNESP. 69p.
- Melcher, G. C. - 1954. Nota sobre o distrito alcalino de Jacupiranga, São Paulo. Div. Geol. Min., Notas Prelim., 84p.
- Melcher, G. C. - 1966. The carbonatites of Jacupiranga, São Paulo, Brazil, In : Tuttle, O. F. & Gittins, J. eds. *Carbonatites*. Intersciences Publishers. P.169-181.
- Olea, R. A. - 1975. Optimum mapping techniques using regionalized variable theory. Kansas, Kansas Geological Survey, 137p. (Series on Spatial Analysis, 2).

Olea, R. A. - 1991. Geostatistical Glossary and Multilingual Dictionary. International Association for Mathematical Geology Studies in Mathematical Geology, Nº 3. Oxford. P.62.

Roden, M. F., Murthy, V. R., Gaspar, J. C. - 1985. Sr and Nd isotopic composition of the Jacupiranga carbonatite. *J. Geol.*, 93:212-220.

Royle, A. G. - 1979. Why geostatistics? *Engineering & Mining Journal*, 180(5):92-101.

Ruperti, E., Marguti, R. L., Gomes, C. B. - 1992. O Complexo Alcalino de Jacupiranga, SP : informações gerais. Roteiro de Excursão do XXXVII Congresso Brasileiro de Geologia, São Paulo, 1992. 18p.

Yamamoto, J. K. - 1991. Comparação de métodos computacionais para avaliação de reservas : um estudo de caso na Jazida de cobre de Chapada, GO. São Paulo. 175p. (Tese de Doutorado apresentada ao Instituto de Geociências - USP).

Yamamoto, J. K. - 1992. Geoestatística Aplicada. Apostila do curso de pós-graduação. 182p.

Yamamoto, J. K. & Bettencourt, J. S. - 1992. Avaliação de Reservas. Apostila do curso de pós-graduação. 113p.

Yamamoto, J. K., Bettencourt, J. S., Montanheiro, T. S. - 1998. Análise Estatística *In* : Yamamoto, J. K. - 1998. Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. Cap. 3. (*Inédito*)

Yamamoto, J. K. & Rocha, M. M. - 1998. Análise Geoestatística Estatística *In* : Yamamoto, J. K. - 1998. Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. Cap. 4. (*Inédito*)

