

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE
ELETORRESISTIVIDADE PARA A DETERMINAÇÃO DE
CONDICIONANTES DE CARSTIFICAÇÃO**

Patricia Gonçalves Guimarães

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Co-Orientador: Dr. Adalberto Aurélio Azevedo

MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
(TF-40/2006)

São Paulo

2006

TF
G963
PG.a

**UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS**

**Análise Geoestatística de Eletroresistividade Para a
Determinação de Condicionantes de Carstificação**

Patrícia Gonçalves Guimarães

Monografia de Trabalho de Formatura



Banca Examinadora

Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha

Prof. Dr. Vagner Roberto Ellis

Prof. Dr. Lília Mascarenhas Sant'Agostino

São Paulo

2006

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MONOGRAFIA DE TRABALHO DE FORMATURA
TF-40/2006

**ANÁLISE GEOESTATÍSTICA DE
ELETRORRESISTIVIDADE PARA A DETERMINAÇÃO
DE CONDICIONANTES DE CARSTIFICAÇÃO**



Patricia Gonçalves Guimarães

DEDALUS - Acervo - IGC



30900024382

Orientador: Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha
Co-Orientador: Dr. Adalberto Aurélio Azevedo

São Paulo
2006

RESUMO

A geofísica é um método de investigação indireto usado para a caracterização de maciços rochosos e terrosos. Dentre os diferentes métodos, a eletrorresistividade normalmente é realizada em perfis de caminamento elétrico segundo malhas irregulares de investigação, particularmente comum em geologia de engenharia. Utilizou-se a geoestatística como ferramenta para a estimativa, em malha regular, de valores de eletrorresistividade, para posterior interpretação das estruturas condicionantes de carstificação do maciço.

Os dados de eletrorresistividade utilizados neste trabalho correspondem a área no entorno de uma mina subterrânea, cujo contexto geológico é complexo, caracterizado por intercalação de metadolomitos e filitos.

A distribuição espacial das estruturas (foliação, falhas, fraturas, juntas, etc.) confere ao maciço uma rede de planos e de direções preferenciais à percolação de água, impondo contrastes de permeabilidade entre os sucessivos planos e/ou intercalações rochosas, favorecendo o fluxo subterrâneo e caracterizando-se como os principais condicionantes da carstificação do maciço dolomítico.

A estimativa por krigagem conseguiu complementar as anomalias identificadas nos diferentes perfis individuais de caminamento elétrico e, assim, caracterizar e diferenciar as estruturas e/ou zonas carstificadas. As anomalias condutivas representam áreas com maior saturação do maciço, ou seja, planos de percolação preferencial de água, representando estruturas e/ou intercalações de filito em meio aos metadolomitos que condicionam a carstificação do maciço rochoso.

Assim, a krigagem possibilitou a caracterização e diferenciação de estruturas e/ou zonas carstificadas quanto à sua saturação, correlacionando as anomalias condutivas às juntas (descontinuidades) de médio e alto ângulo presentes nos metadolomitos e/ou filitos, de direção NE e mergulhando para SE.

ABSTRACT

Geophysics is an indirect investigation method used to characterize rock massives. Among the different methods, electrical resistivity is usually done as electrical profiling according to irregular grids, a common place in engineering geology. Geostatistics was used as a tool to estimate, in a regular grid, electrical resistivity values looking for interpolate conditioning structures of massive karsts.

The used electrical resistivity data regards to underground mine surrounding area, placed in a complex geological context, characterized by the alternation of metadolomites and phyllite.

Structures spatial distribution (foliation, faults, fractures, joints, etc.) gives to massive a set of planes and water percolation preferable directions, imposing permeability contrasts between successive plans and/or rock alternation which favours underground flow and characterizing the main conditions to dolomite massive karst process.

Kriging estimates was able to complement identified anomalies in single electrical profiles and in this way characterize and differentiate structures and/or karst zones. Well conductive anomalies represent areas in the massive with major saturation, in other words, water preferable percolation planes representing the rock massive karst development.

Thus kriging enable to characterize and differentiate structures and/or karst zones regarding to their saturation and to correlate conductive anomalies to joints, with NE direction and SE dip, of high and medium angle found in metadolomites and/or phyllites.

***Dedico este trabalho
aos meus avós Tida, Ernesto,
Marita e Guimarães.***

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao meu orientador, Prof. Dr. Marcelo Monteiro da Rocha, pela dedicação, paciência, ajuda e por me inserir mais e mais no mundo da geoestatística.

Em segundo, agradeço ao meu co-orientador, Dr. Adalberto Aurélio Azevedo, também pela dedicação, paciência e ajuda, e ainda por ter a idéia e me incentivar a realizar esta monografia com este tema.

Agradeço principalmente aos meus pais Luli e Gilberto e minha irmã Camila, pelo carinho, paciência e incentivo, mesmo quando não entendiam por que eu queria estudar geologia e não sabiam ainda a importância da geologia nas nossas vidas.

Agradeço especialmente ao geólogo Silvio Brentan por estar sempre ao meu lado, dividindo comigo todos os choros e os sorrisos.

ÍNDICE

| | | |
|----------|---|----|
| 1. | INTRODUÇÃO..... | 1 |
| 2. | OBJETIVOS..... | 2 |
| 3. | FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA | 2 |
| 3.1. | GEOFÍSICA APLICADA..... | 2 |
| 3.1.1. | MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE | 3 |
| 3.1.2. | APLICAÇÃO DA GEOFÍSICA NA HIDROGEOLOGIA..... | 7 |
| 3.2. | ESTATÍSTICA DESCRITIVA | 7 |
| 3.2.1. | MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL | 7 |
| 3.2.2. | MEDIDAS DE DISPERSÃO | 8 |
| 3.2.3. | MEDIDAS DE FORMA | 8 |
| 3.3. | GEOESTATÍSTICA..... | 8 |
| 3.3.1. | VARIÁVEIS REGIONALIZADAS | 9 |
| 3.3.2. | VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS E MODELOS TEÓRICOS..... | 9 |
| 3.3.3. | VALIDAÇÃO CRUZADA..... | 11 |
| 3.3.3.1. | PARÂMETROS DE VIZINHANÇA..... | 12 |
| 3.4. | KRIGAGEM ORDINÁRIA..... | 14 |
| 4. | MATERIAIS E MÉTODOS | 14 |
| 5. | ESTUDO DE CASO | 15 |
| 5.1. | GEOLOGIA DA ÁREA | 15 |
| 5.2. | ENSAIOS GEOFÍSICOS..... | 16 |
| 5.3. | CONDICIONANTES DA EVOLUÇÃO DO CARSTE | 17 |
| 6. | DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO..... | 18 |
| 7. | RESULTADOS OBTIDOS..... | 18 |
| 7.1. | ANÁLISE ESTATÍSTICA..... | 19 |
| 7.2. | ANÁLISE GEOESTATÍSTICA..... | 19 |
| 7.2.1. | VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS | 20 |
| 7.2.2. | MODELOS TEÓRICOS DOS VARIOGRAMAS | 21 |
| 7.2.3. | VALIDAÇÃO CRUZADA..... | 23 |
| 7.2.3.1. | PARÂMETROS DE VIZINHANÇA..... | 23 |
| 7.3. | KRIGAGEM ORDINÁRIA..... | 23 |
| 7.3.1. | MODELO DE BLOCOS | 23 |
| 7.3.2. | ESTATÍSTICAS DO MODELO | 25 |
| 8. | INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS | 26 |
| 9. | CONCLUSÕES..... | 31 |
| | REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 32 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Cronograma das atividades realizadas. | 18 |
| Tabela 2 - Estatísticas dos dados de eletrorresistividade utilizados. | 19 |
| Tabela 3 - Parâmetros utilizados no ajuste do modelo teórico do variograma..... | 22 |
| Tabela 4 - Parâmetros de vizinhança testados. | 23 |
| Tabela 5 – Parâmetros do modelo de blocos..... | 24 |
| Tabela 6 – Estatísticas dos dados de eletrorresistividade estimados pela krigagem..... | 25 |
| Tabela 7 - Direção dos planos de descontinuidade e linhas de intersecção de descontinuidades..... | 29 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1 - Subdivisão da Geofísica Aplicada, segundo Braga (2000). | 3 |
| Figura 2 – Conceito de resistividade em um cilindro de comprimento unitário L e seção unitária A (Braga, 2000)..... | 4 |
| Figura 3 - Arranjo dos eletrodos dos métodos geoelétricos (Braga, 2000)..... | 5 |
| Figura 4 - Arranjo dipolo-dipolo com vários níveis teóricos de investigação (Braga, 2000). ... | 6 |
| Figura 5 - Representação gráfica de um variograma e suas propriedades (Yamamoto, 2001). | 10 |
| Figura 6 – Gráfico de dispersão da Validação Cruzada, dividido em quadrantes (I, II, III e IV). | 12 |
| Figura 7 – Seleção de amostras pelo critério dos pontos mais próximos (Yamamoto, 2001). | 13 |
| Figura 8 - Seleção de amostras pelo critério do quadrante (Yamamoto, 2001)..... | 13 |
| Figura 9 - Seleção de amostras pelo critério do octante (Yamamoto, 2001). | 13 |
| Figura 10 - Planta da área total com os perfis geofísicos realizados..... | 17 |
| Figura 11 - Planta da área reduzida com os perfis utilizados para o tratamento dos dados. | 18 |
| Figura 12 - Histograma dos dados..... | 19 |
| Figura 13 - Variograma calculado em cinco direções..... | 20 |
| Figura 14 - Variograma calculado em três direções. | 20 |
| Figura 15 - Variograma modelado para a direção 0°/90°. | 21 |

| | |
|--|----|
| Figura 16 - Variograma modelado para as direções: 45°/0°, 135°/0° e 0°/90°. | 22 |
| Figura 17 – Gráfico de dispersão da Validação Cruzada. | 23 |
| Figura 18 - Área de abrangência (em cinza) do modelo em planta, com os perfis utilizados para o tratamento dos dados. | 24 |
| Figura 19 - Modelo de blocos. | 25 |
| Figura 20 – Histograma dos valores obtidos na krigagem..... | 26 |
| Figura 21 – Plantas do modelo em diferentes cotas, com o traçado das direções preferenciais das anomalias condutivas (tons zuis). | 27 |
| Figura 22 – Seções verticias segundo os perfis geofísicos A, B e C, com o com o traçado dos mergulhos aparentes preferenciais das anomalias condutivas (tons zuis). | 28 |
| Figura 23 - Plantas do modelo em diferentes cotas, com o traçado dos planos P1, P2 e P3 e das linhas L1 e L2. | 30 |

1. INTRODUÇÃO

A Geologia de Engenharia é a aplicação de conhecimentos das geociências em estudos, projetos e obras de engenharia. Engloba a avaliação do comportamento mecânico e hidrológico dos solos e maciços rochosos, a determinação dos parâmetros a serem considerados na análise de estabilidade de obras e de maciços; assim como a melhoria e manutenção das condições ambientais e das propriedades dos terrenos. A Geotecnia é definida como o conjunto da Geologia de Engenharia com a Mecânica de Solos e a Mecânica das Rochas (Gallas, 2000).

Os métodos de investigação aplicados à geotecnia são classificados em diretos ou indiretos, quando há coleta de amostras ou não, respectivamente. A geofísica é um método de investigação indireto que visa determinar a distribuição, em profundidade, de parâmetros físicos dos maciços, que estão relacionados com algumas características geológico-geotécnicas do próprio maciço, como grau de fraturamento e de alteração, ou até tipo litológico (Souza *et al.*, 1998).

Uma das vantagens principais da aplicação dos métodos geofísicos em relação aos outros métodos tradicionais de investigação de subsuperfície é a rapidez na avaliação de grandes áreas com o custo relativamente baixo.

Na construção de uma obra, os métodos geofísicos são utilizados principalmente na fase de reconhecimento da área, e tem como objetivo a definição de grandes feições, como contatos litológicos, fraturas e topo rochoso. Os dados geofísicos devem ser complementares/suplementares aos dados geológicos para a decisão dos melhores locais para implantação de obras e identificação preliminar de alguns dos condicionantes geológico-geotécnicos da estabilidade da obra.

A geofísica deve então ser utilizada para caracterizar o maciço rochoso, auxiliando a necessidade de eventual solução de problemas, como a presença de zonas carstificáveis em áreas com empreendimentos de geotecnia, que pode trazer danos aos próprios empreendimentos e ao município onde estão localizados. Os dados obtidos pela realização de perfis geofísicos seguindo uma geometria não regular, podem ser complementados por valores estimados, utilizando a análise geoestatística e a krigagem.

A Geoestatística foi definida e desenvolvida originalmente para a resolução de problemas de avaliação de recursos/reservas minerais, bem como para o planejamento de lavra. Porém, nas últimas duas décadas, a geoestatística conheceu aplicações em outras áreas do saber. Podemos incluir neste rol a geofísica, que pode utilizar as técnicas de krigagem para a interpolação de seus resultados. Entretanto não existem muitos artigos publicados aplicando geoestatística em dados obtidos por geofísica, foco deste trabalho.

Os dados de eletrorresistividade, já coletados, que serão utilizados neste trabalho

correspondem a uma área de entorno de uma mina subterrânea, cujo contexto geológico é complexo, caracterizado por intercalação de metadolomitos e filitos.

2. OBJETIVOS

A geofísica é realizada em perfis de caminhamento elétrico com prévio planejamento de localização, levando em conta fatores e ruídos externos relativamente comuns. Esta característica aliada ao fato da geofísica ser realizada segundo malhas irregulares de investigação, particularmente em geologia de engenharia, fez este projeto visar a utilização da geoestatística como ferramenta para a estimativa, em malha regular, de valores de eletrorresistividade, para posterior interpretação e determinação de zonas de fraturas, fendas e cavidades que possam permitir a infiltração e percolação das águas superficiais e subterrâneas.

Deste modo, destaca-se como principal objetivo a análise geoestatística de dados geofísicos de eletrorresistividade para a determinação de condicionantes geológico-estruturais de processos de carstificação.

3. FUNDAMENTAÇÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1. GEOFÍSICA APLICADA

Os principais métodos geofísicos são, segundo Braga (2000), divididos em: geotérmicos, potenciais (magnetometria e gravimetria), sísmicos (refração e reflexão) e geoelétricos (eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e eletromagnetismo), conforme ilustrado na Figura 1.

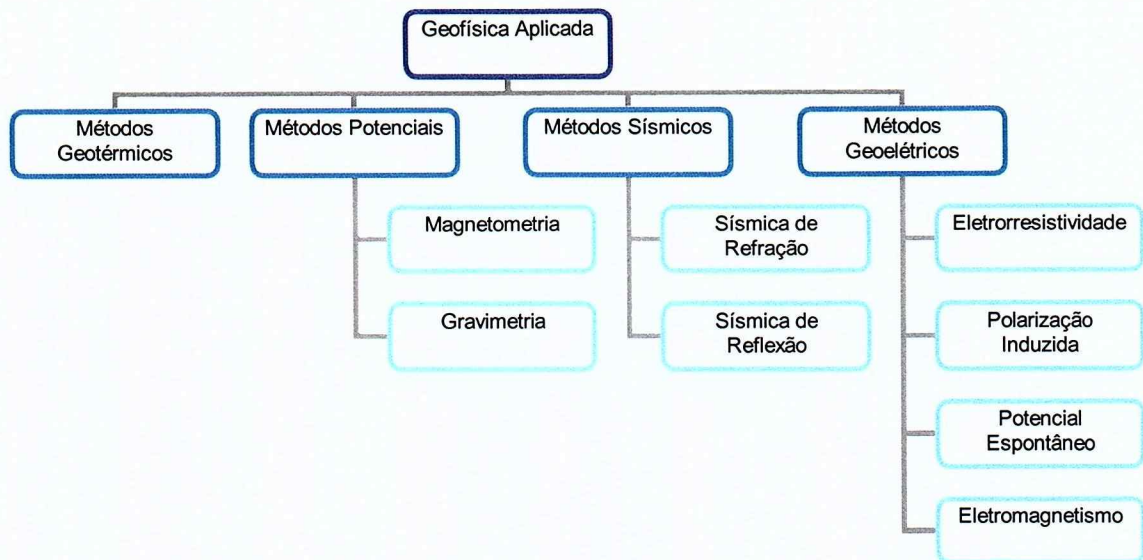


Figura 1 - Subdivisão da Geofísica Aplicada, segundo Braga (2000).

Segundo Braga (1988), a classificação dos métodos geoeletricos é baseada em três critérios: método (eletrorresistividade, polarização induzida, potencial espontâneo e eletromagnetismo), técnica (sondagens, caminhamentos e perfilagens) e arranjo (disposição dos eletrodos).

Os métodos geofísicos podem ser aplicados em diferentes ramos da geologia, pois tratam de medição de propriedades físicas dos materiais do subsolo, visando a determinação, entre outras, da posição e geometria do topo rochoso, caracterização de estratos sedimentares, materiais permeáveis e impermeáveis, corpos condutores e resistentes, superfície do nível d'água, direção do sentido de fluxo de fluidos sub-superficiais, identificação de zonas de falhas e de alteração, assim como identificação de contatos litológicos, cavidades e diques.

Neste trabalho, o método de investigação geofísica tratado foi o da eletrorresistividade, deste modo ele será o único abordado.

3.1.1. MÉTODO DA ELETRORRESISTIVIDADE

O método da eletrorresistividade mede a resistividade dos materiais. Segundo Duarte (2003) a resistividade é definida como a resistência elétrica R medida entre as faces de um cilindro de comprimento unitário L e seção unitária A , ou seja, é a medida da resistência do material à passagem de uma corrente elétrica (Figura 2).

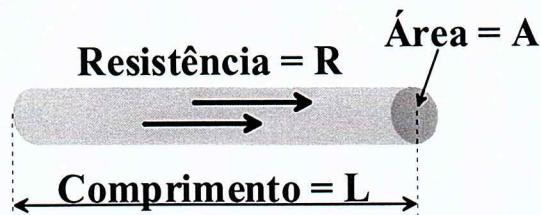


Figura 2 – Conceito de resistividade em um cilindro de comprimento unitário L e seção unitária A (Braga, 2000).

Portanto, a resistividade (ρ), cuja unidade é ohm.m, pode ser definida como:

$$\rho = \frac{\text{resistência} * \text{área}}{\text{comprimento}} = \frac{R * A}{L}$$

A grande maioria das rochas deveria ter comportamento de maus condutores, não fosse pelo fato de que usualmente apresentam poros preenchidos por fluidos, principalmente água (Telford *et al.*, 1990). Assim, a corrente elétrica se propaga através da condução eletrolítica, sendo o meio condutor uma solução de água e sais distribuídos de maneira complexa na porosidade das rochas. A resistividade dependerá da quantidade de água presente, de sua salinidade e distribuição na rocha.

O uso no campo baseia-se na capacidade do equipamento (transmissor de corrente) em introduzir uma corrente elétrica em sub-superfície e calcular as resistividades dos materiais geológicos em função das variações em profundidade.

O subsolo é considerado como um meio homogêneo, isotrópico e com resistividade ρ , limitado superiormente por uma resistividade considerada infinita, a atmosfera. Para que seja estabelecido um campo elétrico, será necessário injetar neste meio uma corrente elétrica, através de dois eletrodos, conectados a uma fonte (Orellana, 1972).

Em geral, os arranjos de campo dos métodos geoeletricos, constam de quatro eletrodos cravados na superfície do terreno. A voltagem observada no voltímetro é a diferença de potencial (ΔV) entre os dois eletrodos de potenciais.

A corrente elétrica de intensidade I é introduzida no subsolo por meio dos eletrodos de corrente (A e B) e o potencial ΔV gerado é medido por meio dos eletrodos de potencial (M e N), conforme a Figura 3.

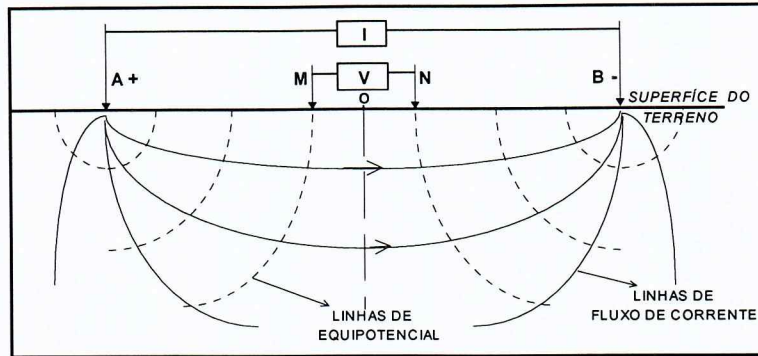


Figura 3 - Arranjo dos eletrodos dos métodos geoeletricos (Braga, 2000).

Ao supor que o meio investigado é homogêneo e isotrópico, tem-se que os potenciais V_M no eletrodo M, e V_N no eletrodo N serão dados por:

$$V_M = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad \text{e} \quad V_N = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right), \text{ respectivamente.}$$

Portanto, a diferença de potencial medida no equipamento para determinada posição dos eletrodos MN, será:

$$\Delta V_{MN} \equiv V_M - V_N, \text{ assim: } \Delta V_{MN} = \frac{I \rho}{2\pi} \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

Ao utilizar o mesmo arranjo de eletrodos para efetuar medições sobre um meio heterogêneo, a diferença de potencial observada ΔV será diferente da registrada sobre um meio homogêneo, pois o campo elétrico deverá sofrer modificações em função desta heterogeneidade dos materiais.

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo, a quantia medida representa uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em um volume de material em sub-superfície relativamente grande, portanto ao efetuar as medições pertinentes obtém-se uma resistividade aparente (ρ_a).

Esta ρ_a é a variável que expressa os resultados das medições na maioria dos métodos geoeletricos, e é a que se toma como base para a interpretação final. As dimensões da resistividade aparente, em virtude de sua definição, são as mesmas que para a resistividade, e sua unidade será também ohm.m. Pode-se então, calcular o valor da resistividade aparente (ρ_a) do meio investigado mediante a seguinte equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{onde} \quad K = 2\pi \left(\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right)$$

A escolha do arranjo dos eletrodos depende dos propósitos do levantamento, situação geológica (heterogeneidades verticais ou horizontais) e do tipo e qualidade de

informação desejada. Os métodos mais utilizados são: dipolo-dipolo (utilizado neste trabalho), pólo-dipolo, gradiente, Schlumberger, Wenner e “*mise-à-la-masse*”.

O levantamento do caminhamento elétrico é realizado ao longo de perfis e o arranjo dipolo-dipolo é definido pelas seguintes dimensões: centro dos dipolos AB e MN não permanecem fixos; espaçamento entre os eletrodos AB igual ao MN; espaçamento entre os dipolos AB e MN pode variar, utilizando-se, simultaneamente, vários dipolos MN dispostos ao longo da linha; e cada dipolo MN refere-se a um nível de investigação, como ilustra a Figura 2.

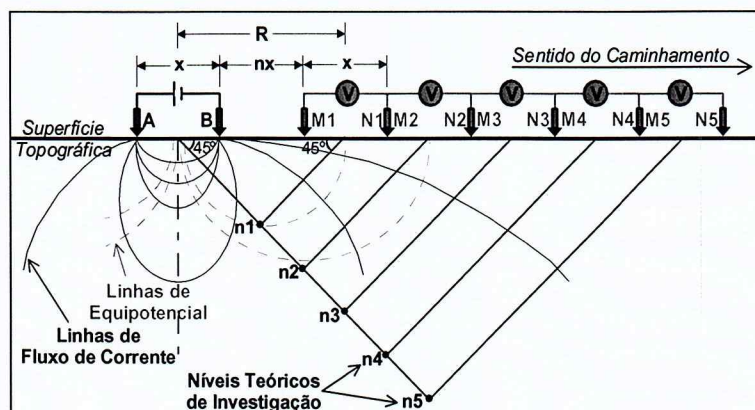


Figura 4 - Arranjo dipolo-dipolo com vários níveis teóricos de investigação (Braga, 2000).

Os potenciais medidos são afetados pela resistividade elétrica dos materiais em subsuperfície, registrando-se a amplitude dos valores de potencial durante a emissão da corrente elétrica.

O ponto de atribuição da leitura é tomado como sendo o ponto médio entre os dipolos AB e MN, locado em função de uma projeção de 45° a partir dos centros destes dipolos. A profundidade teórica investigada é a metade da distância entre os centros dos dipolos AB e MN, isto é, $R/2$.

Após a plotagem de todos os parâmetros físicos obtidos em um perfil levantado, tem-se uma seção geoeletrica aparente, chamada de pseudo-seção, pois as formas e contornos assumidos não são absolutamente verdadeiros, e sim uma aproximação.

Nos últimos tempos, utiliza-se o termo tomografia elétrica com o mesmo significado que o tradicional caminhamento elétrico, combinado com técnicas modernas de inversão, tanto em 2D quanto em 3D (Storz *et al.*, 2000).

Neste sentido, para obter-se uma seção geoeletrica mais precisa, é necessária a aplicação de filtros e processos de inversão dos dados, que conduzem a uma aproximação razoável de modelos para diversas estruturas geológicas.

As investigações efetuadas pelo caminhamento elétrico geralmente são feitas ao

longo de perfis e os resultados obtidos se relacionam através de mapas (a uma ou mais profundidades determinadas), ou de seções (com várias profundidades ou níveis de investigação).

3.1.2. APLICAÇÃO DA GEOFÍSICA NA HIDROGEOLOGIA

A pesquisa de água subterrânea em sistemas cársticos constitui um dos mais delicados problemas para a hidrogeologia subterrânea e para a geofísica, visto que o meio não é contínuo, homogêneo e eletricamente isotrópico (Escodino & Silva, 1980).

A geofísica é aplicada para a localização de aquíferos cársticos e determinação de zonas cársticas associadas a zonas de falhas ou não. Escodino & Silva (1980) aplicaram eletrorresistividade em uma região de Minas Gerais e definiram fraturamentos e estruturas cársticas. Le Masne (1979) aplicou métodos eletromagnéticos para determinar a profundidade das zonas carstificadas, a posição dos aquíferos e ainda as direções predominantes do processo de carstificação. Próximo à zona de falha, onde as rochas podem ser trituradas, há um aumento da porosidade de até 10% (Astier, 1975), implicando em uma anomalia condutora.

O Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo utiliza métodos geofísicos, como eletrorresistividade e sísmica, desde a década de 80 para auxiliar o estudo de problemas de superfície do nível d'água, topo rochoso, direção do sentido de fluxo de água subterrânea, etc. (Azevedo, informação verbal).

3.2. ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A análise estatística tem o objetivo de caracterizar e descrever a distribuição dos dados, determinando o tipo de distribuição de frequência, o valor médio dos dados, assim como suas medidas de dispersão e de forma. Esta etapa é realizada para um maior entendimento do comportamento da distribuição estatística da variável estudada.

3.2.1. MEDIDAS DE TENDÊNCIA CENTRAL

A Média Amostral é uma medida de tendência central dos dados, calculada como:

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

A Mediana corresponde ao valor que divide a distribuição em duas partes iguais.

A Moda é a classe de maior frequência na distribuição dos dados.

3.2.2. MEDIDAS DE DISPERSÃO

A dispersão dos valores em torno da média é medida pela Variância, calculada como:

$$Var[X] = S^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2$$

O Desvio Padrão é a raiz quadrada da Variância.

O Coeficiente de Variação é obtido pela divisão do Desvio Padrão pela Média:

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

Por ser uma medida adimensional, o Coeficiente de Variação permite a comparação da dispersão entre diferentes distribuições, medidas em diferentes escalas e com diferentes unidades.

3.2.3. MEDIDAS DE FORMA

A Assimetria é representada por um coeficiente que mede o grau de assimetria da distribuição em relação à normal, podendo ser positiva, negativa ou nula, o coeficiente de assimetria é calculado como:

$$CA = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^3}{S^3}$$

A Curtose é a medida do grau de achatamento da distribuição em relação à distribuição normal e indica a intensidade das freqüências na vizinhança dos valores centrais. O coeficiente de curtose é:

$$CC = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^4}{S^4}$$

3.3. GEOESTATÍSTICA

Os fundamentos da geoestatística foram definidos no início da década de 60 por D. Krige, nas minas de ouro do Rand, África do Sul, e sistematizados por G. Matheron, engenheiro da Escola de Minas de Paris, França. A geoestatística popularizou-se após a publicação dos conceitos da Teoria das Variáveis Regionalizadas, em inglês, no texto "The Theory of Regionalized Variables and its Applications" em 1971.

Segundo Landim (1997), a geoestatística enfoca três problemas: o entendimento pela análise matemática das leis naturais que regem o fenômeno estudado; a estimativa das variáveis regionalizadas usando informações e relações a partir de um conjunto discreto de amostras; e a avaliação dos erros de estimativa para estabelecer o grau de segurança em suas previsões.

As variáveis regionalizadas possuem comportamento espacial definido e mensurável. A partir da geoestatística faz-se a krigagem, que é um processo de estimativa de valores a partir de valores reais adjacentes considerados espacialmente interdependentes.

A aplicação da geoestatística inclui: cálculo do variograma experimental, verificação da existência de anisotropia, ajuste do modelo teórico de variograma e realização da validação cruzada.

3.3.1. VARIÁVEIS REGIONALIZADAS

A variável regionalizada é uma variável aleatória dependente da sua posição no espaço, e pode ser definida como uma função numérica com certa distribuição espacial, que varia de um ponto a outro com continuidade aparente. A Hipótese Intrínseca implica que uma função (função variograma) descreve o comportamento espacial da variável regionalizada dentro do espaço e é intrínseca da regionalização.

Segundo Yamamoto (2001), as variáveis regionalizadas possuem características que os métodos estatísticos convencionais não são capazes de reconhecer, como localização (posição geográfica das amostras), suporte (é o tamanho das amostras, em 1, 2 ou 3 dimensões), continuidade (variância espacial ponto a ponto) e anisotropia (diferentes comportamentos em diferentes direções).

3.3.2. VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS E MODELOS TEÓRICOS

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

Isto é, a variável regionalizada apresenta um aspecto aleatório e outro estruturado, que refletem as características estruturais do fenômeno regionalizado, tal fenômeno será descrito quantitativamente pela função variograma. A função variograma $2\gamma(h)$ é definida como a média das diferenças ao quadrado entre valores de pares de pontos no espaço, separados por uma distância h em uma dada direção, conforme:

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

onde n é o número de pares de pontos separados por uma distância h , $z(x)$ é o valor da variável no ponto x e $z(x+h)$ é o valor da variável no ponto $x+h$.

A representação gráfica da função variograma é o variograma, que possui algumas propriedades (Figura 5):

- ★ Amplitude (a): é a distância a partir da qual as amostras passam a ser espacialmente independentes, separando o campo estruturado (amostras correlacionadas) do campo aleatório (amostras independentes);
- ★ Patamar (C_0+C): é o valor no qual a variância do variograma se estabiliza;
- ★ Variância Aleatória ou Efeito Pepita (C_0): corresponde a uma descontinuidade próxima à origem;
- ★ Variância Espacial (C): é a diferença entre o patamar e o efeito pepita.

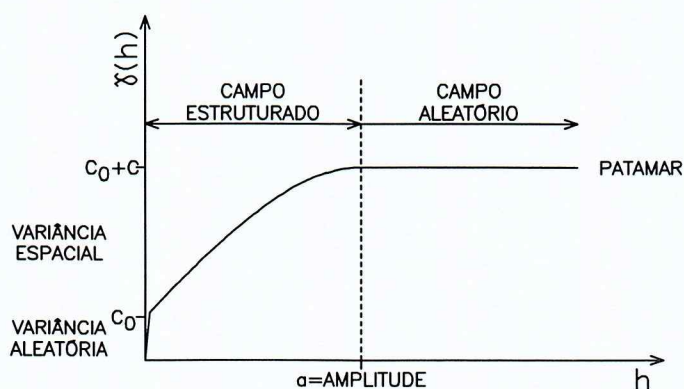


Figura 5 - Representação gráfica de um variograma e suas propriedades (Yamamoto, 2001).

A comparação entre valores de amostras separadas por uma distância h é direta se os pontos de dados estiverem distribuídos segundo uma malha regular. Tratando-se de uma malha irregular, deve-se fazer a pesquisa de amostras situadas a uma distância h , dentro de uma janela de pesquisa. Esta janela é definida, ao longo da direção do variograma, por um ângulo e por uma distância de tolerância. O ângulo de tolerância deve ser limitado, estabelecendo-se uma distância máxima.

Conforme descrito em Yamamoto (2001), a análise estrutural deve ser realizada tomando-se quatro direções iniciais de pesquisa: 0° , 45° , 90° e 135° . Se variogramas determinados ao longo de diferentes direções apresentarem variações distintas, existe anisotropia. No caso dos valores de resistividade a existência de anisotropia pode indicar a

presença de estruturas e condutos preenchidos ou não por água, caracterizando um sistema cárstico.

Como a krigagem requer o valor de variância espacial para qualquer distância, as quais serão utilizadas no sistema de krigagem, é necessário ajustar o modelo teórico de variograma a partir do variograma experimental obtido.

3.3.3. VALIDAÇÃO CRUZADA

A Validação Cruzada consiste em comparar o valor real com o valor estimado no próprio ponto, eliminando o valor deste ponto do conjunto de dados, objetivando a aferição do modelo e melhor definição dos parâmetros de vizinhança. Esta técnica permite que se conheça para cada ponto amostral o seu valor medido, o valor estimado, assim como as incertezas associadas. (Yamamoto, 2001).

O resultado da Validação Cruzada é apresentado na forma de um gráfico de dispersão dos valores reais x valores estimados. O resultado é ideal quando a reta de regressão coincide com a primeira bissetriz do gráfico, com o coeficiente de correlação igual a 1, porém esta situação nunca é alcançada. Deste modo, quanto mais a nuvem de dispersão se aproximar da bissetriz, maior será o coeficiente de correlação, caracterizando uma boa estimativa.

O campo do gráfico de dispersão pode ser dividido em quadrantes (Figura 6). Quando os valores se concentram nos quadrantes ímpares (I e III), a estimativa é tida como boa, pois os valores altos foram estimados altos e valores baixos, como baixos. Quando a concentração dos valores está no quadrante II, caracteriza uma superestimativa, onde os valores estimados são maiores do que os valores reais. No quadrante IV ocorre o inverso, uma subestimativa.

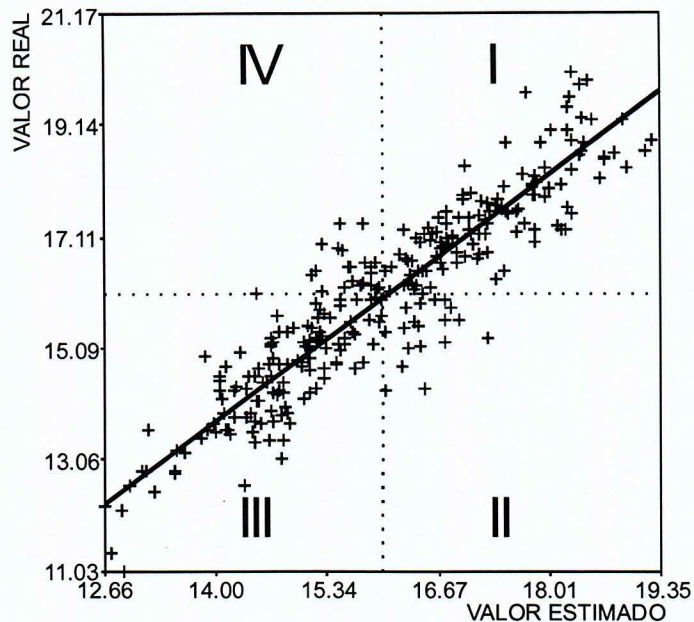


Figura 6 – Gráfico de dispersão da Validação Cruzada, dividido em quadrantes (I, II, III e IV).

3.3.3.1. PARÂMETROS DE VIZINHANÇA

Os parâmetros de vizinhança estabelecem o subconjunto de amostras a ser utilizado na estimativa. Isto é, apenas as amostras dentro de um raio de influência serão utilizadas para a krigagem ordinária, que faz uso da correlação espacial existente entre as amostras, modelada pela função variograma.

O modo de localização e busca de n amostras vizinhas para a definição do subconjunto de amostras a ser utilizado na estimativa local deve ser bem estudado e garantir uma boa amostragem espacial, pois diferentes subconjuntos de amostras poderão ser definidos, obtendo diferentes resultados.

Para tanto, é necessário estabelecer critérios para a definição da vizinhança local, como número de setores angulares, número mínimo de amostras, número ideal de amostras por setor, raio máximo de busca e número máximo de setores consecutivos vazios.

Se o subconjunto dos pontos for definido por n pontos mais próximos em relação ao ponto interpolado (Figura 7), pode ocorrer um agrupamento de pontos, tornando a amostragem espacial não representativa em termos de reprodução do gradiente dos dados (Yamamoto, 2001).

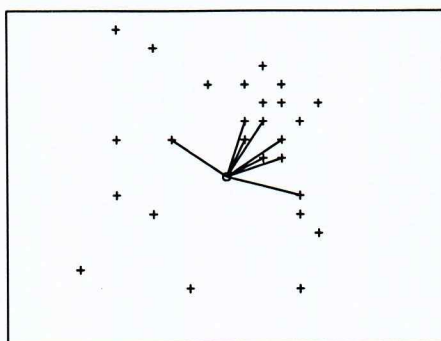


Figura 7 – Seleção de amostras pelo critério dos pontos mais próximos (Yamamoto, 2001).

Para evitar esse agrupamento de pontos, estabeleceu-se critérios de seleção de amostras baseadas na subdivisão da região do ponto a ser estimado em quatro ou oito setores, chamados de quadrante e octante respectivamente. Por estes critérios, a região do ponto a ser estimado é subdividida em 4 (Figura 8) ou 8 setores (Figura 9), onde os $n/4$ ou $n/8$ pontos mais próximos por setor são selecionados (Yamamoto, 2001).

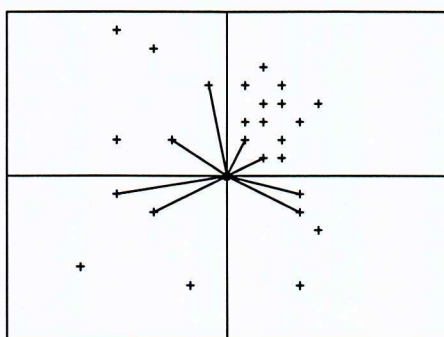


Figura 8 - Seleção de amostras pelo critério do quadrante (Yamamoto, 2001).

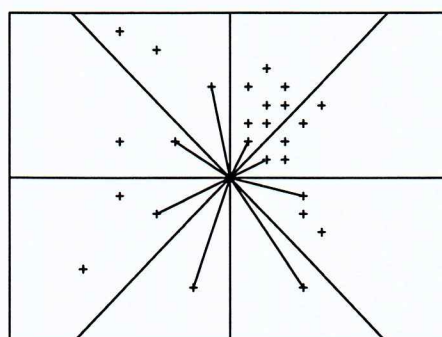


Figura 9 - Seleção de amostras pelo critério do octante (Yamamoto, 2001).

Ainda segundo Yamamoto (2001), embora a seleção de amostras pelo critério dos octantes resulte numa melhor distribuição espacial, há o inconveniente de amostras mais distantes serem selecionadas para a estimativa do ponto. Deve existir um compromisso entre a representatividade da amostragem e a distância máxima das amostras selecionadas.

O número ideal de amostras por setor não deve ser muito pequeno, com o risco de a estimativa ser um número semelhante ao ponto mais próximo, nem muito grande, com o risco da estimativa ser muito suavizada. Usa-se com frequência 8 amostras como número ideal, que se ajustam aos critérios de quadrante (2 amostras por setor) e octante (1 amostra por setor). Vale ressaltar que também é necessário estabelecer um número mínimo de amostras, quando não for possível utilizar o número ideal.

Os raios máximos de busca em cada direção correspondem ao valor de sua amplitude do variograma ajustado, visto que esta representa a distância máxima a partir da qual as amostras não apresentam mais correlação espacial.

3.4. KRIGAGEM ORDINÁRIA

A Krigagem Ordinária é o método que permite estimar o valor desconhecido $z^*(x_0)$ (estimador) associado a um ponto a partir de um conjunto de n dados disponíveis:

$$z^*(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i \cdot z(x_i)$$

onde $z(x_i)$ é o valor que a variável regionalizada assume no i -ésimo ponto vizinho ao que será estimado; e λ_i é i -ésimo ponderador, associado ao i -ésimo ponto vizinho, obtidos a partir da resolução de um sistema de equações lineares, denominado de sistema de krigagem, conforme:

$$\begin{bmatrix} \gamma(x_1, x_1) & \gamma(x_1, x_2) & \cdots & \gamma(x_1, x_n) & 1 \\ \gamma(x_2, x_1) & \gamma(x_2, x_2) & \cdots & \gamma(x_2, x_n) & 1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & 1 \\ \gamma(x_n, x_1) & \gamma(x_n, x_2) & \cdots & \gamma(x_n, x_n) & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 0 \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_n \\ \mu \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \gamma(x_0, x_1) \\ \gamma(x_0, x_2) \\ \vdots \\ \gamma(x_0, x_n) \\ 1 \end{bmatrix}$$

onde $\gamma(x_n, x_n)$ é o valor da variância espacial entre as amostras, $\gamma(x_0, x_n)$ é o valor da variância espacial das amostras em relação ao ponto estimado, μ corresponde ao multiplicador de Lagrange. A condição de restrição que caracteriza a krigagem ordinária é a soma dos ponderadores ser igual a 1: $\sum_{i=1}^n \lambda_i = 1$.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Os dados utilizados foram obtidos pelo IPT a partir de perfis geofísicos de eletrorresistividade, que descrevem a resistência dos materiais (condutivos ou não) em transmitir corrente elétrica.

A análise estatística foi realizada utilizando-se o programa GeoVisual (Yamamoto, 2002), onde foram calculadas as estatísticas descritivas com o cálculo das medidas de tendência central, de dispersão e de forma, assim como o histograma de frequências dos

dados utilizados. Esta análise tem o objetivo de caracterizar o comportamento da distribuição dos dados.

A análise geoestatística, a krigagem e sua interpretação foram realizadas utilizando os programas GeoVisual (Yamamoto, 2002), Isatis® e Datamine®. Na análise geoestatística foram realizados os cálculos dos variogramas experimentais em diversas direções para a verificação da existência de anisotropia, ou não. Uma vez detectada a anisotropia, os variogramas foram recalculados em apenas três direções e, assim, o modelo teórico de variograma foi ajustado.

Foram testados diversos parâmetros de vizinhança de modo que pudessem ser comparados e aquela considerada como a mais adequada utilizada na estimativa por krigagem ordinária.

5. ESTUDO DE CASO

O objetivo da aplicação da geofísica é complementar o arranjo geométrico-espacial dos litotipos e das principais estruturas rúpteis presentes no entorno da área de uma mina subterrânea, integrando dados de levantamento de campo a dados de geofísica, de maneira a caracterizar sistemas cársticos e subsidiar a elaboração do modelo hidrogeológico regional.

5.1. GEOLOGIA DA ÁREA

Este item será deliberadamente pouco desenvolvido, sem caracterização específica da geologia regional e estrutural da área, devido a questões de sigilo.

O contexto geotectônico é caracterizado por seqüências de rochas metamórficas de baixo a alto grau, seqüências ígneas intrusivas e vulcano-sedimentares, e coberturas sedimentares.

A formação predominante na área é composta por metadolomitos bandados, além de metadoloarenitos, metadolomitos estromatolíticos e brechas tectônicas. Há também intercalações com filitos carbonosos cinza com espessuras decimétricas e decamétricas e espaçamentos métricos a decamétricos.

Estudos anteriores na área, realizados pelo IPT, indicam que as principais estruturas reconhecidas referem-se ao bandamento (acamamento sedimentar reliquiar N40E/20NW) dos filitos e metadolomitos, foliação milonítica (N29E/20NW), resultante de deformação dúctil não-coaxial, de baixo ângulo. Há zonas de cisalhamento transcorrente, reconhecidas

pela formação de uma foliação cisalhante de alto ângulo (N55E/64NW), transpondo a foliação milonítica. Descontinuidades são identificadas por fotointerpretação e em campo, como famílias de juntas, clivagens, fraturas e falhas. Ocorrem juntas de médio ângulo nos metadolomitos (N25E/57NW, N54E/57SE e N52W/63SW) e descontinuidades subverticais nos metadolomitos e filitos (N46W/86SW e N51E/83SE).

5.2. ENSAIOS GEOFÍSICOS

Os ensaios de eletrorresistividade foram executados em uma pequena porção da área envolvida no estudo, e foram realizados apenas em caráter experimental, visando a aplicabilidade do método na identificação das estruturas em profundidade assim como evidenciar diferentes estágios e níveis de carstificação das estruturas e do maciço rochoso como um todo.

Foram realizados 8 perfis de caminhamento geofísico (A, B, C, D, E, F, G e H) de eletrorresistividade, onde os resultados permitiram complementar o entendimento do arranjo geométrico-espacial das estruturas condicionantes do fluxo d'água subterrâneo, conforme estudado anteriormente pelo próprio IPT.

A geometria dos ensaios obedeceu inicialmente à necessidade de se verificar a ocorrência de anomalias que pudessem ser associadas a estruturas carstificadas. Dessa forma, executaram-se três linhas de caminhamento elétrico (A, B e H) com intuito de se identificar as estruturas de direção NW-SE envolvidas na carstificação e caracterizá-las quanto a seu desenvolvimento lateral e em profundidade. Adicionalmente, efetuaram-se cinco linhas transversais (C, D, E, F, G), visando avaliar o desenvolvimento do carste nas estruturas NE-SW e ENE-WSW.

O perfil A possui 5.320 metros de extensão, cortando a área de SW a NE, aproximadamente. Os perfis B, C, D, E, F e G têm, respectivamente, 1.960 m, 1.760 m, 1.440 m, 1.160 m, 1.040 m e 480 m, e estão dispostos obliquamente ao perfil A, com exceção do perfil B, que está a 300 m sub-paralelo à porção leste do perfil A. Já o perfil H, com 1.520 m de extensão, encontra-se, aproximadamente, a 1.700 m sub-paralelo à porção central do perfil A. A Figura 10 ilustra a distribuição destes perfis em planta.

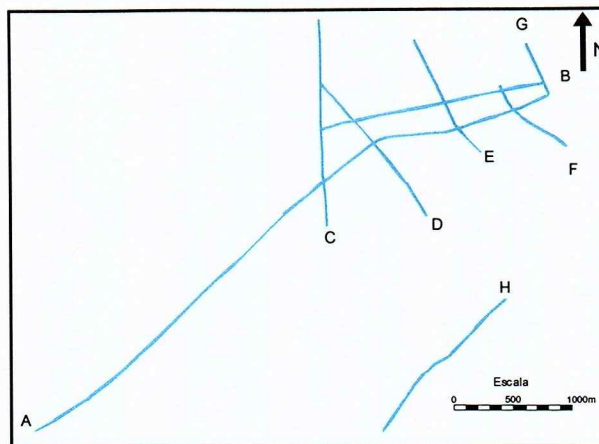


Figura 10 - Planta da área total com os perfis geofísicos realizados.

O levantamento foi realizado segundo o arranjo dipolo-dipolo, com o espaçamento entre os eletrodos igual a 40 metros, com o deslocamento dos eletrodos M e N de 40 metros, obtendo-se 8 níveis de investigação. A aparelhagem utilizada no levantamento de campo foi um transmissor de corrente TSQ3 e um receptor PR12, ambas da Scintrex.

Para a inversão dos dados e determinação de modelos de resistividade, utilizou-se o programa RES2DINV, desenvolvido pela Geotomo Softwares, que utiliza o método dos mínimos quadrados para os processos de inversão (Loke, 2001), projetando os valores de eletrorresistividade para profundidades reais até -500m, aproximadamente.

5.3. CONDICIONANTES DA EVOLUÇÃO DO CARSTE

Na área em análise, ocorrem inúmeras intercalações pelíticas no interior do maciço dolomítico, onde a distribuição, posição espacial, espaçamento e espessura são pouco conhecidos. Essa intercalação de níveis margosos e pelíticos pode atuar como barreiras hidráulicas, restringindo e concentrando a circulação da água subterrânea em zonas preferenciais, promovendo maior ou menor carstificação.

A distribuição espacial das estruturas (foliação, falhas, fraturas, juntas, etc) conferem ao maciço uma rede de planos e de direções preferenciais à percolação de água, impondo contrastes de permeabilidade entre os sucessivos planos e/ou intercalações rochosas, que são as grandes responsáveis pela distribuição dos condutos cársticos no maciço rochoso. Devido a estas características, ganham importância por favorecer o fluxo subterrâneo, caracterizando-se como o principal plano de percolação no maciço dolomítico.

O contexto geológico destaca uma intensa participação das estruturas de direção NW no processo de carstificação, sendo esta uma importante direção de fluxo.

A maiores profundidades, no entanto, as barreiras hidráulicas atuam de maneira

mais eficiente, interrompendo e redirecionando os fluxos no interior do maciço, mesmo ao longo das descontinuidades de grande persistência.

6. DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO

As atividades realizadas para a elaboração desta monografia foram distribuídas ao longo dos meses, seguindo o cronograma da Tabela 1 a seguir:

Tabela 1 - Cronograma das atividades realizadas.

| Atividade \ Mês | Março | Abril | Mai | Junho | Julho | Agosto | Setembro | Outubro |
|-----------------------------------|-------|-------|-----|-------|-------|--------|----------|---------|
| Revisão Bibliográfica | | | | | | | | |
| Análise Estatística | | | | | | | | |
| Variogramas | | | | | | | | |
| Validação Cruzada | | | | | | | | |
| Krigagem | | | | | | | | |
| Análise dos Resultados | | | | | | | | |
| Elaboração da Monografia e Resumo | | | | | | | | |

A monografia foi desenvolvida dentro dos prazos estabelecidos no início do projeto, satisfazendo a previsão para a sua realização.

7. RESULTADOS OBTIDOS

Como ilustrado anteriormente na Figura 10, observa-se que o perfil A é muito extenso e que o perfil H está muito distante dos outros. Devido a essa configuração, optou-se por reduzir a área para o tratamento dos dados conforme ilustrado na Figura 11.

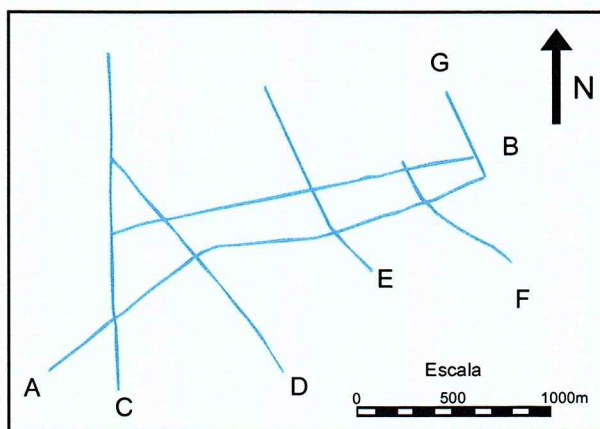


Figura 11 - Planta da área reduzida com os perfis utilizados para o tratamento dos dados.

7.1. ANÁLISE ESTATÍSTICA

O resultado da análise estatística dos dados está resumido na Tabela 2 a seguir.

Tabela 2 - Estatísticas dos dados de eletrorresistividade utilizados.

| ESTATÍSTICAS | Medidas de Tendência Central | Número de dados | 3.766 |
|--------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| | | Mínimo | 98,816 |
| | | Máximo | 999,968 |
| | | Média | 831,054 |
| | | Mediana | 886,166 |
| | | Moda (classe de maior frequência) | 939,901-999,968 |
| | Medidas de Dispersão | Variância | 28.201,470 |
| | | Desvio Padrão | 167,933 |
| | | Coeficiente de Variação | 0,202 |
| | Medidas de Forma | Assimetria | -1,45 |
| | | Curtose | 4,94 |

O histograma, ilustrado na Figura 12, mostra a distribuição de frequência dos dados, divididos em 15 classes, caracterizando uma distribuição assimétrica negativa.

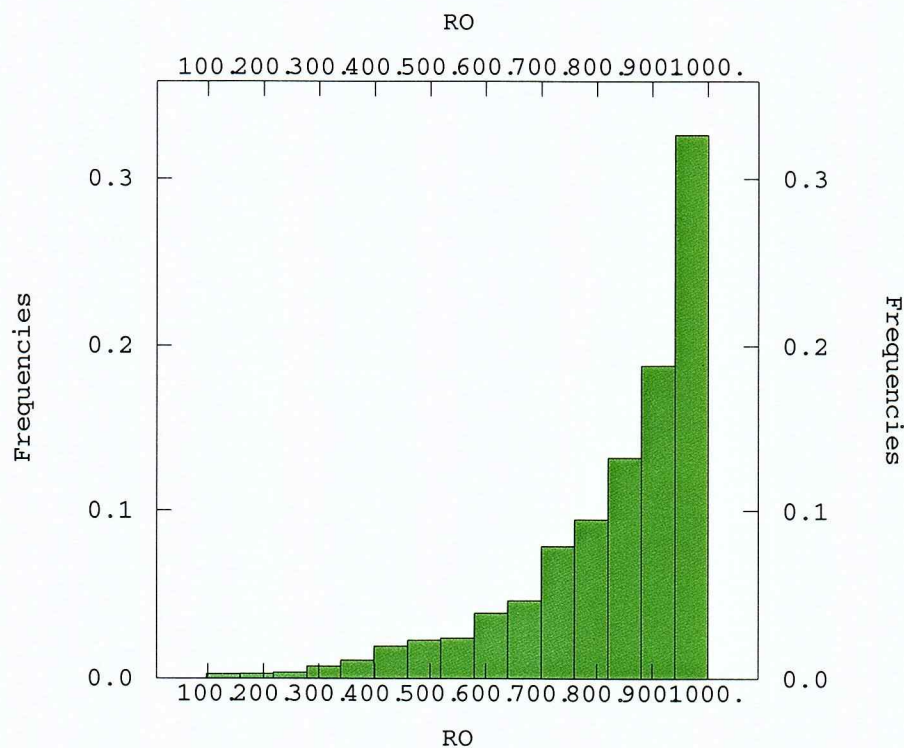


Figura 12 - Histograma dos dados.

7.2. ANÁLISE GEOESTATÍSTICA

A análise geoestatística foi realizada utilizando os programas GeoVisual (Yamamoto, 2002) para cálculo do variograma experimental e o ajuste do modelo teórico do variograma; e Isatis®, para a validação cruzada, definição dos parâmetros de vizinhança e krigagem

ordinária.

7.2.1. VARIOGRAMAS EXPERIMENTAIS

Inicialmente o variograma foi calculado em 5 direções: $0^\circ/0^\circ$, $45^\circ/0^\circ$, $90^\circ/0^\circ$, $135^\circ/0^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$, conforme pode ser observado na Figura 13.

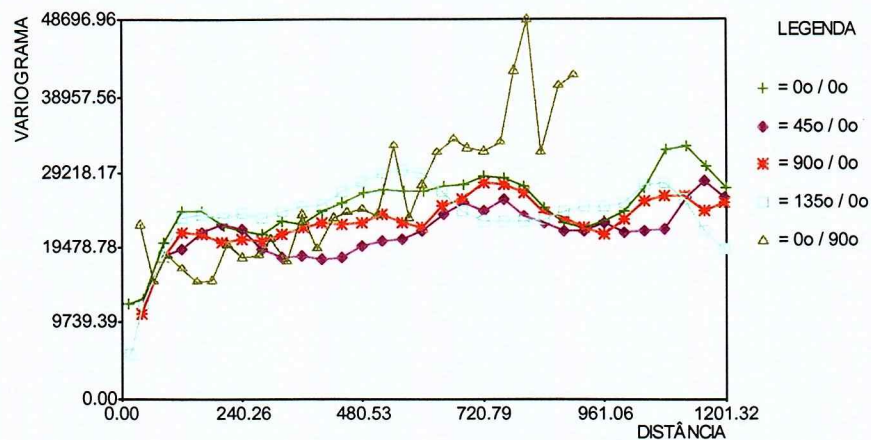


Figura 13 - Variograma calculado em cinco direções.

O variograma calculado apresenta variações distintas ao longo de diferentes direções, apontando uma anisotropia mista, onde tanto a amplitude quanto o patamar variam ao longo de duas direções. O variograma foi recalculado apenas para as direções $45^\circ/0^\circ$, $135^\circ/0^\circ$ e $0^\circ/90^\circ$, conforme ilustrado na Figura 14:

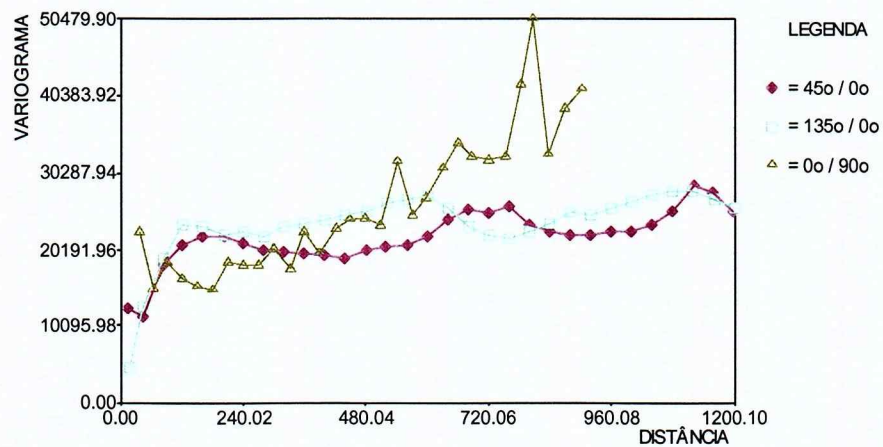


Figura 14 - Variograma calculado em três direções.

7.2.2. MODELOS TEÓRICOS DOS VARIOGRAMAS

Ao variograma experimental, foi ajustado o modelo esférico, contendo três estruturas, ajustando assim a anisotropia mista reconhecida nos variogramas experimentais. Para tanto, optou-se por calcular o modelo na direção 0°/90° separadamente dos demais devido à diferença da escala utilizada, visto que a distância entre as amostras na vertical é menor do que na horizontal. Com isso, a amplitude é menor, ou seja, a distância em que as amostras possuem correlação é menor.

Deve-se destacar que o ajuste do variograma na direção 0°/90° considerou apenas os 6 primeiros pares de pontos do variograma experimental. Justifica-se esta consideração devido ao campo geométrico desta direção, que não ultrapassa 250 m. Por problemas computacionais o campo geométrico não foi considerado para o cálculo do variograma experimental na vertical.

A Figura 15 ilustra o variograma experimental e o modelo teórico ajustado na direção 0°/90°.

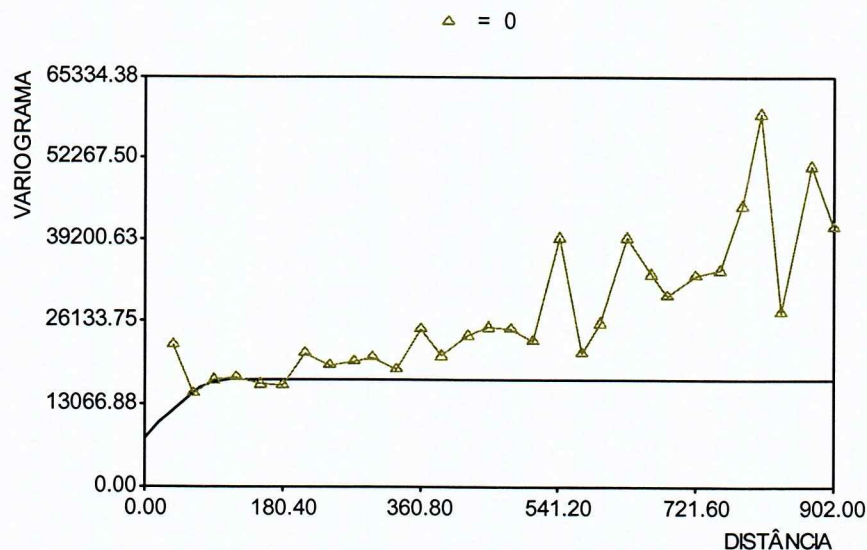


Figura 15 - Variograma modelado para a direção 0°/90°.

A seguir, foi ajustado o modelo teórico do variograma para as direções 45°/0° e 135°/0° com os parâmetros já interpretados para a direção 0°/90°, como mostra a Figura 16:

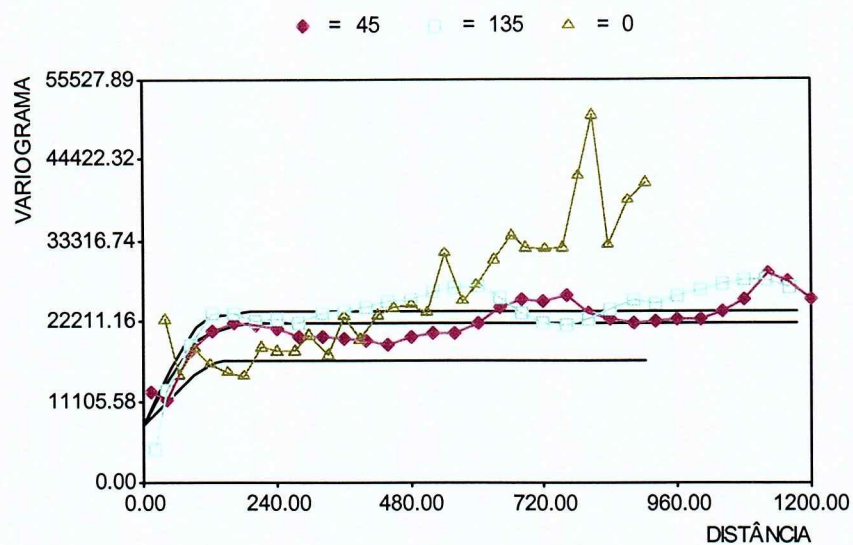


Figura 16 - Variograma modelado para as direções: 45°/0°, 135°/0° e 0°/90°.

Os parâmetros utilizados no ajuste do modelo teórico do variograma são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3 - Parâmetros utilizados no ajuste do modelo teórico do variograma.

| | Direção | Modelo | Efeito Pepita | Variância Espacial | Amplitude Máxima | Amplitude Mínima | Amplitude Vertical |
|--------------|---------|----------|---------------|--------------------|------------------|------------------|--------------------|
| 1ª Estrutura | 0°/90° | Esférico | 7740 | 9200 | 155 | 145 | 105 |
| 2ª Estrutura | 45°/0° | Esférico | 7740 | 5174 | 155 | 215 | 1E+30 |
| 3ª Estrutura | 135°/0° | Esférico | 7740 | 1625 | 1E+30 | 260 | 1E+30 |

7.2.3. VALIDAÇÃO CRUZADA

A Figura 17 ilustra o gráfico de dispersão da validação cruzada com coeficiente de correlação obtido de 0,868.

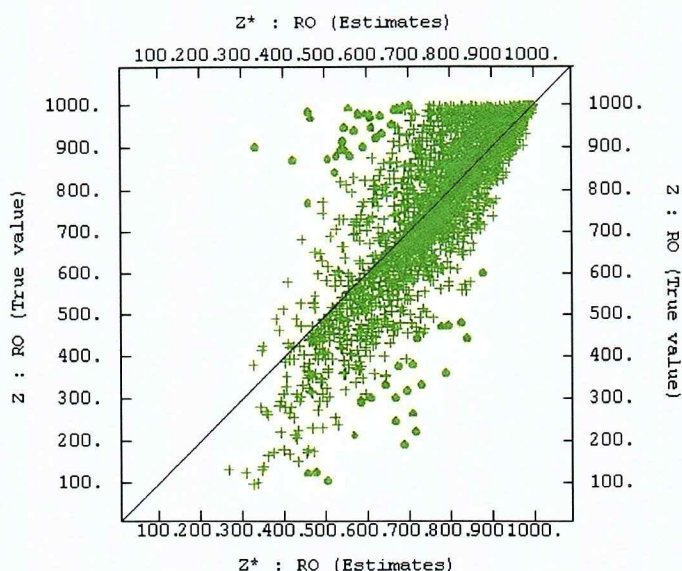


Figura 17 – Gráfico de dispersão da Validação Cruzada.

7.2.3.1. PARÂMETROS DE VIZINHANÇA

Foram testadas várias vizinhanças até se obter um melhor resultado, cujo coeficiente de correlação é 0,868. Apesar de não ser o maior coeficiente obtido, esta vizinhança abrange uma maior área de krigagem, relevante neste trabalho. Os parâmetros de vizinhança testados estão listados na Tabela 4, destacando-se a tentativa 7, cuja vizinhança foi utilizada para a krigagem.

Tabela 4 - Parâmetros de vizinhança testados.

| Tentativas | | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|--|---------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| Número de setores angulares | | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 | 8 |
| Número mínimo de amostras | | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Número ideal de amostras por setor | | 1 | 2 | 3 | 3 | 3 | 3 | 3 |
| Número máximo de setores consecutivos vazios | | 3 | 3 | 3 | 4 | 4 | 4 | 4 |
| Raios máximos de busca | 45°/0° | 155 | 155 | 155 | 155 | 140 | 180 | 215 |
| | 135°/0° | 145 | 145 | 145 | 145 | 130 | 170 | 260 |
| | 0°/90° | 105 | 105 | 105 | 105 | 90 | 130 | 105 |
| Coeficiente de Correlação | | 0,867 | 0,870 | 0,874 | 0,875 | 0,870 | 0,872 | 0,868 |

7.3. KRIGAGEM ORDINÁRIA

7.3.1. MODELO DE BLOCOS

Com o ajuste do modelo de variograma e os parâmetros de vizinhança, foi realizada a krigagem ordinária, para estimar o valor de eletrorresistividade em pontos não amostrados, centros dos blocos do modelo. A Figura 18 mostra a área de abrangência (em

cinza) do modelo em planta.

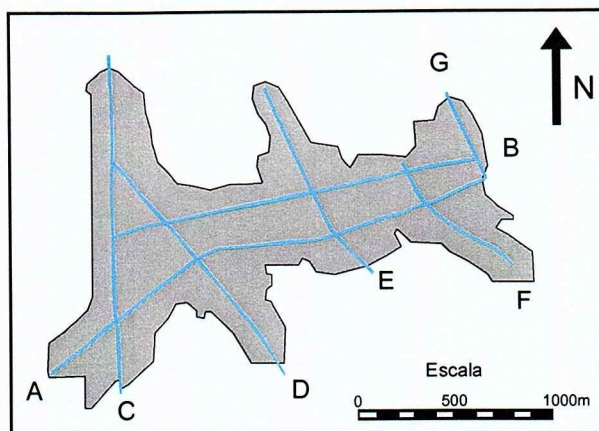


Figura 18 - Área de abrangência (em cinza) do modelo em planta, com os perfis utilizados para o tratamento dos dados.

A Tabela 5 mostra os parâmetros utilizados no modelo de blocos para as direções X (E-W), Y (N-S) e Z (altitude).

Tabela 5 – Parâmetros do modelo de blocos.

| | Tamanho do bloco | Número de blocos |
|---|------------------|------------------|
| X | 40 | 79 |
| Y | 40 | 55 |
| Z | 40 | 49 |

A krigagem foi realizada utilizando-se o programa Isatis®. Visando uma melhor visualização do modelo de blocos, optou-se por exportar os dados para o programa Datamine®. A Figura 19 ilustra o modelo de blocos.

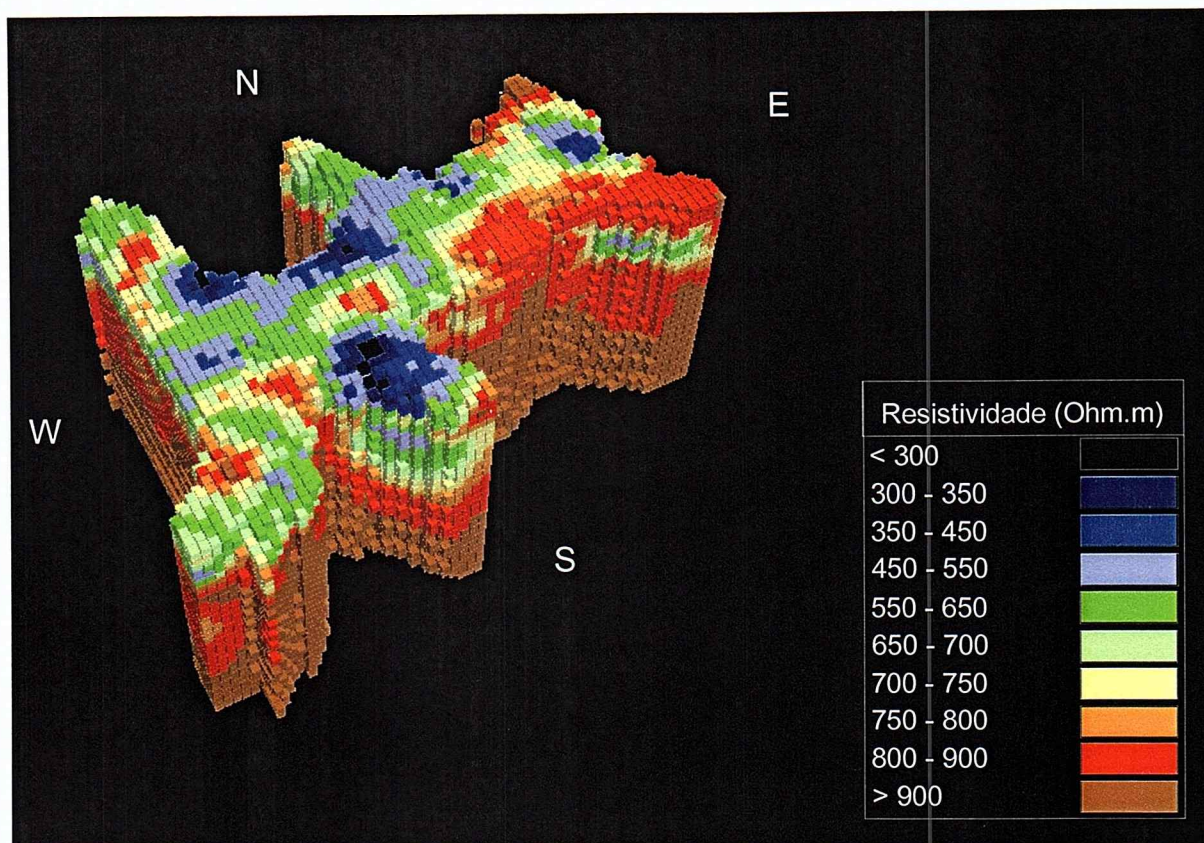


Figura 19 - Modelo de blocos.

7.3.2. ESTATÍSTICAS DO MODELO

A análise estatística dos dados de eletrorresistividade estimados pela krigagem está resumida na Tabela 6.

Tabela 6 – Estatísticas dos dados de eletrorresistividade estimados pela krigagem.

| ESTATÍSTICAS | Medidas de Tendência Central | Número de dados | 38.492 |
|--------------|------------------------------|-----------------------------------|-----------------|
| | | Mínimo | 222,336 |
| | | Máximo | 998,825 |
| | | Média | 864,439 |
| | | Mediana | 908,753 |
| | | Moda (classe de maior frequência) | 947,059-998,825 |
| | Medidas de Dispersão | Variância | 17.033,478 |
| | | Desvio Padrão | 130,512 |
| | | Coefficiente de Variação | 0,151 |
| | Medidas de Forma | Assimetria | -1,48 |
| | | Curtose | 4,94 |

O histograma, ilustrado na Figura 20, mostra a distribuição de frequência dos dados de eletrorresistividade estimados pela krigagem, caracterizando uma distribuição assimétrica negativa.

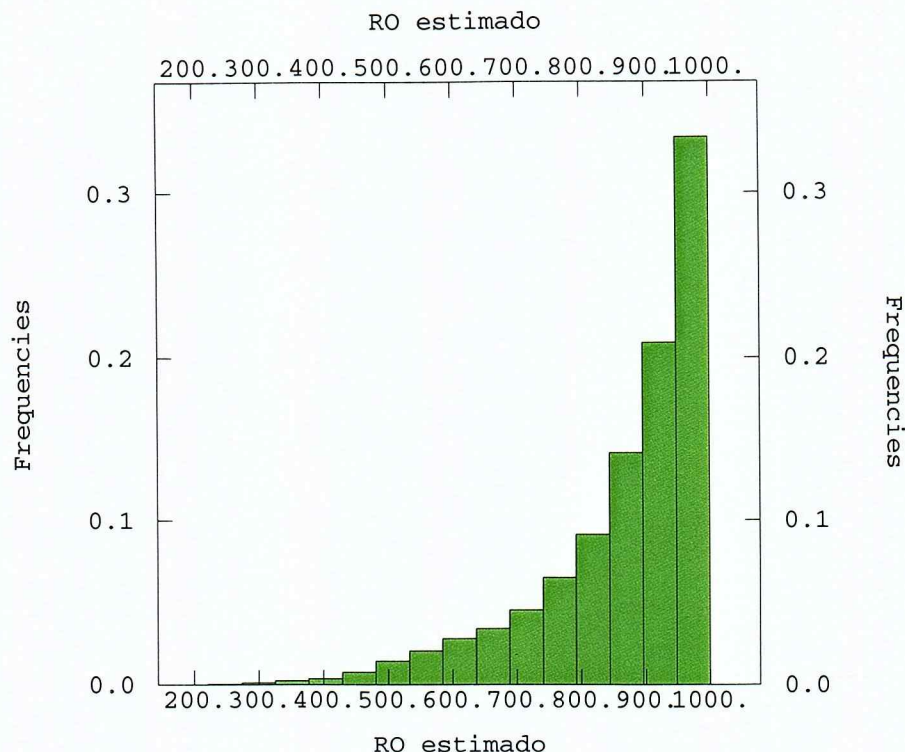


Figura 20 – Histograma dos valores obtidos na krigagem.

8. INTERPRETAÇÃO DOS RESULTADOS

Os dados dos perfis geofísicos seguindo uma geometria não regular foram complementados com os valores estimados pela krigagem, resultando em um modelo tridimensional. Com isso, foi possível a verificação da continuidade lateral e da profundidade de anomalias indicando o aprofundamento das estruturas carstificadas.

As anomalias condutivas representam áreas saturadas do maciço com maior percolação de água, ou seja, planos de circulação preferencial de água, representando estruturas e/ou intercalações de filito em meio aos metadolomitos. A sucessão de litotipos mais e menos susceptíveis à solubilização, bem como a atuação das discontinuidades de maior persistência, conduzem a uma diferenciação lateral dos processos de carstificação, paralelamente à diferenciação vertical decorrente do aprofundamento dos processos cársticos.

A partir do modelo foram construídas plantas em diferentes cotas, para análise das anomalias em profundidade, traçando-se as direções preferenciais das anomalias condutivas, como mostra a Figura 21.

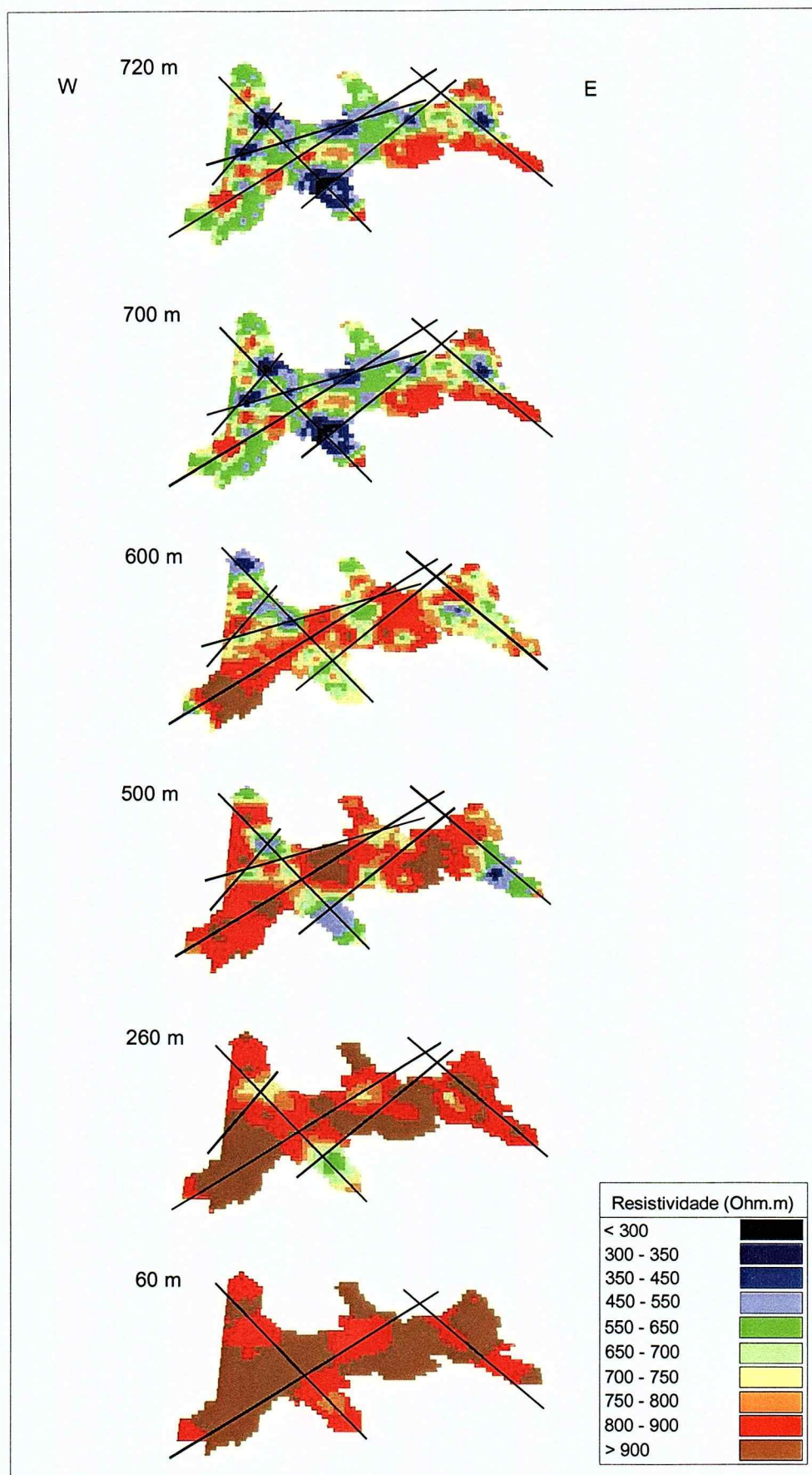


Figura 21 – Plantas do modelo em diferentes cotas, com o traçado das direções preferenciais das anomalias condutivas (tons zuis).

Observa-se que, a pouca profundidade (cotas 720 m, 700 m, 600 m e 500 m), as anomalias pouco resistivas, representadas por tons azuis, destacando-se e possuem nítida direção preferencial. Aumentando-se a profundidade (cotas 260 m e 60 m), observa-se que essas anomalias ficam mais amenas, evidenciando que o processo de carstificação é mais intenso próximo à superfície, contudo ainda apresentam direção.

Considerando que as anomalias se distribuem seguindo planos (descontinuidades ou contatos entre rochas), é necessário analisá-las nos cortes horizontais juntamente com os mergulhos observados a partir de seções verticais do modelo.

A Figura 22 mostra as seções verticais orientadas segundo os perfis geofísicos A, B e C, com o traçado dos mergulhos aparentes preferenciais das anomalias condutivas. A partir desta análise, inferiu-se as direções e mergulhos dos planos de anomalia condutiva, chamados de P1, P2, P3 e P4. Porém, foram observadas duas linhas L1 e L2, que representam linhas de intersecção de planos de descontinuidade, obtendo-se apenas suas direções. Estes resultados estão sumarizados na Tabela 7.

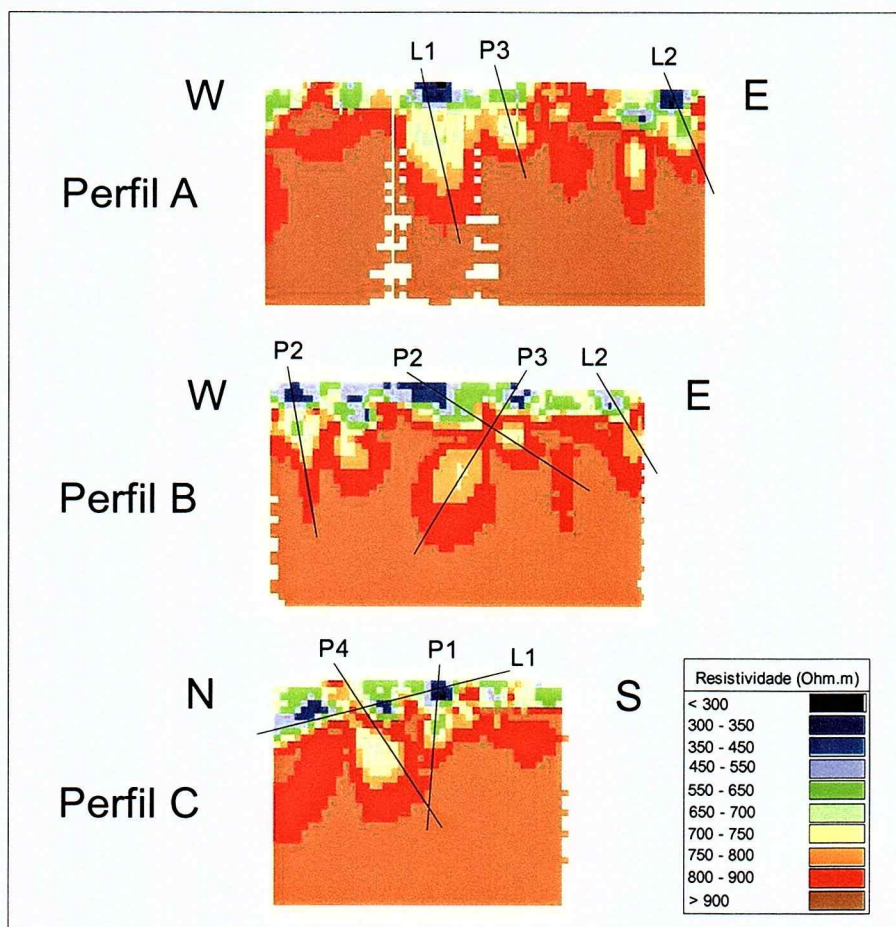


Figura 22 – Seções verticias segundo os perfis geofísicos A, B e C, com o com o traçado dos mergulhos aparentes preferenciais das anomalias condutivas (tons azuis).

Tabela 7 - Direção dos planos de descontinuidade e linhas de intersecção de descontinuidades.

| | | Direção | Mergulho |
|-------|----|---------|-------------|
| Plano | P1 | NE | Subvertical |
| | P2 | NE | SE |
| | P3 | NE | SE |
| | P4 | NE | SE |
| Linha | L1 | NW - SE | - |
| | L2 | NW - SE | - |

A partir destes resultados, a Figura 21 foi complementada com os nomes dos planos P₁, P₂, P₃ e P₄, e das linhas L₁, L₂, mostradas na Figura 23.

Para correlacionar as anomalias do modelo com as descontinuidades do maciço devem ser consideradas as atitudes do:

- ★ bandamento do metadolomito: N40E/20NW;
- ★ zona de cisalhamento: N55E/64NW;
- ★ juntas subverticais nos metadolomitos e filitos: N46W/86SW e N51E/83SE;
- ★ juntas de médio ângulo nos metadolomitos: N25E/57NW, N54E/57SE e N52W/63SW.

Com isso, pode-se correlacionar as anomalias condutivas do modelo com as juntas de médio ângulo presentes nos metadolomitos, de direção NE e mergulho para SE e com as juntas subverticais presentes nos metadolomitos e filitos, de direção NE e mergulho para SE.

A utilização da krigagem para estimar valores de resistividade em pontos não amostrados adicionou informação para a indicação de zonas de maior saturação do maciço rochoso e, portanto, as estruturas e/ou condicionantes geológicas mais significativos do ponto de vista hidrogeológico.

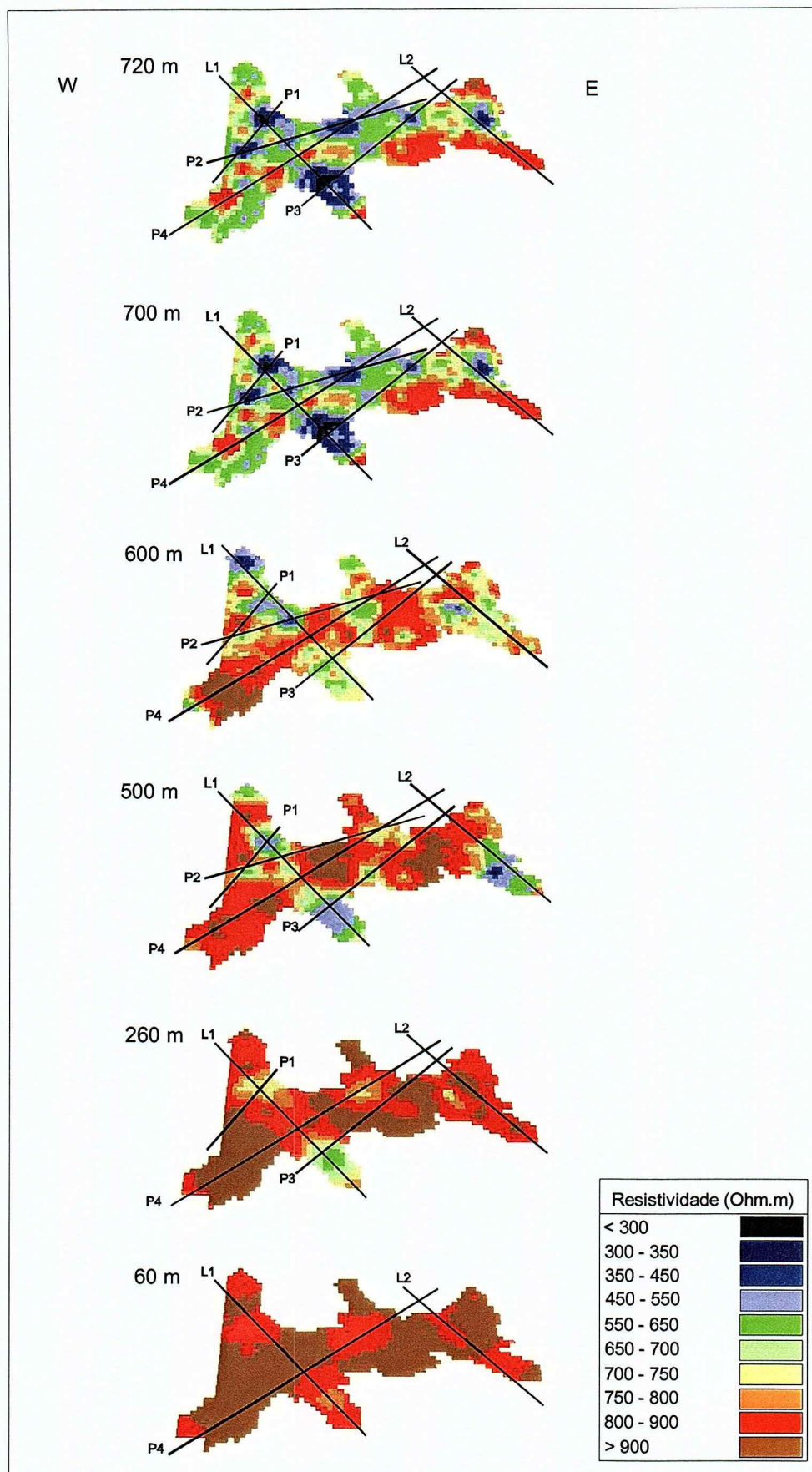


Figura 23 - Plantas do modelo em diferentes cotas, com o traçado dos planos P1, P2 e P3 e das linhas L1 e L2.

9. CONCLUSÕES

De acordo com a análise dos resultados obtidos e suas interpretações, pode-se afirmar que a krigagem conseguiu complementar os dados de anomalias de resistividade e, assim, ressaltar os principais condicionantes do processo de carstificação do maciço, como é o caso das descontinuidades e dos corpos de filito intercalados no maciço dolomítico.

As anomalias condutivas possuem mais expressão quanto mais próximo da superfície, evidenciando que o processo de carstificação é mais intenso até a cota 500 m.

Como foi mostrado anteriormente, inferiu-se as direções e mergulhos dos planos de anomalia condutiva, chamados de P1, P2, P3 e P4, e as direções das linhas de intersecção de planos de descontinuidade, L1 e L2.

Assim, foi possível caracterizar e diferenciar as estruturas e/ou zonas carstificadas quanto à sua saturação, correlacionando os planos de anomalia condutiva às juntas (descontinuidades) de médio e alto ângulo presentes nos metadolomitos e/ou filitos, de direção NE mergulhando para SE.

Vale ressaltar que para se obter resultados melhores da krigagem, a fim de melhorar a definição dos condicionantes de carstificação do maciço, dever-se-ia considerar o adensamento da malha de amostragem utilizada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Astier, J. L. 1975. Geofísica Aplicada a la Hidrogeologia. Paris, 344p.
- Braga, L. V. P. 1988. Geofísica Aplicada a Geologia de Engenharia, Segmento Métodos Elétricos: Sondagem Elétrica Vertical e Caminhamento Elétrico. São Paulo, Apostila do Curso de Aperfeiçoamento em Geologia de Engenharia e Mineração, IPT, 81p.
- Braga, L. V. P. 2000. Métodos Geoelétricos Aplicados à Hidrogeologia. São Paulo, Apostila do Curso de Pós-Graduação em Geociências, UNESP, 60p.
- Duarte, O. O. 2003. Dicionário Enciclopédico Inglês-Português de Geofísica e Geologia. SBGf, pág. 73.
- Escodino, P.C.B.; Silva, A.B. 1980. *Aplicação de Métodos de Prospecção Geoelétricos na Pesquisa de Aquíferos Cársticos*. In: ABAS, Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas, Recife, pp.:337-349.
- Gallas, J.D.F. 2000. Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental. Tese de Doutorado pelo Instituto de Geociências e Ciências Exatas / UNESP, 174p.
- Hujibregts, C. J. 1975. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: Davis, J. C. & McCullagh, M. J. (eds.) Display and anlysis of spatial data. New York, John Wiley, pp.: 38-53.
- Landim, P.M.B. 1997. *Análise Estatística de Dados Geológicos*. Fundação Editora da UNESP, 226p.
- Le Masne, D. 1979. *Application de methodes electriques et eletromagnetiques a l'étude geophysique des milieux fissures*. These de Docteur, Académie de Montpellier, 171p.
- Loke, M. H. 2001. *RES2DINV Software User's Manual*. Ver. 3.4. Geotomo Software, Penang, Malaysia, 92p.
- Orellana, E. 1972. *Prospeccion Geoelectrica en Corriente Contínua*. Ed. Paraninfo, Madrid, 523p.
- Souza, L. A. P.; Silva, R. F.; Iyomassa, W. S., 1998. Métodos de Investigação. In: Oliveira, A. M. S., Brito, S. N. A (eds.) *Geologia de Engenharia*, Cap. 11, pp: 163-196.

Storz, H.; Storz, W.; Jacobs, F. 2000. Electrical Resistivity Tomography to Investigate Geological Structures of the Earth's Upper Crust. *Geophysical Prospecting*, 48(3): 455-471.

Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E.; Keys, D. A. 1990. *Applied Geophysics*. Cambridge University Press, 860p.

Yamamoto, J. K. 2002. *Sistema GeoVisual*.

Yamamoto, J. K. 2001. Avaliação e Classificação de Reservas Minerais. São Paulo: EDUSP, FAPESP, 232p.

De acordo,



Patricia Guimarães