

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS

**Caracterização de Áreas Favoráveis à Extração de Blocos
Graníticos de Grande Porte Com o Uso da
Eletrorresistividade, Cabo de Santo Agostinho, PE**

Diego Daniel Silva

Orientador: Prof. Dr. José Domingos Faraco Gallas

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Programa de Pós-Graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia

SÃO PAULO

2014

Autorizo a reprodução e divulgação total ou parcial deste trabalho, por qualquer meio convencional ou eletrônico, para fins de estudo e pesquisa, desde que citada a fonte

Ficha catalográfica preparada pelo Serviço de Biblioteca e Documentação do
Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo

Silva, Diego Daniel

Caracterização de áreas favoráveis à extração de blocos graníticos de grande porte com o uso da eletrorresistividade, Cabo de Santo Agostinho, PE / Diego Daniel Silva. - São Paulo, 2014

92 p.: il.

Dissertação (Mestrado) : IGc/USP

Orient.: Gallas, José Domingos Faraco

1. Eletrorresistividade 2. Rochas ornamentais 3. SEV 4. Dipolo-dipolo 5. Topo rochoso I. Título

“Não sei onde estou indo, mas sei que estou no meu caminho...”

(Raul Seixas)

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Jorge e Lenice, e irmão Rodrigo, que foram o alicerce de minha vida, e essenciais para a conclusão dessa dissertação.

Ao Prof. Gallas, pela amizade, paciência, confiança e dedicação como orientador e, claro, aos belos whiskys degustados ao longo desses dois anos de trabalho.

Agradeço ao Lauro pela ajuda nas aquisições de dados, à equipe da COESP e Santuário dos Três Reinos. E em especial ao Dr. Roberto Viana, idealizador do Santuário, por permitir que os dados pudessem ser usados na elaboração deste trabalho.

Quando ingressei no mestrado me perguntavam por que eu não tinha uma sala na pós-graduação. Bem, esta dissertação foi desenvolvida quase que em sua totalidade em uma república denominada Cativero, onde tive a oportunidade de conviver com sábios geólogos. Talvez se este trabalho fosse escrito em uma sala silenciosa, não teria toda a sagacidade geológica apresentada em seu conteúdo.

Agradeço ao De Paula, Charula, Indigente e Funga, pela amizade de quase 9 anos, e todo o conhecimento de vida transmitido por esses nobres peritos. E aos agregados do Cativero, Gargalo, Lesado, Dante, Fladmir, Rabikó e Dé.

À Geo Supply, por ter sido uma recente realização profissional, e abrir novos rumos em minha vida.

Aos amigos que deixaram minhas idas à Pirassununga mais cativantes.

À CAPES pelo incentivo financeiro na forma de bolsa de estudos.

Peço desculpas aos que esqueci de mencionar, mas tenho certeza que sou grato a todos que contribuíram/apoiaram esse trabalho.

SUMÁRIO

ÍNDICE DE FIGURAS	vii
CAPÍTULO 1	1
INTRODUÇÃO	1
1.1. Rochas Ornamentais	1
1.2. Justificativa do Tema	4
1.3. Objetivos	4
1.4. Localização.....	5
CAPÍTULO 2	7
REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1. Geologia Regional	7
2.1.1 Província Borborema.....	8
2.1.2. Terreno Pernambuco-Alagoas	9
2.2 Método de Eletrorresistividade	11
2.2.1 Histórico Sobre os Métodos Geoelétricos	11
2.2.2. Generalidades.....	13
2.2.3. Princípios dos Métodos Geoelétricos	14
2.2.4. Profundidade de Investigação	20
2.2.5. Trabalhos Anteriores	25
CAPÍTULO 3	28
MATERIAIS E MÉTODOS.....	28
3.2. Geologia Local	28
3.3. Topografia	30
3.5. Caminhamento Elétrico	33
3.6. Sondagem Elétrica Vertical.....	35
3.7. Processamento dos Dados	38
3.7.1. <i>RES2DINV</i> [®]	38
3.7.2. <i>IPI2WIN</i> [®]	41
3.7.3. <i>SURFER</i> [®]	41
3.7.3.1 Métodos de Interpolação do <i>SURFER</i> [®]	42
3.7.3.1.1 <i>Inverse Distance to a Power</i>	44
3.7.3.1.2 <i>Kriging</i>	45
3.7.3.1.3 <i>Minimum Curvature</i>	46

3.7.3.1.4 <i>Modified Shepard's Method</i>	47
3.7.3.1.5 <i>Natural Neighbor</i>	47
3.7.3.1.6 <i>Nearest Neighbor</i>	48
3.7.3.1.7 <i>Radial Basis Function</i>	49
3.7.3.1.8 <i>Triangulation with Linear Interpolation</i>	50
3.7.3.1.9 <i>Local Polynomial</i>	51
3.7.3.1.10 <i>Moving Average</i>	52
3.7.4. <i>VOXLER</i> [®]	53
CAPÍTULO 4	55
RESULTADOS	55
4.1. Sondagem Elétrica Vertical.....	55
4.2. Caminhamento Elétrico	58
CAPÍTULO 5	62
CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	63
ANEXO A	67
ANEXO B	69
ANEXO C	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Fig. 1- Esculturas realizadas com a técnica de cantaria.	4
Fig. 2- Mapa de localização da área de estudo com as principais vias de acesso.	6
Fig. 3- Esboço geológico e tectônico da área de estudo.	7
Fig. 4- Compartimentação da Província Borborema, segundo Santos (1999).	9
Fig. 5- Complexo Pernambuco Alagoas, segundo Silva Filho et. al. (2002).	10
Fig. 6- Classificação dos métodos geofísicos, destacando-se os métodos geoeletricos.	13
Fig. 7- Lei de Ohm.	15
Fig. 8- Fonte pontual de corrente situada na superfície de um semi-espaço isotrópico e homogêneo (modificado de Telford <i>et al.</i> , 1990).	16
Fig. 9- Comportamento das linhas de corrente e equipotencial.	18
Fig. 10- Curvas NDIC para o arranjo Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo (modificado de Roy & Apparao, 1971; Barker, 1989).	22
Fig. 11- Comparação entre as profundidades de investigações sugeridas por Hallof (1957), Roy & Apparao (1971), Edwards (1977) e Barker (1989).	24
Fig. 12- Vista geral da área de trabalho.	28
Fig. 13- Textura porfirítica da rocha sienogranítica, e diagrama QAP indicando porcentagem de quartzo, K-feldspato e plagioclásio da rocha.	29
Fig. 14- A) Veio de Pegmatito; B) Enclave do sienogranito porfirítico em meio ao sienogranito foliado de granulação fina.	30
Fig. 15- Levantamento topográfico da área de estudo.	31
Fig. 16- Resistivímetro SAS 4000, ABEM.	32
Fig. 17- Visor superior do resistivímetro SAS 4000 com destaque para os canais de corrente e potencial; o adaptador multicanal; e os principais botões e suas respectivas funções.	33
Fig. 18- Aquisição de dados de eletroresistividade.	33
Fig. 19- Arranjo do tipo dipolo-dipolo (original de Gallas, 2000).	34
Fig. 20- Arranjo <i>Schlumberger</i> (original de Gallas, 2000).	35
Fig. 21- Linhas de caminhamento elétrico na área de estudo e a localização das sondagens elétricas verticais.	37
Fig. 22- Modelo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo D-D ($a=2m$) e respectivos dados plotados de acordo com as profundidades estabelecidas por Edwards (1977).	38
Fig. 23 Diferentes métodos de incorporação de topografia ao modelo de inversão do RES2DINV.	40
Fig. 24- Diferença de seção modelada de resistividade entre o SURFER e o RES2DINV.	42
Fig. 25- Exemplo de seção de caminhamento elétrico.	43
Fig. 26- Seção gerada utilizando <i>Inverse Distance to a Power</i> como interpolador.	44
Fig. 27- Seção gerada utilizando <i>Kriging</i> como interpolador.	45
Fig. 28- Seção gerada utilizando <i>Minimum Curvature</i> como interpolador.	46
Fig. 29- Seção gerada utilizando <i>Modified Shepard's Method</i> como interpolador.	47
Fig. 30- Seção gerada utilizando <i>Natural Neighbor</i> como interpolador.	48
Fig. 31- Seção gerada utilizando <i>Nearest Neighbor</i> como interpolador.	49
Fig. 32- Seção gerada utilizando <i>Radial Basis Function</i> como interpolador.	50

Fig. 33- Seção gerada utilizando <i>Triangulation with Linear Interpolation</i> como interpolador.	51
Fig. 34- Seção gerada utilizando <i>Local Polynomial</i> como interpolador.....	52
Fig. 35- Seção gerada utilizando <i>Moving Average</i> como interpolador.....	53
Fig. 36- Plotagem dos dados de resistividades para a interpolação 3D.	54
Fig. 37- Mapa de contorno da profundidade do topo da rocha sã (Polígono sem cores corresponde a trecho de acesso impossível, sem medidas).	57
Fig. 38- Interpretação de anomalia de resistividade causada por falhamento.....	59
Fig. 39- Curvas de isovalores da resistividade modelada, (média dos níveis 1, 2 e 3 do arranjo dipolo-dipolo).	61

Resumo

Os métodos geoeletricos, principalmente a eletrorresistividade, estão sendo cada vez mais requisitados na área da mineração, indicando espessura de capeamento de solo, zonas fraturadas e heterogeneidades do material, viabilizando economicamente, ou não, um projeto minerário. Este trabalho, realizado no município do Cabo de Santo Agostinho-PE, apresenta e discute resultados de aplicações do método geofísico, da eletrorresistividade, como instrumento de auxílio na abertura de uma nova frente de lavra para extração de blocos graníticos de grande porte. Foi investigada a espessura do capeamento de solo, bem como as principais zonas locais de falhas e fraturas. Para isso foram realizadas 32 SEVs (03 SEVs por perfil, à exceção da Linha 11, com 02) com arranjo *Schlumberger* de $AB/2$ máximo de 60 metros, e 11 caminhamentos elétricos com arranjo dipolo-dipolo de $AB=MN=20$ metros, com aproximadamente 1000m de extensão cada perfil. As SEVs foram dispostas nas linhas de modo a cobrir adequadamente a área do terreno, possibilitando a confecção de um mapa de contorno da profundidade do topo rochoso e a caracterização do perfil de alteração pedológico. Os caminhamentos elétricos foram dispostos paralelamente entre si e espaçados de 60 metros, podendo ser observadas as possíveis configurações do topo rochoso, como rocha não fraturada e zonas fraturadas. A partir dos dados dos caminhamentos elétricos foram elaboradas simulações 3D de resistividade e para a estimativa de volume de rocha não fraturada na área de estudo (com base nas resistividades mais elevadas). Os resultados obtidos mostraram a eficiência da eletrorresistividade na determinação do topo da rocha sã e detecção das zonas fraturadas no maciço granítico.

Palavras-chave: Eletrorresistividade, SEV, dipolo-dipolo, rocha ornamental, topo rochoso.

Abstract

The geoelectric methods, especially electroresistivity, are being progressively more required on mining, for identifying soil thickness, fractured zones and geological heterogeneities, to check economical viability of mining projects. This work, held in Cabo de Santo Agostinho-PE city, presents and discusses geophysics application results of electroresistivity as a tool for helping the opening of a new granitic blocks exploitation front. The soil thickness was investigated, as well as the main local fault zones and fractures. A total of 32 VESs (03 VESs per section, exception made to line 11, with 02 VESs) using Schlumberger array with $AB/2$ maximum of 60 m, and 11 geoelectrical profilings using dipole-dipole array ($AB=MN=20$ m), with section lengths close to 1000 m. The VESs lines were organized in order to cover the studied area properly, allowing mapping the top of the rock massif and characterizing the soil profile. The geoelectrical profilings were disposed parallel with 60m gap among each other, enabling the observation of the massif top configurations, such as fractured and non fractured zones. 3D resistivity simulations were performed using the geoelectrical profilings data in order to estimate the total volume of non fractured rock in the studied area (based on the highest resistivities). The obtained data showed the efficiency of electroresistivity for fractured zones detection and for mapping the top of the fresh rock massif.

Keywords: Electroresistivity, VES, dipole-dipole, ornamental rock, rock massif top.

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os métodos geofísicos, sobretudo os geolétricos, abrangem diversas áreas da geologia, sendo um recurso indireto de ágil aplicação e de respostas satisfatórias. A aplicação da eletrorresistividade pode ser de grande valia na prospecção e exploração de rochas ornamentais, podendo indicar zonas favoráveis a esta atividade minerária, basicamente no que diz respeito à quantificação de material a ser removido e identificação de fraturas. Este foi o caso da pesquisa ora apresentada, na qual buscou-se a identificação de áreas para extração de blocos graníticos de grande porte. Para tanto, necessitava-se de identificar locais com pouco capeamento e isento de fraturas.

1.1. Rochas Ornamentais

O emprego de rochas pelo homem datam da antiguidade, sendo uma das mais antigas atividades de engenho do ser humano. Monumentos e obras de construção civil erguidos por civilizações antigas datadas de milhares de anos estão preservadas como marcos históricos.

Se considerarmos rochas ornamentais aquelas cuja utilização principal baseia-se em seu valor estético, e sob o ponto de vista comercial, tanto em função de seu ambiente tectônico e processo genéticos, são classificadas em três grandes famílias: granitos, mármore e ardósias (La Nava *et. al.* 1989). No mercado de rochas para revestimento, os termos granito, mármore e ardósia têm um significado muito mais abrangente do que o ponto de vista petrográfico.

O conceito comercial de granito é muito genérico, tendo como essência as rochas cristalinas silicatadas, de origem e composição das mais diversas, incluindo granitos “*strictu sensu*”, migmatitos, gabros, diabásios, anortositos, piroxenitos. O DNPM (1977) afirma que o termo granito no setor de rochas ornamentais é aplicado a qualquer tipo de rocha não calcária, capaz de ser polida e utilizada como material de revestimento. Comercialmente, os mármore incluem rochas de composição carbonática, de origem sedimentar (calcários e dolomitos) e metamórfica (mármore), sua mineralogia predominante consiste em calcita e dolomita. Os mármore pela sua natureza são rochas consideradas “macias”, pouco abrasivas e as

variedades recristalizadas têm a vantagem de um menor índice de porosidade e absorção de água. As ardósias são rochas metapelíticas de grau metamórfico muito baixo, formadas principalmente por filossilicatos, principalmente sericita. Devido a sua estrutura laminada permite uma fácil obtenção de placas uniformes, geralmente impermeáveis, mas com a desvantagem de ser pouco resistente ao desgaste abrasivo.

Stellin Jr. & Vital (1996) afirmam que as rochas ornamentais tiveram suas primeiras aplicações a cerca de 500 mil anos a.C. No Brasil as construções mais antigas datam do período colonial. Entre os séculos XV e XVII, os portugueses utilizavam a técnica de cantaria para construção de marcos, estátuas, fortalezas e outras construções ao longo do litoral. A técnica de cantaria consiste em lavrar a rocha em formas figurativas ou geométricas para aplicação em construções, com finalidade ornamental ou estrutural. No período das missões jesuíticas, as obras realizadas pelos guaranis atingiram altíssimos níveis de qualidade, utilizando arenitos vermelhos, abundantes na Bacia do Paraná, encontradas em São Miguel das Missões e Santo Ângelo, no Rio Grande do Sul. Em Minas Gerais a arte adquiriu peculiaridades graças ao uso de rochas locais, ajudando a compor o acervo caracterizado como Barroco Mineiro.

No setor mineral, as rochas ornamentais definem uma área promissora, determinada pelos novos tipos de utilização como em paisagens urbanas e obras de revestimento, também definidas pelas novas tecnologias envolvidas (extração, manuseio, transporte e beneficiamento de blocos). Além destas características que aprimoram e otimizam a produção, conseqüentemente com redução dos custos, o mercado está cada vez mais exigente, requerendo uma constante atualização da padronização tecnológica e estética dessas rochas.

No ano de 2011 a produção mundial de rochas para ornamentação e revestimento atingiu 116 milhões de toneladas, onde a China, a maior produtora, respondeu por 36 milhões de toneladas e o Brasil com 7,25 milhões de toneladas, colocando-se como 7º maior exportador mundial de volume de rocha física e 3º lugar como exportador de granitos, ficando atrás de China e Índia (ABIROCHAS, 2012). Desta produção mundial total, 68,5 milhões t (59%) foram referentes a rochas carbonáticas (mármore, travertinos e calcários diversos), 41,7 milhões t (36%) a rochas silicáticas e silicosas (granitos, quartzitos e similares) e 5,8 milhões t (5%) a outras rochas, sobretudo ardósias (ABIROCHAS, 2012).

Em 2012, as exportações brasileiras de rochas ornamentais totalizaram US\$ 1.060,42 milhões, registrando uma variação positiva de 6,08% frente ao ano de 2011 (ABIROCHAS,

2013). Desta forma, foi pouco significativo o impacto da crise econômica dos países da zona do euro.

As rochas graníticas representam aproximadamente 50% do total da produção brasileira, seguindo-se os mármore (18%), além de ardósias e outros. Mais de 60% do total dessa produção concentra-se na região sudeste, seguida da região nordeste com 25% e as demais regiões brasileiras com 11%.

No ano de 2013, as exportações brasileiras de rochas ornamentais e de revestimento totalizaram US\$ 1.302,11 milhões, correspondentes a um volume comercializado de 2.725.628,78 toneladas (ABIROCHAS, 2014a). Frente ao ano de 2012, registrou-se uma variação positiva de 22,8% no faturamento e de 21,8% do volume das exportações, superando o recorde histórico de 2007 (US\$ 1,1 bilhão), reafirmando a forte presença do Brasil no mercado internacional (ABIROCHAS, 2014a).

Para o primeiro semestre de 2014, as exportações de rochas ornamentais somaram US\$ 629,9 milhões e 1.302.698,38 toneladas, com variação de 2,23% e 4,0% frente ao mesmo período de 2013 (ABIROCHAS, 2014b). Esses indicadores mostram a necessidade de explorar o mercado das grandes obras nos EUA, com produtos acabados (pias, balcões e lajotas), e também incrementar a venda de chapas para a China, já que esses dois países representam hoje 75% do faturamento das exportações brasileiras (ABIROCHAS, 2014b).

1.2. Justificativa do Tema

A COESP (Cooperativa dos Escultores de Pedras do Estado de Pernambuco) necessita de uma nova frente de lavra para extração de blocos de grande porte para realizar esculturas com a técnica de cantaria (fig.1), onde vão compor uma vasta coleção artística no Santuário dos Três Reinos.



Fig. 1- Esculturas realizadas com a técnica de cantaria.

O Santuário dos Três Reinos é um projeto que conta com o apoio da UNESCO (United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization) e está localizado na área urbana de Recife-PE em uma região de mata atlântica, totalizando 5 milhões de metros quadrados, onde o IBAMA realiza soltura de animais silvestres apreendidos e também protege diversas espécies de animais ameaçadas de extinção. Além de toda a preocupação com a fauna regional, o Santuário protege uma porção do aquífero Beberibe, com dezenas de fontes de águas minerais, além de preservar espécies vegetais raras dos assentamentos imobiliários.

1.3. Objetivos

Os levantamentos geofísicos objetivaram detectar anomalias ou assinaturas geofísicas de correlacionáveis a falhas/fraturamentos e espessura de solo/rocha alterada, visando uma melhor caracterização geológica em locais em que se pretende a extração de blocos de rocha granítica na região do município do Cabo de Santo Agostinho-PE.

Para isso foram utilizados métodos geoeletricos, no caso a eletrorresistividade, com as técnicas de caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical.

1.4. Localização

A área de estudo localiza-se no município de Cabo de Santo Agostinho no estado de Pernambuco, pertencente à região metropolitana de Recife. Cabo de Santo Agostinho está a aproximadamente 40km a sul de Recife, limitando-se a norte com os municípios de Moreno e Jaboatão de Guararapes, a sul com Ipojuca e Escada, a oeste com Vitória de Santo Antão e a leste com o Oceano Atlântico (Fig.2)

A área urbana do Cabo de Santo Agostinho tem altitude de aproximadamente 29,0 metros e coordenadas geográficas $08^{\circ}17'15''$ de latitude sul e $35^{\circ}02'00''$ de longitude oeste, e seu acesso principal é feito pela rodovia BR-101.



Fig. 2- Mapa de localização da área de estudo com as principais vias de acesso.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo serão abordados os embasamentos teóricos sobre a Geologia Regional da área de estudo, bem como a eletrorresistividade, tendo como base tópicos de grande importância para a elaboração dessa tese.

2.1. Geologia Regional

A área de estudo está inserida geologicamente na província Borborema, mais especificamente no Terreno Pernambuco-Alagoas, sendo delimitada a norte pelo Lineamento de Pernambuco, a leste pela Bacia de Pernambuco, e a sul pelo Alto Estrutural do Cabo de Santo Agostinho (Fig.3).

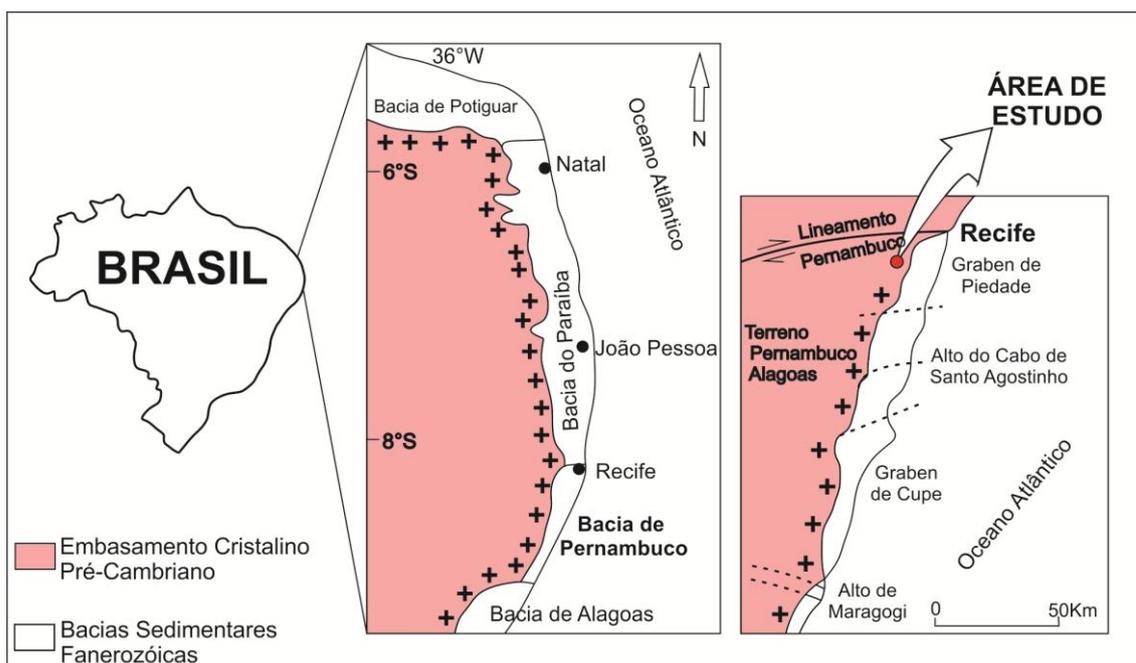


Fig. 3- Esboço geológico e tectônico da área de estudo.

2.1.1 Província Borborema

A Província Borborema, assim definida por Almeida. *et. al.* (1977), está localizada no nordeste oriental do Brasil, apresentando uma série de unidades geológicas, compreendendo domínios pré-cambrianos, formando um mosaico de terrenos gnáissico-migmatíticos-graníticos estabilizados no final da orogênese brasileira, revelando um expressivo magmatismo e um notável sistema de zonas de cisalhamento. Essa Província exibe um segmento crustal de uma extensa faixa fortemente afetada pela deformação Brasileira/Pan-Africana (600 ± 50 Ma), chamado de Faixa Trans-Saara, onde inicialmente, em tempos pré-brasileiros, constituíam massas continentais consolidadas (Jardim de Sá 1994, Brito Neves *et. al.* 2001).

Considerando a diversidade dos blocos crustais e pela complexidade da evolução geodinâmica, a Província Borborema a partir dos anos setenta vem sendo alvo de diversos trabalhos para dividi-la em domínios estruturais e em compartimentos geológicos distintos. Para esse trabalho foi utilizado a compartimentação adotada por Santos (1999), onde apresenta os diferentes Domínios: Médio Coreaú, Cearense, Rio Grande do Norte, Zona Transversal e Externo (Fig.4).

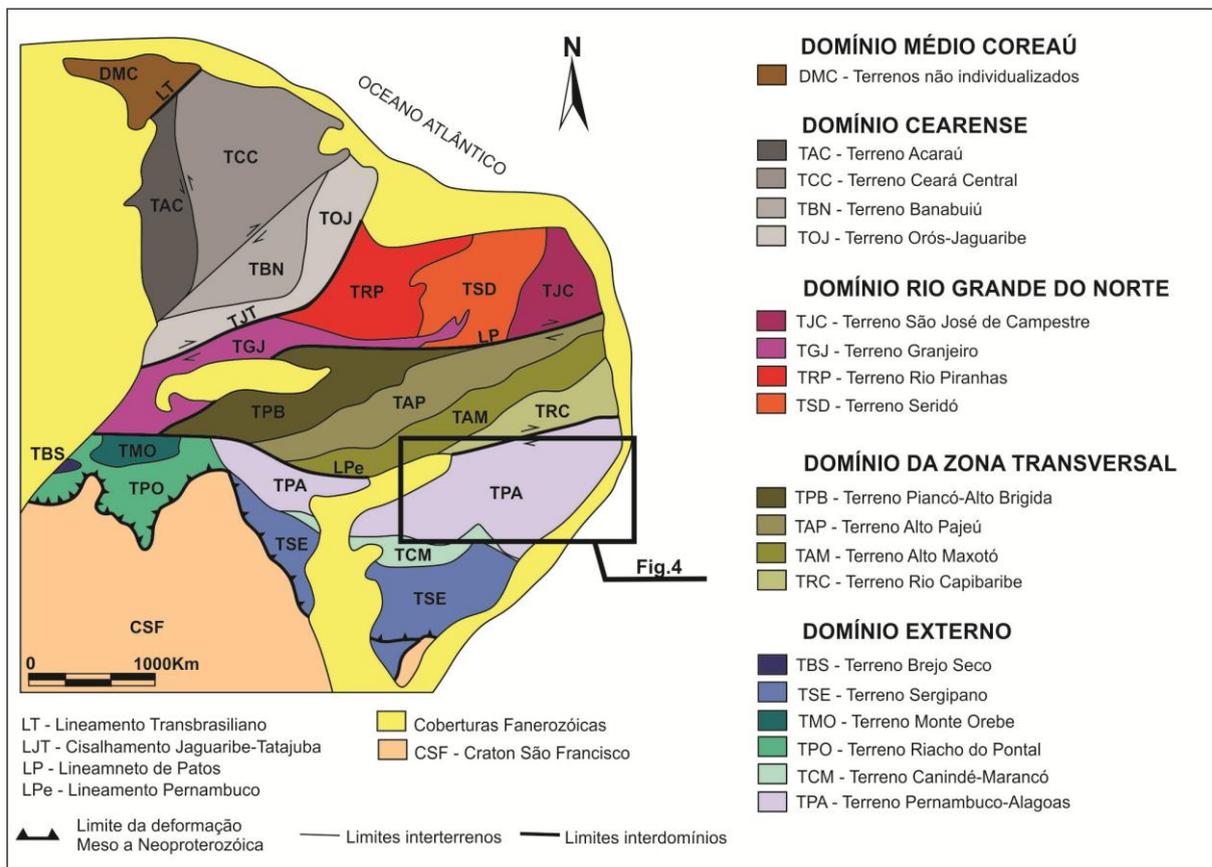


Fig. 4- Compartimentação da Província Borborema, segundo Santos (1999).

2.1.2. Terreno Pernambuco-Alagoas

O Terreno Pernambuco-Alagoas (Santos, 1999), Maciço Pernambuco-Alagoas (Brito Neves, 1975) ou também denominado de Complexo Pernambuco-Alagoas, por apresentar diferentes protólitos e plútons, definido atualmente por Silva Filho *et. al.*, (2002), está delimitado a norte pelo Lineamento de Pernambuco e a sul pelos terrenos Canindé-Marancó e Sergipano e a leste pelas rochas sedimentares da Bacia de Pernambuco. Os limites desse terreno são marcados por importantes zonas de cisalhamento e divididos geograficamente pela Bacia Tucano-Jatobá, em leste e oeste.

O segmento oeste desse terreno apresenta uma tectônica de nappes, englobando fragmentos arqueanos e sequências supracrustais do evento Cariris Velho (Medeiros *et. al.* 1996). Litologicamente apresenta rochas graníticas, gnáissicas e migmatíticas, e restos de rochas supracrustais são bem representativos, enquanto o magmatismo neoproterozóico está limitado às atividades graníticas próximas ao Lineamento de Pernambuco.

No extremo leste desse terreno, as rochas aflorantes são correlacionáveis aos litotipos dos complexos metamórficos Cabrobó e Belém do São Francisco (Santos, 1998), além de numerosos plútons neoproterozóicos. Rocha (1990) e Gomes (2001) afirmam que esse magmatismo é representado por intrusões sin a pós-tectônicas, compreendendo granitóides sieno a monzoníticos, porfiríticos, quartzo dioritos/monzodioritos e monzogranitos. Mais recentemente Silva Filho *et. al.* (2002) identificaram cinco grandes batólitos graníticos nesse segmento (Fig.5).

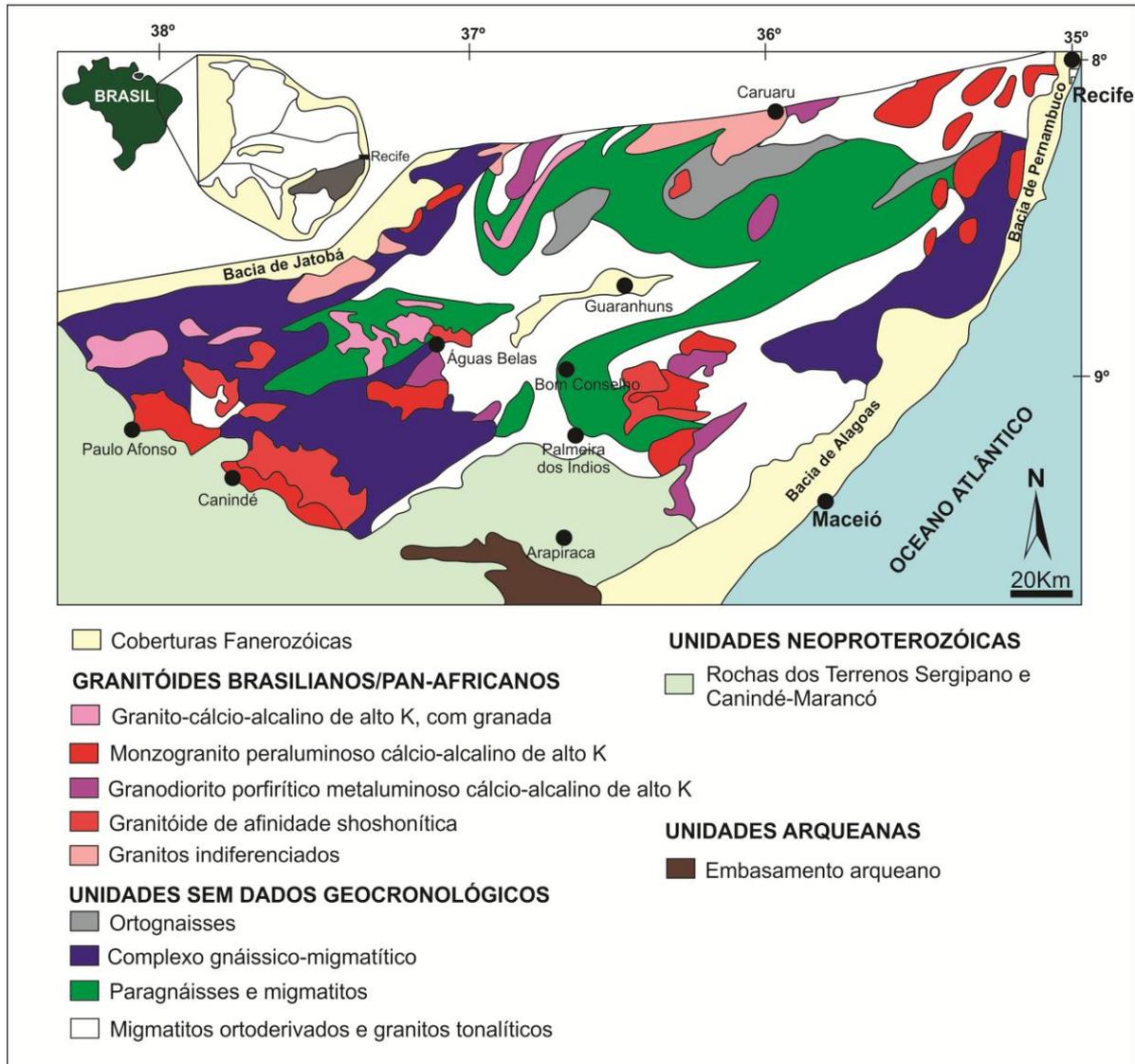


Fig. 5- Complexo Pernambuco Alagoas, segundo Silva Filho *et. al.* (2002).

2.2 Método de Eletroresistividade

2.2.1 Histórico Sobre os Métodos Geométricos

Os métodos elétricos de prospecção, também denominados geométricos, investigam, por meio de medições efetuadas na superfície, a distribuição em profundidade de algumas propriedades elétricas e eletromagnéticas.

Basicamente existem quatro propriedades eletromagnéticas principais que podem caracterizar os materiais encontrados no subsolo: a permeabilidade magnética, que corresponde ao grau de magnetização de um material quando submetido a um campo magnético; constante dielétrica, caracterizada na razão da habilidade de um material polarizar-se quando submetido a um campo elétrico no meio; condutividade elétrica, refere-se à capacidade de um material em permitir a passagem de cargas elétricas em resposta a um campo elétrico aplicado; e a mais significativa em estudos geométricos, a resistividade elétrica, correspondendo ao inverso da condutividade elétrica.

Os primeiros trabalhos com métodos geométricos remontam do século XVIII com Gray & Wheller (1720, *apud* Orellana, 1972), sobre as resistividades das rochas, e o descobrimento de Watson (1746, *apud* Orellana, 1972) de que o solo é condutor.

Em 1815, Robert Fox constata que certos depósitos minerais produzem correntes elétricas e podem ser observadas em subsuperfície. O fenômeno da polarização espontânea começa a ser entendido, e crescem os estudos sobre a prospecção elétrica. Segundo Orellana (1972), o primeiro êxito no emprego dessas técnicas é atribuído ao francês, engenheiro de minas e conhecido como “pai da prospecção geométrica”, Sr. Conrad Schlumberger, que descobriu um depósito de sulfeto de boro por meio da polarização espontânea, considerado como primeiro ensaio geofísico com minerais não magnéticos.

Outros cientistas dirigiram sua atenção a pesquisas com campos elétricos gerados artificialmente. O primeiro a patentear essa técnica foi Brown, em 1883, com um sistema de prospecção elétrica com dois eletrodos. Após vinte anos, Daft & Willians (1902), *apud* Orellana (1972) obtiveram outra patente com o emprego de correntes de baixa frequência, e em 1913 os métodos elétricos ganham sua maioria com aplicações em estudos tectônicos na França.

Apesar dos métodos geoeletricos para fins economicos ainda estarem em desenvolvimento, as aplicações desses princípios foram usadas para problemas de mineração e petróleo durante e imediatamente após a Primeira Guerra Mundial (1914-1918) e essa evolução é atribuída a diferentes escolas de pensamento.

A escola franco-soviética é dada pelos esforços de Schlumberger para aplicar métodos elétricos na localização de estruturas petrolíferas e assim, como um dos seus maiores méritos, foi perceber que se não possuísse uma base teórica sólida onde apoiasse a aplicação dos seus métodos geoeletricos, sua pesquisa poderia não progredir. Schlumberger juntamente com outros pesquisadores, atacaram os difíceis problemas matemáticos da propagação de correntes elétricas em meios estratificados, mas devido à política de segredo comercial, os cálculos foram transmitidos de forma incompleta e atrasados.

A escola francesa tem sua continuação na antiga União Soviética em 1928, onde foram contratados os serviços da companhia Schlumberger para prospecção petrolífera na Rússia, obtendo diversos êxitos. Entretanto, o maior êxito do trabalho foi a assimilação pelos geofísicos russos das técnicas e ideias dos investigadores franceses. Assim, os geofísicos russos puderam percorrer a linha de raciocínio de Schlumberger, seguindo seus procedimentos, avançando tecnologicamente cada vez mais.

A escola Wenner foi elaborada nos EUA, Inglaterra e Canadá e, ao contrário da escola francesa, que procurava solucionar bases físicas matemáticas sólidas, publicavam suas investigações independentes sobre um método similar, mas baseado em ideias intuitivas e inexatas. Apesar de sua inferioridade frente ao de Schlumberger, o dispositivo Wenner seria o mais utilizado.

Segundo Orellana (1972), os textos e várias publicações geradas pela URSS vestem seu progresso nos métodos geoeletricos, porém eram ignorados devido a difícil e complexa explicação dos mesmos, e assim notado um atraso nos livros publicados em 1960 nos EUA e Canadá. A prospecção elétrica não poderia ser empregada para petróleo, pois não atingia profundidades superiores a 300 metros, enquanto na Rússia anos antes atingiu-se a profundidades superiores a 1 quilômetro.

Dentre os avanços científicos e tecnológicos dos métodos geofísicos atribuídos à escola Wenner, há a notável contribuição do professor George Keller pelas traduções de obras soviéticas, a construção de equipamentos e o uso do computador.

2.2.2. Generalidades

Dentre os principais métodos de prospecção geofísica para o estudo de estruturas geológicas da parte superior da crosta terrestre, destacam-se os métodos geoeletricos, constituindo um grande grupo onde se inserem os métodos elétricos e eletromagnéticos (Ward, 1990; Zhdanov & Keller, 1994) Fig.6.

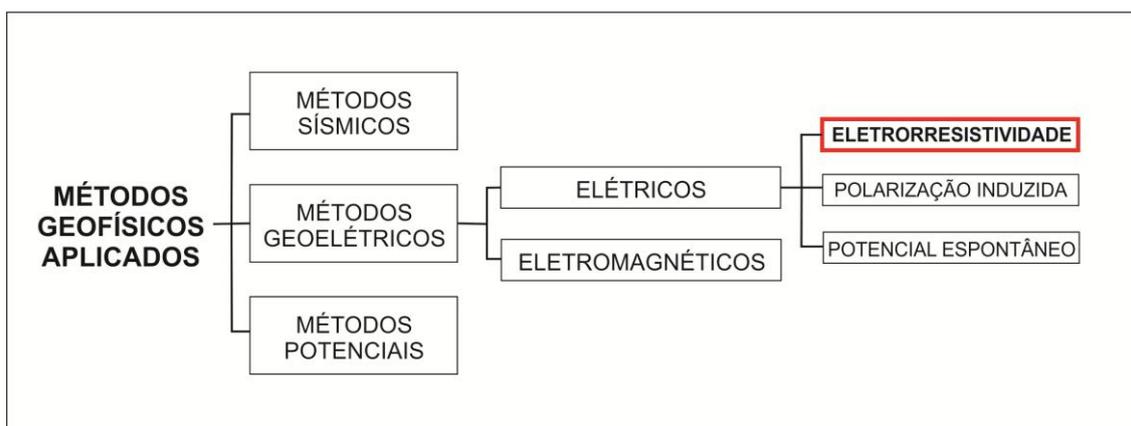


Fig. 6- Classificação dos métodos geofísicos, destacando-se os métodos geoeletricos.

Braga (1997) classifica os métodos geoeletricos em apenas três critérios: método geofísico, técnica, e arranjo. Esses critérios na prática mostram-se de fácil entendimento e aplicação, tornando claro o tipo de levantamento geofísico empregado.

A propriedade física investigada pelo método da eletrorresistividade é a resistividade, tendo como objetivo a determinação da distribuição das resistividades em subsuperfície. Seu princípio é baseado na passagem de uma corrente gerada artificialmente a partir de uma fonte, a qual é introduzida no solo a partir de um par de eletrodos, e mede-se a diferença de potencial entre outros dois eletrodos. Conhecendo-se a corrente, as diferenças de potenciais e as distâncias entre os 4 eletrodos, é possível a determinação da resistividade elétrica.

Métodos geofísicos, particularmente os geoeletricos, são de fácil aplicação e apresentam custos relativamente baixos, mostrando-se muito eficientes em diferentes áreas das geociências: Hidrogeologia, Mineração, Meio Ambiente e Geologia de Engenharia.

2.2.3. Princípios dos Métodos Geométricos

Para iniciar o raciocínio devemos levar em conta as propriedades elétricas dos materiais geológicos, sendo mais relevante a resistividade. O parâmetro resistividade depende da natureza e estado físico do material geológico (Telford *et. al.* 1990). Assim, nas rochas e nos solos a resistividade depende, dentre outros, dos seguintes fatores: porosidade, grau de saturação, composição mineralógica, concentração de sais dissolvidos no fluido preenchendo porosidade primária e secundária, tamanho e forma das partículas sólidas.

A propagação da corrente nesses materiais pode ocorrer de duas maneiras, eletronicamente ou ionicamente. A primeira ocorre através do transporte de elétrons na matriz da rocha, sendo sua resistividade determinada pelo modo de agregação dos minerais e a segunda pelos íons dissolvidos na água contida nos poros interconectados, fraturas e fissuras do maciço rochoso, solo ou sedimentos inconsolidados, sendo esse o mecanismo mais importante nos levantamentos de eletrorresistividade.

A descrição detalhada e teórica do método da eletrorresistividade pode ser encontrada em excelentes e clássicas bibliografias: Orellana (1972); Telford *et. al.* (1990); Zhdanov & Keller (1994); Parasnis (1997); Reynolds (1997).

O método da eletrorresistividade baseia-se na Lei de Ohm, exibindo a proporcionalidade entre a intensidade da corrente elétrica que percorre um condutor e a diferença de potencial entre os terminais desse condutor (Fig.7).

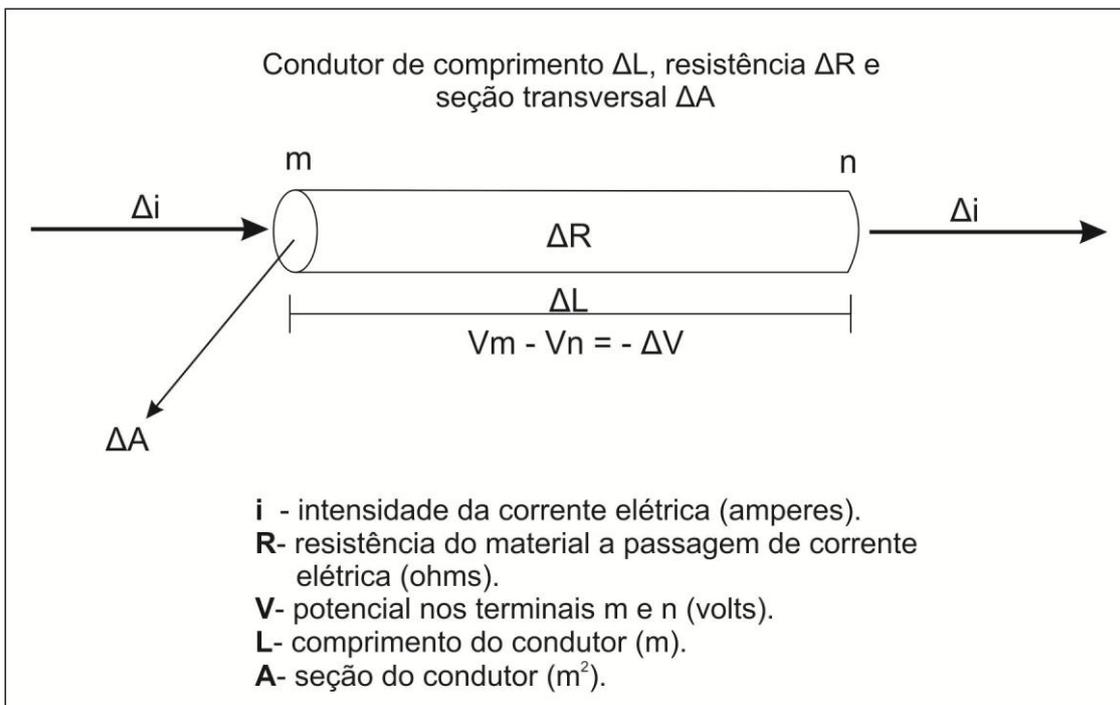


Fig. 7- Lei de Ohm.

Pela Lei de Ohm:

$$\Delta i = -\frac{1}{\Delta R} \cdot \Delta V$$

Equação 1.

A resistência elétrica do condutor varia diretamente com seu comprimento e inversamente a sua seção, resultando na expressão:

$$\Delta R = \rho \cdot \frac{\Delta L}{\Delta A}$$

Equação 2.

Onde ρ é a resistividade (fator de proporcionalidade), sendo um parâmetro que caracteriza o material independente de suas dimensões, podendo-se deduzir sua medida a partir da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{\Delta R \cdot \Delta A}{\Delta L} = \frac{\text{ohm} \cdot \text{m}^2}{\text{m}} = \text{ohm} \cdot \text{m} (\Omega \cdot \text{m})$$

Equação 3.

Na terra ou em qualquer corpo tridimensional, a corrente não flui por apenas um caminho, como no caso do condutor metálico. Considerando um meio homogêneo e isotrópico com resistividade elétrica (ρ) uniforme, uma fonte pontual (A) injetando uma corrente (I) na superfície de um terreno, e outro eletrodo (B) a uma grande distância (Fig.8), é possível equacionar matematicamente a resistividade de um material geológico.

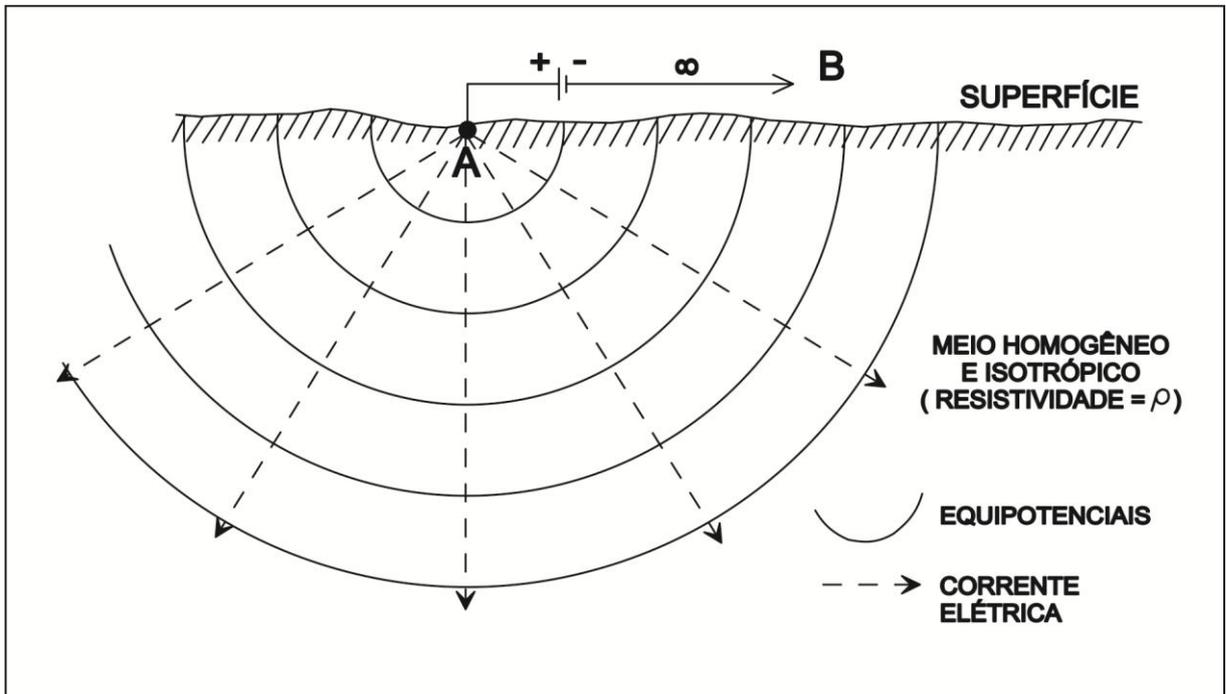


Fig. 8- Fonte pontual de corrente situada na superfície de um semi-espço isotrópico e homogêneo (modificado de Telford *et al.*, 1990).

Aplicando a Equação 2, no semi-espço, tem-se:

$$\Delta R = \frac{\rho \cdot r}{2\pi \cdot r^2} = \frac{\rho}{2\pi \cdot r}$$

Equação 4.

Portanto:

$$\Delta V = \frac{\rho \cdot I}{2\pi \cdot r}$$

Equação 5.

Onde ΔV = diferença de potencial, I = corrente, ρ = resistividade, r = distância entre o eletrodo de corrente e o ponto no qual o potencial foi medido.

Portanto, considerando o subsolo com uma resistividade constante, pode-se determinar sua resistividade:

$$\rho = 2\pi \cdot r \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Equação 6.

O ar situado no semi-espaço superior é praticamente isolante, portanto apresenta uma resistividade que pode ser considerada infinita, e pode-se considerar nas Equações 4, 5 e 6 apenas o semi-espaço da fig. 8, de geometria 2π .

A fig.9 mostra o comportamento das linhas de corrente e equipotencial.

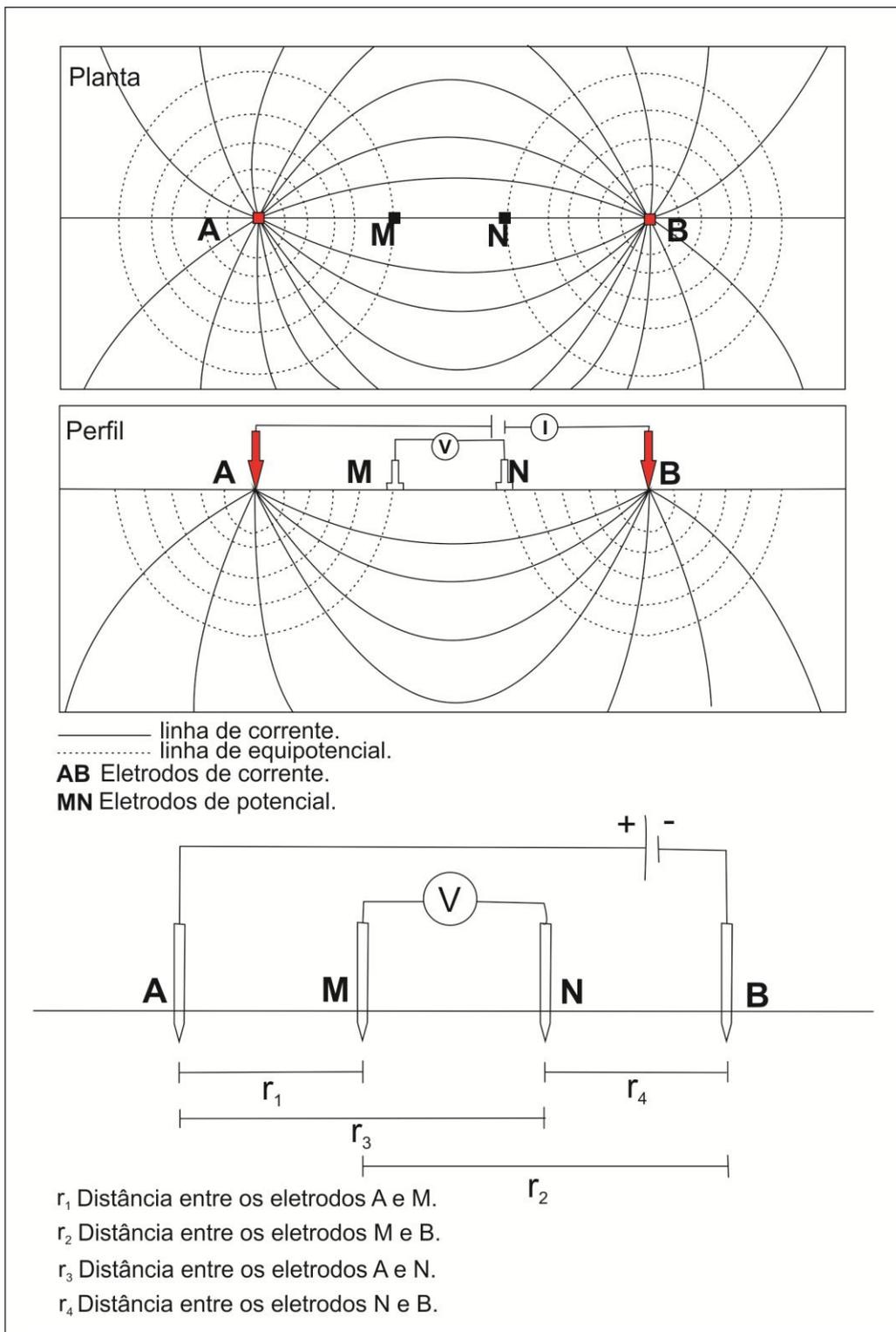


Fig. 9- Comportamento das linhas de corrente e equipotencial.

O potencial elétrico resultante no ponto M devido a uma corrente I entre os eletrodos A e B, será dado por:

$$Vm = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} \right]$$

Equação 7.

Similarmente, o potencial em N será:

$$Vn = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{r_3} - \frac{1}{r_4} \right]$$

Equação 8.

No campo mede-se a diferença de potencial entre dois eletrodos. Então a diferença de potencial entre M e N será:

$$Vm - Vn = \frac{I \cdot \rho}{2\pi} \cdot \left[\frac{1}{r_1} - \frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_3} + \frac{1}{r_4} \right]$$

Equação 9.

E a resistividade ρ pode ser dada por:

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

Equação 10.

E define-se o fator geométrico K, dado por:

$$K = 2\pi \left[\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right]^{-1}$$

E finalmente:

$$\rho = K \frac{\Delta V}{I}$$

Equação 11.

A constante K depende unicamente da geometria relacionada à disposição dos quatro eletrodos (A,B,M e N) em subsuperfície, levando-se em conta a diminuição do potencial elétrico com a distância.

Como na prática o subsolo não pode ser considerado um meio homogêneo e isotrópico, o valor da resistividade varia de ponto a ponto. Portanto, o que é medido é uma resultante que sofre influência de todas as resistividades existentes em um volume conhecido investigado, denominado de resistividade aparente (ρ_a). Orellana (1972) diz que a resistividade aparente não pode ser definida como uma média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em subsuperfície, tratando-se apenas de um conceito formal.

As dimensões de resistividade aparente (ρ_a) são as mesmas para a resistividade (ρ), apresentando unidade em ohm.m. O conceito de resistividade aparente é de grande utilidade nas aplicações desses métodos, pois é um parâmetro que varia ao longo de uma seção, sendo diagnosticada pela presença de heterogeneidades no meio investigado, correspondendo a resposta de uma estrutura/feição geológica em subsuperfície.

2.2.4. Profundidade de Investigação

Particularmente, no caso da eletrorresistividade, estudos vêm sendo empregados por diferentes autores para que exista uma relação entre diferentes arranjos de eletrodos na superfície e uma determinada profundidade de investigação.

Evjen (1938) foi um dos precursores do conceito de profundidade de investigação, utilizando o termo fator de profundidade, sendo um fator que transforma uma distância medida na superfície do terreno em um valor significativo de profundidade. A partir dos anos 70 há uma gama de trabalhos experimentais e teóricos a respeito, sendo objeto de discussão até os dias atuais.

Empiricamente, utilizando um arranjo dipolo-dipolo, Haloff (1957), associou o valor de cada medida de campo a um ponto no centro do arranjo, localizado na intersecção de duas retas a 45° partindo do centro de cada dipolo, de corrente e potencial.

Roy & Apparao (1971), utilizando o conceito de equivalência eletrostática, em um meio isotrópico e homogêneo para diversos arranjos de eletrodos, define profundidade de investigação como a profundidade que uma fina camada horizontal, paralela à superfície, contribui para o valor máximo de sinal total medida na superfície do solo. Plotando o valor obtido após o cálculo individualizado de cada camada para o sinal total, resulta em uma curva denominada profundidade característica de investigação (DIC - *depth of investigation characteristic*) definida pela fórmula:

$$DIC = \frac{\rho I}{4\pi} dz \left[\frac{8\pi z}{(AM^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{8\pi z}{(BM^2 + 4z^2)^{3/2}} - \frac{8\pi z}{(AN^2 + 4z^2)^{3/2}} + \frac{8\pi z}{(BN^2 + 4z^2)^{3/2}} \right]$$

Equação 12.

Para estudar a profundidade de investigação para os diferentes arranjos Roy & Apparao (1971) usaram um fator de normalização, de tal forma que a totalidade do sinal medido seja igual à unidade, e relacionada à geometria de cada arranjo, permitiram a elaboração das diferentes curvas NDIC (*normalized depth of investigation characteristic*) em função da profundidade z/L , sendo “z” profundidade de investigação e “L” a distância entre os eletrodos mais externos do arranjo (Fig.10). Tais curvas iniciam-se com valor zero na superfície, atingindo um valor máximo (máxima sensibilidade), tendendo a zero novamente. Loke (2002), define profundidade característica de investigação como função de sensibilidade.

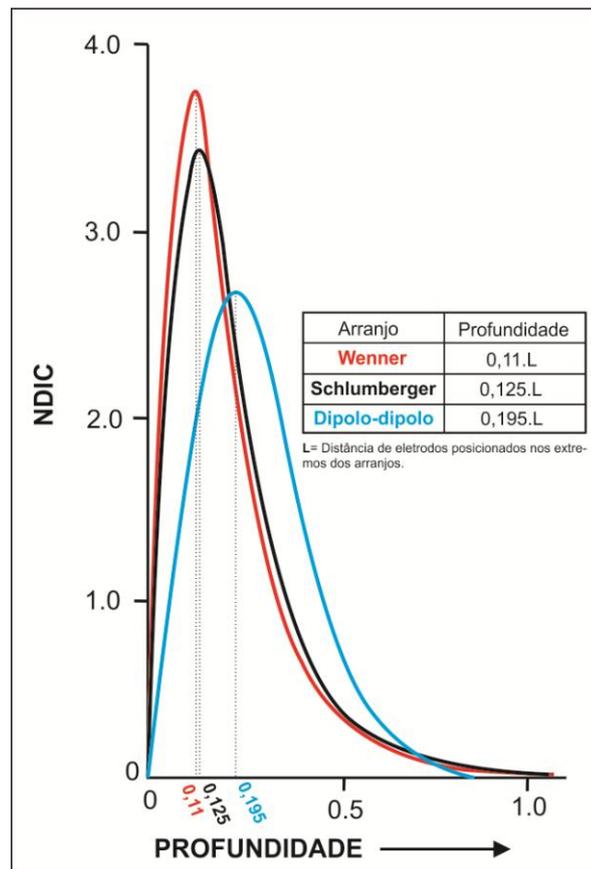


Fig. 10- Curvas NDIC para o arranjo Wenner, Schlumberger e dipolo-dipolo (modificado de Roy & Apparao, 1971; Barker, 1989).

Roy e Apparao (1971), puderam concluir que a profundidade de investigação nos arranjos é determinada pelas posições dos eletrodos de corrente e potencial, e não somente pela penetração ou distribuição da corrente.

Roy (1972), utilizando a mesma metodologia imposta por Roy e Apparao (1971), calculou a profundidade de investigação em um meio homogêneo para os arranjos Wenner α , β e γ e dipolo-dipolo, demonstrando que, para todos os arranjos dipolares, a profundidade de investigação diminui e a resolução vertical aumenta com o aumento do espaçamento dos dipolos, em exceção o equatorial que indica uma tênue variação de sua profundidade.

Edwards (1977) mostra que as curvas NDIC possuem validade para casos reais de ensaios geofísicos 2D. O autor utiliza coeficientes empíricos para a determinação da profundidade de investigação característica, baseada em uma pseudo-seção modificada, criando assim a definição de profundidade efetiva (z_{med}) como aquela em que metade do sinal total é proveniente da porção acima dessa profundidade.

Bhattacharya & Sen (1981) prosseguiram os estudos sobre profundidade de investigação, apresentando uma análise sobre a profundidade de diversos arranjos

colineares, mostrando que simples transformações podem ser aplicadas na expressão NDIC de determinado arranjo em meio homogêneo e anisotrópico, para obtê-la em um semi-espaço homogêneo e anisotrópico.

Barker (1989) através dos resultados obtidos por Roy (1972) para NDIC e Edwards (1977) para z_{med} , comparou curvas de sondagens construídas para modelos unidimensionais, com diferentes arranjos de eletrodos, e definiu novos valores de profundidade de investigação para arranjos convencionais.

Apparao *et. al.* (1997), com estudos para alvos resistivos, concluíram que a profundidade de detecção é comparativamente menor em relação a alvos condutivos, dependendo do arranjo a ser utilizado.

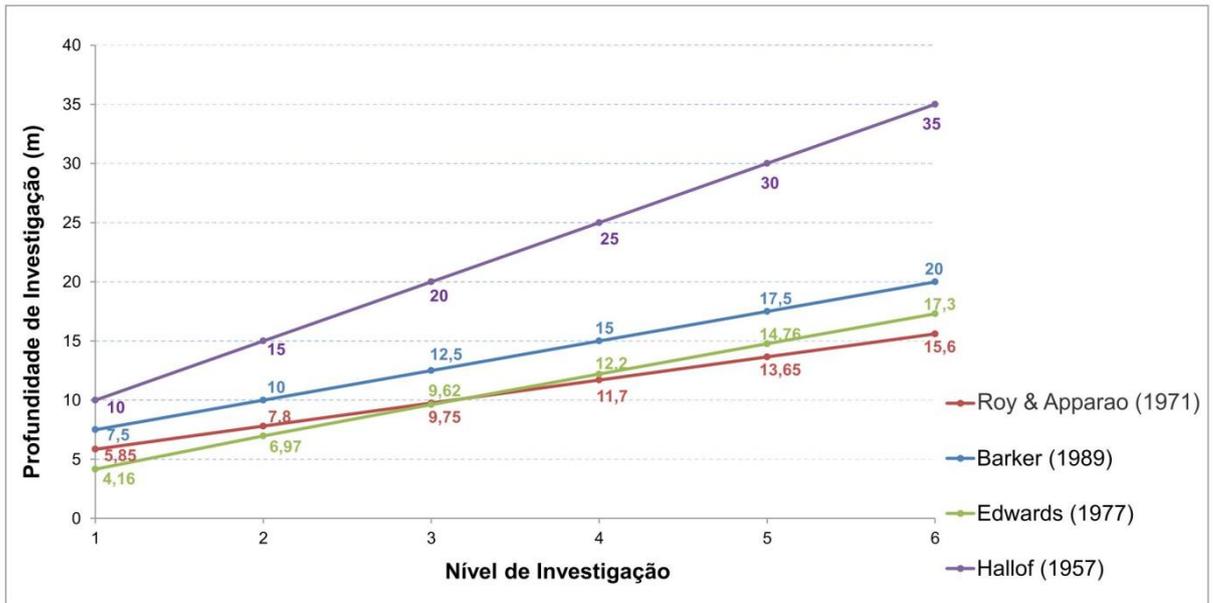
Gallas (2000), constatou que a profundidade de detecção para um arranjo dipolo-dipolo (caso real voltado à mineração) deve ficar entre as profundidades de Hallof (1957) e Edwards (1977).

Gandolfo (2007), com um estudo de imageamento geoeletrico raso, mostrou que as profundidades de investigação de Edwards (1977) são coerentes com os resultados obtidos nas áreas de estudos escolhidas pelo autor, além de apresentar informações que o arranjo dipolo-dipolo oferece a melhor resolução dentre os arranjos mais clássicos no caminhamento elétrico (Polo-Dipolo, Polo-Polo e Wenner).

Como podemos observar o tema “profundidade de investigação” nos métodos geoeletricos, necessita ainda de muitos estudos nas mais diversas situações. Na realidade, a profundidade atingida dependerá da distribuição das distribuições de resistividades em subsuperfície (Gallas, 2000). Ward (1990) não quantifica uma profundidade de penetração, pois argumenta que o tema não foi suficientemente estudado nas diferentes situações.

Para finalizar o capítulo, uma comparação sobre as profundidades de investigações sugeridas pelos autores aqui abordados (Fig.11).

Comparação de seis níveis de investigação dipolo-dipolo, com abertura de eletrodos de 10 metros segundo Hallof (1957), Roy & Apparao (1971), Edwards (1977) e Barker (1989)



Tipo de arranjo	n	z_e/a	z/L
Wenner alfa		0,519	0,173
Dipolo-dipolo (D-D)	1	0,416	0,139
	2	0,697	0,174
	3	0,962	0,192
	4	1,220	0,203
	5	1,476	0,211
	6	1,730	0,216
	7	1,983	0,220
	8	2,236	0,224
Pólo-dipolo (P-D)	1	0,519	
	2	0,925	
	3	1,318	
	4	1,706	
	5	2,093	
	6	2,478	
	7	2,863	
	8	3,247	
Pólo-pólo (P-P)		0,867	

Profundidades de investigação segundo EDWARDS (1977).

Arranjo	Profundidade
Wenner	0,17 L
Schlumberger	0,19 L
Dipolo-dipolo	0,25 L

Profundidades de investigação segundo BARKER (1989).

Arranjo	Profundidade
Dois eletrodos (pólo-pólo)	0,35 L
Wenner	0,11 L
Dipolo-dipolo	0,195 L
Schlumberger	0,125L

Profundidades de investigação segundo ROY & APPARAO (1971).

n	z_e/a
1	1,0
2	1,5
3	2,0
4	2,5
5	3,0
6	3,5
7	4,0
8	4,5

Profundidades de investigação segundo HALLOF (1957).

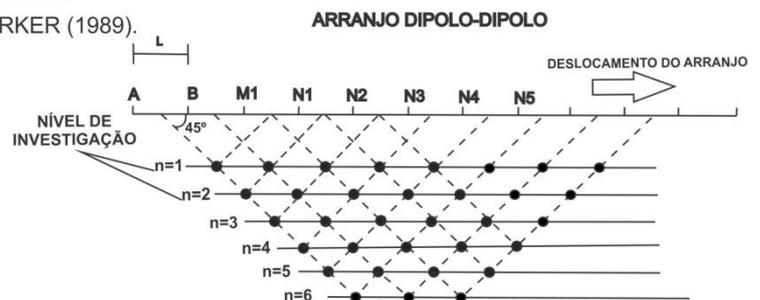


Fig. 11- Comparação entre as profundidades de investigações sugeridas por Hallof (1957), Roy & Apparao (1971), Edwards (1977) e Barker (1989).

2.2.5. Trabalhos Anteriores

Mesmo quando há uma evidente expressão geomorfológica de uma estrutura geológica presente na topografia, fica complexa a localização precisa de seu traço. Portanto, há diversos métodos não destrutivos que podem ser aplicados a fim de mapear com precisão o traçado de uma falha em superfície.

Dentre os diferentes métodos geofísicos, os geoeletricos têm tido uma melhoria significativa em investigações de pequena e média escala com profundidade de investigação de algumas dezenas de metros. A aplicação da eletrorresistividade para investigar grandes profundidades tem sido objetivo de estudo durante muitos anos, Keller (1966) e Alfano (1980).

Storz *et. al.* (2000) adaptaram o arranjo dipolo-dipolo em grande escala para investigar a distribuição da condutividade elétrica a vários quilômetros de profundidade, obtendo duas estruturas altamente condutoras, com inclinação elevada, sendo interpretadas como importantes zonas de falhas incorporadas a um corpo metamórfico.

Demant (2001) descreve aplicações de técnicas de prospecção geofísica para localizar falhas ativas em sedimentos Quaternários superficiais utilizando tomografia elétrica e sísmica de refração, com o objetivo principal de determinar o melhor local para a instalação de uma trincheira para estudos sísmicos. Ambos os métodos mostraram-se bem sucedidos.

Park & Wernick (2003) comparam uma seção de resistividade elétrica derivado de dados magnetotelúricos com uma seção geológica conhecida. A comparação mostra que características condutoras mergulhando abruptamente são correlacionáveis a falhas transcorrentes.

Nguyen *et al.* (2003) utilizaram métodos geoeletricos, sísmica de refração e GPR (Ground Penetrating Radar) na região de Provença (França) para a detecção de evidências geomorfológicas de falhas. Nesse trabalho as falhas não foram detectadas diretamente, porém as tomografias elétricas forneceram algumas restrições sobre a geometria do sistema de falhas. As anomalias sísmicas também foram claramente visíveis e parcialmente explicadas pelas características geológicas conhecidas, e os perfis de GPR também mostraram anomalias que poderiam ser gerados pelos traços das falhas.

Wise *et. al.* (2003), através de uma investigação integrada de geofísica, incluindo, métodos geoeletricos e reflexão/refração sísmica, determinaram a locação de trincheiras em

falhas para estudos sísmicos na Nova Zelândia. Os métodos sísmicos foram bem menos sucedidos acima do plano de falha, em parte devido à falta de refletores coerentes dentro da sequência Quaternária, principalmente devido ao alto grau de intemperismo em ambos os lados da falha. Os métodos de resistividade, apesar deste ambiente de intemperismo, revelou-se muito eficaz para confirmar a suspeita da localização da falha, fornecendo informações sobre a morfologia da estrutura da falha.

Suzuki *et al.* (2006) aplicaram métodos elétricos e eletromagnéticos para revelar estruturas geológicas cobertas por formações Quaternárias em quatro locais de falhas ativas no Japão. A conclusão final desse trabalho forneceu informações detalhadas e precisas sobre as estruturas geológicas nas áreas de estudo.

Galli *et al.* (2006) em um estudo nos Apeninos do sul, centro-oeste do Mediterrâneo, aplicaram métodos geoeletricos para retratar a geometria de uma falha ativa em profundidade em meio a rochas carbonáticas.

Trabalhos acadêmicos sobre métodos geoeletricos, principalmente em termos de eletrorresistividade aplicados à extração de rochas ornamentais no Brasil, ainda são muito restritos, provavelmente pelo alto nível de detalhamento exigido para as frentes de lavras. Porém, há trabalhos sobre a localização de fraturas em rochas cristalinas e sedimentares utilizando-se a eletrorresistividade.

Souza Junior & Porsani (2003) utilizaram GPR para mapear falhas e fraturas em uma pedreira de granito no município de Capão Bonito-SP, e com ajuda de sondagens elétricas verticais obtiveram o topo da rocha sã, orientando o avanço da frente de lavra.

Gallas (2003) utiliza a eletrorresistividade para identificar fraturas para a locação de poços tubulares no embasamento cristalino no município de São José do Rio Pardo, SP.

Porsani *et al.* (2003) tiveram como objetivo localizar zonas de fraturas nas rochas graníticas da Suíte Itú através da integração dos métodos GPR e resistividade elétrica, obtendo fortes refletores inclinados para o GPR e regiões condutivas para os métodos de eletrorresistividade, podendo estar relacionadas à presença de fraturas subverticais.

Madrucci (2004) utiliza a interpretação de fotografias aéreas, juntamente com dados de eletrorresistividade, para caracterizar áreas com elevado potencial hidrogeológico pela identificação de fraturas em rochas do embasamento cristalino da região de Lindóia, SP.

Costa & Malagutti Filho (2008), através das técnicas de sondagem elétrica vertical e imageamento elétrico, objetivaram identificar a contaminação do solo e das águas subterrâneas do lixão do município de Porto Velho, RO. Com os dados das resistividades, permitiram a identificação de fraturas preenchidas por percolação, estas confirmadas por estereogramas e mapas de lineamentos da área, mostrando a integração de resultados geoeletricos, mapeamentos de fraturas e dados geológicos para uma avaliação preliminar na área do depósito de resíduos.

Cutrim & Shiraiwa (2011) utilizam sondagens elétricas verticais para a prospecção de água subterrânea no município de Rondonópolis, MT. A pesquisa indicou as espessuras do Terciário/Quaternário, Formação Furnas e a profundidade do embasamento cristalino. Como a Formação Furnas é o principal aquífero da área, três poços tubulares foram implantados, indicando um acerto de 95% na profundidade estimada pelas SEVs.

Martins (2014) utiliza os métodos geoeletricos para auxiliar o planejamento da frente de lavra em uma pedreira de gnaiss localizada no município de Embu das Artes-SP, para a produção de brita. As SEVs permitiram entender e mapear as rochas em subsuperfície, e os caminhamentos elétricos, através dos contrastes de resistividades, puderam mapear os contatos dos diferentes materiais geológicos e corroborar com a interpretação estrutural da pedreira.

CAPÍTULO 3

MATERIAIS E MÉTODOS

Para este trabalho foram realizadas 11 seções de caminhamentos elétricos de aproximadamente 1km de extensão, com arranjo dipolo-dipolo, com $AB=MN=20$ metros, e 33 sondagens elétricas verticais com arranjo *Schlumberger*, de modo a cobrir toda área investigada. A Fig.12 , mostra uma visão geral da área de trabalho.



Fig. 12- Vista geral da área de trabalho.

3.2. Geologia Local

Para a caracterização da geologia local foram visitados afloramentos e grandes matacões, onde os principais litotipos foram descritos macroscopicamente.

Macroscopicamente, a rocha principal apresenta coloração cinza rosado, granulação média a grossa com estrutura maciça a levemente orientada e índice de cor em torno de 15%. A textura exibida é porfirítica com fenocristais de K-feldspato alcançando até 6 cm e matriz milimétrica (2 - 4 mm) composta por quartzo, plagioclásio, biotita e anfibólio, além de magnetita como mineral acessório. No diagrama QAP a rocha é plotada no campo dos sienogranitos (Fig.13).

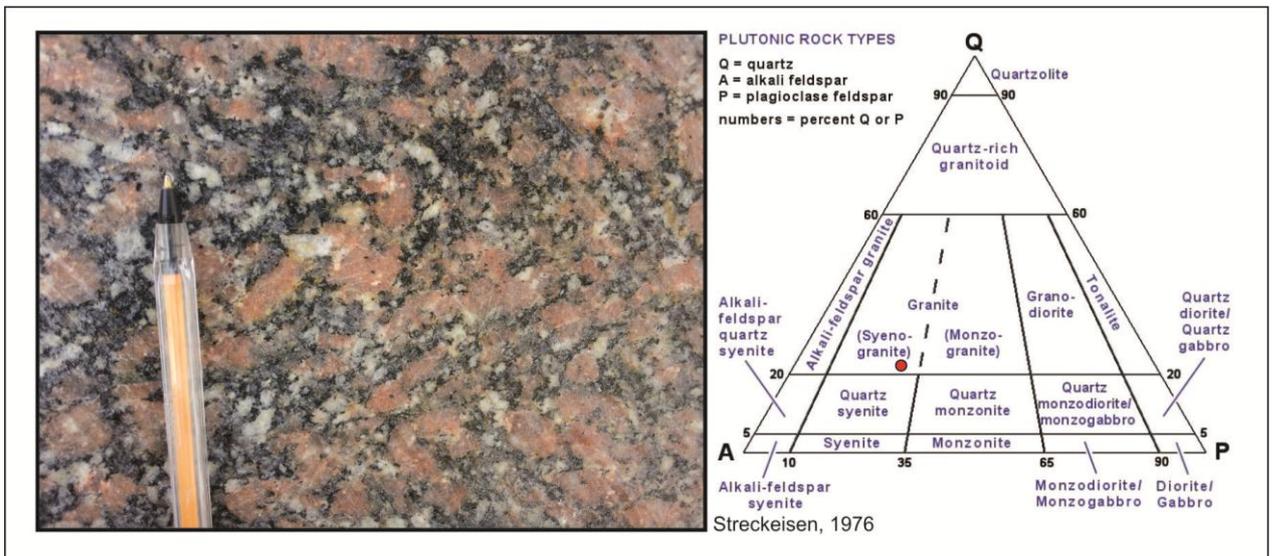


Fig. 13- Textura porfírica da rocha sienogranítica, e diagrama QAP indicando porcentagem de quartzo, K-feldspato e plagioclásio da rocha.

Localmente foi encontrada uma variedade de cor cinza com estrutura orientada, exibe textura equigranular de granulação fina com índice de cor igual a 5%, a assembléa mineralógica é composta essencialmente de quartzo, K-feldspato, plagioclásio e biotita, classificada como um sienogranito foliado. Essa rocha apresenta um contato brusco e não gradacional com a rocha porfírica, observando-se a presença de enclaves do granito porfírico dentro desses corpos mais finos (Fig.14), o que a hierarquiza como sendo mais jovem, sugerindo tratar-se de uma fase mais evoluída do mesmo magma que intrude a rocha predominante, quando a mesma se encontrava pouco plástica caracterizando um dique sin a tardi magmático.

Em alguns trechos ocorrem intrusões de pegmatitos que aproveitam fraturas e pequenas falhas, apresentando predominantemente k-feldspato (cristais de até 7 cm), tendo quantidades subordinadas de quartzo, plagioclásio e biotita.

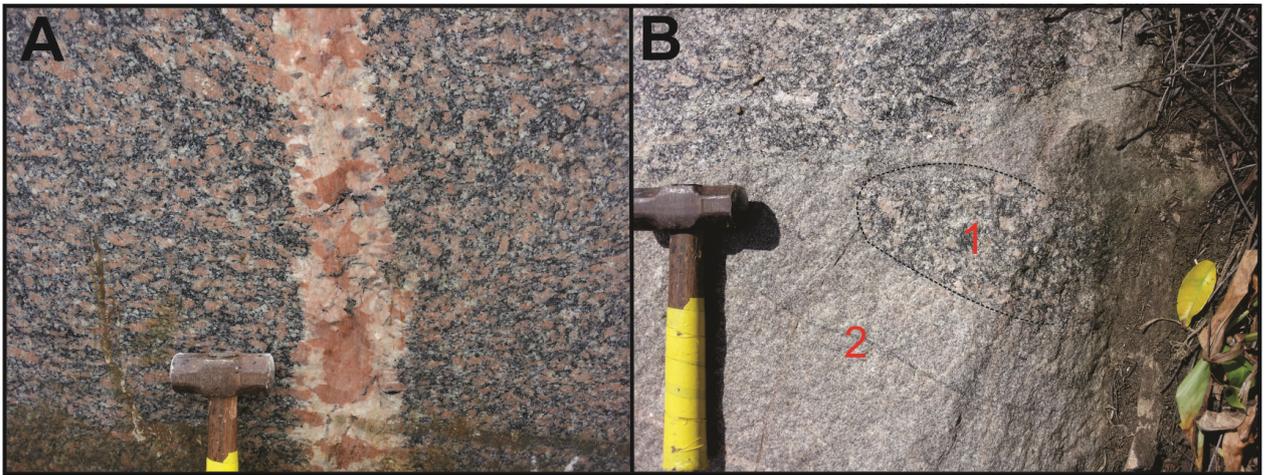


Fig. 14- A) Veio de Pegmatito; B) Enclave do sienogranito porfirítico em meio ao sienogranito foliado de granulação fina.

3.3. Topografia

Concomitante aos trabalhos geofísicos foi realizado um levantamento topográfico da área, utilizando-se estação total. O levantamento foi realizado a cada 40 metros em cada linha de investigação. No início (E1, E2, E3 e E4) e fim (E29, E30, E31 e E32) de cada linha a topografia foi realizada a cada 20 metros, para facilitar o início de cada caminhamento elétrico.

O levantamento topográfico foi essencial para a realização desse trabalho, pois as seções modeladas de caminhamento elétrico foram submetidas à correção topográfica. O resultado desse levantamento pode ser observado na Fig.15.

LEVANTAMENTO TOPOGRÁFICO

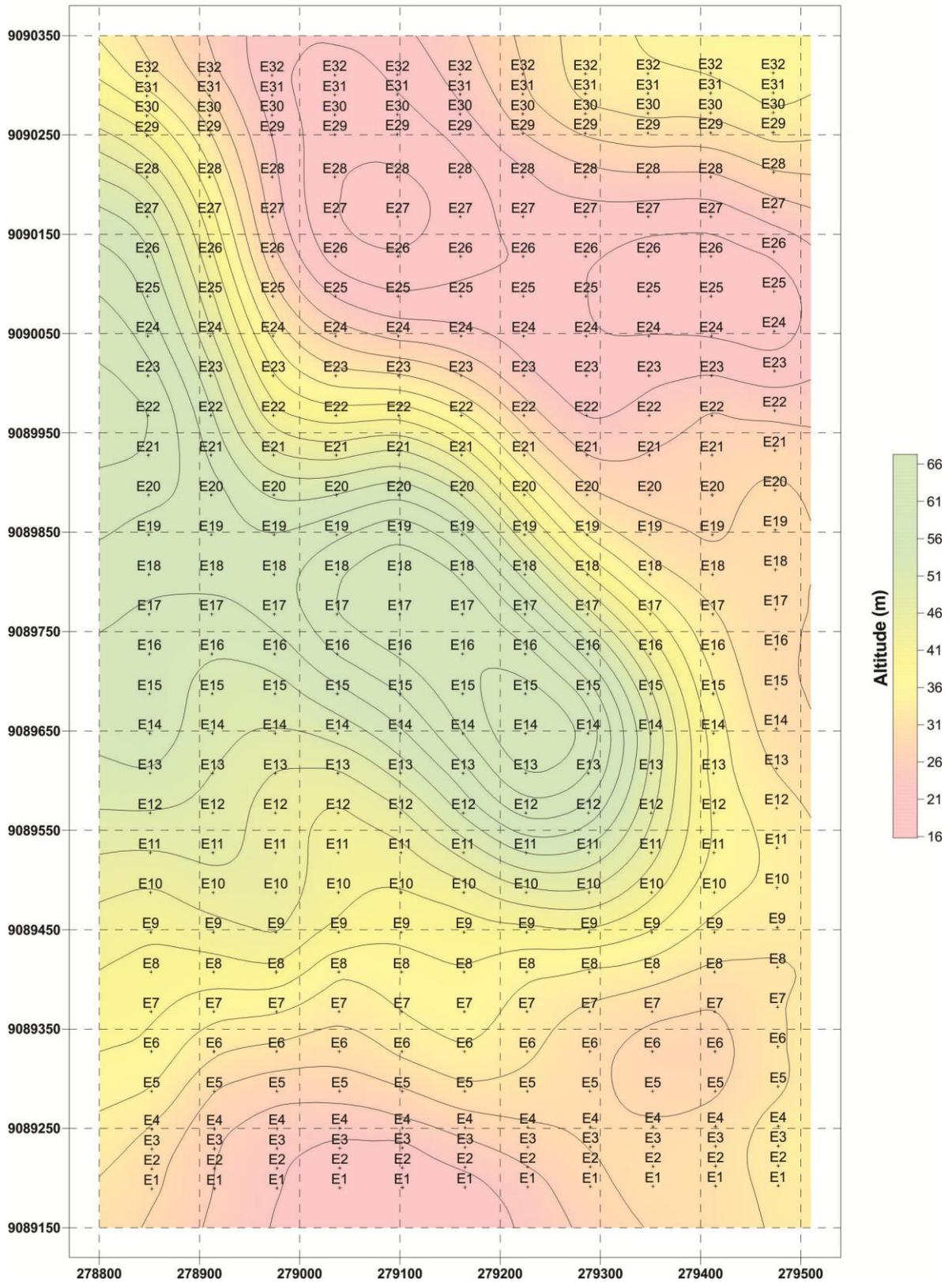


Fig. 15- Levantamento topográfico da área de estudo.

3.4. Equipamentos utilizados

Para a aquisição dos dados de resistividade, foram utilizados fios, trenas e bobinas, e o resistímetro Terrameter SAS 4000 (Fig.16), de fabricação sueca. Este equipamento consiste em módulo único de transmissão e recepção de dados, enviando correntes de até 1000mA, com tensões de até 400V, limitada pela potência de saída de 100W (ABEM, 2006). A relação entre a tensão e a corrente (V/I) é calculada automaticamente e apresentada digitalmente em ohms pelo equipamento.



Fig. 16- Resistímetro SAS 4000, ABEM.

Para medições que utilizam apenas um canal, é mais acessível à utilização dos conectores acima do visor do instrumento, C1 e C2, eletrodos de corrente e P1 e P2, eletrodos de potenciais (Fig.17). No caso desse trabalho, onde foi utilizado mais canais, foi empregado um adaptador multicanal (acessório SAS-4000). O adaptador multicanal é conectado diretamente ao SAS-4000, fazendo com que seja possível ligar um par de eletrodos de corrente e quatro pares de eletrodos de potencial, deixando o trabalho mais eficiente (Fig.17).

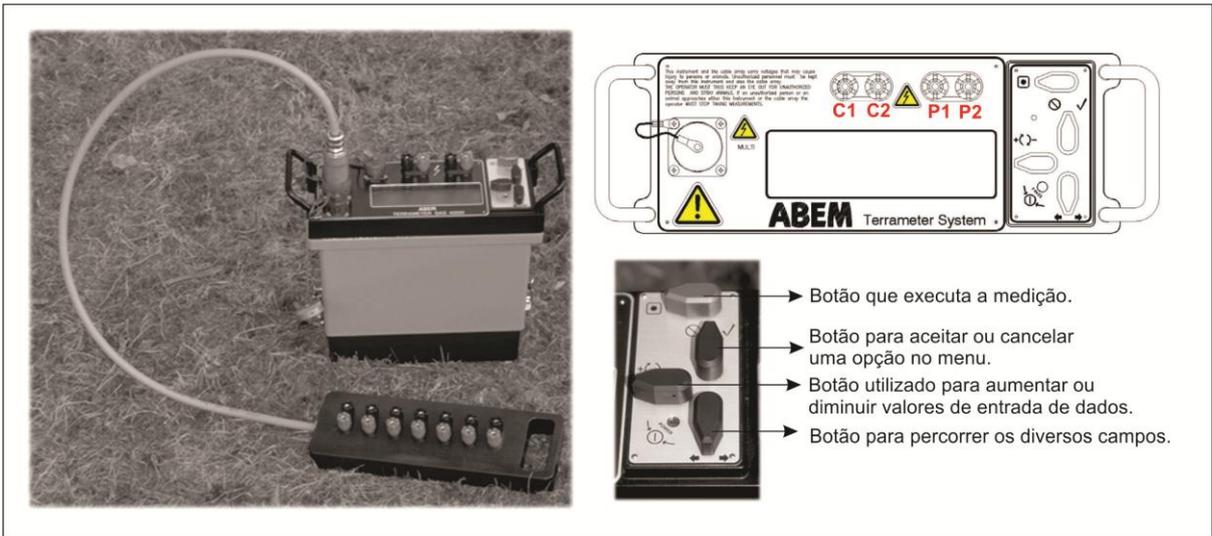


Fig. 17- Visor superior do resistivímetro SAS 4000 com destaque para os canais de corrente e potencial; o adaptador multicanal; e os principais botões e suas respectivas funções.

3.5. Caminhamento Elétrico

O caminhamento elétrico (CE) é uma técnica executada através da transmissão de corrente elétrica por meio de eletrodos, e o potencial gerado é medido através de outros eletrodos em contato galvânico com o solo, investigando assim sua variação na horizontal a uma ou mais profundidades determinadas. A Fig.18 mostra o levantamento de dados em uma das seções de caminhamento elétrico.



Fig. 18- Aquisição de dados de eletrorresistividade.

O arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo (Fig.19) que consiste em dois eletrodos fixados A e B, de envio de corrente e movendo os eletrodos M e N de recepção, alinhados em um mesmo perfil com deslocamento igual a L. A profundidade aumenta conforme o deslocamento, obtendo vários níveis de investigação (n=1,2,3,4...). Os pontos (valores medidos de resistividade aparente) são plotados a 45° dos centros de AB ($\Omega, \Omega', \Omega'' \dots$) e MN (O, O', O''...) de cada estação de medida.

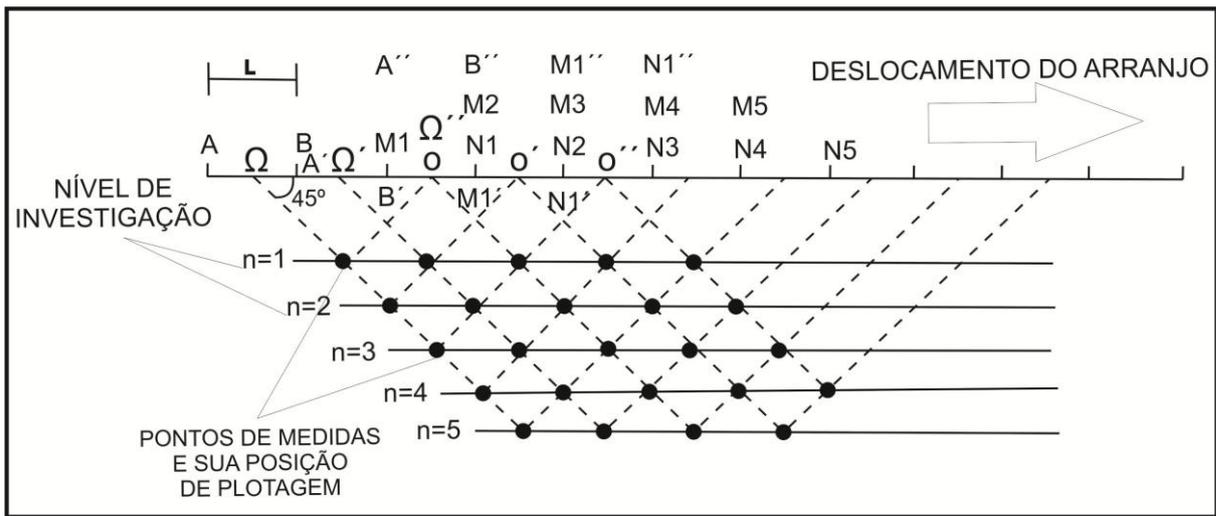


Fig. 19- Arranjo do tipo dipolo-dipolo (original de Gallas, 2000).

Foram realizados 11 caminhamentos elétricos (CE) dipolo-dipolo, linha 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10 e 11 com $AB=MN=20$ metros, 6 níveis de investigação, sendo as linhas paralelas entre si e espaçadas de 60 metros, com aproximadamente 1km de extensão (Fig.21).

As linhas levantadas são listadas a seguir:

Linha1: estaca 1 até estaca 26,5.

Linha2: estaca 1 até estaca 28.

Linha3: estaca 1 até estaca 28.

Linha4: estaca 1 até estaca 27.

Linha5: estaca 1 até estaca 28.

Linha6: estaca 1 até estaca 28.

Linha7: estaca 1 até estaca 32.

Linha8: estaca 1 até estaca 32.

Linha9: estaca 1 até estaca 32.

Linha10: estaca 1 até estaca 32.

Linha11: estaca 1 até estaca 32.

3.6. Sondagem Elétrica Vertical

A sondagem elétrica vertical (SEV) é uma técnica que investiga variações verticais de resistividade em subsuperfície onde as medidas são feitas a partir da superfície do terreno e efetuadas através de 4 eletrodos dispostos simetricamente em relação ao ponto investigado (centro do arranjo).

O arranjo utilizado foi o *Schlumberger* (Fig.20) onde os eletrodos de potencial M e N permanecem fixos enquanto os de corrente A e B são progressivamente afastados a cada leitura efetuada. A medida que aumenta o espaçamento AB, maior será o volume amostrado em subsuperfície e, conseqüentemente, maiores as profundidades investigadas. O ponto (valor medido de resistividade aparente) de atribuição das medidas é o ponto médio O entre M e N.

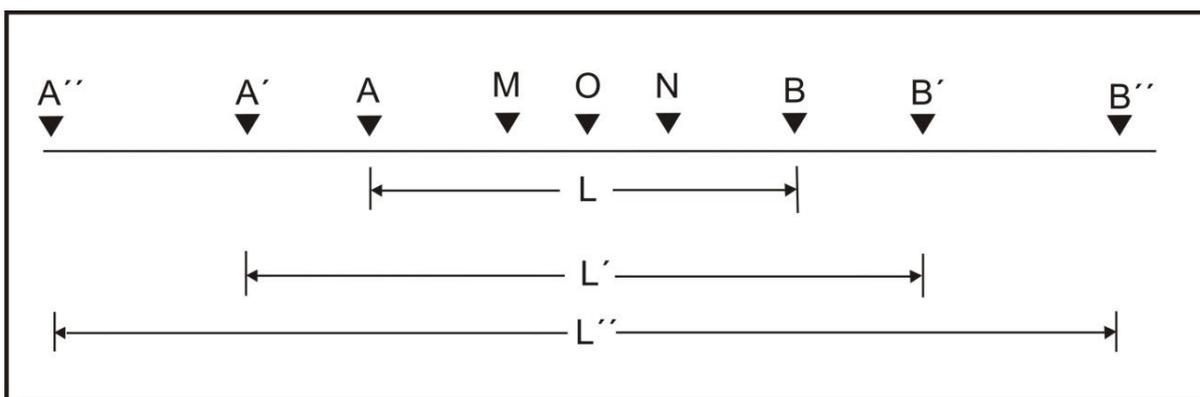


Fig. 20- Arranjo *Schlumberger* (original de Gallas, 2000).

Foram realizadas 32 sondagens elétricas verticais (SEVs) com arranjo *Schlumberger* (Fig.20), SEV1_9E, SEV1_14E, SEV1_23E, SEV2_7E, SEV2_16E, SEV2_21E, SEV3_9,5E, SEV3_19,5E, SEV3_23E, SEV4_8E, SEV4_18E, SEV4_22E, SEV5_7E, SEV5_19E,

SEV5_25E, SEV6_9,5E, SEV6_18,5E, SEV6_24E, SEV7_8E, SEV7_11E, SEV7_21E, SEV8_5E, SEV8_19E, SEV8_26E, SEV9_10,5E, SEV9_21E, SEV9_24,5E, SEV10_8,5E, SEV10_16E, SEV10_22,5E, SEV11_6E e SEV11_27E, com AB máximo de 60 metros. Essas sondagens foram realizadas de modo a cobrir adequadamente a área do terreno.

A nomenclatura das SEVs relaciona-se com linha e estaca de execução da mesma.

Ex.: SEV1_9E indica que a sondagem elétrica vertical foi realizada na linha 1 de caminhamento elétrico, na estaca 9.

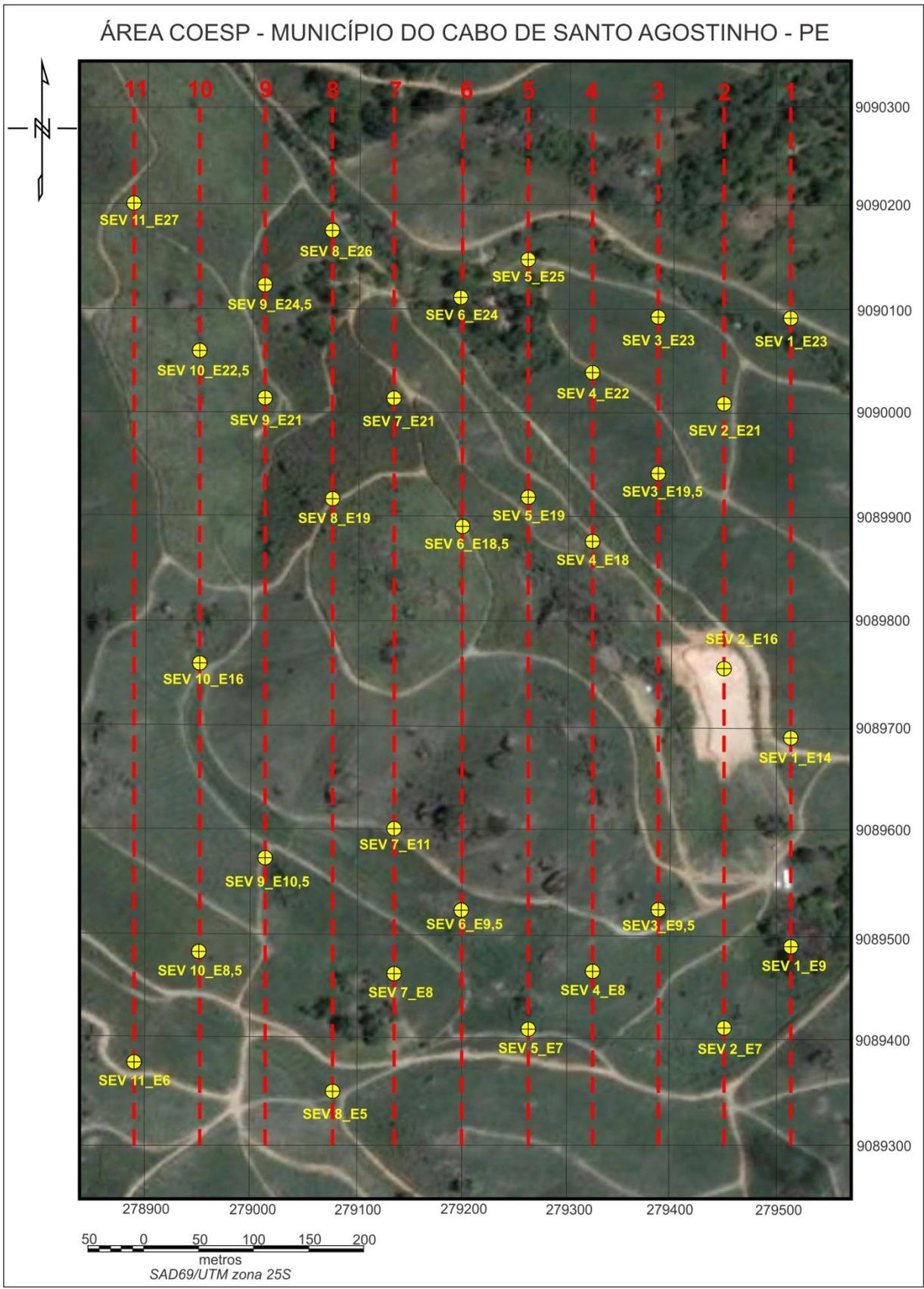


Fig. 21- Linhas de caminhamento elétrico na área de estudo e a localização das sondagens elétricas verticais.

3.7. Processamento dos Dados

Para a inversão e apresentação 1D, 2D e simulação 3D dos dados de resistividade foram utilizados os seguintes programas: Surfer 11.1.719 (64-bit) Golden Software Inc., RES2DINV v. 3.4 Geotomo Software, IPI2Win v. 3.0.1 GEOSCAN-M Ltd, e Voxler 3.0.1406 (64-bit) Golden Software Inc.

3.7.1. RES2DINV®

RES2DINV é um programa de computador que determina automaticamente um modelo 2D da subsuperfície terrestre a partir dos dados obtidos no imageamento elétrico (Griffiths and Barker, 1993). O modelo 2D usado pelo programa de inversão é constituído por um certo número de blocos retangulares, e sua disposição é ligada à distribuição de pontos de dados na pseudo-seção (Fig.22).

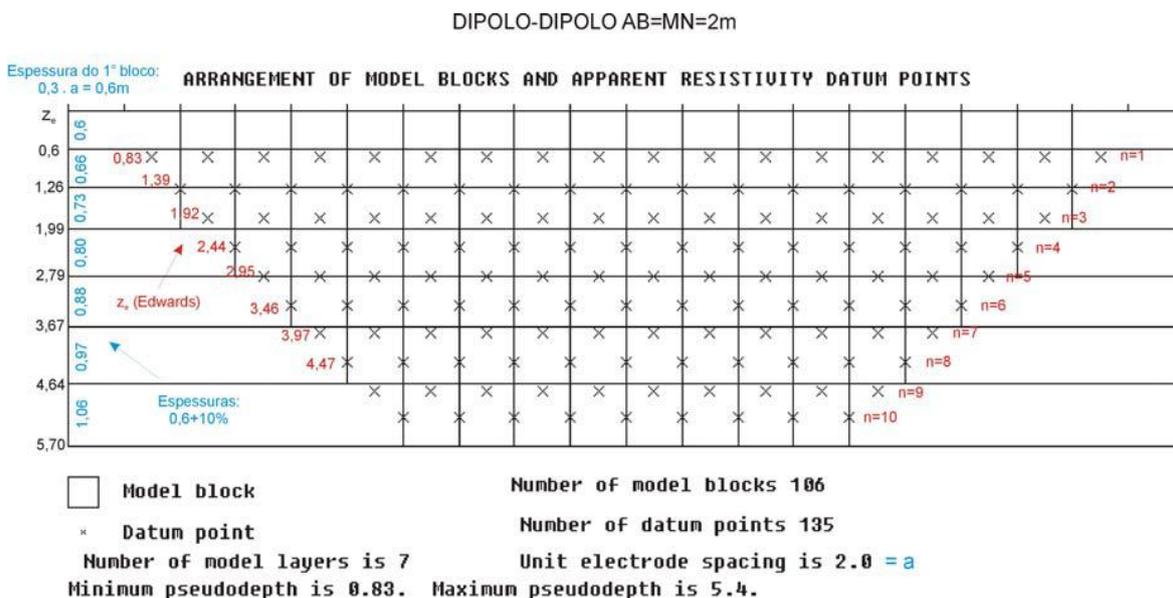


Fig. 22- Modelo de blocos utilizado no RES2DINV, arranjo D-D (a=2m) e respectivos dados plotados de acordo com as profundidades estabelecidas por Edwards (1977).

A profundidade das camadas dos blocos é ajustada para ser aproximadamente igual à profundidade de investigação de Edwards, 1977.

A inversão utilizada pelo programa é baseada no método dos mínimos quadrados com vínculo de suavidade (deGroot-Hendlin & Constable, 1990, Sasaki, 1992). O programa

suporta uma implementação do método dos mínimos quadrados, com base na técnica de otimização quasi-Newton (Loke & Barker, 1996). Esta técnica é significativamente mais rápida do que o método de mínimos quadrados convencional utilizado nesse programa, chamado de Gauss-Newton. Em áreas com grandes contrastes apresentam resultados ligeiramente melhores. Uma terceira opção dada pelo programa consiste em utilizar o método Gauss-Newton para as primeiras 2 ou 3 iterações, e nas restantes, o método quasi-Newton, apresentando em muitos casos uma melhor resposta (Loke & Dahlin, 2002).

No passado era discutido qual método de inversão deveria ser utilizado, devido aos computadores de baixa velocidade de processamento de dados, porém, devido à melhoria nos códigos de programas e computadores mais modernos, o método padrão utilizado para a interpretação final do modelo é o Gauss-Newton, levando apenas alguns minutos para efetuar todas as iterações.

Como já descrito, o modelo 2D do RES2DINV divide a pseudo-seção em um número de blocos retangulares. O objetivo deste programa é determinar a resistividade de cada bloco produzida a partir das resistividades aparentes das pseudo-seções. No caso do arranjo dipolo-dipolo, a espessura da primeira camada de blocos é ajustada cerca de 0,3 vezes o espaçamento entre os eletrodos, e a espessura de cada camada subsequente é normalmente aumentada de 10% da anterior, porém as profundidades das camadas podem ser alteradas manualmente pelo usuário.

O programa conta com quatro métodos diferentes de incorporação de topografia ao modelo de inversão, um deles utiliza a técnica das diferenças finitas, e os outros três são baseados nos métodos dos elementos finitos (Fig.23). O método das diferenças finitas utiliza a abordagem semi-analítica de Schwartz-Christoffel, mapeando uma região bidimensional com superfície ondulada como uma grade retangular (Spiegel *et.al.*, 1980).

Os três outros métodos são similares por usarem uma malha de elementos finitos distorcidos, com os nós das grades deslocados para cima ou para baixo para que se ajustem à superfície real, sendo automaticamente incorporada ao modelo de inversão. A diferença entre estes métodos está na forma como os nós são deslocados.

A escolha ideal de um método depende da variação topográfica. Para uma variação pequena de topografia utiliza-se o método em que todos os nós se deslocam com a mesma distância (Fig.23b); para uma variação de topografia moderada, os nós são reduzidos exponencialmente com a profundidade, até atingirem uma profundidade grande em que os nós

não são deslocados. No programa pode-se mudar o fator em que os nós são deslocados (Fig.23 c e d); e no terceiro método de elementos finitos utiliza-se a técnica de transformação de Schwartz-Christoffel, levando em conta a curvatura da superfície topográfica, criando perfis mais realistas (Fig.23e)

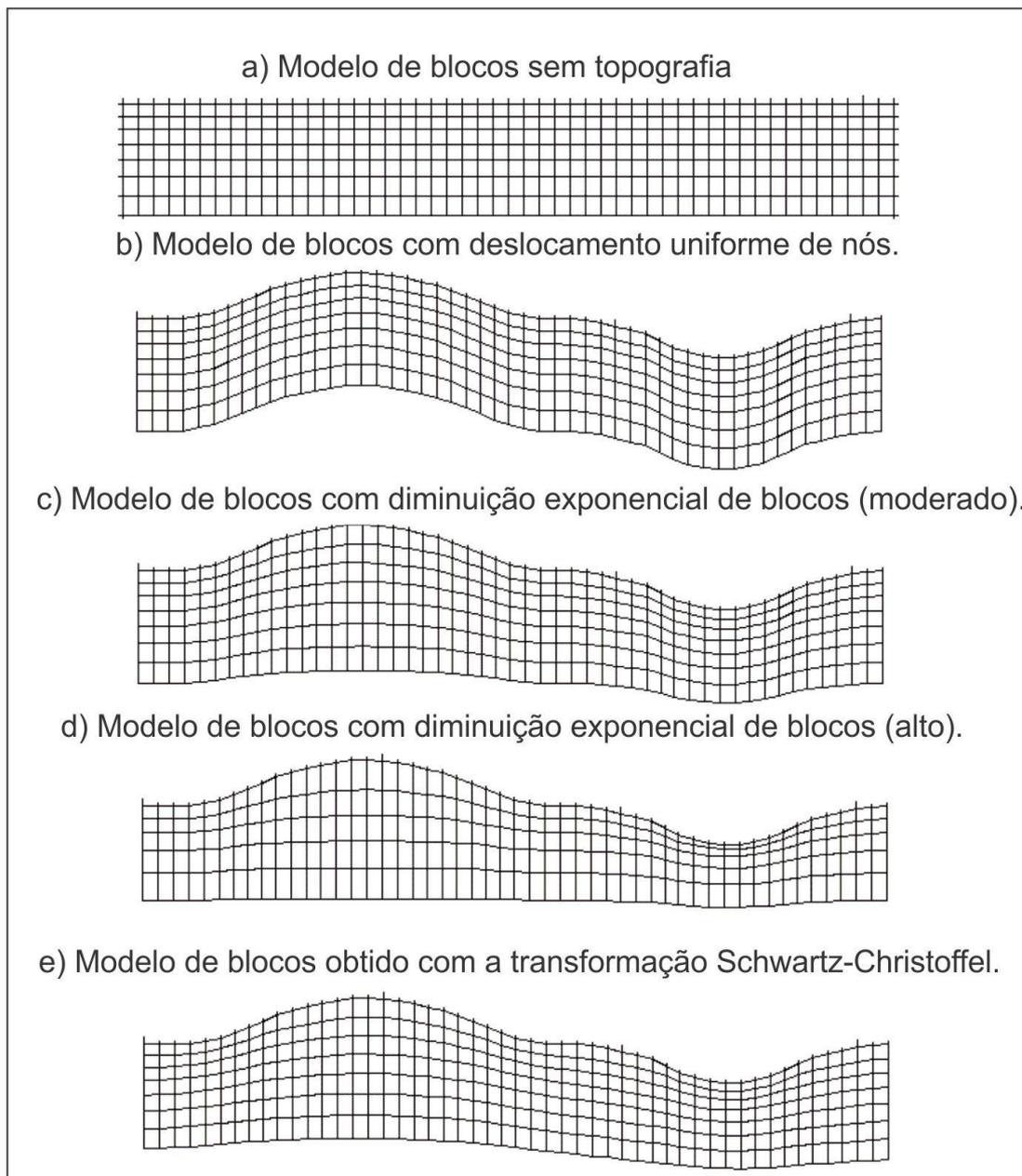


Fig. 23 Diferentes métodos de incorporação de topografia ao modelo de inversão do RES2DINV.

Fox *et. al.* (1980) acreditam que as anomalias de resistividade são significativas em áreas onde a topografia é da ordem de 10° ou maiores.

3.7.2. IPI2WIN®

A inversão dos dados na sondagem elétrica vertical assume um modelo de terra unidimensional (1D) para determinar a resistividade verdadeira e espessura da camada geológica. Teoricamente assume-se um meio plano-estratificado, formado por camadas horizontais lateralmente infinitas, homogêneas e isotrópicas, variando assim a resistividade elétrica apenas com a profundidade.

O IPI2Win foi utilizado para a interpretação 1D das curvas de sondagem elétrica vertical ao longo dos perfis. Esse processo é dado a partir de um processo iterativo dos resultados empregando-se um algoritmo linear elaborado pela Faculdade de Geologia da Universidade Estadual de Moscow, Rússia (GEOSCAN-M Ltd. 2000).

3.7.3. SURFER®

O SURFER permite, através de diversos métodos de interpolações, a construção de uma malha regular (*grid*) baseada num conjunto de dados, regularmente ou irregularmente distribuídos. A partir do *grid* estabelecido são elaboradas as curvas de isovalores gerando o mapa de contorno.

Um mapa é construído usando-se a posição espacial de um determinado ponto e o valor correspondente das diferentes variáveis, normalmente representado por X, Y e Z. A parte mais importante na geração desses mapas é a escolha do método de interpolação.

Esse programa foi utilizado para a apresentação dos dados de campo, tanto para as pseudo-seções como para as seções modeladas a partir do RES2DINV. A escolha desse programa para a apresentação dos dados foi devido ao melhor detalhamento das curvas de resistividades, bem como os valores de resistividades plotados ao longo de suas seções (Fig.24).

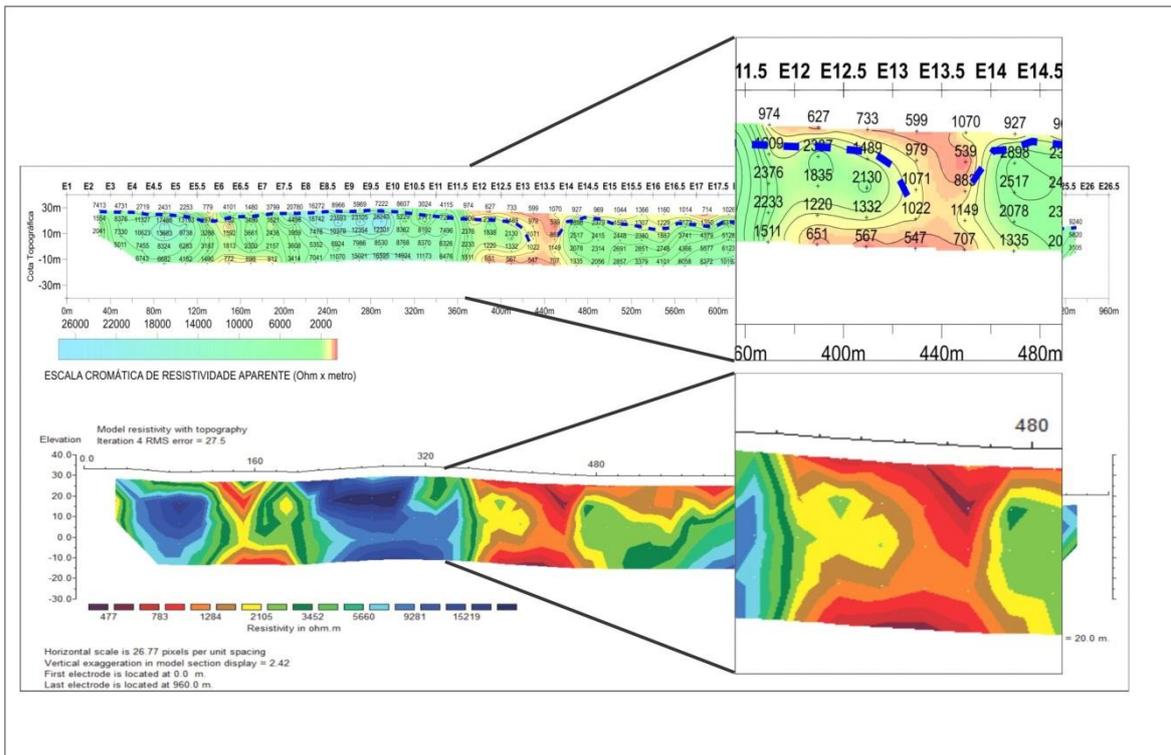


Fig. 24- Diferença de seção modelada de resistividade entre o SURFER e o RES2DINV.

3.7.3.1 Métodos de Interpolação do SURFER®

A necessidade de caracterizar um contorno de uma variável, através de um interpolador adequado, depende do conhecimento dos dados de entrada bem como das características principais de cada interpolador.

O SURFER® contém 12 métodos de interpolação que adaptam-se a cada necessidade. É sugerido ter o conhecimento básico de cada método de interpolação para que o operador possa efetivamente selecionar os parâmetros em cada método.

Os métodos para realizar o grid no SURFER® são: *Inverse Distance to a Power*; *Kriging*; *Minimum Curvature*; *Modified Shepard's Method*; *Natural Neighbor*; *Nearest Neighbor*; *Polynomial Regression*; *Radial Basis Function*; *Triangulation with Linear Interpolation*; *Local Polynomial*; *Moving Average*; *Data Metrics*.

As diferenças dos métodos de interpolação estão em seus diferentes algoritmos. Sendo assim, cada método pode resultar em diferentes resultados a partir de uma mesma base de dados. Para este trabalho foi desenvolvido um ensaio mostrando os diferentes resultados com a mesma base de dados para os diferentes interpoladores do SURFER®, indicando qual o melhor resultado na representação do conjunto de dados de interesse.

Os métodos de *Polynomial Regression* e *Data Metrics* não são aqui apresentados, pois o Surfer não os considera métodos de interpolação em geral (SURFER, 2002). O método *Polynomial Regression* é utilizado para definir tendências e padrões de larga escala, e o *Data Metrics*, cria uma rede de informações nó a nó no grid como, por exemplo, números de pontos utilizados para interpolar cada nó do grid, desvio padrão e variância dos dados em cada nó (SURFER, 2002).

Para a representação dos diferentes métodos de interpolação foi utilizada uma seção de caminhamento elétrico dipolo-dipolo com espaçamento de 20 metros entre os eletrodos, que apresenta diferentes valores de resistividades indicando uma estrutura geológica anômala com menores valores de resistividades no centro do perfil na direção vertical (Fig.25).

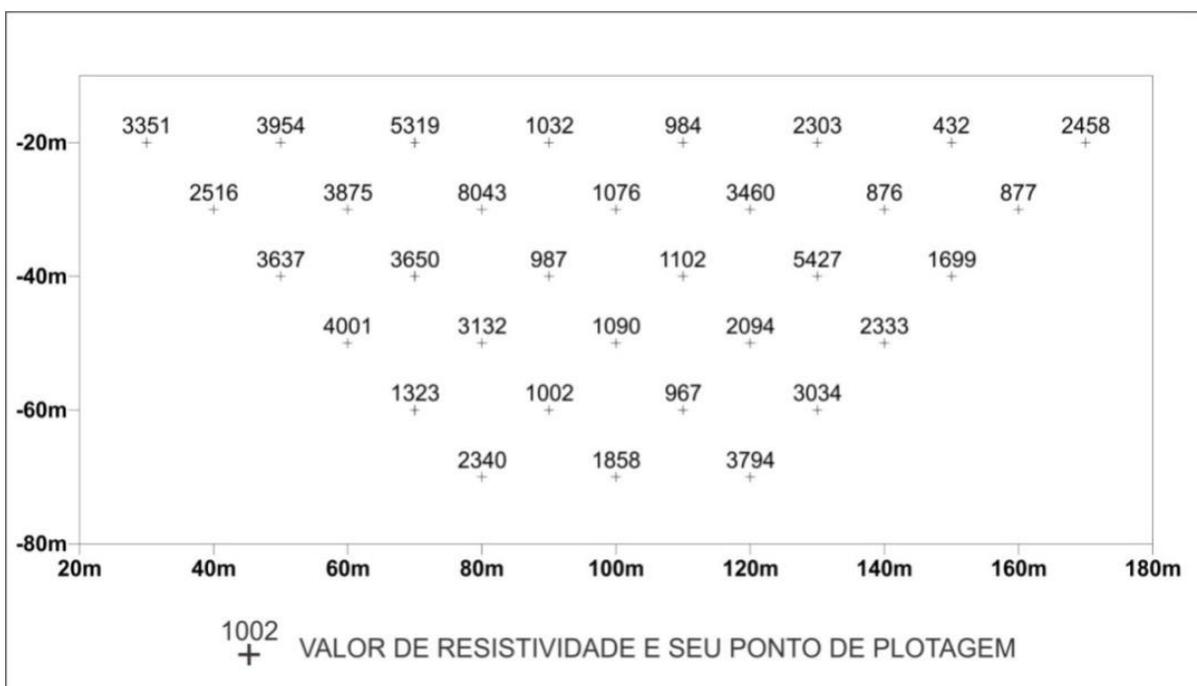


Fig. 25- Exemplo de seção de caminhamento elétrico.

3.7.3.1.1 Inverse Distance to a Power

No método *Inverse Distance to a Power*, é classificado tanto como um interpolador exato como suavizante, ou seja, são utilizados quando se tem certeza dos valores dos pontos no qual a interpolação foi baseada, ou quando há incertezas sobre os valores dos pontos amostrados. Este método faz com que a influência de cada ponto seja inversamente proporcional à distância do nó da malha. O dado é ponderado durante a interpolação, assim, a presença de um ponto em relação ao outro decresce com a distância ao grid, quanto maior a potência de ponderação, menor será o efeito de um ponto, distante de um nó de grid, sobre a interpolação.

A principal vantagem desse método é a rapidez para fazer a gridagem com baixo custo computacional, porém há uma característica negativa desse método, que é a geração de “bull’s-eyes” (SURFER, 2002) ou efeito mira, que são pontos em destaques (altos e baixos valores) em relação a sua vizinhança (Fig.26).

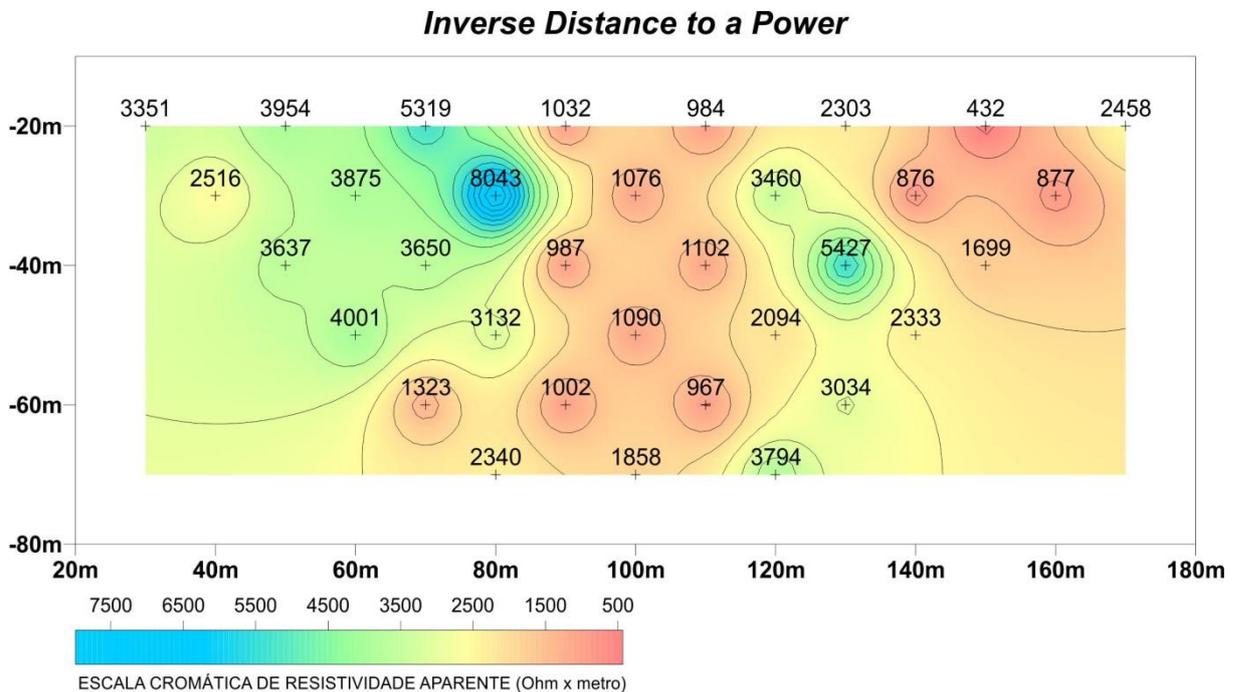


Fig. 26- Seção gerada utilizando *Inverse Distance to a Power* como interpolador.

3.7.3.1.2 Kriging

Esse método é uma ferramenta geoestatística que utiliza das funções semivariograma (Cressie, 1993) para atribuir o peso aos pontos amostrais para o cálculo das interpolações, levando vantagens muitas vezes sobre outros métodos. Atribui a correlação espacial entre amostras através de um semivariograma, definindo parâmetros necessários para a estimativa de valores para locais não amostrados. Após modelado o semivariograma, é possível reconhecer o grau de anisotropia dos dados, definindo pesos mais correlacionáveis para as diferentes amostras.

Diferentemente do método *Inverse Distance to a Power*, o método *Kriging*, tenta representar as tendências sugeridas para cada conjunto de dados como, por exemplo, eliminar o efeito mira, mostrando que altos e baixos valores podem ser conectados (Fig.27).

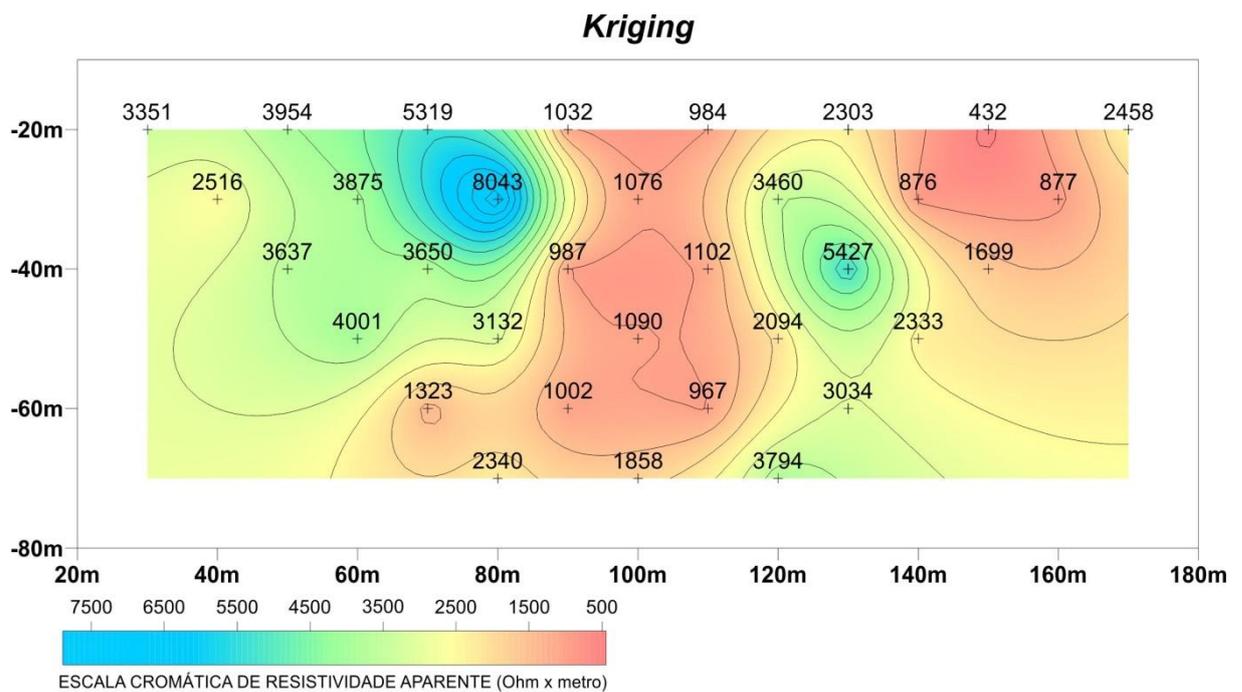


Fig. 27- Seção gerada utilizando *Kriging* como interpolador.

3.7.3.1.3 Minimum Curvature

O método *Minimum Curvature*, diferentemente de outros interpoladores, utiliza polinômios de pequenas ordens para cada subconjunto de amostras, onde a soma de todos eles forma a interpolação sobre todo o campo amostral.

Landim (2000) apresenta algumas vantagens e desvantagens sobre o método, tais como: a um menor número de formas estranhas, com exceção das bordas e interior de células de amostragens; a superfície estimada é independente da distribuição dos dados e da presença de ruídos; havendo dados próximos a bordas pode haver geração de depressões ou picos nas bordas do mapa.

Todas essas vantagens e desvantagens são atribuídas ao mapa de contorno gerado apresentado na Fig.28.

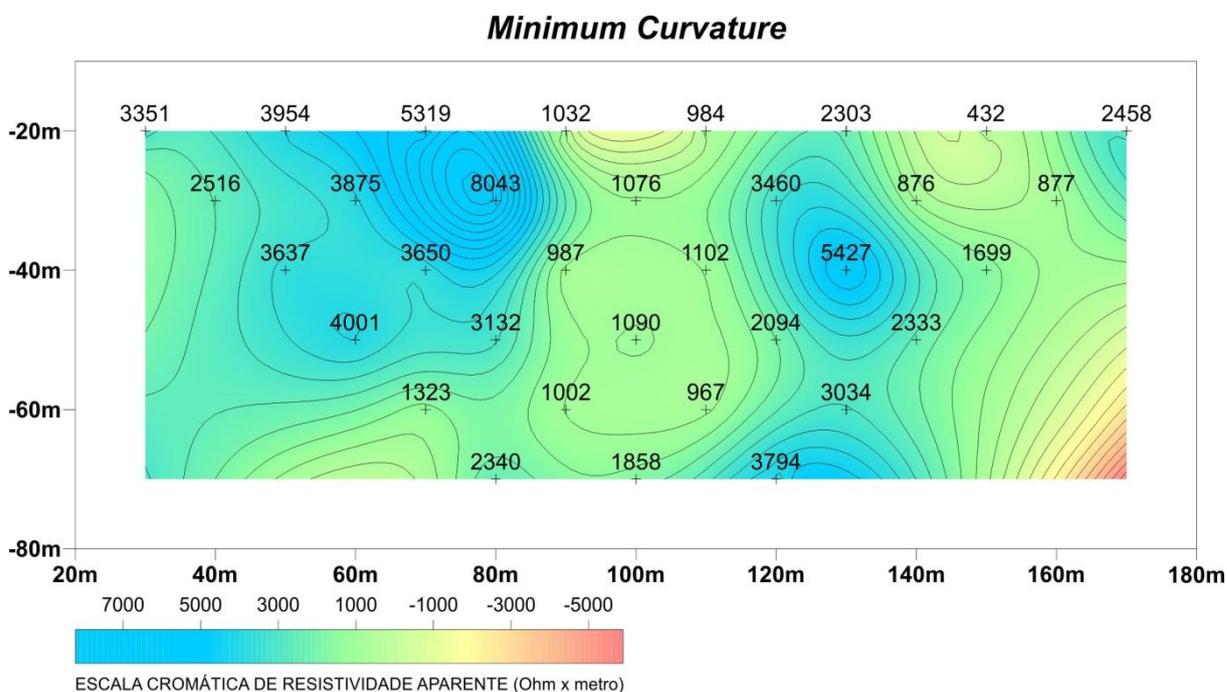


Fig. 28- Seção gerada utilizando *Minimum Curvature* como interpolador.

3.7.3.1.4 Modified Shepard's Method

Esse método é similar ao *Inverse Distance to a Power*, porém utilizando localmente o método dos mínimos dos quadrados, reduzindo ou eliminando o efeito de mira nos contornos gerados (SURFER, 2002).

O mapa gerado por esse método, apresenta curvas suavizadas sem a presença de efeito mira, Fig.29.

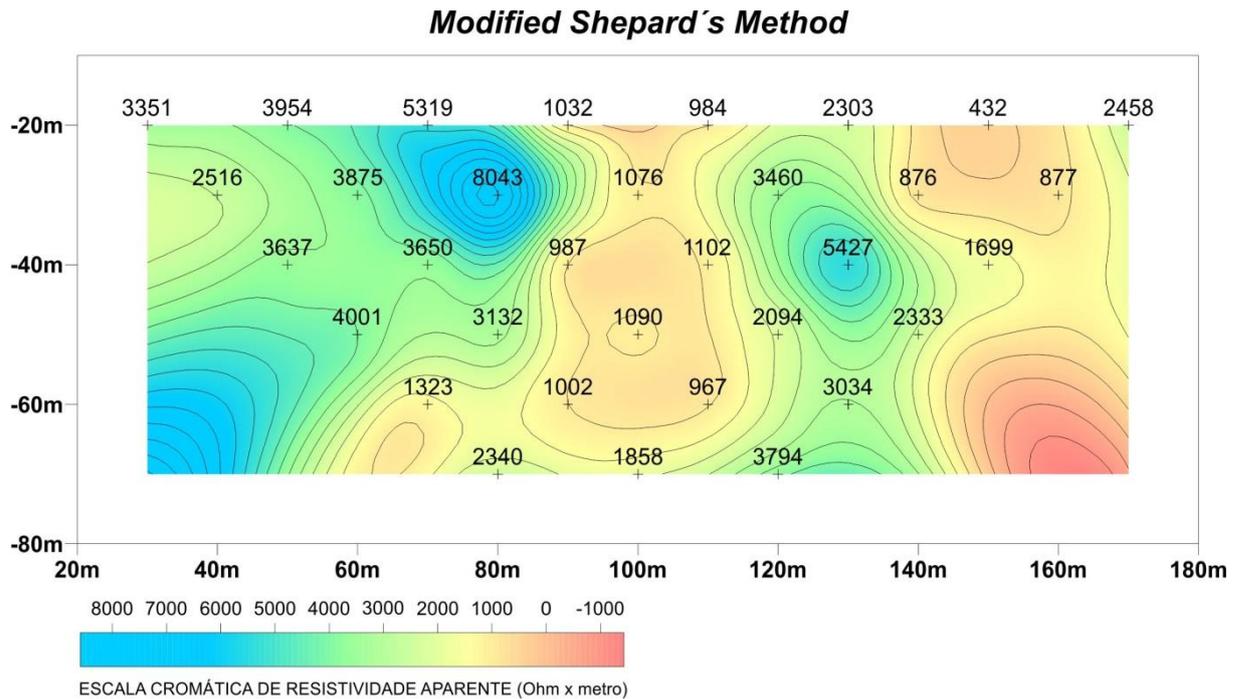


Fig. 29- Seção gerada utilizando *Modified Shepard's Method* como interpolador.

3.7.3.1.5 Natural Neighbor

Esse interpolador, diferentemente das demais técnicas, não extrapola valores, resolvendo a interpolação apenas para o interior do domínio amostrado (Fig.30). Esse método utiliza os polígonos de Thiessen (SURFER, 2002) para dar o peso para as amostras, ou seja, utilizando a interpolação através da média ponderada de amostras vizinhas, onde os pesos são proporcionais às áreas dos polígonos.

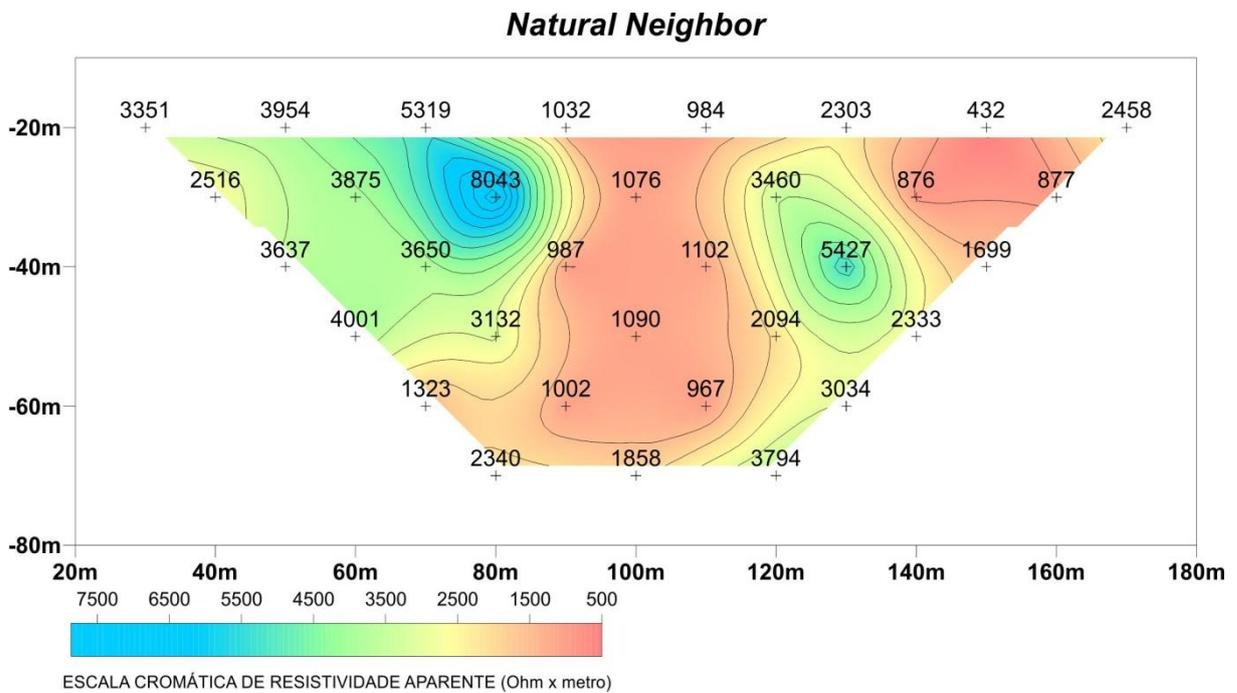


Fig. 30- Seção gerada utilizando *Natural Neighbor* como interpolador.

3.7.3.1.6 *Nearest Neighbor*

Esse método é caracterizado como o mais simples dentre os interpoladores (FRANKE, 1982), seu algoritmo tem como principal característica, a não geração de novos valores, interpolando apenas valores originais do campo amostrado.

Por ter algoritmo muito simples, não é recomendado para a interpretação de dados geofísicos, pois seu resultado não apresenta grau de detalhamento necessário, formando modulações quadráticas para a interpretação das curvas de contorno, e exibindo o efeito degrau em suas curvas (Fig.31).

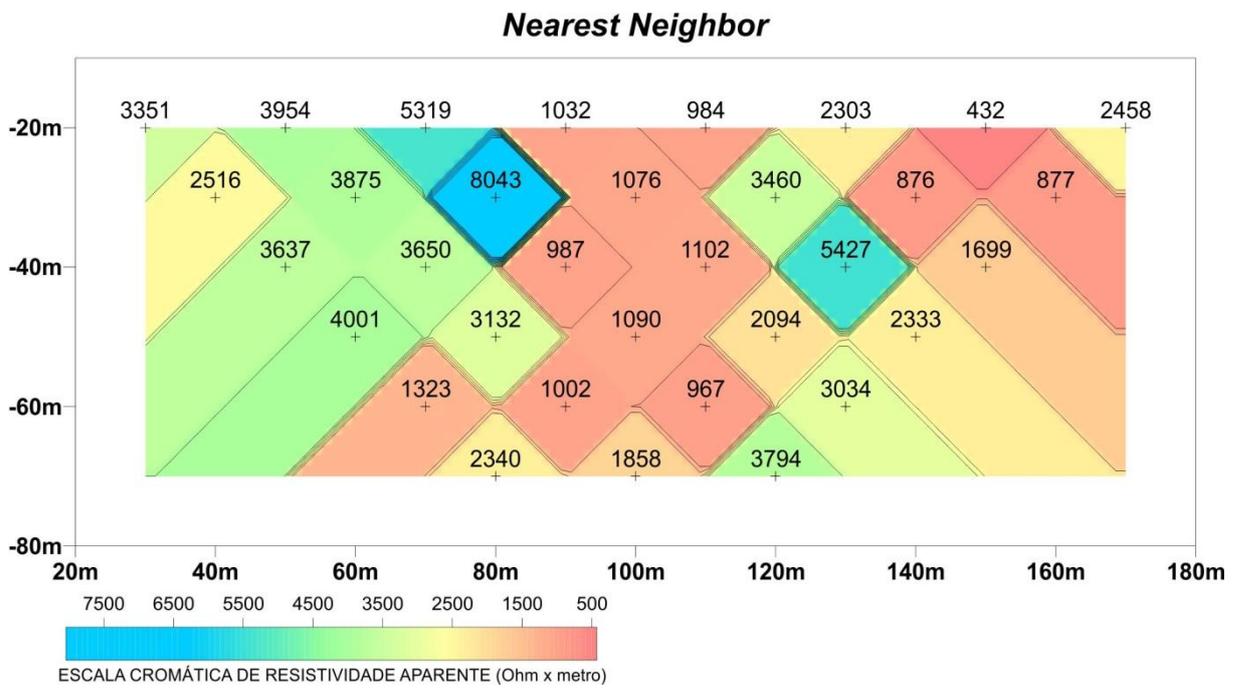


Fig. 31- Seção gerada utilizando *Nearest Neighbor* como interpolador.

3.7.3.1.7 Radial Basis Function

O método *Radial Basis Function*, na verdade, é um conjunto diversificado de métodos de interpolação de dados, destacando-se o multi-quadrático como o melhor para a construção de superfícies suavizadas (SURFER, 2002). As funções utilizadas para esse método são correlacionáveis a método *Kriging*, tornando esses métodos análogos entre si, definindo automaticamente a melhor distribuição de pesos a ser aplicado em todos os pontos amostrados (Fig.32).

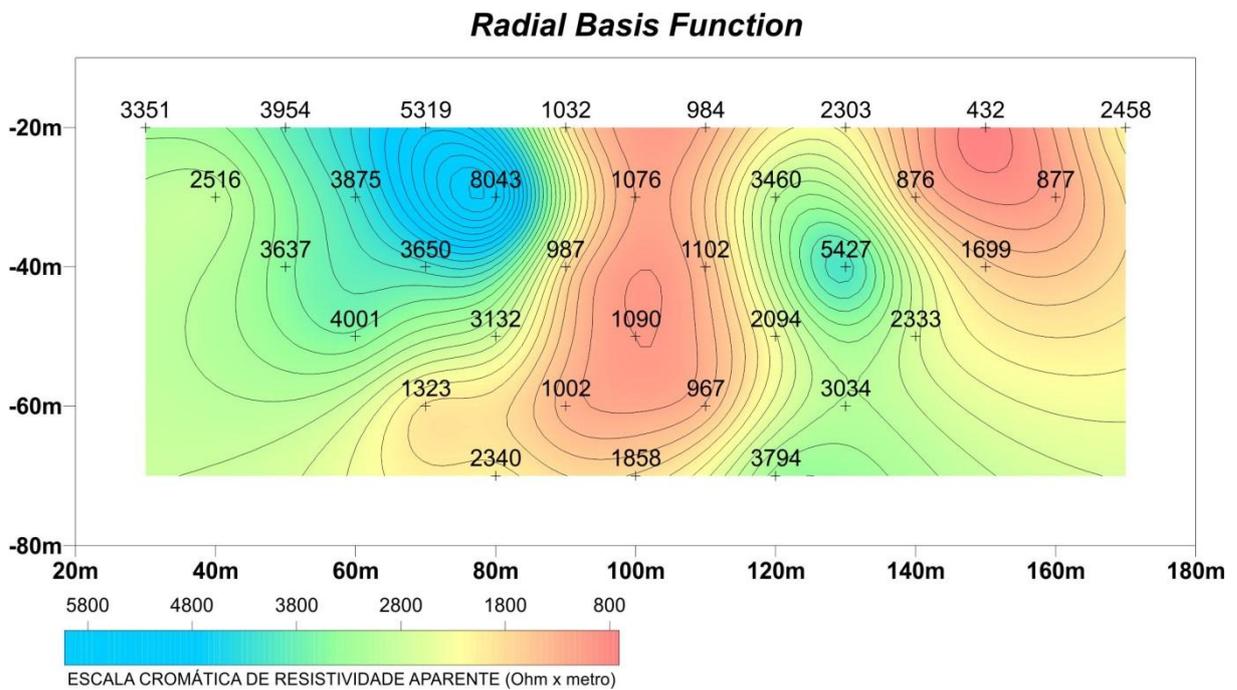


Fig. 32- Seção gerada utilizando *Radial Basis Function* como interpolador.

3.7.3.1.8 Triangulation with Linear Interpolation

Este método é um interpolador exato e utiliza o método de triangulação de Delaunay (SURFER, 2002). Esse método trabalha com a criação de triângulos entre os dados amostrados, resultando um mosaico de superfícies triangulares ao longo de toda a extensão do grid. Cada triângulo define um plano gerado pelos três pontos originais amostrados e a cada vértice são distribuídos pesos correlacionáveis a cada amostra original.

Uma desvantagem do método é a aparição de feições triangulares em áreas do grid que contenham dados dispersos ou espaçados (Fig.33).

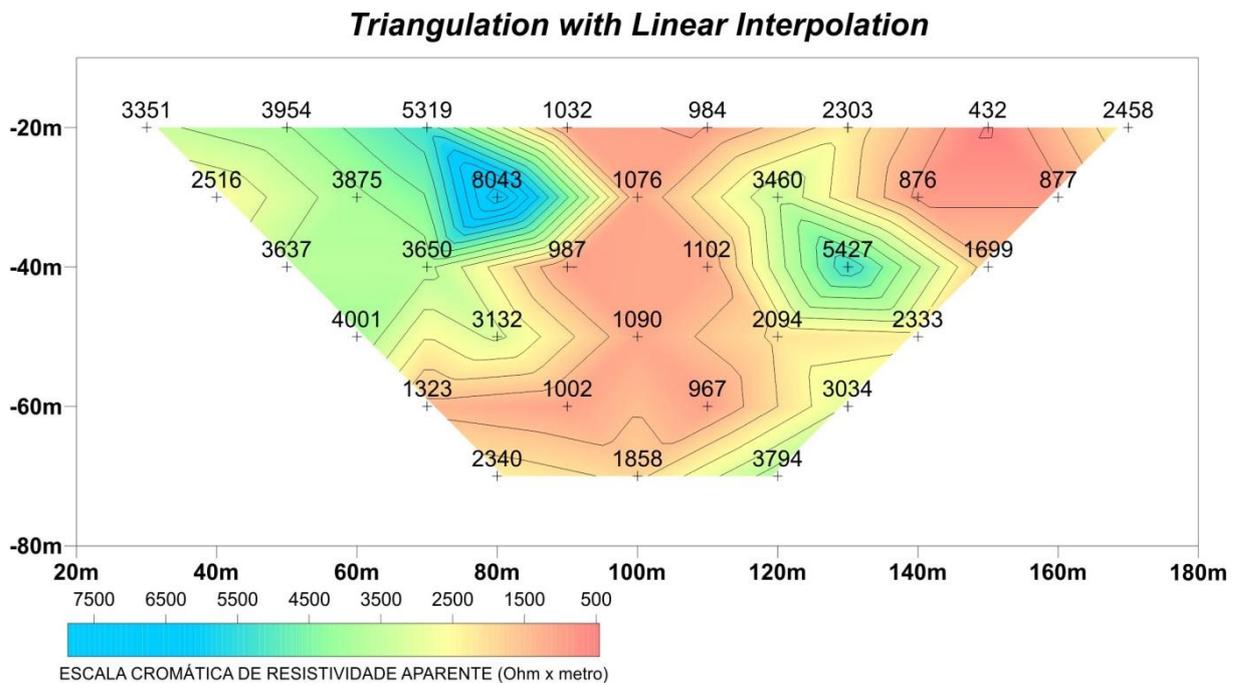


Fig. 33- Seção gerada utilizando *Triangulation with Linear Interpolation* como interpolador.

3.7.3.1.9 *Local Polynomial*

Esse método ajusta os valores do grid usando o método dos mínimos quadrados, sendo que os dados observados mais próximos dos nós do grid apresentam maior peso nos cálculos, e os mais distantes, menores pesos (SURFER, 2002), apresentado na Fig.34.

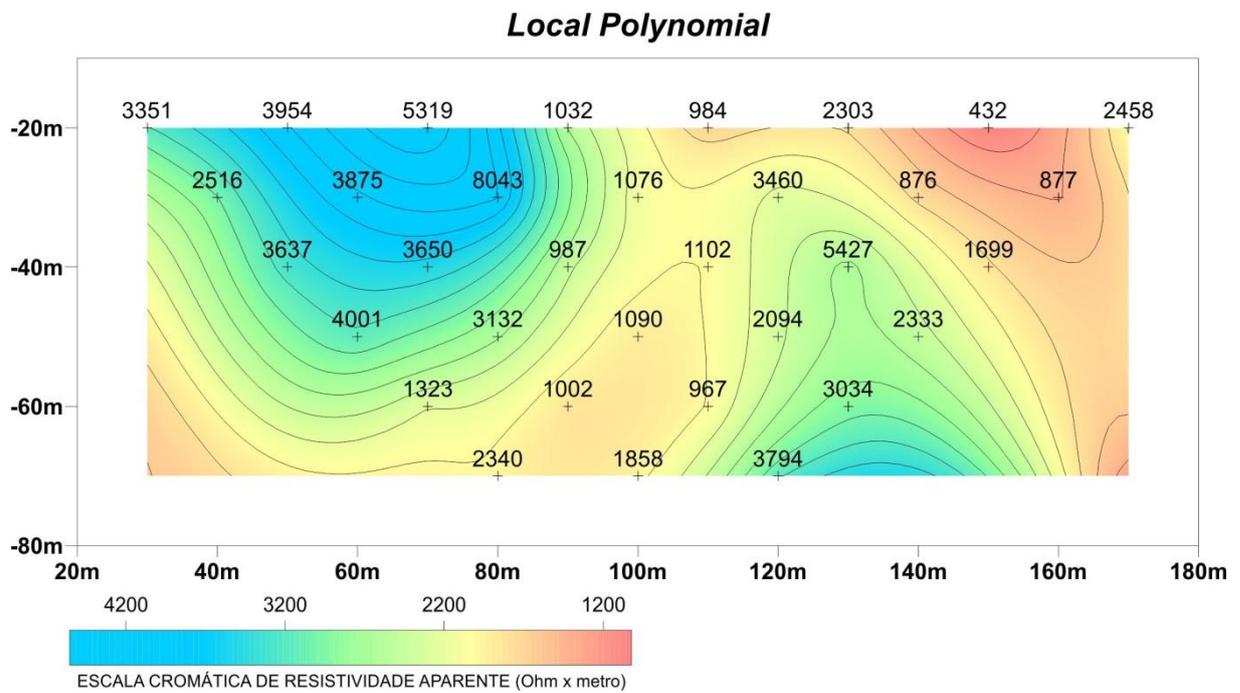


Fig. 34- Seção gerada utilizando *Local Polynomial* como interpolador.

3.7.3.1.1 *Moving Average*

Esse método atribui valores aos nós do grid através da média aritmética de todos os pontos vizinhos identificados (SURFER, 2002). É utilizado para grande conjuntos de dados, mostrando tendências em escalas intermediárias e mostrando grande variações no conjunto de dados (Fig.35)

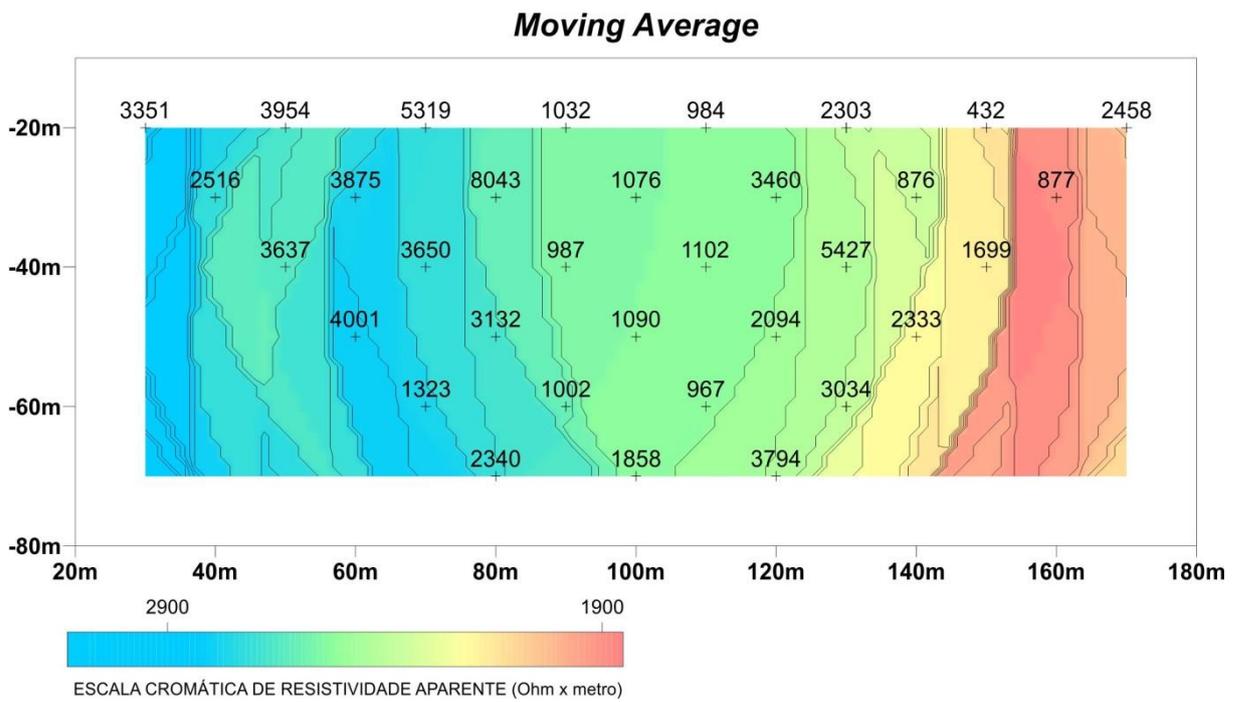


Fig. 35- Seção gerada utilizando *Moving Average* como interpolador.

3.7.4. VOXLER®

O VOXLER é um programa utilizado para a visualização científica, orientada principalmente para a renderização volumétrica e tridimensional de visualização de dados, concebido para apresentar dados XYZC, onde C é uma variável em cada local X, Y e Z (Fig. 36).

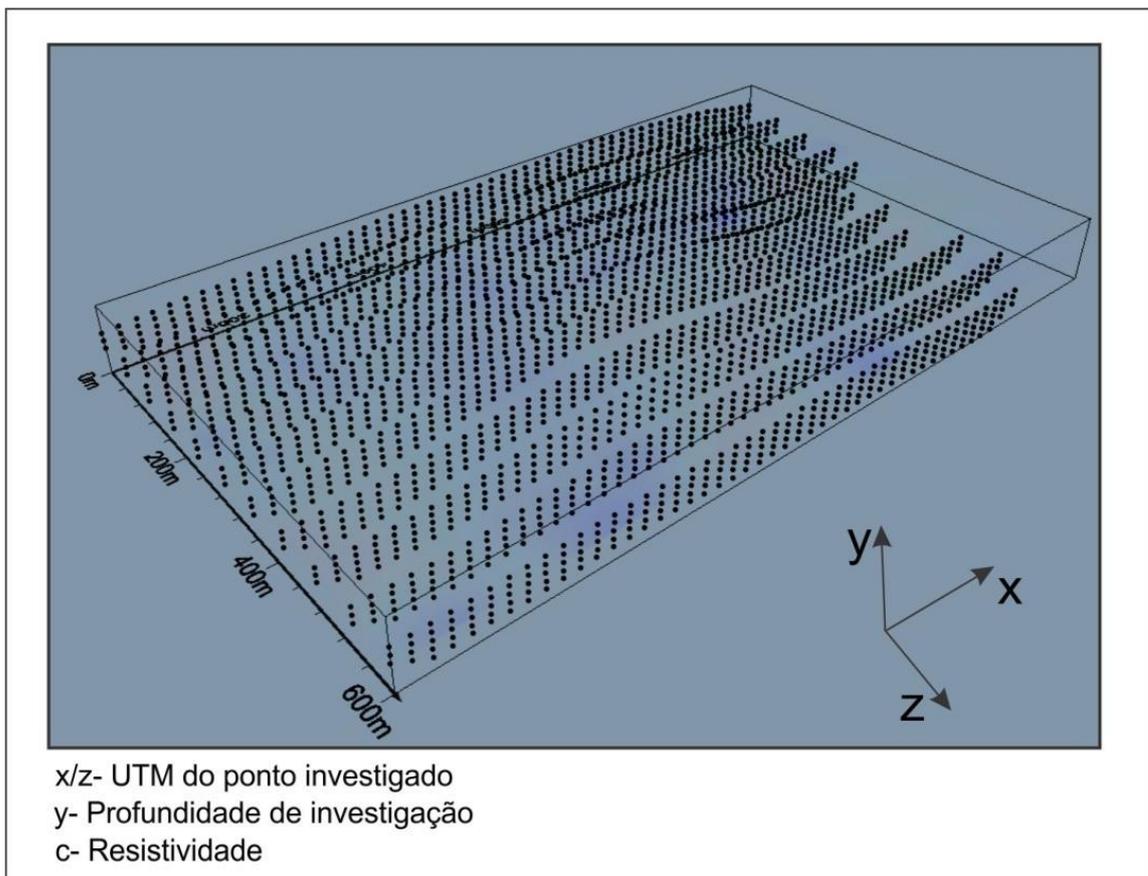


Fig. 36- Plotagem dos dados de resistividades para a interpolação 3D.

O VOXLER apresenta três tipos diferentes de interpoladores, *Inverse Distance to a Power*, *Local Polynomial* e *Data Metrics*. Todos esse métodos podem resultar em uma representação diferente de dados. A melhor forma de escolher um interpolador é testar cada método com um conjunto de dados conhecidos, para determinar qual deles oferece a interpretação mais satisfatória de dados.

Para a interpolação dos dados foi utilizado o método *Inverse Distance to a Power*. O funcionamento desse programa é muito similar ao SURFER, já que a empresa Golden Software Inc. é fabricante desses dois programas.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS

4.1. Sondagem Elétrica Vertical

No Anexo B, são apresentadas as interpretações quantitativas individuais das SEVs, a profundidade interpretada do topo da rocha é colocada em cada uma das figuras em que as SEVs são apresentadas individualmente. A localização em UTM de cada SEV está no anexo A.

O significado das letras e símbolos dos quadros é o seguinte:

linha preta = curva de campo.

linha vermelha = curva modelada pelo software de inversão.

ρ = resistividade;

h = espessura do estrato geoeletrico;

d = profundidade da base do estrato geoeletrico;

Alt = altitude da base do estrato geoeletrico (sempre negativa porque se refere à superfície do terreno).

Para a caracterização do perfil de alteração foi utilizado esse critério:

-Solo residual, constituído por minerais secundários (neoformados) e primários que resistiram à ação do intemperismo, de granulação fina, homogêneo, de estrutura porosa, podendo ser transportados.

-Saprolito, camada de solo constituída por minerais primários e secundários, com características herdadas da rocha original (estrutura reliquiar), presença de matacões, rocha alterada, onde os minerais exibem sinais evidentes de alteração, como perda de brilho e cor.

-Rocha sã, locais no maciço onde a rocha não sofreu intemperismo.

Observando as SEVs, nota-se alguns padrões sobre o perfil de alteração. As SEVs SEV1_14E, SEV1_23E, SEV2_21E, SEV5_7E, SEV5_19E, SEV6_18,5E, SEV6_24E, SEV8_19E, SEV9_21E, SEV10_16E, SEV10_22,5E e SEV11_27E, mostram o que seria o habitual em um perfil de alteração, com a camada de solo residual pequena, de resistividade baixa, devido à presença de matéria orgânica e íons dissolvidos pelo cultivo de cana-de-

açúcar, seguida de uma camada de saprolito, observada pelo aumento da resistividade, e por fim, o topo da rocha sã, com o aumento significativo da resistividade.

Em observações feitas em campo notam-se muitas vezes a rocha exposta alterada, e no caso das SEVs, SEV5_25E, SEV6_9,5E, SEV7_8E, SEV7_11E, SEV7_21E, SEV8_5E e SEV10_8,5E, não apresentam a camada de solo residual, iniciando o perfil geoeletrico com a camada de saprolito, com resistividades maiores, seguida pelo topo da rocha sã.

As SEVs, SEV2_16E, SEV3_9,5E, SEV3_19,5E, SEV3_23E, SEV4_8E, SEV4_18E, SEV4_22E, SEV8_26E, SEV9_10,5E e SEV11_6E, apresentam um estrato geoeletrico no topo do perfil com resistividade demasiadamente alta, indicando matações e blocos grandes soterrados em meio ao solo residual, e até mesmo preservados em saprolito.

A Fig. 37 mostra o mapa de contorno da profundidade do topo da rocha sã (topo rochoso), elaborado a partir dos dados quantitativos das SEVs. Também foram usados valores de estimativas pontuais extraídos do contorno interpretado do topo rochoso contido nas seções modeladas de resistividade das linhas 1 a 11, mostradas a seguir.

MAPA DA PROFUNDIDADE DO TOPO ROCHOSO

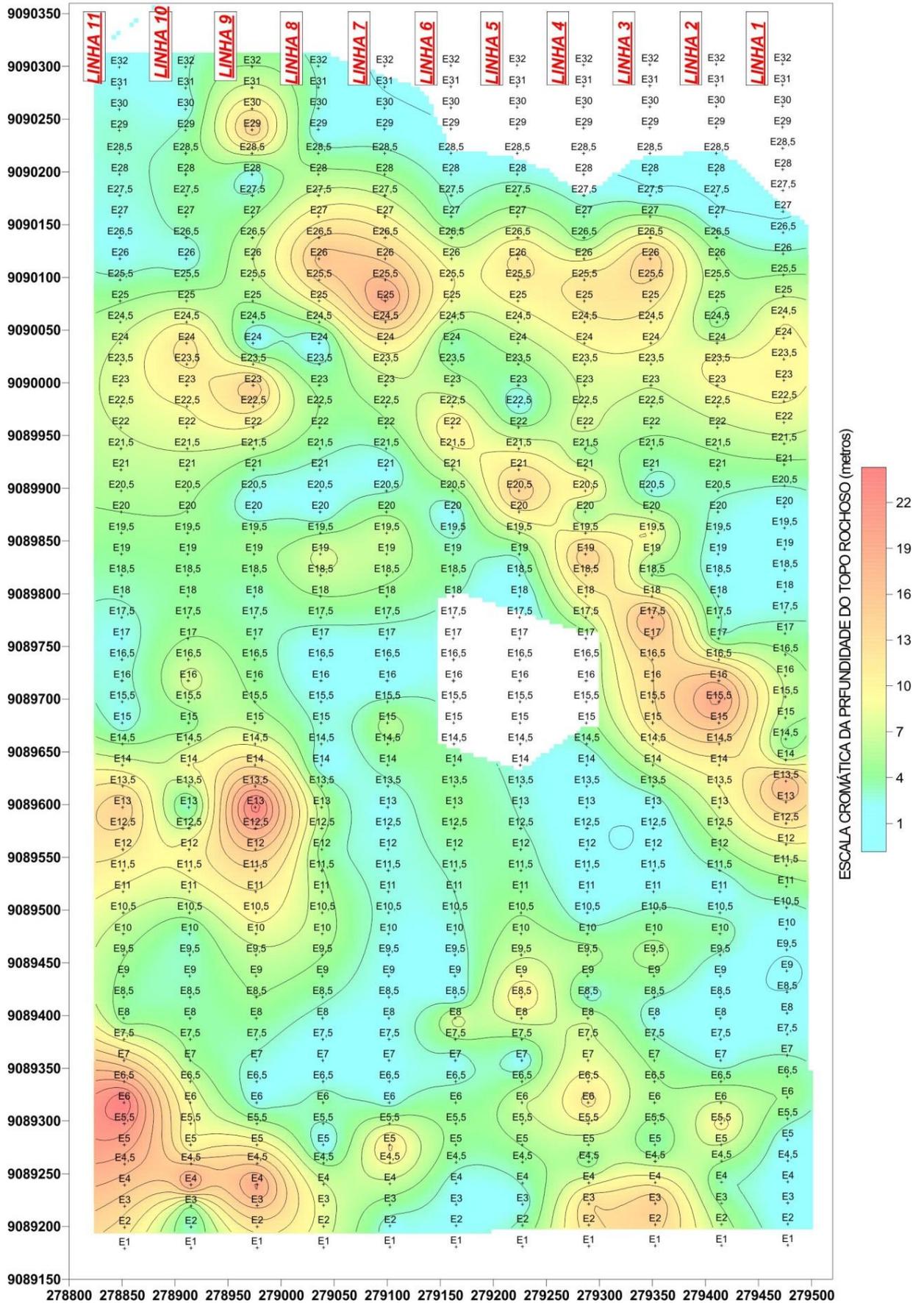


Fig. 37- Mapa de contorno da profundidade do topo da rocha sã (Polígono sem cores corresponde a trecho de acesso impossível, sem medidas).

4.2. Caminhamento Elétrico

Os dados de resistividade coletados em campo são apresentados em pseudo-seções, que mostram qualitativamente as anomalias geradas, ou seja, identificam localmente as anomalias, porém sem uma escala precisa de profundidade. A apresentação das pseudo-seções muitas vezes são de grande ajuda, pois em superfície, em termos de horizontalidade, é projetada a anomalia.

A característica básica que deve se levar em conta em uma pseudo-seção é o formato da anomalia gerada a partir das resistividades aparentes. Em um ambiente geológico onde se tem camadas plano-paralelas, a pseudo-seção tende a ser mais fiel à realidade do substrato. No entanto, na área estudada, de geologia não horizontalizada e com a presença de fraturas verticais ou subverticais, as feições costumam ser distorcidas, dificultando a interpretação dos resultados. A Fig.38 exibe uma porção da pseudo-seção de resistividade do caminhamento elétrico executado na Linha 2. A figura em questão mostra a posição do falhamento em superfície (barra vermelha) e dois flancos de anomalias formando um “V” invertido. O flanco esquerdo é consequência da passagem dos eletrodos de potencial sobre a falha, e o flanco direito é gerado pela passagem dos eletrodos de corrente. Assim sendo, a representação de uma falha vertical em uma pseudo-seção, normalmente, é representado por dois flancos.

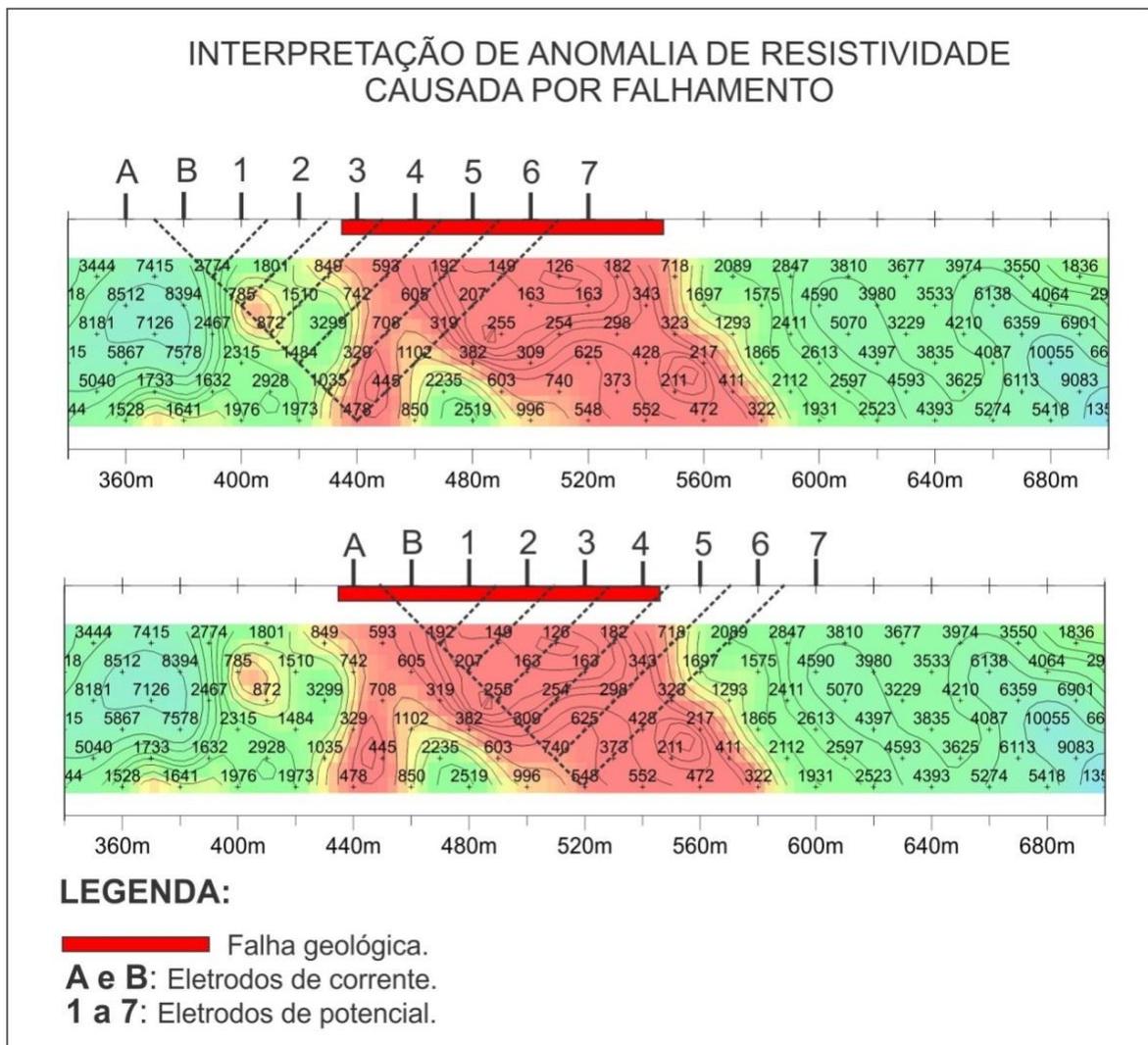


Fig. 38- Interpretação de anomalia de resistividade causada por falhamento.

Para fazer a interpretação quantitativa do modelo geoeletrico, é necessária a passagem das resistividades aparentes por um software que faça a inversão dos dados, e crie uma seção modelada de resistividade com valores em termos de horizontalidade e verticalidade, teoricamente, mais condizente com a realidade.

Para uma melhor visualização, as linhas de caminamento elétrico, pseudo-seções e seções modeladas, foram impressas em folhas A3 (anexo C), sendo possível a observação de maiores detalhes.

Observando as seções modeladas, as linhas tracejadas em azul representam as possíveis configurações do topo rochoso, estabelecidas a partir das interpretações das SEVs. Como pode-se notar, foram assinaladas nas mesmas hachuras vermelhas, que indicam as projeções de anomalias de resistividade na subsuperfície, interpretadas como zonas de

falhas/fraturamentos. Por outro lado, também podem refletir aprofundamentos locais no topo da rocha subjacente, principalmente quando não estão claramente alinhadas.

Nas mesmas figuras foram indicadas por meio de barras azuis cheias, os locais onde interpretou-se que a rocha não apresenta fraturas e que está com pouca cobertura de solo ou rocha aflorantes. As barras hachuradas azuis indicam os locais em que a rocha não apresenta fraturas, mas com uma cobertura de solo mais espessa.

Algumas linhas não puderam ser totalmente recobertas pelo levantamento geoeletrico, em alguns trechos intermediários, em virtude da topografia extremamente acidentada. Esses perfis foram 4, 5, 6, 8 e 11 e nas suas respectivas figuras os intervalos não amostrados estão em branco.

Para as figuras dos mapas de contorno de resistividade e profundidade de topo rochoso não há nelas intervalos sem dados para as linhas 8 e 11, pois devido à proximidade das linhas adjacentes completas, permitiu uma interpolação de dados razoáveis.

A Fig. 39exibe as curvas de isovalores da resistividade modelada (média dos níveis 1, 2 e 3 do arranjo dipolo-dipolo), as anomalias de resistividade e as zonas favoráveis à extração de blocos graníticos de grande porte.

Também no Anexo C, está uma simulação 3D de resistividade da área de estudo, juntamente com uma simulação 3D do volume aproximado da rocha sem fraturas. O volume foi calculado através de um modelo de blocos gerado pelo VOXLER. Este modelo foi feito com valores de resistividade superiores a 5.300 Ohms.m, apresentando um volume de aproximadamente 6,8 milhões de toneladas de metros cúbicos. Esse dado não representa fielmente o valor da reserva medida, porém auxilia nas próximas etapas de pesquisas contribuindo com um nível maior de conhecimento sobre o recurso mineral.

MAPA DE RESISTIVIDADE MODELADA - MÉDIA DOS NÍVEIS 1, 2 e 3 DO DIPOLO-DIPOLO

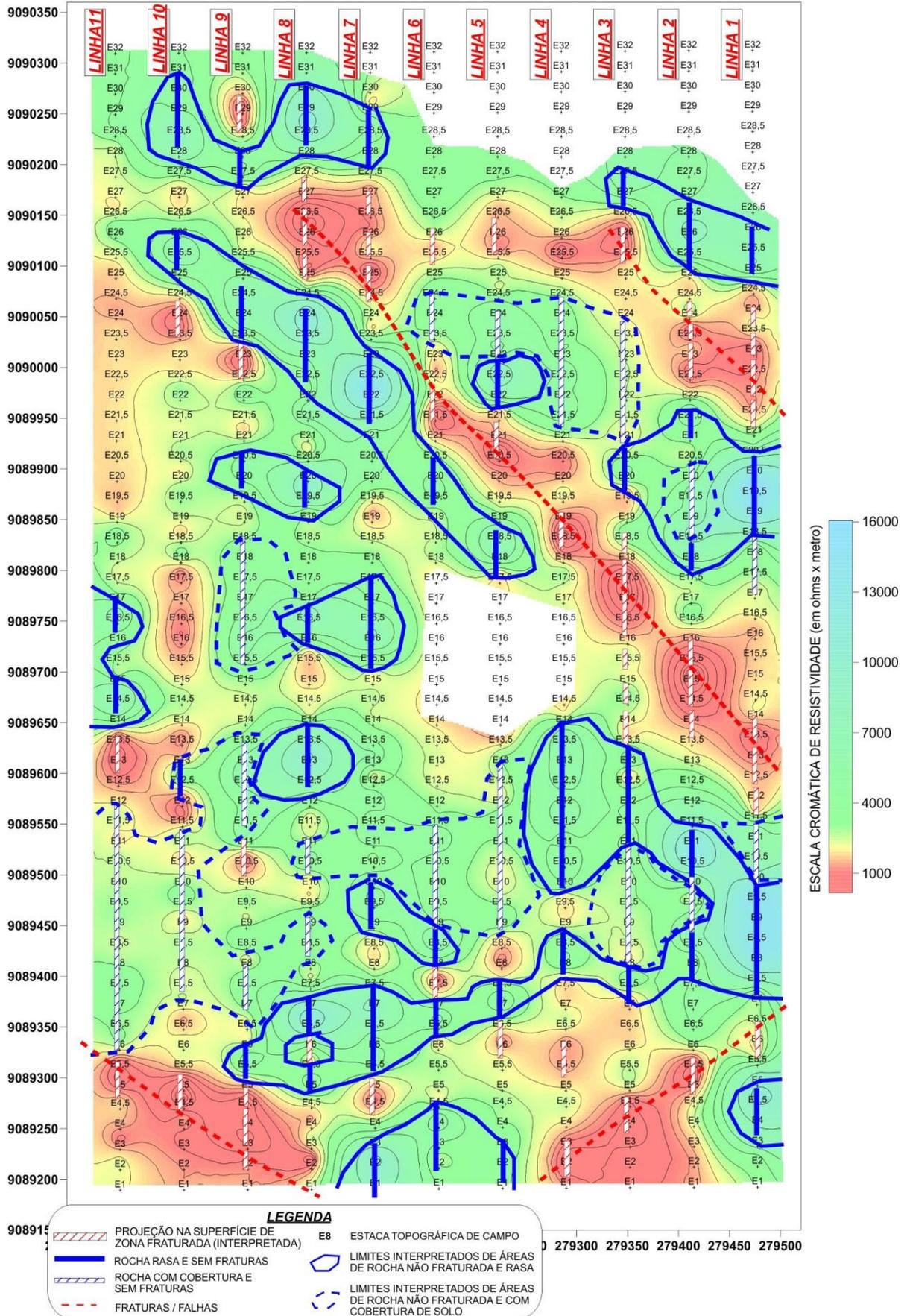


Fig. 39- Curvas de isovalores da resistividade modelada, (média dos níveis 1, 2 e 3 do arranjo dipolo-dipolo).

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Conforme avaliação das seções modeladas de resistividade, mapas de contorno e SEVs, os locais interpretados como rocha não fraturada e as espessuras menores da cobertura de solo e saprolito configuram-se como sendo os mais indicados à extração de blocos de grandes dimensões. As áreas em que interpretou-se que a rocha não está fraturada, mas apresenta uma maior cobertura, deverão ter uma priorização secundária. Estas áreas – principais e secundárias – são indicadas na figura 39 de forma georreferenciada.

Nota-se uma grande estrutura geológica, muito bem definida, NW-SE na área, interpretada como uma grande falha, também observada pela quebra de relevo. Outras duas estruturas menores foram identificadas ao sul da área, com direções NW-SE e NE-SW, mas como o levantamento geofísico não as interceptam em sua plenitude, não há como classificá-las com maiores detalhes.

Com a interpretação da simulação 3D de resistividade, juntamente com o modelo de blocos, pode-se ter uma ideia inicial do volume da reserva mineral, sendo um bom indicador para as novas fases de pesquisas.

Para a escolha de uma área favorável à extração, deve-se levar em conta a sua acessibilidade, como estradas, além de apresentar todas as características investigadas nesse trabalho. O grau de detalhamento empregado nesta pesquisa não detecta fraturas muito pequenas (centimétricas, p. ex.). Desta forma, uma vez selecionadas as áreas dentre as indicadas, é recomendável um detalhamento mais minucioso para estas identificações, priorizando trabalhos de grande detalhe de resistividade e, secundariamente, GPR (Ground Penetrating Radar).

De acordo com os objetivos propostos nesta pesquisa, considera-se que os ensaios geofísicos realizados na área estudada atingiram plenamente os mesmos, quais sejam os de identificar os locais em que a rocha não apresente fraturas bem como estimar as profundidades do topo do maciço rochoso.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABEM, 2006. Terrameter SAS 4000/SAS 1000 Instruction Manual, 136 p.
- ABIROCHAS, 2014(a). Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2013. Informe 01/2014, 24 p.
- ABIROCHAS, 2014(b). Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais no 1º Semestre de 2014. Informe 09/2014, 9 p.
- ABIROCHAS, 2013. Balanço das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2012. Informe 01/2013, 17 p.
- ABIROCHAS, 2012. Balanço Sucinto das Exportações e Importações Brasileiras de Rochas Ornamentais e de Revestimento em 2011. Informe 01/2012, 19 p.
- Alfano, L., 1980. Dipole-dipole deep geoelectric soundings over geological structures. *Geophysical Prospecting*, **28(2)**:283-296.
- Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B., Fuck, R.A., 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. NE, 8, Campina Grande, *Atas*; 363-391.
- Apparao, A., Sastry, R.S., Sarma, V.S., 1997. Depth of detection of buried resistive targets with some electrode arrays in electrical prospecting. *Geophysical Prospecting*, **45**:365-375.
- Barker, R.D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, **54(8)**:1031-1037.
- Bhattacharya, B.B. & Sen, M.K., 1981. Depth of investigation of collinear arrays over homogeneous anisotropic half-space in direct current methods. *Geophysics*, **46(5)**:768-780.
- Braga, A.C.O., 1997. *Métodos geoeletricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formação Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro-SP*. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 169 p.
- Brito-Neves, B.B., 1975. *Regionalização geotectônica do Precambriano nordestino*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 198 p.
- Brito-Neves, B.B., Van-Schmus, W.R., Fetter, A.H., 2001. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema). Ensaio comparativo e problemas de correlações. *Geologia USP Série Científica*, São Paulo, **1**:59-78.
- Costa, A.F. & Malagutti-Filho, W., 2008. Caracterização estrutural e geofísica da lixeira de Porto Velho (RO). *Geociências*, **27(2)**:229-236
- Cressie, N. A. C., 1993. *Statistic for Spacial Data*. New York: J. Wiley, 900 p.

- Cutrim, A.O. & Shiraiwa, S., 2011. Prospecção de água subterrânea no sudoeste do município de Rondonópolis (MT) usando sondagem elétrica vertical. *Revista Brasileira de Geofísica*, **29(4)**:745-751.
- deGroot-Hedlin, C., Constable, S., 1990. Occam's inversion to generate smooth, two dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, **55**:1613-1624.
- Demant, D., Pirard, E., Renardy, F., Jongmans, D., 2001. Application and processing of geophysical images for mapping faults. *Computers & Geosciences*, **0**:1-7.
- Edwards, L.S.A., 1977. A modified pseudosection for resistivity and induced-polarization. *Geophysics*, **42(5)**:1020-1036.
- Evjen, H.M., 1938. Depth factors and resolving power of electrical measurements. *Geophysics*, **3(2)**:78-95.
- Fox, R.C., Hohmann, G.W., Killpack, T.J., Rijo, L., 1980. Topographic effects in resistivity and induced polarization surveys. *Geophysics*, **45**:75-93.
- Franke, R., 1982. Scattered data interpolation: Tests of some methods. *Mathematics of Computation*, **38**:381-400.
- Gallas, J.D.F., 2000. *Principais Métodos Geoelétricos e suas Aplicações em Prospecção Mineral, Hidrogeologia, Geologia de Engenharia e Geologia Ambiental*. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 174 p.
- Gallas, J.D.F., 2003. Prospecção de água subterrânea em aquíferos cristalinos com o emprego de métodos indiretos. *Revista do Instituto Geológico*, São Paulo, **24(1/2)**:43-51.
- Gandolfo, O.C.B., 2007. *Um Estudo do Imageamento Geoelétrico na Investigação Rasa*. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 206 p.
- Galli, P., Bosi, V., Piscitelli, S., Giocoli, A., Scionti, V., 2006. Late Holocene earthquakes in Southern Apennines: Paleoseismology of the Caggiano fault. *International Journal Earth Science*, **95(5)**:855-870.
- Gomes, H.A., 2001. *Geologia e recursos minerais do Estado de Pernambuco. Mapa Geológico do Estado de Pernambuco, escala 1:500.000*. CPRM/DIEDIG/DEPAT, 198 p.
- Griffiths, D.H. & Barker, R.D., 1993. Two-dimensional resistivity imaging and modeling in areas of complex geology. *Journal of Applied Geophysics*, **29**:211-226.
- Hallof, P.G., 1957. On the interpretation of resistivity and induced polarization measurements. Ph.D. Thesis, MIT, Cambridge.
- Jardim de Sá, E.F., 1994. *A Faixa Seridó (Província Borborema, NE do Brasil) e o seu significado geodinâmico na cadeia Brasileira/Pan-Africana*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de Brasília, Brasília, 800 p.
- Keller, G.V., 1966. Dipole method for deep resistivity studies. *Geophysics*, **31**:1088-1104.

- Landim, P. M. B., 2000. *Introdução aos métodos de estimação espacial para a confecção de mapas*. DGA, IGCE, UNESP/Rio Claro, Lab. Geomatemático, Texto Didático 02, 20 p.
- La-Nava, M., Escudero, J.A. R., Suarez, I.R., Romero, E.G., Rosa, A.C., Moles, F.C., Martinez, M.P.G., 1989. Metodología de investigación de rocas ornamentales: Granitos. *Boletín Geológico y Minero*, **100(3)**:433-453.
- Lima-Filho, M.F., 1998. *Análise estratigráfica e estrutural da Bacia de Pernambuco*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 139p.
- Lima-Filho, M.F., Barbosa, J.A., Neumann, V.H., Sousa, E.M., 2005. Evolução estrutural comparativa da Bacia de Pernambuco e da Paraíba: Implicações. *Simpósio Nacional de Estudos Tectônicos*, Curitiba, 45-47.
- Loke, M.H., 2002. Tutorial: 2D and 3D electrical imaging surveys. 127 p.
- Loke, M.H. & Barker, R.D., 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, **44**:131-152.
- Loke, M.H. & Dahlin, T.A., 2002. A comparison of the Gauss-Newton and quasi-Newton methods in resistivity imaging inversion. *Journal of Applied Geophysics*, **49(3)**:149-162.
- Madrucci, V., 2004. *Prospecção de água subterrânea em terreno cristalino utilizando-se análise integrada de dados de sensoriamento remoto, geofísicos e técnicas de geoprocessamento, região de Lindóia, SP*. Tese de Doutorado do Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo, São Paulo, 226 p.
- Martins, C.C., 2014. *Utilização de métodos geoelétricos para auxílio do planejamento de lavra em pedreira de gnaiss*. Tese de Mestrado do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 86p.
- Medeiros, V.C., Angelim, L.A.A., Santos, E.J., 1996. Caracterização dos segmentos leste e oeste do Terreno Pernambuco-Alagoas. In: SBG/Núcleo Minas Gerais, Cong. Bras. Geol., 40, Belo Horizonte, *Anais*, 17-17.
- Nguyen, F., Garambois, S., Chardon, D., Jongmans, D., Bellier, O., Hermitte, D., 2003. Slow active fault detection and imaging using multiple geophysical methods: the Trevarresse thrust (Provence, France). *Geophysical Research Abstracts*, **5**:1115-1127.
- Orellana, E., 1972. *Prospección geoelectrica em corriente continua*. Madrid: Paraninfo, 523 p.
- Parasnis, D.S., 1997. *Principles of applied geophysics*. 5ed London: Chapman and Hall, 429p.
- Park, S.K. & Wernicke, B., 2003. Electrical conductivity images of Quaternary faults and Tertiary detachments in the California Basin and Range. *Tectonics*, **22(4)**:1030-1052.
- Porsani, J.L., Hiodo, F.Y., Elis, V.R., 2003. Investigações geofísicas em rochas graníticas no município de Itu, São Paulo-Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **20(1)**:73-78.
- Reynolds, J.M., 1997. *An Introduction to Applied and Environmental Geophysics*. New York: John Wiley & Sons, 796 p.

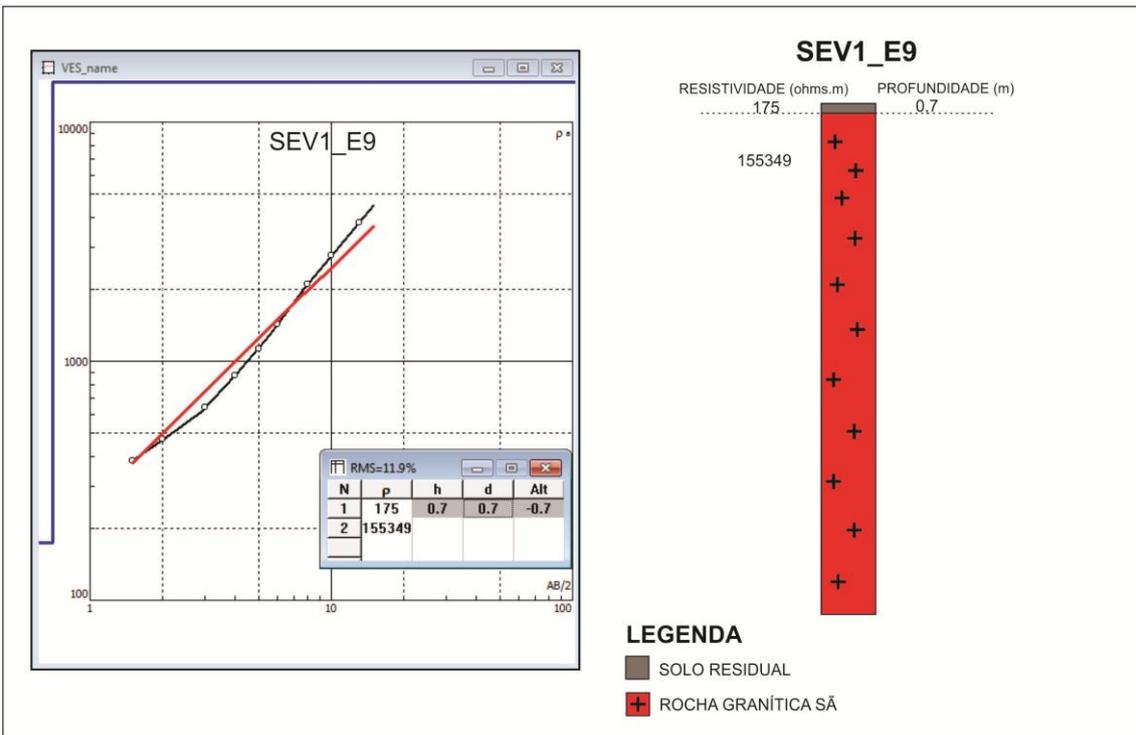
- Rocha, D.E.G.A., 1990. *Programa de Levantamento Geológico Básico do Brasil: carta geológica, carta metalogenética/previsional. Escala 1:100.000 (Folha SC.25-V-A-II – Vitória)*. Brasília, DNPM/CPRM. 112 p.
- Roy, A. & Apparao A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, **36(5)**:329-340.
- Roy, A., 1972. Depth of investigation in Wenner, three-electrode and dipole-dipole dc resistivity methods. *Geophysical Prospecting*, **20**:329-340.
- Santos, E.J., 1999. *Programa de Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil: carta geológica. Escala 1:250.000 (Folha SC.24-X-A – Belém do São Francisco)*. Brasília, CPRM, CD-Rom.
- Sasaki, Y., 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, **40**:453-464.
- Silva-Filho, A.F., Guimarães, I.P., Van-Schmus, W.R., 2002. Crustal evolution of the Pernambuco-Alagoas Complex, Borborema Province, NE Brazil: Nd isotopic data from neoproterozoic granitoids. *Gondwana Research*, **5(2)**:409-422.
- Souza-Júnior, A.O. & Porsani, J.L., 2002. Localização de fraturas em rochas graníticas, no município de Capão Bonito-SP, Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, **20(2)**:123-128.
- Spiegel, R.J., Sturdivant, V.R., Owen, T.E., 1980. Modeling resistivity anomalies from localized voids under irregular terrain. *Geophysics*, **45**:1164-1183.
- Stellin-Junior, A. & Vidal, F.W.H., 1996. *Estudo da arte de extração de rochas ornamentais*. São Paulo, CNPq/MT/CETEM.
- Storz, H., Storz, W., Jacobs, F., 2000. Electrical resistivity tomography to investigate geological structures of the earth's upper crust. *Geophysical Prospecting*, **48**:455-471.
- SURFER., 2002. *User's Guide, Contouring and 3D Surface Mapping for Scientists and Engineers*. 562 p.
- Suzuki, K., Toda, S., Kusunoki, K., Fujimitsu, Y., Mogi, T., Jomori, A., 2000. Case studies of electrical and electromagnetic methods applied to mapping active faults beneath the thick quaternary. *Engineering Geology*, **56**:29-45.
- Telford, W.M., Geldart, L.P., Sheriff, R.E., 1990. *Applied Geophysics*. 2ed. Cambridge. Cambridge University Press, 770 p.
- Ward, S.H., 1990. Resistivity and induced polarization methods. *Geotechnical and Environmental Geophysics*, **1**:147-189.
- Wise, D.J., Cassidy, J., Locke, C.A., 2003. Geophysical imaging of Quaternary Wairoa North Fault, New Zealand: a case study. *Journal of Applied Geophysics*, **53**:1-16.
- Zhdanov, M.S. & Keller, G.V., 1994. *The geoelectrical methods in geophysical exploration*. Elsevier Science Publishing Co., Amsterdam, 873 p.

ANEXO A

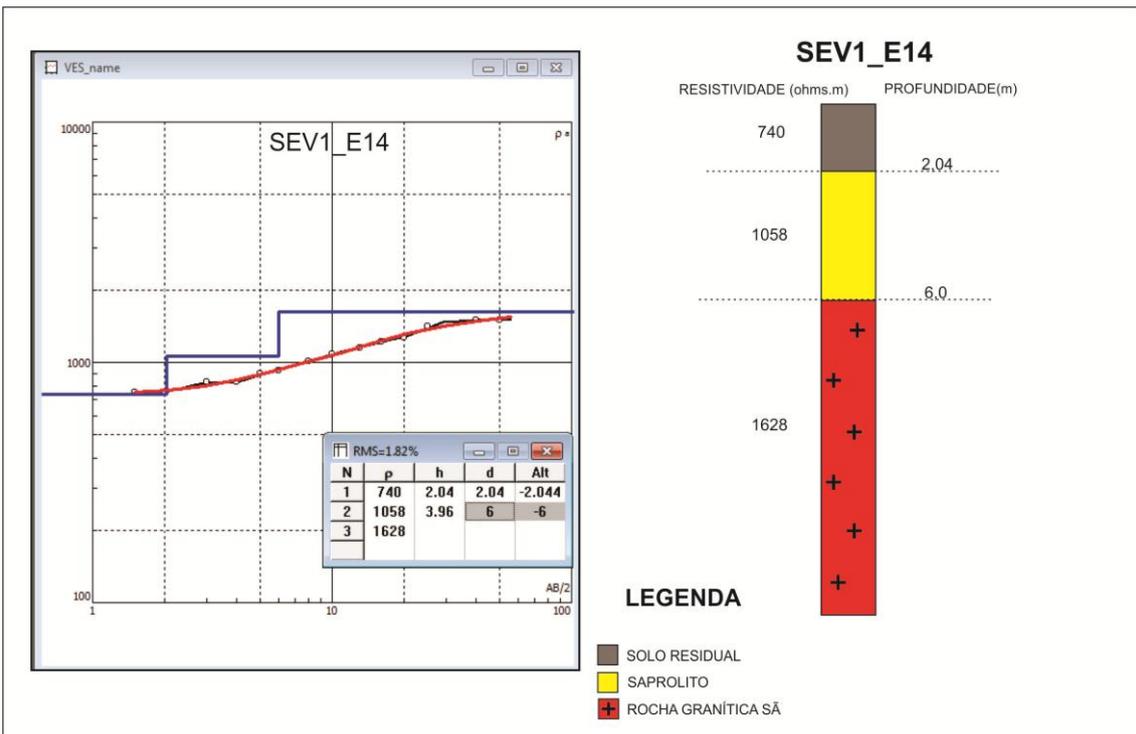
SEV	Prof. Rocha (m)	E	N
SEV 11 E6	25,0	278851.95	9089327.42
SEV 11 E27	6,5	278847.77	9090167.59
SEV 10 E8,5	3,5	278914.05	9089427.44
SEV 10 E16	8,0	278912.46	9089727.5
SEV 10 E25	8,0	278910.67	9090087.57
SEV 9 E10,5	5,0	278976.15	9089507.45
SEV 9 E21	3,5	278973.96	9089927.54
SEV 9 E24,5	3,5	278973.36	9090067.56
SEV 8 E5	1,2	279039.65	9089287.41
SEV 8 E19	8,0	279036.86	9089847.52
SEV 8 E26	14,0	279035.47	9090127.58
SEV 7 E8	2,0	279101.55	9089407.44
SEV 7 E11	2,5	279100.95	9089527.46
SEV 7 E21	1,5	279098.96	9089927.54
SEV 6 E9,5	2,0	279163.85	9089467.44
SEV 6 E18,5	4,0	279162.06	9089827.51
SEV 6 E245	3,0	279160.87	9090047.56
SEV 5 E7	1,5	279226.75	9089367.43
SEV 5 E19	3,0	279224.36	9089867.52
SEV 5 E25	9,5	279223.17	9090087.57
SEV 4 E8	7,0	279289.05	9089407.44
SEV 4 E18	10,0	279287.06	9089807.51
SEV 4 E22	8,0	279286.26	9089967.55
SEV 3 E9,5	6,0	279351.35	9089467.44
SEV 3 E19,5	9,5	279349.36	9089867.52
SEV 3 E23	10,0	279348.57	9090007.55
SEV 2 E7	2,0	279414.25	9089367.43
SEV 2 E16	17,0	279412.46	9089727.5
SEV 2 E21	4,0	279411.46	9089927.54
SEV 1 E9	0,7	279476.55	9089452.22
SEV 1 E14	6,0	279475.55	9089652.26
SEV 1 E23	10,0	279473.76	9090012.33

Localização em UTM de cada SEV realizada e a profundidade da rocha sã.

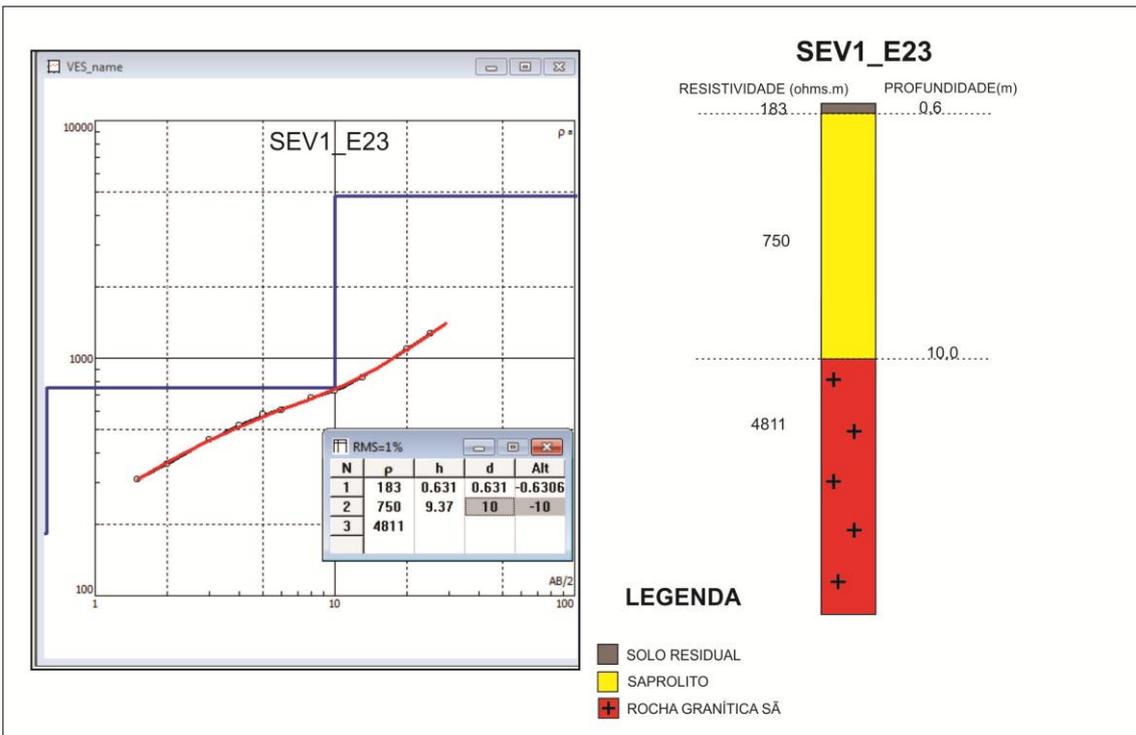
ANEXO B



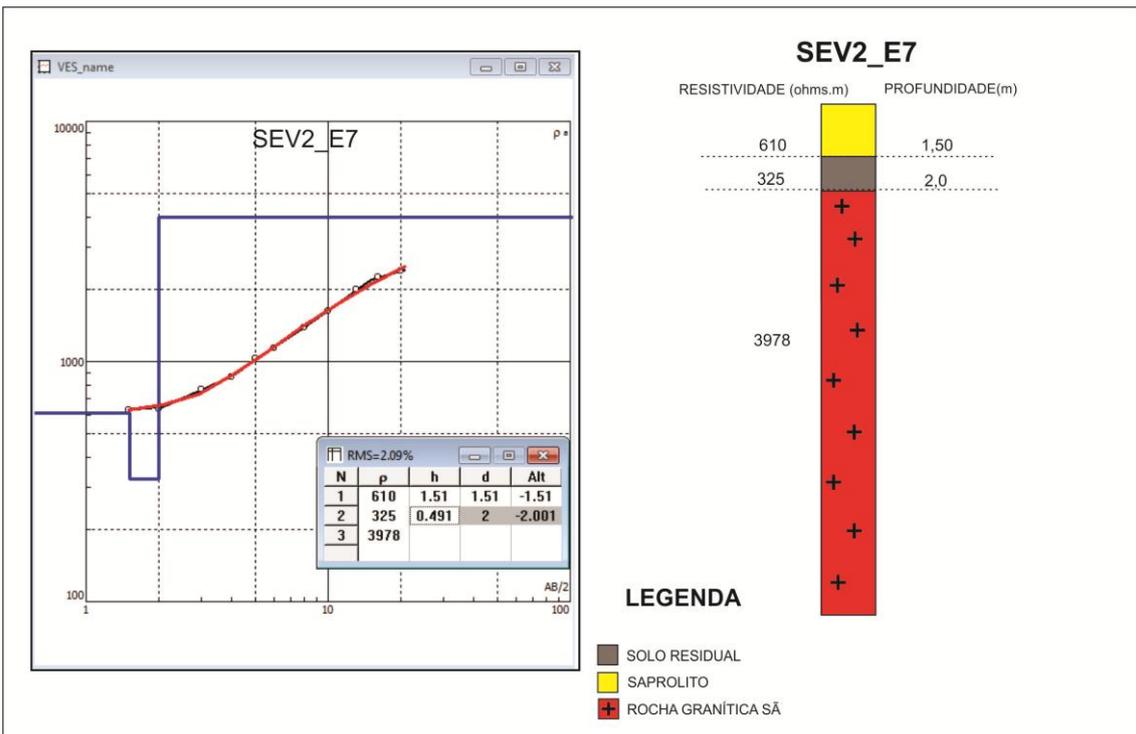
SEV1_E9 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



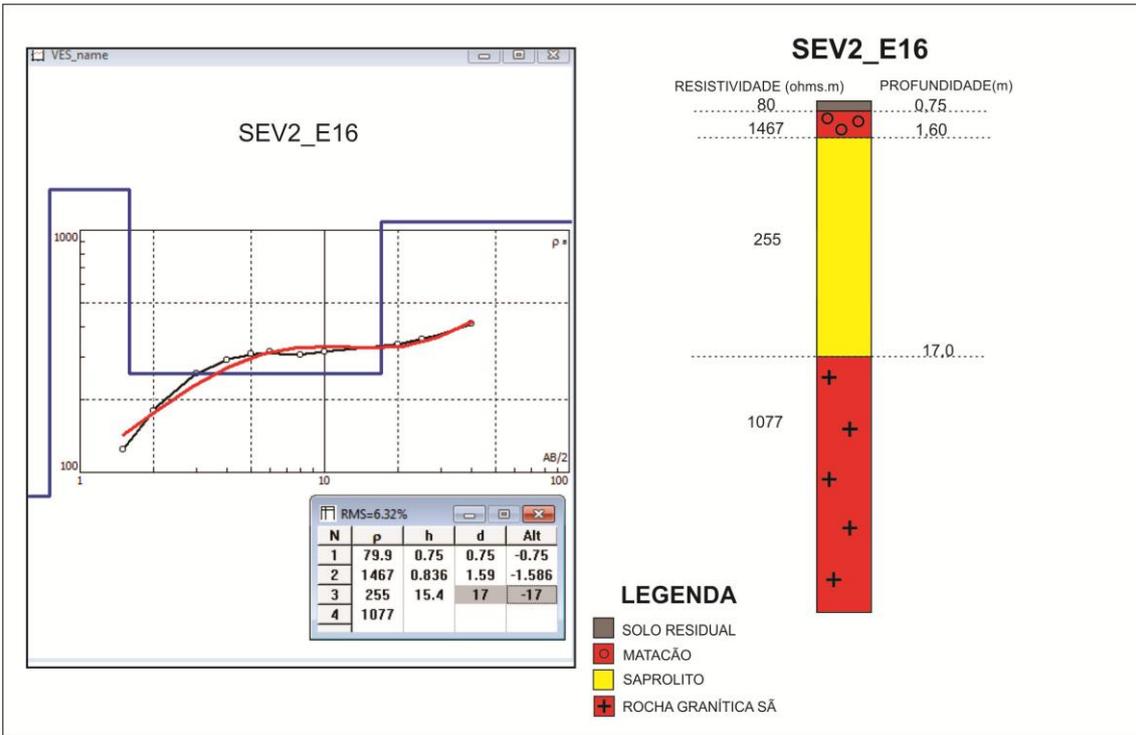
SEV1_E14 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



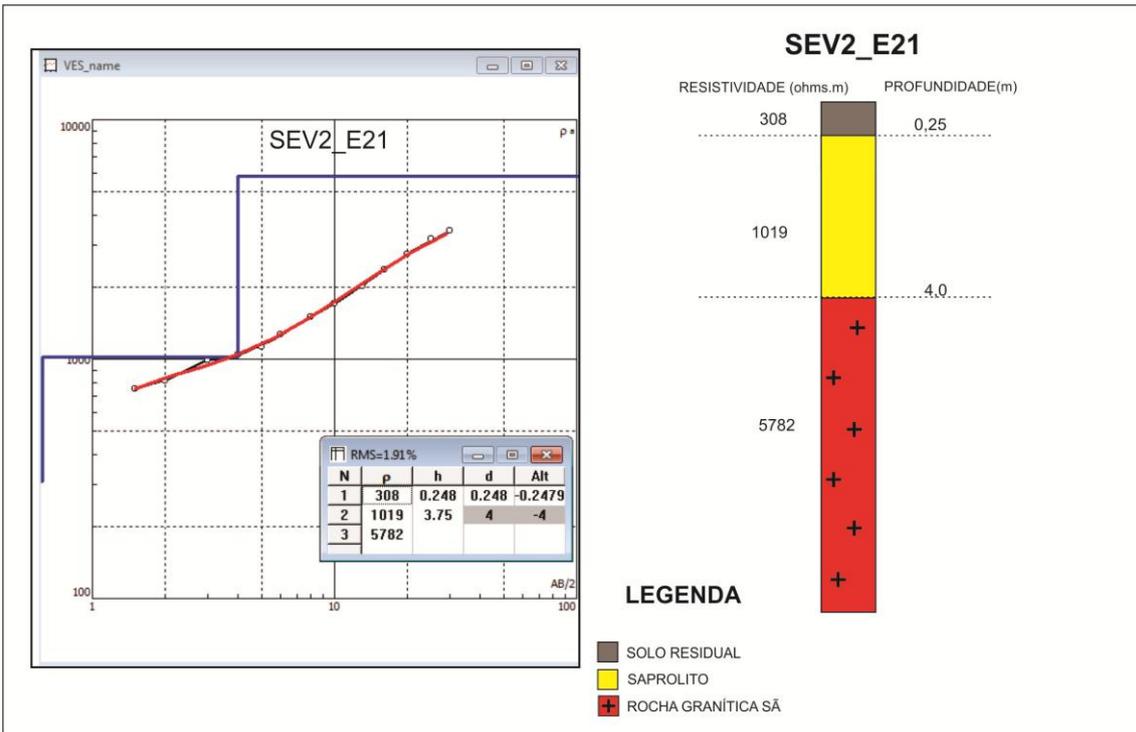
SEV1_E23 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



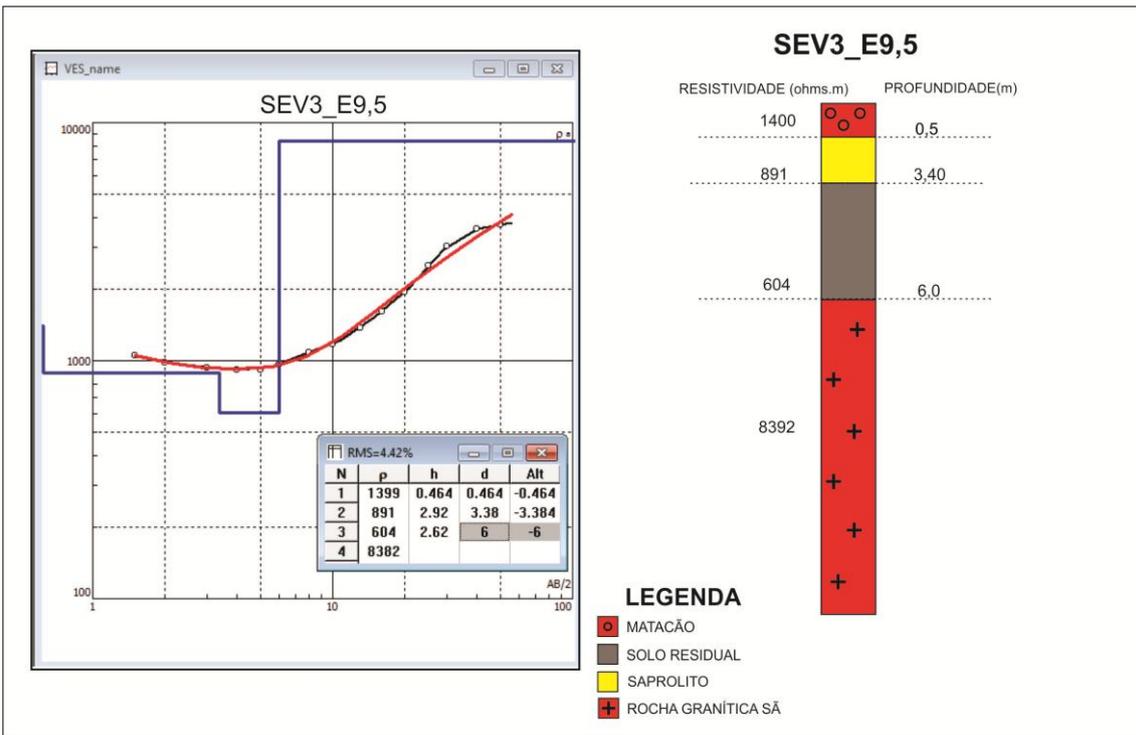
SEV2_E7 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



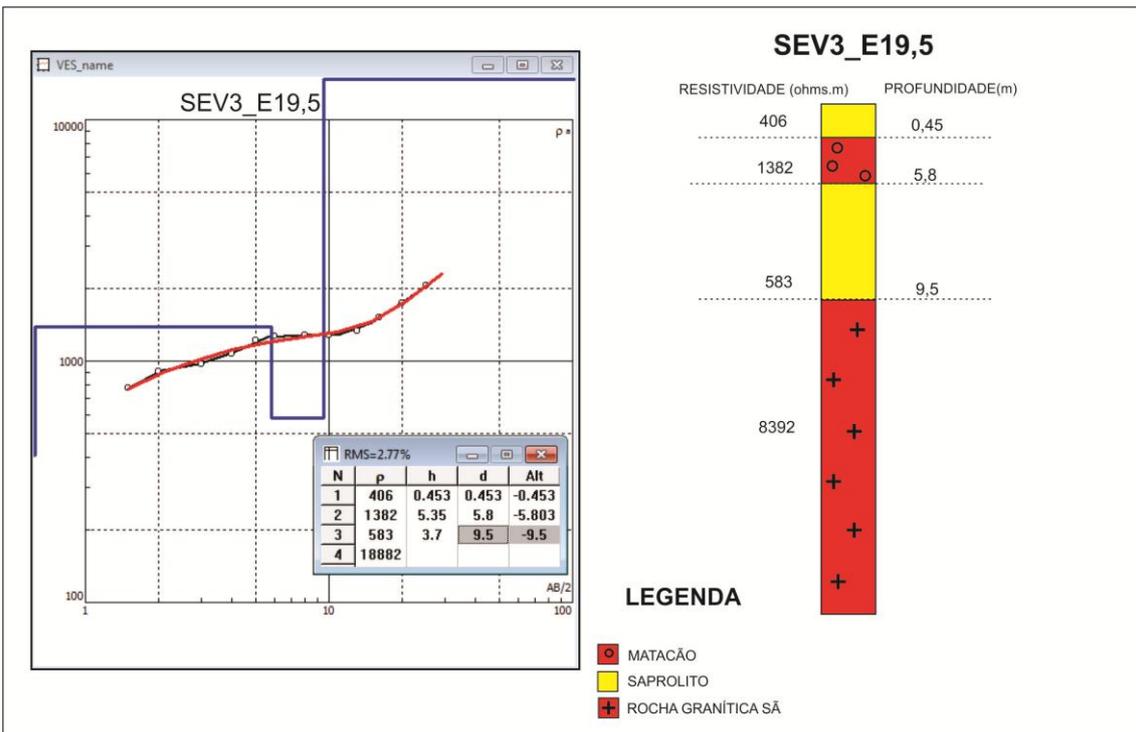
SEV2_E16 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



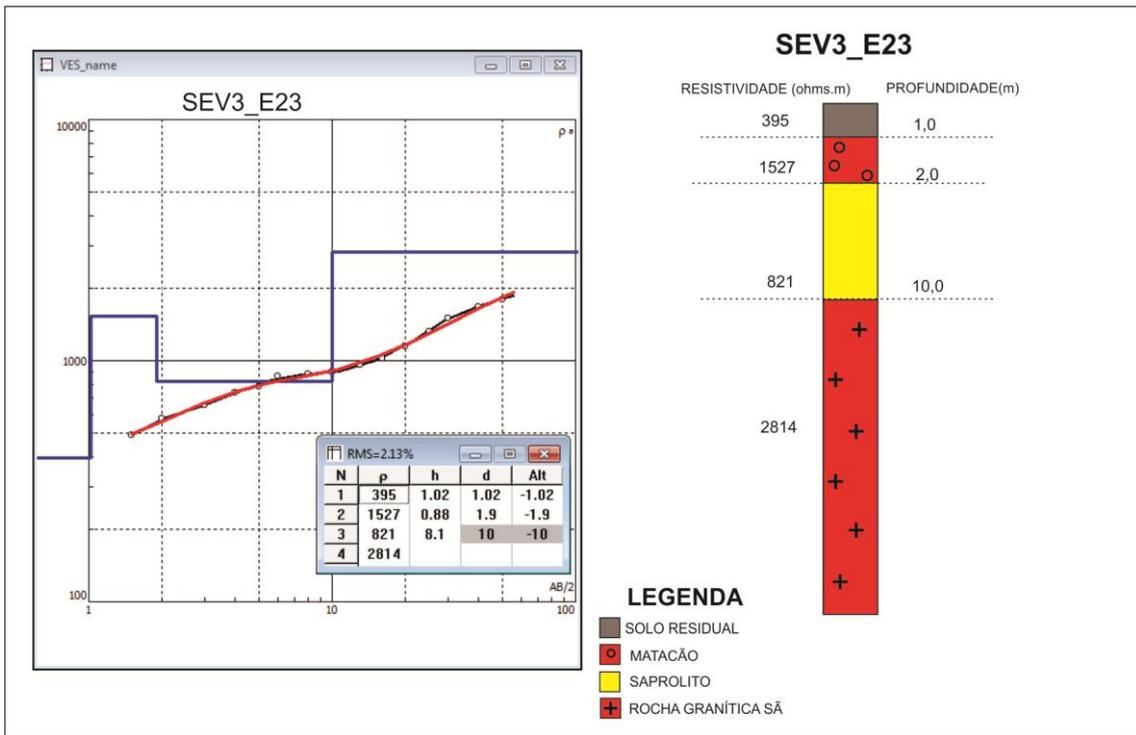
SEV2_E21 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



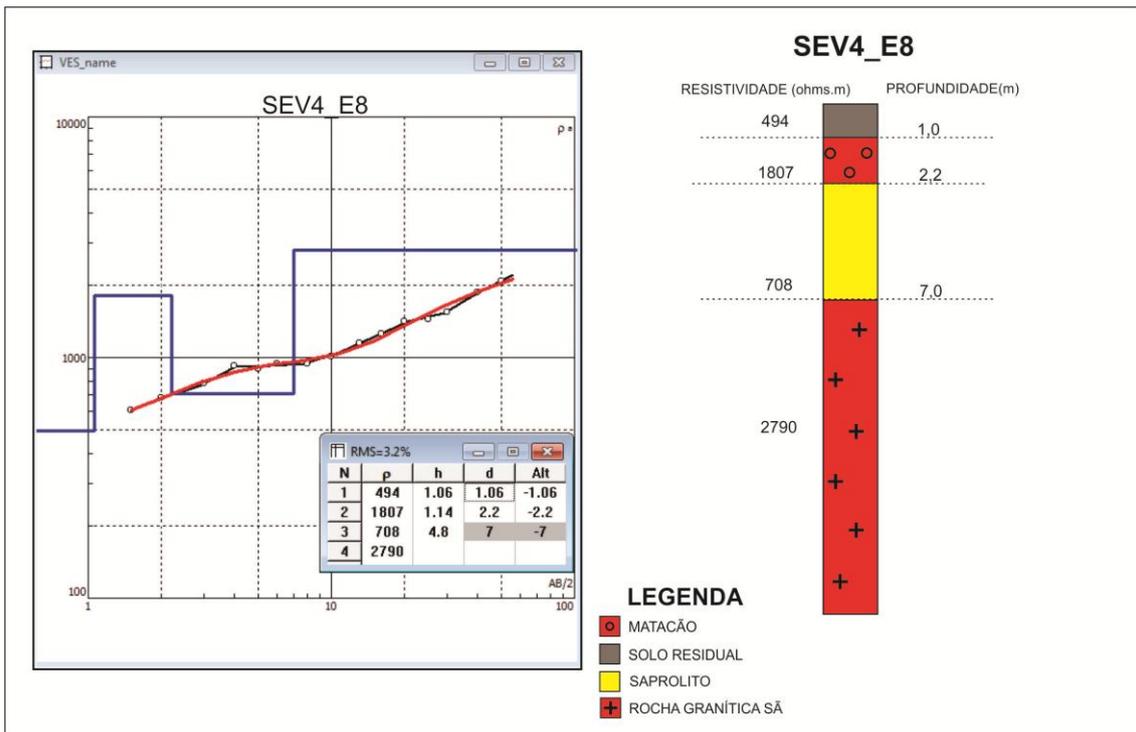
SEV3_E9,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



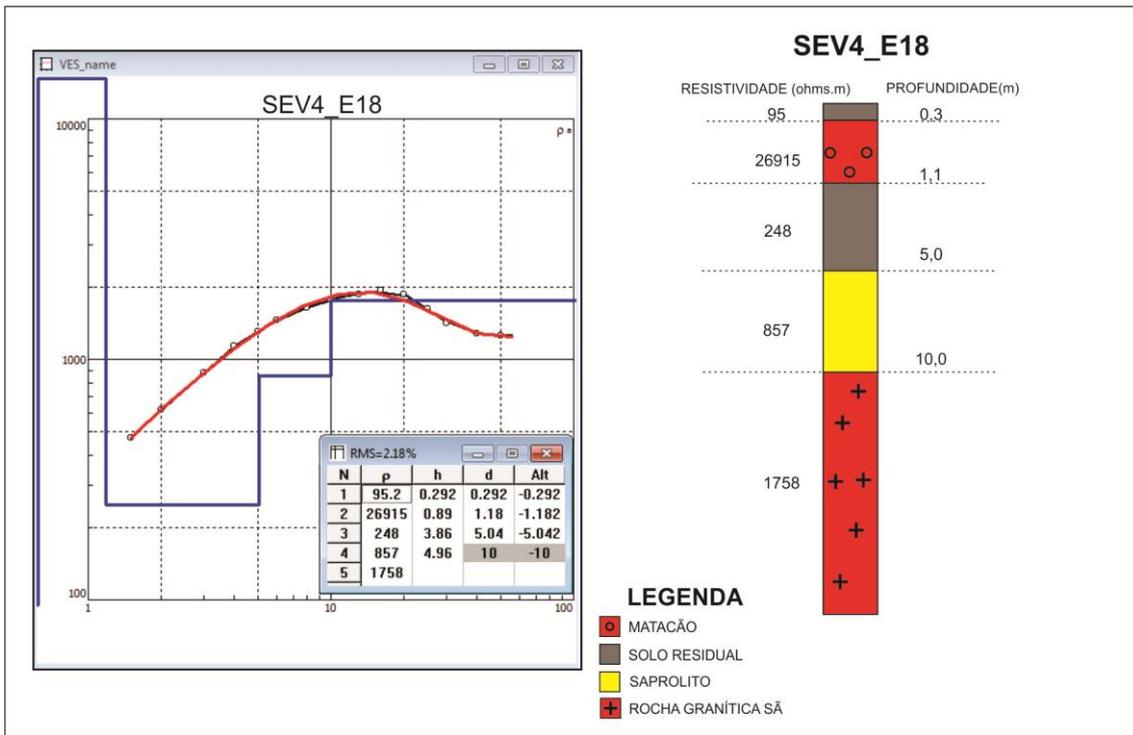
SEV3_E19,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



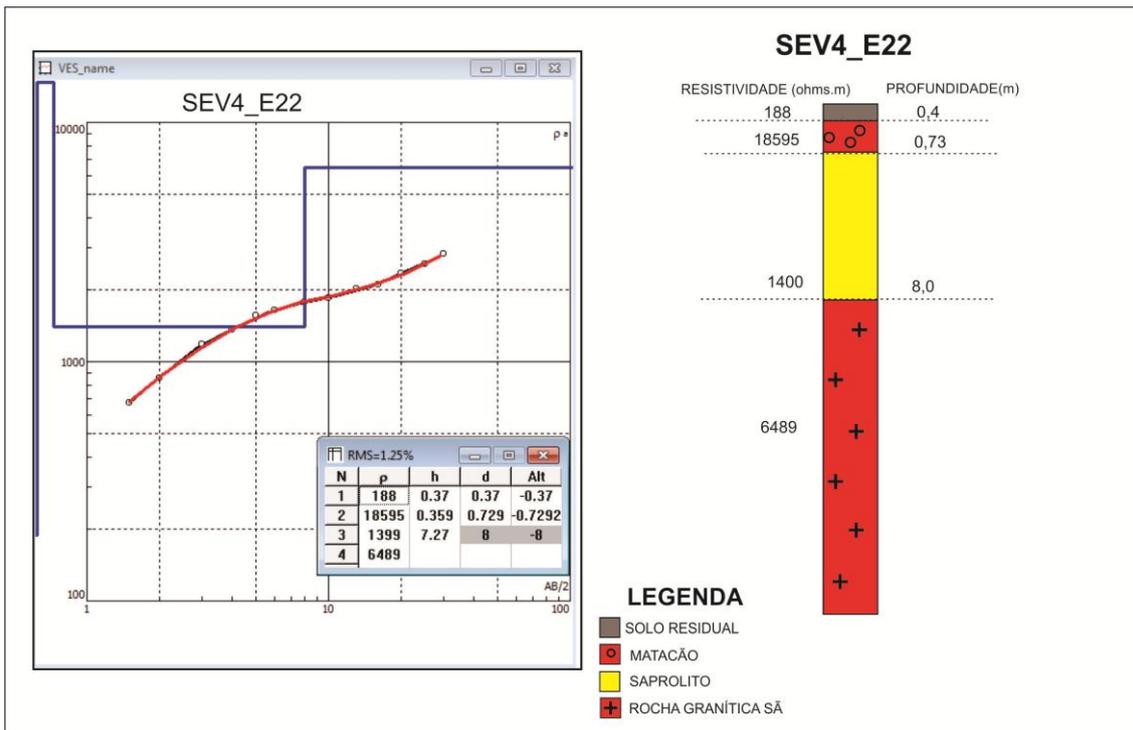
SEV3_E23 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



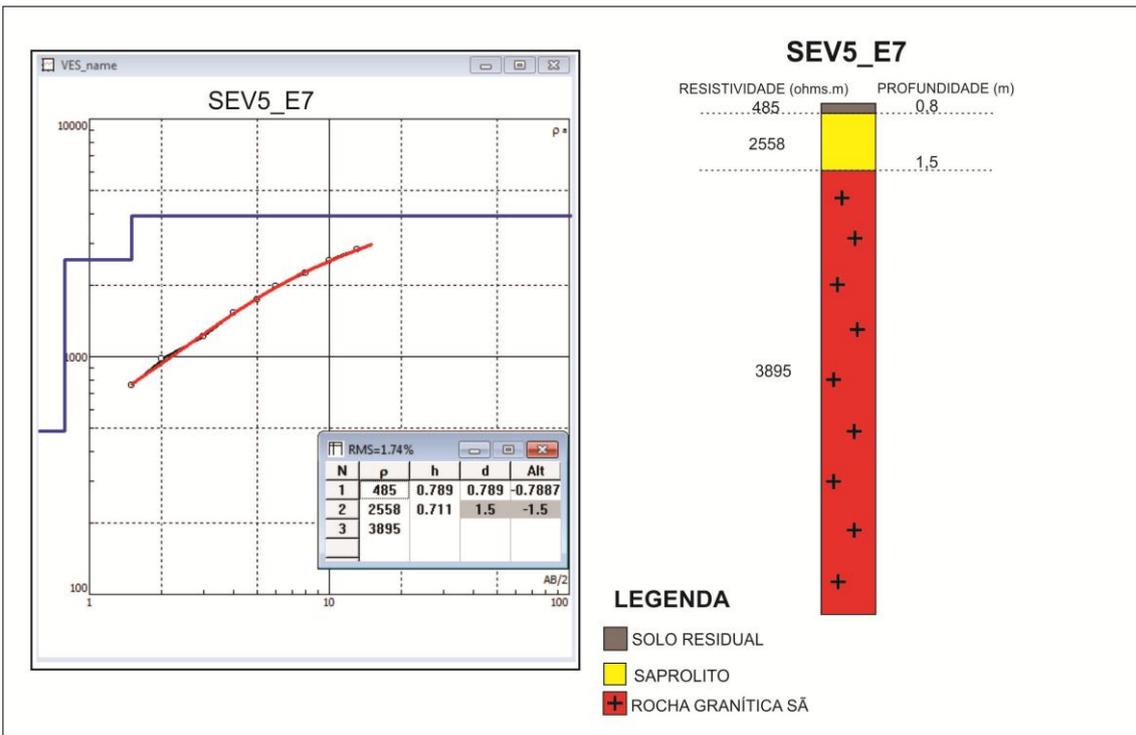
SEV4_E8 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



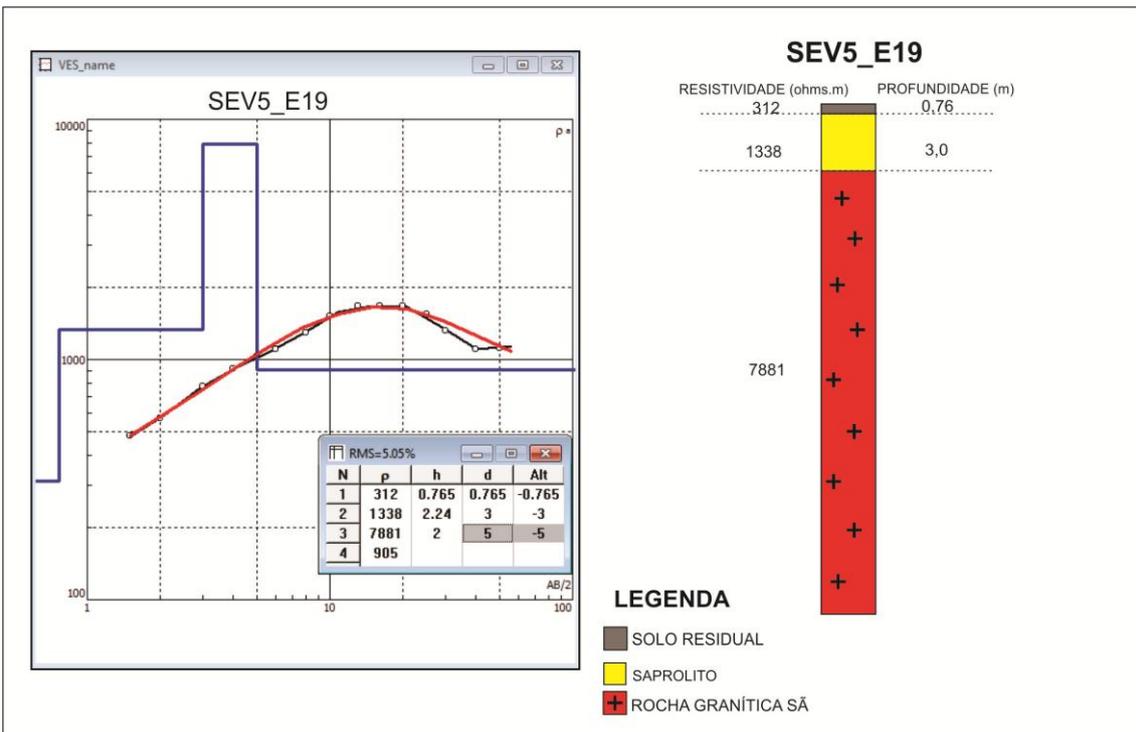
SEV4_E18 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



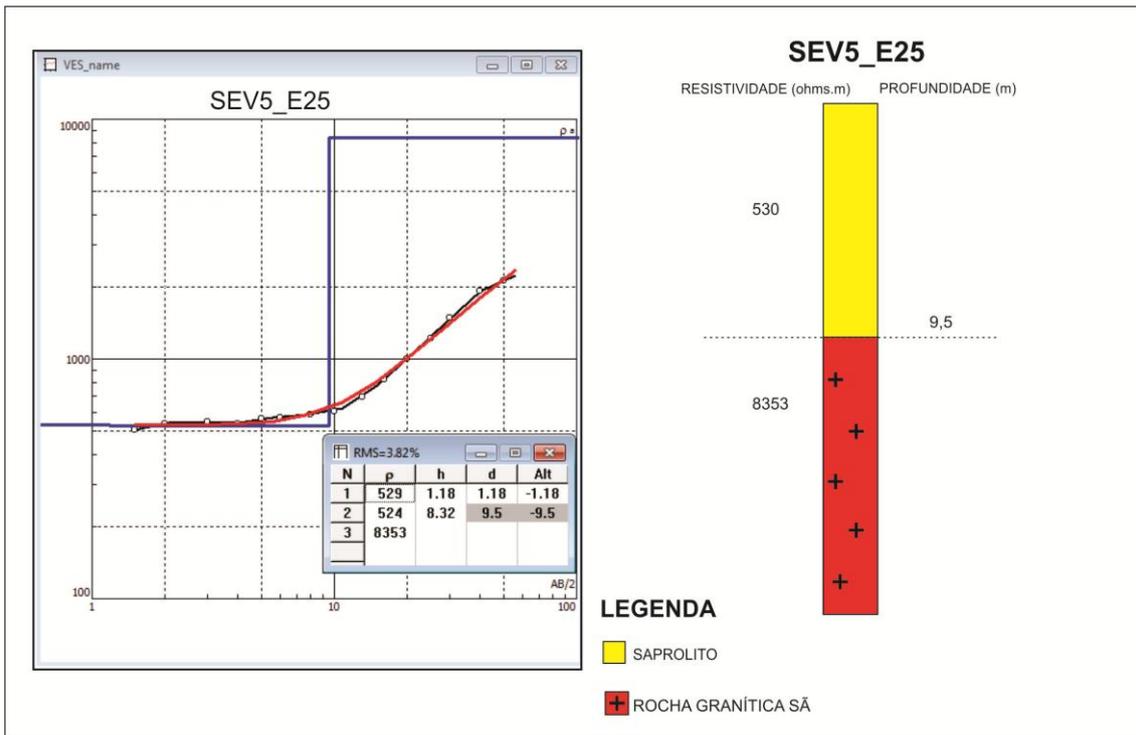
SEV4_E22 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



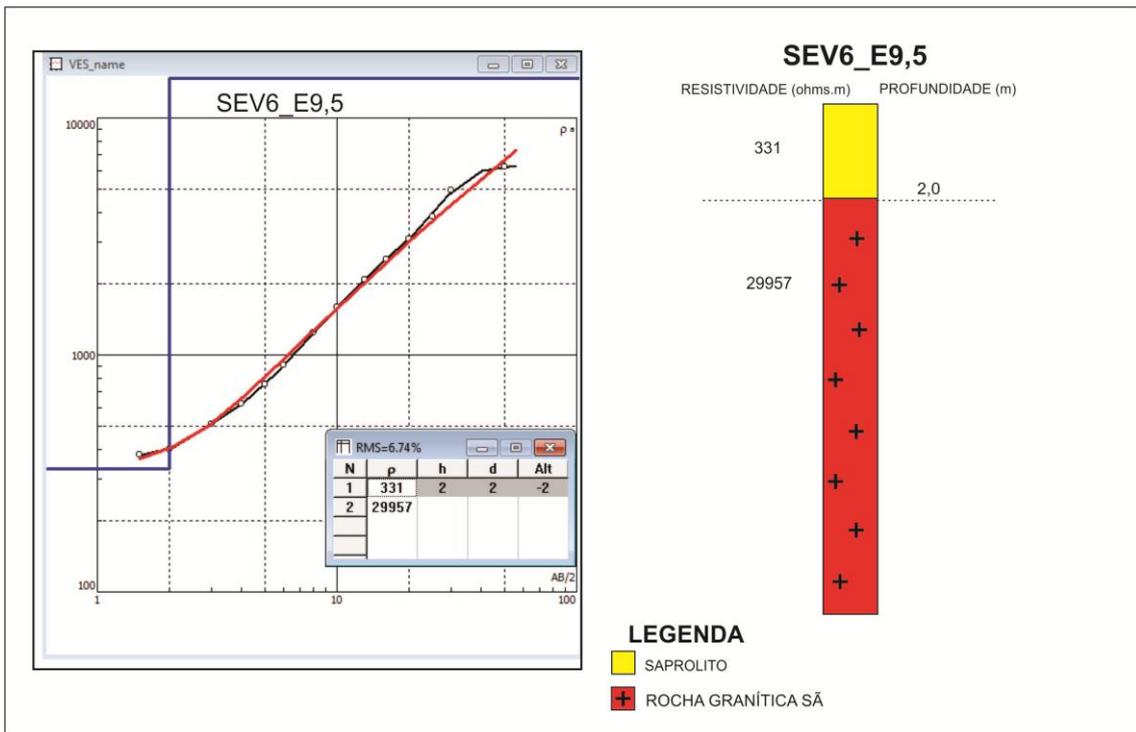
SEV5_E7 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



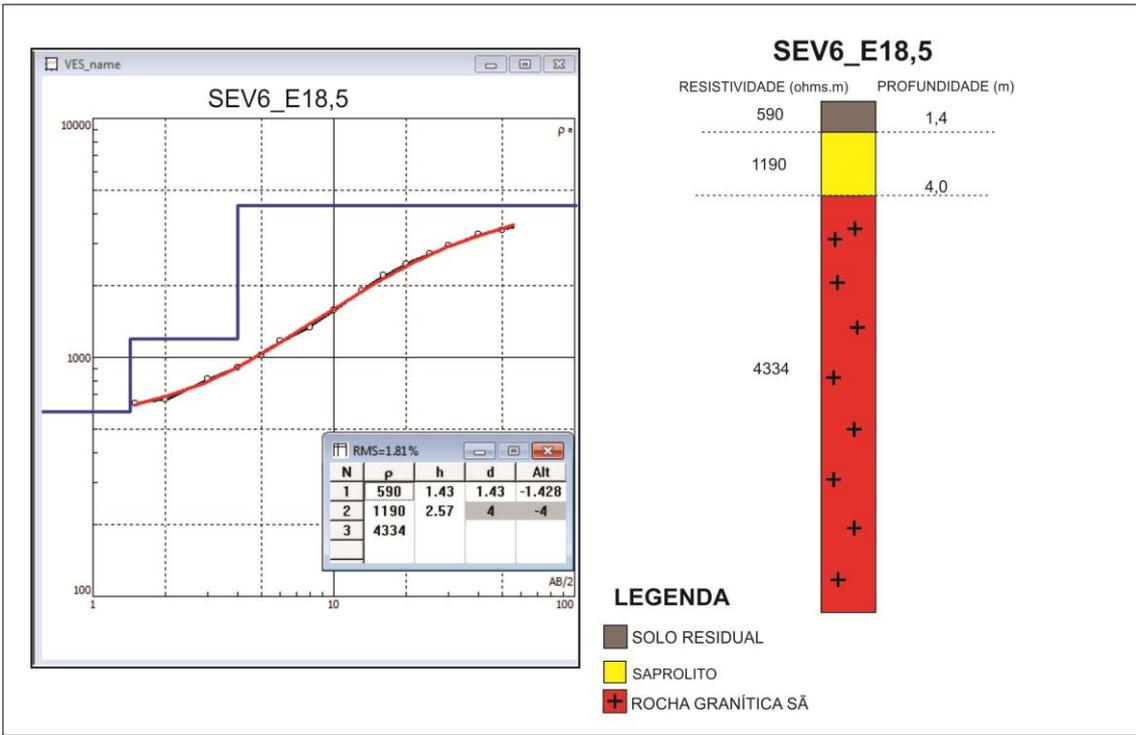
SEV5_E19 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



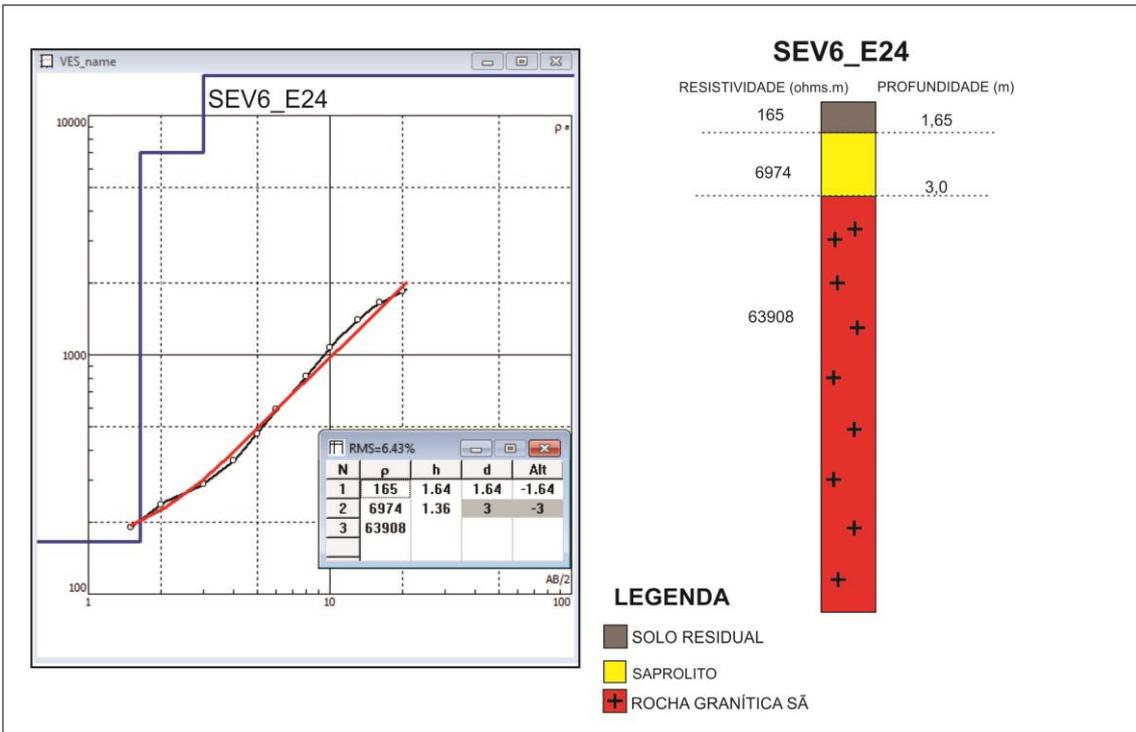
SEV5_E25 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



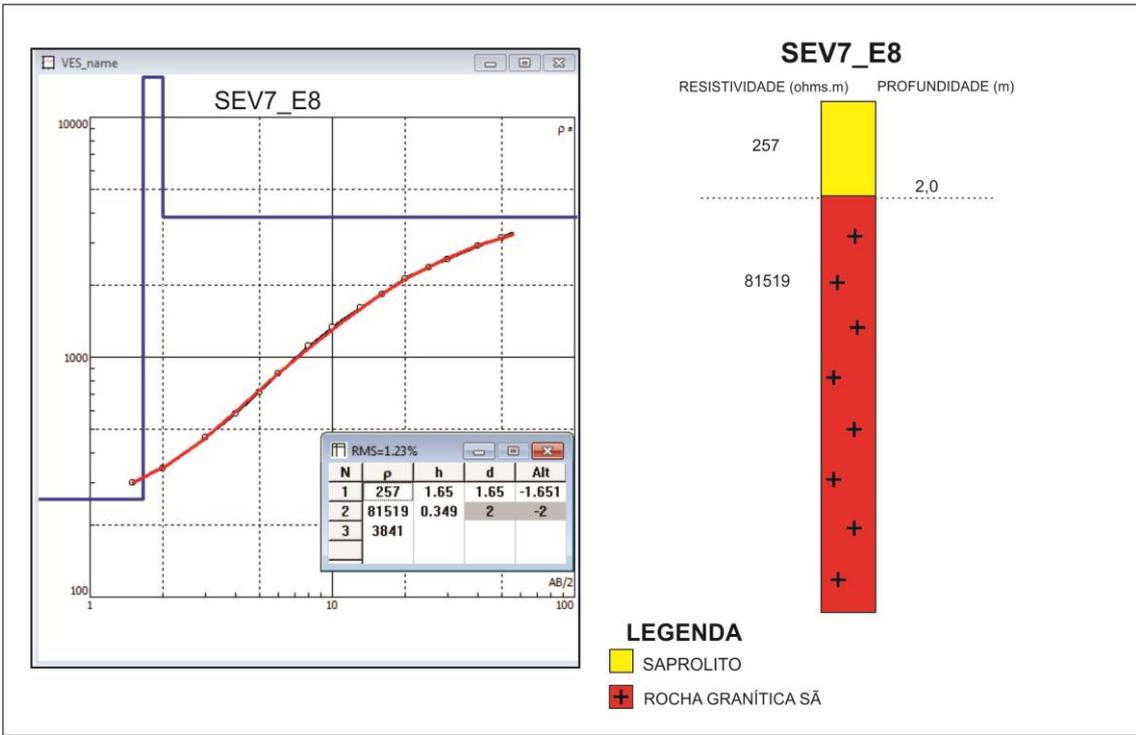
SEV6_E9,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



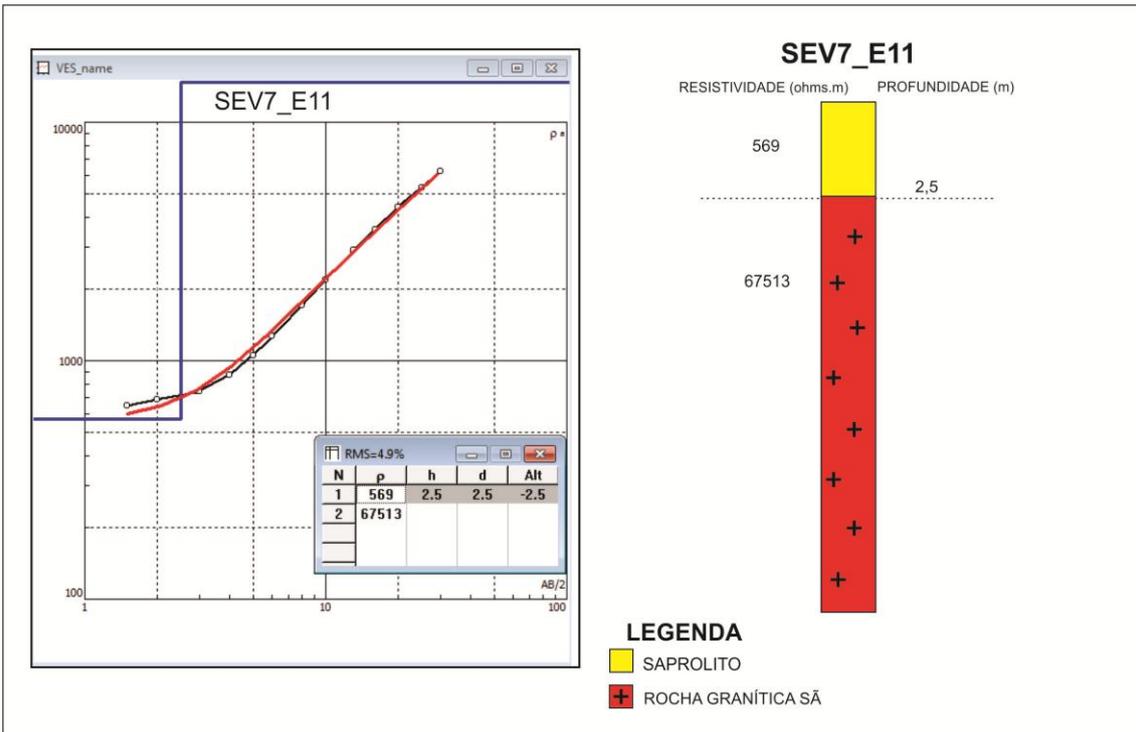
SEV6_E18,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



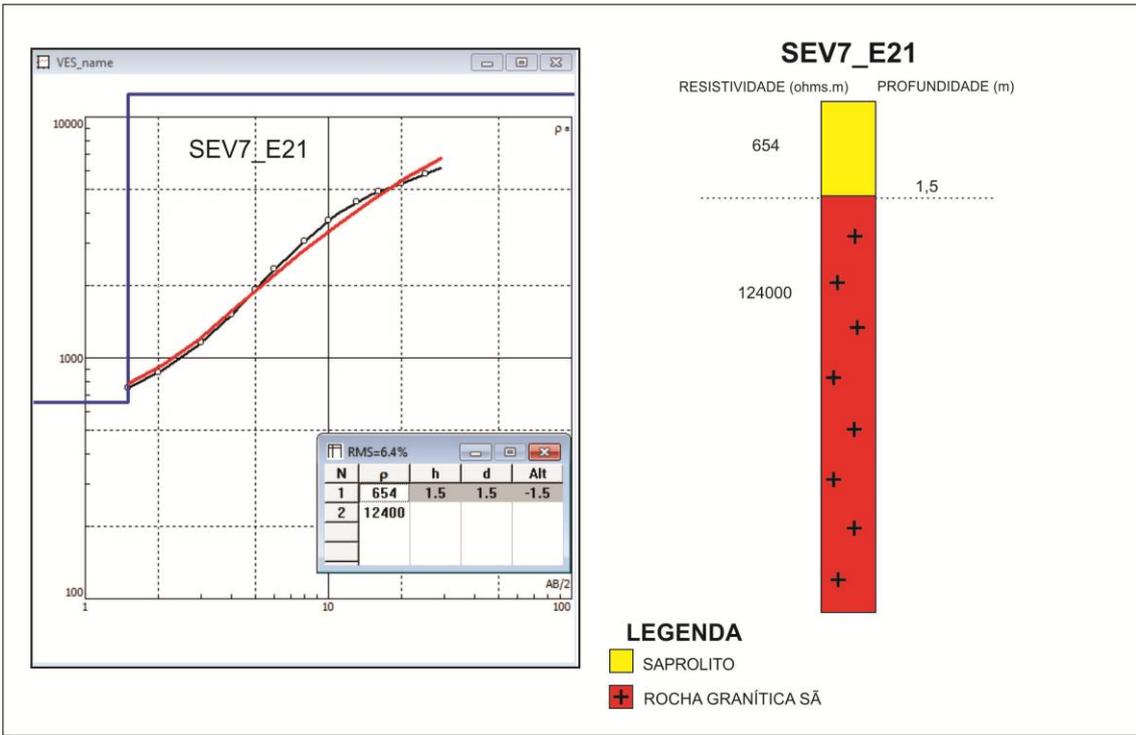
SEV6_E24 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



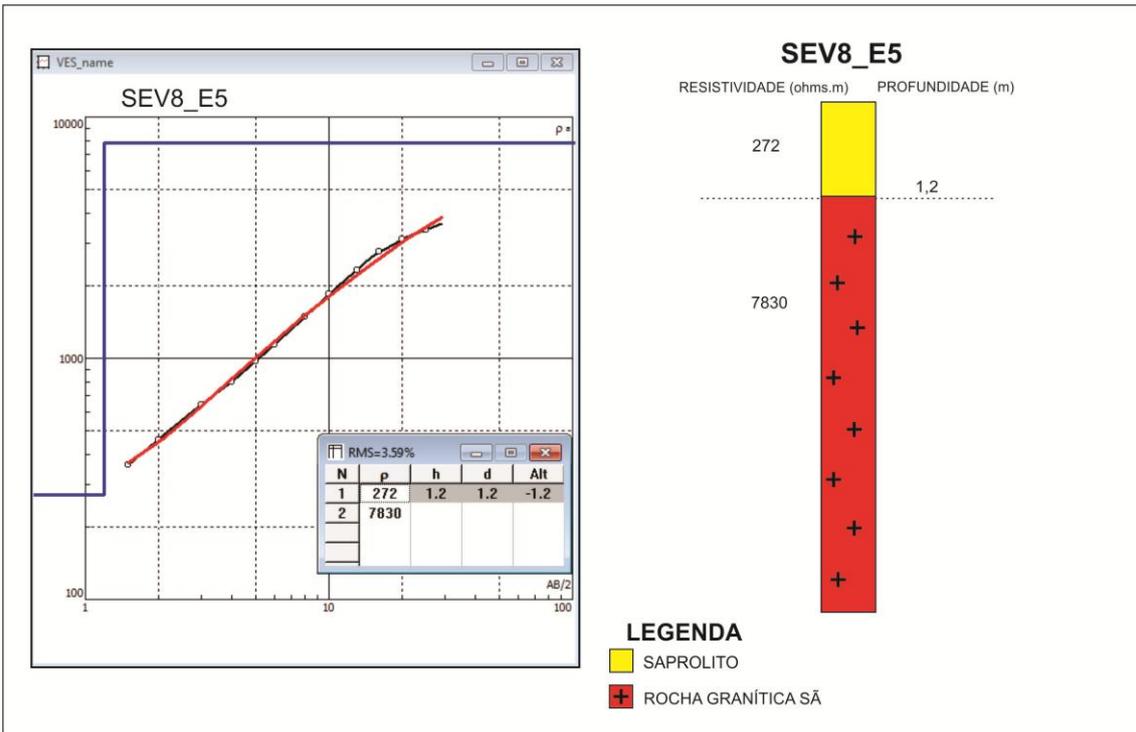
SEV7_E8 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



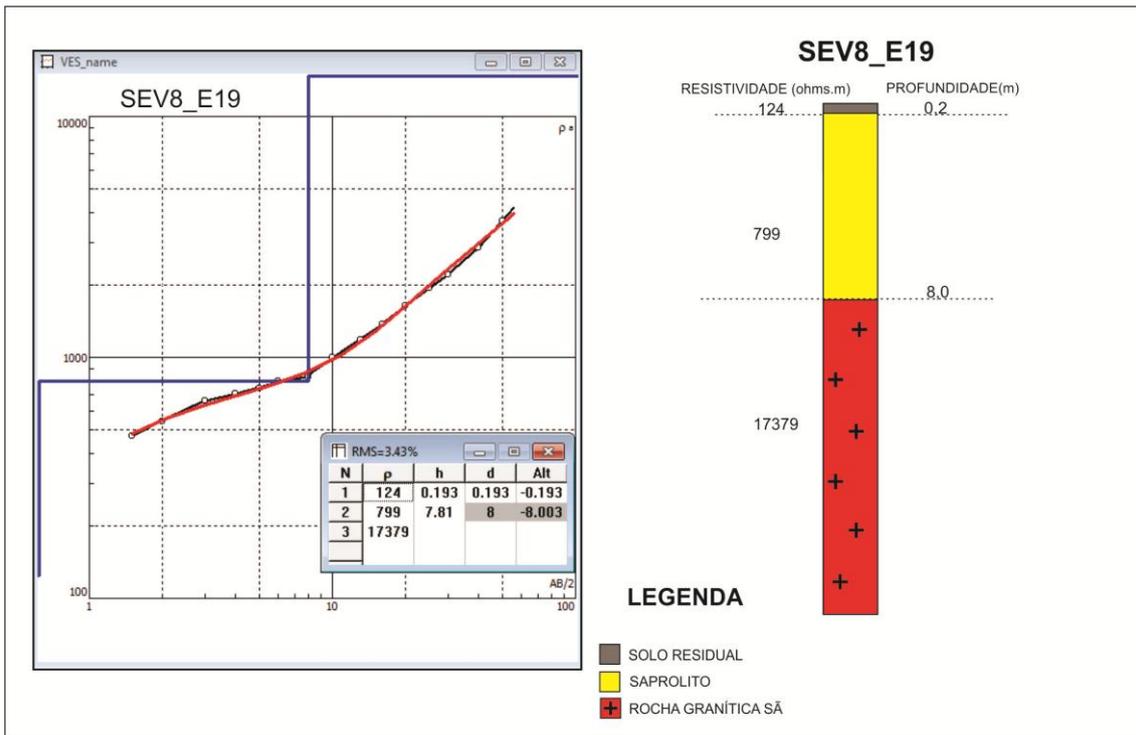
SEV7_E11 e sua respectiva interpretação dos estratos geolétricos.



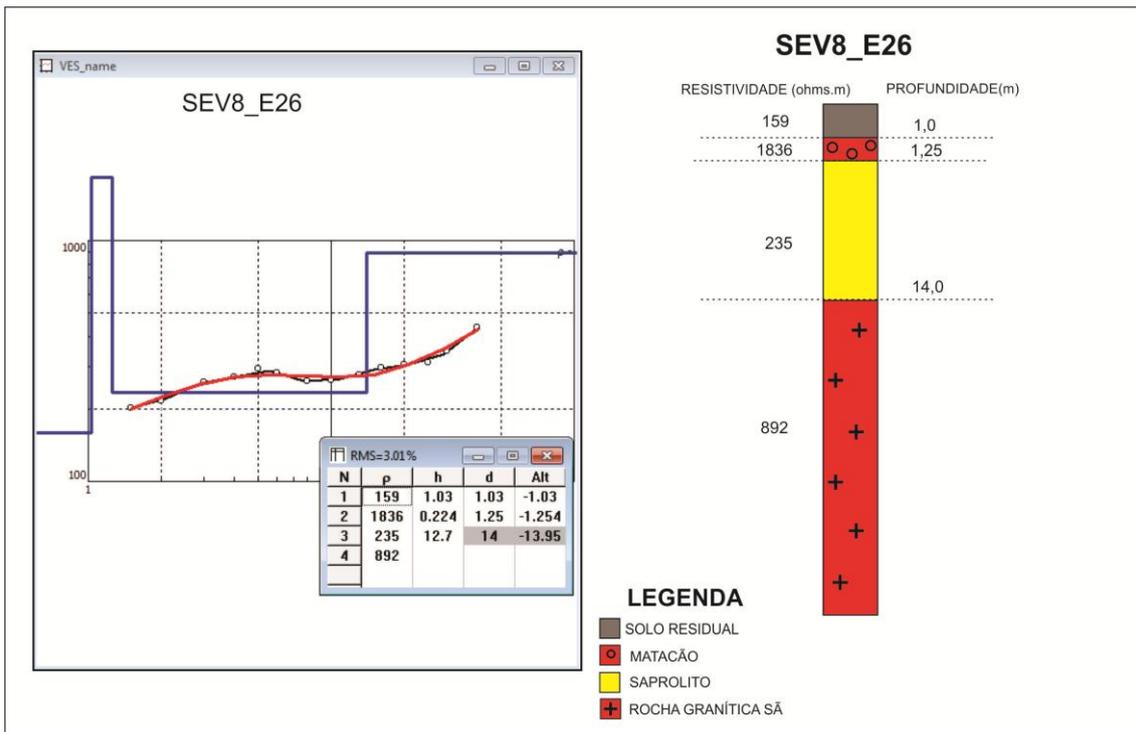
SEV7_E21 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



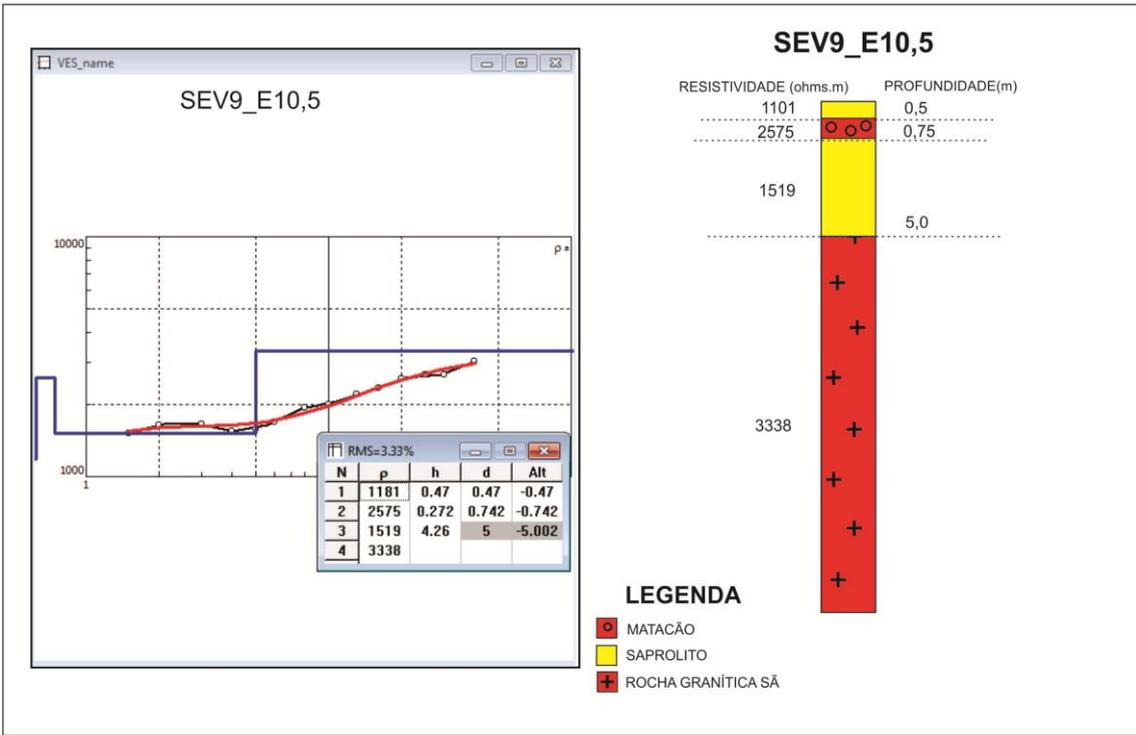
SEV8_E5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



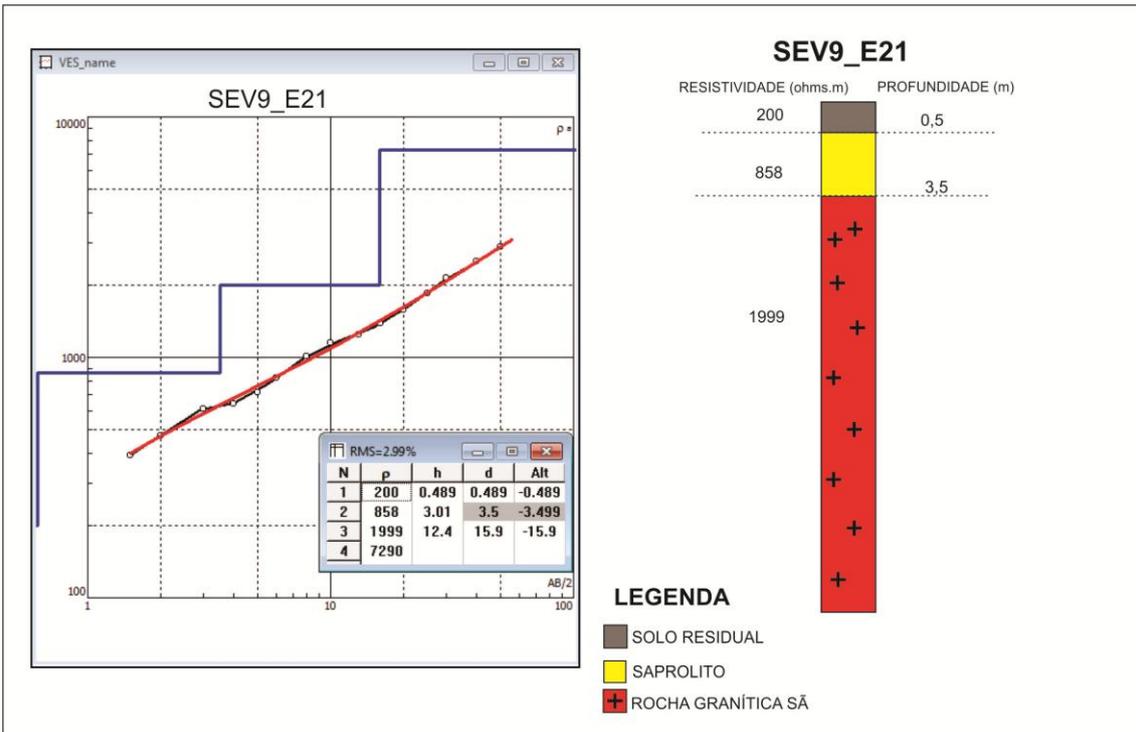
SEV8_E19 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



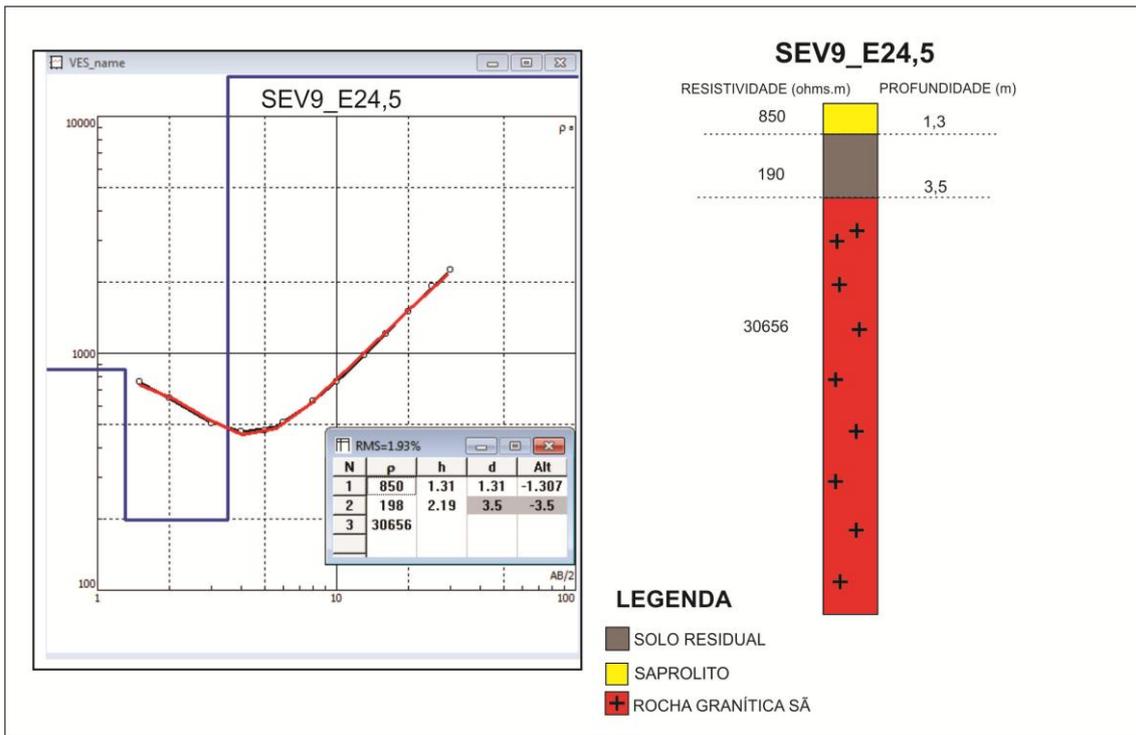
SEV8_E26 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



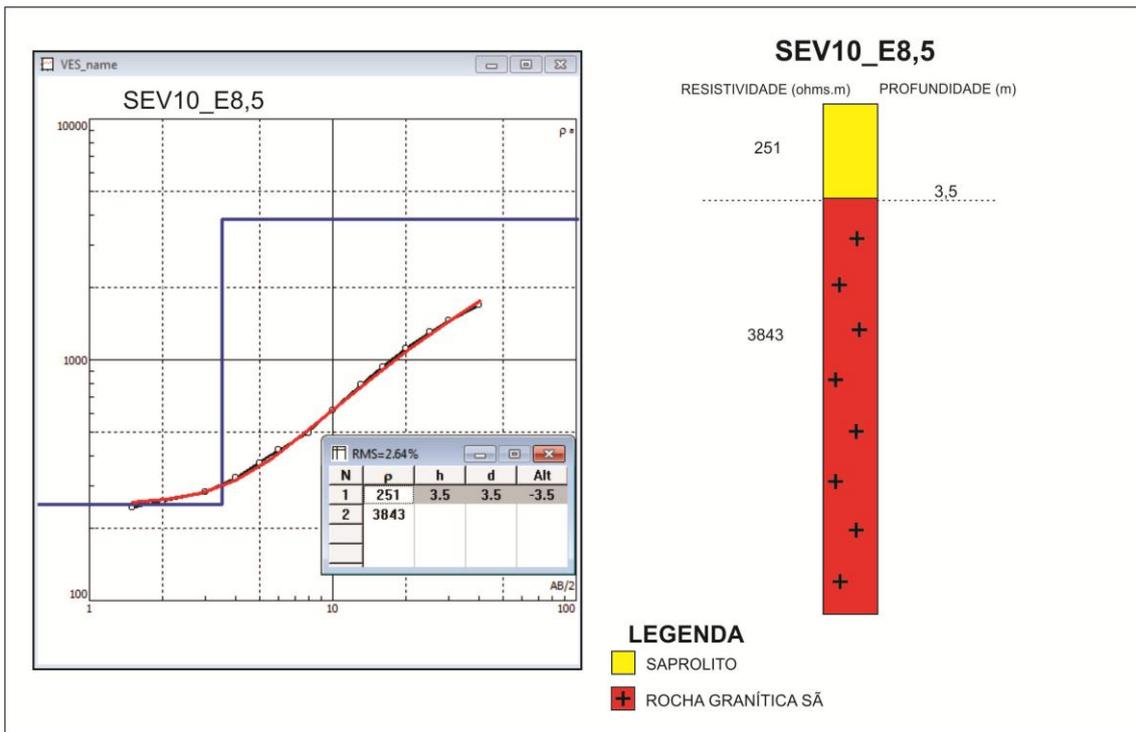
SEV9_E10,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



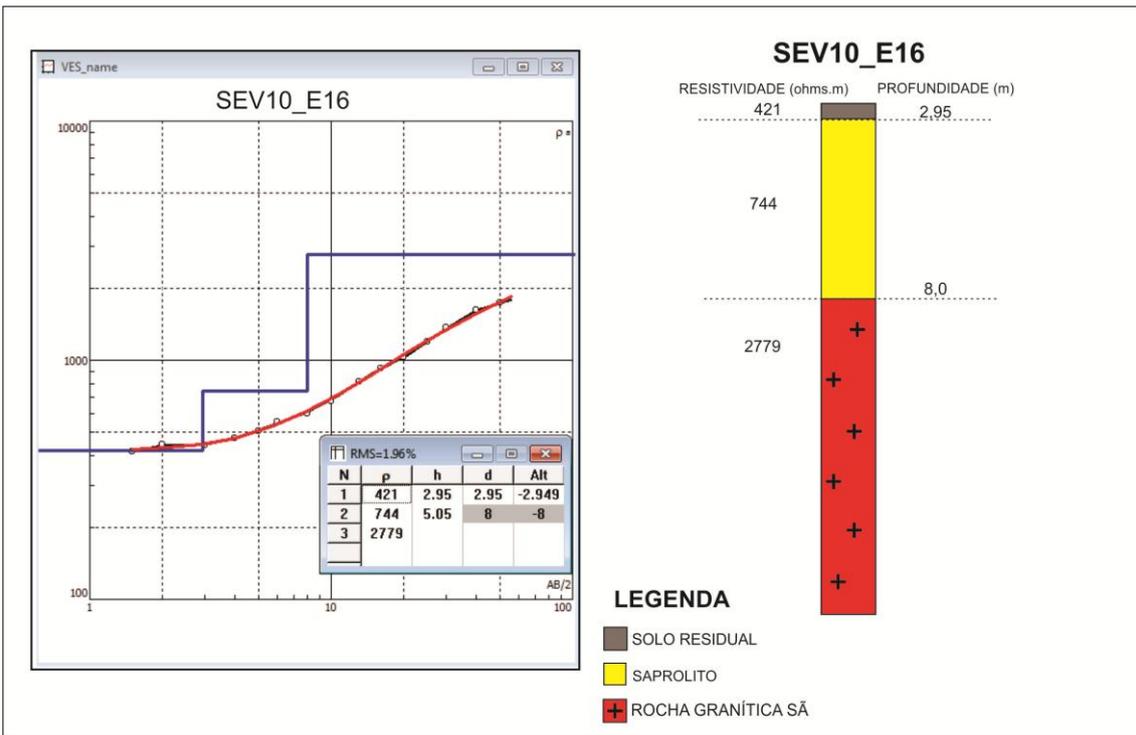
SEV9_E21 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



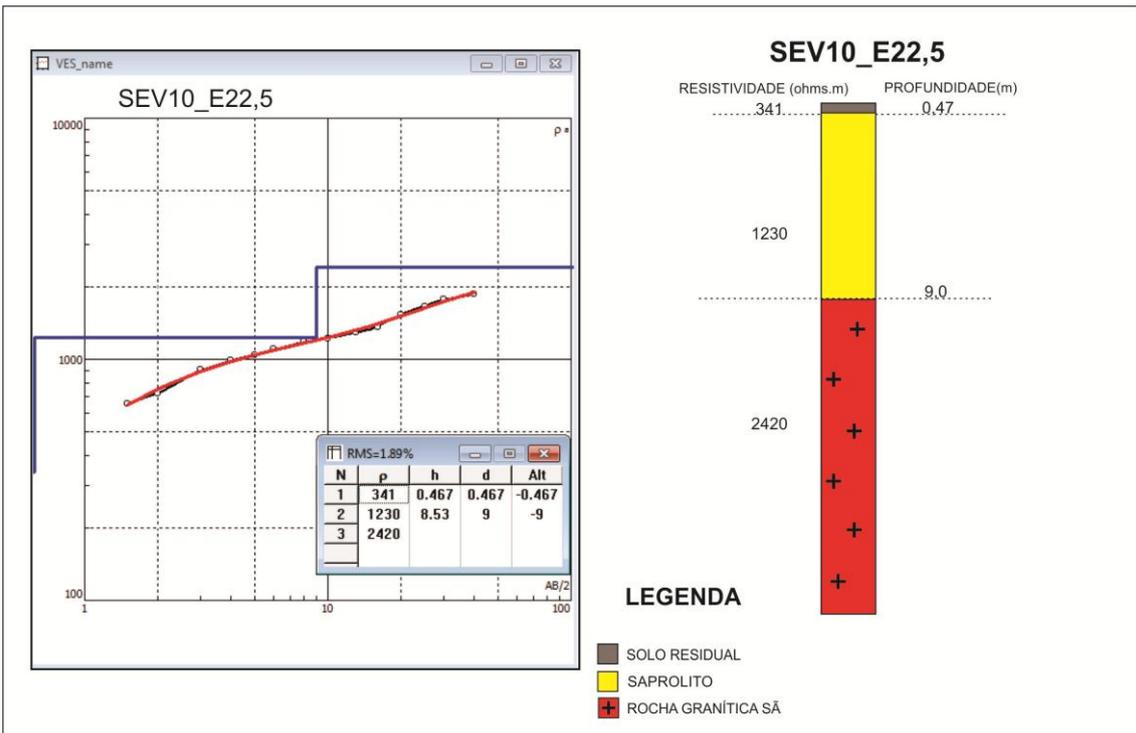
SEV9_E24,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



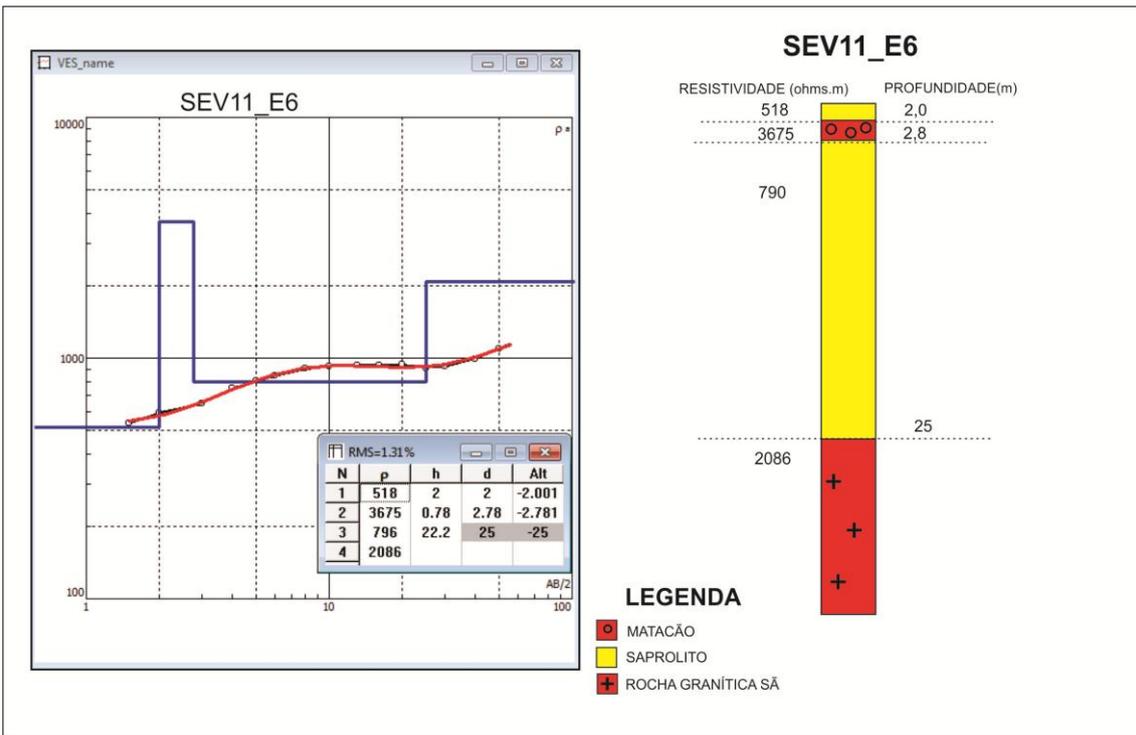
SEV10_E8,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



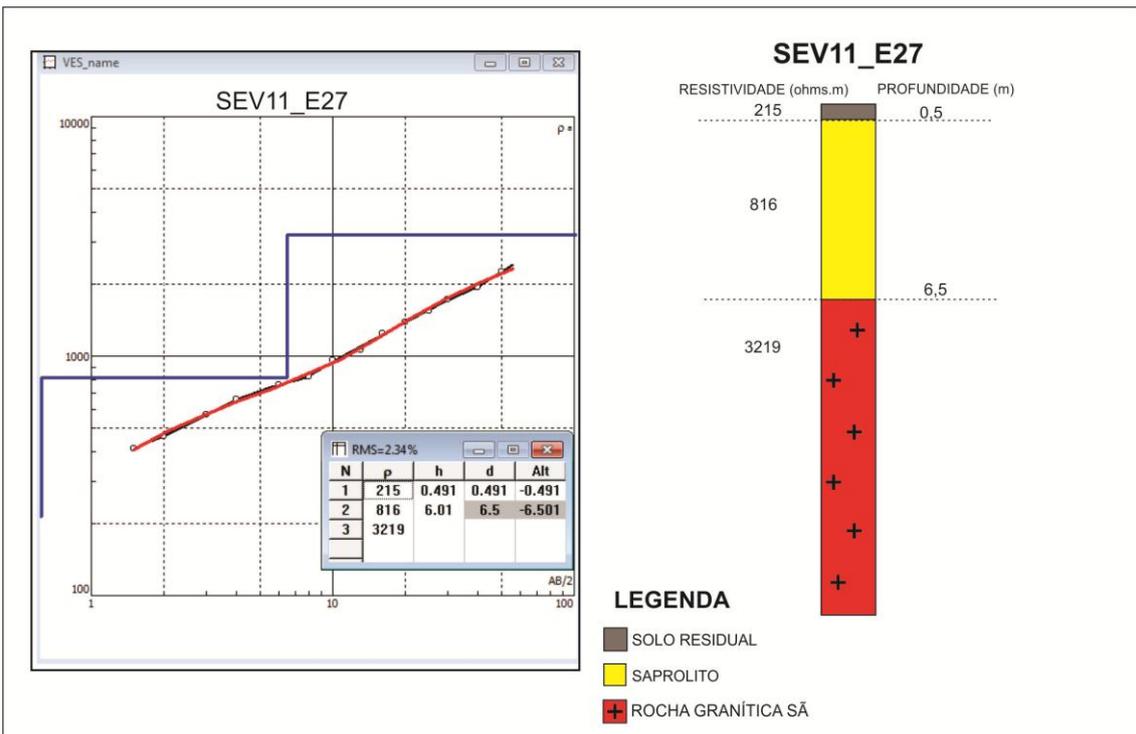
SEV10_E16 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



SEV10_E22,5 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeletricos.



SEV11_E6 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeétricos.



SEV11_E27 e sua respectiva interpretação dos estratos geoeétricos.

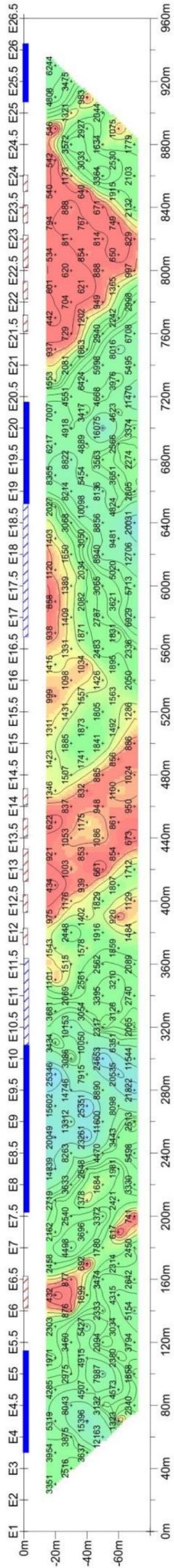
ANEXO C

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

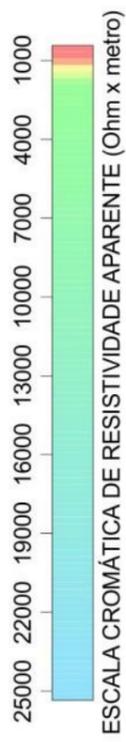
LINHA 1

OSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670
- VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)
- E8
- ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

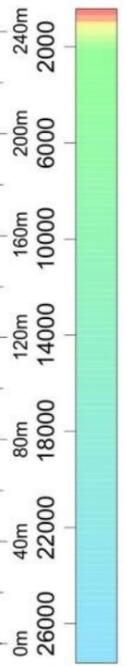
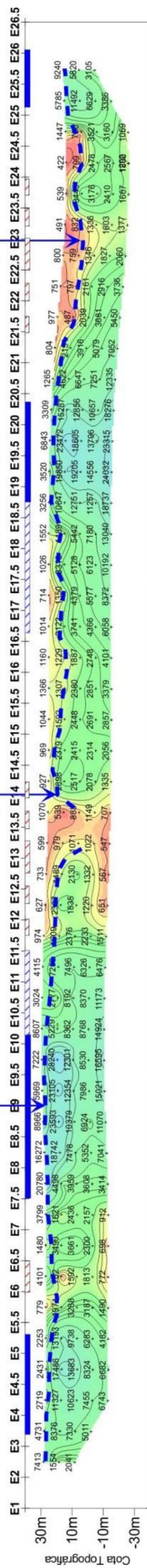


SEV_1E9 (0,7m)

SEV_1E14 (6,0m)

SEV_1E23 (10,0m)

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



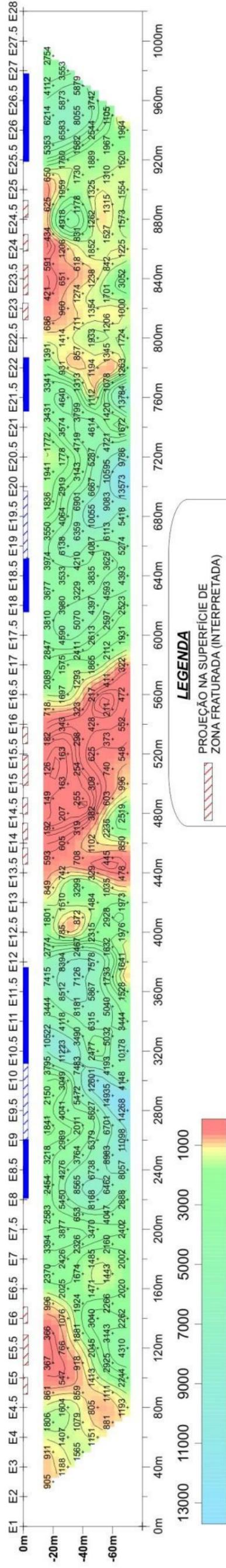
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETTORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 2

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEGENDA

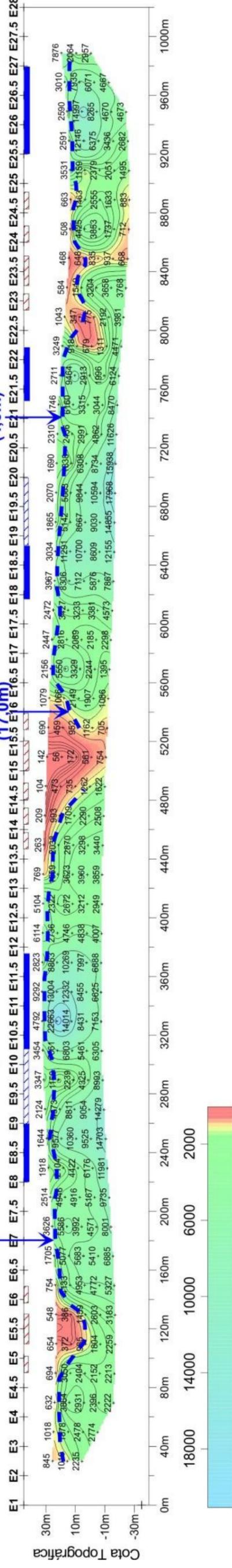
- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASAE SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

SEV_2E7
(2,0m)

SEV_2E16
(17,0m)

SEV_2E21
(4,0m)

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



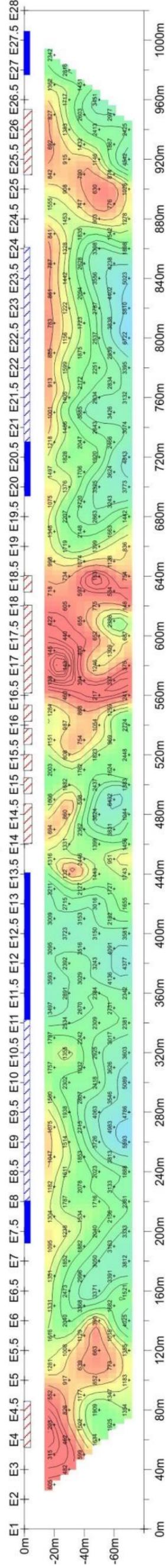
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 3

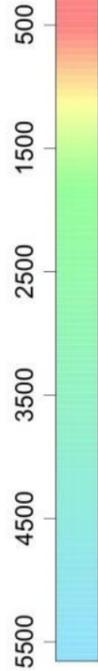
PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



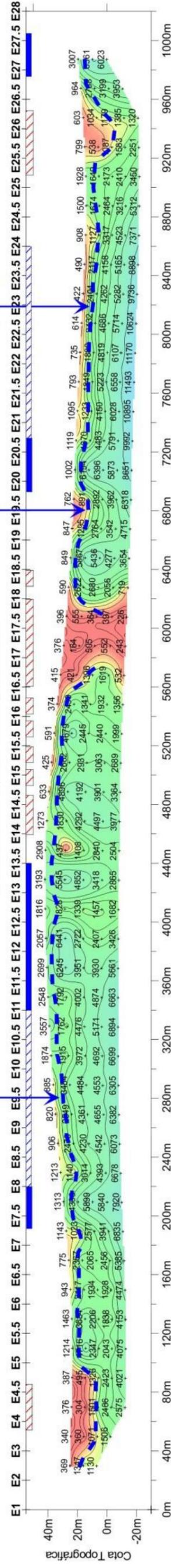
LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670** + VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)



SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

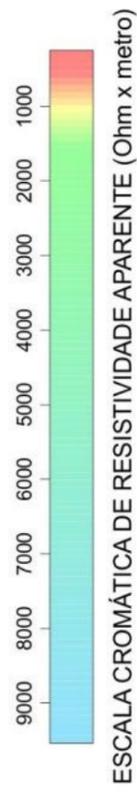
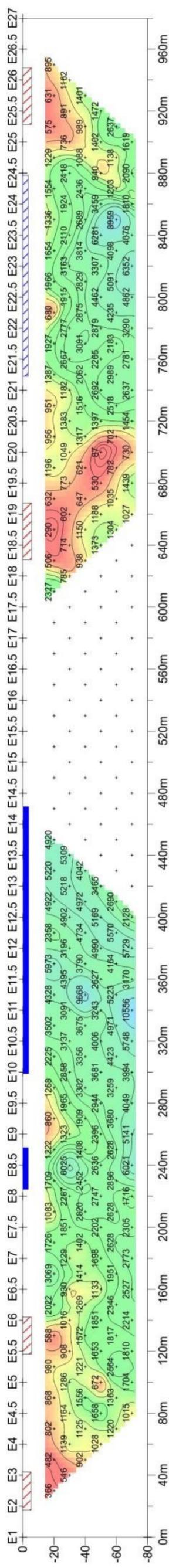


LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 4

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

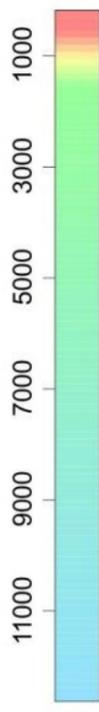
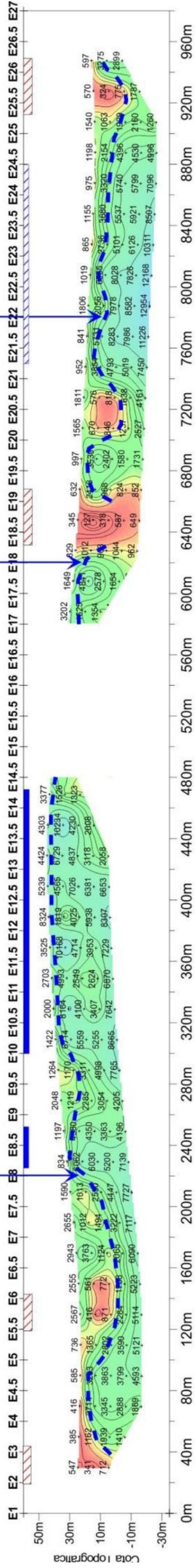
LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670** + VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** SONDA GEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASAE SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

SEV_4E8 (7,0m)

SEV_4E18 (10,0m)

SEV_4E22 (8,0m)



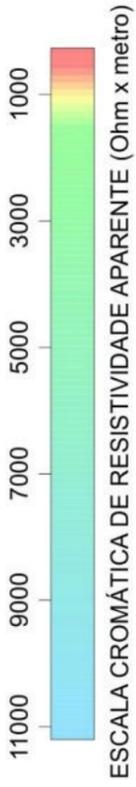
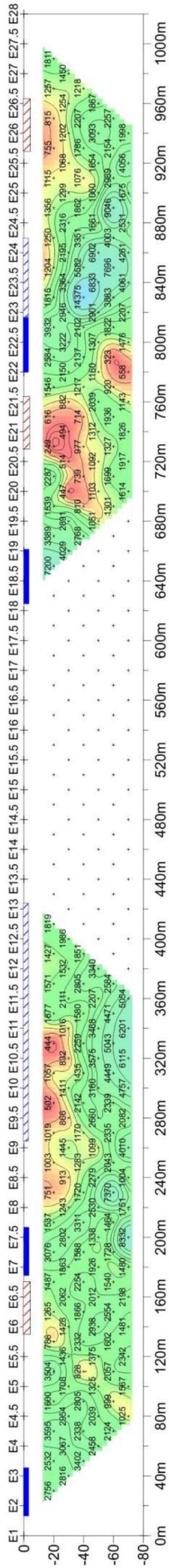
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 5

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE

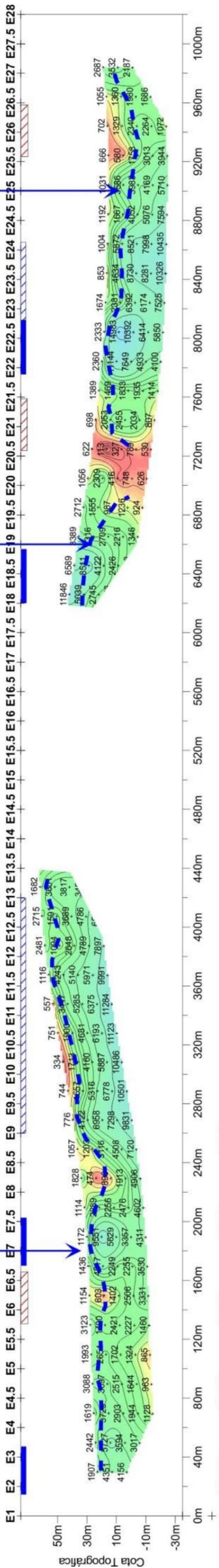


ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670 VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO (15m)
- E8 ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



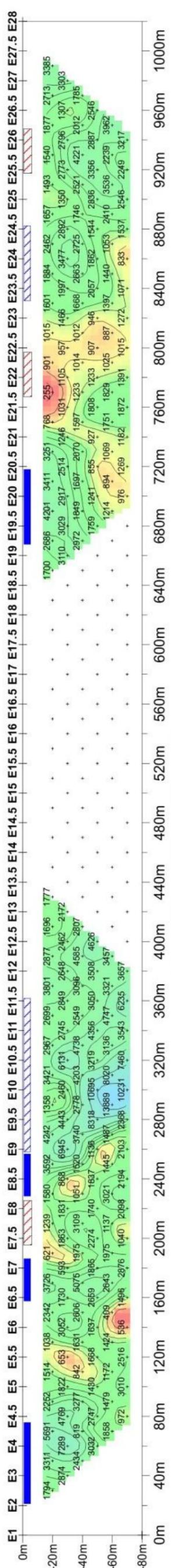
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 6

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



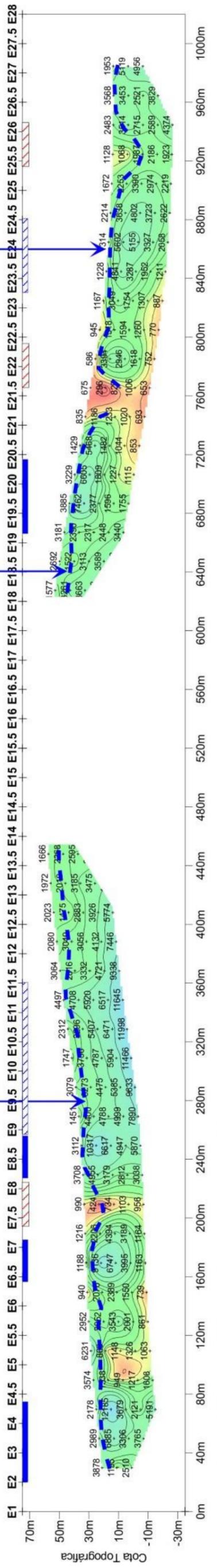
LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670** + VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

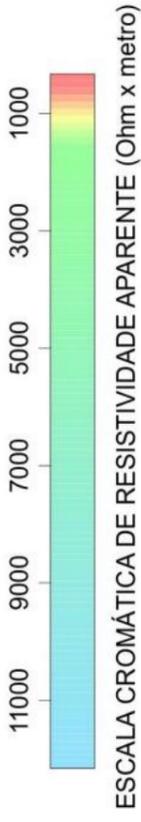
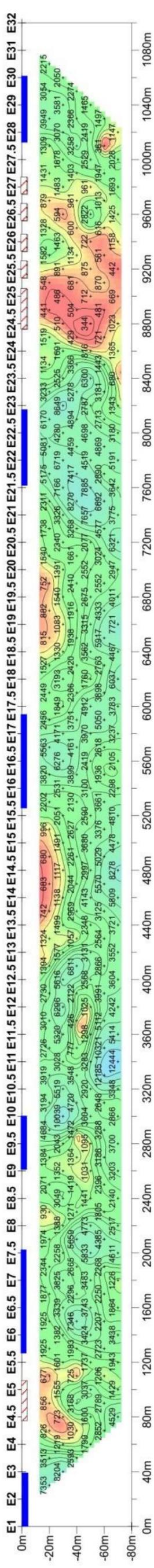
SANTUÁRIO DOS TRÊS REINOS

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 7

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE

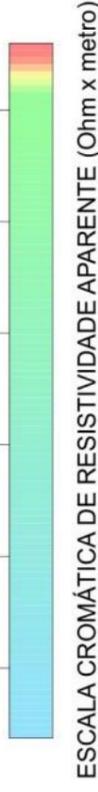
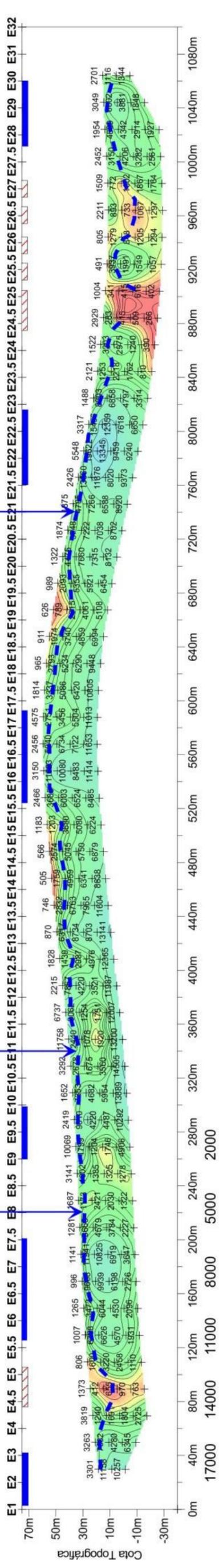


ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670 + VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- SEV 4 (15m) CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 7E8 (2,0m) SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 7E11 (2,5m) ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- SEV 7E21 (1,5m) ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



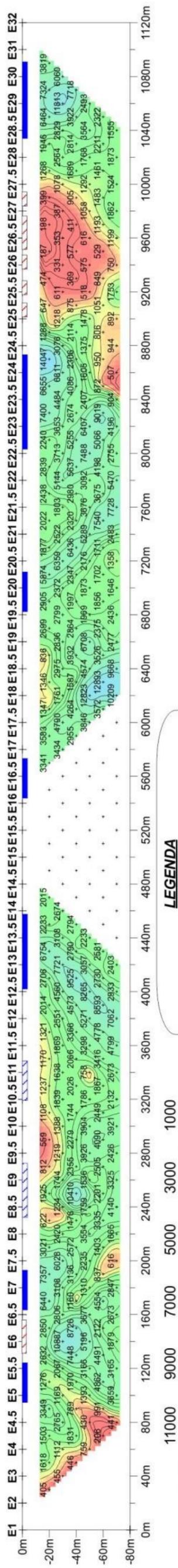
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 8

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670 +** VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

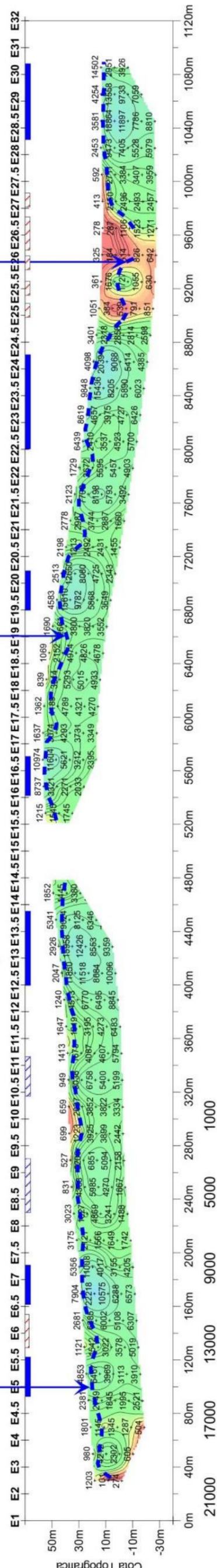
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

SEV_8E5 (1,2m)

SEV_8E19 (8,0m)

SEV_8E26 (14,0m)

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



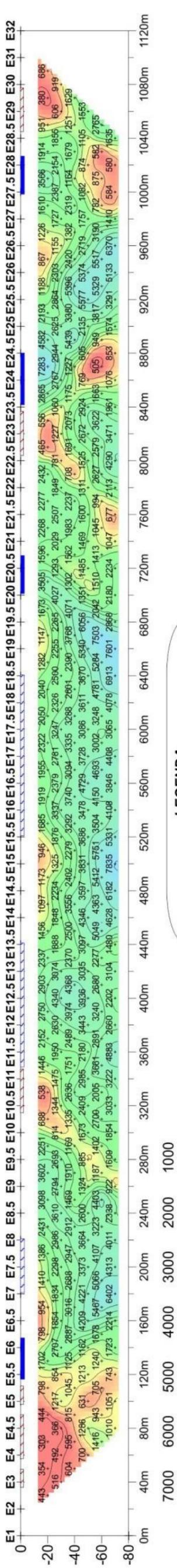
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

L I N H A 9

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE

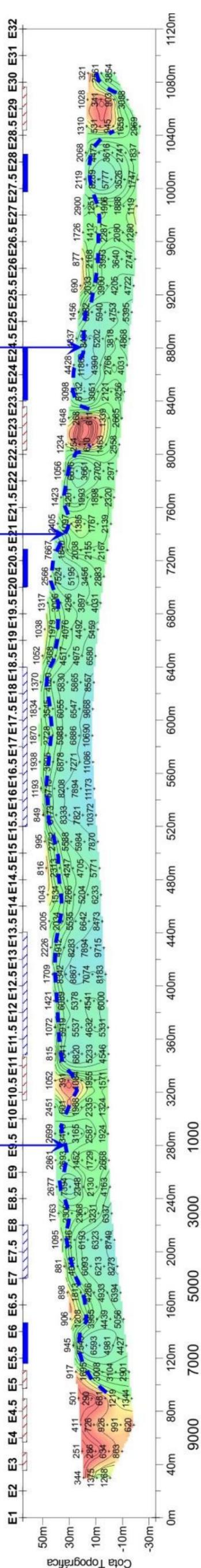


ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670** + VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASAE SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



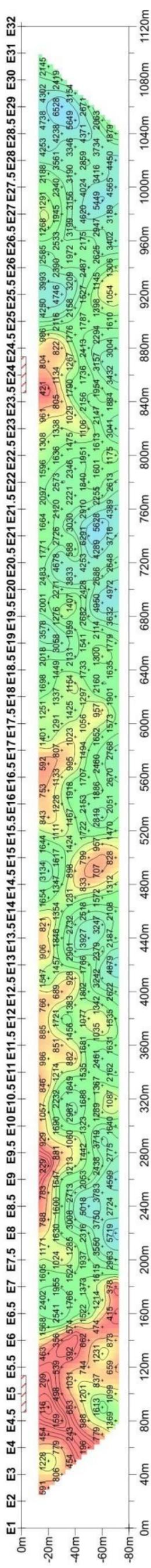
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 10

PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



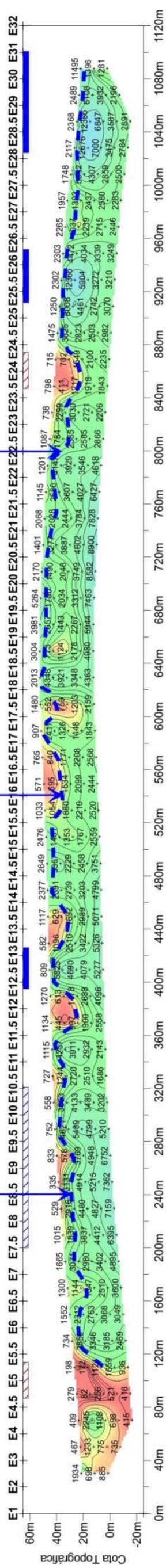
LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- 670 +** VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m)** SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8** ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

SEV_10E22,5 (9,0m)

SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



SEV_10E16 (8,0m)

SEV_10E8,5 (3,5m)

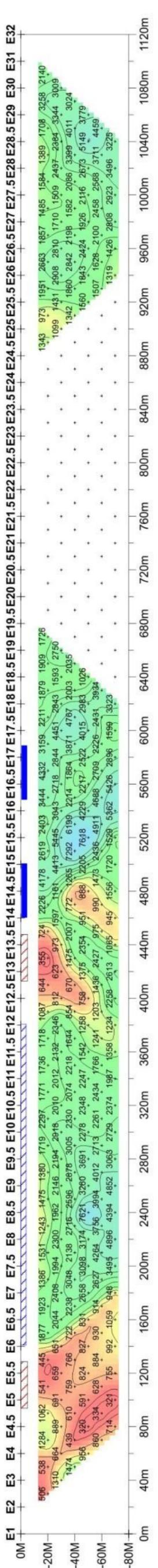
ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)

LEVANTAMENTO DE ELETRORRESISTIVIDADE

ARRANJO DIPOLO-DIPOLO - AB = MN = 20m

LINHA 11

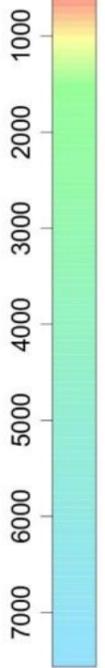
PSEUDO-SEÇÃO DE RESISTIVIDADE APARENTE



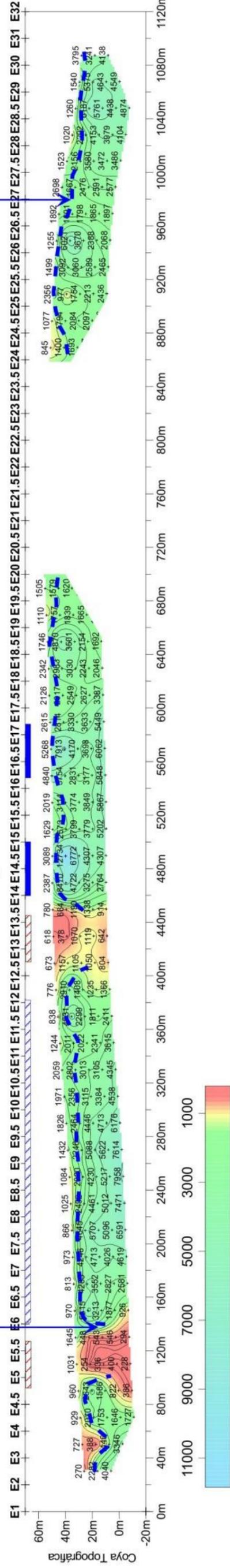
LEGENDA

- PROJEÇÃO NA SUPERFÍCIE DE ZONA FRATURADA (INTERPRETADA)
- VALOR MEDIDO / MODELADO DE RESISTIVIDADE E SEU PONTO DE PLOTAGEM
- CONFIGURAÇÃO INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- SEV 4 (15m) SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL E PROFUNDIDADE INTERPRETADA DO TOPO ROCHOSO
- E8 ESTACA TOPOGRÁFICA DE CAMPO
- ROCHA RASA E SEM FRATURAS
- ROCHA COM COBERTURA E SEM FRATURAS

ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)



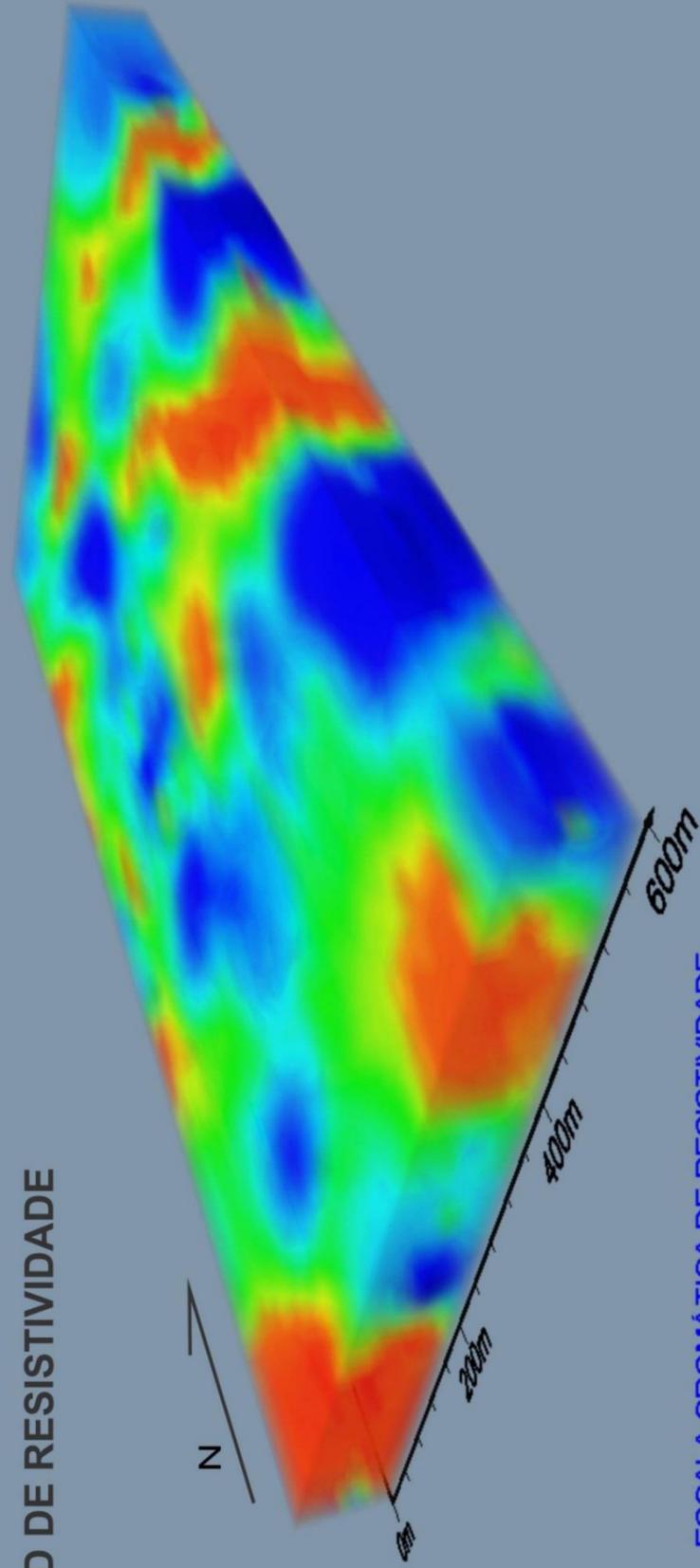
SEÇÃO MODELADA DE RESISTIVIDADE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE APARENTE (Ohm x metro)



MODELO 3D DE RESISTIVIDADE



ESCALA CROMÁTICA DE RESISTIVIDADE



VOLUME DE ROCHA NÃO FRATURADA

