

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**  
**CENTRO DE GEOCIÊNCIAS**  
**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA**

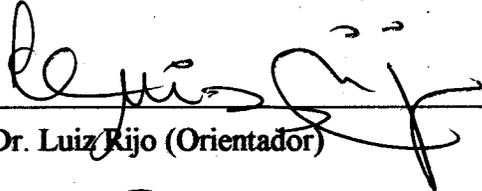
**ELETRORESISTIVIDADE NA PROSPECÇÃO**  
**HIDROGEOLOGICA NO MUNICÍPIO**  
**DE OURILÂNDIA DO NORTE-PA**

**TESE APRESENTADA POR**  
**JOSÉ ANTONIO FERREIRA DE SOUSA**

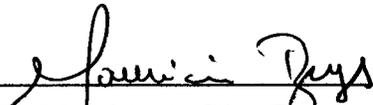
**COMO REQUISITO PARCIAL À OBTENÇÃO DE GRAU DE**  
**MESTRE EM CIÊNCIAS NA ÁREA DE GEOFÍSICA**

**Data de Aprovação : 22/05/1996**

**COMITÊ DE TESE:**

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Luiz Rijo (Orientador)

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Om Prakash Verma

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Mauricio da Silva Borges

**BELÉM**

**1996**

**SOUSA, José Antonio Ferreira de. Eletroresistividade na prospecção hidrogeológica no município de Ourilândia do Norte-PA. Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências, 1996. 86p.**

**Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPA, 1996.**

**1. ÁGUA SUBTERRÂNEA. 2. AMBIENTE CRISTALINO. 3. MÉTODOS ELETRORESISTIVOS. 4. MODELAGEM NUMÉRICA. 5. INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA. I. Título.**

## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Prof. Dr. Luis Rijo, pela dedicada orientação, e principalmente por ter assumido comigo este desafio.

Aos meus examinadores Profs. Drs. Om Prakash Verma e Maurício da Silva Borges pelas sugestões e correções que contribuíram para melhorar esta tese.

Ao convênio UFPA/PETROBRÁS/FADESP/CNPq/FINEP, pelo suporte financeiro a este programa de Pós-Graduação.

A Prefeitura de Ourilândia do Norte, pela hospedagem e pelo apoio logístico dados durante o trabalho de campo.

Ao corpo docente do Curso de Pós-Graduação em Geofísica da Universidade Federal do Pará, responsável pelo meu aperfeiçoamento.

Aos funcionários do Curso de Geofísica, pelo apoio e cooperação, em especial ao Ronald pela dedicação na confecção das figuras desta tese; à Socorro no auxílio bibliográfico; à Regina, Silvio e Selene pela amizade.

Ao técnico de campo Afonso Quaresma, pela ajuda e dedicação no trabalho de campo.

Aos amigos do CEDENPA pelo apoio e incentivo para a conclusão desta tarefa.

Aos Profs. Jadir, Leão, José Geraldo e Lúcia pelas discursões técnicas e sugestões para o aprimoramento deste trabalho.

Aos bibliotecário Hélio Martins pela revisão do texto e das normas de editoração.

Aos amigos Arnaldo, Artur, Fernando e Valcir pelo companheirismo e compreensão nos bons e maus momentos.

À todos meus familiares pela compreensão pelos dias, noites e fins de semana em que não pude estar presente.

A todos os amigos e colegas do mestrado e doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica, em particular àqueles que contribuíram mais diretamente para a conclusão deste trabalho com sugestões e críticas.

À Ielze Barros Pereira e Jena Farias pelo permanente estímulo e carinho a mim dedicado

durante toda a realização deste trabalho.

Finalmente agradeço à DEUS por ter me dado confiança e inspiração para concluir este trabalho.

# SUMÁRIO

	P.
<b>DEDICATÓRIA</b> . . . . .	i
<b>AGRADECIMENTOS</b> . . . . .	ii
<b>LISTA DE ILUSTRAÇÕES</b> . . . . .	vi
<b>RESUMO</b> . . . . .	1
<b>ABSTRACT</b> . . . . .	2
<b>1 - INTRODUÇÃO</b> . . . . .	3
<b>2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA SOB ESTUDO</b> . . . . .	7
2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS E GERAIS . . . . .	7
2.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO . . . . .	9
2.3 FISIOGRAFIA . . . . .	11
2.4 GEOLOGIA . . . . .	14
2.4.1 Geologia Regional . . . . .	14
2.4.2 Geologia Local . . . . .	15
<b>3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E OPERAÇÃO DE CAMPO</b> . . . . .	18
3.1 MÉTODO ELETRORESISTIVO . . . . .	18
3.1.1 Sondagem Elétrica Vertical . . . . .	20
3.1.2 Caminhamento ou Perfilagem Elétrica . . . . .	23
3.1.3 Instrumentação e Operação de Campo . . . . .	24
3.1.3.1 Sondagem Elétrica Vertical . . . . .	24
3.1.3.2 Caminhamento Elétrico . . . . .	26
<b>4 - MODELAGENS E AMBIGÜIDADES EM TERRENOS CRISTAL- NOS</b> . . . . .	28
4.1 MODELAGEM . . . . .	28
4.1.1 - Análise dos Modelos Simulados . . . . .	31

4.1.1.1 - Modelo 1a . . . . .	31
4.1.1.2 - Modelo 1b . . . . .	32
4.1.1.3 - Modelo 1c . . . . .	32
4.1.1.4 - Modelo 1d . . . . .	32
4.2 - AMBIGÜIDADES EM TERRENOS CRISTALINOS . . . . .	34
4.2.1 - Ambigüidade 1 . . . . .	35
4.2.2 - Ambigüidade 2 . . . . .	41
4.2.3 - Ambigüidade 3 . . . . .	43
4.2.4 - Ambigüidade 4 . . . . .	45
4.2.5 - Ambigüidade 5 . . . . .	46
4.2.6 - Ambigüidade 6 . . . . .	47
<b>5 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ELETRORESISTIVOS COLETA-</b> <b>DOS NA CIDADE DE OURILÂNDIA DO NORTE . . . . .</b>	<b>48</b>
5.1 - METODOLOGIA PARA A INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DAS SEVs	49
5.1.1 Método Direto . . . . .	49
5.1.2 Método da Inversão . . . . .	50
5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO . . . . .	51
5.2.1 Resultados Provenientes da Interpretação das SEVs . . . . .	53
5.2.2 Seção Geométrica . . . . .	57
5.2.2.1 Seção 01 . . . . .	57
5.2.2.2 Seção 02 . . . . .	58
5.2.3 - Resultados da Interpretação do Caminhamento Elétrico . . . . .	58
5.2.3.1 perfil 01 . . . . .	58
<b>6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES . . . . .</b>	<b>62</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS . . . . .</b>	<b>65</b>
<b>I - ANEXO I - CURVAS DE CAMPO &amp; INTERPRETADAS . . . . .</b>	<b>69</b>
<b>II - ANEXO II - CURVAS DE CAMPO &amp; INTERPRETADAS . . . . .</b>	<b>80</b>

# LISTA DE ILUSTRAÇÕES

## FIGURAS

Figura 2.1	Mapa de localização e acesso . . . . .	10
Figura 2.2	Litoestruturas do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará . . . . .	17
Figura 3.1	circuitos do método eletroresistivo . . . . .	19
Figura 3.2	Arranjo Wenner . . . . .	21
Figura 3.3	Arranjo Schlumberger Colinear Simétrico . . . . .	22
Figura 3.4	Arranjo Dipolo-Dipolo . . . . .	23
Figura 3.5	Mapa de localização das SEVs e do caminhamento . . . . .	27
Figura 4.1	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a zona condutiva aflorante localizada a 0, 8, 16 e 24 m do centro de sondagem . . . . .	33
Figura 4.2	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante. . . . .	37
Figura 4.3	Sondagens elétricas verticais devido a dois meios estratificados com resistividades proporcionais ao fator 5.5. . . . .	37
Figura 4.4	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade não aflorante. . . . .	38
Figura 4.5	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte superior(1 m)da heterogeneidade. . . . .	38
Figura 4.6	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte superior(3 m)da heterogeneidade. . . . .	39
Figura 4.7	sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a metade superior(6 m)da heterogeneidade. . . . .	39
Figura 4.8	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte basal(30 $\Omega$ .m)da heterogeneidade. . . . .	40
Figura 4.9	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte basal(300 $\Omega$ .m)da heterogeneidade. . . . .	40
Figura 4.10	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante a 8 m do centro de sondagem. . . . .	41
Figura 4.11	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob a primeira camada do manto. . . . .	42

Figura 4.12	sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 2,8 m do manto. . . . .	42
Figura 4.13	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante distante 16 m do ponto de sondagem. . . . .	43
Figura 4.14	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 0,8 m do manto. . . . .	44
Figura 4.15	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante distante 24 m do ponto de medida. . . . .	44
Figura 4.16	Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 2,8 m do manto e localizada a 8, 16 e 24 m do centro da SEV . . . . .	45
Figura 4.17	Sondagens elétricas verticais devido a heterogeneidade aflorante com 30° de mergulho e na vertical. . . . .	46
Figura 4.18	Sondagens elétricas verticais devido a heterogeneidade aflorante e localizada a 8 m à esquerda e à direita do ponto de sondagem. . . . .	47
Figura 5.1	Seção Geométrica 01 . . . . .	59
Figura 5.2	Seção geométrica 02 . . . . .	59
Figura 5.3	Seção Geométrica 03 . . . . .	60
Figura 5.4	Perfil de Caminhamento . . . . .	61

## TABELAS

Tabela 1.1	Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (extraído de PONTES, 1995). . . . .	6
Tabela 3.1	Valores de AB/2 e MN utilizados nos levantamentos com SEVs . . . . .	26
Tabela 5.1	Resultado da interpretação quantitativa das SEVs efetuadas na cidade de Ourilândia do Norte. . . . .	53
Tabela 5.2	Modelo geométrico proposto para a subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte. . . . .	56

## RESUMO

A prospecção geofísica para a exploração de água subterrânea em regiões cristalinas torna-se uma tarefa extremamente difícil pela presença de estruturas como falhas, fraturas e ocorrência de variação lateral de resistividade no manto intempérico. Para analisar a influência da variação bidimensional da propriedade física no comportamento das curvas de sondagem elétrica vertical Schlumberger, simulou-se modelos contendo tais estruturas encaixadas no manto de alteração com ângulo de mergulho de 30° e 90° e com a posição do centro de sondagem variando em relação a heterogeneidade. A modelagem numérica foi feita através do método dos elementos finitos com o programa EGSLIB/SEV2D. O resultado da simulação mostra que o emprego da técnica da sondagem elétrica vertical Schlumberger sobre meios bidimensionais não funciona eficientemente, como quando aplicada em regiões sedimentares e de aluvião, devido o fenômeno da ambigüidade que dificulta a interpretação das curvas.

Dentre os métodos geofísicos para a investigação hidrogeológica, a aplicação dos métodos eletrorresistivos mostra-se mais simples, eficaz e econômica. Assim, o levantamento geofísico para orientar os trabalhos de perfurações de poços na cidade de Ourilândia do Norte contou de trinta e duas sondagens elétricas verticais tipo Schlumberger e um caminhamento elétrico dipolo-dipolo realizados em diversas ruas da cidade. As curvas de resistividade aparente, obtidas com as sondagens foram tratadas e processadas considerando um modelo de camadas planas, horizontais, homogêneas e isotrópicas, inicialmente com o algoritmo EGSLIB/SEV1D e posteriormente com uso do programa EGSLIB/SEV1DINV, permitindo estabelecer modelos geoeletricos aproximados para a configuração da subsuperfície da cidade.

Depois da interpretação quantitativa, foi possível separar duas zonas geoeletricas distintas. Esta diferenciação foi realizada com base nos valores de resistividade aparente e as informações geológicas de superfície. A primeira, com pouca representatividade na área da cidade, apresenta-se constituída por solo/aterro sobre saprolito de natureza argilo-arenosa recobrendo os granitóides tipo Rio Maria. A segunda composta pelo solo/aterro seguido de um horizonte preenchido por sedimentos arenosos superposto a camada argilo-arenosa e finalmente a rocha sã. Esta seqüência geoeletrica predomina na cidade. Os estratos arenoso e argilo-arenoso apresentam condições potenciais para armazenamento de água.

## ABSTRACT

Geophysical prospecting for groundwater in crystalline regions is a difficult task due to the presence of faults, fractures and lateral variations of resistivity in the overburden. To analyze the influence of bidimensional(2D) variation of resistivity on Schlumberger vertical electrical soundings several layer models were studied containing 2D vertical and dipping structures. These 2D structures are located in the alteration mantle at varying distances from the sounding position. The numerical modeling was done employing the finite element method using an algorithm developed for this purpose (EGSLIB/SEV2D). The results of simulation show that the Schlumberger vertical electrical sounding technique over bidimensional media is not very effective as in sedimentary and alluvial regions due to the phenomenon of ambiguity which complicates the interpretation of the curves.

Among the geophysical methods used for hydrogeological investigation, electroresistivity is simplest, economical and efficient. 32 Schlumberger vertical electrical soundings and several kms of dipole-dipole profiling were realised in the Ourilândia do Norte town in order to help locate sites for tube-wells. The apparent resistivity curves were treated and processed considering an isotropic, homogeneous, horizontal layers model, using algorithm EGSLIB/SEV1D and EGSLIB/SEV1DINV program. This permitted to establish approximate geoelectrical models for the subsurface geology of the town.

Two distinct geological zones could be recognized based on interpreted geoelectric sections and available geological information. One of the zones is formed by soil/embankment followed by a soil horizon containing sandy sediments over a sandyclay layer and finally the bedrock. This geological sequence predominated in the town. The other zone is formed by soil/embankment overlying a sandyclay bed which is underlain by granitoids type Rio Maria. This second zone is limited in the central part of the town. The sand and sandyclay stratum possess good potential for water storing.

# 1 - INTRODUÇÃO

A Amazônia é uma região rica em recursos hídricos, devido conter a maior bacia hidrográfica do planeta. Contraditoriamente, o Estado do Pará apresenta problemas sérios de falta d'água para o abastecimento de sua população. Estima-se que dos 5,5 milhões de moradores, apenas 1,9 milhões não sofram com o desabastecimento de água potável.

Segundo PONTES (1995), o Estado do Pará contabiliza 27.828 localidades distribuídas em 136 municípios com 1.535.172 prédios, onde moram em média 3,6 habitantes em cada prédio. Cerca de 50,38% da população paraense mora na zona rural onde a resolução do problema de abastecimento de água torna-se mais difícil, visto que em função da distribuição rarefeita da população, a implantação e/ou ampliação do sistema de abastecimento é mais oneroso e as prefeituras locais não possuem recursos financeiros suficientes. Conforme dados do Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará (IDESP,1988), 84,36% das sedes dos municípios paraenses possuem sistema de abastecimento de água, embora nem toda a população tenha acesso a esse serviço. Considerando-se apenas a população das sedes municipais, o déficit no abastecimento é de 59,73% e quando se considera a população urbana e rural, o déficit aumenta para 64,30%.

Esse déficit no abastecimento, aliado a fatores educacionais da população, repercute na economia e na qualidade de vida dos habitantes. Por exemplo, de conformidade com a Secretaria de Saúde/Sistema Unificado de Saúde (SESPA/SUS), foram registrados no ano de 1993 no Pará, por motivo de interinfecções, 119.785 morbidades e 560 óbitos, sendo 62,14% óbitos em menores de 1 ano. O custo para o tratamento dessas interinfecções, por paciente, é de R\$97,65, perfazendo um total de R\$11.697.005,25 para o estado. Esse custo eleva-se quando se considera a ausência ao trabalho dos pacientes em tratamento clínico, gastos com despesas fúnebres e a perda do homem enquanto agente produtivo.

Em geral, a maioria dos recursos financeiros aplicados no abastecimento de água tem como fonte de captação as águas superficiais, cujos custos de implantação e manutenção são mais caros do que para as águas subterrâneas. Ademais, funcionando como fator de elevação dos custos, pois necessita-se melhorar o tratamento físico-químico e bacteriológico, as fontes superficiais vêm sendo continuamente degeneradas em algumas regiões do estado pela atividade humana. Muitas das vezes, têm-se os centros consumidores localizados muito distantes do ponto de captação, o que implica, também, na elevação dos custos para canalizar

a água até esses centros.

Devido a esses fatores, o interesse pela captação da água existente no subsolo, para os consumos doméstico e industrial, com o intuito de minimizar os custos, tem aumentado substancialmente nos últimos anos. Entretanto, no Pará, a utilização dos recursos hídricos subterrâneos, para substituir ou não as fontes superficiais, tem acontecido de maneira empírica, resultando, muitas vezes, em poços estéreis ou com vazões insuficientes para atender a demanda. Faz-se necessário, portanto, a aplicação de técnicas e métodos científicos ou o desenvolvimento de pesquisas para a localização, avaliação dos recursos disponíveis e exploração racional dos mananciais subterrâneos.

As rochas sedimentares são litologias mais favoráveis ao armazenamento de água no subsolo devido, principalmente, a sua maior porosidade intergranular. Neste ambiente geológico, os métodos geofísicos, especialmente o eletrorresistivo, são muito eficazes permitindo com precisão razoável e dentro de certos limites a identificação das camadas mais promissoras para a captação de água subterrânea. No entanto, em ambientes de rochas cristalinas, que apresentam porosidade intergranular quase nula, o acúmulo da água fica sujeito à presença de estruturas favoráveis, como falhas e fraturas, ou à existência de um manto de intemperismo bastante espesso. Neste tipo de ambiente litológico a prospecção geofísica para extração de água é muito complexa.

O estado do Pará compreende uma área de 1.248.042  $km^2$ , na qual em 30% afloram rochas de origem sedimentar e está assentada a maioria da população paraense. O Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Pará (DGf/UFPa) realizou várias campanhas geofísicas em alguns municípios paraenses localizados sobre regiões sedimentares e, conseqüentemente, possui vasta experiência, vide Tabela 1.1. Nos 70% restantes da área do estado, ocorrem rochas ígneas e metamórficas, onde vivem 14,21% da população paraense. Neste tipo de terreno, o DGf/UFPa começa a desenvolver pesquisas.

Esta tese visa avaliar a possibilidade de se aplicar o método eletroresistivo na prospecção de água subterrânea em terrenos cristalinos, com o intuito principal de identificar as zonas promissoras e os locais mais favoráveis para a perfuração de poços no município de Ourilândia do Norte. Objetivando alcançar este propósito, dividiu-se este trabalho em seis capítulos.

A introdução, no primeiro capítulo, apresenta a motivação, objetivo e organização desta tese.

O segundo capítulo mostra as características gerais da área sob investigação.

Embora os conceitos teóricos inerentes ao método eletroresistivo sejam encontrados em qualquer livro pertinente ao método, resolveu-se incluí-lo no terceiro capítulo, juntamente

com a operação de campo, no intuito de auxiliar a pesquisa de profissionais com pouco ou nenhum contato com estes conceitos.

No quarto capítulo, faz-se um estudo detalhado da modelagem numérica dos dados eletroresistivos visando analisar o comportamento das curvas de sondagens elétricas verticais Schlumberger devido a presença de estruturas encaixadas no manto de intemperismo da rocha, assim como das dificuldades que se tem ao interpretar quantitativamente estas curvas em função das ambigüidades geradas.

O quinto capítulo versa sobre a metodologia utilizada na interpretação quantitativa das SEVs, os resultados desta interpretação e da análise qualitativa da perfilagem elétrica de superfície e, por conseguinte, a caracterização geológica e hidrogeológica da subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte.

As conclusões desta tese e as recomendações para trabalhos futuros constituem os tópicos abordados no sexto capítulo.

Com a finalidade de auxiliar futuros levantamentos geofísicos na região investigada, incluiu-se no Apêndice as curvas das 32 sondagens efetuadas bem como os respectivos resultados da interpretação inversa.

Tabela 1.1 - Prospecção Geofísica para Água Subterrânea no Estado do Pará - Convênio UFPA/FNS DE 1989-1995 (Jul) (extraído de PONTES, 1995).

LOCAL	MUNICÍPIO	REGIÃO DO ESTADO DO PARÁ	UNIDADE TECTÔNICA	SEV	VLF	OBSERVAÇÕES
Maracanã	Maracanã	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Aquíferos salinizados, influência do mar
São Miguel	São Miguel	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Borda da Bacia; ampliação do Sistema de água
Inhangapi	Inhangapi	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Redefinição do manancial para captação de água
Santa Izabel	Santa Izabel	NE	Bacia Sedimentar do Pirabas	X		Redefinição do manancial para captação de água
Mosqueiro	Belém	NE	Bacia Sedimentar do Pirabas	X		Redefinição do manancial para captação de água
Icoaraci	Belém	NE	Bacia sedimentar do Pirabas	X		Ampliação do Sistema de captação de água
Rondon do Pará	Rondon do Pará	NE	Bacia Sedimentar do Maranhão	X		Redefinição de captação de água
Bom Jesus do Tocantins	Bom Jesus do Tocantins	SE	Bacia Sedimentar do Maranhão	X		Substituição de captação de água superficial por subterrânea
Apeú - São Salvador	Vizeu	NE	Bacia Sedimentar Bragança-Vizeu	X		Influência de salinização das águas subterrâneas
Mãe do Rio	Mãe do Rio	NE	Bacia Sedimentar Maranhão-Pirabas	X		Instalação Sistema de água
Irituia	Irituia	NE	Bacia Sedimentar Maranhão-Pirabas	X		Ampliação do Sistema de água
Curionópolis	Curionópolis	SE	Craton Amazônico	X	X	Instalação do Sistema de água
Alter do Chão	Santarém	NW	Bacia Sedimentar do Amazonas	X		Instalação do Sistema de água
Rurópolis	Rurópolis	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Ampliação do Sistema de água
Uruará	Uruará	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Implantação do Sistema de água
Pacajá	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Anapu	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Ampliação do Sistema de água
Bom Jardim	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Nazaré	Pacajá	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Tuerê	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Maracajá	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Belo Monte	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Bela Vista	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Implantação do Sistema de água
Novo Repartimento	Novo Repartimento	NW	Craton Amazônico	X	X	Ampliação do Sistema de água
Brasil Novo	Brasil Novo	NW	Borda Sul da bacia do Amazonas	X	X	Ampliação do Sistema de água
Altamira	Altamira	NW	Borda Sul da Bacia do Amazonas	X	X	Substituição do manancial superficial por subterrâneo
São João do Araguaia	São João do Araguaia	SE	Faixa Araguaia	X	X	Ampliação do Sistema de água
Diamante	São João do Araguaia	NE	Faixa Araguaia	X	X	Implantação do Sistema de água

## 2 - CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA SOB ESTUDO

### 2.1 ASPECTOS HISTÓRICOS E GERAIS

O processo de ocupação do atual município de Ourilândia do Norte teve início em 1980, ocasionado pela implantação do Projeto Tucumã, desenvolvido pela construtora Andrade Gutierrez, numa área de 400.000 hectares no município de São Félix do Xingu. A maior parte dessa área deu origem ao município de Tucumã e o restante foi dividido entre os municípios de Ourilândia do Norte e São Félix do Xingu.

O Projeto Tucumã consistia de vários lotes divididos em lotes urbanos, agrícolas, para a formação de chácaras e para o desenvolvimento da pecuária. As famílias para serem assentadas nessas áreas passavam por uma seleção. Nessa seleção, bastante rigorosa, tinham várias exigências dentre, as quais uma de ordem econômica. As famílias rejeitadas por causa daquele item principalmente, ou que lá chegavam para tentar se estabelecer no Projeto, não tendo para onde ir, já que a cidade mais próxima era Xinguará, distante 160 km, construíram várias barracas do lado de fora e nas proximidades do portão do Projeto Tucumã. Iniciou-se, assim, a currutela. Porque a Andrade Gutierrez mandou construir uma guarita no portão principal do Projeto, esse embrião do município ficou conhecido pelos nomes de Gurita, Guarita ou Guaritai. A origem desse último nome tem várias versões, numa das quais ele teria surgido devido à existência da Guarita I no portão principal, que muitos colonos, por não saberem identificar o número um em algarismo romano, acabavam chamando Guaritai.

O nome geográfico de Ourilândia foi escolhido pelo médico Ari Luiz Braga juntamente com o comerciante Ernesto Moura, devido a existência de vários garimpos de ouro na região.

A população do município é estimada em 27.552 habitantes distribuídos sobre uma área de 33716,54  $km^2$ , o que confere ao município uma baixa densidade demográfica, inferior a 1 hab/ $km^2$ , apesar de apresentar nos últimos cinco anos uma elevada taxa de crescimento populacional, 22,2% ao ano, em função do intenso fluxo migratório que se deslocou para a região, em busca de novas terras e do extrativismo mineral (ouro) e vegetal (madeira).

Rede de água e esgoto e coleta de lixo são serviços inexistentes no município. O procedimento utilizado pela população para solucionar a falta de saneamento básico, na época da coleta de dados, era jogar o lixo na rua, a céu aberto, queimá-lo e/ou enterrá-lo no fundo do quintal das residências sem qualquer tipo de tratamento, usar fossas negras e desviar as

águas servidas para o leito das ruas. Há um número muito pequeno de residências com fossas sépticas, todas localizadas na sede do município. Os moradores que têm um nível de renda mais elevado utilizam poços artesianos construídos pela prefeitura nos prédios públicos, enquanto que os moradores de baixa renda ou localizados na zona rural consomem água de poço tipo "cacimba". Este tipo de poço, muito freqüente, para captação de água para o consumo humano, facilita a proliferação de doenças, pois não existe qualquer tipo de tratamento da água antes de ser consumida e pela facilidade desses poços serem contaminados, devido a sua proximidade com áreas onde se localizam dejetos humanos, criação de animais, etc.

A malha viária da sede do município consiste de cinco avenidas, 40 ruas e 50 passagens, a maioria ainda em leito natural. A avenida das Nações, trecho da Pa-279, que corta o município, é a área onde se concentram o comércio, os serviços e algumas residências. O transporte intermunicipal e interestadual são realizados pelas empresas de onibus Transbrasiliana e Rodobens. Estas empresas mantêm linhas regulares e diárias para os municípios de Imperatriz, Marabá, Conceição do Araguaia, Goiânia e Belém.

A malha rodovária que serve o município é precária, principalmente no período chuvoso. As estradas vicinais existentes não oferecem condições de trafegabilidade e segurança, o que dificulta o acesso a zona rural. Esta situação compromete a distribuição dos produtos agrícolas e, conseqüentemente, o crescimento do município.

A falta de saneamento básico, fluxo migratório sem nenhum controle e a existência de muitos garimpos são os principais causadores e propagadores das doenças de maiores incidências no município, tais como: malária, diarreias infecciosas e parasitárias, hanseníase, leishmaniose, hepatite e desidratação. O município possui uma Unidade Mista de Saúde ligada à Secretaria de Saúde Pública (SESPA), dois hospitais particulares, duas clínicas odontológicas e 37 farmácias e drogarias.

A Secretaria de Estado de Educação (SEDUC) contabilizava até 1991 o total de 50 escolas compondo o sistema de ensino que funciona com o primeiro e segundo graus. Desse total, cinco escolas se localizam no distrito sede e 40 na zona rural. O ensino de segundo grau esta restrito a sede do município.

Na sede do município existe sistema de distribuição de energia elétrica fornecido pela centrais elétricas do Pará (CELPA). Esta distribuição não ocorre às 24 horas do dia e não atende a toda população local. A zona rural não apresenta sistema de iluminação pública, registrando-se casos isolados de algumas residências que apresentam motores geradores em algumas localidades. A maioria da população utiliza-se de lampião e/ou outra forma de iluminação.

No setor de telecomunicações, o município possui um posto dos Correios e Telegrafos funcionando no distrito sede. As cartas são recebidas e enviadas via terrestre para Belém, que se encarrega de distribuir para os destinatários. Na zona rural na localidade de Gradaús existe um posto dos Correios Rural (PCR) e em Cumaru uma agência postal.

A sede municipal tem um posto telefônico da TELEPARÁ, um radio amador, uma estação receptora de canais de tv via satélite. O município não possui estação de rádio e as recepções de Belém e Marabá são fracas.

## 2.2 LOCALIZAÇÃO E ACESSO

O município de Ourilândia do Norte localiza-se na mesorregião do Sudeste paraense, limitando-se ao Norte com os municípios de Parauapebas e de Tucumã; ao Sul, com os municípios de São Félix do Xingu e de Santana do Araguaia; a Leste, com os municípios de Santa Maria das Barreiras, de Santana do Araguaia, de Rio Maria, de Redenção e de Parauapebas, e a Oeste, com o município de São Félix do Xingu

Contida na microrregião de São Félix do Xingu, Ourilândia do Norte tem sua sede municipal localizada pelas coordenadas geográficas  $06^{\circ}46'30''$  de latitude sul e  $51^{\circ}5'25''$  de longitude oeste de Greenwich. Por via rodoviária, dista 8 km de Tucumã, 140 km de São Félix do Xingu, 160 km de Xinguará e 900 km da capital do Estado.

O acesso aéreo pode ser feito através da companhia de aviação Brasil Central que realiza vôos regulares da capital do estado para a cidade de Tucumã, uma vez que não há campo de pouso no município de Ourilândia do Norte. Várias pistas de aviação de pequeno porte, usadas por fazendeiros e/ou garimpeiros, são comuns na área. Em vôo direto gasta-se em média duas horas. Caso haja conexão, este tempo é acrescido no mínimo em uma hora e meia

A principal via de acesso rodoviária é a Pa-279, uma estrada de terra em conclusão, que permite a ligação do município com a cidade de Xinguará, na Pa-150, de onde é possível alcançar a rede rodoviária nacional. Na Pa-279, tem-se uma complexa malha de estradas vicinais que atende aos interesses dos fazendeiros, agricultores, garimpeiros e madeireiros da região. Dentre essas, destacam-se as estradas denominadas de Morada do Sol, do Cuca, da Fazenda Belauto, da Impar, da Fazenda Bannach e da Colônia Tancredo Neves. Das estradas construídas pelas empresas de mineração as mais importantes são a estrada do São Raimundo e a estrada do Mocambo. A maioria destas rodovias apresentam precárias condições de trafegabilidade e são parcialmente obstruídas durante o período chuvoso. Através da Pa-150, chega-se ao ancoradouro de Arapari, no município de Barcarena, após a travessia de balsa do

rio Moju. Em Arapari, faz-se outra travessia, também de balsa, no caso de viatura pois, para o transporte de passageiro são utilizados barcos específicos até Belém. O tempo consumido no percurso todo, no caso de ser feito de ônibus, é de aproximadamente um dia, e no caso de automóveis diminui para dez horas.

Não se consegue chegar a sede municipal através de via fluvial, pois não existe no município curso de água com ligação para a cidade de Ourilândia do Norte, não obstante a existência do rio Fresco, importante afluente do rio Xingu, que atravessa o município. A navegabilidade no rio Fresco só é possível através de embarcações de pequeno porte. Trata-se de um rio com inúmeras cachoeiras e corredeiras apresentando grande desnível na lâmina de água entre as estações secas e chuvosas. Estão previstas as construções de hidrelétricas ao longo do rio Xingu. Estas hidrelétricas inundarão as margem do rio Xingu à montante de São Félix do Xingu e o baixo curso do rio Fresco, modificando enormemente a hidrografia da região. A Figura 2.1 mostra o mapa de acesso ao município.

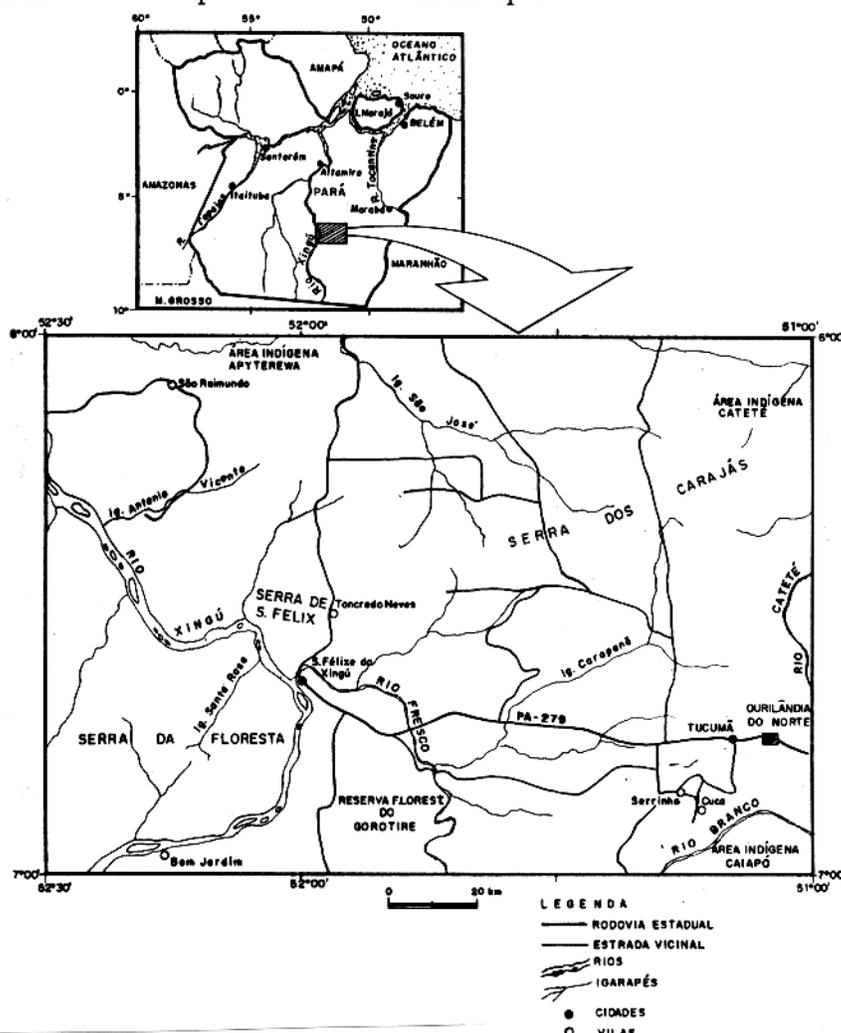


Figura 2.1 - Mapa de localização e acesso

### 2.3 FISIOGRAFIA

O município de Ourilândia do Norte está localizado numa área de clima do tipo Am, de acordo com a classificação de Köppen, que se baseia principalmente nas precipitações pluviométricas e temperaturas. O tipo climático Am é descrito como um tropical úmido de monção com precipitação excessiva durante alguns meses, o que compensa a ocorrência de meses com precipitações inferiores a 60 mm. De acordo com este padrão climático, tem-se uma precipitação média anual de 2.000 mm, sendo o trimestre de junho a agosto o mais seco do ano. A temperatura média mínima anual varia de 10°C a 26°C e a média máxima em torno de 25°C a 35°C, com a umidade relativa média anual de 85%.

A área do município é revestida por uma espessa cobertura vegetal, caracterizada por uma floresta tropical com grande número de espécies vegetais, muitas das quais de valor econômico. De acordo com VELOSO et al. (1974), ocorrem os seguintes tipos de vegetais:

- Floresta Aberta - Predomina na área do município. Nessas regiões o cocal e o cipóal aparecem intercalados nas depressões mais rasas com babaçuzais ( *Orbigya Martiana*). As árvores de grande porte são raras, destacando-se as castanheiras.
- Floresta Mista - Caracteriza-se por uma vegetação densa e baixa, lembrando o cerrado.
- Floresta Densa Sub-montana acidentada - Sobressaem-se as árvores de médio porte, bastante uniforme, onde predominam as quarubas ( *Vochysias* sp. e *Erisma* sp.). Nos vales encontram-se as castanheiras (*Bertholetia Excelsa*), que se destacam e caracterizam o conjunto.

Uma parte da vegetação nativa, principalmente as situadas ao longo das vias rodoviárias e fluvias, foi devastada para ser ocupada por empreendimentos agropecuários financiados pelo governo Federal. Alguns desses empreendimentos não vingaram e deram origem as chamadas "capoeiras".

De conformidade com o Mapa Exploratório de Solos de ROSATELLI (1974) a folha São Félix do Xingu apresenta os seguintes tipos pedológicos:

- Podzólico Vermelho-Amarelo - Este tipo de solo encontra-se amplamente representado na área da folha. São solos bem desenvolvidos, bem drenados, ácidos apresentando um horizonte A1 mineral assentado sobre um horizonte A2 ligeiramente descolorido. O horizonte B vermelho amarelo, profundo, com concentração de argila a baixa atividade ( a atividade das argilas esta relacionada à capacidade de troca de cátions da fração

mineral, subtraída a contribuição da matéria orgânica. Baixa atividade significa valor menor que 24 meq/100 g de argila, após correção referente ao carbono), havendo boa destinação textural entre os horizontes A e B.

- Podzólico Vermelho-Amarelo Equivalente Eutrófico - Outro tipo de solo muito comum na área da folha. O perfil deste solo apresenta o horizonte B textural não hidromórfico, com argila de baixa atividade, saturação de base alta (exprime o estado de saturação ou dessaturação do material constitutivo do solo, caracterizado pela proporção de cátions básicos trocáveis em relação à capacidade de troca de cátions. Saturação baixa indica valores inferiores a 50%), maior que 50% no horizonte Bt e baixa saturação com alumínio. Apresenta o horizonte A fraco ou moderado, sendo geralmente pouco espesso e Bt com profundidade moderada e com cerosidade normalmente desenvolvida.
- Terra Roxa Estruturada Eutrófica - Este tipo de solo encontra-se na porção meridional e ocidental da folha. Trata-se de solos de textura geralmente argilosa, com perfil A, B e C, profundidade média em torno de 1,5 m. O horizonte A apresenta coloração que varia de bruno avermelhado escuro a vermelho escuro acinzentado, textura franco-argilo arenosa ou argilosa. O horizonte B apresenta uma cor que varia entre o vermelho escuro acinzentado e vermelho escuro. Possui textura pertencente à classe das argilas.
- Solos Litóticos e Distróficos - São solos pouco desenvolvidos, com o horizonte A repousando diretamente sobre a rocha sã ou mesmo sobre um horizonte C em evolução, bem drenados, de granulometria variável, argila de atividade baixa e saturação de base baixa.
- Solos Concrecionários Lateríticos - Aparecem no topo de algumas elevações. Solos medianamente profundos formados de uma mistura de partículas mineralogicamente finas e concreção de um arenito ferruginoso de diâmetro variável. Os perfis podem apresentar-se completamente argiloso ou argilo-arenoso no horizonte A e argiloso no B, podendo ocorrer também solos com textura média.
- Laterita Hidromórfica - Presente também no topo de algumas elevações. Este tipo litológico caracteriza-se por ser hidromórfico, moderadamente profundo, moderada e imperfeitamente drenado, com argila de baixa atividade, textura média ou argilosa e proporções variáveis de cascalho laterítico.
- Solos Aluviais Eutrófico e Distrófico - Tipo de solo predominante nas zonas periodicamente inundadas da folha. Solos pouco desenvolvidos, moderadamente profundos e drenados de composição granulométrica variável, argila de baixa atividade e saturação de base baixa ou alta (Eutrófico ou Distrófico respectivamente).

A quase totalidade da área da folha São Félix do Xingu está contida na bacia do médio Xingu e ao baixo curso do rio Fresco demonstrando que os padrões de drenagem resultam do interrelacionamento entre os diversos tipos rochoso, elementos estruturais e a evolução geomorfológica. As ramificações irregulares dos cursos de água, em qualquer direção, definem o padrão dendrítico predominante na área da folha.

A rede de drenagem caracteriza-se por apresentar uma média a boa relação de simetria, observada com maior ênfase, nas cabeceiras do igarapé São Sebastião e na bacia do igarapé Carapanã.

A maioria dos cursos de água apresenta média densidade, embora ocorram padrões com alta densidade, conforme observado na região da serra do Eldorado, assim como, padrões de baixa densidade, como exemplificado na porção central da folha. A maior parte dos cursos de água que apresentam a mais alta densidade esta localizada em regiões de rochas supracrustais, enquanto que os de mais baixa densidade estão associados as zonas do Complexo Xingu e do Granodiorito Rio Maria.

Os cursos de água apresentam um padrão definido por uma baixa angulosidade, possuindo trajetoria bem definida. Os ângulos de confluência entre tributário/principal são de alto valor no baixo e médio cursos e agudos em direção as nascentes.

A disposição dos cursos de água exhibe uma regular a boa relação de linearidade, embora em alguns locais, como no rio Fresco à montante da foz do igarapé Carapanã e na bacia dos afluentes do rio Xingu, a disposição seja sinuosa.

Embora predomine o padrão dendrítico, em alguns lugares ocorrem padrões anômalos, fruto dos fatores lito-estruturais. Assim, observa-se o padrão radial nas regiões do maciço granítico Suíte Intrusiva Velho Guilherme; o padrão regular ocorre nos domínios do Grupo Uatumã, onde são evidentes os efeitos distensivo do Proterozóico Médio; o padrão anastomosado é observado ao longo do curso do rio Xingu, nos domínios do Quaternário Aluvionar; o padrão paralelo apresenta exemplares na região da serra do Eldorado e na bacia do igarapé Aquiri.

## 2.4 GEOLOGIA

### 2.4.1 Geologia Regional

O município de Ourilândia do Norte situa-se dentro do domínio da Folha São Félix do Xingu ( SB.22 - Y - B), que está localizada na porção meridional do estado do Pará, limitada pelos paralelos 6°00' e 7°00' S e pelos meridianos 51°00' e 52°30' W, constituído por rochas e elementos estruturais do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará, do Cinturão de Cisalhamento Itacaiúnas e da Bacia do Médio Xingu, além de intrusões ácidas e basico-ultrabásicas proterozóica, intrusões mesozóicas e coberturas sedimentares cenozóicas. O Cinturão Itacaiúnas contém rochas do Complexo Pium, gnaisses diversos migmatizados do Complexo Xingu, granitos estratóides da Suite Plaqué e uma seqüência metavulcano-sedimentar pertencente aos Grupos Sapucaia, Aquiri, São Sebastião e São Félix. Segundo COSTA et al.(1993), sua estruturação é definida por um sistema imbricado de cavalgamento dúcteis e por segmentos dos sistemas transcorrentes Carajás e Araraquara, caracterizado nos Grupos Aquiri, São Sebastião e São Félix. A estratigrafia do Proterozóico Médio é constituída por rochas vulcânicas do grupo Uatumã, e sedimentares da Formação Triunfo, corpos máficos-ultramáficos (Suíte Cateté) e graníticos (Suíte Velho Guilherme). A geologia estrutural do Proterozóico Médio é caracterizada por falhas normais e transcorrentes de direção NW-SE e NE-SW, respectivamente, produzidas por esforços distensivos com direção NE-SW.

A sede do município de Ourilândia do Norte está situada no domínio geológico do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará, terreno formado no arqueano superior composto por granitóides e rochas supracrustais com direção WNW-ESE e NW-SE, e prolongando-se no sentido do município de Rio Maria, no sul do Pará. A estruturação interna do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará é caracterizada por um conjunto anastomosado de zonas de cisalhamento, representada por cavalgamento dúcteis e zonas transcorrentes, atuando com maior intensidade nas rochas supracrustais e incipientemente gravadas nos granitóides (COSTA et al., 1993).

Os cavalgamentos dúcteis predominam no terreno e, segundo suas orientações, podem ser divididos em dois grupos. No âmbito da sede do município de Ourilândia, os cavalgamentos ocorrem com direção NW-SE e localmente para E-W, com ângulos de mergulho forte preferencialmente para NE e às vezes para SW. Nas rochas supracrustais, os cavalgamentos são simbolizados por uma foliação milonítica que, dependendo da composição da rocha, pode apresentar-se na forma de xistosidade ou foliação de transposição paralela ao aleitamento e bandeamento composicional, definidos por faixas de unidades litológicas distintas. A lineação de estiramento, caracterizada sobretudo por bastões de quartzo nas diversas litologias e seixos

estirados em rochas conglomeráticas, apresenta direção segundo NE-SW, com mergulho para NE e os indicadores de movimento revelam uma cinemática dextral (COSTA et al., 1993).

As zonas de transcorrência, que seccionam os cavalgamentos e são representadas por uma foliação milonítica sub-vertical e lineação de estiramento sub-horizontal na direção EW, ocupa a porção meridional do terreno com direção E-W. Em alguns tipos litológicos do Grupo Tucumã a foliação milonítica é definida pela alternância regular de bandas pélicas e quartzosa e/ou quartzofeldspática, desenhando um bandamento composicional. As rochas supracrustais (metabásicas e metassedimentos) definem o Grupo Tucumã, e os granitóides são denominados de Granodiorito Rio Maria, sendo mais precisamente sobre estas que se localiza a sede do município de Ourilândia do Norte.

Dentro do quadro da folha São Félix do Xingu, o Granodiorito Rio Maria ocupa a porção sudeste, formando dois corpos separados por rochas do Grupo Tucumã, grupo este que agrega as unidades metassedimentares do Greenstone-Belts e que mantém relações de contato discordante e intrusivo com as rochas do referido grupo. Em escala regional, o Granodiorito Rio Maria é cortado por maciços graníticos (Velho Guilherme), por pequenos corpos máficos e ultramáficos (Suíte Intrusiva Cateté), por diques de riolitos (Formação Iriri) e de diabásio (Unidade Cururu). A Figura 2.2 mostra as litoestruturas do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará.

#### 2.4.2 Geologia Local

Nos limites da área estudada, os tipos litológicos dominantes são granitóides mesocráticos, holocristalinos de cores cinza média à escura, por vezes esverdeadas, com granulações variável no range fanerítico, com predominância do aspecto equigranular. Segundo MACAMBIRA & VALE (CPRM, no prelo) as rochas desta unidade apresentam a seguinte constituição mineralógica: plagioclásio, microclina, quartzo, biotita e orblenda, podendo também conter epidoto, clorita, titanita, sericita, opacos, alanita, apatita e zircão, em ordem de decréscimo em abundância. Quando estas rochas são submetidas aos processos intempéricos, espera-se que o produto resultante seja constituído predominantemente por argila, devido a maior quantidade de plagioclásio, além de areia, dada a proporção de quartzo na composição mineralógica da rocha.

A textura é predominantemente hipidiomáfica granular, mas este arranjo textural foi destruído ou parcialmente modificado por uma tectônica de caráter predominantemente rúptil, produzindo fraturamento de diferentes dimensões, que estão em sua maioria preenchidos por quartzo, além de microzonas de cisalhamento. Medidas efetuadas em diferentes afloramento

dentro da cidade indicam que o "trend" dominante na tectônica rúptil desta unidade tem atitude em torno de N55E/subvertical. Em determinados afloramentos, como o da rua Maranhão esquina com a rua República do Brasil, além da tectônica rúptil, ocorrem indícios de tectônica dúctil revelados por xenólitos alongados segundo o mesmo "trend" da tectônica rúptil. .

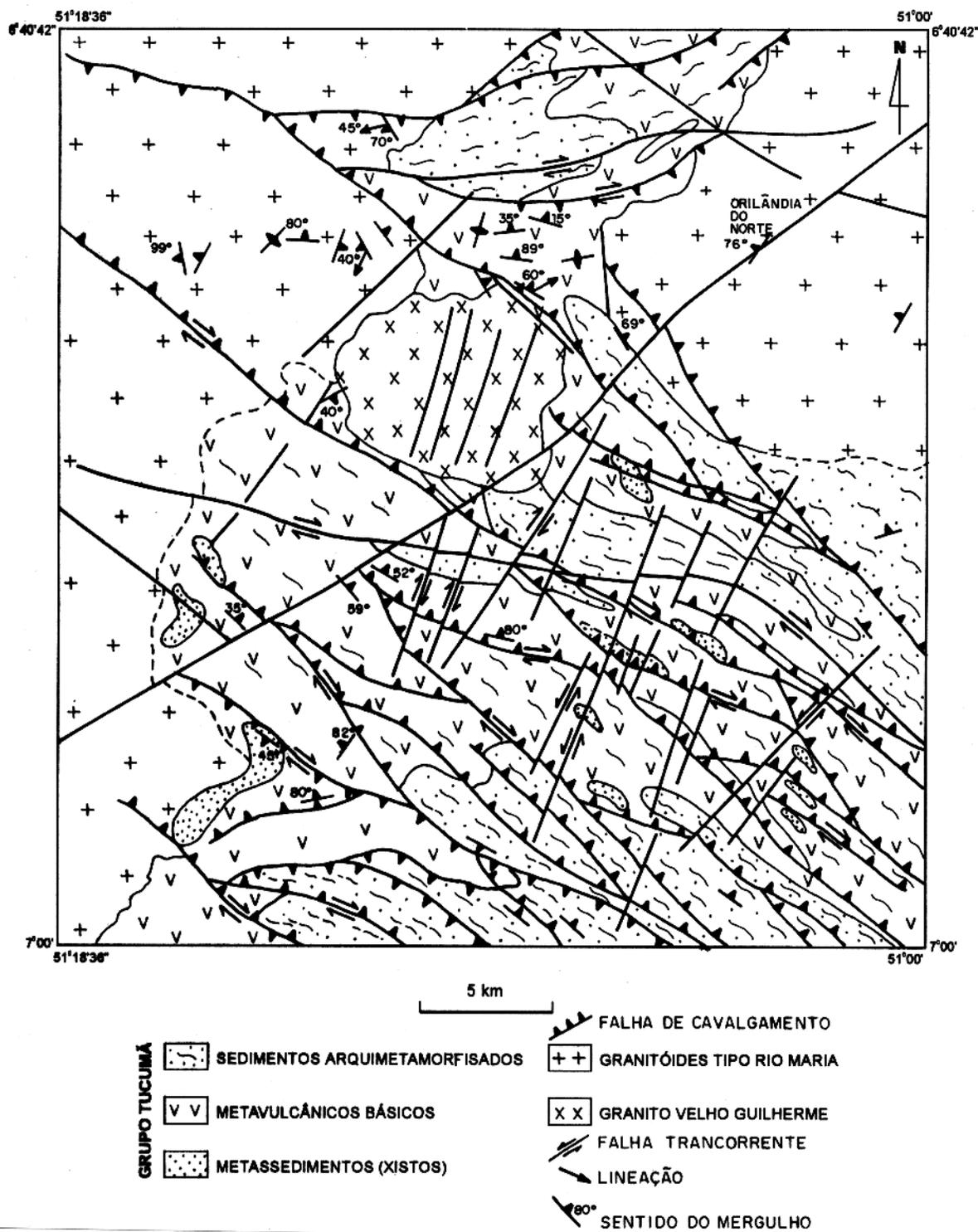


Figura 2.2 - Litoestruturas do Terreno Granito-Greenstone do Sul do Pará, (após COSTA et al., 1993)

## 3 - FUNDAMENTOS TEÓRICOS E OPERAÇÃO DE CAMPO

### 3.1 MÉTODO ELETRORESISTIVO

O método geofísico de eletroresistividade consiste basicamente na aplicação de uma corrente elétrica contínua ou alternada de baixa frequência (inferior a 10Hz) no subsolo através do contato galvânico em dois pontos, denominados A e B (eletrodos de corrente), e medir a resposta em forma de diferença de potencial (voltagem), através também do contato galvânico em dois outros pontos do terreno, designados de M e N (eletrodos de potencial).

O circuito de emissão, cujo objetivo é fazer circular no subsolo uma corrente elétrica, é constituído por uma fonte de corrente contínua ou de baixa frequência, pelos eletrodos A e B enterrados na superfície do terreno, que injetam a corrente na subsuperfície, ligados respectivamente aos polos positivo e negativo da fonte através de um fio condutor isolado, para evitar fugas de corrente; um amperímetro ligado em série ao circuito, possibilitando o conhecimento do valor da corrente circulante na subsuperfície e o solo.

O emprego de aparelho com baixa frequência, visa minimizar o efeito do acoplamento eletromagnético que ocorre com maior intensidade quando se usa corrente alternada. Este efeito corresponde a uma atenuação da corrente elétrica com a profundidade, cresce com a condutividade do terreno e com o aumento da frequência da corrente elétrica. Por isso as correntes alternadas são amortecidas mais rapidamente que as contínuas, e este decréscimo da densidade de corrente com a profundidade leva ao decréscimo da profundidade de investigação (ORELLANA, 1972)

O circuito de recepção ou de medida é composto de um potenciômetro ou voltímetro e dos eletrodos M e N encravados na superfície do solo. Os eletrodos são conectados ao potenciômetro ou voltímetro por meio de um fio isolado com o intuito de se evitar tensões indesejadas, tais como polarização de eletrodos, polarização espontânea e outras. No potenciômetro ou voltímetro faz-se a leitura da medida da diferença de potencial criada entre os pontos M e N. Figura 3.1.

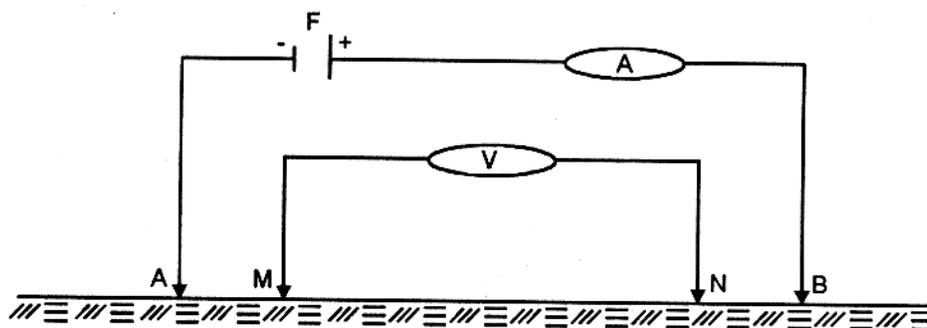


Figura 3.1 - circuitos do método eletroresistivo

Com o conhecimento do valor da corrente elétrica injetada, da diferença de potencial obtida como resposta e da posição relativa entre os pontos A, B, M e N é possível estimar-se a resistividade dos materiais de subsolo. A resistividade elétrica de um material condutor pode ser entendida como a resistência elétrica ( $R$ ) de uma porção desse material de comprimento ( $L$ ) unitário e seção transversal ( $S$ ) unitária. Assim a resistividade elétrica fica sendo função apenas do parametro físico ( $R$ ) do material condutor possibilitando, com isso, identificar-se as diferentes camadas geológicas de um subsolo estratificado.

Sendo o meio homogêneo a resistividade é a mesma qualquer que seja a posição relativa dos eletrodos A, B, M e N e da lei de Ohm, sabe-se que a resistividade elétrica a partir de dois eletrodos de corrente na superfície do terreno para um meio homogêneo e isotropico é dada pela formula.

$$\rho = \frac{k\Delta V}{I} (\Omega.m) \quad (3.1)$$

onde:

$\Delta V$  = diferença de potencial elétrico entre M e N

$I$  = corrente elétrica aplicada entre A e B

$K$  = função da disposição dos eletrodos A, B, M e N,

denominado por este motivo de fator geométrico, dado por

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{AN} - \frac{1}{BM} + \frac{1}{BN}} (m) \quad (3.2)$$

sendo AM, AN, BM e BN as distância entre os eletrodos

Entretanto, o ambiente geológico apresenta uma distribuição de resistividade que pode variar tanto vertical como lateralmente. Devido a isto, os valores de resistividade obtidos não representam os valores verdadeiros das resistividades dos materiais de subsuperfície, embora estejam qualitativamente relacionados a eles. O que se obtem são valores denominados

de resistividade aparente. Para um subsolo em que a resistividade varie apenas verticalmente, isto é, constituído por “n” camadas com resistividades  $\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_n$  e espessuras  $h_1, h_2, \dots, h_{n-1}$ , a resistividade medida é a resistividade aparente. Assim a formula 3.1 fica :

$$\rho_a = \frac{K \Delta V}{I} (\Omega.m) \quad (3.3)$$

A partir da interpretação do comportamento dessa função é que se pode chegar a estabelecer os parâmetros elétricos e geométricos-estruturais que caracterizam a seção geoeétrica de uma área particular investigada.

Quando se opera com o método eletroresistivo sobre um meio heterogêneo a profundidade de investigação depende, além de outros fatores, da distância entre os eletrodos A e B. Dessa maneira para uma pequena abertura de AB, a corrente flui em subsuperfície a uma profundidade pequena e a resposta, medida em forma de voltagem, tem forte influência dos materiais mais superficiais. Quando a camada ou corpo investigado encontra-se mais profundo, deve-se aumentar o espaçamento entre A e B.

Dentre os métodos geofísicos, o método eletroresistivo tem sido o mais empregado na busca de água subterrânea por apresentar os melhores resultados, os menores custos e simplicidade operacionais.

A aplicação do método na procura de lençóis subterrâneos visa basicamente definir os locais para a perfuração de poços que possibilite a extração da água. Esse objetivo é alcançado quando, a partir das medidas de resistividade aparente, reconhece-se a existência do aquífero, estima-se sua profundidade e busca-se estabelecer sua continuidade lateral.

O método tem se mostrado eficiente na procura de mananciais subterrâneos em formações sedimentares e de aluvião, porém, com razoável sucesso na prospecção de água localizada em falhas e fraturas ou no manto de alteração de rochas cristalinas.

Comumente são utilizados dois processos para avaliação da resistividade aparente em subsuperfície: A sondagem elétrica vertical (SEV) e o caminhamento elétrico ou perfilagem elétrica de superfície.

### 3.1.1 Sondagem Elétrica Vertical

Na sondagem elétrica vertical busca-se estabelecer a distribuição de resistividade elétrica com a profundidade sob a vertical que passa por um determinado ponto da superfície terrestre, denominado de ponto de sondagem, deslocando-se simetricamente os eletrodos de corrente e de potencial em relação a esse ponto.

Uma das condições para o acúmulo de água subterrânea em ambientes cristalinos é a existência do manto de alteração da rocha bastante espesso. Tendo em vista este fato, a utilização das sondagens elétricas verticais na prospecção de água em regiões cristalinas têm como objetivo identificar os locais promissores para a extração de água do subsolo. Estes pontos devem apresentar o manto de intemperismo bastante espesso, saturado e com o maior conteúdo de areia. Estes dados são inferidos da comparação dos valores de espessura e resistividade das curvas de sondagens interpretadas.

Algumas configurações geométricas pré-estabelecidas entre as posições relativas dos eletrodos A, B, M e N são consagradas na prática da sondagem elétrica vertical e entre elas se destacam as posições nas quais se têm  $AM = MN = NB$  (arranjo Wenner) e  $AB \gg MN$  (arranjo Schlumberger).

No dispositivo Wenner os eletrodos de potencial e de corrente são dispostos em linha e simetricamente em relação ao centro do arranjo, sendo a distância entre os eletrodos adjacentes iguais entre si. Este fato impõe, na prática, que os quatros eletrodos sejam expandidos em relação ao centro do arranjo de modo que a separação entre eletrodos adjacentes se mantenha uniforme (LUIZ & SILVA, 1983). O uso dessa configuração eletródica tem sido feita, geralmente, com os eletrodos MN localizados entre os eletrodos de corrente, Figura 3.2.

O fator geométrico do arranjo é dado por:

$$K_w = 2\pi a \quad (3.4)$$

Sendo  $a$  o espaçamento entre dois eletrodos adjacentes quaisquer

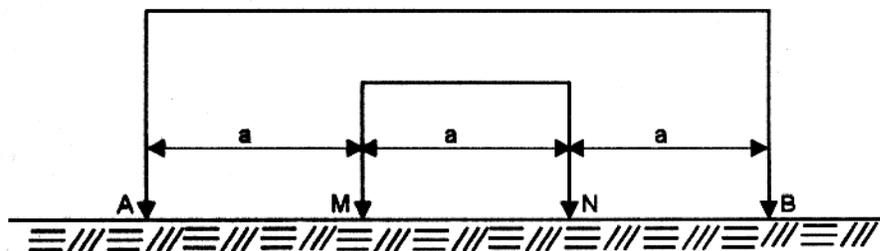


Figura 3.2 - Arranjo Wenner

No arranjo Schlumberger os eletrodos A, B, M e N são dispostos de forma colinear e geralmente os eletrodos de potencial são colocados entre os de corrente, Figura 3.3. A condição imposta de que a distância entre os eletrodos de corrente seja muito maior do que o

espaçamento entre os eletrodos de potencial, sendo que este no limite deve tender a zero, surge do fato deste arranjo ter sido construído teoricamente para medir o campo elétrico no centro do dispositivo. Na prática, porém, a comparação entre essas separações deve ser tal que o erro introduzido, posto que é impossível fazer-se a distância entre os eletrodos M e N igual a zero, seja inferior a 5%.

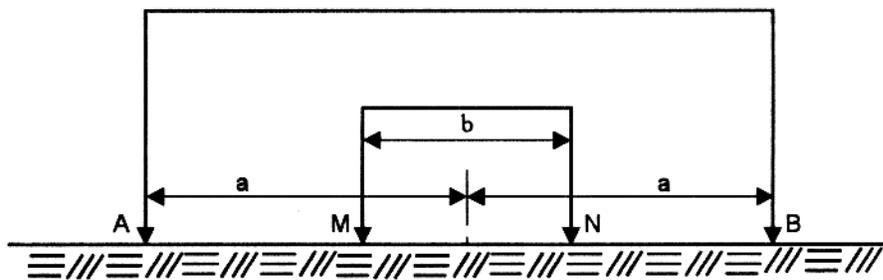


Figura 3.3 - Arranjo Schlumberger Colinear Simétrico

O fator geométrico do arranjo para uma disposição colinear e simétrica dos eletrodos, sendo esta a configuração usual na prática do trabalho de campo com sondagem elétrica vertical é dado por:

$$K_s = \pi \left( \frac{a^2}{b} - \frac{b}{4} \right) \quad (3.5)$$

onde:

a= espaçamento do arranjo=AB/2

b= separação entre os eletrodos de potencial

Teoricamente nas SEVs com o arranjo Schlumberger apenas os eletrodos de corrente precisariam ser deslocados, pois a condição de  $AB \gg MN$  estaria sempre satisfeita. Entretanto na prática, a distância MN é aumentada periodicamente porque a partir de uma determinada distância grande de AB a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), dependendo da sensibilidade do aparelho, torna-se tão pequena que não se consegue medi-la com precisão. Com o aumento de MN surgem pontos de descontinuidades na curva de resistividade aparente em virtude das variações laterais de resistividade nas proximidades da superfície do terreno. Para se corrigir esta descontinuidade são necessárias repetir-se pelo menos duas medidas com a nova distância MN. Este procedimento é denominado de “embreagem”.

Comparações entre os arranjos supracitados foram feitas, no sentido de avaliar as respostas desses arranjos para várias situações teóricas, com ou sem a presença de fontes de

ruídos, assim como suas aplicabilidades no trabalho de campo. Estas análises foram feitas considerando-se os dois procedimentos básicos do método eletroresistivo.

Para o levantamento com sondagem elétrica vertical, o arranjo Schlumberger é o preferido por ser operacionalmente mais simples, não se necessita deslocar os quatro eletrodos simultaneamente a cada medida executada, econômico e tecnicamente melhor, pois a qualidade das curvas de sondagem obtidas são superiores devido a menor sensibilidade do arranjo aos efeitos de variações superficiais do solo nas circunvizinhança dos eletrodos de potencial, que têm grande influência nas medidas das resistividades aparentes.

### 3.1.2 Caminhamento ou Perfilagem Elétrica

Neste tipo de investigação geológica do subsolo todos os eletrodos são deslocados lateralmente na superfície do terreno, mantendo-se a distância pré-fixada entre eles constante. Este processo mostra a variação lateral da resistividade aparente a uma determinada profundidade.

Um dos aspectos condicionantes do armazenamento de água subterrânea em terrenos cristalinos está relacionado à presença de falhas e fraturas na rocha sã. Sob esta condição os trabalhos de perfilagem elétrica sobre ambientes cristalinos visam identificar a existência de zonas intensamente fraturadas ou falhadas. Estas estruturas, reveladas pela resistividade, são promissoras se estiverem impregnadas de água.

Diversos tipos de arranjo podem ser usados para medir a variação lateral de resistividade aparente, tais como, Schlumberger, Wenner e Dipolo-Dipolo. A escolha do dispositivo eletródico depende da estrutura pesquisada.

No arranjo Dipolo-Dipolo os eletrodos podem ser colocados em várias posições relativas entre si, sendo a mais utilizada a configuração axial, em que os eletrodos A, B, M e N são colineares. Figura 3.4

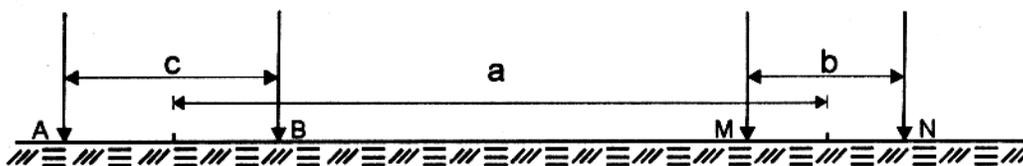


Figura 3.4 - Arranjo Dipolo-Dipolo

Teoricamente a distância entre os eletrodos de corrente e o espaçamento entre os eletrodos de potencial devem ser feitas muito pequenas, respectivamente  $c$  e  $b$  na Figura 3.4, quando comparadas com a distância que separa seus centros,  $a$  na Figura 3.4. Essa condição aproxima os eletrodos de um comportamento dipolar de maneira que a teoria dos dipolos elétricos possa ser aplicada no arranjo. No entanto, na prática, o diminuto espaçamento dos eletrodos de corrente não consegue produzir diferença de potencial capaz de ser captada pelos eletrodos MN, a menos que se utilize uma fonte que introduza no subsolo corrente de grande intensidade. Porém, o procedimento habitual consiste em separar os eletrodos AB tal que possibilite medir a resposta e ainda sejam considerados como eletrodos elétricos. Essa separação geralmente é tomada como igual ou inferior a um quinto da distância que separa o centro dos eletrodos AB e MN (ORELLANA, 1972; ZOHDY, 1978).

O fator geométrico para este tipo de arranjo, considerando-se a abertura entre os eletrodos de corrente igual a dos eletrodos de potencial pode ser calculado por:

$$K_d = \pi \left( \frac{a^3}{b^2} - \frac{a}{2} \right) \quad (3.6)$$

onde :

$a$ = espaçamento entre o centro dos eletrodos AB e MN

$b$ = espaçamento entre os eletrodos AB ou MN

### 3.1.3 Instrumentação e Operação de Campo

#### 3.1.3.1 Sondagem Elétrica Vertical

Os trabalhos de campo foram realizados nos dias 1 a 6 de dezembro de 1994. Foram realizadas 32 SEV's. A área estudada através da sondagem elétrica vertical está mostrada na Figura 3.5, onde vem representado os centros de sondagem e as respectivas direções de expansão dos eletrodos. Estes foram dispostos segundo o arranjo Schlumberger, com a distância mínima entre os eletrodos de corrente igual a 2 m ( $AB/2=1$  m) e a máxima variável, em função da profundidade do embasamento sendo que a máxima permitida pelo aparelho é de 600 m ( $AB/2=300$  m). O equipamento utilizado nos levantamentos foi o GEOTEST pertencente ao DGF/UFPa, projetado e fabricado pela companhia Geotest Industria e Comercio de Equipamentos Eletrônicos. Potência máxima de saída de 100 w e corrente máxima 500 mA. A fonte de corrente contínua utilizada foi uma bateria de automóvel, que tem a vantagem de ser portátil e portanto podendo ser facilmente deslocada durante a operação de campo. O equipamento fornece diretamente os valores de  $\Delta V$  e  $I$ . Para as medidas de

corrente o intervalo de leitura varia desde valores inferiores a 1 mA até valores superiores a 1 A. O voltímetro do aparelho está calibrado para fornecer leitura de valores desde 0,1 mV até valores de 199,9 mV.

A onda gerada no aparelho transmissor possui uma forma quadrada por ter sua polaridade invertida periodicamente. A reversão da polaridade permite minimizar a instabilidade nas leituras originadas pelo fenômeno de polarização de eletrodos. O aparelho receptor dispõe de filtros eletrônicos que minimizam os efeitos ruidosos gerados por correntes telúricas ou linhas de transmissão.

As demais fontes de ruídos foram atenuadas durante a execução das SEVs, tomando-se cuidados operacionais.

Dessa maneira para evitar a indução entre o circuito de emissão e de recepção, manteve-se estes o mais afastado possível, assim como os cabos conectados a eles.

Durante o levantamento geofísico fez-se as medidas o mais longe possível das linhas de transmissão, para evitar que um forte campo eletromagnético induzisse corrente nos circuitos.

A resistência de contato, produzida entre o eletrodo de corrente e o terreno, foi atenuada colocando-se água salgada ao redor do eletrodo e/ou enterrando-o o suficiente de maneira a continuarem válidas as condições de fontes pontuais.

Quando a abertura entre os eletrodos de corrente era grande o suficiente para tornar o valor de  $\Delta V$  (diferença de potencial) muito pequeno ou o procedimento anterior não surtia o efeito desejado, executava-se a “embreagem”, aumentando-se a distância entre os eletrodos de potencial.

Freqüentemente realizava-se teste de leitura com um calibrador, fornecido pelo fabricante, assim como inspeção nos cabos e carretéis com o intuito de averiguar se estava ocorrendo fugas de corrente e que o potencial medido no aparelho era efetivamente devido aos materiais de subsuperfície.

Devido o relevo acidentado do município de Ourilândia do Norte, as SEVs foram executadas nos locais onde o terreno apresentava-se com os menores desníveis topográficos.

Apesar da limitação de potência do equipamento, que impossibilitou a execução de outros caminhamentos de apoio as SEVs, cujas curvas mostravam no formato indícios de zona de fraturamento ou de falhas, e dos trabalhos terem sido realizados dentro da zona urbana, que impõem algumas restrições e ruídos culturais, no geral as condições foram boas, mesmo porque, nos levantamentos com as sondagens, muitas vezes não se necessitou fazer as medidas até a abertura máxima dos eletrodos de corrente.

Tabela 3.1 - Valores de AB/2 e MN utilizados nos levantamentos com SEVs

	1.00	1.30	1.80	2.40	3.20	4.20	5.50	7.50	10.0	13.0	
0.5	x	x	x	x	x	x	x	x	x	x	
	18.0	24.0	32.0	42.0	55.0	75.0	100	130	180	240	300
2.0	x	x	x	x							
5.0					x	x	x				
10.0								x	x	x	x

Na Tabela 3.1 estão mostrados os valores de AB/2, disposto horizontalmente, e MN, verticalmente, usados nos trabalhos com SEV na área sob investigação.

Os valores de resistividade aparente obtidos nas SEVs estão representados graficamente no Apêndice.

### 3.1.3.2 Caminhamento Elétrico

A coleta de dados foi realizada no dia 7 de dezembro de 1994 sendo executada uma perfuração elétrica de superfície na rua Rondônia. A Figura 3.5 mostra o local do caminhamento. O arranjo empregado foi o dipolo-dipolo axial com a distância entre os eletrodos AB igual o espaçamento entre os eletrodos MN (25 m). No levantamento foram utilizados o mesmo equipamento e os procedimentos operacionais observados nas SEVs que objetivaram diminuir os ruídos introduzidos nas medidas das resistividades aparentes.

## 4 - MODELAGENS E AMBIGÜIDADES EM TERRENOS CRISTALINOS

### 4.1 MODELAGEM

Para se tentar associar as medidas geofísicas com o subsolo, criam-se modelos para representar a subsuperfície. Os modelos produzidos para auxiliar na interpretação geofísica dos dados podem ser: geológico, físicos e matemáticos. Os modelos geológicos representam as rochas e estruturas da área sob estudo, mostrando suas prováveis relações temporais e espaciais, condizentes com o observado no trabalho de campo. Estes modelos podem ser representados sob a forma de perfis, diagrama de blocos e mapas geológicos.

Os modelos físicos representam os contrastes de propriedades física da subsuperfície, obtidas a partir do modelo geológico e das medidas feitas no campo e no laboratório (modelo físico geométrico).

O modelo matemático é o equacionamento do modelo físico através de variáveis (dependente e independentes) e parâmetros (conhecidos e desconhecidos). A variável dependente representa os efeitos do modelo físico. As variáveis independentes podem ser o espaço, o tempo ou a frequência. Um dos parâmetros é a propriedade física (LUIZ & SILVA, 1995).

Estes modelos são simplificações da situação real. No modelo geológico, as heterogeneidades das rochas são desprezadas, a forma das estruturas e corpos mineralizados são geometricamente simples. No modelo físico, muitas vezes, as rochas são assumidas como homogêneas e isotrópicas e as estruturas e corpos mineralizados têm a forma geométrica tão ou mais simples que o adotado no modelo geológico. Os modelos matemáticos, no qual são convertidos os modelos físicos, apresentam equações bastantes complexas e soluções analíticas exatas não são frequentes, predominando soluções aproximadas.

Os modelos podem ser classificados em 1D, 2D e 3D, dependendo da distribuição espacial das propriedades físicas. No modelo 1D, a propriedade física varia ao longo de uma direção, normalmente a profundidade. No modelo 2D, a propriedade física varia em duas direções. No modelo 3D, a propriedade física varia tridimensionalmente. Esta classificação depende do método geofísico aplicado, ou seja, um modelo pode ser considerado 2D para um determinado método geofísico, porém, 1D para outro método.

Estes modelos podem ser investigados teoricamente em laboratório (modelamento reduzido ou analógico) ou computacionalmente (modelamento numérico ou digital).

O modelamento digital investiga a resposta geofísica obtida do modelo matemático, representado por soluções analíticas exatas ou aproximadas. Neste caso, a matemática utilizada pode envolver técnicas simples, tais como integração numérica, convolução; ou sofisticada, como o método das equações integrais, método das equações diferenciais representado pelas diferenças finitas e elementos finitos.

A técnica das sondagens elétricas verticais tem se mostrado muito eficiente na prospecção de água subterrânea quando aplicada em regiões sedimentares e de aluviões (BHATTACHRYA & PATRA, 1968; KOEFOED, 1979). O modelo matemático utilizado para a representação é unidimensional, com uma seqüência de camadas eletricamente homogêneas e isotropicas separadas entre si por planos horizontais e caracterizadas por sua resistividade aparente. Trata-se de um modelo matemático simples mas que funciona muito bem na maioria dos casos de interpretação quantitativa naqueles tipo de geologia.

Em ambientes cristalinos o método da sondagem elétrica vertical não é muito eficiente devido a variação lateral brusca de resistividade ocasionada, principalmente, pela presença de falhas e fraturas, que dificultam a interpretação quantitativa. O modelo matemático representativo é totalmente tridimensional e tem-se apenas soluções aproximadas.

Nas simulações numéricas das sondagens elétricas verticais Schlumberger sobre terrenos cristalinos, utilizou-se o programa EGSLIB/SEV2D de autoria do professor RIJO (1994c). Este programa foi desenvolvido com base no método dos elementos finitos. Este método permite obter-se a solução aproximada de modelos com a mais complexa geometria (COGGON, 1971; RIJO, 1977). A premissa básica para a obtenção de soluções numéricas aproximadas, usando elementos finitos, consiste em se construir uma malha através da divisão do meio sob investigação em um número finito de subdomínios denominados de elementos ou células que podem ter a forma quadrangular, quadrática ou triangular. Este fato impõem ao método uma grande versatilidade, pois possibilita que as estruturas tenham uma geometria complexa e permite também a representação acidentada da superfície do terreno. A cada célula atribue-se um valor constante de resistividade.

O problema de contorno para a determinação da resistividade aparente em meios cristalinos é totalmente tridimensional (3D-3D), uma vez que tanto a fonte pontual como a propriedade elétrica do meio (resistividade) variam nas três direções do espaço. No entanto, para problemas hidrogeológicos, o modelamento de zonas de falhas e fraturas pode ser assumido como bidimensional, considerando-se invariáveis sua resistividade e geometria ao longo do "strike". Dessa maneira, a equação diferencial representativa do problema de contorno

torna-se 2D-3D, sendo convertida para 2D-2D através da transformada direta de Fourier.

Na implementação da técnica dos elementos finitos, os seguintes procedimentos são utilizados:

1 - O região investigada é dividida em um número finito de elementos ou células (a malha para o elemento finito) na forma triangular, quadrangular ou quadrática. Estes elementos estão associados a pontos nodais comuns e conjuntamente aproximados à forma da região.

2 - A função contínua desconhecida é representada sobre cada elemento por polinômios lineares, cuja definição obtém-se através de valores nodais da função contínua que se constitui na variável a ser determinada.

3 - A transformada do potencial elétrico sobre cada elemento deriva da equação de Helmholtz, utilizando-se os polinômios definidos e o método de Galarkin.

4 - Nas regiões onde se tem a resistividade tendendo para o infinito, aplica-se a condição de Newmann. Impõem-se as condições de contorno.

5 - As equações elementares são agrupadas para formarem as equações matriciais dos elementos.

6 - As equações matriciais elementares agrupadas segundo a numeração dos nós da malha dão origem a equação matricial global. O vetor da fonte é construído.

7 - As condições de fronteira de Dirichlet são incorporadas.

8 - O sistema de equações lineares é resolvido.

A solução do problema original 2D-3D é restaurada através da transformada inversa de Fourier.

Na construção da malha um aspecto importante a ser considerado é a extensão do modelo finito escolhido para representar a região contínua infinita, que deve ser suficientemente grande para garantir que os valores calculados ao longo da borda externa sejam compatíveis com os valores de fronteira. Para diminuir o tamanho da malha e conseqüentemente reduzir o tempo de computação, usa-se elementos finitos na fronteira (RIJO, 1995).

Os modelos foram simulados considerando-se uma malha de 36445 nós, sendo 985 na direção x e 37 na direção z totalizando 35424 elementos de forma quadrangular com 984 na direção x e 36 na direção z. A malha utilizada nas simulações não era homogênea. Dessa maneira as células foram divididas em grupos, cada um com uma determinada dimensão. Na direção x considerou-se 24 grupos de células e na direção z, 5 grupos.

O desenvolvimento teórico e a aplicação da técnica dos elementos finitos em problemas práticos podem ser encontrados em HUEBNER (1975), BECKER et al.(1981), RIJO(1981), SILVESTER & FERRARI (1983), CARRASQUILLA (1984), ROSS(1990), CARRASQUILLA & RIJO(1991), FARIAS (1996), SILVA (1996).

#### 4.1.1 - Análise dos Modelos Simulados

Nas simulações numéricas realizadas usou-se um modelo geoeétrico com a propriedade física variando tanto vertical como horizontalmente. O programa EGSLIB/SEV2D determinou os efeitos da sondagem elétrica vertical Schlumberger do modelo simulado considerando 21 posições para os eletrodos de corrente ( $AB/2$ ) e quatro para os eletrodos de potencial, de acordo com as posições indicadas na Tabela 3.1. O modelo apresentado tem por objetivo mostrar como a presença de estruturas encaixadas no manto de intemperismo podem produzir perturbações nas curvas de SEV. Para cada situação simulada considerou-se uma posição para o centro do arranjo em relação a heterogeneidade. A curva utilizada para as comparações com os modelos 2D foi obtida pelo método de inversão, que é uma técnica de ajuste para obtenção dos parâmetros dos modelos unidimensionais, dos dados coletados com SEV na cidade de Ourilândia do Norte.

Ilustrado na Figura 4.1, o modelo geoeétrico bidimensional simulado é constituído pelo manto de intemperismo, o qual é subdividido em quatro estratos: 0,8 m de solo superficial com  $230 \Omega.m$  de resistividade; um segundo horizonte, mais resistivo, de  $730 \Omega.m$  de resistividade e 6 m de espessura; uma terceira camada, mais condutiva, de 10 m de espessura e resistividade de  $26 \Omega.m$  e finalmente o substrato de  $5.000 \Omega.m$  formado pelas rochas sã do embasamento cristalino e a zona condutiva com 8 m de espessura e uma inclinação de 30 graus aproximadamente, representando fraturas ou um dique ou mesmo, variações litológicas em rochas cristalinas intemperizadas. Foram consideradas quatro posições de observação, isto é, quatro posições para o centro do arranjo de eletrodos

A seguir, são apresentados os resultados obtidos da investigação numérica das SEVs e faz-se uma análise do comportamento das curvas de sondagens elétricas verticais Schlumberger, feitas sobre estruturas bidimensionais em regiões cristalinas, com respeito à curva obtida sobre uma região estratificada.

##### 4.1.1.1 - Modelo 1a

Aqui considerou-se uma zona condutiva aflorante e o local da sondagem exatamente sobre o centro da estrutura, Figura 4.1. Neste caso, a resposta devido ao meio bidimensional

desloca-se quase totalmente paralela com relação à curva obtida para o meio unidimensional, apenas no ramo inicial as curvas perdem o paralelismo. Isto é explicado pelo fato de que para pequenas aberturas de  $AB/2$  ( $< 4$  m) o efeito medido é devido exclusivamente a heterogeneidade. O efeito da variação lateral de resistividade na superfície do terreno é observado na sexta medida ( $AB/2=4,2$  m) onde ocorre um ponto anguloso na curva devido ao meio bidimensional.

#### 4.1.1.2 - Modelo 1b

Nesta simulação, o centro de sondagem está localizado a 8 m do lado direito da estrutura aflorante, Figura 4.1. Sob estas condições, as curvas devido aos meios 1D e 2D se comportam da seguinte maneira: Para aberturas de  $AB/2$  inferiores a 4,2 m as curvas praticamente coincidem demonstrando a maior influência na resposta 2D do meio estratificado. Quando o semi-comprimento da linha de emissão de corrente é 4,2 m observa-se uma “quebra” na curva obtida para o meio 2D. Este fato evidencia a mudança de litologia na superfície do terreno. No ramo final as curvas afastam-se paralelamente refletindo a resposta do embasamento cristalino e a contribuição do corpo bidimensional.

#### 4.1.1.3 - Modelo 1c

Nesta investigação teórica, o centro de observação localiza-se a 16 m do lado direito da zona condutiva aflorante, Figura 4.1. Os efeitos medidos para os meios 1D e 2D coincidem para aberturas de  $AB/2$  inferiores a 9 m. Isto espelha uma maior contribuição do meio estratificado encaixante sobre os efeitos medidos para o meio bidimensional. Na porção intermediária, as curvas apresentam um afastamento que caracteriza a influência da zona condutiva na resposta 2D. A variação lateral de litologia superficial observa-se na décima medida ( $AB/2=13$  m) através do ponto anguloso presente na curva 2D. Os pontos dos ramos finais das curvas 1D e 2D apresentam um afastamento constante revelando a presença do embasamento cristalino e os efeitos do corpo bidimensional detectados para as maiores aberturas de  $AB/2$ .

#### 4.1.1.4 - Modelo 1d

O centro do arranjo encontra-se a 24 m do lado direito da heterogeneidade aflorante, Figura 4.1. Nesta situação, as curvas devido aos meios 1D e 2D são coincidentes nos ramos final e inicial refletindo a maior contribuição do meio encaixante nos valores de resistividade

aparente medida para a confecção da curva 2D. Constata-se a presença da heterogeneidade através do pequeno afastamento entre as curvas 1D e 2D. A variação lateral de resistividade na superfície do terreno impõe a angulosidade presente na curva 2D na décima segunda medida.

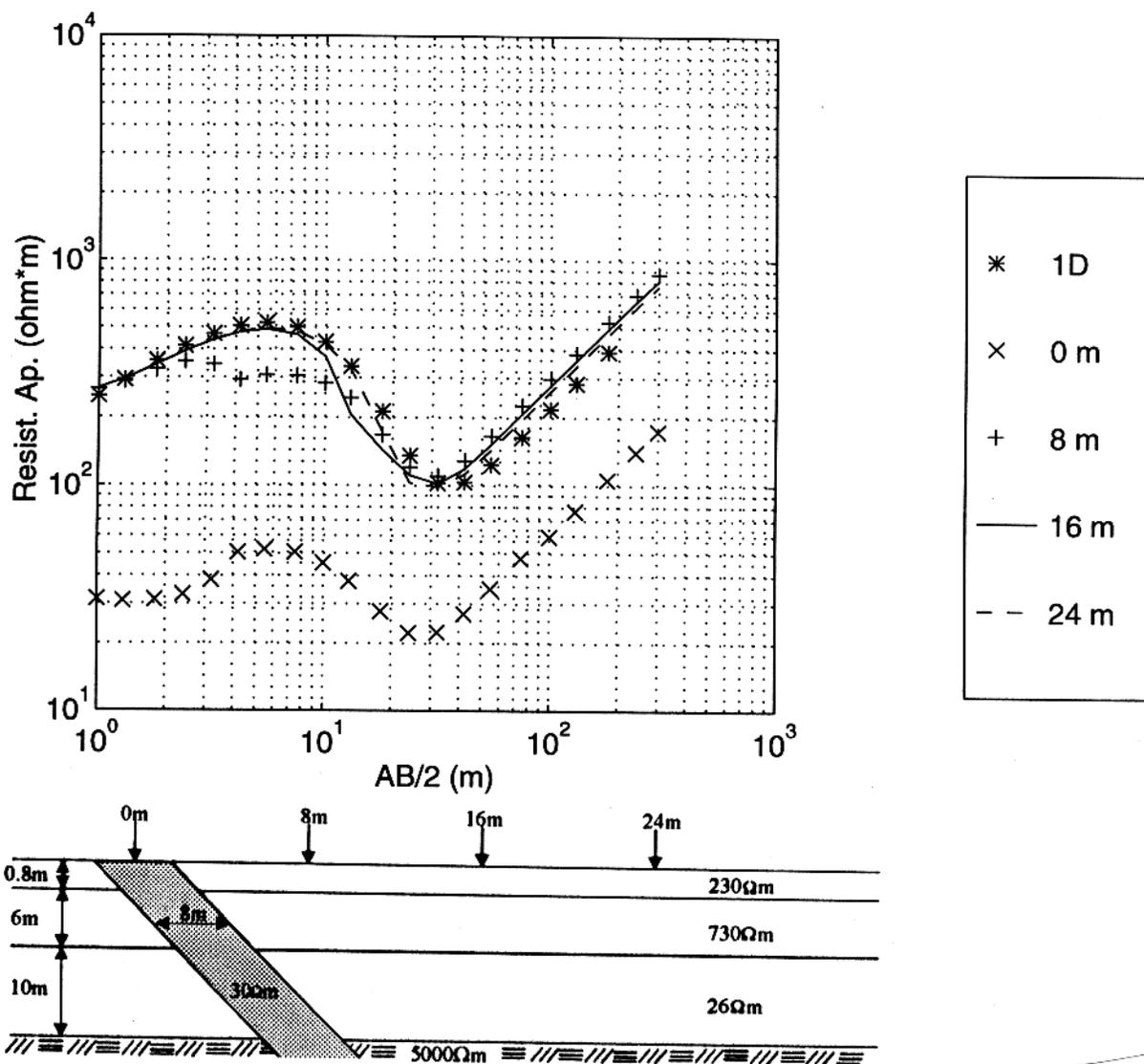


Figura 4.1 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a zona condutiva aflorante localizada a 0, 8, 16 e 24 m do centro de sondagem

## 4.2 - AMBIGÜIDADES EM TERRENOS CRISTALINOS

A interpretação dos dados geofísicos é extremamente dificultada pelo fenômeno da ambigüidade. A ambigüidade consiste em se ajustar mais de um modelo para um determinado conjunto de medidas, ou seja, a mesma resposta pode ser produzida por modelos geoeletricos com geometrias idênticas, porém, variando-se os parâmetros. Mesmo modelos com geometrias distintas podem causar ambigüidade. Isto significa que, embora os efeitos sejam diferentes, eles são próximos o bastante para se confundirem. Neste caso, a ambigüidade é causada pela percentagem provável de erros contido no conjunto de medidas.

O método das sondagens elétricas verticais tem funcionado eficientemente na prospecção geofísica de água subterrânea, quando aplicado sobre regiões sedimentares e de aluviões, entretanto, não é muito efetivo em região cristalina, devido a variação lateral brusca de resistividade que pode ocasionar algumas dificuldades quando da interpretação quantitativa dos dados. As curvas de sondagem elétrica vertical Schlumberger obtidas sobre este tipo de terreno geológico, em alguns casos mostram nitidamente as variações de resistividade aparente através de perturbações facilmente observáveis no formato da curva, porém, em muitos outros casos, as perturbações são tão imperceptíveis que não se consegue detectar qualquer variação de resistividade aparente nas curvas. Frequentemente estes dados são tratados como se fossem modelos unidimensionais. Esta interpretação, quando feita de maneira inadequada, gera erros na quantificação dos parâmetros geoeletricos.

A investigação sobre as ambigüidades reveladas nas curvas de sondagem elétrica vertical Schlumberger quando feitas em regiões que apresentam variação lateral de resistividade surge como consequência dos frequentes levantamentos geofísicos executados pelo Departamento de Geofísica da Universidade Federal do Pará, dentro do convênio celebrado com a Fundação Nacional de Saúde, em municípios localizados no sul paraense com o intuito de assessorar os trabalhos de prospecção hidrogeológica feitos pela Fundação. Estes municípios situam-se ao longo da Transamazônica e por conseguinte estão assentados em regiões onde afloram rochas ígneas e metamórficas de idade Pré-Cambriana.

O intuito aqui é analisar, através da modelagem numérica, alguns resultados interessantes acerca do comportamento das curvas de sondagens elétricas verticais Schlumberger, realizadas sobre regiões com variações laterais de resistividade e, com isso, mostrar as dificuldades encontradas na interpretação das sondagens devido ao fenômeno da ambigüidade. O meio encaixante e as propriedades físicas e geométricas da zona condutiva são os mesmos do item anterior.

#### 4.2.1 - Ambigüidade 1

No primeiro modelo a heterogeneidade bidimensional está aflorando e o ponto de tomada das medidas localizado exatamente sobre o topo da heterogeneidade (Figura 4.2). Nessa, situação observa-se um deslocamento paralelo da curva de sondagem elétrica do modelo bidimensional com respeito à curva do modelo unidimensional. Este efeito é semelhante ao "static shift" observado nas sondagens magnetotelúricas devido as variações laterais rasas de resistividades.

Comparando-se este resultado com o da Figura 4.3, na qual a curva superior é exatamente a mesma da Figura 4.2, que representa a resposta do meio estratificado encaixante. A curva inferior da Figura 4.3 corresponde o efeito desse mesmo meio estratificado, porém com as resistividades das camadas reduzidas de 20% dos valores originais. Plotadas em escala logarítmicas, estas duas curvas da Figura 4.3 devem ser paralelas, como de fato o são, mas na Figura 4.2 o paralelismo entre as curvas não é tão óbvio assim.

Com o intuito de investigar porque os diagramas das sondagens, na Figura 4.2, são paralelos, simulou-se o mesmo modelo, porém, com a heterogeneidade totalmente coberta pela camada superior, não aflorante portanto como mostra a Figura 4.4. O paralelismo entre as curvas persiste, com uma ligeira modificação no início ( $AB/2 < 4$  m) devido a influência da camada superior.

Este resultado mostra que a causa do paralelismo das curvas na Figura 4.2 deve-se à influência da porção da heterogeneidade que fica abaixo da superfície. A questão agora é saber em que profundidade a influência da heterogeneidade é mais pronunciada. Com este objetivo, simulou-se inicialmente uma heterogeneidade pouco espessa, de 1,0 m apenas de espessura na vertical, conforme ilustrado na Figura 4.5. Observa-se que as curvas continuam paralelas, embora o afastamento entre elas seja um pouco menor do que o constatado na Figura 4.2. Aumentando um pouco mais a espessura da heterogeneidade para 3,0 m (Figura 4.6) nota-se que o afastamento das curvas também aumenta, alcançando praticamente o mesmo valor do afastamento observado na Figura 4.2. Duplicando-se para 6,0 m a espessura da heterogeneidade, até alcançar a base da segunda camada (Figura 4.7), o paralelismo entre as curvas se estabiliza praticamente no mesmo valor observado na Figura 4.2.

A metade inferior da heterogeneidade encaixada na terceira camada não influencia o comportamento da curva de sondagem, como ilustra a Figura 4.8. Isto é absolutamente esperado, porque a resistividade da heterogeneidade ( $30 \Omega.m$ ) é praticamente igual a da terceira camada ( $26 \Omega.m$ ).

À guisa de ilustração, se a resistividade da parte inferior da heterogeneidade fosse dez

vezes maior ( $300 \Omega.m$ ), a curva de sondagem teria o comportamento ilustrado na Figura 4.9, completamente diferente do das figuras anteriores.

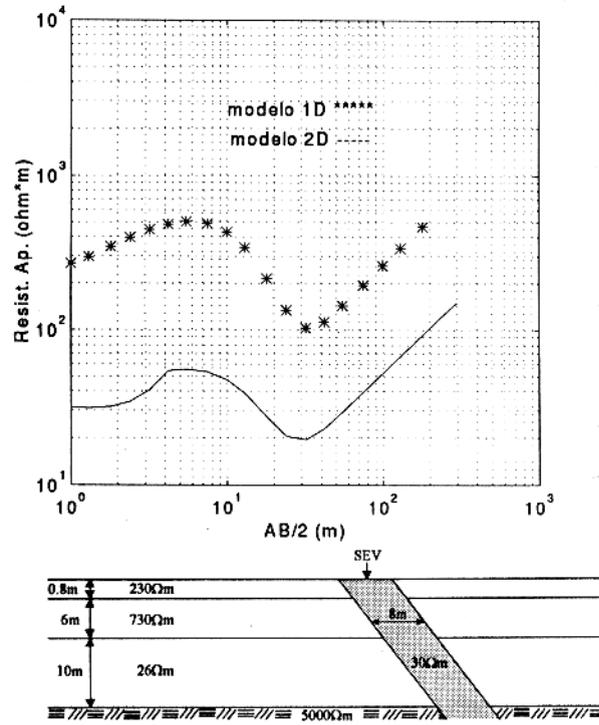


Figura 4.2 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante.

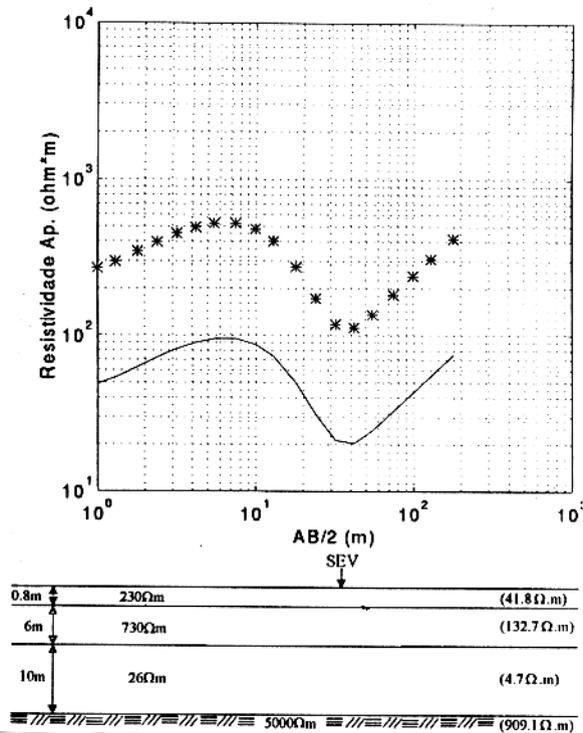


Figura 4.3 - Sondagens elétricas verticais devido a dois meios estratificados com resistividades proporcionais ao fator 5.5.

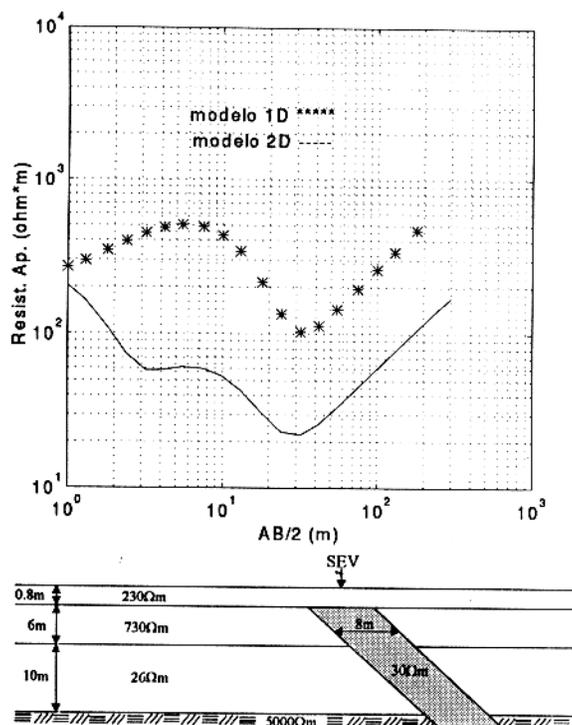


Figura 4.4 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade não aflorante.

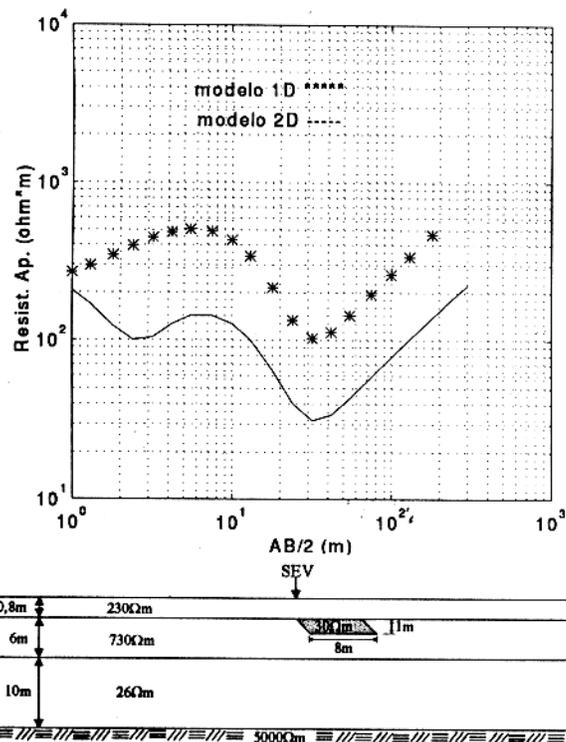


Figura 4.5 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte superior (1 m) da heterogeneidade.

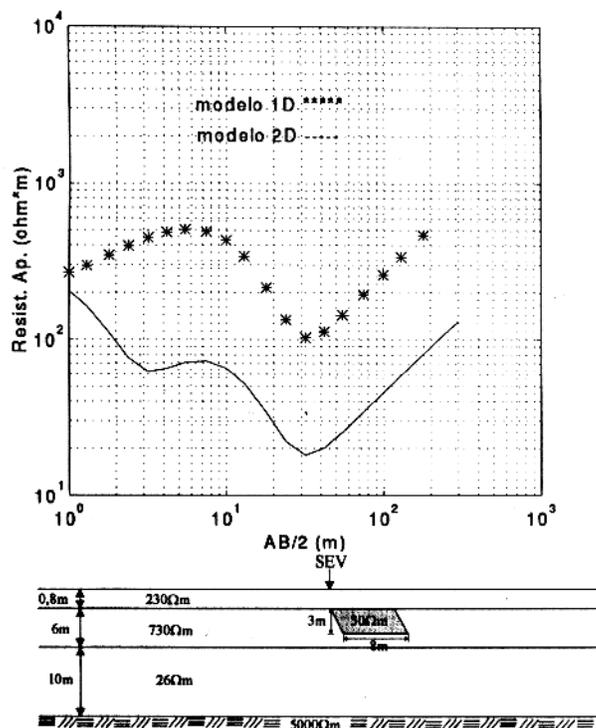


Figura 4.6 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte superior (3 m) da heterogeneidade.

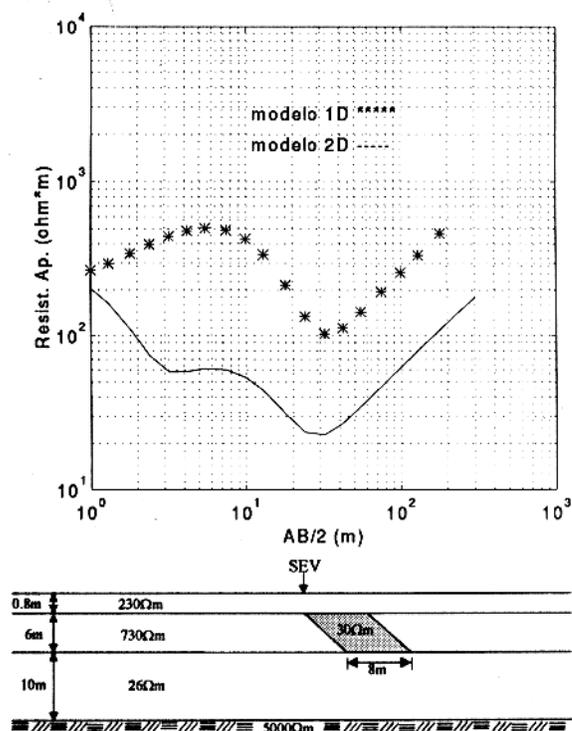


Figura 4.7 - sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a metade superior (6 m) da heterogeneidade.

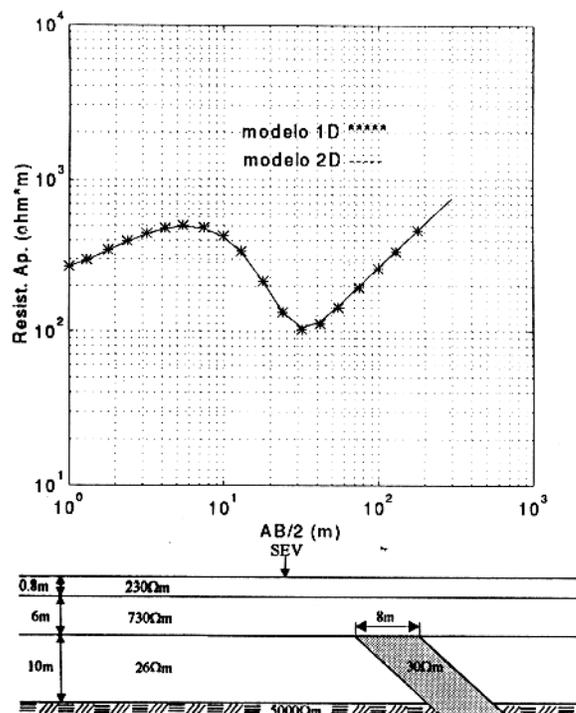


Figura 4.8 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte basal ( $30 \Omega.m$ ) da heterogeneidade.

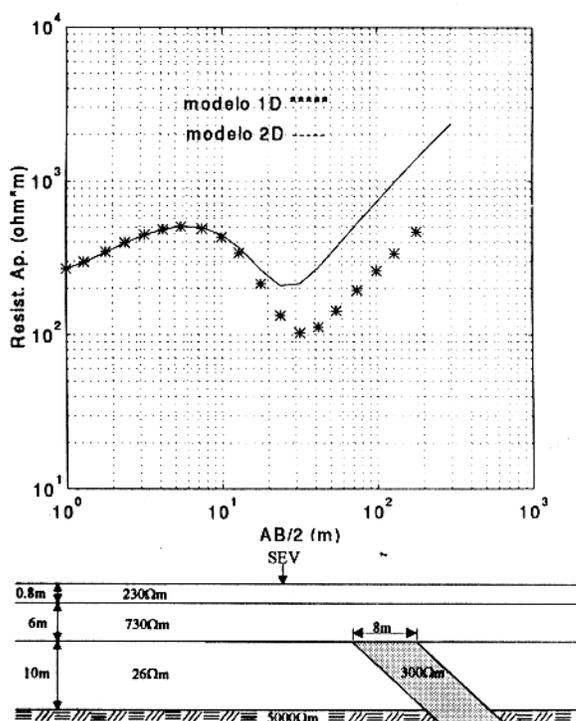


Figura 4.9 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a parte basal ( $300 \Omega.m$ ) da heterogeneidade.

#### 4.2.2 - Ambigüidade 2

Nesta simulação numérica a zona condutiva aflorante encontra-se a 8 m do lado esquerdo do ponto de medidas, Figura 4.10. A presença do corpo bidimensional revela-se na curva 2D pela presença de uma angulosidade observada na sexta medida ( $AB/2=4,2$  m) como consequência da mudança de litologia na superfície do terreno. Entretanto, em região cristalina, aquela situação geologica (corpo aflorante) não é corriqueira. Devido ao fenômeno de intemperismo que modifica a rocha sã nos aspectos físico e químico, geralmente, as estruturas localizam-se abaixo da superfície do terreno. Por este motivo, contudo mantendo-se o afastamento entre a zona condutiva e o centro do arranjo, simulou-se o modelo geoeletrico representado na Figura 4.11. Neste modelo o corpo bidimensional encontra-se a 0,8 m de profundidade dentro do manto de alteração da rocha. A curva representativa da resposta 2D praticamente não se altera à exceção da suavização da angulosidade motivada pela presença da camada do manto que recobre a heterogeneidade, todavia não o suficiente para mascarar esta. Porém, na investigação teórica do modelo ilustrado na Figura 4.12 mostrando o manto de intemperismo, nesta situação, com espessura de 2,8 m acima do corpo, a curva 2D contida nesta figura não mostra quaisquer evidência da heterogeneidade em subsuperfície, produzindo erro interpretativo para quaisquer conjunto de dados com aquelas características.

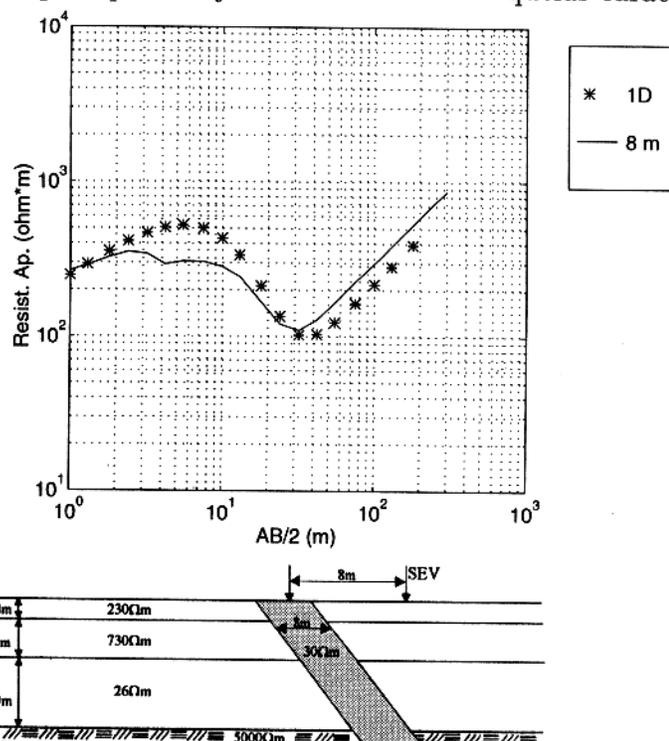


Figura 4.10 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante a 8 m do centro de sondagem.

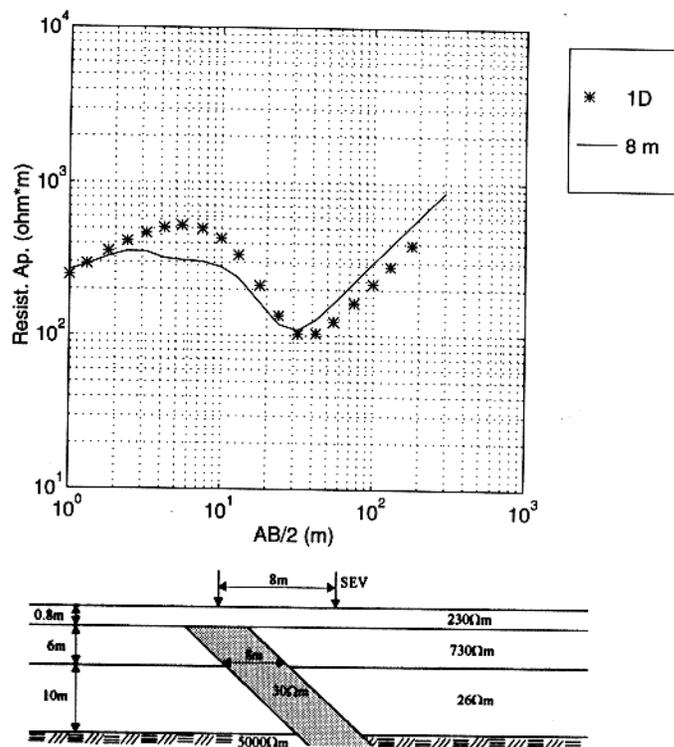


Figura 4.11 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob a primeira camada do manto.

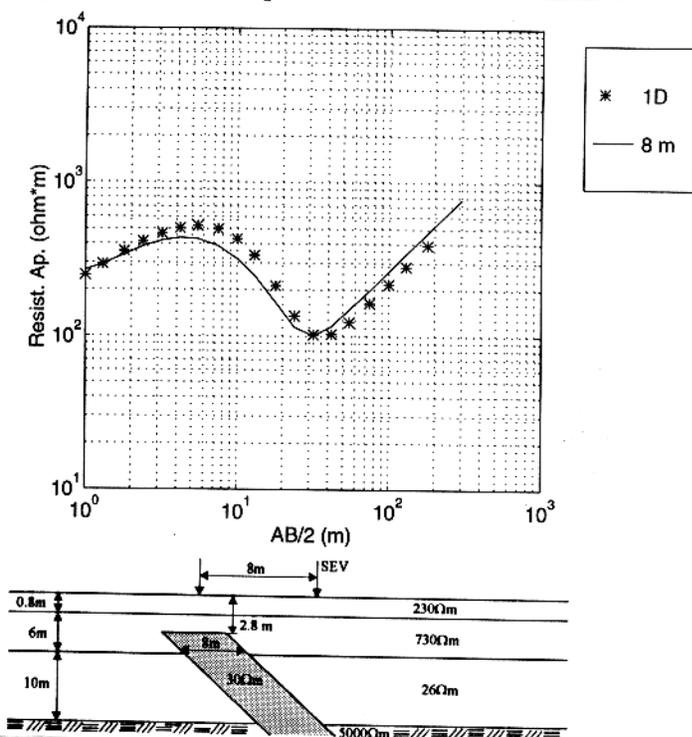


Figura 4.12 - sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 2,8 m do manto.

### 4.2.3 - Ambigüidade 3

Na investigação teórica do modelo inserido na Figura 4.13, considerou-se a zona condutiva aflorante a esquerda e posicionada a 16 m do centro de tomada das medidas. Nota-se a variação lateral de resistividade superficial na curva 2D através do ponto anguloso na décima medida ( $AB/2=13$  m). Com a finalidade de observar o comportamento da curva 2D ao introduzir-se a zona condutiva no manto de intemperismo, simulando-se assim situações mais realísticas, construiu-se o modelo contido na Figura 4.14. O modelo mostra a corpo condutivo abaixo do solo superficial (0,8 m) e afastado 16 m do centro de medidas. A resposta 2D para esta situação não mostra com clareza o corpo condutivo. No levantamento geofísico com SEV tipo Schlumberger a pequena angulosidade observada na curva 2D pode ser confundida com ruídos inerentes ao método ou devido a presença de erros nos dados coletados (erro de observação ou instrumental). O mesmo raciocínio se aplica ao modelo mostrado na Figura 4.15 onde a zona condutiva aflorante encontra-se a 24 m do centro da sondagem.

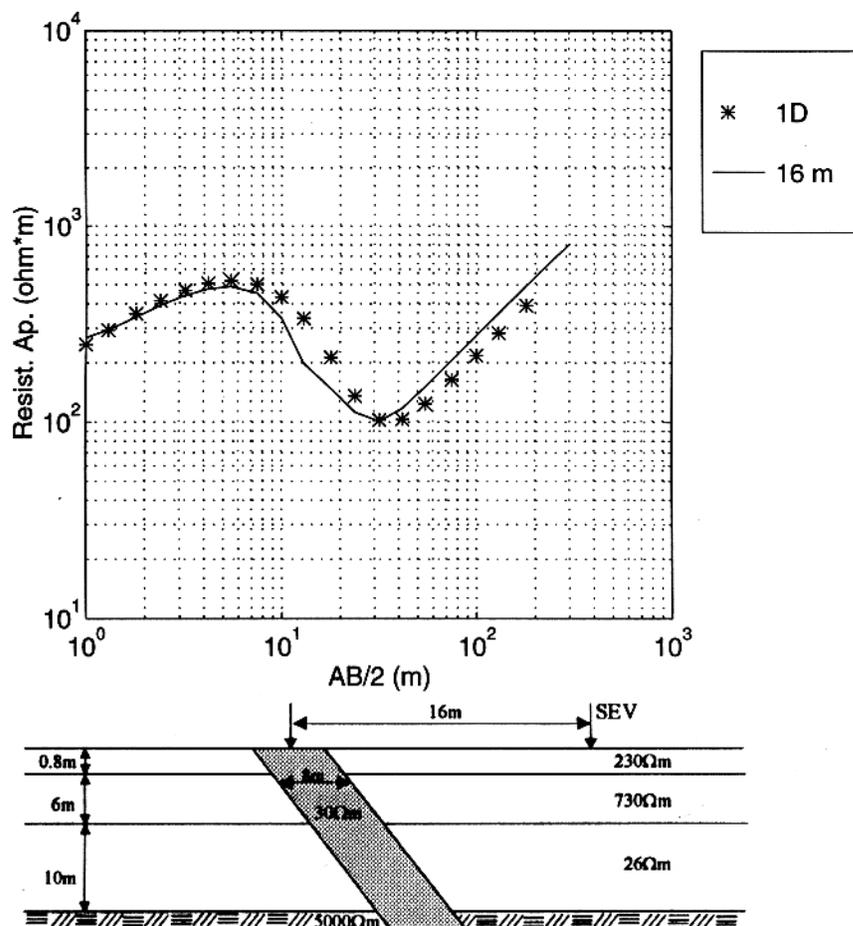


Figura 4.13 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante distante 16 m do ponto de sondagem.

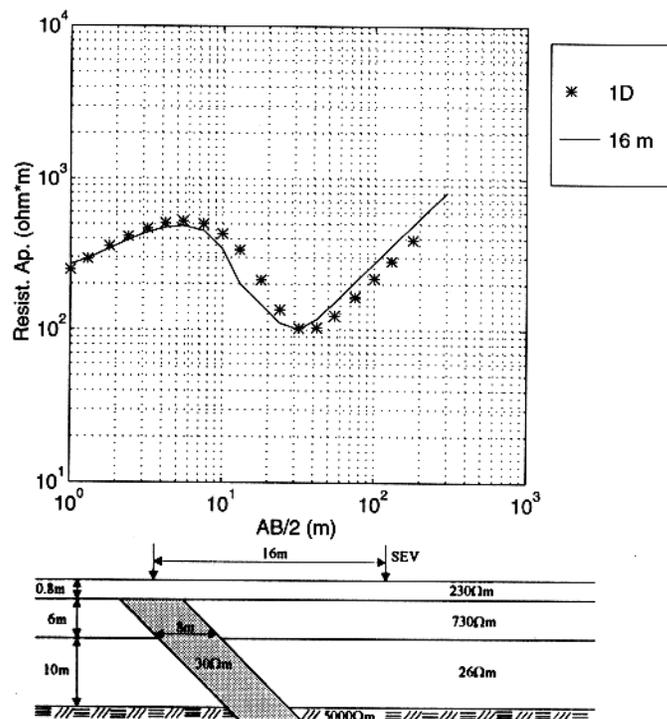


Figura 4.14 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 0,8 m do manto.

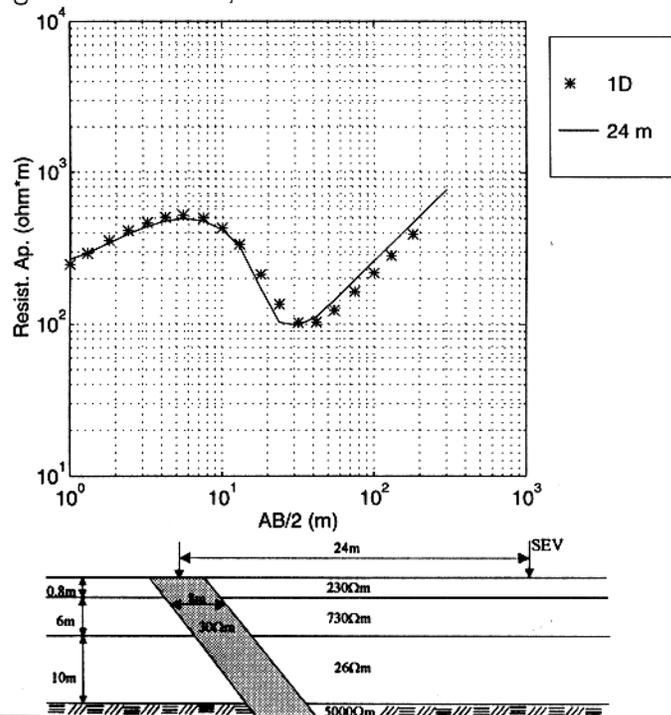


Figura 4.15 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade aflorante distante 24 m do ponto de medida.

## 4.2.4 - Ambigüidade 4

Um resultado interessante sobre o comportamento das curvas de sondagem elétrica vertical Schlumberger executadas em regiões com distribuição irregular de resistividade mostra-se na Figura 4.16. Nesta figura a zona condutiva encontra-se a 2,8 m abaixo da superfície do terreno afastada de 8, 16 e 24 m do centro da SEV. A curva traçada com '\*' mostra os efeitos do meio unidimensional, a curva contínua representa os efeitos medidos com o corpo a 8 m do ponto de medida, a curva plotada com '+' ilustra a resposta do modelo considerando o corpo a 16 m do centro de sondagem e a curva marcada com 'o' registra a resposta do modelo com o corpo localizado a 24 m. Estas curvas praticamente coincidem com a curva representativa do meio acamado, levando-se a concluir que para as situações modeladas o método não consegue detectar a zona condutiva a uma pequena profundidade (2,8 m) no interior do manto de intemperismo. De acordo com este resultado as curvas obtidas para um meio bidimensional, quando interpretadas sem informações geológicas da área prospectada, pode levar o interprete a considera-las como obtidas sobre um meio unidimensional.

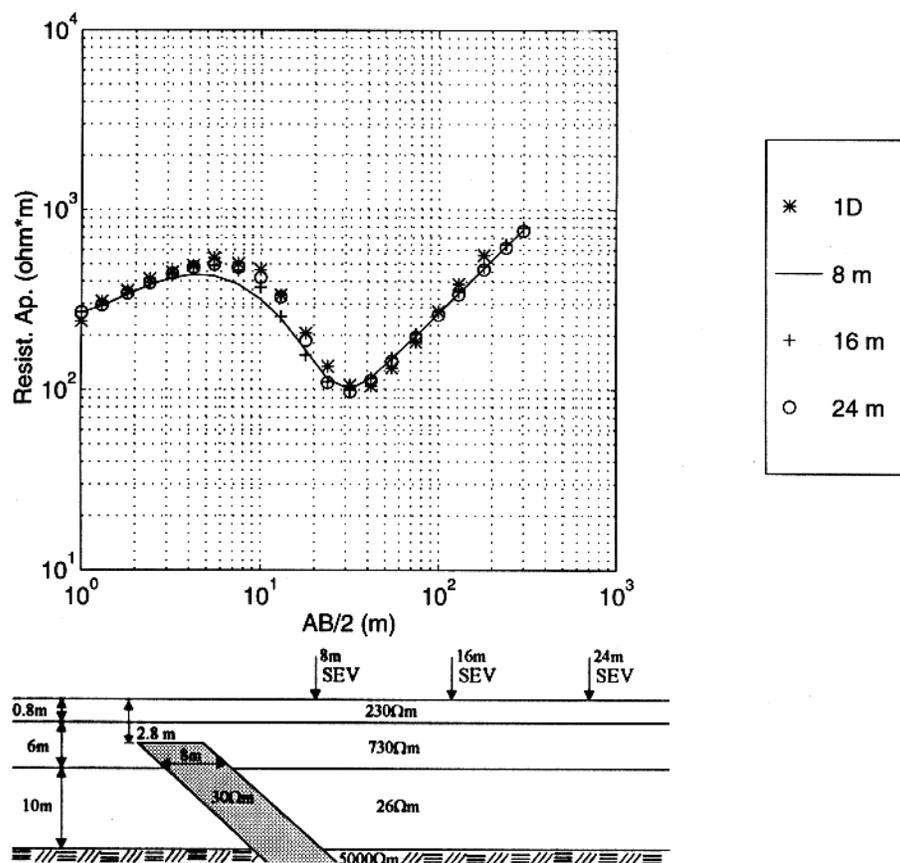


Figura 4.16 - Sondagens elétricas verticais devido ao meio encaixante e a heterogeneidade sob 2,8 m do manto e localizada a 8, 16 e 24 m do centro da SEV

## 4.2.5 - Ambigüidade 5

Para esta análise, considerou-se um modelo na qual a zona condutiva esta inclinada de aproximadamente 30 graus e no outro na vertical, em ambas simulações a heterogeneidade aflora e o centro das medidas posicionado exatamente sobre o topo destas. Na Figura 4.17 a curva traçada com linha contínua mostra a resposta da zona condutiva inclinada e a curva plotada com '\*' ilustra o efeito devido a heterogeneidade na vertical. Observa-se na Figura 4.17 que as curvas se superpõem inferindo-se que a intensidade do mergulho da heterogeneidade não altera o formato das curvas de resistividade aparente para a situação simulada. Este resultado é muito interessante, visto que a presença de contato inclinado entre as camadas provoca distorções nas curvas de resistividade aparente obtida com a técnica da sondagem elétrica vertical em meios unidimensionais de maneira que, se forem interpretadas como estratos horizontais pode resultar menores valores de resistividade e espessura das camadas do que os reais. Dados coletados com sondagem elétrica vertical Schlumberger, em regiões onde as camadas mergulhem com angulo superior a 20 graus (BHATTACHARYA & PATRA, 1968), não podem ser interpretados utilizando-se modelos de camadas horizontais, sob pena de introduzir-se erros superiores a 10% na quantificação dos parâmetros. Para o arranjo Wenner o valor limite do angulo de mergulho é de 45 graus, segundo KELLER & FRISCHNECHT (1970).

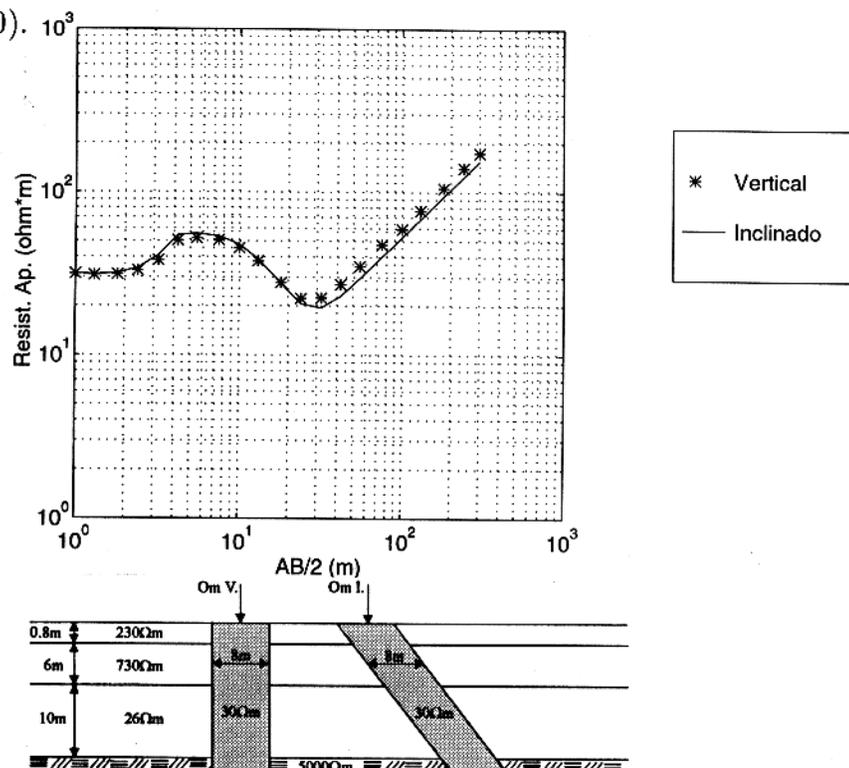


Figura 4.17 - Sondagens elétricas verticais devido a heterogeneidade aflorante com 30° de mergulho e na vertical.

## 4.2.6 - Ambigüidade 6

Nesta investigação teórica, a heterogeneidade está inclinada de 30 graus aproximadamente e simulou-se duas situações. Na primeira a zona condutiva está a 8 m à esquerda do centro da SEV e a outra a 8 m à direita do ponto de medida. A curva plotada com '\*' ilustra a resposta para a zona localizada a 8 m à esquerda do ponto de medida e a curva traçada com '+' mostra a resposta para a outra situação. Na Figura 4.18 observa-se que os efeitos se confundem. Este fato comprova que a posição simétrica da estrutura em relação ao centro da SEV é irrelevante. Com efeito as SEVs executadas com o corpo localizado a direita geram curvas semelhantes aquelas executadas com o corpo diametralmente posicionado no lado esquerdo, quer a estrutura esteja aflorando ou não.

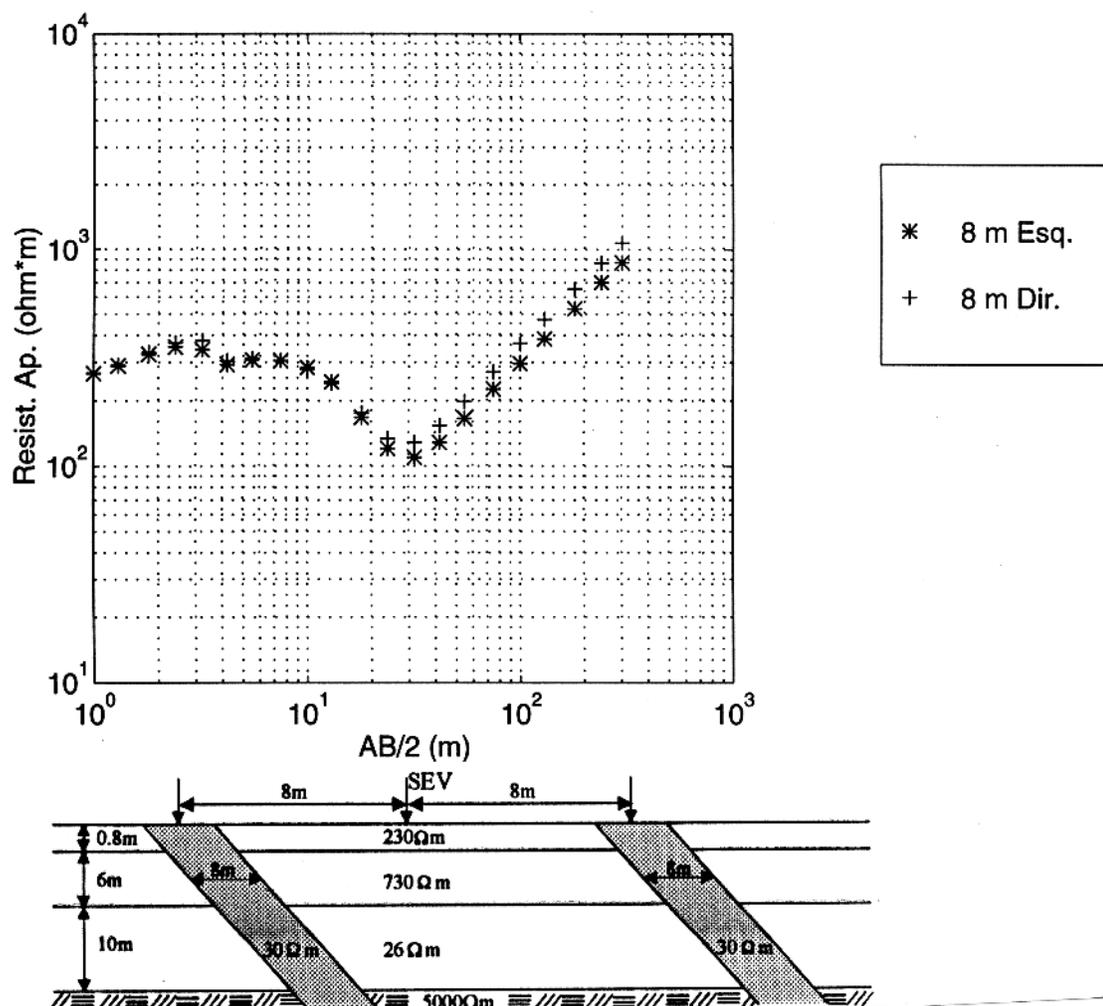


Figura 4.18 - Sondagens elétricas verticais devido a heterogeneidade aflorante e localizada a 8 m à esquerda e à direita do ponto de sondagem.

## 5 - INTERPRETAÇÃO DOS DADOS ELETRORE-SISTIVOS COLETADOS NA CIDADE DE OURILÂNDIA DO NORTE

A interpretação geofísica é a operação que possibilita a conversão dos dados geofísicos em informações geológicas. A interpretação geofísica pode ser feita em duas etapas. Na primeira, as medidas de campo produzem um modelo geoeletrico e na segunda, busca-se um significado geológico dos dados geofísicos, com o que se transforma o modelo geoeletrico em modelo geológico.

A interpretação geofísica pode ser: qualitativa, semi-quantitativa e quantitativa. Nas interpretações qualitativa e semi-quantitativa têm-se por objetivo formular uma idéia ou aproximação da estruturação do subsolo investigado. Nestes tipos de interpretações não se determinam espessuras nem resistividades em valor absoluto, mas sim, relações de igualdade/desigualdade entre certas características evidenciadas pelas medidas geofísicas, o que proporciona obter-se informações acerca da localização e forma do corpo geológico, profundidade máxima ou mínima do embasamento e outras.

Na interpretação quantitativa busca-se estimar os valores numéricos dos parâmetros de um modelo de maneira que a geometria deste seja a mais próxima possível da geometria da fonte dos dados coletados. Neste tipo de interpretação podem-se usar os métodos comparativos, direto e inverso.

No método comparativo, a interpretação é feita graficamente com o auxílio de catálogo de perfis ou curvas características. A interpretação quantitativa com o uso de catalogo de perfis, que são curvas obtidas pela investigação teórica em computador (modelo numérico) ou em laboratório (modelagem reduzida), consiste em comparar a curva de campo com um perfil teórico do catálogo escolhido como modelo. Caso o perfil teórico se ajuste satisfatoriamente à curva de campo, os valores numéricos dos parâmetros do modelo usado na construção do perfil são adotados como possíveis valores dos parâmetros da feição subsuperficial. Caso contrário repete-se o procedimento com outras curvas teóricas, até obter-se o melhor ajuste.

Com as curvas características, que são gráficos calculados a partir de elementos específicos retirados dos perfis teóricos, tais como, valores de máxima declividade do perfil ou razão entre os picos de máximo e mínimo, a interpretação é feita quantificando-se os elementos

específicos do perfil de campo que são plotados em seguida nas curvas características para o modelo escolhido. Os possíveis valores dos parâmetros geométricos e/ou físicos da feição subsuperficial são dados pela posição ocupada pelos elementos característicos retirados da curva de campo.

Até a década de 70, a interpretação quantitativa era feita com base no método comparativo. Com o advento de métodos matemáticos mais eficientes de computação, o que possibilitou a geração de curvas teóricas em um curto intervalo de tempo, surgiram os métodos numéricos de interpretação direta e inversa.

Na interpretação com o método direto admite-se um modelo e atribue-se valores aos parâmetros deste. Calcula-se a curva teórica correspondente com o auxílio do computador e compara-se com a curva de campo. Caso as curvas se ajustem, os parâmetros do modelo são tomados como os possíveis valores da feição investigada. Caso contrário, modificam-se os valores dos parâmetros tentando-se alcançar um ajuste mais perfeito entre as curvas de campo e a calculada.

Com o método inverso, alimenta-se o computador com os dados medidos no trabalho de campo e com os valores numéricos iniciais para os parâmetros que se desejam estimar do modelo adotado. Através de um algoritmo de inversão o computador calcula curvas teóricas e compara com a curva de campo e a curva teórica que apresentar a menor divergência dentro de uma precisão pré-estabelecida com relação à curva de campo fornecerá os valores dos parâmetros como modelo final para os valores da fonte das medidas de campo.

## 5.1 - METODOLOGIA PARA A INTERPRETAÇÃO QUANTITATIVA DAS SEVs

### 5.1.1 Método Direto

O tratamento quantitativo dos parâmetros geoeletricos pelo método direto consiste em calcular a resposta para um modelo teórico, escolhido para representar a subsuperfície investigada, interagindo através do fornecimento dos valores de resistividade e espessura do modelo e comparando visualmente na tela do monitor do computador, até se obter um ajuste satisfatório com a curva de campo. O cálculo dos valores de resistividade aparente para a confecção da curva teórica, introduzindo-se os valores de resistividade e espessura para o modelo escolhido para representar o subsolo sob estudo foi realizado pelo programa computacional EGSLIB/SEV1D de autoria de RIJO (1994a).

Os procedimentos seguidos para a interpretação quantitativa direta dos dados das SEVs são descritos com mais detalhes a seguir.

Os valores de resistividade aparente medidos nas SEVs foram plotados em papel bi-logarítmicos, durante a coleta de dados e, posteriormente suavizados para eliminar as pequenas perturbações no formato da curva introduzidas por ruídos e corrigir as discontinuidades nas curvas provenientes da mudança de posição dos eletrodos de potencial quando das realizações das “embreagens”.

A interpretação das curvas de sondagens foi realizada assumindo-se um modelo geoeétrico de camadas homogêneas e isotrópicas separadas entre si por superfícies planas e horizontais. A escolha do modelo unidimensional para a subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte teve por base informações geológicas superficiais e a análise detalhada de todas as curvas de sondagens possibilitando, ao mesmo tempo, a definição do número de horizontes de cada curva.

Com o intuito de determinar os valores numéricos dos parâmetros resistividade e espessura de cada camada dos modelos adotados, fez-se sucessivos ajustes, atribuindo-se valores de resistividade e espessura para as “n” camadas estimadas para os modelos, até se conseguir uma boa aproximação entre a curva gerada para o modelo e a de campo. Os valores numéricos dos parâmetros do modelo, cujo ajuste foi o mais preciso, foram adotados como os possíveis valores dos parâmetros geoeétricos da subsuperfície investigada.

### 5.1.2 Método da Inversão

Na determinação numérica dos parâmetros das SEVs através do método inverso utilizou-se o programa computacional EGSLIB/SEV1DINV desenvolvido por RIJO (1994b) que se baseia na técnica dos mínimos quadrados amortecidos (Ridge Regression) com o uso de critérios estatísticos para a resolução dos parâmetros das camadas do modelo inicial arbitrado. Este enfoque estatístico do método na interpretação proporciona uma distribuição mais econômica e racional dos esforços e meios de interpretação dos dados geofísicos (GOL'TSMAN, 1977).

A aplicação da técnica do “Ridge Regression” na inversão de dados iniciou-se em 1960 com o desenvolvimento do algoritmo “Ridge Analysis”, que consiste numa técnica gráfica para representar as características das funções de regressão de segunda ordem que apresentam muitas variáveis independentes.

O emprego da “Ridge Regression” na inversão dos dados eletroresistivos unidimensionais justifica-se pela simplicidade, estabilidade e flexibilidade que proporciona no tratamento dos dados. De acordo com INMAN (1975) a “Ridge Regression” é mais estável e eficiente que a técnica do Inverso Generalizado Linear no tratamento dos dados eletroresistivos, quando o problema está próximo da singularidade. O “Ridge Regression” se comporta como o método

do Gradiente, o qual é lento na vizinhança do mínimo mas sempre converge, quando o estimador está longe do mínimo, porém, assemelha-se ao método de Newton-Raphson, que é mais rápido mas pode divergir, quando o estimador está perto do mínimo. A vantagem do "Ridge Regression" reside justamente em permitir a mudança do valor do estimador durante o processo de inversão, para assegurar estabilidade e rápida convergência. Além disso, INMAN (op. cit.) verificou que o "Ridge Regression" permite encontrar um modelo que ajuste bem os dados, indicando a precisão do ajuste dos ruídos nos dados e a precisão com o qual cada parâmetro das camadas do modelo é estimada. Esta é outra vantagem da técnica em relação aos outros métodos, pois, possibilita indicar o intervalo dos modelos que ajustam os dados com um certo grau de confiança. Entretanto, a eficiência da técnica está condicionada à coerência entre o modelo inicial usado na investigação e a geologia da área investigada. Esta condição para o êxito na aplicabilidade do método de inversão com a técnica de "Ridge Regression" está exemplificada no trabalho de CARRASQUILLA (1984), no qual o autor mostra o quanto é inadequado o tratamento de SEVs executadas sobre regiões que apresentam variações laterais rasas nas propriedades elétricas como se fossem modelos unidimensionais. Esta interpretação pode resultar em informações quantitativas ambíguas na determinação dos parâmetros geoeletricos dos modelos.

O método da inversão permite estabelecer modelos mais representativos da subsuperfície através do ajuste automático dos dados eletroresistivos. As resistividades aparentes medidas no trabalho de campo funcionaram como "input" para o processamento sendo que o modelo inicial adotado foi aquele obtido do modelo direto. O número de interações assim como sua precisão são função da coerência entre o modelo inicial usado para representar a subsuperfície e a geologia da área sob investigação. Como mostrado por CARRASQUILLA (1984) a falta de coerência entre o modelo e a geologia pode introduzir erros no ajuste de 12%.

Os conhecimentos teóricos e as aplicações práticas sobre o método da inversão podem ser encontrados, dentre outros, nas obras de INMAN et al. (1973), BARD (1974), BECK & ARNOLD (1977), PETRICK et al. (1977), TWOMEY (1977), MENKE (1984), TARANTOLA (1987) e LINES (1988).

## 5.2 APRESENTAÇÃO DOS RESULTADOS DA INTERPRETAÇÃO

Em função dos baixos custos e dos fatores condicionantes do acúmulo de água em ambientes cristalinos, manto de intemperismo bastante espesso e presença de falhas ou fraturas nas rochas, os trabalhos geofísicos consistiram basicamente no emprego do método eletroresistivo. Os trabalhos com SEVs foram realizados com o intuito de detectar os locais onde o manto

de intemperismo era bem desenvolvido e com a aplicação da perfilagem elétrica buscou-se identificar as zonas intensamente fraturadas e/ou falhadas da rocha sã.

Durante a etapa de campo foram executadas 32 SEVs com os eletrodos dispostos segundo o arranjo Schlumberger e um perfil de caminhamento com uso da configuração dipolo-dipolo. Tanto as SEVs quanto o caminhamento foram executados ao longo das ruas e avenidas não pavimentadas da cidade de Ourilândia do Norte por serem os locais mais adequados para os levantamentos uma vez que apresentavam um relevo mais suave e espaço suficiente para a abertura dos eletrodos. No levantamento dos dados de campo tomou-se o cuidado em minimizar os efeitos dos fenômenos não considerados no modelo físico-matemático utilizado na fase interpretativa, tais como: elevada resistência de contato entre os eletrodos e o terreno e indução eletromagnética entre os circuitos de emissão e recepção.

A análise e interpretação das medidas geofísicas obtidas com os caminhamentos foram feitas de forma qualitativa. Este procedimento, quase genérico no tratamento dos dados de perfilagem, ocorre face às dificuldades teóricas para a simulação de modelos representativos da subsuperfície investigada. Dessa maneira, os dados obtidos das perfilagens elétricas foram plotados, via computador, para se traçar as curvas de isorresistividades e através delas tentar-se identificar a existência de descontinuidades estruturais saturadas de água na rocha que está presente na região a diferentes profundidades.

A interpretação qualitativa, feita durante a coleta dos dados, das sondagens elétricas verticais objetivaram verificar se o solo superficial era mais ou menos resistivo que as camadas subjacentes e, os locais em que o embasamento cristalino se encontrava a menores profundidades. A primeira informação servia para se posicionar os eletrodos de potencial para a realização das “embreagens” e futuras suavizações para eliminação dos ruídos geológicos e a segunda para se decidir pela continuação ou não das medidas até a abertura máxima dos eletrodos de corrente.

A interpretação quantitativa dos dados das SEVs foram feitas com o auxílio de computador, tendo-se como modelo camadas planas, paralelas, horizontais, homogêneas e isotrópicas. O tratamento quantitativo foi realizado com base no método direto através do programa computacional EGSLIB/SEV1D, como também com base no método inverso fazendo uso do programa EGSLIB/SEV1DINV que utiliza a técnica de “Ridge Regression”. No primeiro método interpretativo, obtem-se valores de resistividade aparente e espessura das camadas correspondente a uma curva de SEV, a partir de um modelo geoeletrico fornecido previamente. No segundo, obtem-se um modelo geoeletrico correspondente aos dados de campo.

### 5.2.1 Resultados Provenientes da Interpretação das SEVs

As informações geológicas disponíveis da área sob investigação, apresentadas no item 2.4.2, resultaram das observações feitas sobre afloramentos durante a etapa de coleta de dados. Não se conseguiu informações sobre a existência de furos estratigráficos ou quaisquer dados acerca das características hidrogeológicas da subsuperfície da área investigada, assim como, trabalhos geofísicos anteriores. A escassez de tais informações não permitiu uma correlação mais completa entre os horizontes geoeletricos conseguidos na interpretação e os horizontes geológicos produzidos pela decomposição do cristalino da região.

Tabela 5.1 - Resultado da interpretação quantitativa das SEVs efetuadas na cidade de Ourilândia do Norte.

SIMBOLO DAS SEVs	ESPESSURA DAS CAMADAS(m)				RESISTIVIDADE DAS CAMADAS ( $\Omega.m$ )					PROFUNDIDADE DO TOPO DO CRISTALINO (m)
	$h_1$	$h_2$	$h_3$	$h_4$	$\rho_1$	$\rho_2$	$\rho_3$	$\rho_4$	$\rho_5$	
01	0.6	3.0	2.8		26	73	21		5000	6.4
02	0.9	5.2	9.7		49	17	29		5000	15.8
03	0.3	0.3	10.5		46	817	80		5000	11.1
04	0.5	2.1	22.8		378	90	25		5000	25.4
05	2.5	26.7			186	720			5000	29.2
06	0.9	0.9	3.9	20.2	102	202	8814	572	5000	25.9
07	0.5	2.4	35.6		325	769	75		5000	38.5
08	1.2	0.8	33.4		159	862	84		5000	35.4
09	0.8	5.1	9.7		228	721	26		5000	15.6
10	1.4	0.4	18.9		71	6931	60		5000	20.4
11	0.9	1.0	4.0		115	811	56		5000	5.9
12	0.3	2.1	11.7		53	15	42		5000	14.1
13	1.2	0.7	7.4	2.3	138	110	745	35	5000	11.6
14	0.8	0.9	2.9	16.9	121	247	92	33	5000	21.5
15	0.9	4.6	8.6		117	925	24		5000	14.1
16	0.7	2.6	4.5		166	996	34		5000	7.8
17	0.4	8.7	28.1	25.6	290	830	128	327	5000	62.8
18	0.3	1.6	19.9		121	518	76		5000	21.8
19	0.7	1.4	7.8		51	122	52		5000	9.9
20	0.6	3.4	11.8	10.6	184	767	211	38	5000	26.4
21	0.5	4.9	4.4	5.3	117	1000	1379	28	5000	15.1
22	0.3	1.9	14.4	1.9	104	21	56	36	5000	18.5
23	0.4	2.2	7.4	11.2	92	382	129	32	5000	21.2
24	0.2	0.6	15.2	16.1	58	3466	169	109	5000	32.1
25	0.8	3.0	21.6		130	373	90		5000	25.4
26	0.5	2.7	6.9		82	341	31		5000	10.1
27	0.8	7.6			82	20			5000	8.4
28	0.3	0.8	9.7	12.3	269	710	168	35	5000	23.1
29	0.4	3.1	14.4	18.9	210	1416	62	37	5000	36.8
30	0.7	0.8	5.5		57	83	22		5000	7.0
31	0.3	1.8	4.8	26.9	133	387	139	32	5000	33.8
32	0.3	1.0	5.7	37	70	655	94	26	5000	44

Na Tabela 5.1 estão ilustrados os resultados da interpretação quantitativa de cada uma das 32 SEVs efetuadas na cidade de Ourilândia do Norte e a profundidade em que foi detectado o embasamento cristalino, na Figura 3.5 encontra-se representado o centro de sondagem

destas e no Apêndice as curvas de campo e da interpretação inversa. A maioria das curvas de resistividade aparente, obtidas através das sondagens elétricas verticais, foram interpretadas como modelo geoeétrico de 3 e 4 camadas, excepcionalmente com 2, refletindo o comportamento lito-estratigráfico dos sedimentos resultantes da decomposição do Granodiorito Rio Maria. As curvas apresentam padrões distintos, porém a maioria apresenta o ramo final ascendente próximo a uma linha de  $45^\circ$ , espelhando os efeitos do cristalino não fraturado. No apêndice encontram-se as curvas de sondagem resultante da interpretação quantitativa inversa. A seguir, faz-se a correlação entre os diferentes horizontes geoeétricos determinados e as informações geológicas de superfície e pedológicas no intuito de se tentar desenhar o subsolo da área investigada e, conseqüentemente, localizar as estruturas armazenadoras de água.

Como todas as SEVs foram realizadas sobre as vias públicas da cidade, nos locais sem pavimentação asfáltica, o primeiro horizonte geoeétrico, cuja resistividade alcança valores que variam de 26 a 378  $\Omega.m$  e espessura de 0.3 a 2.5 m, refere-se ao solo/aterro presente nas vias. Os maiores valores de resistividade estão relacionados aos capeamentos de piçarra que foram executados em algumas vias. Isto porque, normalmente este tipo de aterro é colocado sobre o leito da via sob intensa compactação no intuito de reduzir o volume de vazio e, conseqüentemente, a condução iônica, principal forma de propagação da corrente elétrica nos materiais geológicos superficiais, fica comprometida. Os menores valores de resistividade aparente foram medidos nos locais que não apresentavam capeamento de piçarra, mas sim, um solo de constituição arenosa e úmido com presença de matéria orgânica. Este solo é conhecido popularmente como capa de curvão.

A variação nos valores de resistividade aparente verificado neste horizonte indicam uma forte heterogeneidade lateral. Este efeito superficial pode deslocar verticalmente a curva de sondagem em um ou outro sentido, ocasionando ambigüidade na interpretação dos dados eletroresistivos. Para evitar este efeito, tomou-se o cuidado de posicionar os eletrodos de potencial sobre o solo de textura o mais homogêneo possível.

O segundo horizonte geoeétrico identificado na interpretação das SEVs apresenta valores de resistividade entre 15 a 6931  $\Omega.m$  e espessura que varia de 0.1 a 26.7 m. Dada a presença dos minerais pagoclásio e quartzo, nesta ordem de abundância, na rocha ígnea da área sob estudo, presume-se que a decomposição desta, proveniente dos agentes intempéricos, origine um material composto basicamente de argila e areia. Assim sendo, este horizonte, face aos valores de resistividade conseguidos na interpretação quantitativa, pode estar preenchido por um material arenoso com intercalações de argila, conforme pode ser observado nos baixos valores de resistividade revelados nas SEVs 01, 02, 04, 12, 22, 27 e 30. Esta hipótese encontra

subsídios nos dados pedológicos inclusos na folha São Félix do Xingu (ROSATELLI,1974), na qual relata-se a existência de um horizonte A com migração de argila para o horizonte subsequente.

O terceiro horizonte foi detectado em quase todas as SEVs, com exceção das SEVs 05 e 27. Devido aos baixos valores de resistividade presente na maioria das curvas pode-se associá-lo a um horizonte composto por material argilo-arenoso, dada à proporção de plagioclásio e quartzo contido no substrato cristalino. Além da composição mineralógica da rocha sã, outros fatores que servem para respaldar esta suposição são os informações pedológicas, que descrevem a presença de um horizonte B argiloso na área da folha São Félix do Xingu. As SEVs 13, 17, 20, 21, 23, 24, 28 e 31 apresentam valores de resistividade correspondente a sedimentos arenosos. Dessa maneira, pode-se inferir que este horizonte é composto predominantemente por material argilo-arenoso com porções localizadas de areia.

O valor elevado de resistividade aparente medido na SEV06, 8814  $\Omega$ .m, neste horizonte, justifica-se pelo comportamento da curva, descrito a seguir: A curva inicia com valores baixos de resistividade, correlacionáveis ao solo/aterro, seguida de um acréscimo nos valores de resistividade, como resposta do material arenoso e novamente uma subida nos valores de resistividade, porém, não segundo uma linha de 45°, observando-se em seguida um decréscimo nos valores de resistividade e culminando com uma subida nos valores de resistividade segundo uma linha de 45° evidenciando os efeitos do substrato cristalino. Os ante-penúltimo e penúltimo efeitos podem ter sido provocados por zonas de falhas ou fraturas existente na rocha subjacente.

O quarto horizonte, presente apenas em 13 SEVs, apresenta resistividade com valor mínimo de 21  $\Omega$ .m e máximo de 572  $\Omega$ .m. Novamente, tomando como referência a composição mineralógica da rocha cristalina juntamente com os dados pedológicos e correlacionando-os aos valores de resistividade, pode-se interpretá-lo como contendo material argiloso. Os valores elevados de resistividade das SEVs 06, 17, 24 indicam que neste locais o material que preenche este horizonte é mais arenoso. Entretanto, não se descarta a possibilidade do valor alto de resistividade da SEV 06 surgir em função do deslocamento da curva devido aos valores elevados de resistividade presentes nos terceiro e quinto horizontes.

O último horizonte geoeétrico obtido da interpretação quantitativa das SEVs equivale ao substrato cristalino que de acordo com a geologia compõem-se de granitóides mesocráticos, holocristalinos de cores cinza média à escura, as vezes esverdeadas, com granulação variável no range fanerítico, com predominância do aspecto equigranular, cuja assembléia mineral

Tabela 5.2 - Modelo geoeletrico proposto para a subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte.

CAMADA	DESCRIÇÃO LITOLÓGICA	RESISTIVIDADE ( $\Omega.m$ )	INTERVALO DE ESPESSURA (m)
01	Solo/aterro	$26 \leq \rho_1 \leq 378$	$0.3 \leq h_1 \leq 2.5$
02	Arenosa com lentes argilosas	$15 \leq \rho_2 \leq 6931$	$0.1 \leq h_2 \leq 26.7$
03	Argilo-arenosa com lentes arenosas	$21 \leq \rho_3 \leq 8814$	$2.8 \leq h_3 \leq 35.6$
04	Argilosa	$26 \leq \rho_4 \leq 572$	$1.9 \leq h_4 \leq 37$
05	Granodiorito Rio Maria	$\rho_5 \rightarrow \infty$	$h_5 \rightarrow \infty$

constitue-se, em ordem decrescente de abundância, de plagioclásio, microclina, quartzo, biotita e orniblanda. O valor de resistividade aparente determinado para o embasamento cristalino ( $5000 \Omega.m$ ) deve ser interpretado como meramente indicativo de material altamente resistivo e não como o valor real da resistividade das rochas cristalinas. Qualquer valor de mesma ordem de magnitude ou maior conservaria os formatos obtidos para as curvas.

A interpretação das SEVs sugere para o subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte a sequência geoeletrica apresentada na Tabela 5.2 como a mais representativa.

Embora tenha-se diferenciado os horizontes geoeletricos 3 e 4, pode-se tomá-los como uma única camada geoeletrica de constituição argilo-arenosa com intercalação de material arenoso, provavelmente continuação da camada sobrejacente. Esta aglutinação é possível visto que estes horizontes são constituídos basicamente por argila dada sua proximidade com o embasamento cristalino. Ademais, durante a interpretação, foi possível observar zonas onde as resistividades apresentavam valores baixo para quase todos os horizontes geoeletricos determinados e outras não. Daí, tornou-se possível selecionar as sondagem elétricas em dois grupos de curvas, que representam ambientes geoeletricos distintos. O primeiro grupo formado pelas SEVs 01, 02, 03, 04, 12, 22, 27 e 30 indica para o subsuperfície da cidade de Ourilândia do Norte o modelo geoeletrico constituído por solo/aterro sobre saprolito de natureza argilo-arenosa recobrimdo o substrato cristalino. O segundo grupo descreve a sequência estratigráfica apresentada na Tabela 5.2, predominante na subsuperfície da cidade.

Apesar da natureza argilosa do terceiro horizonte, que lhe confere pequena transmissividade hidraulica, pode-se utilizá-lo para a captação de água. Conforme pode ser observado na Figura 3.5 as SEVs 01, 03, 10, 18, 19, 20, 25 e 30 foram efetuadas próximas de poços. Infelizmente não se conseguiu informações sobre a profundidade em que foi atingido o lençol subterrâneo e nem tampouco sobre a natureza do material retirado na perfuração do poço. No entanto, na vizinhança da SEV 16, verificou-se a existência de um poço tipo "cacimba", comum na área do município de Ourilândia do Norte, no qual, segundo informação do

morador, detectou-se o aquífero com 4 m de profundidade, sem atingir a rocha sã. A interpretação quantitativa da SEV 16 indica que esta profundidade equivale ao terceiro horizonte. O segundo horizonte geométrico, também, apresenta condições potenciais para armazenar água.

## 5.2.2 Seção Geométrica

A interpretação das SEVs, quando feita isoladamente, revela na direção vertical sob o ponto de sondagem os diversos horizontes geométricos presentes no subsolo da área investigada, porém, quando feita coletivamente permite visualizar a continuidade lateral e a distribuição espacial dos diferentes pacotes geométricos identificados. Com esta intenção, construiu-se as seções geométricas descritas abaixo. Face não se dispor de dados altimétricos da superfície da cidade, adotou-se para os diversos pontos de sondagem das SEVs que compõem as diferentes seções, a mesma cota. Este procedimento pode ter deslocado verticalmente o centro de sondagem das SEVs para cima ou para baixo. As escalas utilizadas na confecção de todas as seções foram: 1:750 na horizontal e 1:500 na vertical.

### 5.2.2.1 Seção 01

Esta seção mostrada na Figura 5.1 consiste do solo superficial que se estende até 0.9 m de profundidade. Sob este, até a profundidade máxima de 24.5 m, tem-se uma camada condutiva de natureza argilo-arenosa superposta aos granitóides tipo Rio Maria. Analisando-se o perfil percebe-se que o substrato cristalino encontra-se abatido e soerguido. Entretanto, afirmou-se anteriormente que o centro de sondagem das SEVs apresenta-se deslocado na direção vertical e por conseguinte este desnivelamento do substrato resistivo pode estar acentuado ou diminuído em sua real dimensão. O manto argilo-arenoso acompanha a configuração do embasamento. Sob a SEV 01, onde às proximidades existe um poço, encontra-se pouco espesso, aumentando de espessura na SEV 02 e em seguida adelgaça-se abaixo da SEV 03, na qual existe uma lente arenosa encaixada, para alcançar sua maior espessura na SEV 04. Tanto na vizinhança da SEV03 como na da SEV04, há um poço. As SEVs usadas para compor esta seção foram todas executadas ao longo da Pa-279, que corta a cidade no sentido longitudinal e recebe a denominação de Av. das Nações. Este padrão geométrica se repete sob as SEVs 22, 27 e 30, todas as proximidades da Av. das Nações.

### 5.2.2.2 Seção 02

Constituída pelas SEVs 11, 13, 03, 25 e 26, efetuadas, respectivamente nas ruas Ceará, Maranhão, Av. das Nações e novamente no fim da rua Ceará, esta seção secciona transversalmente a cidade. A sequência geométrica contida nesta seção compõem-se de três camadas. A primeira representa o solo superficial com espessura média de 0.8 m seguida de um estrato resistivo predominantemente constituído de sedimentos arenosos, com espessura máxima de 7.4 m. Abaixo, desenvolve-se uma camada condutiva representada por sedimentos argilo-arenosos sobre o Granodiorito Rio Maria. Como na seção anterior, o embasamento cristalino apresenta-se escalonado resultando na formação de duas depressões separadas por uma elevação verificada na SEV03. A camada argilo-arenosa segue a geometria do substrato resistivo, desenvolvendo sua maior espessura na SEV 25, onde se localiza a depressão mais acentuada. Nas proximidades desta SEV existe um poço. A camada arenosa acompanha ligeiramente o traçado do embasamento, mostrando-se mais espessa sob a SEV 13, onde ocorre o outro abatimento da rocha sã. Bem próximo a esta SEV localiza-se um poço. Este pacote arenoso, que na seção anterior não tinha continuidade lateral, aparecendo apenas na SEV03 em forma de lente, nesta seção apresenta-se contínuo. A sucessão geométrica descrita predomina na área investigada. Para ilustrar este fato, confeccionou-se a seção mostrada na Figura 5.3 que corta a cidade no sentido longitudinal. Nas SEVs extremas que compõem esta seção, sondagens 32 e 25, o pacote arenoso se adelgaça e o argilo-arenoso se espessa. Estas SEVs foram executadas nas vizinhanças das SEVs 30 e 22, cuja sequência geométrica é aquela descrita na Figura 5.1.

### 5.2.3 - Resultados da Interpretação do Caminhamento Elétrico

#### 5.2.3.1 perfil 01

A execução deste caminhamento teve por objetivo investigar a causa dos elevados valores de resistividade aparente presente nos segundo e terceiros horizontes da SEV 21, cujo formato não revela a existência de feições estruturais típicas de ambientes cristalinos. O caminhamento elétrico foi realizado ao longo da rua Rondônia com início na rua Pernambuco e término na rua Acre. Na análise qualitativa do perfil, (Figura 5.4, nota-se a predominância dos valores baixos de resistividade aparente ( $\leq 500 \Omega.m$ ). Isto indica que a rocha sã situa-se a maiores profundidades, ou seja, o manto de intemperismo encontra-se bastante desenvolvido. A área da cidade onde se executou o perfil mostra a sequência geométrica descrita na Figura 5.2, para a subsuperfície. Assim, acredita-se que esta porção alterada do cristalino seja composta por dois níveis. O primeiro associado a sedimentos arenosos e o segundo relacionado a

material argilo-arenoso.

Na porção leste do perfil, na parte inferior, observa-se uma concentração de valores elevados de resistividade, da mesma ordem de grandeza daqueles contidos na curva de sondagem 21. Estes valores podem corresponder a uma intrusão, com um halo de alteração, uma vez que no Granodiorito Rio Maria existem diques de riolito (Formação Iriri) e de diabásio (Unidade Cururu) ou um soerguimento do embasamento cristalino como consequência dos cavalgamentos dúcteis.

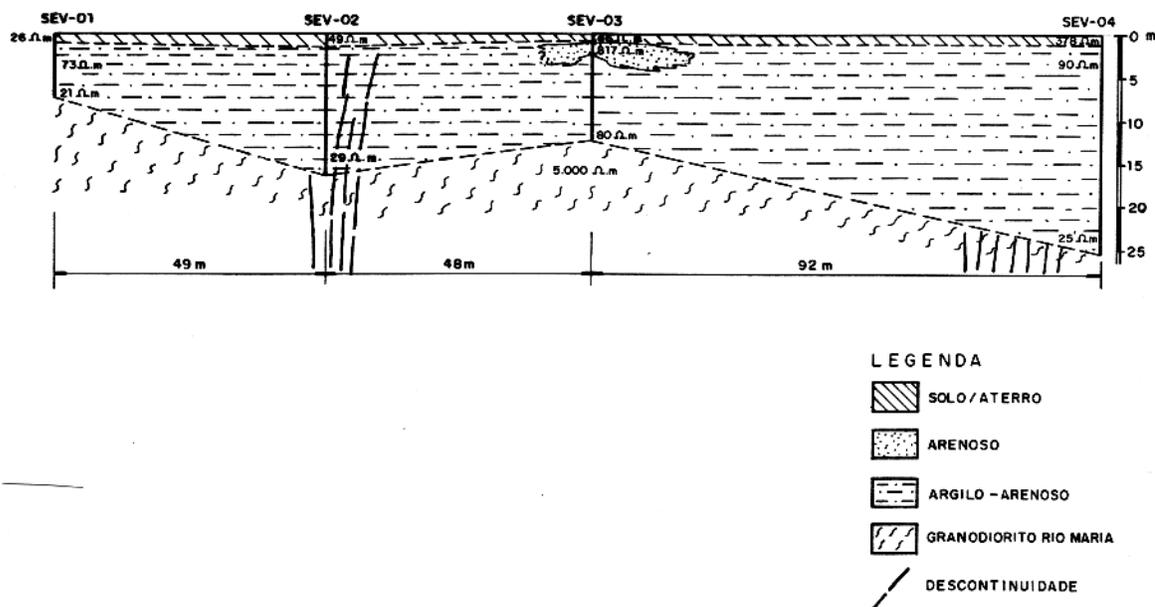


Figura 5.1 - Seção Geométrica 01

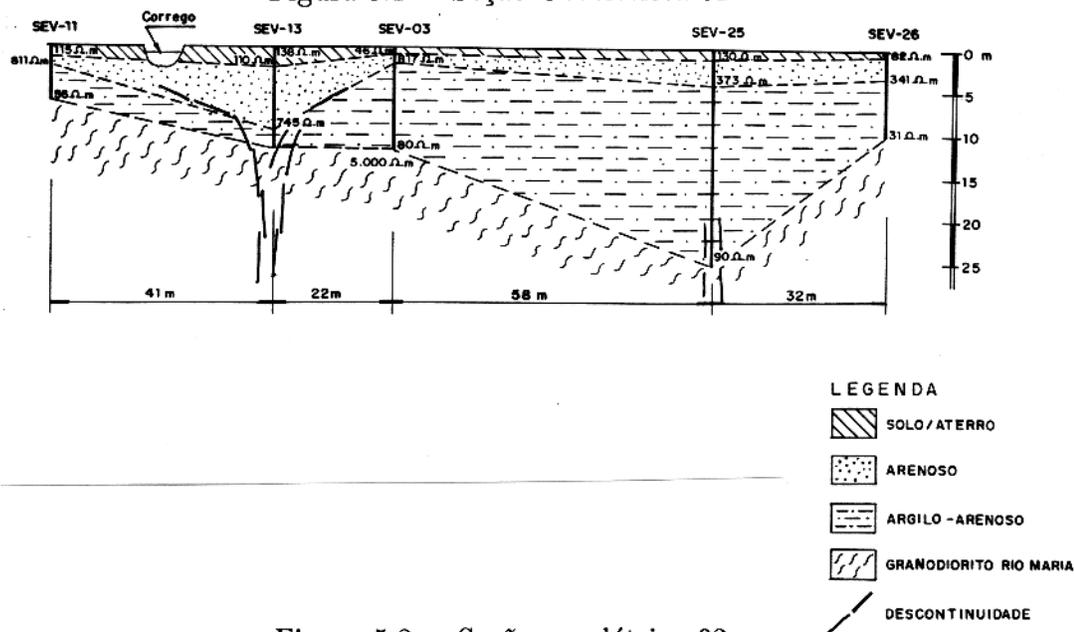


Figura 5.2 - Seção geométrica 02

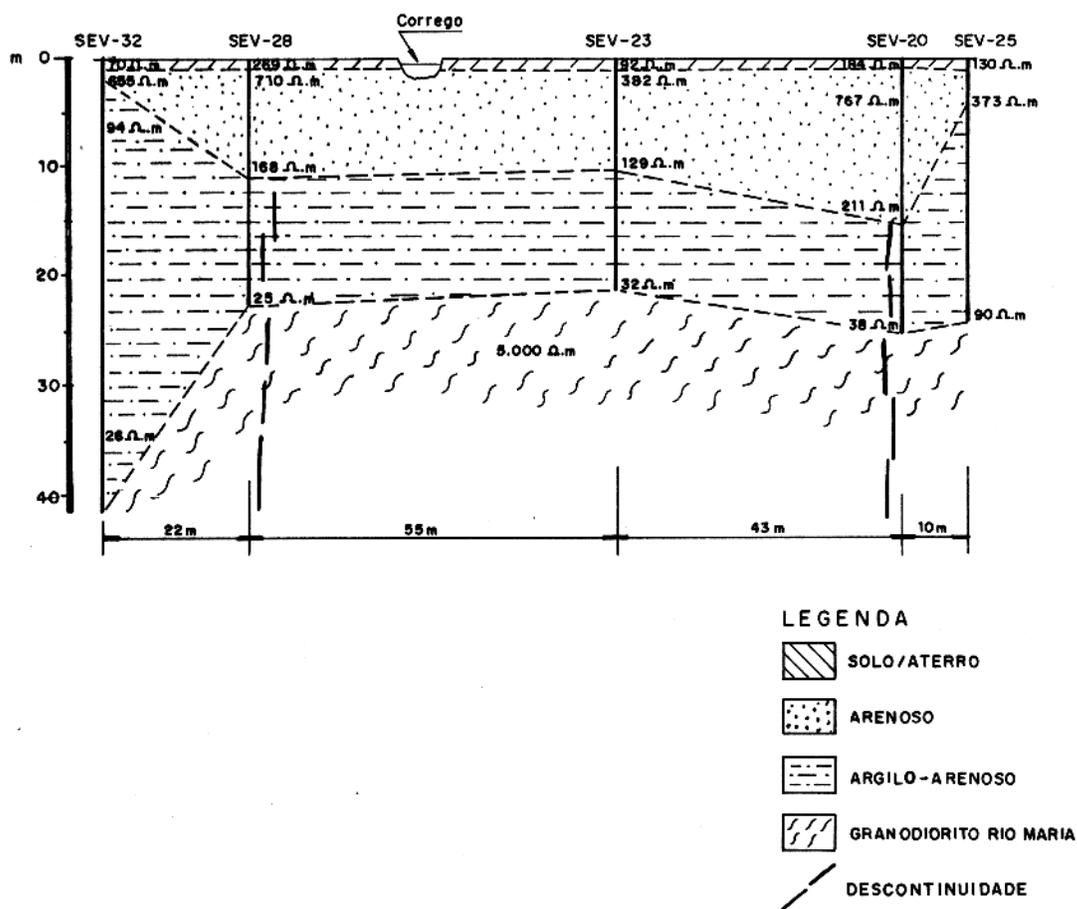


Figura 5.3 - Seção Geométrica 03

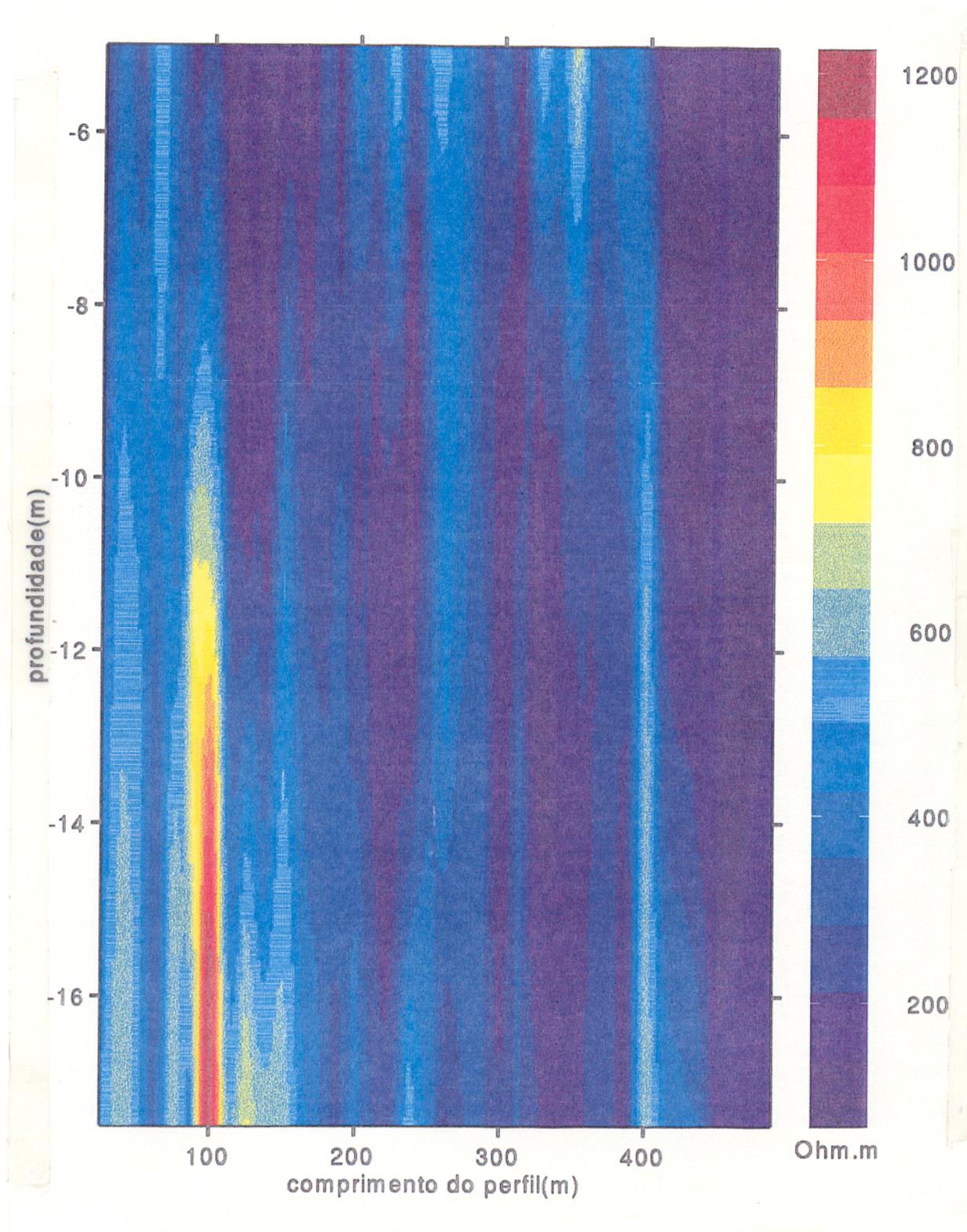


Figura 5.4 - Perfil de Caminhamento

## 6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A exemplo de outros municípios localizados no sul do Pará, o município de Ourilândia do Norte apresenta sérios problema de abastecimento de água para sua população. As alternativa para a resolução deste problema resume-se a captação de água dos manancias superficiais ou subterrâneos.

O aproveitamento do igarapé Serra, localizado no centro do distrito sede bem como do rio Caeteté, situado a 20 km, que possuem vazão necessária para o absteimento da cidade, torna-se inviável dado os altos custos para a implantação e manutenção do sistema de distribuição e a insuficiência de recursos financeiros da prefeitura local. Assim, a utilização dos recursos hídricos subterrâneos é a alternativa mais viável porque quase sempre a água deste manancial dispensa onerosos tratamentos físico-químico e bacteriológico e pode ser captada em pontos próximos e adequado ao centro consumidor.

No entanto, o armazenamento de água em rochas cristalinas, como é o caso da cidade em questão, fica restrito à existência de falhas, fraturas ou ao manto de alteração da rocha bem desenvolvido. O emprego da perfilagem elétrica de superfície visa identificar os locais de ocorrência da primeira condição. Infelizmente, devido a problemas no aparelho não foi possível realizar perfis de apoio as SEVS que mostram comportamento que sugerem a existência de tais feições estruturais em subsuperfície. Recomenda-se a aplicação deste procedimento assim como a realização de perfis de VLF e HLEM, nestes locais. As SEVs são utilizadas na pesquisa da segunda condição. Entretanto, neste tipo de ambiente geológico, o uso do modelo de camadas horizontais homogêneas e isotrópicas na interpretação dos dados de SEV pode ser inadequado. Com o intuito de pesquisar a influência que estruturas bidimensionais exercem sobre o comportamento das curvas de sondagem introduziu-se uma zona condutiva representando uma zona fraturada ou falhada, um dique ou mesmo variações litológicas laterais, no manto intempérico estratificado. As conclusões destas simulações revelam que:

- A presença da zona condutiva aflorando sob o centro de sondagem desloca integralmente a curva de sondagem como se fosse de um meio estratificado, com todos os valores de resistividade reduzidos de um mesmo fator.
- Quando desloca-se a zona condutiva não aflorante em relação ao ponto de sondagem as

curvas devido ao meio estratificado e bidimensional coincidem, ou seja, o método não detecta a heterogeneidade a uma pequena profundidade (2.8 m) no interior do manto intempérico.

- Os efeitos medidos para a zona condutiva na vertical coincidem com a resposta gerada pelo corpo com angulo de mergulho de 30°.
- As curvas de sondagem obtidas com o corpo condutivo localizado a direita do centro de sondagem são semelhantes as curvas com o corpo diametralmente posicionado no lado esquerdo do centro de sondagem.

Naturalmente que estes resultados foram obtidos para situações específicas, porém, servem para ilustrar que a interpretação das SEVs, sem o conhecimento prévio da geologia da área investigada ou sem a realização de outros procedimentos geofísicos de apoio, não identificam a existência de estruturas em subsuperfície.

A interpretação dos dados eletroresistivos coletados na cidade de Ourilândia do Norte possibilitou a definição da geologia de subsuperfície e por conseguinte as potencialidades hídricas dos estratos. Vale ressaltar que a interpretação foi feita com pouco controle geológico. A indisponibilidade de furos estratigráficos não permitiu um melhor aferimento dos parametros interpretados.

Da análise das SEVs conseguiu-se definir cinco horizontes geoléticos:

- O primeiro, cuja espessura alcança valores que variam entre 0.3 a 2.5 m, refere-se ao solo/aterro com forte heterogeneidade lateral
- O segundo horizonte com espessura variável entre 0.1 a 26.7 m, face os valores de resistividade, foi interpretado como preenchido por sedimentos arenosos com intercalação de argila.
- O terceiro estrato, com menor espessura de 2.8 e máxima de 35.6 m, tem resistividade correspondente a material argiloso-arenoso.
- O quarto, com espessura média de 20 m, esta relacionado a material argiloso.
- O último horizonte está associado ao embasamento cristalino composto por granitóides tipo Rio Maria.

Dada a proximidade dos quarto e quinto horizontes com o embasamento cristalino resolveu-se adota-los como uma única camada de constituição argilo-arenosa. A seqüência estratigráfica descrita predomina na área investigada, porém, encontrou-se também porções isoladas

contendo solo/aterro sobre saprolito de natureza argiloso-arenoso recobrimdo os granitóides. Em ambos os casos os horizontes definidos eram geologicamente esperados, dada a proporção de plagioclásio e quartzo na rocha cristalina.

O segundo horizonte apresenta condições favoráveis para armazenar água e os melhores locais para a perfuração de poços são as proximidades das SEVs 05, 09, 15, 17 e 27 efetuadas respectivamente nas Av. das Nações, Rio Branco e nas ruas 12 de Julho, Roraima e Republica do Brasil. Sob o centro destas SEVs obteve-se as maiores espessuras para este pacote.

O terceiro horizonte, apesar da natureza argilosa que lhe confere pouca transmissividade hidraulica, pode acumular água. Os locais mais promissores para a perfuração de poços são, logicamente, onde se tem as maiores espessuras do estrato e o menor conteúdo argiloso. As maiores espessuras foram obtidas nas SEVs 03, 04, 06, 07, 08, 10, 14, 17, 18, 20, 22, 23, 24, 28, 29, 31 e 32. Na Figura 3.5 estão localizados os centros de sondagens destas SEVs e as ruas onde elas foram executadas.

Recomenda-se a perfuração de um poço, com retirada de amostra de calha e testemunho, com a finalidade de confirmar ou não os prognósticos e auxiliar no refinamento da interpretação. Além disso, durante ou após a perfuração coletar-se informações sobre as características petrofísicas do possível intervalo portador de água, tais como: profundidade do topo e da base, granulometria, qualidade, potabilidade ou teor de sais dissolvidos e percentual de argila bem como parâmetros hidrogeológicos que possam avaliar a real potencialidade do aquífero.

Como consequência da interpretação geofísica construiu-se três seções geoeletricas. Estas seções permitiram uma melhor compreensão da continuidade lateral e a distribuição espacial dos diferentes estratos geoeletricos determinados na análise das curvas de sondagem.

Objetivando encontrar a causa dos altos valores de resistividade aparente presentes nos segundo e terceiro horizontes da SEV 21, cujo formato não indicava à existência de feições estruturais, como falhas e fraturas no embasamento cristalino, executou-se o perfil elétrico na rua Rondônia as proximidades da SEV 21. Da análise qualitativa do caminhamento elétrico notou-se a existência de uma zona com resistividade elevada, da mesma magnitude daquelas determinadas para os estratos da sondagem 21. Estes efeitos foram atribuídos a uma intrusão, dada à presença de diques nos granitóides tipo Rio Maria, ou uma falha de cavalgamento no substrato cristalino, face os esforços compressivo que atuaram na área investigada.

Durante o desenvolvimento desta tese foi possível detectar-se ambigüidades inerentes ao tratamento dos dados. A atribuição dos valores de resistividade e espessura para as camadas não são únicos. Isto resulta do princípio de equivalência elétrica.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

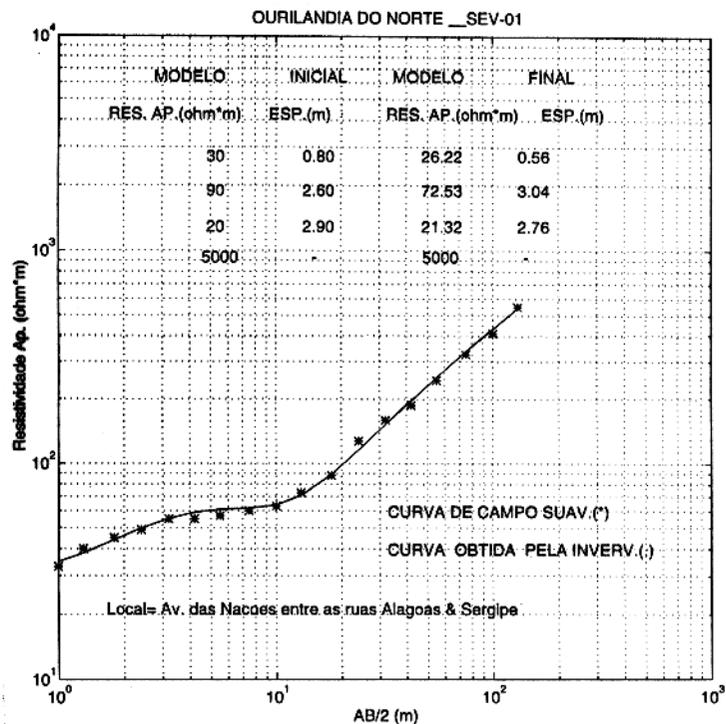
- BARD, Y. 1974. **Nonlinear Parameter Estimation**. Ney York: Academic. 341 p.
- BECK, J.V. & ARNOLD, K.J. 1977. **Parameter Estimation in Engineering and Scienc.** NeyYork: John Wiley. 501 p.
- BECKER, E. B.; CAREY, G. F.; ODEN, J.T. 1981. **Finite Elements; an introduction.** Ney Jersey, Prentice. Hall. 258 p. (The Texas Finite Element).
- BHATTACHARYA, P.K. & PATRA, H.P., 1968. **Direct Current Geoeletric Sounding; principles and interpretation.** Amsterdam, Elsevier Publishing Company. 135 p (Methods in geochimistry Geophysics, 9).
- CARRASQUILLA, A.A. 1984. **Estudo geofísico regional sobre águas subterrâneas na Ilha de Marajó, Pará, Brasil.** Belém, Universidade Federal do Pará. Núcleos de Ciências Geofísicas e Geológicas. 143 p. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Ciências Geofísicas e Geológicas, Núcleo de Ciências Geofísicas e Geológicas, UFPa, 1984.
- CARRASQUILLA, A.A. & RIJO, L. 1991. Análise da utilização da teoria dos meios estratificados na interpretação de SEVs da Ilha do Marajó, Pará. **Revista Brasileira de Geofísica**, 9 (2) : 187 - 197.
- COGGON, J.H. 1971. Electromagnetic and Eletric Modeling by the Finit Element Method. **Geophysics**, 36, 132 - 135.
- COSTA, J.B.S.; MACAMBIRA, E.M.B.; VALE, A.G., ARAUJO, O.J.B.; PINHEIRO, R.V.L.; JORGE JOÃO, X. da S. 1993. Evolução Litoestrutural da Região de São Félix do Xingu - Serra dos Carajás. **Geociências**, São Paulo, V.12(2), jul/Dez: 316-332.
- FARIAS, V.J.C. 1996. **Aplicação dos Métodos Eletromagnéticos VLF e HLEM na Prospecção Hidrogeológica no Município de São Domingos do Araguaia-PA.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa, 1996.

- GOL'TSMAN, F.M. 1977. Problems of the Statistical Information Theory of the Interpretation of Geophysical Observations. *Izvestya, Physics of the Solid Earth*, 13(12) : 873 - 879.
- HUEBNER, K. 1975. **The Finite Elements Method for Engineers**. Ney York, John Wiley and Sons. 500 p.
- IDESP-Instituto de Desenvolvimento Econômico e Social do Pará - Abastecimento de Água - Anuário Estatístico - 1988. Pesquisas geofísicas realizadas em convênio - FNS/UFPa de 1988 - 1995 (jul) - e déficit da demanda de consumo de água potável no Estado do Pará. (Relatório Diagnóstico).
- INMAM, J.R. 1975. Resistivity Inversion with ridge regression. *Geophysics*, 40:789-817.
- INMAM, J.R.: RYU, T.: WARD, S.H. 1973. Resistivity Inversion. *Geophysics*, 38:1088-1108.
- KELLER, G.V. & FRISCHNECHT, F.C. 1970. **Electrical Methods in Geophysical Prospecting**. Oxford, Pergamon Press. 517 P.
- KOEFOD, O. 1979. **Geosounding Principles 1, Resistivity Souding Measurements**. Amsterdam, Elsevier. 276 p.
- LINES, L.R. 1988. Inversion of Geophysical Data. Tulsa. Society of Exploration Geophysicists. 543 p. **Geophysics Reprint Series, 9**.
- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M. da C. 1983. **Curso de Geofísica de Prospecção**. Belém, UFPa. Centro de Geociências. 263 p.
- LUIZ, J.G. & SILVA, L.M. da C. 1995. **Geofísica de Prospecção**. Belém, CEJUP. V. 1, 311 p.
- MACAMBIRA, E.M.B. & VALE, A.G.V. - Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. **Folha São Félix do Xingu (SB.22-Y-B)**. Estado do Pará. Brasília. Texto DNPM/CPRM. (no prelo).
- MARTORANO, L.G.; CÉZAR, E.G.M.; PEREIRA, I.C.B. 1983. **Estudos climáticos do Estado do Pará, Classificação Climática (KÖPPEN) e deficiência Hídrica (THORNTWHITE, MATHER)**. Belém, SUDAM/EMBRAPA, SNLCS. 53 p.
- MENKE. W. 1984. **Geophysical Data analysis: Discrete Inverse Theory**. Orlando: Academic. 523 p.

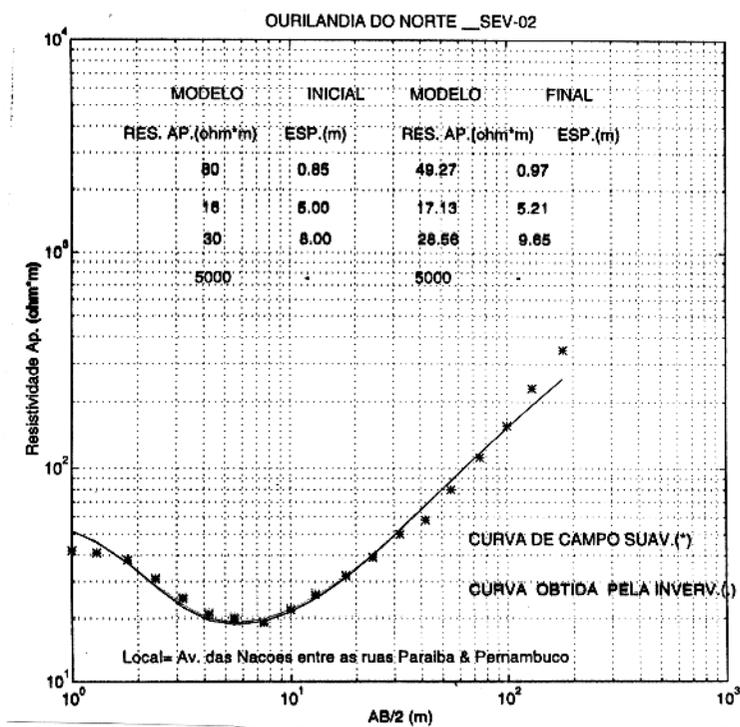
- ORELLANA, E. 1972. **Prospeccion Geoeletrica en Corriente Continua**. Madrid. Paraninfo. 523 p.
- PETRICK, W.R.; PELTON, W.H.; WARD, S.H. 1977. Ridge Regression Inversion Applied to Crustal Resistivity and Sounding Data from South Africa. **Geophysics**. 42:995-1006.
- PONTES, M.X. 1995. Pesquisas geofísicas realizadas em convênio - FNS/UFPA de 1988- 1995 (jul) - e déficit da demanda de consumo de água potável no Estado do Pará. (Relatório Diagnóstico).
- RIJO, L. 1977. **Modelling of Electric and Electromagnetic Data**. PhD Thesis. Salt Lake City, University of Utah. 242 p.
- RIJO, L. 1981. A Fast Finite Element (FEE) Algorithm for two and three - Dimensional IP - Resistivity Data Interpretation. In: SIAM CONFERENCE ON MATHEMATICAL AND COMPUTATIONAL METHODS IN THE EXPLORATION AND EXTRACTION OF DEEP MINERAL RECOURCES, Tucson, 1991, **SIAM Conference Abstracts**. p. 16-19.
- RIJO, L. 1982. Mathematical Modelling of Applied Geoelectromagnetism. **PROCEEDINGS OF THE INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON APPLIED GEOPHYSICS IN TROPICAL REGIONS**, Belém, 1982, Brazil, 1-8:429-471.
- RIJO, L. 1994a. SEV1D - Programa para modelagem de sondagem elétrica vertical unidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGF/UFPA.
- RIJO, L. 1994b. SEV1DINV - Programa para inversão de sondagem elétrica vertical unidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGF/UFPA.
- RIJO, L. 1994c. SEV2D - Programa para modelagem de sondagem elétrica vertical bidimensional. **EGSLIB (Electrical Geophysics Software Library)**. Belém, DGF/UFPA.
- RIJO, L. 1995. Modeling of 2-D Schlumberger Electrical Sounding by Finite and Infinite Elements. Submitted to *Geophysics*.
- ROSATELLI, J.S. 1974. Mapa Exploratório de solos. In: PROGRAMA Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. **Folha São Félix do Xingu (SB.22-Y-B)**. Estado do Pará. Brasília. Texto DNPM/CPRM. (no prelo).
- ROSS, C.T.F. 1990. **Finite Element Methods in Engineering Science**. New York, Ellis Horwood. 519 p.

- SILVA, A. de Q. 1996. **Eletroresistividade Aplicada a Caracterização Hidrogeológica Para o Abastecimento da Cidade de São Domingos do Araguaia - Pará.** Belém, Universidade Federal do Pará. Centro de Geociências. Tese (Mestrado em Geofísica) - Curso de Pós-Graduação em Geofísica, Centro de Geociências, UFPa, 1996.
- SILVESTER, P.P. & FERRARI, R.L. 1983. **Finit Elements for Electrical Engineers.** Cambridge University. 209 p.
- TARANTOLA, A. 1987. **Inverse Problem Theory.** Amsterdam: Elsevier. 614 p.
- TWOMEY, S. 1977. **Introduction to the Mathematics of Inversion in Remote Sensing and Indirect Measurements.** Amsterdam: Elsevier. 243 p. (Development in Geomathematics,3)
- VELOSO, H.P.; JAPIASSU, A.M.S.; FILHO, L.G.; LEITE, P.F. 1974. **Vegetação da Folha São Félix do Xingu.** In: PROGRAMA Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil. Programa Grande Carajás. **Folha São Félix do Xingu (SB.22-Y-B).** Estado do Pará. Belém. Texto DNPM/CPRM. (no prelo).
- ZOHDY, A.A.R. 1978. **Total Field Resistivity Mapping and Sounding over Horizontally Layered Media.** *Geophysics*. 43: 748-766.

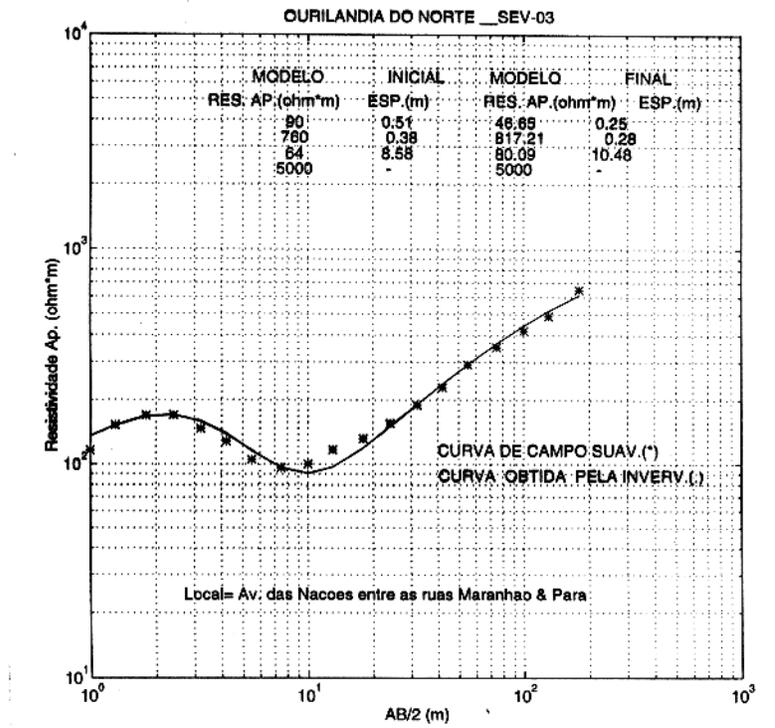
**I - ANEXO I - CURVAS DE CAMPO & INTERPRE-  
TADAS**



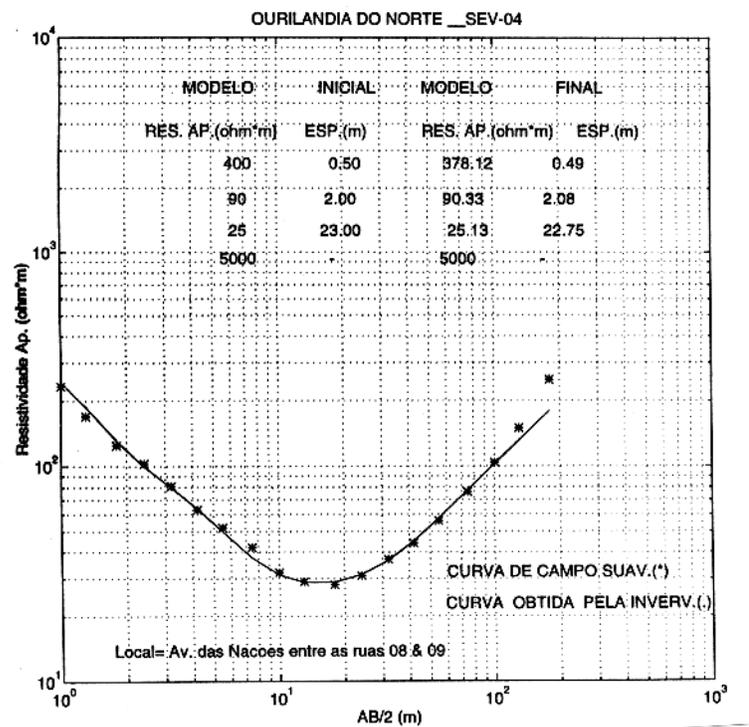
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 01



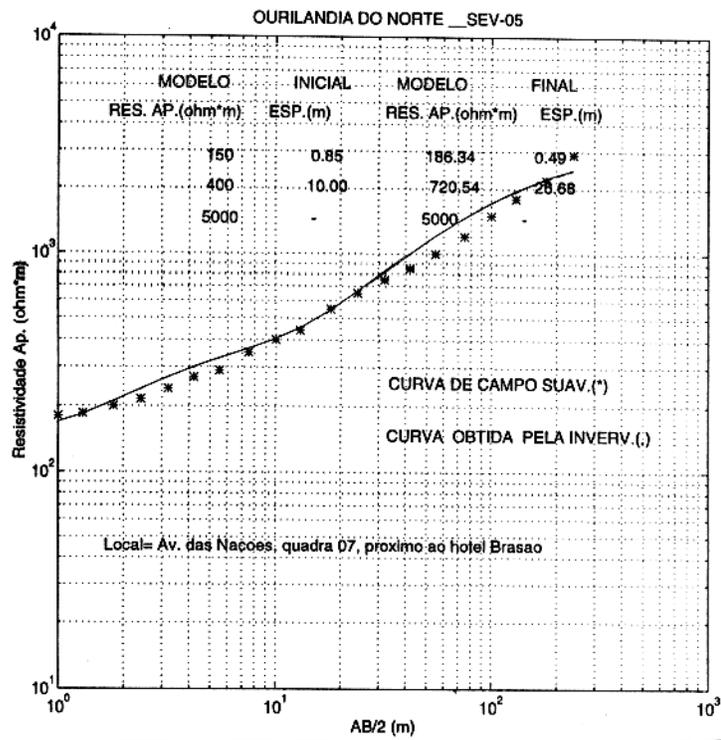
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 02



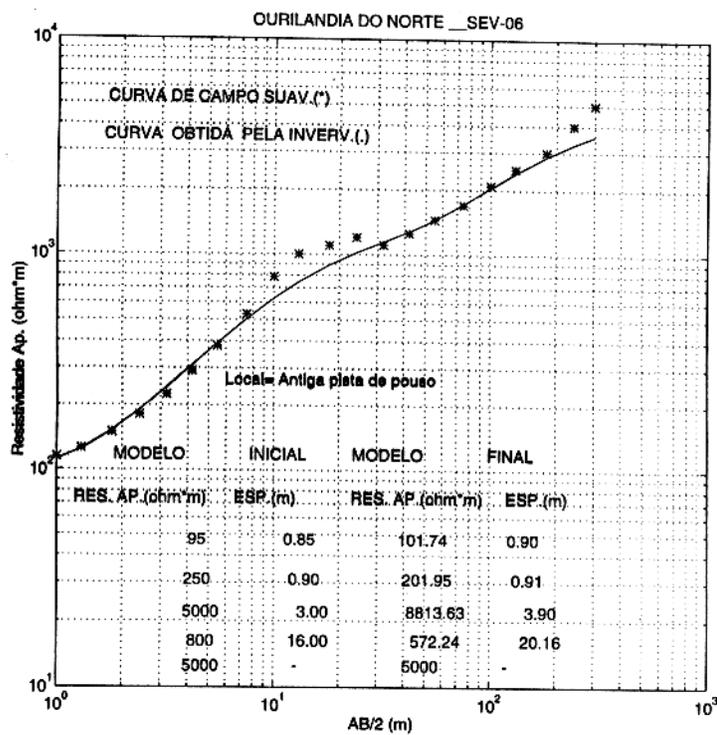
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 03



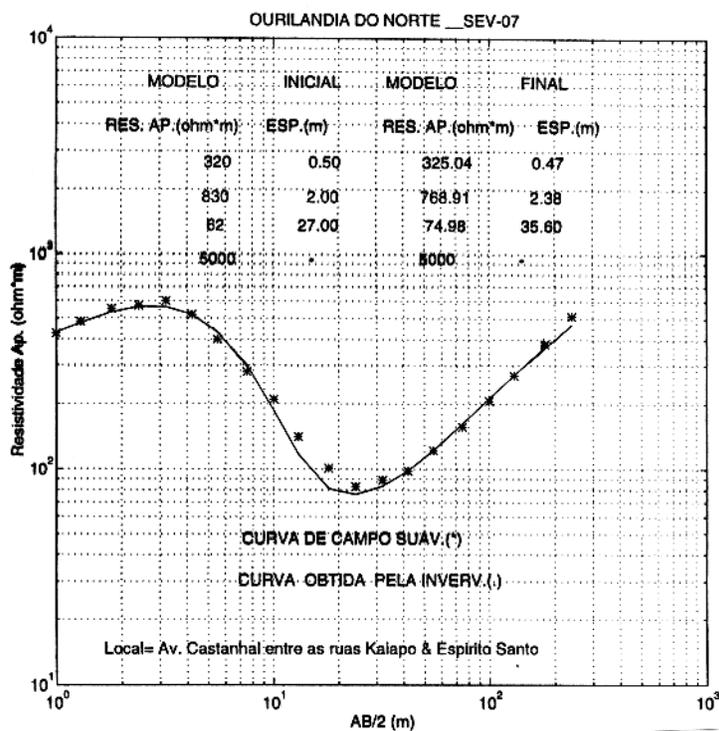
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 04



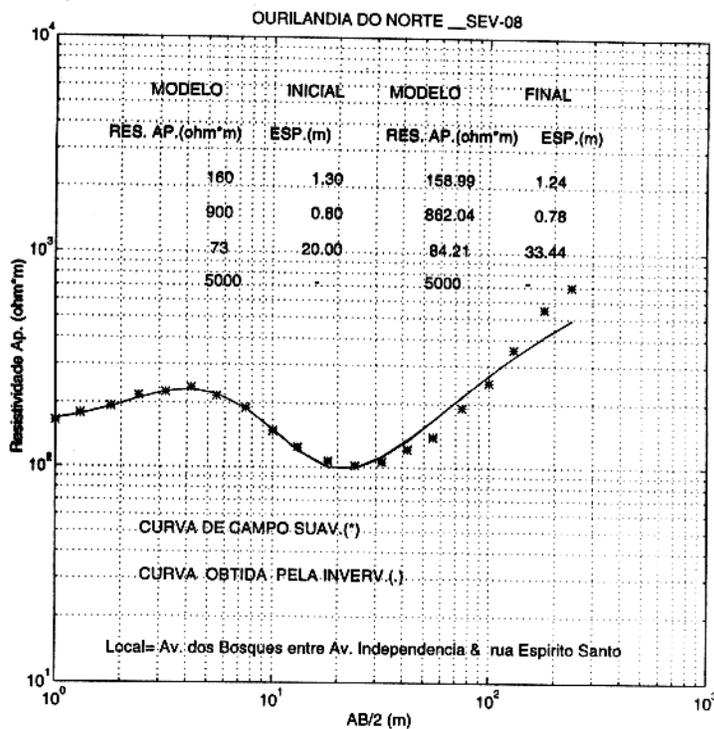
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 05



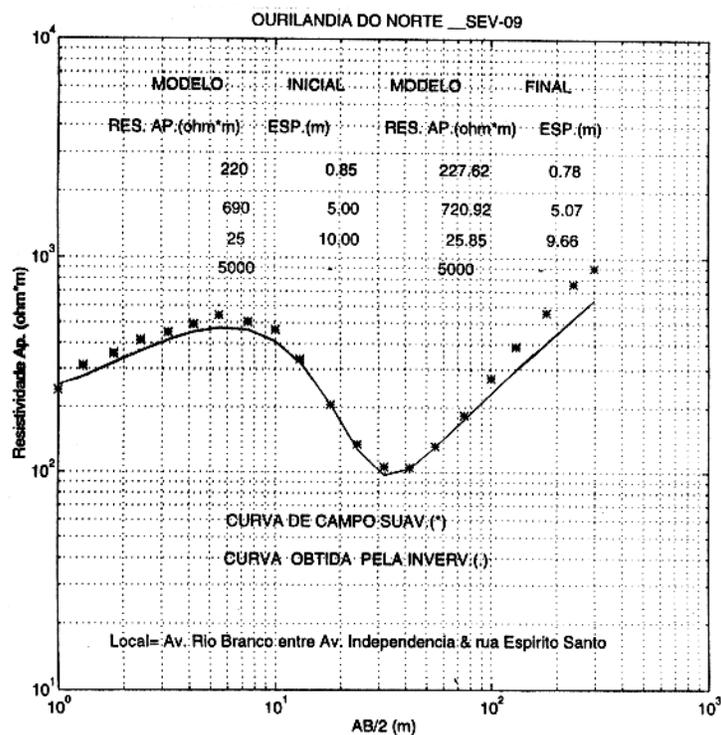
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 06



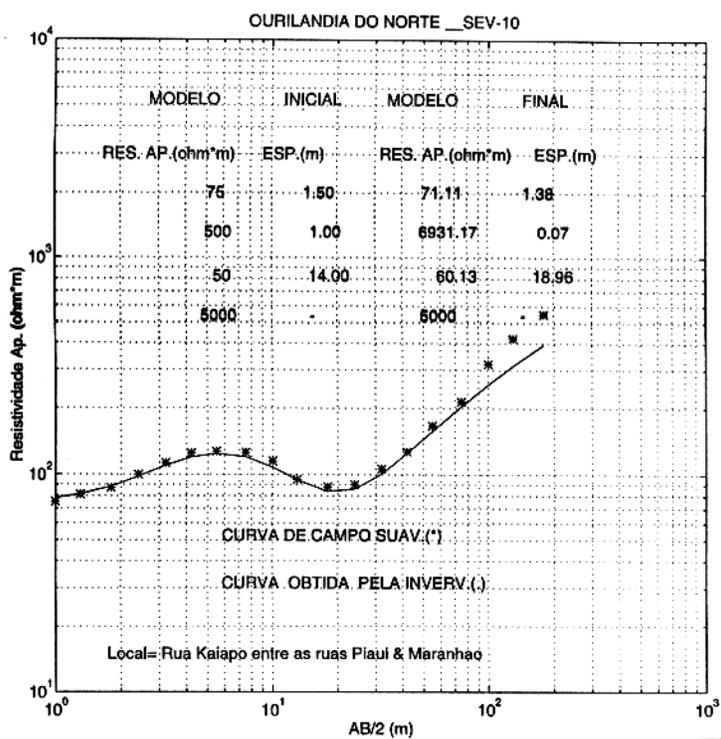
### SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 07



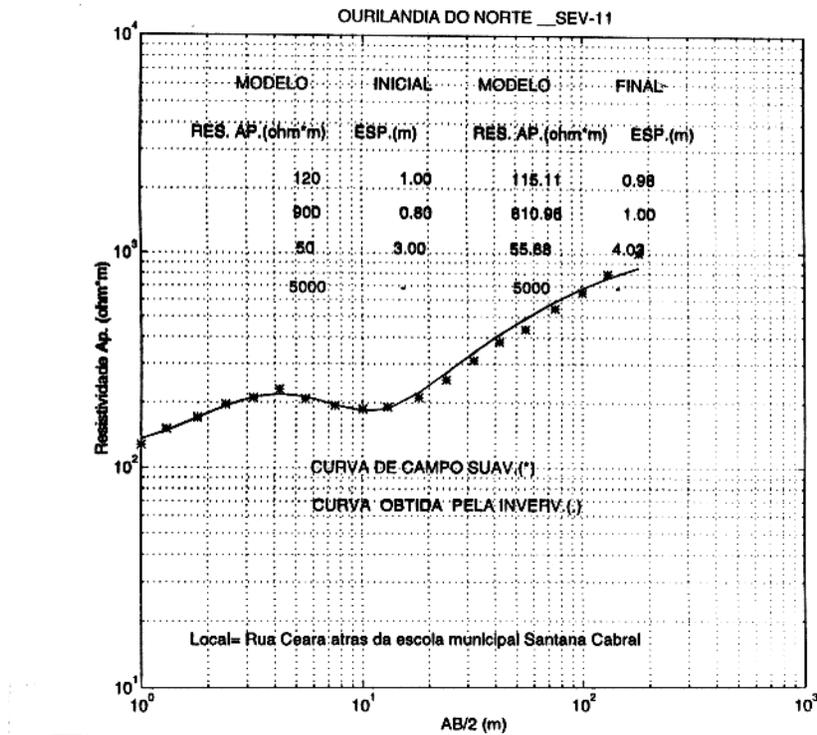
### SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 08



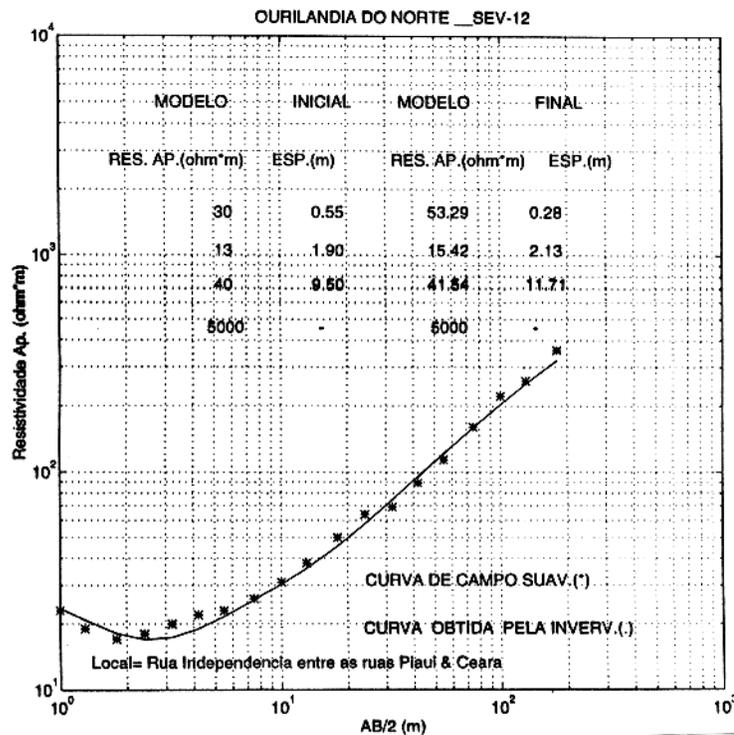
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 09



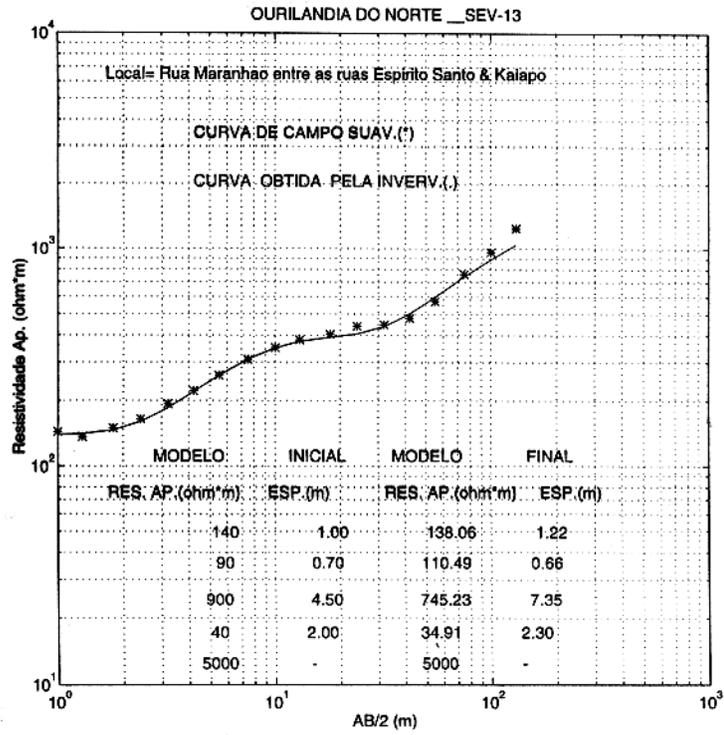
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 10



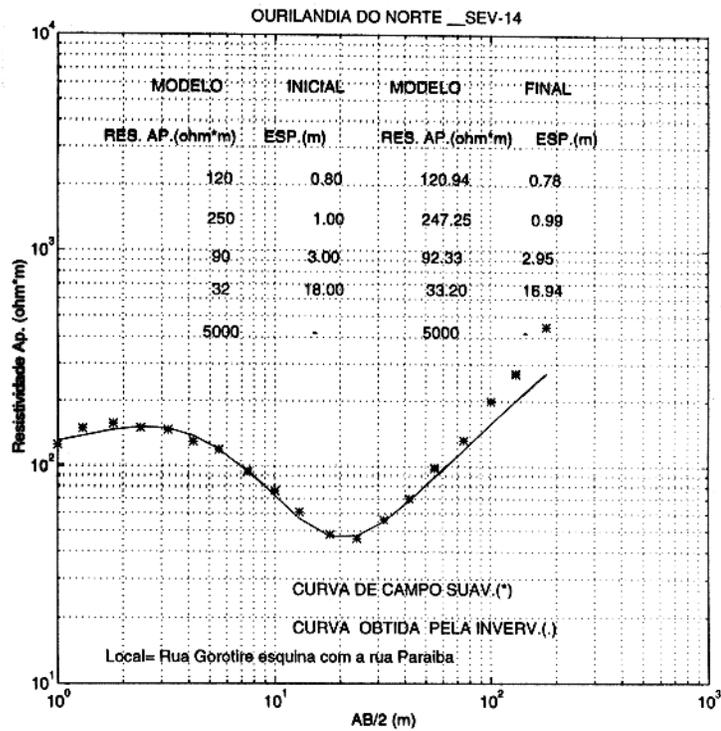
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 11



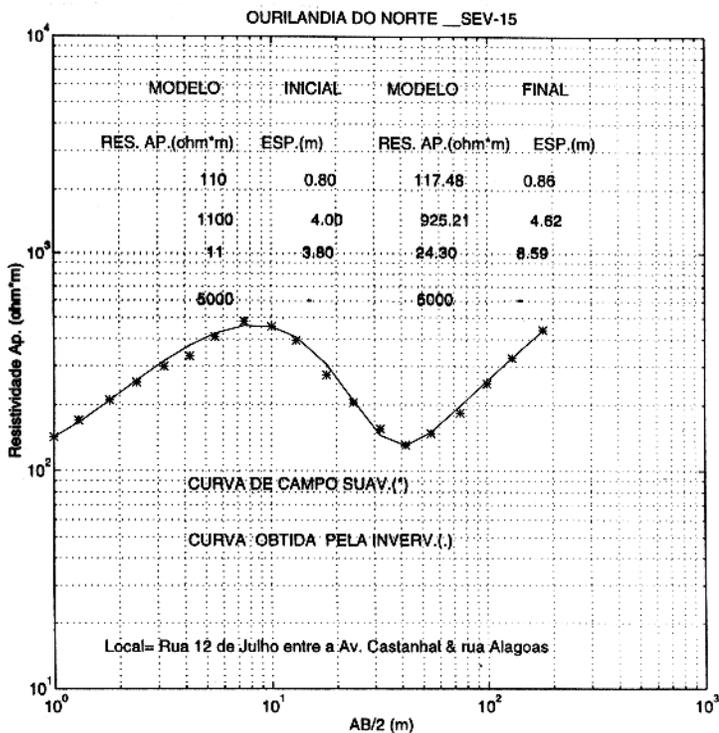
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 12



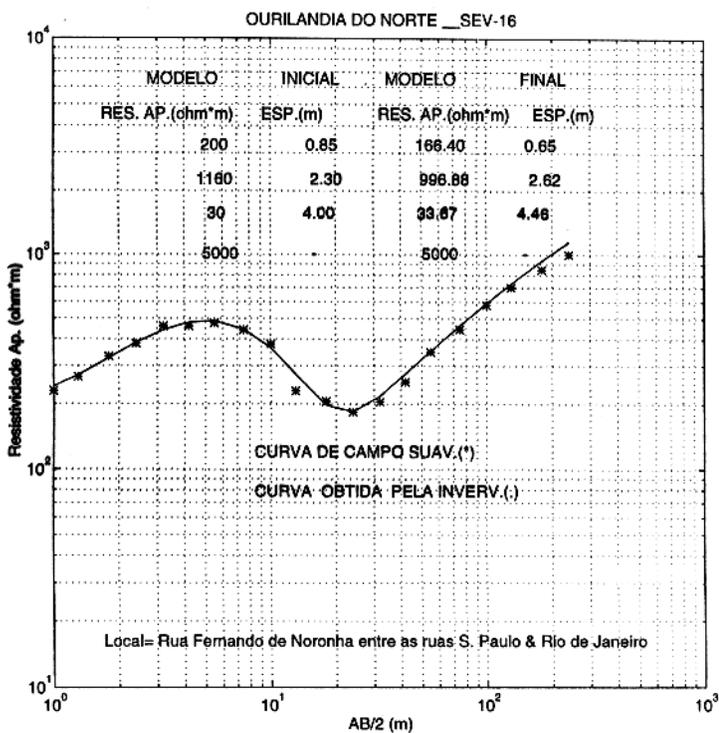
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 13



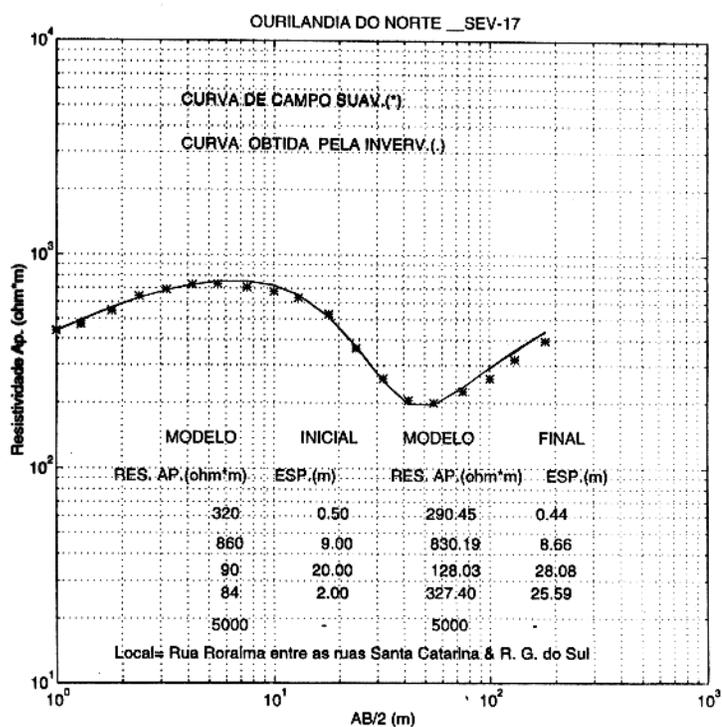
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 14



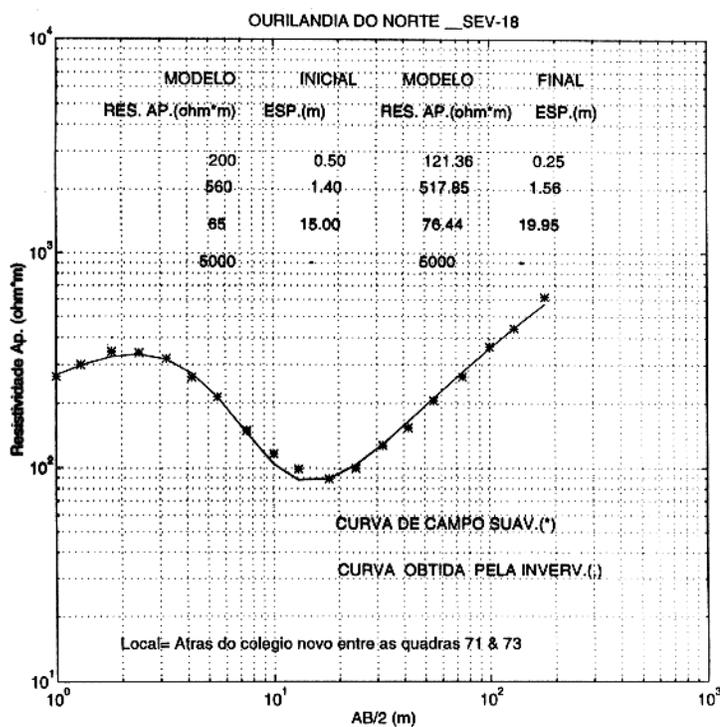
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 15



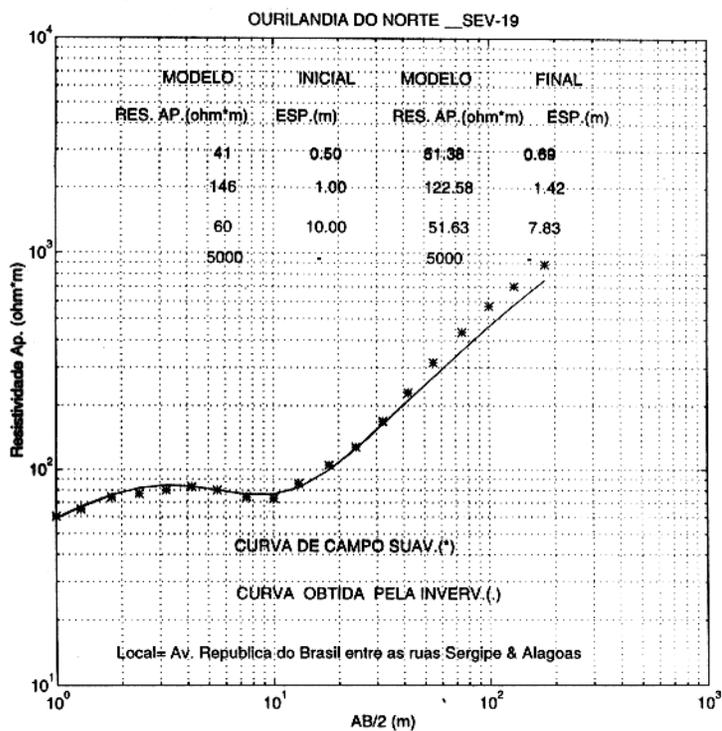
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 16



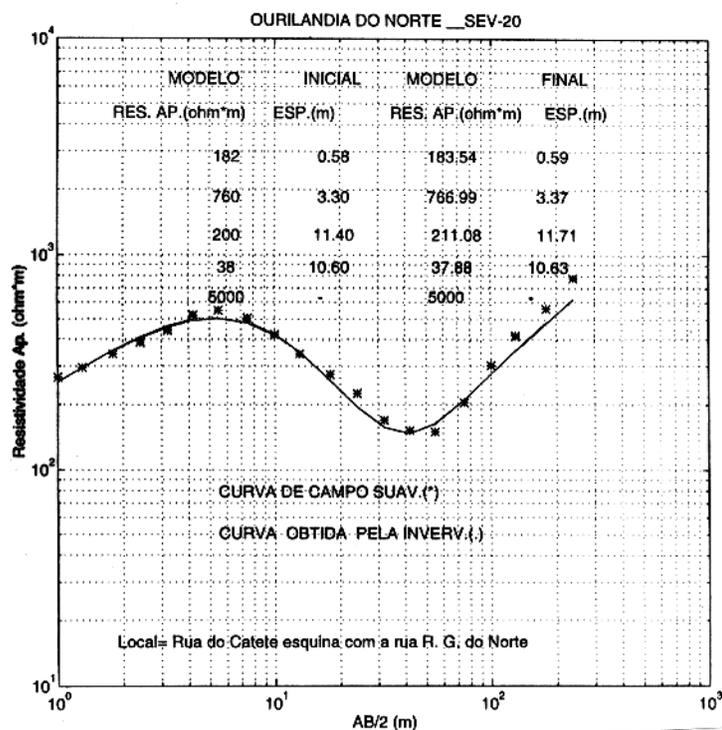
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 17



SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 18

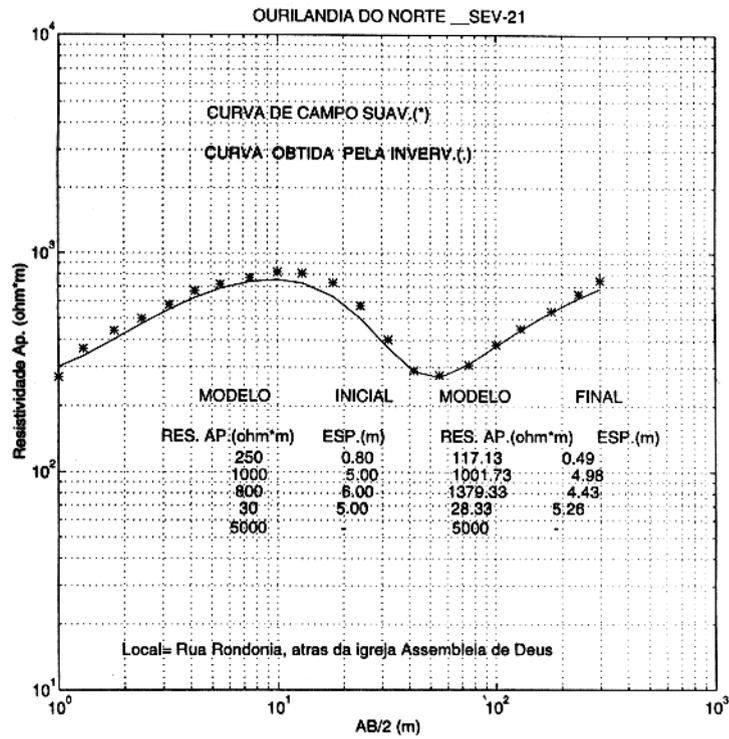


SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 19

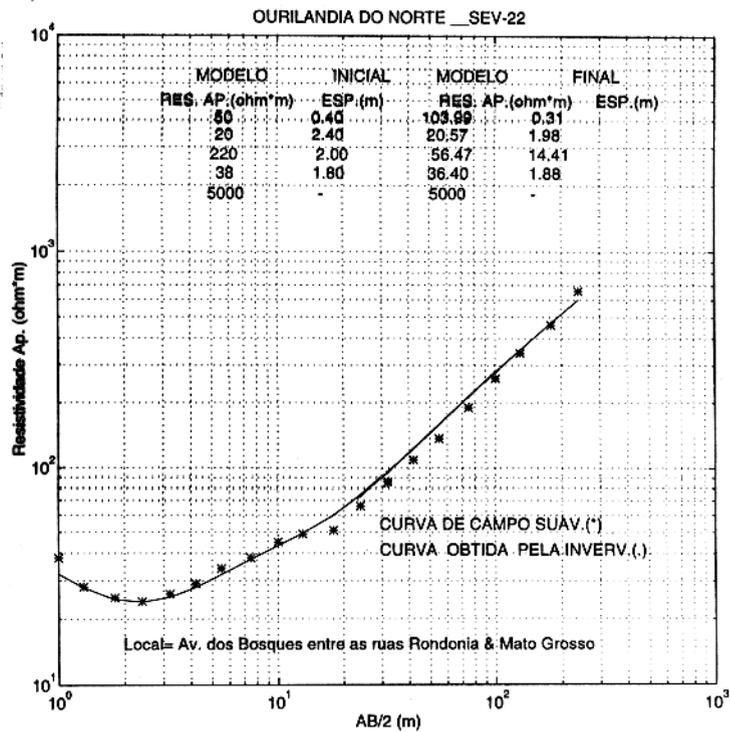


SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 20

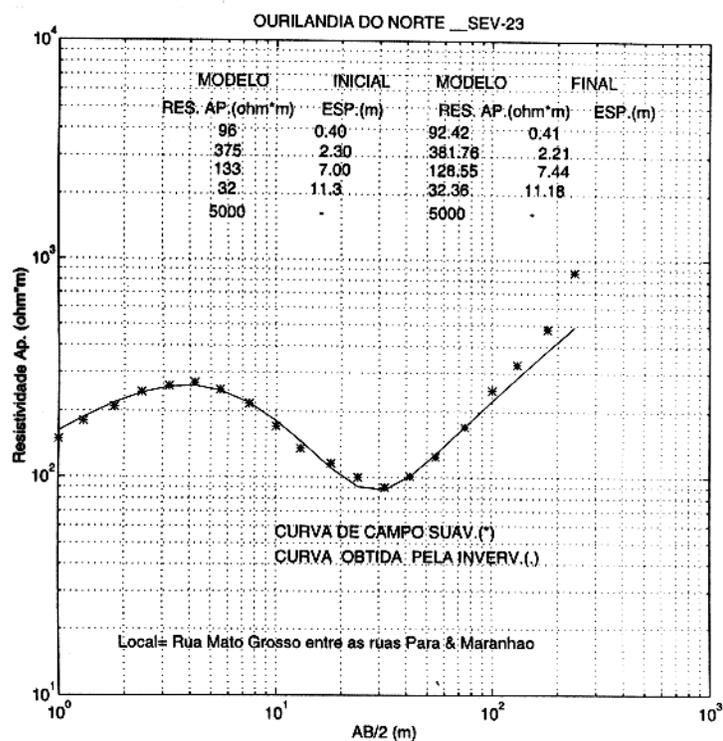
**II - ANEXO II - CURVAS DE CAMPO & INTER-  
PRETADAS**



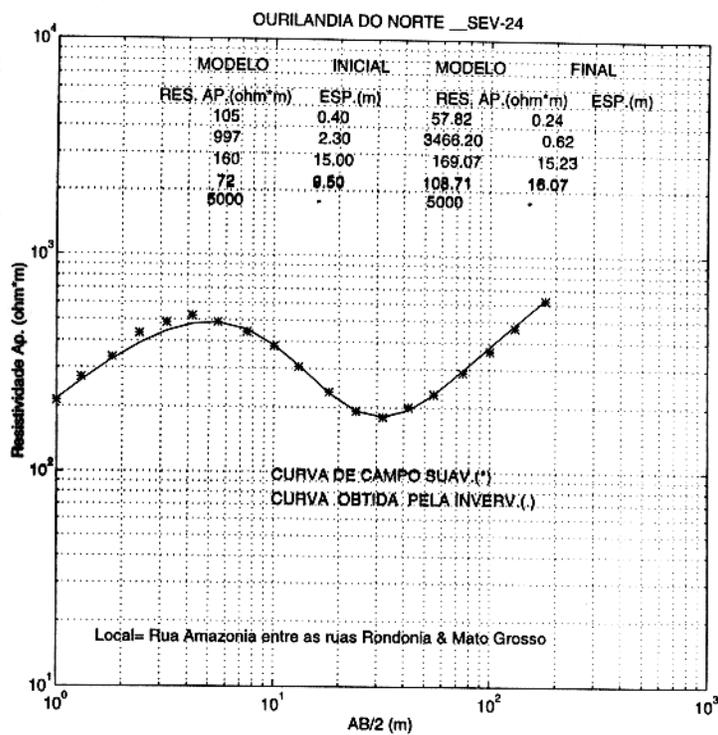
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 21



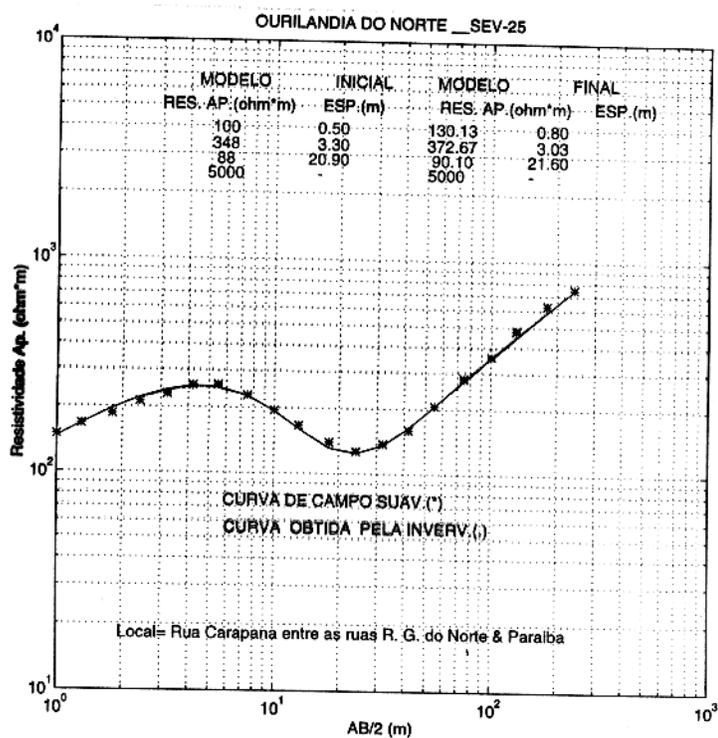
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 22



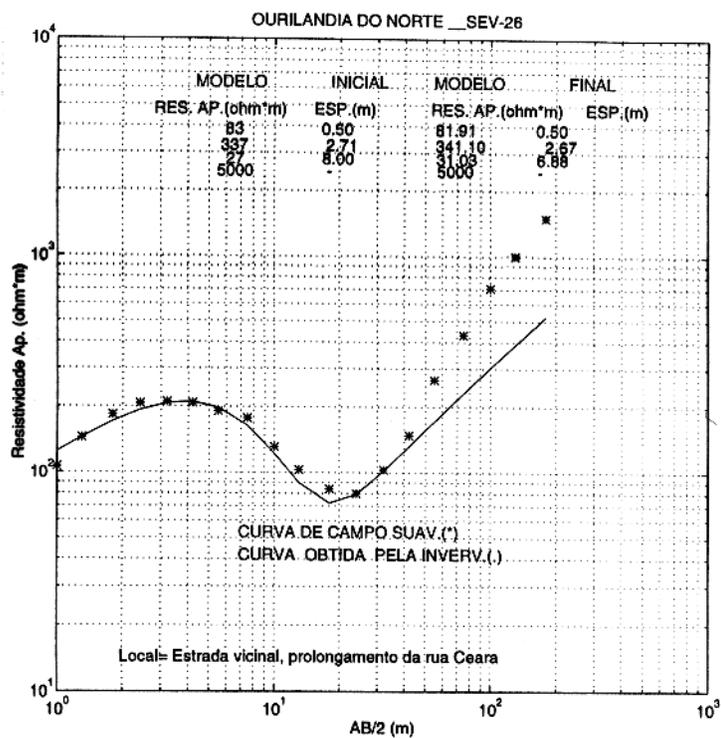
### SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 23



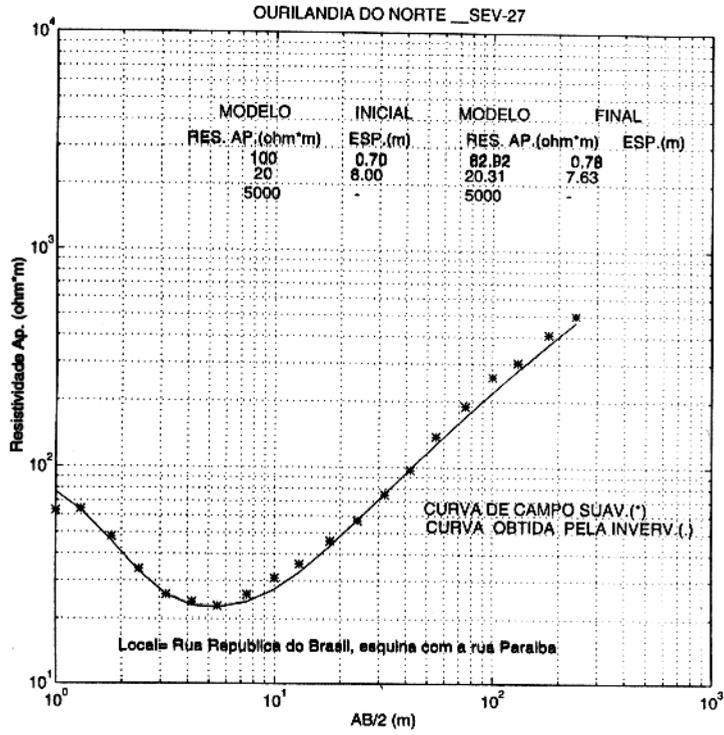
### SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 24



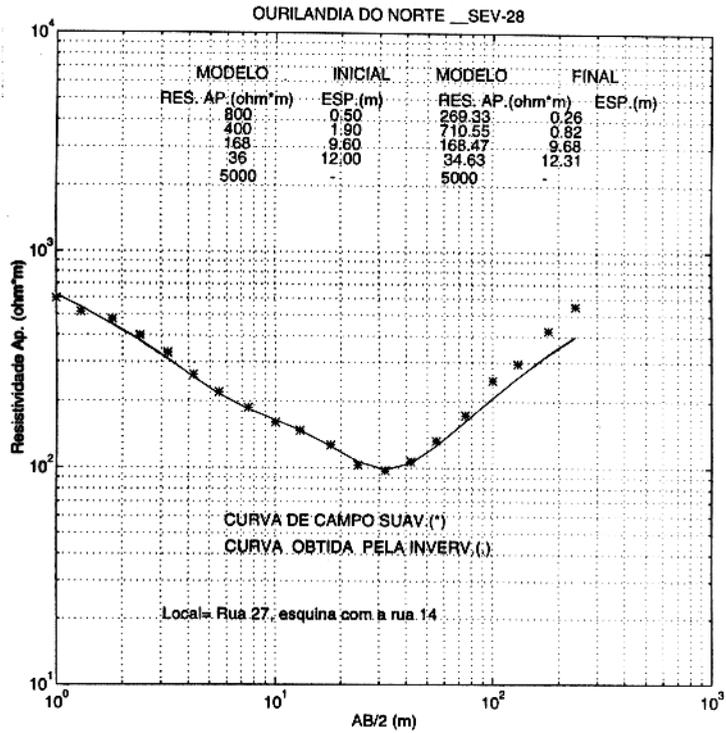
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 25



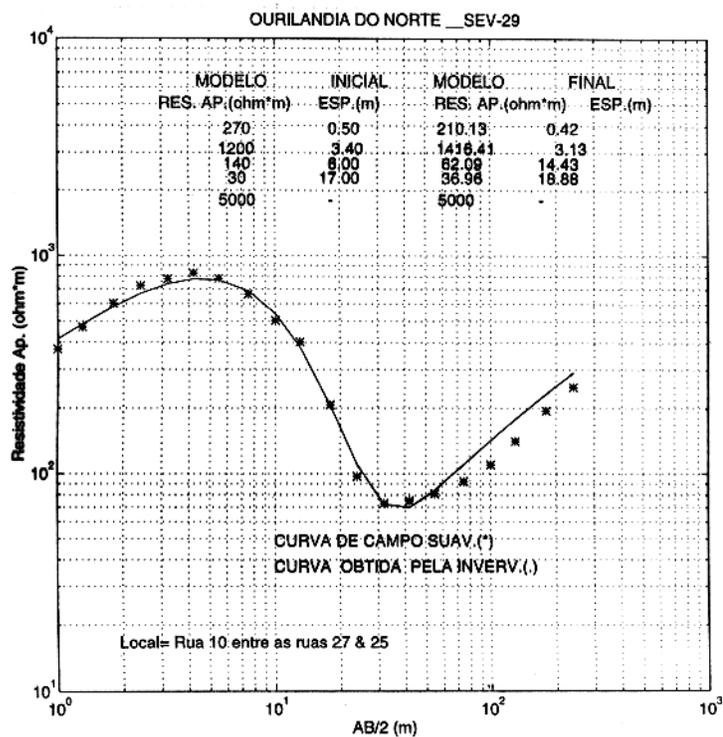
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 26



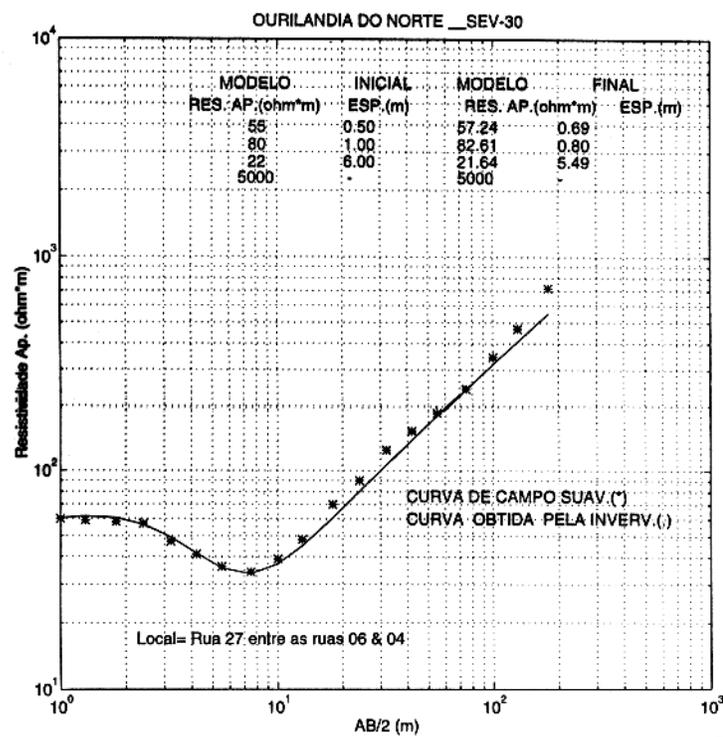
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 27



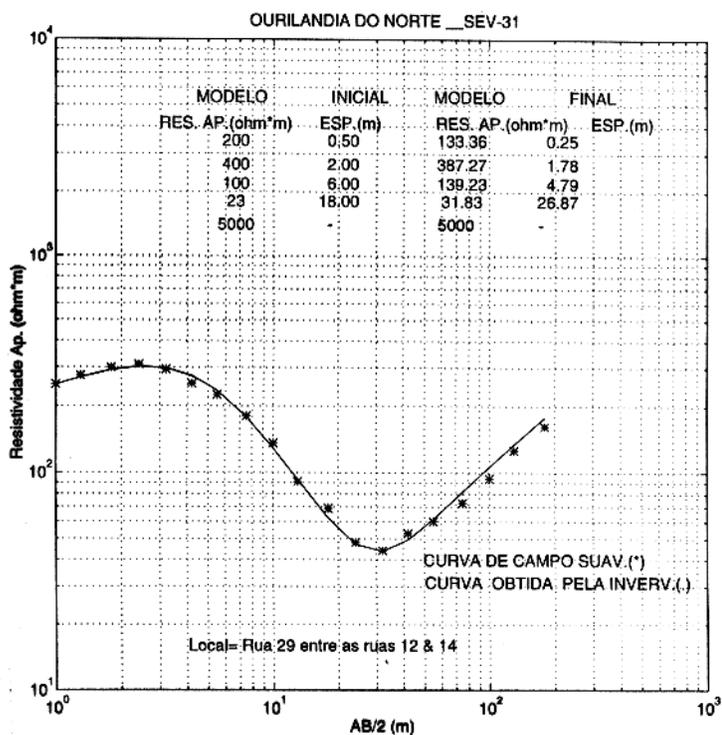
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 28



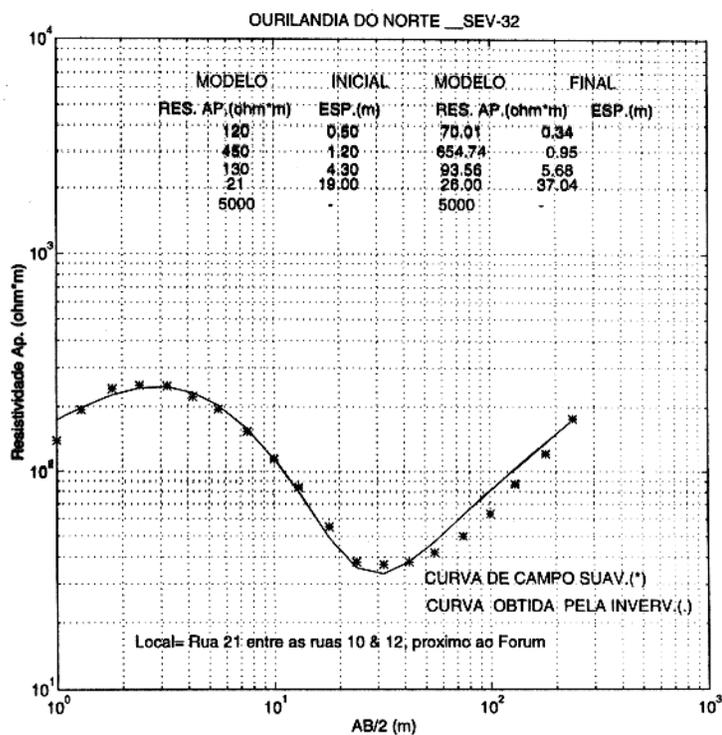
SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 29



SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 30



SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 31



SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL 32