

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LUÍS ANSELMO DA SILVA

**APLICAÇÃO GEOFÍSICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DO
PERFIL DO SOLO DE UMA VERTENTE ASSOCIADA A
PROCESSO EROSIVO LINEAR NO MUNICÍPIO DE SORRISO-MT**

Orientadores: Prof. Dr. Shozo Shiraiwa

Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra

Campina Grande – PB

Outubro de 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LUÍS ANSELMO DA SILVA

**APLICAÇÃO GEOFÍSICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DO
PERFIL DO SOLO DE UMA VERTENTE ASSOCIADA A
PROCESSO EROSIVO LINEAR NO MUNICÍPIO DE SORRISO-MT**

Dissertação apresentada à Universidade
Federal de Campina Grande, como parte
dos requisitos para obtenção do Título de
Mestre em Engenharia Civil, na área de
Geotecnia.

Orientadores: Prof. Dr. Shozo Shiraiwa

Prof. Dr. Raimundo Leidimar Bezerra

Campina Grande – PB

Outubro de 2002

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
INSTITUTO DE CIÊNCIAS E TECNOLOGIA
GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL

LUÍS ANSELMO DA SILVA

APLICAÇÃO GEOFÍSICA PARA A CARACTERIZAÇÃO DO
PERFIL DO SOLO DE UMA VERTENTE ASSOCIADA A
PROCESSO EROSIVO LINEAR NO MUNICÍPIO DE SORRISO-MT

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Campina Grande
para obtenção do título de

S586m
2002

Silva, Luís Anselmo da
Aplicação Geofísica para a caracterização do perfil do solo de uma
vertente associada a processo erosivo linear no município de Sorriso-
MT./ Luís Anselmo da Silva. – Campina Grande: UFCG, 2002.
76p.: il.

Inclui Bibliografia
Dissertação (Mestrado)- DCE,UFCG

1. Geofísica - método da eletrorresistividade 2. Geofísica – método “ground
penetrating radar. 3. Geofísica - SEV. 4. Pedologia – caracterização do
perfil do solo. 5. Hidrogeologia – variação do nível d’água.

CDU: 550.3

APLICAÇÃO GEOFÍSICA PARA CARACTERIZAÇÃO DO
PERFIL DO SOLO DE UMA VERTENTE ASSOCIADA A
PROCESSO EROSIVO LINEAR NO MUNICÍPIO DE
SORRISO- MT

LUÍS ANSELMO DA SILVA

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DA
COORDENAÇÃO DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM
ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL DA UNIVERSIDADE
FEDERAL DE CAMPINA GRANDE – PB COMO PARTE DOS
REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE
MESTRE EM ENGENHARIA CIVIL, NA ÁREA DE GEOTECNIA.

Aprovada por:



Prof. Shozo Shiraiwa, Dr.
(ORIENTADOR)



Prof. Raimundo Leidimar Bezerra, Dr.
(ORIENTADOR)



Prof. Carlos Alberto dos Anjos, Dr.
(EXAMINADOR EXTERNO)



Prof. Wilson Conciani, Dr.
(EXAMINADOR EXTERNO)

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS.....	i
LISTA DE TABELAS.....	v
LISTA DOS SÍMBOLOS E DAS ABREVIACÕES.....	vi
RESUMO	vii
ABSTRACT	viii

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS	1
--------------------------------	---

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	3
2.1 MÉTODOS DIRETOS	3
2.1.1 Poços de monitoramento do nível d'água.....	3
2.1.2 Furos de sondagem a trado	4
2.2 MÉTODOS INDIRETOS	4
2.2.1 Eletrorresistividade.....	4
2.2.2 <i>Ground Penetrating Radar</i> (GPR)	9

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS.....	15
3.1 ÁREA DE ESTUDO	15
3.1.1 Aspectos Fisiográficos.....	15
3.1.1.1 Geologia.....	15
3.1.1.2 Solos	19
3.1.1.3 Clima	19
3.1.1.4 Hidrografia.....	19
3.1.1.5 Vegetação	20
3.1.1.6 Geomorfologia.....	21
3.2 MATERIAIS UTILIZADOS	23
3.2.1 Poços de monitoramento de nível d'água.....	23
3.2.2 Eletrorresistímetro	25

3.2.3 GPR	27
3.2.4 Materiais utilizados no geo-referenciamento.....	27
3.3 METODOLOGIA.....	28
3.3.1 Métodos diretos de investigação.....	28
3.3.2 Métodos indiretos de investigação	32
3.3.2.1 Sondagens elétricas verticais (SEV's).....	32
3.3.2.2 Perfis GPR.....	37

CAPÍTULO 4

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS	42
4.1 FUROS DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA	42
4.2 MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO	46
4.2.1 Dados de eletrorresistividade.....	46
4.2.2 Dados de GPR	60

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES	69
------------------------------------	----

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	72
-----------------------------------	----

APÊNDICES (EM CD-ROM ANEXO).....	77
Apêndice A.....	1A
Apêndice B	1B
Apêndice C	1C
Apêndice D.....	1D
Apêndice E	1E

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Poço de monitoramento de nível d'água para aquíferos uniformes e homogêneos (modificado de SOUZA, <i>et al.</i> , 1998).....	3
Figura 2.2 – Resistividades aparentes de alguns materiais geológicos (modificado de McNEIL, 1980).....	6
Figura 2.3 – Configuração tetraeletródica comumente utilizada em SEV's com arranjo Schlumberger simétrico mostrando esquematicamente o comportamento das linhas de fluxo de corrente e equipotenciais no meio.....	7
Figura 2.4 – Diagrama de antenas GPR idealizando os principais eventos da onda eletromagnética no meio.....	10
Figura 2.5 – a) procedimento envolvendo deslocamentos (x) repetitivos das antenas transmissora e receptora, com espaçamento constante entre as antenas (s), n é igual ao número de deslocamentos; b) três traços de GPR esquemáticos mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta no solo e da onda refletida no nível d'água (Na) em subsuperfície.....	13
Figura 3.1 – Mapa de localização e vias de acesso da área estudada	17
Figura 3.2 – Mapa Geológico regional da área de Sorriso – MT (modificado de BARROS <i>et al.</i> , 1982).....	18
Figura 3.3 – Zona de transição entre a mata de galeria (ao fundo) e a vegetação antrópica na área de estudo, Sorriso – MT	20
Figura 3.4 – Vertente com grande comprimento de rampa e baixa inclinação na área de estudo, Sorriso – MT	21
Figura 3.5 – Erosão do tipo ravina desenvolvida em latossolos presentes na área de estudo, Sorriso – MT	22
Figura 3.6 – Processo de <i>piping</i> desenvolvido dentro de uma erosão presente na área de estudo, Sorriso – MT	22
Figura 3.7 – Instalação de medidor de nível d'água, onde a parte ranhurada do tubo de PVC está protegida por um tecido sintético para evitar a entrada de partículas no tubo	23

Figura 3.8 – Medidor de nível d'água elétrico utilizado nas medidas do lençol freático obtidas nos poços de monitoramento instalados dentro da área de estudo, Sorriso – MT.....	24
Figura 3.9 – a) Execução de furo de sondagem a trado mecânico. b) Retirada de material a partir do furo de sondagem a trado para caracterização pedológica	25
Figura 3.10 – Equipamento para ensaios de resistividade Geotest R100A	26
Figura 3.11 – Equipamento para ensaios de resistividade Iris Syscal R2. A esquerda o módulo de potência e no centro o console principal	26
Figura 3.12 – Equipamento RAMAC fabricado pela empresa sueca MALÅ. a) Sistema GPR sendo preparado para aquisição de dados. b) Aquisição de dados	27
Figura 3.13 – a) GPS Geoexplorer 3. b) Aquisição de dados de GPS.....	28
Figura 3.14 – Localização dos Poços de monitoramento do nível d'água dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso – MT	30
Figura 3.15 – Localização dos Furos de Sondagem a trado perfurados, para fornecer dados geológicos e pedológicos, dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso – MT.....	31
Figura 3.16 – Localização das Sondagens Elétricas Verticais (SEV's) dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.....	34
Figura 3.17 – Janela de processamento de dados de sondagens elétricas verticais do software de modelagem 1D, IPI (BOBACHEV <i>et al.</i> , 1999).....	36
Figura 3.18 – Localização dos Perfis GPR adquiridos dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso – MT	38
Figura 3.19 – Mapa topográfico gerado com dados de topografia dos pontos onde foram executadas as SEV's, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso – MT.....	39
Figura 3.20 – Fluxograma básico de processamento do software RADPRO (<i>Mala Geoscience</i>) utilizado nos dados de GPR.....	41
Figura 4.1 – a) Perfil geológico elaborado através da correlação entre os furos de sondagem a trado FT2 e FT0; b) Perfil geológico elaborado através da correlação entre o FT1 e o FT0, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso – MT.....	43
Figura 4.2 – Gráfico mostrando a porcentagem de argila, silte e areia presentes no solo coletado entre 0,0 e 0,5m de profundidade dentro da área estudada	45

Figura 4.3 – Curvas das sondagens elétricas verticais A1, B1, B2, C1, C2 e D1, realizadas na Fazenda Salvatti II , município de Sorriso – MT.....	47
Figura 4.4 – Curvas das sondagens elétricas verticais D2, D3,D4, E2, F2 e G2, realizadas na Fazenda Salvatti II , município de Sorriso – MT.....	48
Figura 4.5 – Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's A1, B1, C1 e D1 realizadas no mês de junho de 2000.	51
Figura 4.6 – Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's A1, B1, C1 e D1 realizadas no mês de maio de 2001	52
Figura 4.7 – Modelos geolétricos obtidos através da correlação entre as SEV's B2, C2, D2, E2, F2 e G2 adquiridas nos meses de junho/2000 e novembro/2000.....	54
Figura 4.8 – Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's B2, C2, D2, E2, F2 e G2 adquiridas no mês de maio de 2001.	55
Figura 4.9 – Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's D1, D2, D3 e D4 realizadas no mês de junho de 2000.	58
Figura 4.10 – Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's D1, D2 e D3 realizadas no mês de maio de 2001.	59
Figura 4.11 – (a) Seção GPR D2-G2 adquirida com antenas de 50MHz no mês de maio de 2001. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados	61
Figura 4.12 – (a) Seção GPR B2-F2 adquirida com antenas de 100MHz no mês de maio de 2001. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados	63
Figura 4.13 – (a) Seção GPR A1-D1 adquirida com antenas de 100MHz no mês de novembro de 2000. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados	64
Figura 4.14 – (a) Seção GPR D1-D2 adquirida com antenas de 100MHz no mês de novembro. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados	65
Figura 4.15 – Seção GPR A1 adquirida com antenas de 100MHz no mês de maio de 2001. (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.....	67

Figura 4.16 – a) detalhe da seção GPR D2-G2 (50MHz) adquirida em maio de 2001, as setas indicam o refletor que representa o nível d'água; b) detalhe de parte da seção GPR D2-G2 (50MHz) adquirida em novembro de 2000, as setas de linha cheia indicam o refletor que representa o nível d'água e as setas pontilhadas mostram a profundidade do nível d'água em maio 68

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1 – Relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para o arranjo Schlumberger.....	9
Tabela 2.2 – Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica (ϵ_r'), condutividade elétrica (σ_0), velocidade (v) e atenuação (α) observados nas frequências utilizadas no GPR (PORSANI, 1999).....	11
Tabela 2.3 – Frequência x Profundidade de penetração (valores para materiais geológicos com ausência de argila) (PORSANI, 1999).....	12
Tabela 3.1 – Ficha utilizada em campo para registrar os dados de sondagens elétricas verticais com o arranjo Schlumberger	32
Tabela 3.2 – Características geométricas dos perfis GPR executados dentro da área de estudo.....	36
Tabela 4.1 – Profundidade do nível d'água nos medidores de nível instalados dentro da área de pesquisa, Fazenda Salvatti II, Sorriso – MT	43

LISTA DOS SÍMBOLOS E DAS ABREVIACÕES

α	- atenuação (em dB/m)
AC	- corrente alternada
AGC	- controle de ganho automático
AQ	- Areia Quartzosa
Db	- decibel
DC	- corrente contínua
EM	- eletromagnética
ϵ_r	- constante dielétrica relativa
f	- frequência (para o GPR, em MHz)
FT	- furo a trado
GPR	- radar de penetração no solo
I	- corrente elétrica (mA)
km	- quilômetro (10^3 metros)
LVA	- Latossolo Vermelho-Amarelo
m	- metro
mA	- miliampère
mS	- milisiemens (10^{-3} Siemens, unidade de σ)
Na	- nível d'água
ns	- nanosegundo (10^{-9} Segundos)
RADPRO	- programa de processamento dos sinais de GPR
SEV	- sondagem elétrica vertical
STD	- sólidos totais dissolvidos
V	- Volt
v	- velocidade de propagação da onda EM (para o GPR em m/ns)
ΔV	- diferença de potencial (mV = milivolt)
ρ	- resistividade elétrica ($\Omega.m$)
σ	- condutividade elétrica (S/m)

RESUMO

O objetivo deste trabalho foi identificar a variação estratigráfica do subsolo e a variação sazonal do lençol freático com a finalidade de compreender a dinâmica do processo de formação de erosões lineares profundas em uma vertente associada a uma grande voçoroca no Município de Sorriso – MT. Os levantamentos de campo consistiram de aquisições de dados geológicos diretos, obtidos através de furos de sondagem a trado e observações superficiais, em conjunto com levantamentos geofísicos de eletrorresistividade e “Ground Penetrating Radar”. Após a modelagem e interpretação dos dados geofísicos com base nas informações geológicas obtidas através dos furos de sondagem, foi possível avaliar a potencialidade de utilização do método da eletrorresistividade para identificar a variação sazonal do lençol freático. As sondagens elétricas verticais (SEV’s) identificaram horizontes geoeletricos resistivos e condutivos, correlacionados com a variação pedológica, o topo da rocha e a profundidade do nível d’água. O método GPR mostrou-se eficaz no imageamento de estruturas da subsuperfície até profundidades que permitiram identificar o topo do lençol freático e o topo da rocha. Os resultados geofísicos permitiram investigar até aproximadamente 30m de profundidade (SEV’s) com boa resolução lateral (GPR), possibilitando o delineamento da estratigrafia do subsolo e o nível d’água ao longo da vertente estudada.

Palavras-Chave: Geofísica, eletrorresistividade, SEV, GPR, voçoroca

ABSTRACT

The objective of this work was to identify the stratigraphic variation of the subsoil and the seasonal variation of the water table with the purpose of comprehending the dynamics of the formation process of profound lineal erosions in a associated slope to a big rills in the Municipal district of Sorriso - MT. The field surveys consisted of acquisitions of direct geological data, obtained through for manual probing holes and superficial observations, together with geophysical surveys of resistivity and ground penetrating radar (GPR) methods. After the modeling and interpretation of the geophysical data with base in the information obtained geological through of the manual probing holes, it was possible to evaluate the utilization potentiality of the resistivity method to identify the seasonal variation of the water table. The vertical electrical sounding (VES's) identified resistive and conductive horizons, correlated with the pedologic variation, the top of the rock and the depth of the top level water. The GPR method proved effective to map structures of subsoil that allowed to identify the depth of the top level water and the top of rock. The geophysical results were adjusted from the geological information of wells of top level water controlling and manual probing holes, allowing investigations up to 30m of depth (VES's) with good lateral resolution (GPR), enabling the delineation of the stratigraphic variation and the top level water along the studied slope.

Keywords: geophysical, resistivity, SEV, GPR, rills

CAPÍTULO 1

1 INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

A ocupação e manejo inadequado do solo pela agricultura extensiva intensifica os processos erosivos, comprometendo principalmente a fertilidade do solo, lixiviando os principais minerais, sementes e adubos, tornando os solos estéreis. O principal processo erosivo atuante é a erosão laminar, seguido pelos processos erosivos lineares profundos. A atuação destes processos aumenta o custo financeiro de manejo do solo e coloca em risco o planejamento urbano.

A presença de longas vertentes com pequenas inclinações faz com que a água superficial se concentre pontualmente em uma região, provocando o surgimento de sulcos e desenvolvimento de processos erosivos lineares profundos, tais como ravinas e voçorocas. No Brasil é evidente a preocupação dos estados e municípios com a escassez de conhecimento acerca das técnicas de contenção de processos erosivos.

A degradação do solo pela prática agrícola desordenada tem provocado o aparecimento de erosões profundas no Município de Sorriso, ao norte do Estado de Mato Grosso (ALMEIDA, 1997; ARAUJO, 2002). A presença de processos de *piping* nas formações geológicas levou à indagação sobre a influência do comportamento do lençol freático no desenvolvimento destas erosões (SALOMÃO, 1999).

As autoridades do Estado de Mato Grosso em conjunto com pesquisadores da Universidade Federal de Mato Grosso, preocupados com a multiplicação das voçorocas na região, iniciaram estudos para o aprofundamento dos conhecimentos sobre o manejo do solo e controle das erosões, visando a atenuação destes processos. A necessidade da busca de informações para a melhor caracterização do subsolo sob o aspecto do conhecimento de sua estratificação e do comportamento do lençol freático desta região, levou os pesquisadores a optarem pelos processos indiretos de investigação apoiados por processos diretos. Os métodos geofísicos tem, mais recentemente, auxiliado o estudo de subsuperfície, permitindo que se obtenham informações, tanto em profundidade, quanto em área, de modo rápido e econômico, associadas à informações diretas da pedologia, geologia e hidrogeologia (WARD, 1997; ELIS, 1998; CUTRIM,

1999). A aplicação de métodos geofísicos como ferramenta adicional para caracterização do meio físico deve, entretanto, ser utilizada com cautela devido às ambiguidades dos mesmos. Estas ocorrem, comumente, em todas etapas das investigações, desde as aquisições até o produto final da interpretação. Por este fato, investigações diretas devem ser efetuadas em conjunto com as investigações indiretas.

O objetivo desta pesquisa é caracterizar a cobertura pedológica, o substrato geológico e estabelecer a variação do nível d'água em uma vertente, localizada à montante de uma voçoroca ocasionada pela ocupação e manejo inadequado do solo por agricultura, utilizando-se métodos geofísicos com informações pedológicas.

Como objetivos específicos:

- identificar intervalos de resistividade elétrica, através da utilização de sondagens elétricas verticais (SEV's), que possibilitem definir variações pedológicas, geológicas e da profundidade do nível d'água no subsolo;
- definir a variação do nível d'água no subsolo através de observações diretas em furos de sondagem a trado e levantamentos geofísicos; e
- definir padrões de reflexão de dados de Radar de Penetração no Solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) que permitam definir a profundidade do nível d'água no subsolo na área de estudo.

CAPÍTULO 2

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 MÉTODOS DIRETOS

2.1.1 Poços de monitoramento de nível d'água

O poço de monitoramento de nível d'água consiste em furo no subsolo, onde é instalado um tubo plástico, perfurado e com a parte inferior tamponada. Um tubo de PVC de 50 mm é instalado no furo de sondagem, com proteção na parte perfurada com filtro de areia e manta sintética (SOUZA, *et al.*, 1998). Na superfície do terreno é feita uma caixa de proteção para resguardar o equipamento e identificá-lo (Figura 2.1).

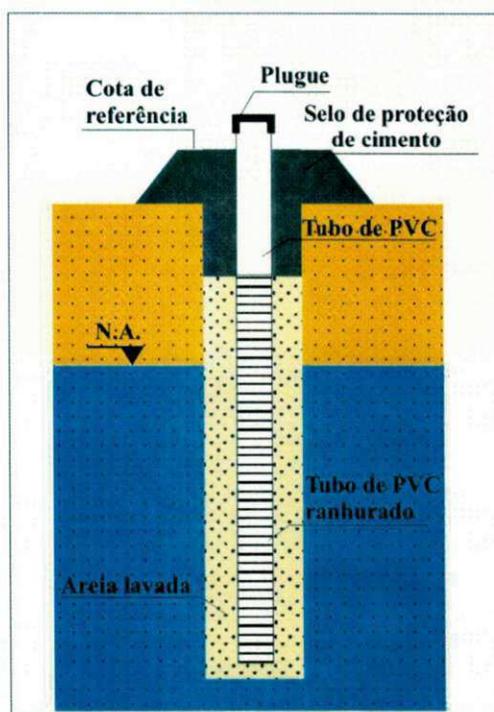


Figura 2.1 – Poço de monitoramento de nível d'água para aquíferos uniformes e homogêneos (modificado de SOUZA, *et al.*, 1998).

A posição da água no interior do tubo é medida com um sensor elétrico, sonoro (apito) ou equipamentos sofisticados que empregam ondas eletromagnéticas.

2.1.2 Furos de sondagem a trado

A sondagem a trado é uma perfuração de pequeno diâmetro, executada manual ou mecanicamente, utilizando trado concha, cavadeira, helicoidal ou espiral. É uma sondagem ligeira, sendo realizada para a investigação de solo de baixa à média resistência. O equipamento é acionado por hastes de aço rosqueáveis e composto, em seu topo, por uma cruzeta para aplicação de torque.

A coleta de amostras é feita a cada metro de avanço ou quando ocorre mudança do tipo do material perfurado, para que seja identificada uma possível mudança de horizontes pedológicos ou de camadas geológicas. Durante a coleta de amostras, o processo de torque do equipamento deforma-as, permitindo somente a realização de ensaios onde a estrutura da amostra não precisa ser preservada, tais como caracterização e granulometria.

2.2 MÉTODOS INDIRETOS

Inúmeros métodos geofísicos vêm sendo aplicados em estudos hidrogeológicos, dentre eles podem-se destacar os métodos elétricos e eletromagnéticos. Nesta pesquisa utilizam-se a eletrorresistividade e o radar de penetração no solo - GPR.

2.2.1 Eletrorresistividade

A eletrorresistividade é um método elétrico que vem sendo utilizado desde o início do século XX na investigação de depósitos minerais. Os primeiros pesquisadores a utilizar e descrever o método foram os Profs. Conrad Schlumberger, da "Escola Francesa" e Frank Wenner, da "Escola Americana", sendo responsáveis pela introdução do arranjo tetraeletródico para medidas de resistividade no subsolo.

Dentre os inúmeros pesquisadores que contribuíram para o desenvolvimento deste método, destacam-se ORELLANA (1972); TELFORD *et al.*(1990); WARD (1997); dentre outros. No Brasil várias pesquisas foram desenvolvidas com a finalidade de verificar a aplicabilidade da técnica da eletrorresistividade para condições tropicais, dentre elas destacam-se os trabalhos de DAVINO (1970); MALAGUTTI (1991); BRAGA (1997); ELIS (1998); CUTRIM (1999), dentre outros.

A eletrorresistividade é um método elétrico baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais. A resistividade é designada por (ρ), dada em ohm.m e a condutividade (σ), dada em S/m, sendo a relação entre elas $\rho = 1/\sigma$.

A resistividade elétrica das rochas e minerais é uma propriedade que depende, principalmente, de quatro fatores:

1. quantidade de água presente nos vazios (poros e fraturas) – a água (solvente) torna-se condutiva com a assimilação de sais presentes no meio;
2. sólidos totais dissolvidos (STD) – a concentração de STD na água influencia nas características elétricas do meio, tornando-o mais ou menos condutivo;
3. porosidade – forma e tamanho dos poros, número, tamanho e forma das passagens de interconexão;
4. composição mineralógica.

A Figura 2.2 ilustra a variação da resistividade elétrica de alguns materiais geológicos.

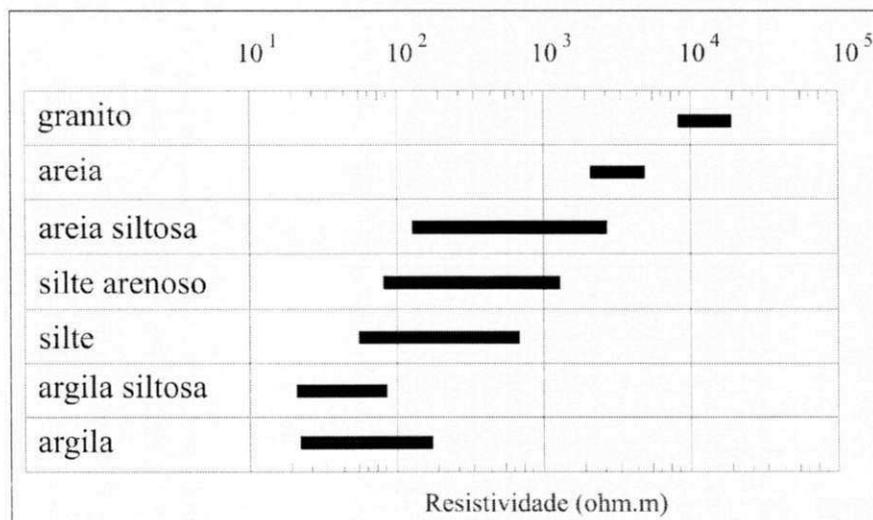


Figura 2.2 – Resistividades aparentes de alguns materiais geológicos (McNEILL, 1980).

A resistividade é dada pela Lei de Ohm (2.1),

$$\rho = \frac{\Delta V}{I} \cdot \frac{A}{L} \quad (2.1)$$

onde A é a área de uma face de um cilindro, L é a distância de face a face, ΔV é a diferença de potencial entre as faces e I é a intensidade de corrente que passa através da amostra. Conhecendo-se as dimensões e a natureza do material através do qual circulam as correntes pode-se medir sua resistividade.

No entanto, o subsolo é de maneira geral, um meio heterogêneo; ao injetar corrente neste terreno (mais de uma camada) os valores de área e comprimento não serão conhecidos, sendo substituídos na equação (1) por uma constante K (que depende da configuração eletródica utilizada). A resistividade medida desta forma não será mais a resistividade de uma rocha ou camada mas uma resistividade média de um pacote e por isto chamada resistividade aparente (ρ_a).

O fator K pode ser calculado através da Equação (2.2), onde \overline{AM} , \overline{AN} , \overline{BN} e \overline{BM} são as distâncias entre os eletrodos de corrente e de potencial, conforme ilustrado na Figura 2.3.

$$K = \frac{2\pi}{\left[\left(\frac{1}{\overline{AM}} - \frac{1}{\overline{MB}} \right) - \left(\frac{1}{\overline{AN}} - \frac{1}{\overline{NB}} \right) \right]} \quad (2.2)$$

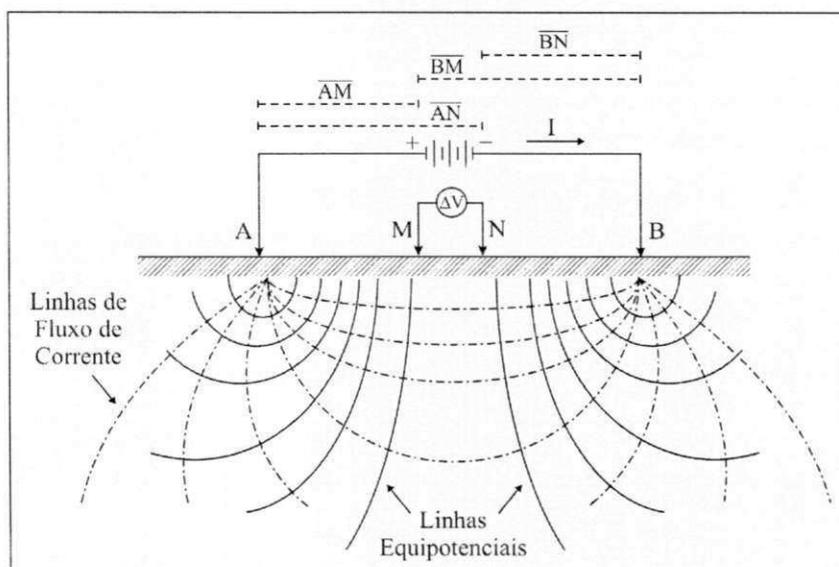


Figura 2.3 – Configuração tetraeletródica utilizada em SEV's com arranjo Schlumberger simétrico mostrando esquematicamente o comportamento das linhas de fluxo de corrente e equipotenciais no meio.

No método da eletrorresistividade existem várias técnicas de levantamentos de campo e uma grande variedade de configurações possíveis de eletrodos, que confere ao método grande versatilidade. Uma técnica muito utilizada é a sondagem elétrica vertical, onde a mesma é aplicada quando se deseja uma informação pontual, com observação da variação vertical da resistividade.

O arranjo de campo mais utilizado para os ensaios de sondagem elétrica vertical é o denominado Schlumberger, onde quatro eletrodos são dispostos em linha, sendo que os eletrodos de potencial (MN) (Figura 2.3) são colocados entre os de corrente (AB) e distribuídos simetricamente em relação a um ponto central, sendo que a distância MN deve ser bem menor que a distância $AB/2$ ($MN \leq AB/5$, TELFORD *et al.*, 1990). Na prática, quando o sinal ΔV medido torna-se muito fraco, aumenta-se a distância MN, isto é, adota-se um primeiro intervalo MN e realizam-se várias medidas com diferentes AB, depois aumenta-se MN que se conserva constante para outra série de deslocamentos de AB e assim por diante, evitando deslocar ao mesmo tempo os eletrodos de corrente e de potencial, e mantendo a relação $MN \leq AB/5$. Esta manobra recebe a denominação de “embreagem” e permite uma checagem da qualidade dos dados obtidos durante o processo de campo (ELIS, 1998).

O fator que controla a profundidade atingida pela corrente é a separação dos pontos de injeção de corrente e para se medir a resposta do material localizado a maiores profundidades é necessário que a corrente (I) atinja essas profundidades. Considerando z a profundidade teórica de investigação e L a separação entre os eletrodos de corrente, para uma determinada separação, na medida em que a relação z/L aumenta o percentual de corrente verificado diminui, segundo a Equação (2.3) (TELFORD *et al.*, 1990):

$$J_x = \frac{I}{2\pi} \frac{L}{(z^2 + L^2/4)^{3/2}} \quad (2.3)$$

sendo J_x a densidade de corrente horizontal, observa-se que, para $z = 0$, a densidade de corrente é máxima (J_0). Para profundidade $z = L/2$, J_x assume valores de 1/3 de J_0 e para $z = L$, valores de 1/10 de J_0 .

Portanto, para se investigar uma determinada profundidade é necessário, em geral, que o espaçamento entre os eletrodos de corrente seja maior do que essa profundidade. Além da configuração dos eletrodos, a profundidade de investigação nos métodos elétricos é influenciada por diversos fatores: ruídos naturais e artificiais; heterogeneidades geológicas laterais; topografia da superfície e do substrato geológico; presença de camadas finas de resistividades distintas; entre outros. Deste modo, a profundidade de investigação teórica, freqüentemente, não expressa a profundidade observada. Alguns autores, através de experimentos em laboratório e campo, identificaram relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para o arranjo Schlumberger (Tabela 2.1).

Tabela 2.1 – Relações de profundidade de investigação versus configuração eletródica para o arranjo Schlumberger.

Autores	Profundidade de Investigação
ROY & APPARAO (1971)	0,125L
BARKER (1989)	0,190L
TELFORD <i>et al.</i> (1990)	0,167L

L = separação entre os eletrodos de emissão de corrente elétrica

ROY & APPARAO (1971) encontraram a relação de profundidade de investigação através de estudos teóricos entre campos elétricos estáticos e estacionários em meios homogêneos. BARKER (1989) encontrou a relação apresentada na tabela 2.1 através da utilização de curvas de profundidade de investigação característica normalizada (NDIC). TELFORD (1990), injetando corrente contínua em um meio homogêneo através de dois eletrodos instalados na superfície, verificou a relação z/L de 0,167, ou seja, $z = L/6$. As diferenças encontradas pelos autores citados devem-se às diferentes metodologias de investigação.

Os dados de SEV's, como de vários métodos de investigação indireta, apresentam soluções ambíguas durante o decorrer do processo de - modelagem. Além disso ORELLANA (1982) mostra que as SEV's produzem os melhores resultados quando aplicadas sobre meios acamados com mergulhos inferiores a 30°. SOUZA (1995) e QUEIROZ (1995) mostram que a técnica de SEV's é extremamente ambígua em regiões com variações laterais de resistividade e deve ser usada com bastante cautela. Durante as etapas de modelagem de dados, as curvas podem ser ajustadas com números variados de camadas e resistividades, possibilitando ao intérprete um intervalo variado de interpretações.

2.2.2 Radar de Penetração no Solo (GPR)

O radar de penetração no solo (*Ground Penetrating Radar* - GPR) é uma metodologia geofísica relativamente nova. Serve para caracterizar as propriedades das rochas e estruturas a pequenas profundidades, com grande resolução e foi desenvolvido principalmente para localizar objetos enterrados ou interfaces geológicas abaixo da

identificar a interface solo/nível d'água é atribuída a LEIMBACH e LÖWY em 1910 na Alemanha (DANIELS, 1996). A partir da década de 80 a técnica de utilização do radar teve um grande avanço tecnológico, resultando na publicação de inúmeros artigos. Na hidrogeologia destacam-se os trabalhos de DAVIS & ANNAN (1988); ANNAN *et. al.* (1991); BERES & HAENI (1991); ANNAN & COSWAY (1992); HARARI (1996); entre outros.

O método GPR consiste na transmissão de ondas eletromagnéticas (EM) repetidamente radiadas para dentro do subsolo por uma antena transmissora colocada na superfície (Figura 2.4). A propagação do sinal EM depende da frequência do sinal transmitido e das propriedades elétricas dos materiais, as quais são principalmente dependentes do conteúdo de água presente no solo (TOPP *et. al.*, 1980); quanto maior o conteúdo de água maior será a atenuação do sinal da onda EM, e vice-versa. As mudanças das propriedades elétricas em subsuperfície fazem com que parte do sinal seja refletido. As ondas de radar refletidas e difratadas em subsuperfície são recebidas através de outra antena denominada de antena receptora, também colocada na superfície da Terra (Figura 2.4).

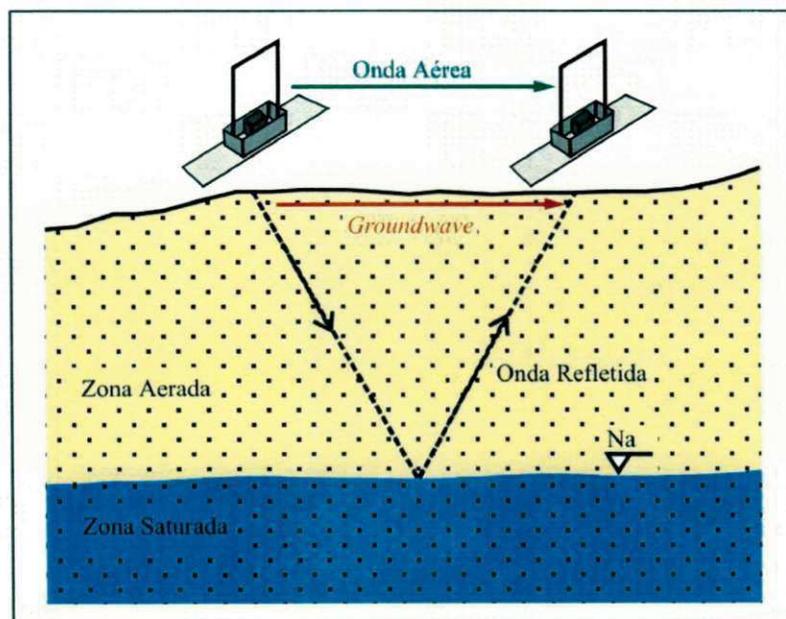


Figura 2.4 – Diagrama de antenas GPR idealizando os principais eventos da onda eletromagnética no meio.

O tempo duplo de reflexão é medido em nanosegundos. A energia refletida é registrada em função do tempo de chegada, amplificada, digitalizada e gravada no disco rígido de um computador *notebook* (DANIELS, 1996). Após o processamento dos dados, o resultado obtido é uma imagem de alta resolução da subsuperfície.

Os fundamentos do método GPR encontram-se na teoria de propagação de ondas eletromagnéticas. Os fatores mais importantes que governam a propagação da onda EM num determinado meio são a velocidade (v) e a atenuação (α).

$$v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2.4)$$

$$\alpha = 1,636 \frac{\sigma_0}{\sqrt{\epsilon_r'}} \quad (2.5)$$

onde c é a velocidade da luz no vácuo ($\cong 0,3\text{m/ns}$), ϵ_r' é a permissividade dielétrica relativa do meio, e σ_0 é a condutividade elétrica (mS/m).

A Tabela 2.2 lista alguns materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica, condutividade elétrica, velocidade e atenuação observados nas frequências do radar.

Tabela 2.2 – Materiais geológicos comuns com sua constante dielétrica (ϵ_r'), condutividade elétrica (σ_0), velocidade (v) e atenuação (α) observados nas frequências utilizadas no GPR (PORSANI, 1999).

Materiais	ϵ_r'	σ_0 (mS/m)	V (m/ns)	α (dB/m)
Ar	1	0	0,30	0
Água Fresca	81	0,5	0,033	0,1
Siltito	5-30	1-100	0,07	1-100
Argila	5-40	2-1000	0,06	1-300
Solo Arenoso Seco	2,6	0,14	0,18	0,14
Solo Arenoso Saturado	25	6,9	0,06	2,25
Solo Argiloso Seco	2,4	0,27	0,19	0,28
Solo Argiloso Saturado	15	50	0,07 - 0,09	21

A profundidade de investigação e resolução do GPR variam de acordo com a frequência da antena. Quanto maior a frequência, maior a resolução vertical e menor a profundidade de investigação, e vice-versa (Tabela 2.3).

Tabela 2.3 – Frequência x Profundidade de penetração (valores para materiais geológicos com ausência de argila) (PORSANI, 1999).

Frequência Central (MHz)	Profundidade Máxima de Penetração (m)
1000	1
500	1,5
400	2
200	4
100	25
50	30
25	40
10	50

A profundidade (Z) de um refletor é determinada através da Equação (2.6):

$$Z = \frac{vt}{2} \quad (2.6)$$

onde t é o tempo duplo de reflexão da onda eletromagnética no meio, ou seja, o tempo que a onda eletromagnética gasta para sair, incidir, refletir no corpo e atingir a antena receptora.

Existem três técnicas principais de aquisição de dados de georadar: o perfil de reflexão de afastamento constante, a sondagem de velocidade e a tomografia. Neste trabalho será descrita somente a primeira, pois a sondagem de velocidade é utilizada para converter os radargramas de tempo para profundidade e a última é realizada dentro de poços de investigação, que não é o objetivo deste trabalho.

No perfil de reflexão de afastamento constante as antenas são mantidas a um espaçamento (s) fixo, sendo transportada a uma distância constante (x), passo a passo, ao longo do perfil. O resultado obtido é uma imagem onde o eixo horizontal representa a posição das antenas (distância) e o eixo vertical é o tempo duplo do sinal GPR (Figura 2.5).

Os perfis de reflexão são convertidos em profundidade através da utilização de informações geológicas de subsolo ou de poços, onde tem-se a profundidade (Z) de um corpo ou interface, identificando o tempo duplo (t) de propagação da onda EM no radargrama e substituindo-se na Equação (2.6), obtêm-se a velocidade da onda EM no meio.

As principais etapas envolvidas no processamento dos dados de radar são: edição dos dados, filtro de remoção de ruídos de baixa frequência provocados pelo relaxamento do equipamento (*dewow*), ganhos no tempo, filtragem temporal e espacial, e migração (ANNAN, 1993 *apud* BORGES, 2002).

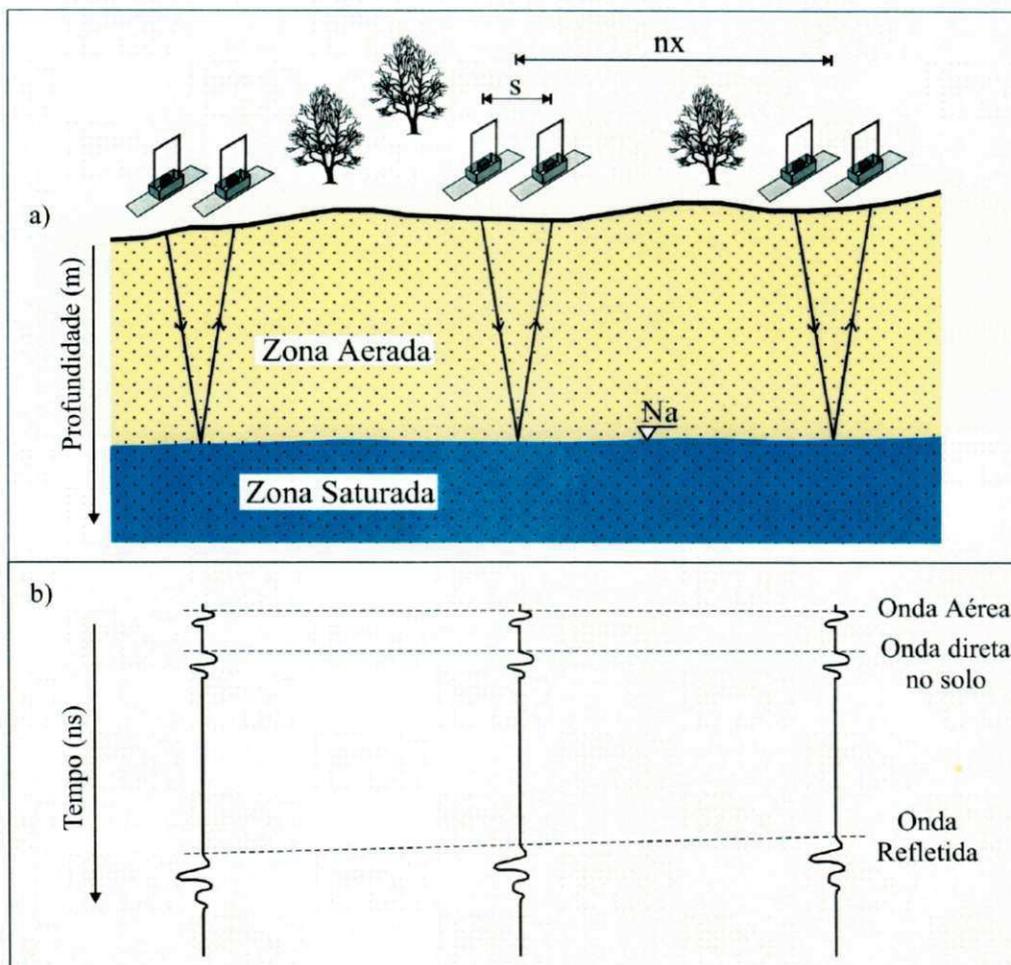


Figura 2.5 - a) procedimento envolvendo deslocamentos (x) repetitivos das antenas transmissora e receptora, com espaçamento constante entre as antenas (s), onde n é igual ao número de deslocamentos; b) três traços de GPR esquemáticos mostrando a chegada da onda aérea, da onda direta no solo e da onda refletida no nível d'água (N_a) em subsuperfície.

De uma maneira geral os métodos de investigação indireta devem ter como preceito básico uma preocupação especial com os processos de aquisição, processamento e interpretação de dados, em virtude de fatores que podem surgir durante os mesmos e que podem gerar um amplo espectro de informações. O GPR, por ser uma técnica recente, requer o apoio de métodos de investigação direta, para minimizar as possibilidades de geração de ambiguidades, em consequência do uso de parâmetros inadequados. Por exemplo, ANNAN & COSWAY (1992) mostram que o simples processo de empilhamento dos traços pode interferir na resolução dos perfis de GPR. Da mesma maneira, a velocidade da onda eletromagnética utilizada durante o processo de conversão dos dados de GPR pode ser obtida por processos de investigação *in situ* ou à partir de ábacos existentes, gerando perfis com parâmetros de profundidade diferentes.

CAPÍTULO 3

3 MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de pesquisa localiza-se na margem esquerda do Ribeirão Gonçalves, dentro da Fazenda Salvatti II, Município de Sorriso – MT, no Centro-Norte do Estado de Mato Grosso (Figura 3.1). Partindo de Sorriso o acesso à área é feito por via asfaltada através da BR-163, percorrendo 4km pela mesma; segue-se, então, à esquerda na MT-242 por 2,5km até a entrada da Fazenda Salvatti II; a partir deste ponto percorrem-se uma distância de aproximadamente 10km até a área de estudo (Figura 3.1).

3.1.1 Aspectos Fisiográficos

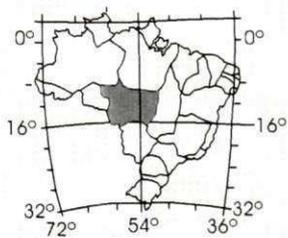
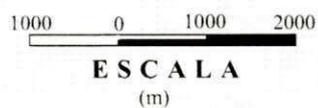
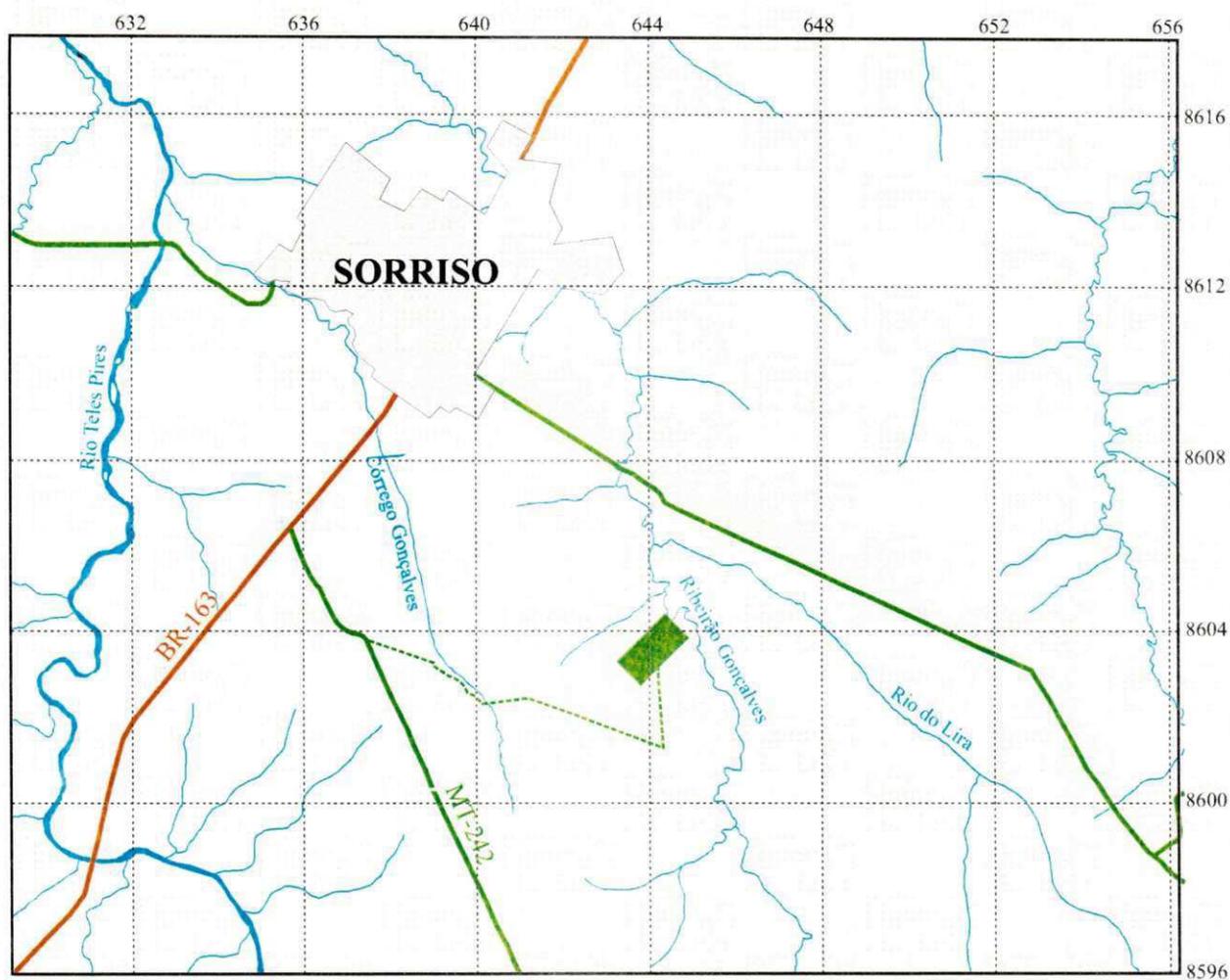
3.1.1.1 Geologia

O município de Sorriso está situado, geologicamente, na porção leste da Bacia dos Parecis. BARROS, *et al.* (1982) identificam três unidades geológicas distintas, próximas a Sorriso, o Grupo Parecis (representado pela Formação Salto das Nuvens), a Formação Araguaia e os aluviões atuais (Figura 3.2).

A Formação Salto das Nuvens é observada principalmente ao longo do curso do rio Teles Pires, sendo representada na área por pacotes de arenitos feldspáticos com lentes de conglomerados. Os arenitos apresentam matriz areno-argilosa, coloração avermelhada e estratificação cruzada de grande porte. Os conglomerados possuem matriz argilo-arenosa, clastos mal selecionados e subarredondados.

A Formação Araguaia é constituída por sedimentos pouco consolidados, representados por siltes, areias siltosas pouco estratificadas, argilas e conglomerados basais com seixos pouco rolados e heterogêneos (SIQUEIRA, 1989).

Os aluviões atuais correspondem aos depósitos holocênicos que ocorrem nas margens dos rios, representado por areias, siltes, argilas e cascalhos, possuindo espessuras inferiores a 10m.



CONVENÇÕES

-  Área de Estudo
-  Área Urbana
-  Rodovia Pavimentada
-  Rodovia Sem Pavimentação
-  Estrada vicinal
-  Drenagens

Figura 3.1 - Mapa de localização e vias de acesso da área estudada.

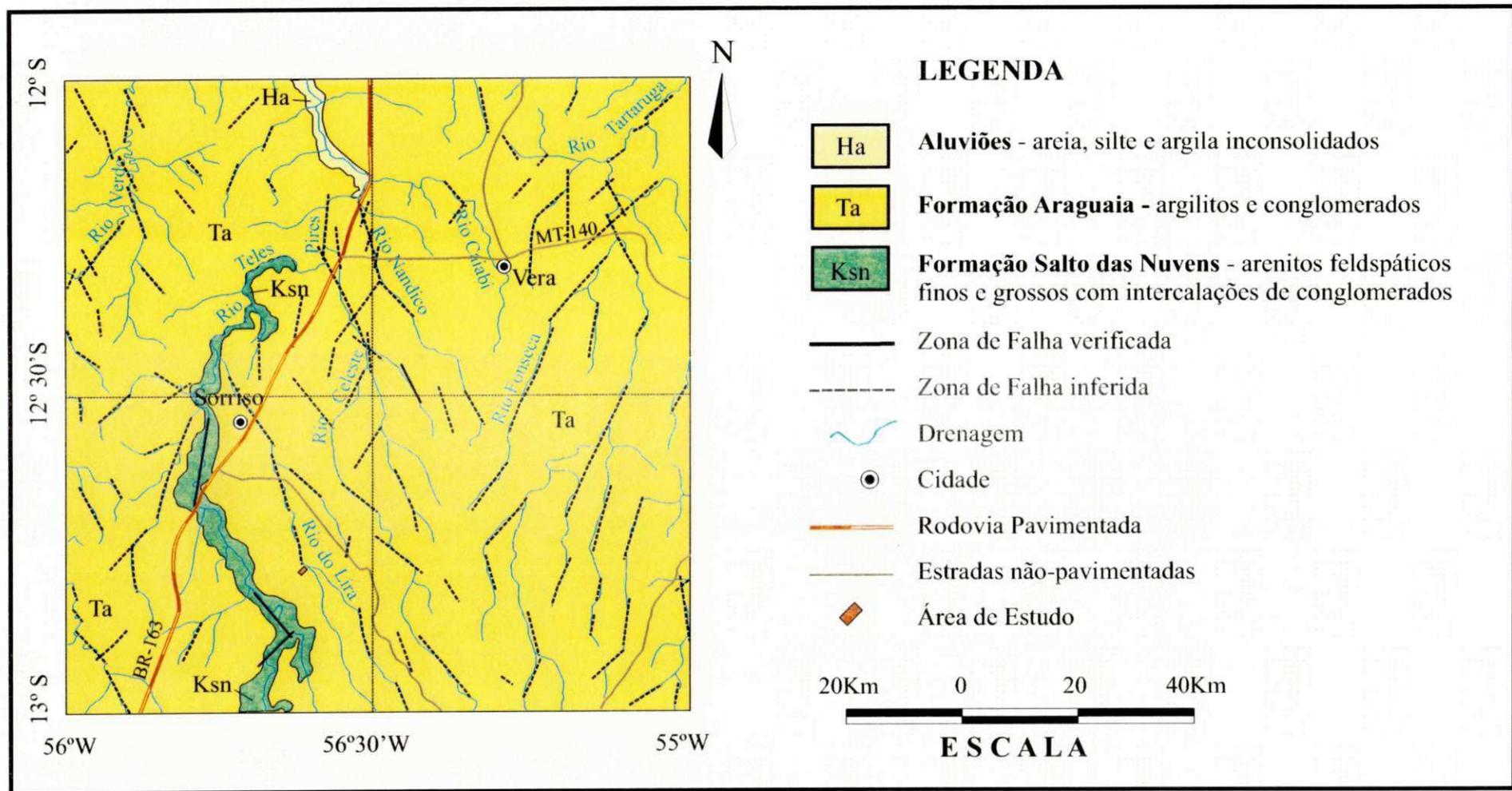


Figura 3.2 - Mapa geológico regional da área de Sorriso - MT (modificado de Barros, *et al.*, 1982).

3.1.1.2 Solos

O desenvolvimento de solos na região é bastante favorecida devido à baixa inclinação do relevo. ALMEIDA (1996) identifica dois tipos predominantes de solo na região de Sorriso, as Areias Quartzosas (AQ) e os Latossolos Vermelho-Amarelo (LVA). As AQ desenvolvem-se, principalmente, sobre rochas do Grupo Parecis, ao passo que os latossolos são observados sobrepondo sedimentos da Formação Araguaia. A agricultura mecanizada é desenvolvida principalmente na região sobre os LVA; esses solos apresentam, em geral, textura média argilosa, elevada porosidade e permeabilidade, baixa capacidade de retenção de água, horizontes pedológicos pouco diferenciados e expressivas espessuras.

3.1.1.3 Clima

De acordo com a classificação de *Köppen*, o regime climático da área enquadra-se no tipo AW, caracterizado por um clima quente e úmido com duas estações bem marcadas, uma seca e uma chuvosa. O regime de chuvas é tropical, caracterizado pela divisão nítida do ano em um período com chuva abundantes com início em outubro ou novembro e prolongando-se até março ou abril, e outro com baixas precipitações de maio a setembro. Os índices de precipitação variam entre 1700 e 2900mm/anuais (ARAÚJO, 2002). A umidade relativa do ar anual é elevada, geralmente variando entre 75% e 80%. A temperatura sempre se mantém elevada em qualquer época do ano, sendo em média 24°C. As médias anuais das máximas temperaturas assinalam valores entre 37° e 40°C e das mínimas entre 4° e 20°C (ARAÚJO, 2002).

3.1.1.4 Hidrografia

A rede hidrográfica pertence totalmente a Bacia do Amazonas, sendo o principal rio da região o rio Teles Pires. Tal curso d'água tem suas nascentes na Chapada dos Parecis, escoando de forma tranqüila, salvo algumas pequenas quedas e corredeiras. De um modo geral oferece boas condições de navegabilidade para pequenos barcos a motor ou a remo. Seus principais afluentes são, próximo à cidade de Sorriso, pela margem esquerda o rio Verde, e pela margem direita os rios Lira, Celeste e Nandico. O rio Teles Pires apresenta escoamento de sul para norte com uma configuração meandrante, sendo

que, em alguns pontos, o mesmo mostra-se condicionado à estruturas geológicas regionais.

O ribeirão Gonçalves é o córrego que drena a área estudada, sendo afluente da margem esquerda do rio do Lira. Seu canal apresenta o padrão dendrítico a retilíneo (controlado por estruturas de falhas).

3.1.1.5 Vegetação

Na região de Sorriso predominam quatro tipos distintos de vegetação: floresta estacional, contato floresta estacional/cerrado, savana arbórea densa (cerrado), e campos antrópicos. A floresta estacional, às vezes imponente, acha-se bastante reduzida, devido a ação predatória do homem, e tem como característica uma vegetação luxuriante, muito densa, com árvores de pequeno a grande porte, desenvolvendo-se principalmente ao longo do rio Teles Pires (AMARAL, *et al.*, 1982). A floresta de transição entre a floresta estacional e o cerrado apresenta árvores que alcançam 20 a 25m de altura com diâmetros, relativamente, finos. A savana arbórea densa caracteriza-se por ser de pequeno a médio porte, aberta a densa, atingindo de 5 a 10m de altura. Ao longo das drenagens, observa-se o adensamento e o crescimento desta cobertura vegetal, em função do aumento da umidade, levando à formação de matas-galeria (Figura 3.3). A vegetação antrópica é relacionada principalmente a monoculturas, representadas principalmente pelo cultivo de soja e algodão.



Figura 3.3 – Zona de transição entre a Mata de galeria (ao fundo) e a vegetação antrópica na área de estudo, Sorriso – MT.

3.1.1.6 Geomorfologia

A cidade de Sorriso está situada na unidade geomorfológica denominada de Planalto dos Parecis (ROSS & SANTOS, 1982), que representa uma antiga superfície de aplainamento. As formas de relevo principais são as de topo plano e ligeiramente convexas, baixa declividade com grandes comprimentos de rampa (Figura 3.4).

A fragilidade dos solos, associada ao desmatamento das matas para a implantação de atividade agrícola desorientada, contribui para o desenvolvimento de processos erosivos na área (Figura 3.5), atingindo o lençol freático e favorecendo o surgimento de enormes bossorocas (Figura 3.6).



Figura 3.4 – Vertente com grande comprimento de rampa e baixa inclinação na área de estudo, Sorriso – MT.



Figura 3.5 – Erosão do tipo ravina desenvolvida em latossolos presentes na área de estudo, Sorriso – MT.

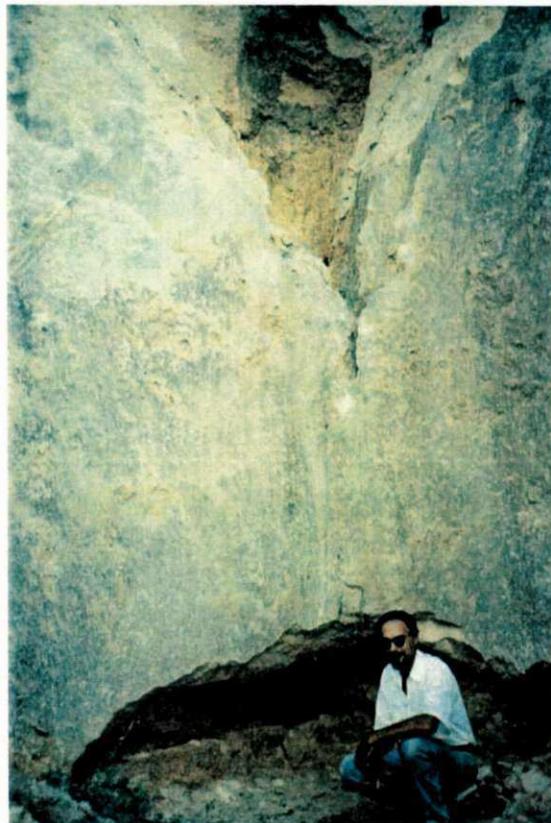


Figura 3.6 – Processo de *piping* desenvolvido dentro de uma erosão presente na área de estudo, Sorriso – MT.

3.2 MATERIAIS UTILIZADOS

3.2.1 Poços de monitoramento de nível d'água

Na instalação dos medidores de nível d'água para monitoramento da variação do nível d'água na área de estudo foram utilizados tubos de PVC com 2" (50mm) de diâmetro, tamponados e ranhurados na parte inferior do tubo, e revestidos com um tecido sintético envolvendo estas ranhuras (Figura 3.7) evitando assim a passagem de material coloidal para dentro do tubo.

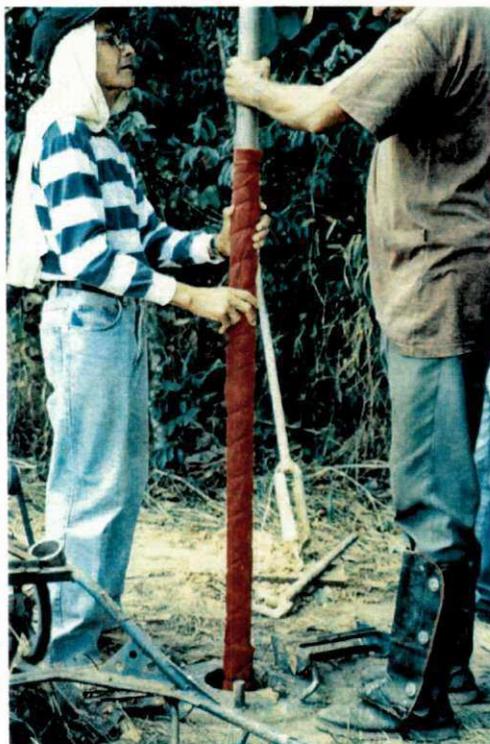


Figura 3.7 – Instalação de medidor de nível d'água, onde a parte ranhurada do tubo de PVC está protegida por um tecido sintético para evitar a entrada de partículas no tubo.

A medição da profundidade do nível d'água dentro do furos de sondagem a trado foi executada com a utilização de um sensor elétrico portátil, contendo sinal visual e sonoro (Figura 3.8).



Figura 3.8 – Medidor de nível d'água elétrico utilizado nas medidas do lençol freático obtidas nos poços de monitoramento instalados dentro da área de estudo, Sorriso – MT.

Os poços de monitoramento do nível d'água foram perfurados com o trado mecânico (Figura 3.9a e 3.9b) até profundidades máximas de 10m. Já os furos de investigação geológica e para coleta de amostras para análise granulométrica foram realizados com o trado manual.



Figura 3.9 – a) Execução de furo de sondagem a trado mecânico; b) Retirada de material a partir do furo de sondagem a trado para caracterização pedológica.

3.2.2 Eletrorresistivímetros

As investigações elétricas foram realizadas com os equipamentos Geotest R100A (Figura 3.10), e o equipamento SYSCAL R2, de fabricação da empresa Íris (Figura 3.11).

O equipamento R100A é um equipamento que injeta corrente contínua com uma tensão de saída máxima de 400V. O potencial espontâneo é compensado pelo operador através do ajuste na posição zero do medidor. O equipamento fornece valores de intensidade de corrente e tensão medidas no solo.

O equipamento SYSCAL R2 possui um conversor DC/AC (*Direct current/Alternated current*), que permite uma tensão de saída máxima de 800V e apresenta um sistema de empilhamento contínuo de medidas para redução dos ruídos. Efetua o cálculo da fator geométrico (K), da Equação 2.2, através da entrada da

configuração eletródica. Possui teste para carga da bateria interna e mede o nível de ruído antes da realização das medidas. Pode armazenar os dados na memória e fornecer diretamente valores de intensidade de corrente, tensão, potencial espontâneo, indicação da qualidade de leitura, cargabilidade e resistividade aparente.



Figura 3.10 – Equipamento para ensaios de resistividade Geotest R100A.

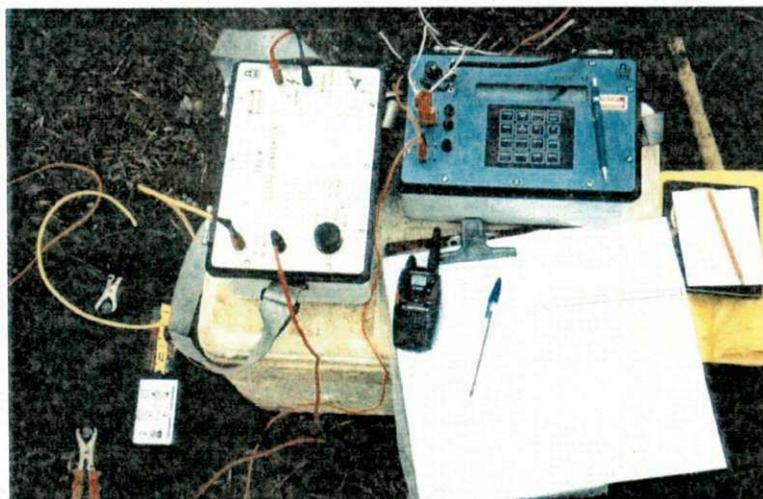


Figura 3.11 – Equipamento para ensaios de resistividade Iris Syscal R2. À esquerda o módulo de potência e no centro o console principal.

3.2.3 GPR

Os dados de GPR foram adquiridos com o equipamento GPR RAMAC, fabricado pela empresa sueca MALÅ (Figura 3.12).

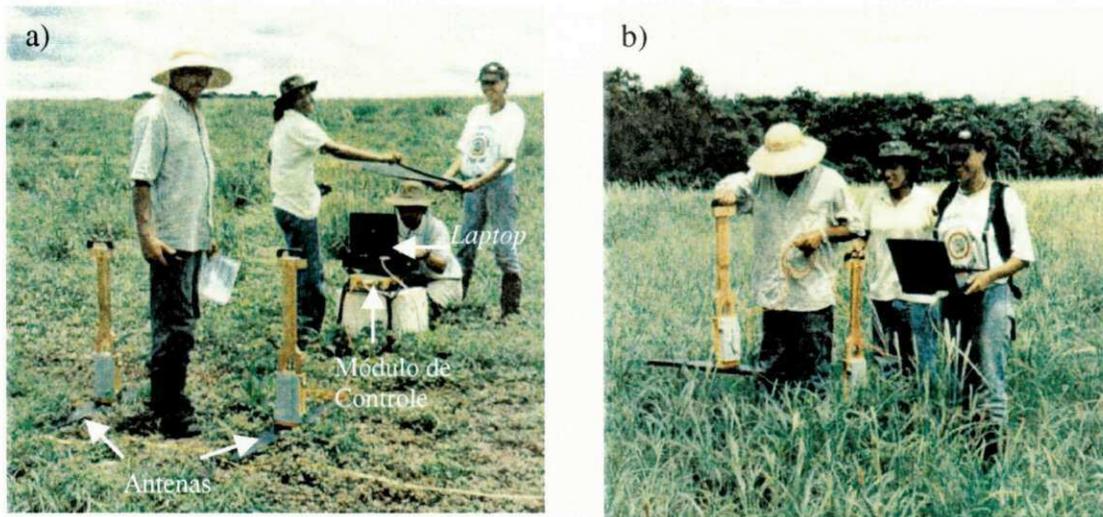


Figura 3.12 – Equipamento RAMAC fabricado pela empresa sueca MALÅ. a) Sistema GPR sendo preparado para aquisição de dados; b) Aquisição de dados.

3.2.4 Materiais utilizados no geo-referenciamento

O GPS (*Global Positioning System*) foi utilizado para geo-referenciar os locais onde foram realizadas as investigações geofísicas e geológicas. Os equipamentos utilizados durante as aquisições dos pontos de posicionamento foram os GPS's *Geoexplorer II e 3* (Figura 3.13), da marca Trimble, resolução de 2 à 5 metros. Os dados foram modelados com o software *GPS Pathfinder® Office*. A precisão deste equipamento é de 2 a 5 metros.

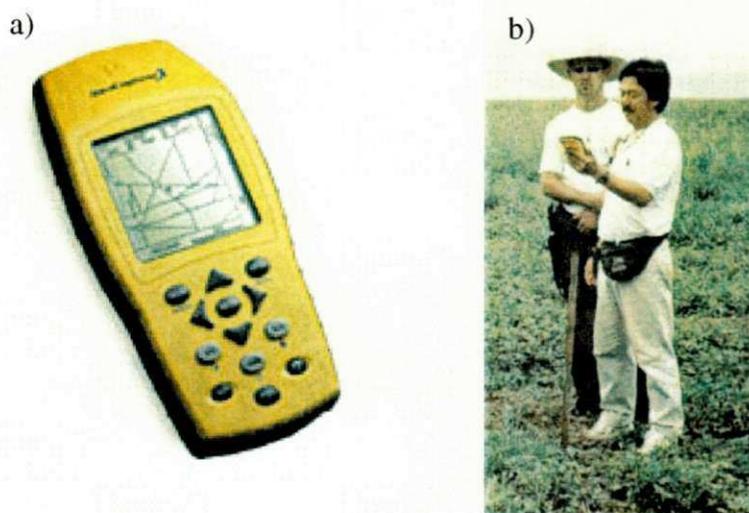


Figura 3.13 – a) GPS Geoploter 3; b) Aquisição de dados de GPS.

Para coleta dos dados de altimetria foi utilizado o equipamento Nível Basic Level, da *Leica Geosystems*. Foi estipulado uma cota de referência de 300m para a menor altitude na área. Durante o nivelamento foram utilizados nível topográfico, régua de 3m, trenas e uma bússola da marca *Brunton*.

3.3 METODOLOGIA

Os levantamentos de campo foram realizados em três campanhas: no período de seca (junho/2000), no início do período de chuvas (novembro/2000) e no final do período de chuvas (maio/2001). Na campanha de junho de 2000 foram realizados furos de sondagem a trado para instalação de poços de monitoramento de nível d'água e adquiridos dados de SEV's. Em novembro de 2000 e maio de 2001 foram adquiridos perfis GPR e SEV's, fechando, assim, um período hidrológico completo.

3.3.1 Métodos diretos de investigação

Informações geológicas foram obtidas através de furos de sondagem a trado e poços de monitoramento de nível d'água instalados para verificar a variação sazonal do lençol freático na área de estudo

Foram perfurados 10 (dez) furos de sondagem a trado dentro da área de estudo, sendo 7 para instalação de poços de monitoramento do nível d'água (Figura 3.14) e 3 furos para correlação e caracterização pedológica (Figura 3.15). A máxima profundidade atingida pelo trado foi de 10 metros no Pm1.

Em 3 furos de sondagem a trado, foram coletadas amostras de solo à cada 0,5 metros de profundidade, armazenadas em sacolas plásticas e catalogadas para posterior análises táctil-visual e granulométrica.

Além dos três furos citados, foram coletadas amostras de solo na profundidade de 0,5 metros nos locais onde foram realizadas as SEVs A1, B1, C1, D1, D2, D3 e D4, e nos seus pontos intermediários, ou seja, entre as SEV's (Figura 3.15), visando a verificação do teor de areia, silte e argila presentes na camada superficial do solo com o intuito de associar o maior percentual de areia como fator preponderante dos processos erosivos. As amostras foram submetidas a análises granulométricas (ABNT/NBR7181, 1984) para melhor caracterização das mesmas.

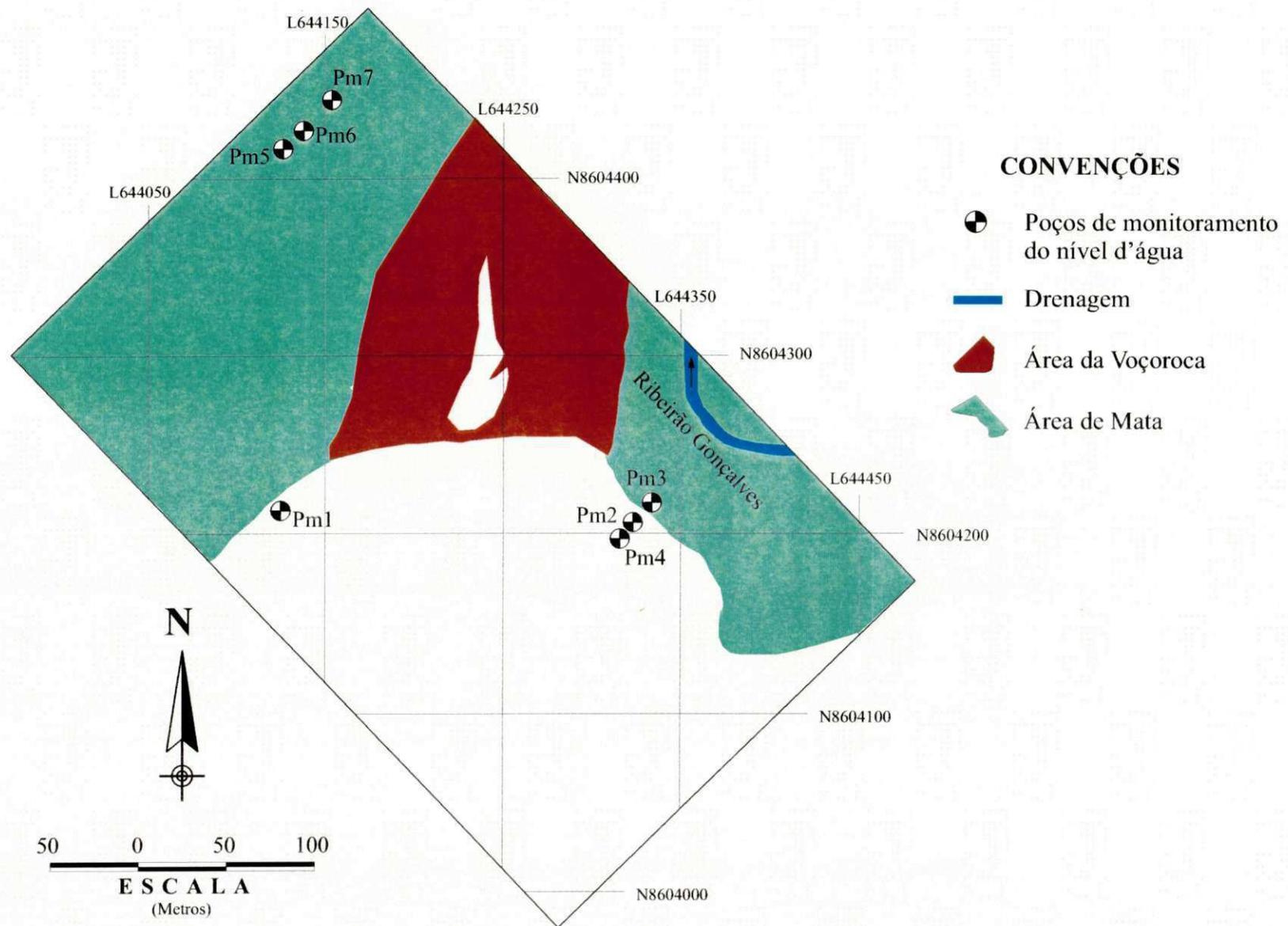


Figura 3.14 - Localização dos poços de monitoramento do nível d'água dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

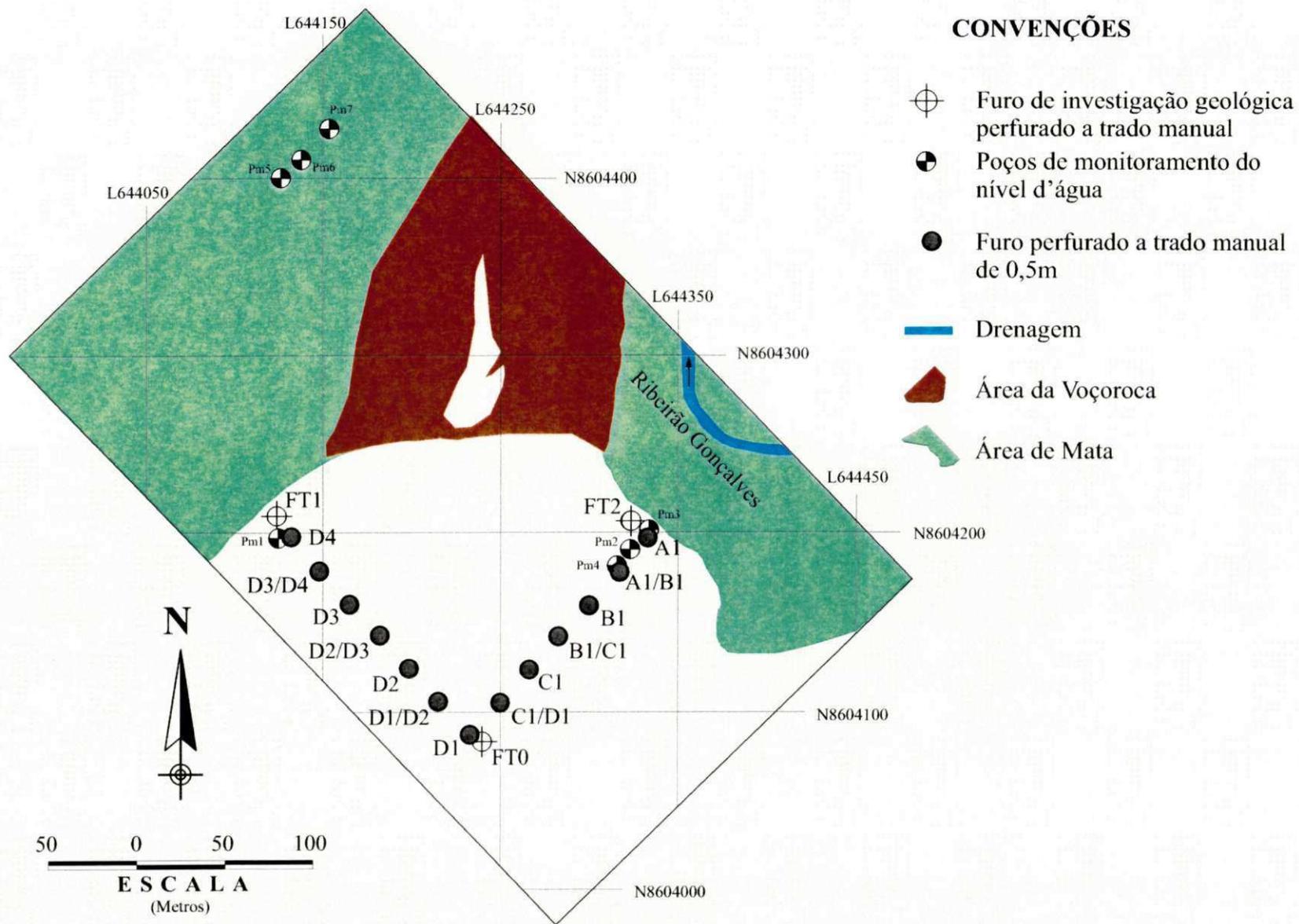


Figura 3.15 - Localização dos furos de sondagem a trado realizados, para fornecer dados geológicos e pedológicos, dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

3.3.2 Métodos indiretos de investigação

As campanhas geofísicas consistiram da realização de sondagens elétricas verticais (SEV's) e de perfis de GPR (*Ground Penetrating Radar*).

3.3.2.1 Sondagens elétricas verticais (SEV's)

Os dados de eletrorresistividade foram adquiridos através da técnica da sondagem elétrica vertical utilizando o arranjo Schlumberger. As SEV's tiveram os espaçamentos entre os eletrodos de emissão de corrente (AB/2) e de potencial (MN/2) conforme disposto na Planilha de campo (Tabela 3.1).

As SEV's foram denominadas de SEV-A1, SEV-B1, SEV-B2, SEV-C1, SEV-C2, SEV-D1, SEV-D2, SEV-D3, SEV-D4, SEV-E2, SEV-F2 e SEV-G2. As sondagens foram dispostas com o intuito de realizar correlações entre si e investigar uma maior área possível da vertente (Figura 3.16). Todas as SEV's, com exceção das SEV-E2, SEV-F2 e SEV-G2, tiveram os eletrodos de emissão de corrente (AB/2) distanciados até 50m, alinhados na direção NW-SE, com exceção da SEV-D4 que teve os eletrodos alinhados na direção NE-SW. As SEV-E2, SEV-F2 e SEV-G2, tiveram os eletrodos de emissão de corrente (AB/2) distanciados até 100m.

As SEV's foram executadas nos meses de junho de 2000, novembro de 2000 e maio de 2001, seguindo sempre as mesmas configurações e alinhamentos apresentados na figura 3.16, com o intuito de verificar o comportamento geolétrico dos materiais geológicos e a variação da profundidade do nível d'água.

Tabela 3.1 – Ficha utilizada em campo para registrar os dados de sondagens elétricas verticais com o arranjo Schlumberger.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO INSTITUTO DE CIÊNCIAS EXATAS E DA TERRA NGEA – NÚCLEO DE GEOFÍSICA E ESTUDOS AMBIENTAIS										nº da SEV C2
PROJETO: Fazenda Salvatti II							DATA	19/05/2001		
LOCAL: Sorriso – MT										
Lat.				Long.				Altitude		
OPERADOR	Luis Anselmo			AUXILIARES	Shozo, Tania e Cláudia					
EQUIPAMENTO	Syscal R2			Direção da injeção de corrente						
No.	AB/2	MN/2	SP	ΔV	I	ρ_a	Q	N	Fonte	Observação
1	1	0,30	18	558,57	2,31	1150,3	0	4,7	100	
2	1,3	0,30	17	406,67	2,26	1505,8	0	4,6	100	
3	1,8	0,30	17	257,81	2,28	1863,3	0	4,5	100	
4	2,4	0,30	17	169,05	2,39	2103,4	0	4,7	100	
5	3,2	0,30	16	100,77	2,34	2291,6	0	4,6	100	
6	4,2	0,30	16	55,34	2,31	2197,3	0	4,5	100	
7	4,2	1,00	-51	202,03	2,31	2286,7	0	4,9	100	
	5,5	1,00	-45	105,59	2,34	2076	0	5,0	100	Embreagem
8	7,5	1,00	-40	55,03	2,37	2011,2	0	5,4	100	
9	10	1,00	-34	30,4	2,47	1913	0	5,4	100	
	10	0,30	18	8,6	2,46	1828,5	0	5,5	100	Embreagem
10	13	1,00	-27	18,31	2,42	1994,9	0	5,5	100	
11	18	1,00	-24	10,73	2,46	2218	0	5,7	100	
12	24	1,00	-21	7,18	2,5	2594,6	0	6,8	100	
	24	2,50	-13	17,27	2,5	2478,2	0	6,2	100	Embreagem
13	32	2,50	-17	10,67	2,44	2795,7	0	6,3	100	
14	42	2,50	-14	6,92	2,45	3126,8	0	7,2	100	
	50	2,50	-11	5,29	2,5	3322,1	0	7,5	100	Embreagem
15	50	1,00	-12	2,19	2,49	3457,9	0	8,4	100	
16	75	2,50								
17	100	2,50								

SP = Potencial Espontâneo. ΔV = potencial, I = corrente, ρ_a = resistividade aparente, Q = qualidade da leitura, N = cargabilidade

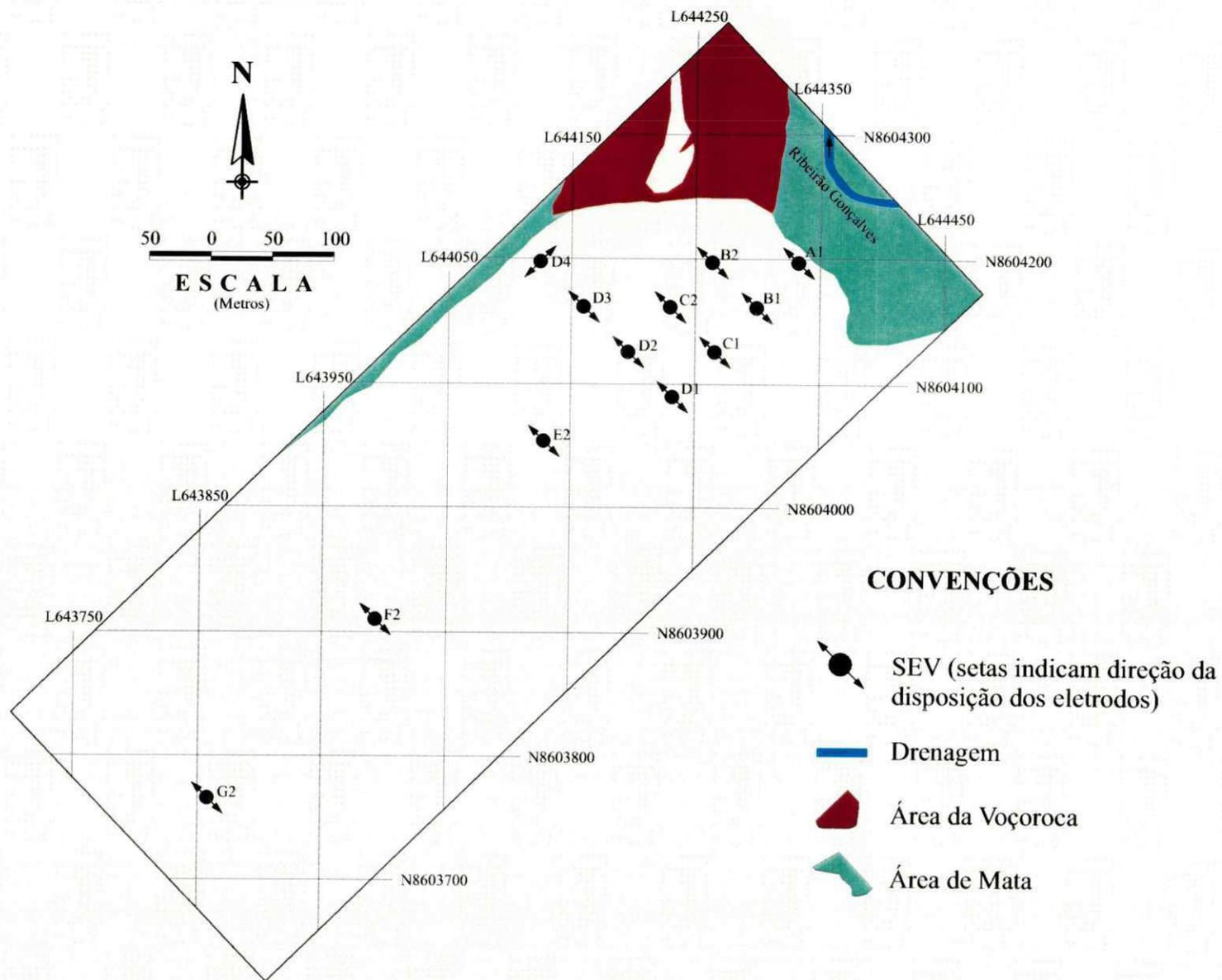


Figura 3.16 - Localização das sondagens elétricas verticais (SEV's) dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

As primeiras informações retiradas das curvas elétricas são qualitativas. Nesse estágio pode ser verificado, por exemplo, se a camada de cobertura é mais ou menos resistiva do que as camadas subjacentes ou localização em que o nível d'água se encontra à profundidades menores.

A interpretação quantitativa dos dados de sondagens elétricas é feita assumindo-se um modelo de camadas isotrópicas, separadas por superfícies planas horizontais, cujo objetivo é determinar os parâmetros "espessura" e "resistividade média" de cada camada. Uma maneira para realizar a análise quantitativa é através de ajustes semi-automáticos entre os dados de campo e a resposta obtida por inversão de modelos. Esta etapa foi realizada através do algoritmo de inversão 1D do *software* IPI (BOBACHEV *et al.*, 1999).

As profundidades reais de algumas camadas geológicas e do nível d'água apresentadas neste trabalho, foram obtidas através da correlação de informações dos furos de sondagem a trado e poços de monitoramento de nível d'água implantados dentro da área de estudo.

Os dados das SEV's foram modelados com o software de inversão 1D de dados de sondagens elétricas IPI (BOBACHEV *et al.*, 1999) que fornece um modelo geolétrico contendo resistividade aparente, espessura e profundidade de camadas horizontais (Figura 3.17).

Durante a etapa de modelagem o principal fator de orientação era a profundidade do nível d'água. No entanto, em algumas SEV's, devido à elevada resistividade superficial do solo, o processo de modelagem das curvas de sondagens elétricas foi dificultado. Desta maneira, alguns modelos geolétricos foram ajustados para compatibilizar com os dados geológicos obtidos em campo. Cerca de 82,8% dos modelos geolétricos ajustados ficaram com o erro de ajuste inferior a 10%.

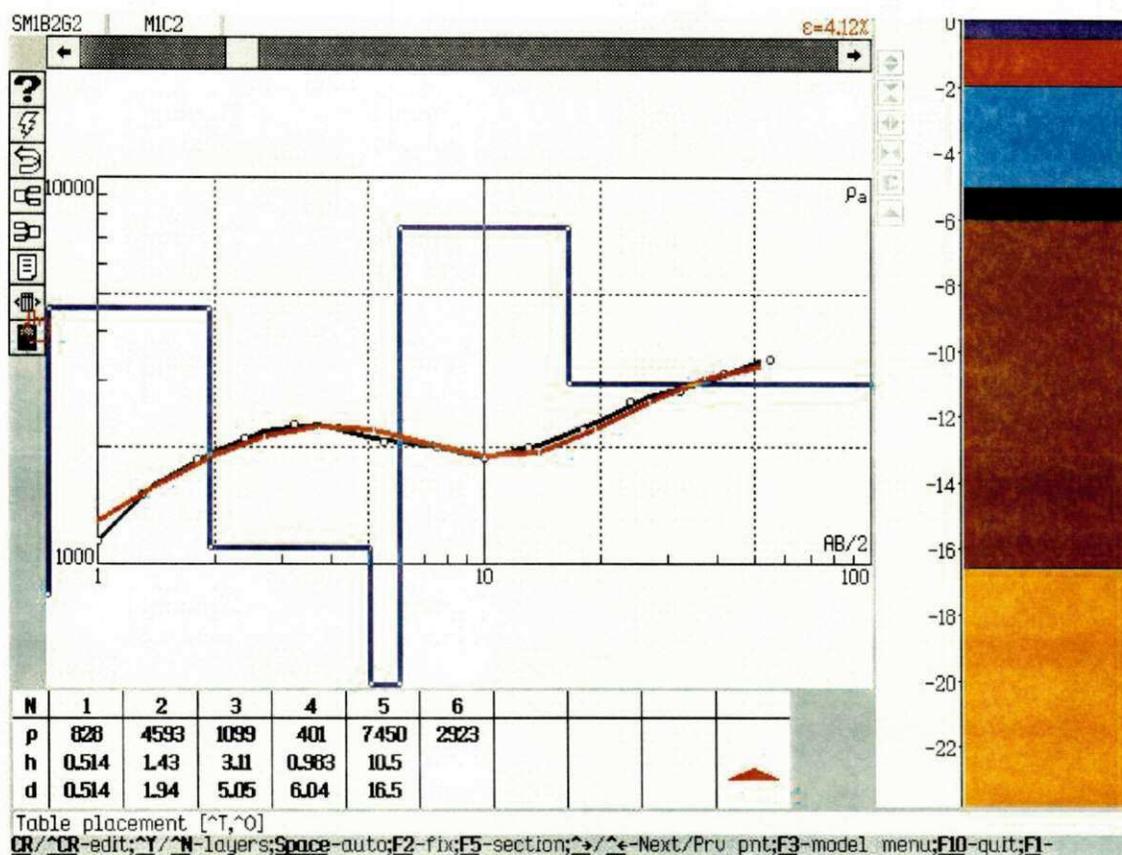


Figura 3.17 – Janela de processamento de dados de sondagens elétricas verticais do software de modelagem 1D, IPI (BOBACHEV *et al.*, 1999).

Os modelos geolétricos foram obtidos para as diferentes campanhas de campo (Apêndice D – CD-ROM) e possibilitaram a elaboração de perfis geolétricos. Tais perfis foram denominados de A1-D1, B2-G2 e D1-D4, correspondendo ao alinhamento das respectivas SEV's dispostas em campo nos meses de junho (2000) e maio (2001). No mês de novembro (2000), somente o perfil B2-G2 foi realizado.

3.3.2.2 Perfis GPR

A aquisição dos dados de campo de GPR foi realizada em duas etapas, sendo adquiridos cinco perfis GPR (Figura 3.18). Nos pontos em que foram executadas as SEV's foi realizado um levantamento topográfico de detalhe para atenuar o efeito da topografia nos dados de radar. Através dos dados de altimetria foi possível elaborar, utilizando-se o software *Surfer 6.0* (GOLDEN SOFTWARE, 1995) um mapa topográfico para a área (Figura 3.19).

Os perfis GPR com afastamento constante foram denominados A1-D1 (100MHz), D2-G2 (50MHz), B2-F2 (100MHz), D1-D2 (100MHz) e A1 (100MHz). Estes perfis foram obtidos com antenas de frequência central de 50 e 100MHz. O espaçamento utilizado entre as antenas transmissora–receptora foram de 2 e 1 metros e o intervalo entre os traços de 2,0 e 1,0m para as antenas de 50 e 100MHz, respectivamente, e o *stack*¹ de 512. O comprimento, período de aquisição e orientação dos perfis GPR estão na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 – características geométricas dos perfis GPR executados dentro da área de estudo.

Perfil	Comprimento	Orientação	Período de Aquisição
A1-D1 (100MHz)	210m	NE – SW	Novembro de 2000
D1-D2 (100MHz)	60m	SE – NW	Novembro de 2000
B2-F2 (100MHz)	450m	NE – SW	Maio de 2001
D2-G2 (50MHz)	505m	NE – SW	Maio de 2001
A1 (100MHz)	40m	SE – NW	Maio de 2001

¹ *Stack* – empilhamento por traço. Como na sísmica supõe-se que os dados GPR são caracterizados pelos sinais que permanecem essencialmente constantes e por ruídos que são basicamente aleatórios. O aumento na razão sinal/ruído é alcançado pelo aumento do *stack* (BORGES, 2002).

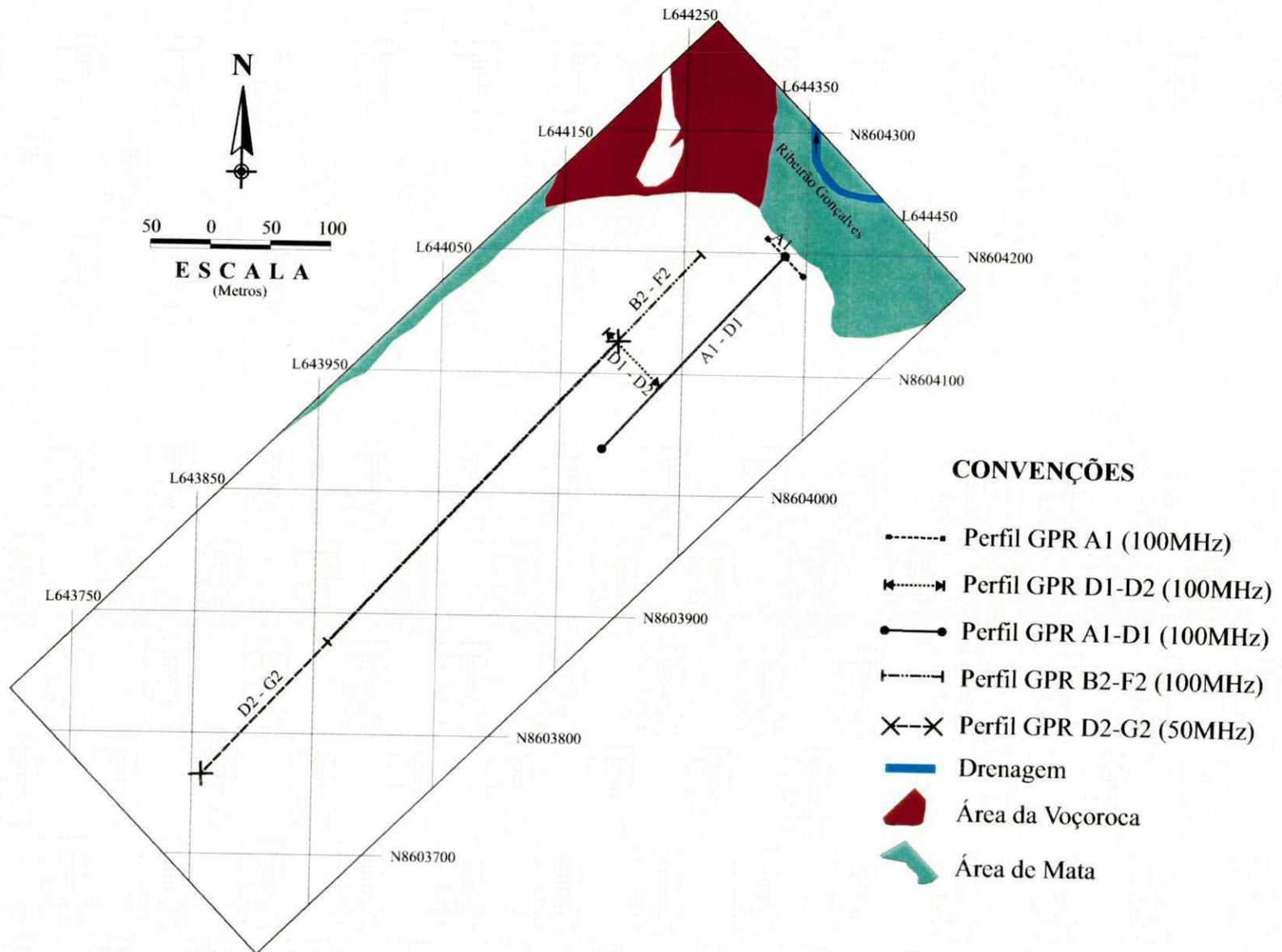
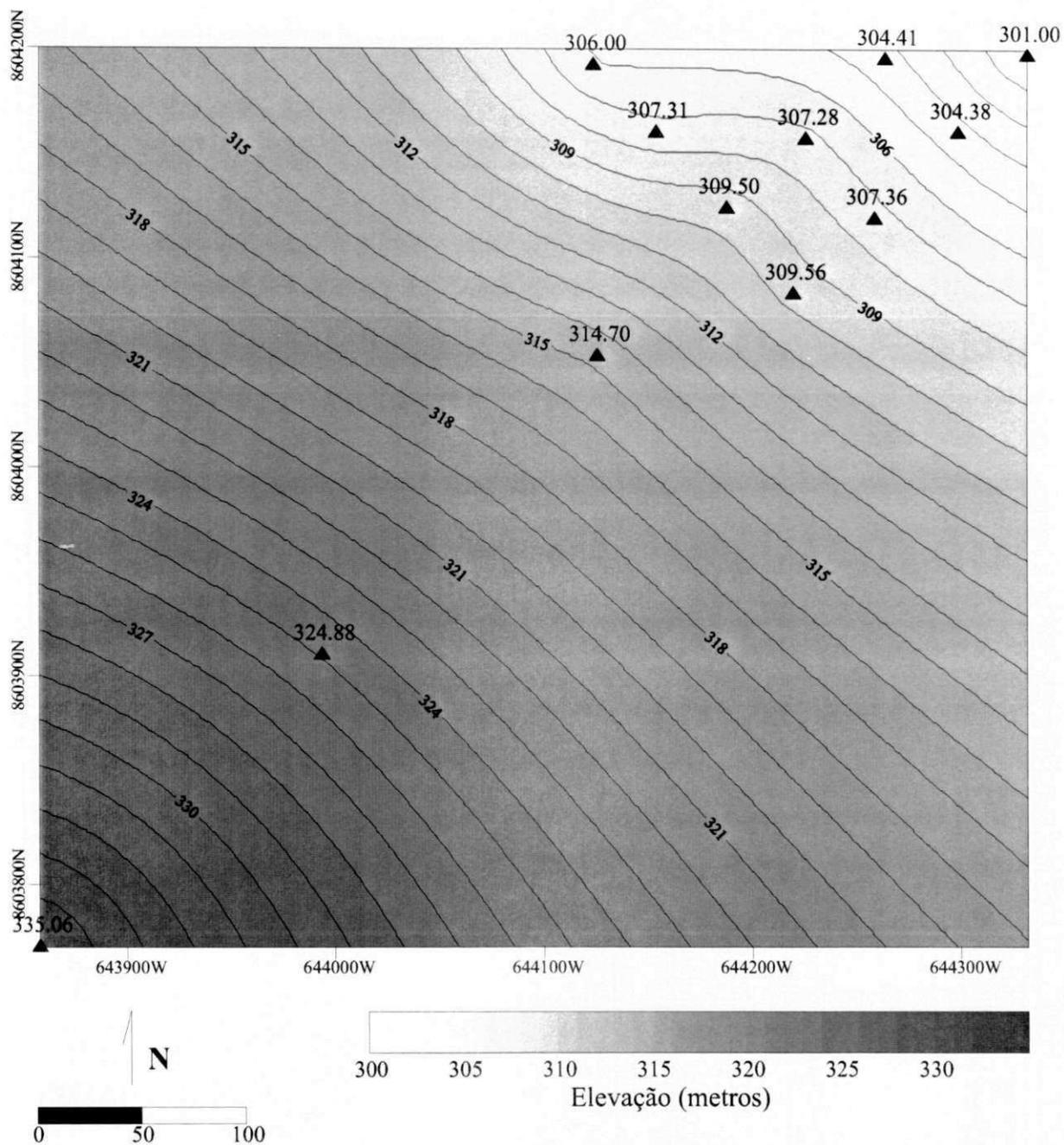


Figura 3.18 - Localização dos perfis GPR adquiridos dentro da área de estudo, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.



OBS: cota de referência 300m não guarda nenhuma relação com a altitude da área

Figura 3.19 - Mapa topográfico gerado com dados de topografia dos pontos onde foram executadas as SEV's, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso MT.

O processamento dos dados de GPR foi efetuado utilizando o software RADPRO (*Radar Processing Software*), versão 2.2 da *Mala Geoscience*, e as etapas realizadas no processamento, adotadas neste trabalho, são brevemente descritas a seguir.

- Conversão dos Arquivos – esta etapa consistiu na conversão dos dados no formato RD3, que é o formato de saída do GPR fabricado pela RAMAC, para o formato RD4 que é o formato lido pelo RADPRO.
- DcFilter – utilizado para remoção dos ruídos de baixa frequência nos sinais de radar e para situar o tempo zero em seu tempo real, ou seja, situar o tempo zero na primeira chegada da onda eletromagnética.
- Gain (Ganho) – aplicação de ganhos nos dados, com o intuito de melhorar a visualização de refletores fracos. Pode ser aplicado em um determinado intervalo de tempo, com diferentes amplitudes. Os ganhos disponíveis são o ganho linear e exponencial.
- AGC (*automatic gain control*) – é um tipo de função escalar temporal na qual as amplitudes dos dados são aumentadas ou pelo menos normalizadas visando melhorar a apresentação dos dados (recuperar sinais fracos ou reforçar os sinais de menor energia).
- Filter (Filtro) – remoção de frequências não desejadas (ruídos). Os espectros de amplitude em função da frequência, definir a escolha dos parâmetros do filtro. O tipo mais usual é o filtro Passa Banda Trapezoidal.
- Spectrum (Espectro) – permite analisar o espectro de amplitude e de fase dos dados GPR da seção analisada, possibilitando a escolha das frequências a ser utilizadas no processo de filtragem.
- Elevation File (Arquivo de Topografia) – inserção da topografia nos dados de radar. O arquivo tem a extensão *.elv sendo do tipo texto contendo x, y e z.
- Moving Average (Média móvel) – é um filtro de média móvel para suavização de refletores horizontais.
- Section (Seção) – permite a edição da visualização do conjunto de traços (*wiggle trace*, *variable área* e *variable density*), ganhos, dimensões do perfil, editar a velocidade de conversão do perfil em tempo para profundidade e modificar escalas e anotações verticais e horizontais. Gera um arquivo imagem da seção processada.

Um organograma simplificado, demonstrando as etapas do processamento realizado nos dados de perfis de reflexão de afastamento constante, está mostrado na Figura 3.20. O processamento dos dados de radar é bastante interativo.

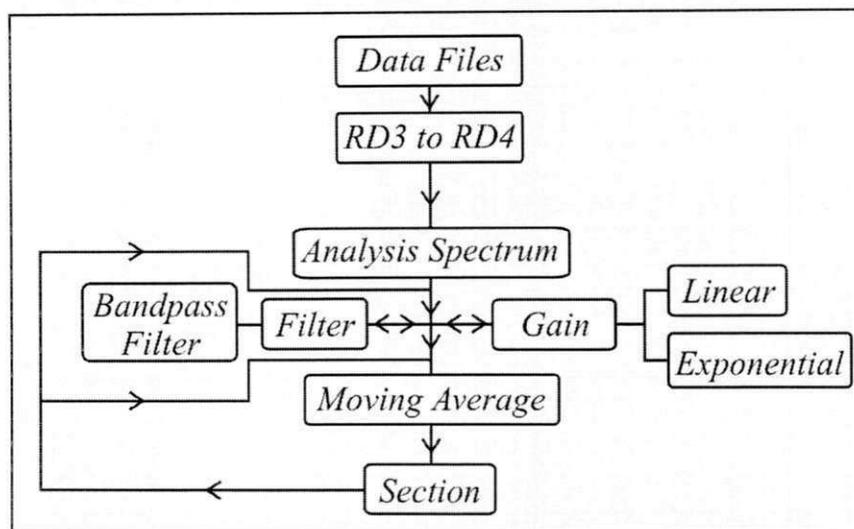


Figura 3.20 – Fluxograma básico de processamento do software RADPRO (Mala Geoscience) utilizado nos dados de GPR.

Os dados de GPR foram ajustados com a topografia e plotados em função do tempo e da profundidade para facilitar a visualização dos refletores. Serão mostrados sempre dois perfis: o superior, sem interpretação, e o inferior, interpretado. Na conversão dos perfis de afastamento constante, de tempo para profundidade, foi utilizada uma velocidade constante de 0,08m/ns, que foi a velocidade obtida através de informações geológicas diretas dos furos de investigação realizados na área.

Os parâmetros utilizados no processamento dos perfis GPR de afastamento constante encontram-se no Apêndice E (CD-ROM).

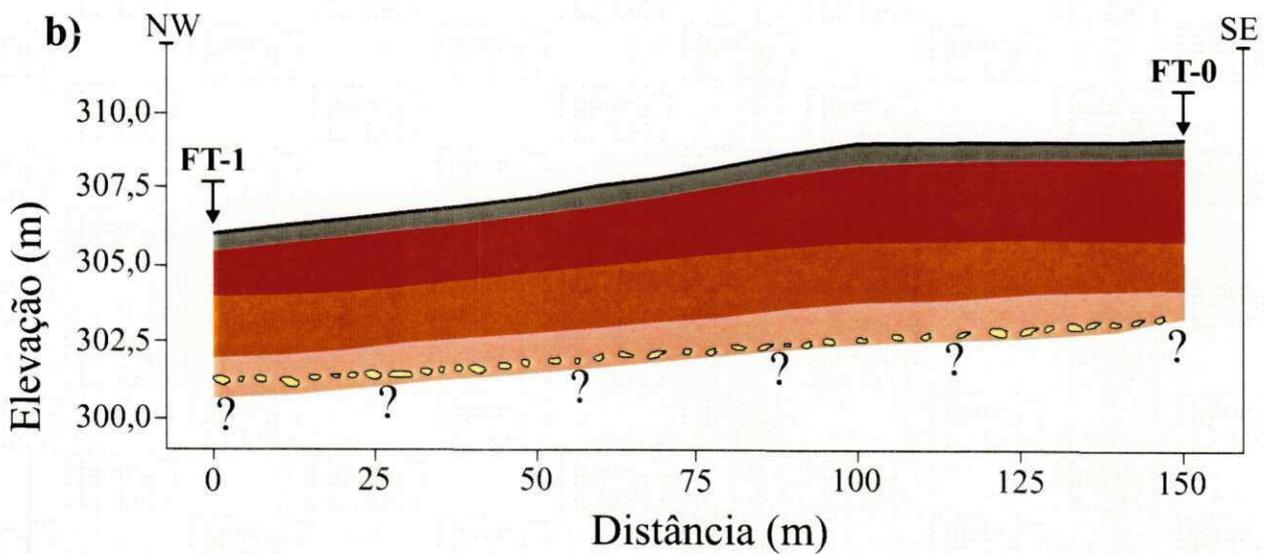
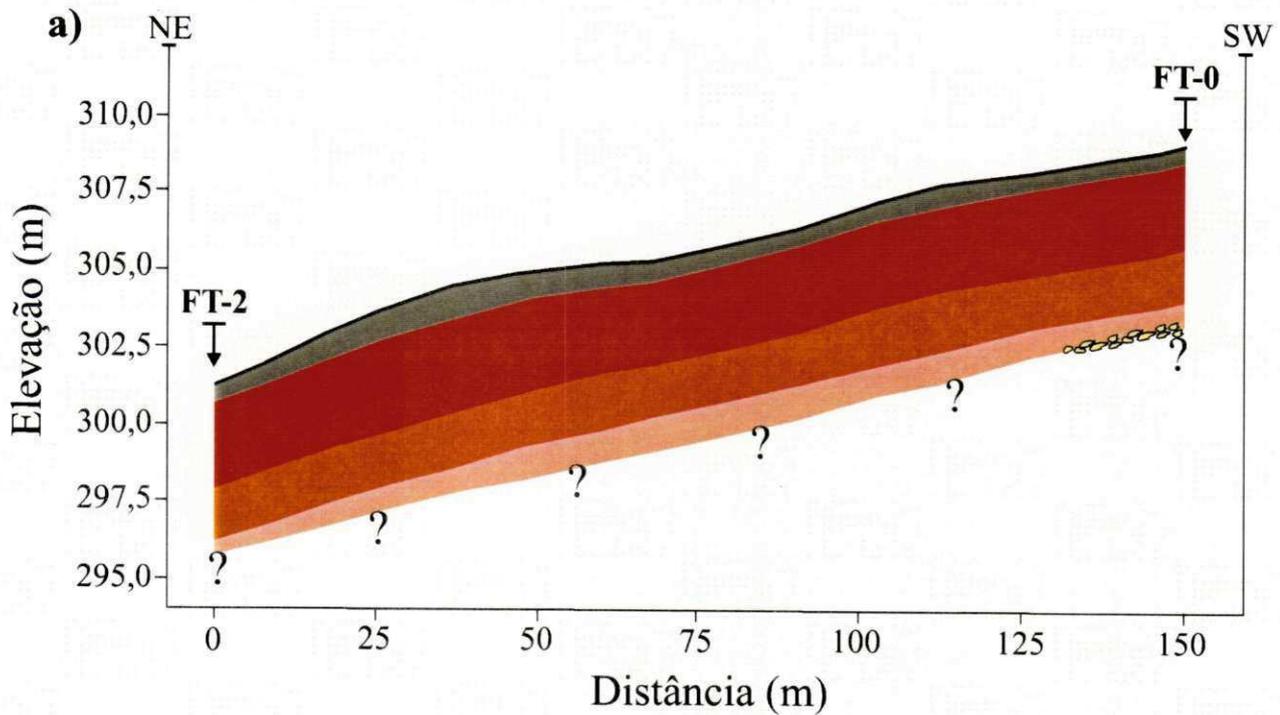
CAPÍTULO 4

4 APRESENTAÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1 FUROS DE INVESTIGAÇÃO GEOLÓGICA

Através da correlação dos furos de sondagem a trado e das respectivas análises granulométricas de suas amostras foram elaboradas duas seções geológicas (Figura 4.1). Na seção geológica 1 (Figura 4.1a) que foi elaborada através da correlação dos furos de sondagem FT-2 e FT-0, observa-se a presença, inicialmente, de um solo arenoso de coloração cinza, com presença de matéria orgânica e pouca argila; a segunda camada tem uma espessura de 3,0m sendo caracterizada como uma areia siltosa de coloração amarelada; a terceira camada possui uma espessura aproximada de 1,5m associada a uma camada de areia argilosa, cor variegada, com presença de concreções ferruginosas; e a quarta e última camada atingida pelos furos é associada a uma areia argilosa de cor cinza esbranquiçada, com presença de material plíntico; são notados alguns clastos de quartzo no furo de sondagem FT-0, não sendo notada a presença no FT-2.

A seção geológica 2 (Figura 4.1b), elaborada através da correlação dos furos de sondagem FT-1 e FT-0, apresenta a mesma seqüência estratigráfica da seção geológica 1 descrita anteriormente, com exceção dos clastos de quartzo que também foram observados no FT-1.



LEGENDA

- | | |
|--|--|
|  Areia fina, pouco argilosa, cor cinza escura, com matéria-orgânica |  Areia argilosa de cor cinza esbranquiçada, presença de material plíntico |
|  Areia siltosa de cor amarela, textura fina |  Clastos de quartzo |
|  Areia argilosa, cor variegada, com presença de concreções ferruginosas | |

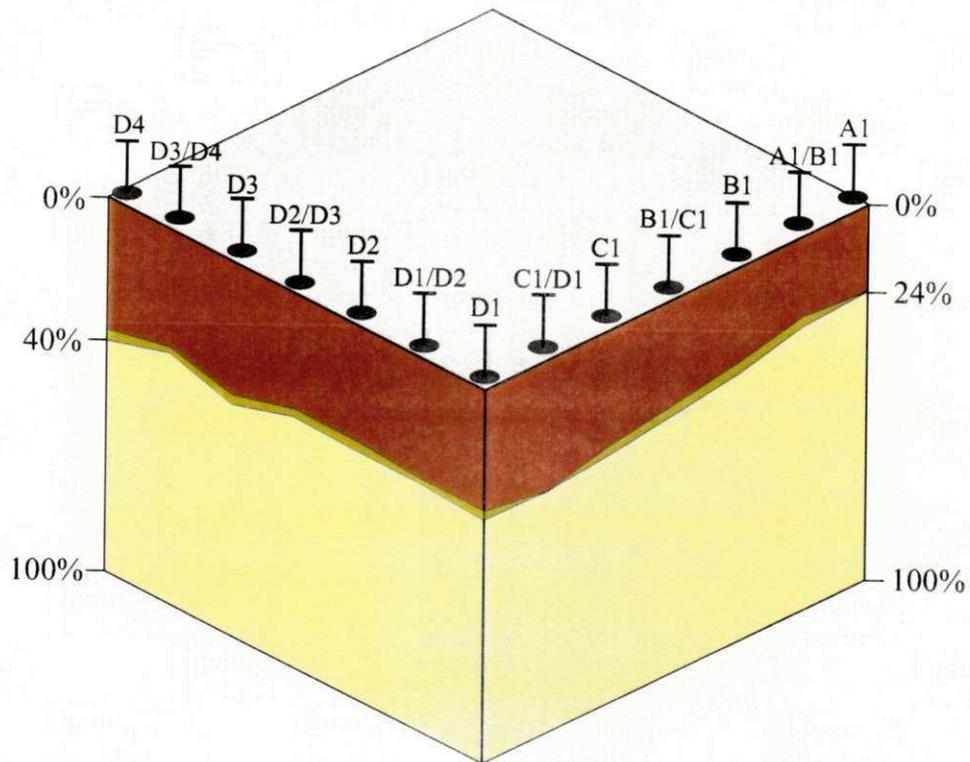
Figura 4.1 - a) Perfil geológico elaborado através da correlação entre os furos de sondagem a trado FT2 e FT0; b) Perfil geológico elaborado através da correlação entre o FT1 e o FT0, Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

À partir dos resultados obtidos através das análises granulométricas das amostras coletadas nos pontos de aquisição das SEV's e nos pontos intermediários entre as mesmas na área mais próxima à voçoroca (Figura 3.15), foi possível definir a percentagem de areia, silte e argila presentes no solo. Os resultados mostram que nos pontos A1 e A1/B1 o solo é mais arenoso que nos demais pontos (Figura 4.2). A percentagem de areia diminui gradativamente para os pontos de maior altitude. Solos de textura arenosa permitem rápida infiltração das chuvas, dificultando o escoamento superficial e, devido à baixa proporção de partículas argilosas, apresentam maior susceptibilidade à erosão.

Nos furos onde foram instalados os medidores de nível d'água foram realizadas coletas de informação da profundidade do lençol freático em épocas distintas. Isto serviu para definir a variação do lençol freático sazonalmente e auxiliar na interpretação das SEV's (Tabela 4.1). Os resultados mostram que o nível d'água apresenta um aprofundamento do lençol freático no período de julho a novembro (seca) e soerguimento do mesmo no período de chuvas, meses de novembro à abril.

Tabela 4.1 – Profundidade do nível d'água nos poços de monitoramento de nível d'água instalados dentro da área de pesquisa, Fazenda Salvatti II, Sorriso – MT.

Poços de Monitoramento do Nível d'água	Data de medição do nível d'água					
	26/07/00	12/09/00	03/11/00	23/01/01	24/02/01	30/10/01
	Profundidade (m)					
Pm1	8,90	SECO	SECO	SECO	SECO	SECO
Pm2	5,42	5,66	5,70	5,01	5,28	SECO
Pm3	3,87	4,69	4,60	3,56	3,63	SECO
Pm4	5,70	5,98	6,60	5,34	5,64	5,86
Pm5	7,31	7,47	7,51	SECO	7,34	6,20
Pm6	6,97	SECO	SECO	6,90	6,90	5,85
Pm7	5,47	5,81	5,70	5,22	5,29	4,22



CONVENÇÕES

- | | | | |
|---|-----------------------|---|----------------------------|
|  | Porcentagem de Argila |  | Local de coleta da amostra |
|  | Porcentagem de Silte | | |
|  | Porcentagem de Areia | | |

Figura 4.2 - Gráfico mostrando a porcentagem de argila, silte e areia presentes no solo coletado entre 0,0 e 0,5m de profundidade dentro da área estudada

4.2 MÉTODOS INDIRETOS DE INVESTIGAÇÃO

4.2.1 Dados de eletrorresistividade

Observando-se as curvas de resistividade elétrica aparente obtidas em períodos diferentes (Figura 4.3 e 4.4) nota-se que na campanha de junho de 2000 há uma variação nos dados obtidos, relativamente às duas outras campanhas, fazendo com que os valores de resistividade oscilem. Este fato é percebido claramente nas SEV's A1, C1, D1, E2 e F2.

As curvas de resistividade aparente versus abertura $AB/2$ em geral devem apresentar um comportamento suave; alguns pontos verificados na campanha de junho divergem da tendência natural das curvas e esta divergência é atribuída ao equipamento utilizado neste período, que efetua somente uma leitura a cada injeção de corrente no solo. Nas campanhas seguintes este fato foi atenuado (Figura 4.3 e 4.4) com a utilização do equipamento SYSCAL R2 que trabalha com corrente contínua mas alternando a polaridade a cada período de medição e realiza 10 medidas programadas pelo operador, fazendo um empilhamento destas medidas, eliminando os ruídos e melhorando a qualidade dos dados. Neste processo o sistema avalia a qualidade do resultado e fornece um indicador de qualidade (Q).

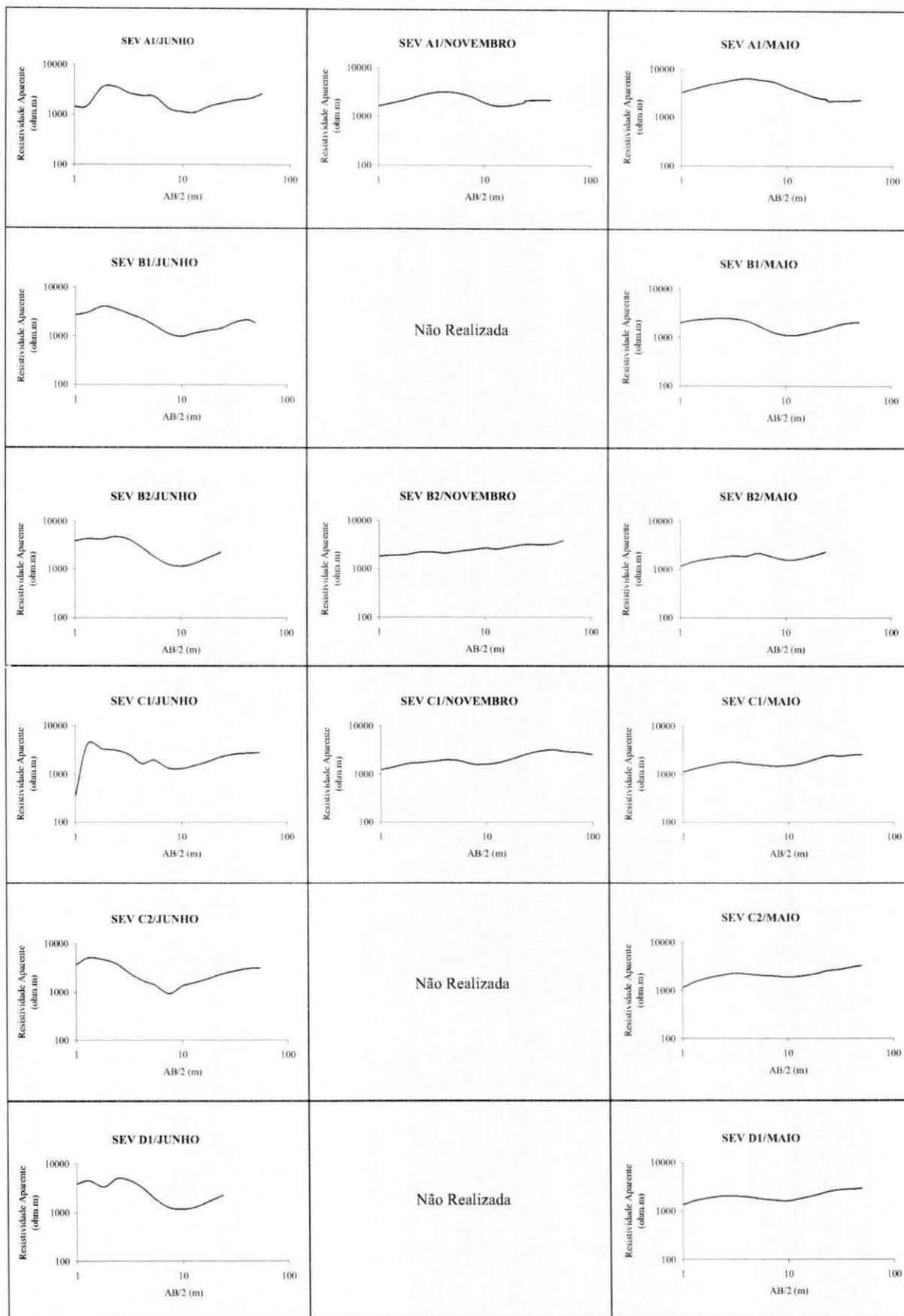


Figura 4.3 - Curvas das sondagens elétricas verticais A1, B1, B2, C1, C2 e D1 realizadas na Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

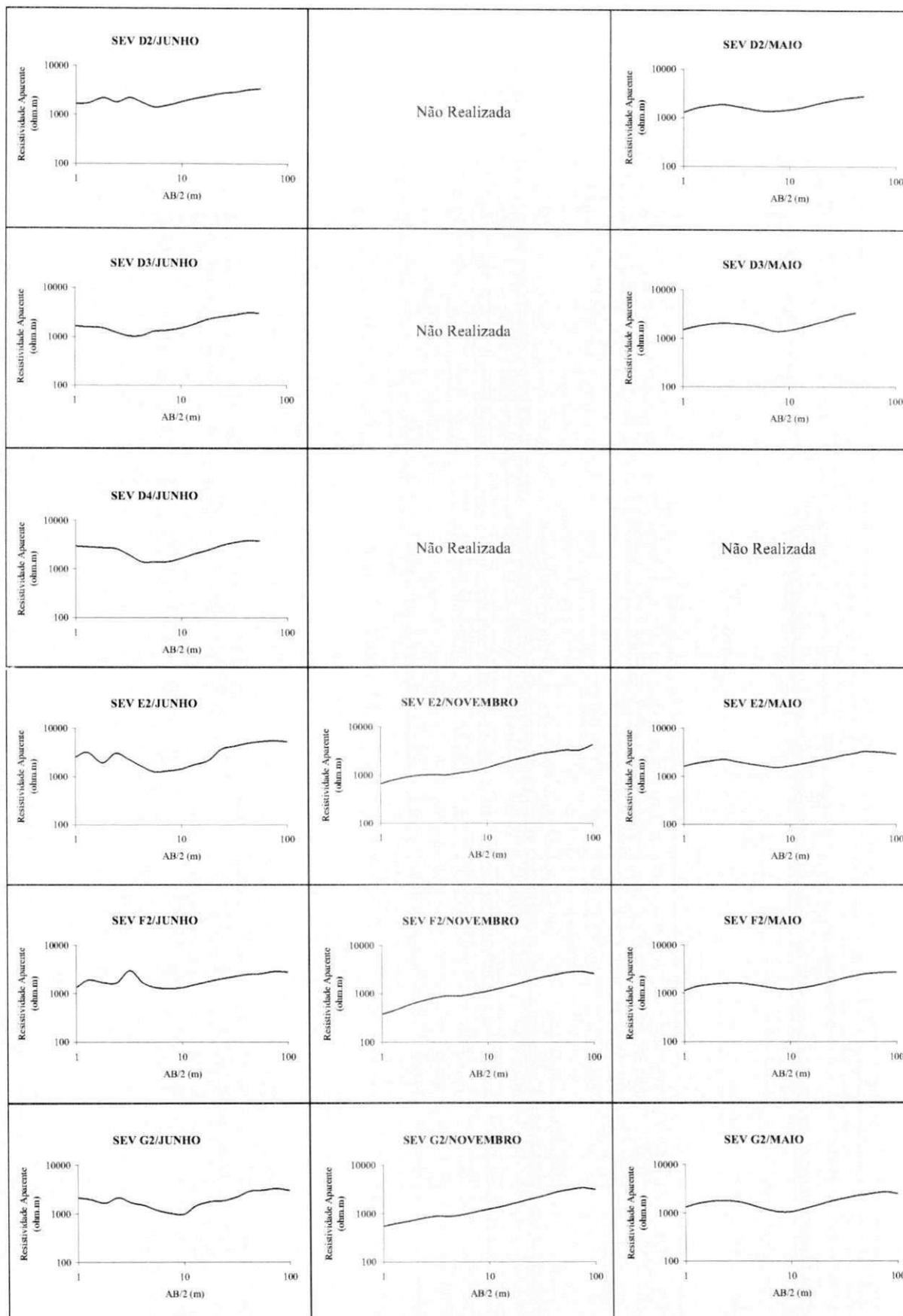


Figura 4.4 - Curvas das sondagens elétricas verticais D2, D3, D4, E2, F2 e G2 realizadas na Fazenda Salvatti II, município de Sorriso - MT.

Após a modelagem das curvas com a utilização do software IPI foram elaborados três perfis geolétricos: A1-D1, B2-G2 e D1-D4.

Perfil A1 – D1

O perfil geolétrico A1-D1 foi elaborado através dos modelos geolétricos ajustados para as SEV's A1, B1, C1 e D1.

Para o mês de junho de 2000 este perfil mostra a presença de 6 camadas geolétricas (Figura 4.5). A correlação dos dados superficiais dos modelos geolétricos foi realizada através de informações dos furos de sondagem a trado executados na área (Figura 4.1). A primeira camada do perfil (Figura 4.5) possui uma espessura de aproximadamente 0,5m e uma resistividade aparente variando entre 1222 e 1750ohm.m, sendo relacionado com a camada de solo arenoso com presença de matéria orgânica. A segunda camada apresenta uma resistividade aparente ajustada variando de 3650 (SEV-D1) à 9588ohm.m (SEV-B1) e uma espessura de aproximadamente 1m, sendo associada a um solo arenoso seco. A camada seguinte (3) possui uma resistividade aparente ajustada entre 712 e 1160ohm.m até a profundidade entre 5,1m (SEV-A1) e 6,2m (SEV-D1), quando sua resistividade diminui para aproximadamente 300ohm.m indicando a presença do nível d'água. Este horizonte geolétrico é definido como uma camada de areia argilosa, como observado em campo. A quarta camada é associada ao topo da rocha na área, sendo caracterizada como um arenito com resistividade variando entre 2200 e 2500ohm.m, com algumas lentes de conglomerados com resistividade de 3760 até 7362ohm.m, sendo rochas típicas da Formação Salto das Nuvens.

Em maio de 2001, o perfil geolétrico A1-D1 (Figura 4.6) diferiu do apresentado para o mês de junho de 2000 em relação a profundidade do nível d'água que apresentou uma diminuição de profundidade de cerca de 0,6m (SEV-A1) à 1,70m (SEV-D1). As resistividades ajustadas para cada SEV variaram. No entanto, os intervalos de resistividades adotadas para as camadas geolétricas não sofreram grandes alterações. Nesse perfil, observamos o primeiro horizonte com espessura de aproximadamente 0,5m e resistividade aparente variando entre 750 e 1800ohm.m (solo arenoso com matéria orgânica). O segundo horizonte apresenta uma resistividade aparente entre 3247 e 9002ohm.m e espessura variando entre 1 e 3,5m (solo arenoso). O horizonte seguinte (3) tem uma resistividade aparente entre 979 e 1336ohm.m (areia argilosa) até

a profundidade entre 5,7(SEV – A1) e 7,9m (SEV – D1), quando sua resistividade diminui para aproximadamente 300ohm.m com a presença do nível d'água. O quarto horizonte geoeletrico marca o topo da rocha no perfil, sendo caracterizado como um arenito com resistividade variando entre 2200 e 2890ohm.m, com algumas lentes de conglomerados, com resistividade de 5211ohm.m.

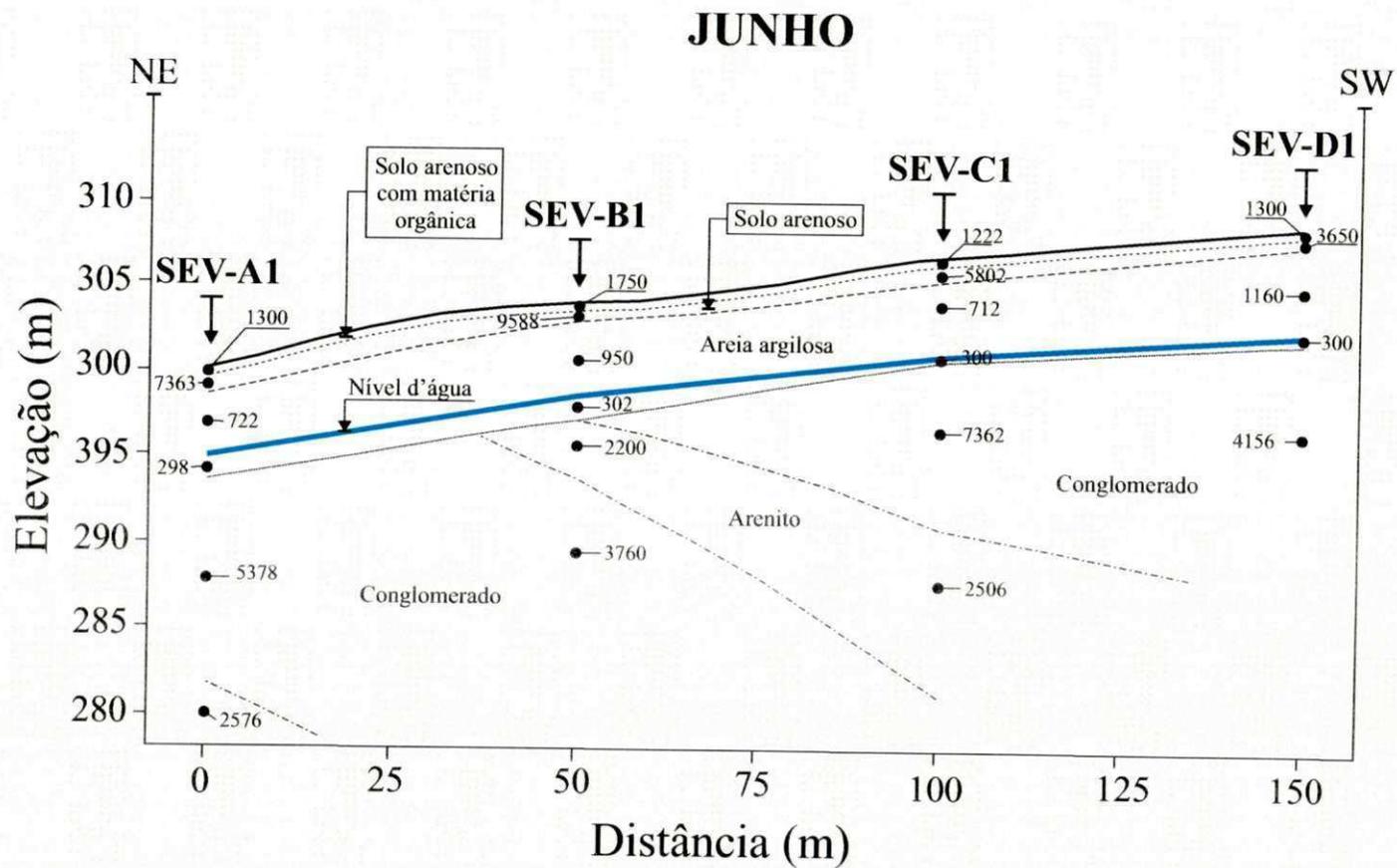


Figura 4.5 - Modelo geológico obtido através da correlação entre as SEV's A1, B1, C1 e D1 realizadas no mês de junho de 2000.

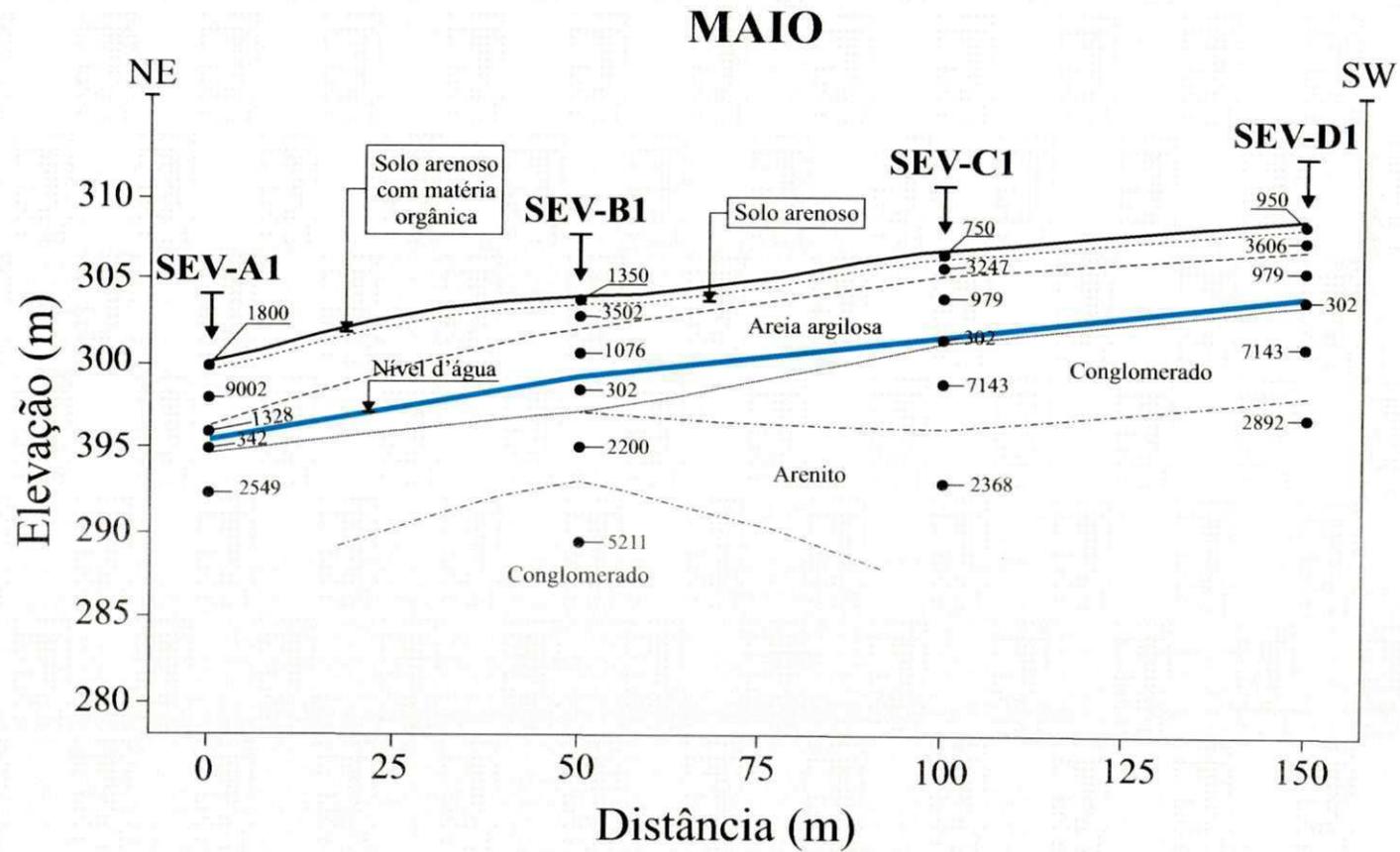


Figura 4.6 - Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's A1, B1, C1 e D1 realizadas no mês de maio de 2001.

Perfil B2 – G2

O perfil geolétrico B2-G2 (Figura 4.7), foi elaborado nos meses de junho de 2000 e maio de 2001 através dos modelos geolétricos ajustados para as SEV's B2, C2, D2, E2, F2 e G2. No mês de novembro de 2000 este mesmo perfil foi elaborado através das SEV's B2, E2, F2 e G2, apenas.

Esta seção mostra a presença de 6 camadas geolétricas (Figura 4.7a). A correlação dos dados superficiais dos modelos geolétricos também foi realizada através de informações dos furos de sondagem a trado executados na área.

No mês de junho de 2000, a primeira camada do perfil (Figura 4.7a) apresenta uma espessura de aproximadamente 0,5m e uma resistividade aparente variando entre 931 a 4950ohm.m, sendo relacionado com uma camada de solo arenoso com presença de matéria orgânica. A segunda camada apresenta uma resistividade aparente variando entre 2549 (SEV-G2) a 6777ohm.m (SEV-B2) e uma espessura que varia de 0,58 a 1,24m sendo associada a solo arenoso seco. A terceira camada possui uma resistividade aparente ajustada entre 650 e 1539ohm.m até a profundidade entre 5,6 (SEV-B2) e 11,3m (SEV-G2), quando sua resistividade diminui para um intervalo entre 300 e 400ohm.m devido a presença de água. Geologicamente esta camada é associada a uma camada de areia argilosa, como observado nos dados de campo. A quinta e sexta camadas são definidas como rochas de composição arenítica e conglomerática. As primeiras apresentam uma resistividade aparente variando entre 2576 e 4271ohm.m, ao passo que a segunda possui resistividade entre 5000 e 9847ohm.m.

No mês de novembro de 2000, devido ao período de chuvas na região, o solo superficial encontrava-se mais úmido do que no mês de junho, diminuindo a amplitude dos valores de resistividade medida em campo. Deste modo, a camada superficial do perfil B2-G2 deste mês (Figura 4.7b) apresentou valores de resistividade na ordem de 311 a 1510ohm.m. A profundidade do nível d'água aumentou aproximadamente 1 metro ao longo de todo o perfil.

Em maio de 2001, o perfil geolétrico B2-G2 (Figura 4.8) diferiu do apresentado no mês de novembro de 2000 somente em relação a profundidade do nível d'água que diminuiu cerca de 1,5m ao longo de todo o perfil. Os intervalos de resistividades adotadas para as camadas geolétricas não sofreram grandes alterações.

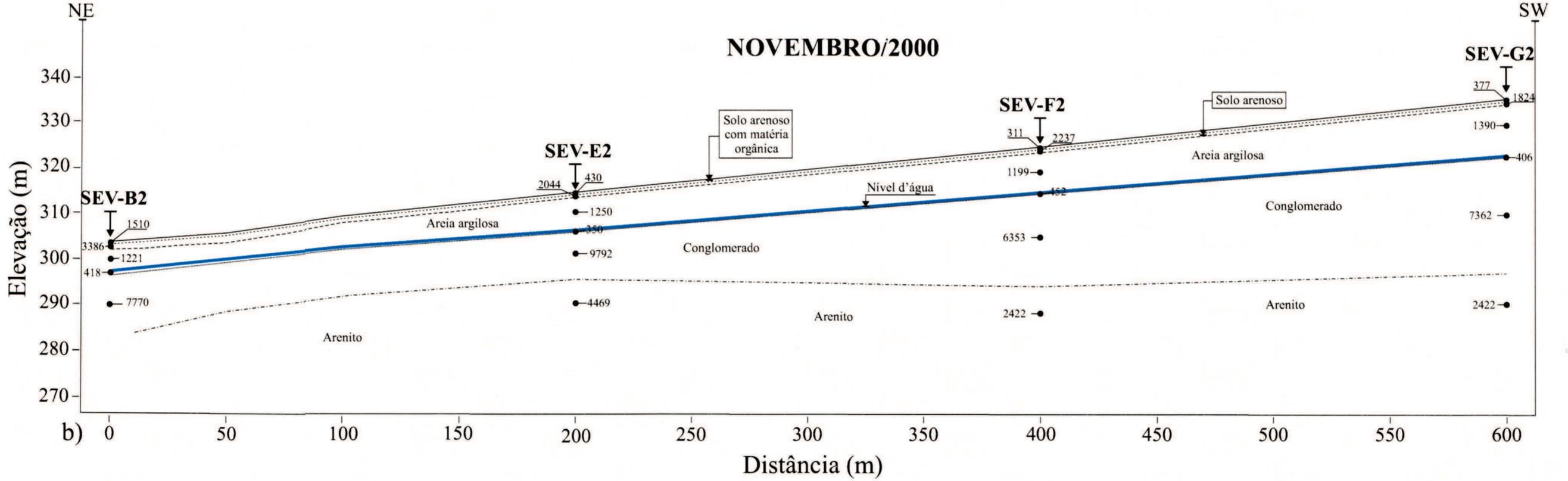
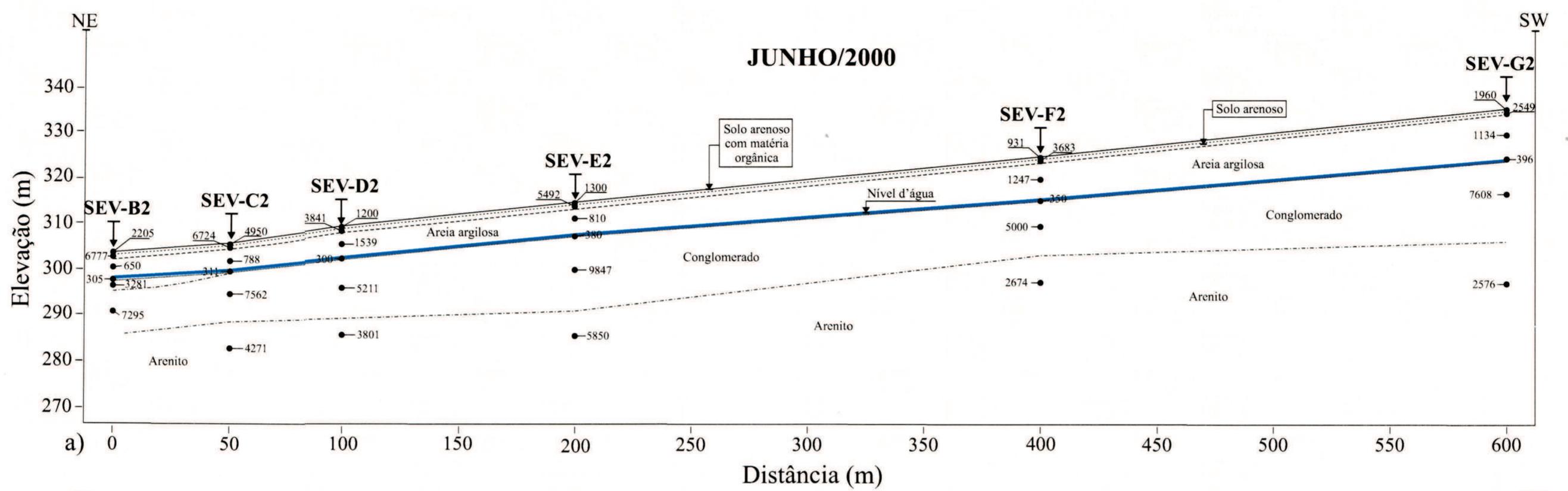


Figura 4.7 - Modelos geolétricos obtidos através da correlação entre as SEV's B2, C2, D2, E2, F2 e G2 adquiridas nos meses de junho/2000 e novembro/2000.

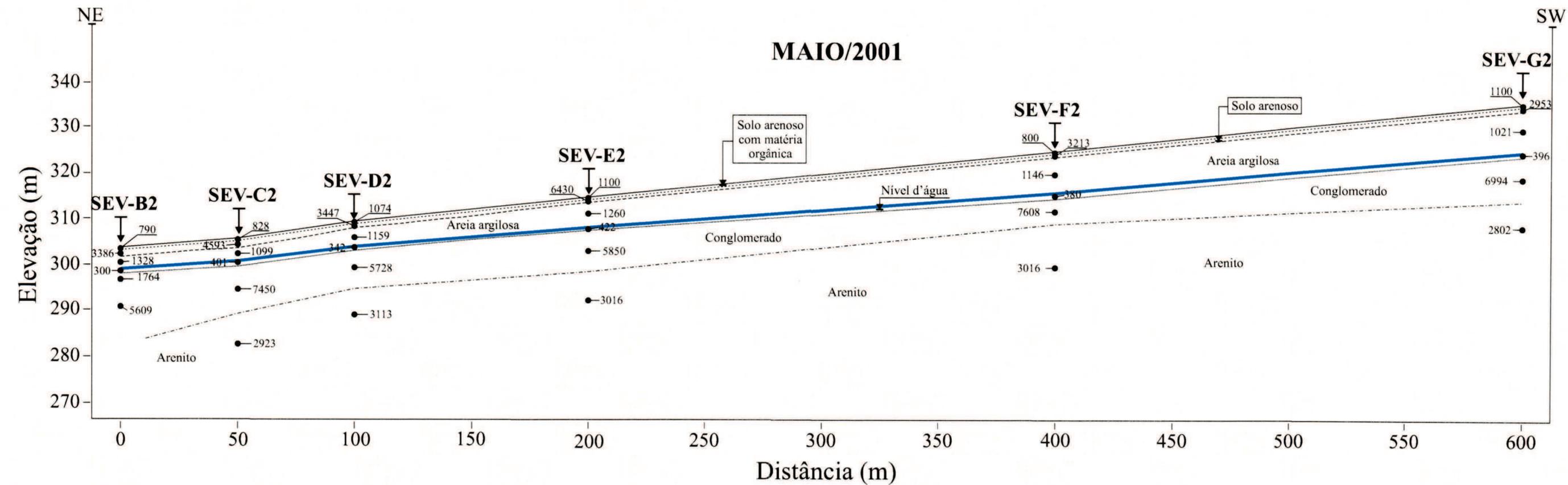


Figura 4.8 - Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's B2, C2, D2, E2, F2 e G2 adquiridas no mês de maio de 2001.

Perfil D1 – D4

O perfil geolétrico D1-D4, desenvolvido transversalmente em relação aos demais perfis, foi elaborado nos meses de junho de 2000 e maio de 2001 através dos modelos geolétricos ajustados para as SEV's D1, D2, D3 e D4. Esta seção mostra a presença de 6 camadas geolétricas (Figura 4.9 e 4.10). A correlação dos dados superficiais dos modelos geolétricos foi auxiliada com informações geológicas dos furos de sondagem a trado executados na área.

O modelo geolétrico elaborado para o mês de junho de 2000 (Figura 4.9) identifica seis horizontes bem definidos. O primeiro horizonte geolétrico possui uma espessura de aproximadamente 0,5m e resistividade aparente variando entre 1200 e 2475ohm.m, sendo definido como um solo arenoso. O horizonte seguinte apresenta uma resistividade aparente ajustada entre 1860 e 3840ohm.m e espessura entre 0,5 (SEV D1) e 1m (SEV D4), sendo correlacionado com uma camada de solo arenoso seco. O terceiro horizonte tem uma resistividade aparente entre 1160 e 1539ohm.m até a profundidade entre 6,2 (SEV-D1) e 9,34m (SEV-D4) sendo definido como uma areia argilosa. Abaixo deste horizonte a resistividade aparente diminui para valores entre 300 e 440ohm.m, marcando o nível d'água no perfil geolétrico. O quinto e sexto horizontes geolétricos são definidos como rochas areníticas e conglomeráticas; as primeiras possuem resistividade entre 2820 e 3800ohm.m, e as últimas resistividades entre 4156 e 9690ohm.m.

Em maio de 2001, o perfil geolétrico D1-D4 (Figura 4.10) diferiu do apresentado para o mês de junho de 2000 em relação a profundidade do nível d'água que apresentou uma diminuição de profundidade entre 1,6m (SEV-D1) à 2,6m (SEV-D3). Os intervalos de resistividades adotadas para as camadas geolétricas, bem como as resistividades aparentes não sofreram grandes alterações.

As SEV's possibilitaram identificar as camadas de solos arenosos mais vulneráveis aos processos erosivos, sendo definidas como a primeira e segunda camadas superficiais mais próximas das SEV's A1, B1, B2 e C2. Nota-se que há uma variação de resistividade lateral próximo a essas sondagens, ou seja, a resistividade aumenta progressivamente próximo às mesmas. Deste modo acredita-se que há uma variação na quantidade de argila, indicando que há uma mudança de Areia Latossólica para Areia Quartzosa nas regiões mais baixas da vertente. As Areias Quartzozas, devido à sua

maior porosidade, permeabilidade e ausência de matriz argilosa, nos pontos de surgência de água, permitem que os finos do solo sejam lixiviados desestruturando o meio e desencadeando um processo de desmoronamento, provocando os entubamentos ou *piping*.

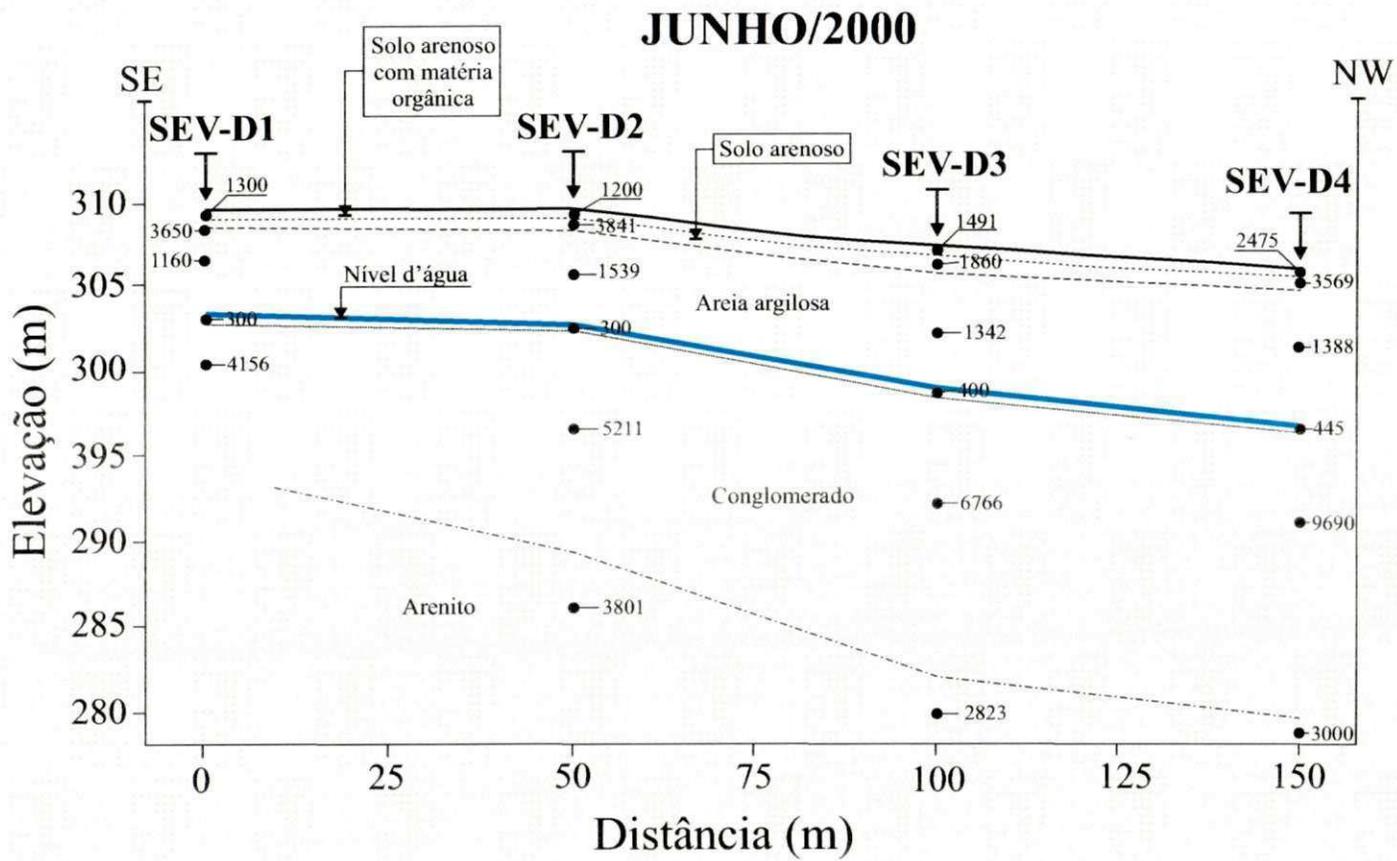


Figura 4.9 - Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's D1, D2, D3 e D4 realizadas no mês de junho de 2000.

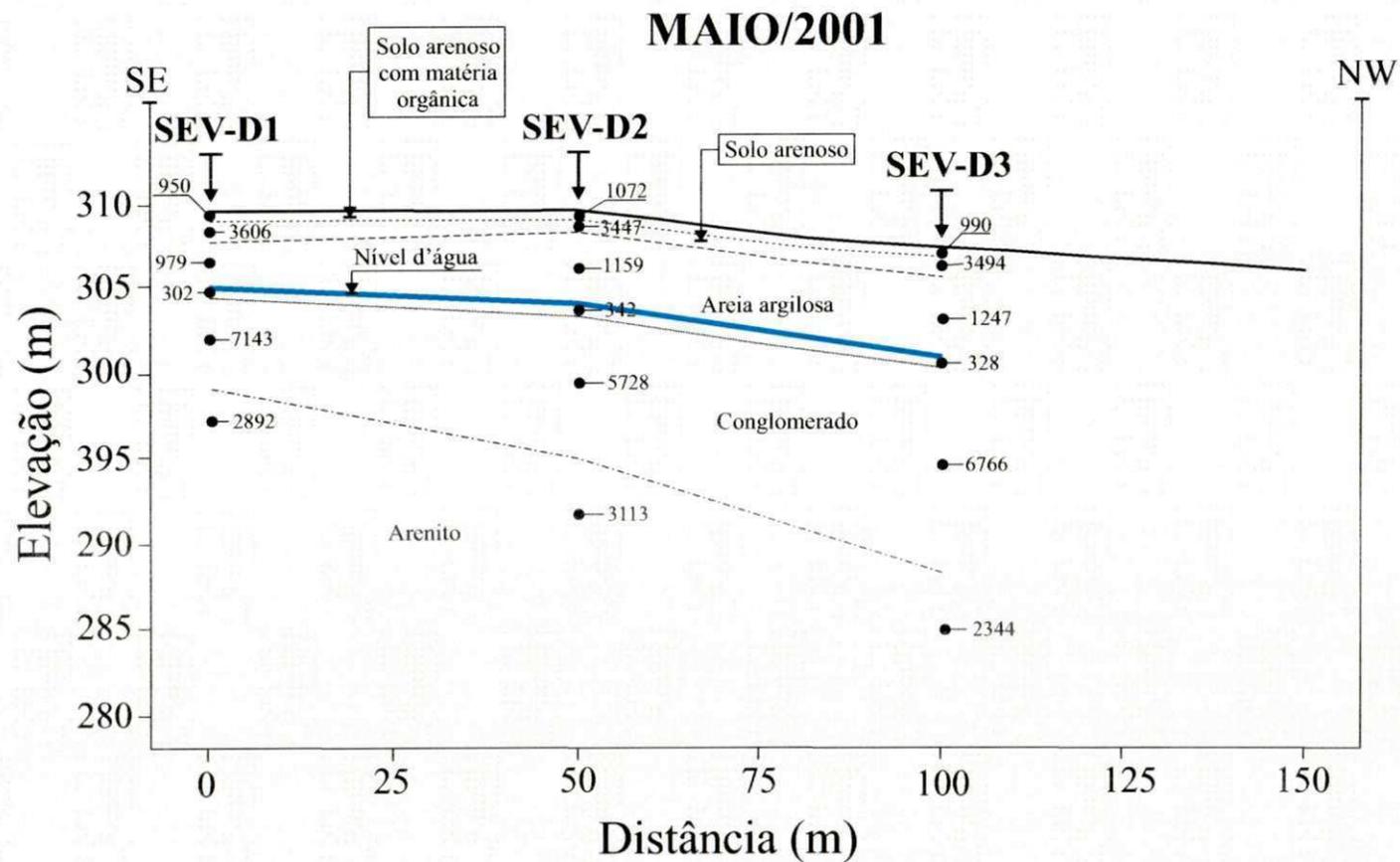


Figura 4.10 - Modelo geolétrico obtido através da correlação entre as SEV's D1, D2 e D3 realizadas no mês de maio de 2001.

4.2.2 Dados de GPR

A Figura 4.11 mostra o perfil GPR D2-G2 (50MHz). Observa-se claramente a presença de duas zonas refletoras e cinco refletores. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao solo arenoso livre de argila. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com um solo arenoso com matriz argilosa. O primeiro refletor subhorizontal está localizado a 5,5m (NE) e 11m (SW) e é correlacionável com o nível d'água. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 5,5m (NE), sofre uma inflexão ao centro do perfil e atinge uma profundidade de a 8,5m (SW) e é correlacionável ao topo da rocha (arenito). O terceiro refletor ocorre no perfil entre 200 e 260m a uma profundidade de 12m sendo interpretado como uma possível lente de cascalho e/ou areia quartzosa livre de argila. O quarto e quinto refletores apresentam-se inclinados e ocorrem no início do perfil entre 0 e 125m a uma profundidade de 10 a 16m, sendo interpretados como camadas de arenito livre de argila e/ou camadas de conglomerado.

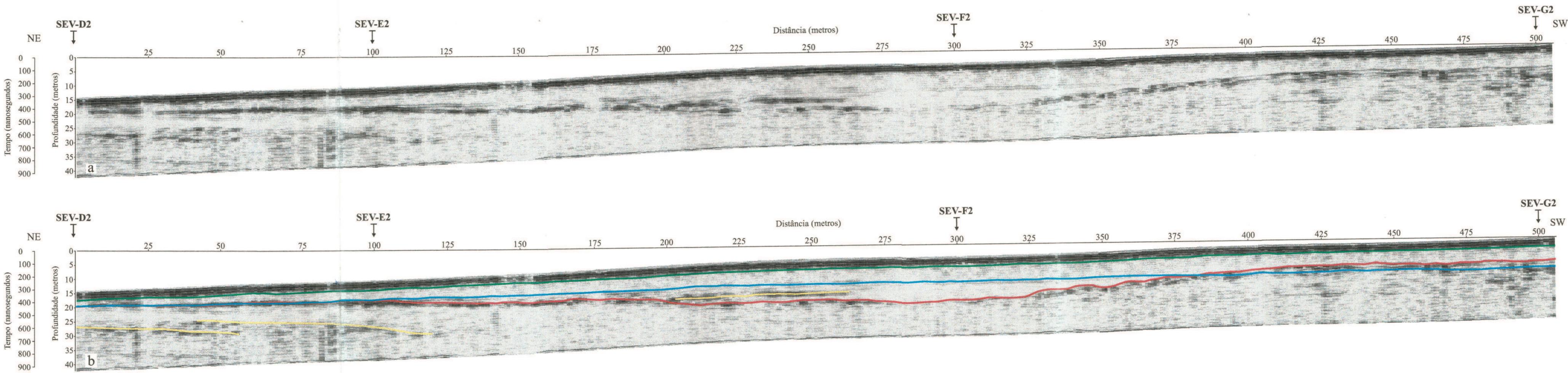


Figura 4.11 - (a) Seção GPR D2-G2 adquirida com antenas de 50MHz no no mês de maio de 2001. (B) Mesmo perfil, com os principais refletos interpretados

A Figura 4.12 mostra o perfil GPR B2-F2 (100MHz). Neste perfil observa-se a presença de duas zonas refletoras e sete refletores. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao solo arenoso livre de argila. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com um solo arenoso com matriz argilosa. O primeiro refletor subhorizontal está localizado a 3,5m (NE) e 9m (SW) e é correlacionável com o nível d'água. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 3,5m (NE), sofre uma inflexão ao centro do perfil e desaparece no final do mesmo; é correlacionável ao topo da rocha (arenito). O terceiro e quarto refletores ocorrem no perfil entre 260 e 320m a uma profundidade de 8,7m sendo interpretado como possíveis lentes de cascalho e/ou areias quartzosas livres de argila. O quinto e sexto refletores apresentam-se inclinados, marcam uma zona de forte reflexão, ocorrem no início do perfil entre as SEV's B2 e D2, a uma profundidade que varia de 6,5 a 12m, sendo interpretados como camadas de arenito livre de argila e/ou camadas de conglomerado.

A Figura 4.13 mostra o perfil GPR A1-D1 (100 MHz). Neste perfil são observadas duas zonas refletoras e quatro refletores lineares. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao solo arenoso livre de argila. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com um solo arenoso com matriz argilosa. O primeiro refletor linear está localizado a 4,8m (NE) e 5,80m (SW) de profundidade e é correlacionável com o nível d'água. Os três refletores lineares inclinados apresentam um mergulho para SW, ocorrendo entre 30 e 200m ao longo do perfil abaixo dos 7 metros de profundidade, sendo interpretados como camadas de arenitos e/ou conglomerados.

A Figura 4.14 mostra o perfil GPR D1-D2 (100 MHz). Este perfil mostra duas zonas refletoras e dois refletores subhorizontais. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se na porção mais superficial ao longo de todo perfil, relacionada ao solo arenoso livre de argila. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com um solo arenoso com matriz argilosa. O primeiro refletor subhorizontal está localizado a 5,2m de profundidade e é correlacionável com o nível d'água. O segundo refletor está localizado a uma profundidade de 8m (SE) a 8,5m (NW) e é correlacionável ao topo da rocha (arenito).

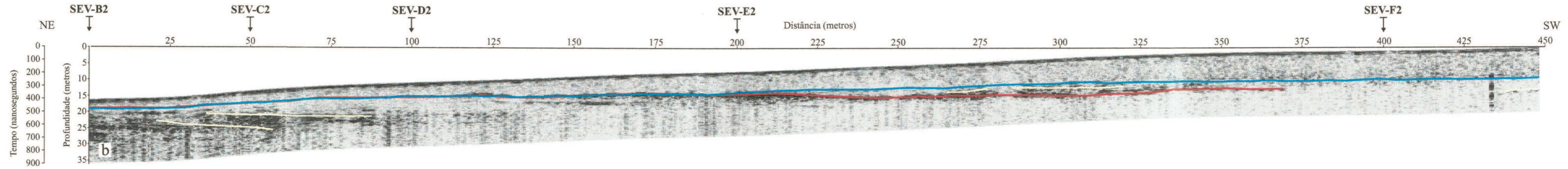
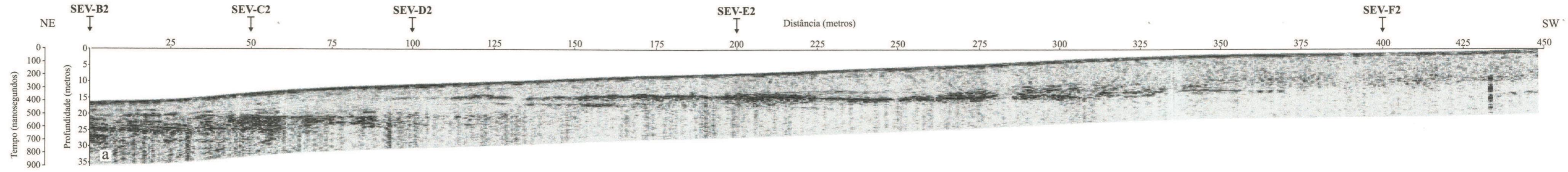


Figura 4.12 - (a) Seção GPR B2-F2 adquirida com antenas de 100MHz no mês de maio de 2001. (B) Mesmo perfil, com os principais refletos interpretados.

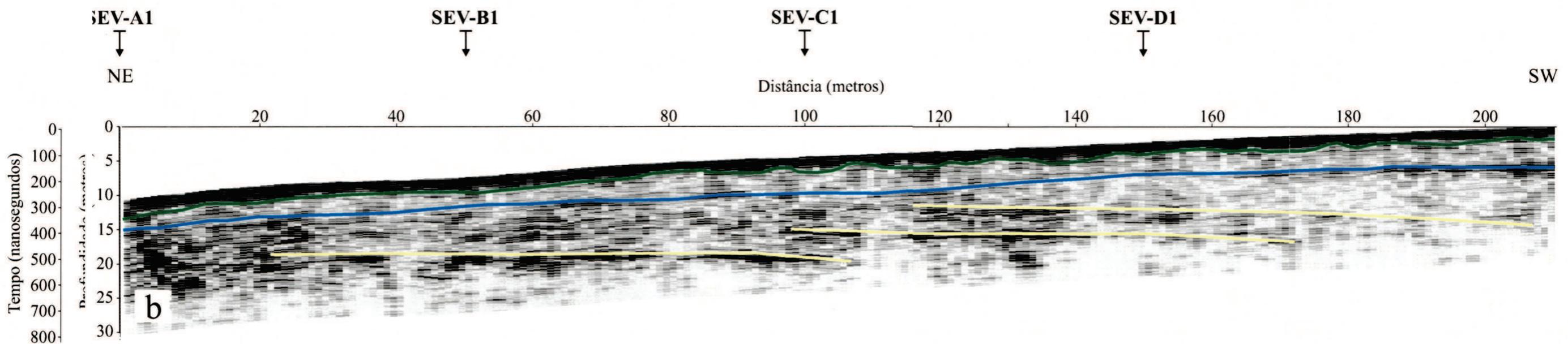
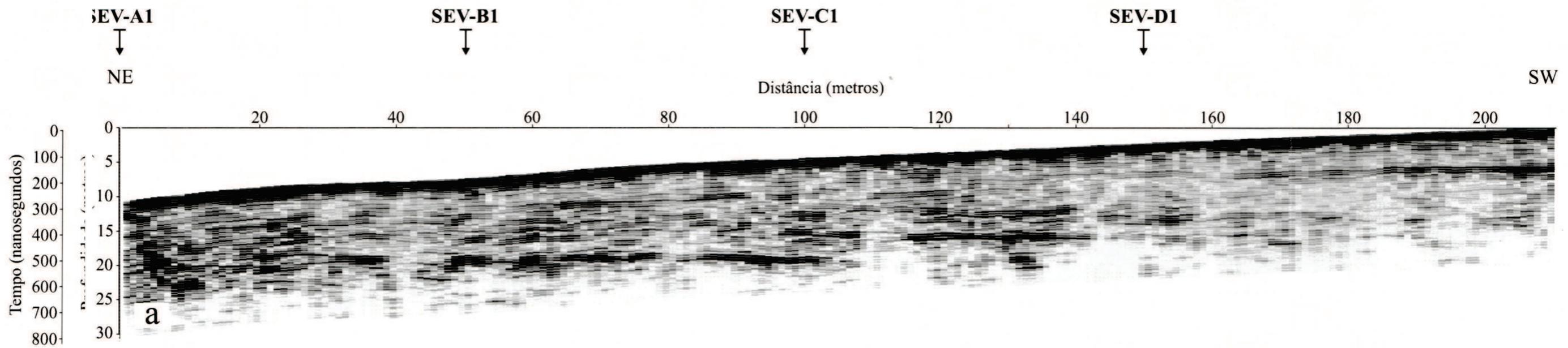


Figura 4.13 - (a) Seção GPRA1-D1 adquirida com antenas de 100MHz no mês de novembro de 2000, (b) Mesmo perfil, com os principais refletos interpretados.

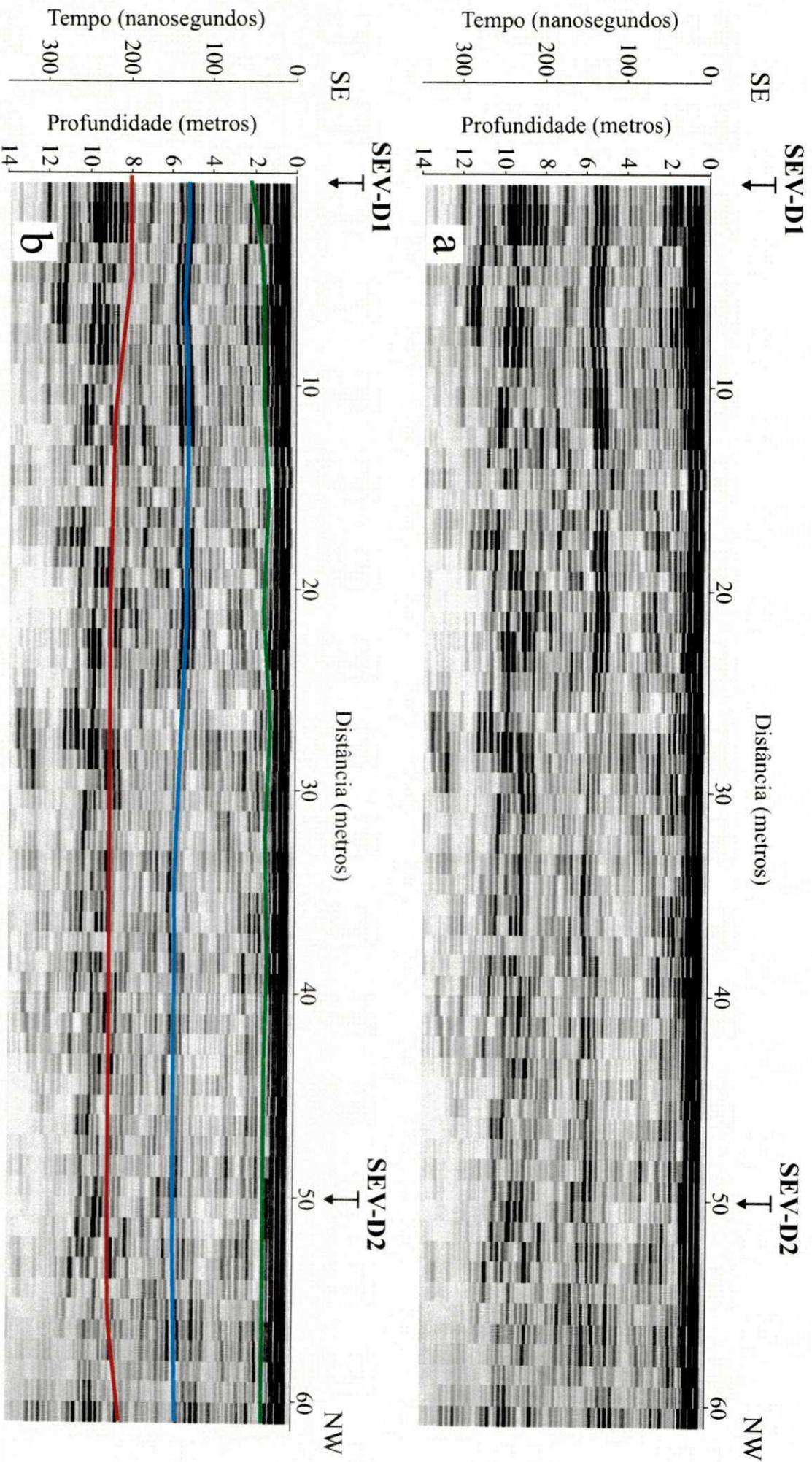


Figura 4.14 - (a) Seção GPR D1-D2 adquirida com antenas de 100MHz no mês de novembro (2000). (b) Mesmo perfil, com os principais refletores interpretados.

A Figura 4.15 mostra o perfil GPR A1 (100 MHz). Este perfil mostra duas zonas refletoras e 1 refletor horizontal. A primeira zona (forte reflexão) encontra-se acima de 1,7m na parte SE do perfil e a 1m na parte NW do mesmo, e é relacionada ao solo arenoso livre de argila. A segunda (ausência de reflexão), ocorre logo abaixo da primeira e está relacionada com um solo arenoso com matriz argilosa. O refletor horizontal está localizado a 5,0m de profundidade e é correlacionável com o nível d'água.

O perfil D2-G2 (50MHz) foi realizado no mês de novembro de 2000. Na figura 4.16 apresentamos apenas o trecho compreendido entre 300 a 350m do perfil total, para realizar uma comparação com o mesmo trecho do perfil realizado no mês de maio de 2001. Os refletores apresentam o mesmo comportamento, exceto pelo fato do refletor subhorizontal que apareceu no mês de maio a uma profundidade menor e no mês de novembro o mesmo apresentou um aumento na profundidade de aproximadamente 1,7 metros (Figura 4.16).

Já era esperada uma variação do nível d'água com as mudanças sazonais. Como consequência se a variação for maior na porção mais alta da vertente haverá um aumento do gradiente hidráulico (dissipação de energia ou perda de carga por unidade de comprimento no sentido do escoamento) que, por sua vez, favorece o surgimento do fenômeno de *piping*, principalmente quando essas áreas estiverem desprovidas de cobertura vegetal. Essa vegetação tem a função de reter e diminuir as taxas de infiltração e, portanto, de reduzir a variação do gradiente hidráulico e, em consequência, o processo de erosão interna. Entretanto, não houve variação diferenciada no nível d'água ao longo da vertente, mas sim uma variação uniforme e constante, como pode ser observada comparando-se o nível d'água nas seções de GPR em maio e novembro e de SEV's realizadas no mesmo período, que apresentaram valores inferiores a 1%. Portanto não há neste caso, aumento no gradiente hidráulico, não sendo este o responsável pelo fenômeno de *piping*.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990 *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v.16, n.3, p.574-582.

WARD, S. H., 1997 *Resistivity and Induced Polarization Methods*. Investigations in Geophysics, n.º 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, v.I, p. 147 - 189.

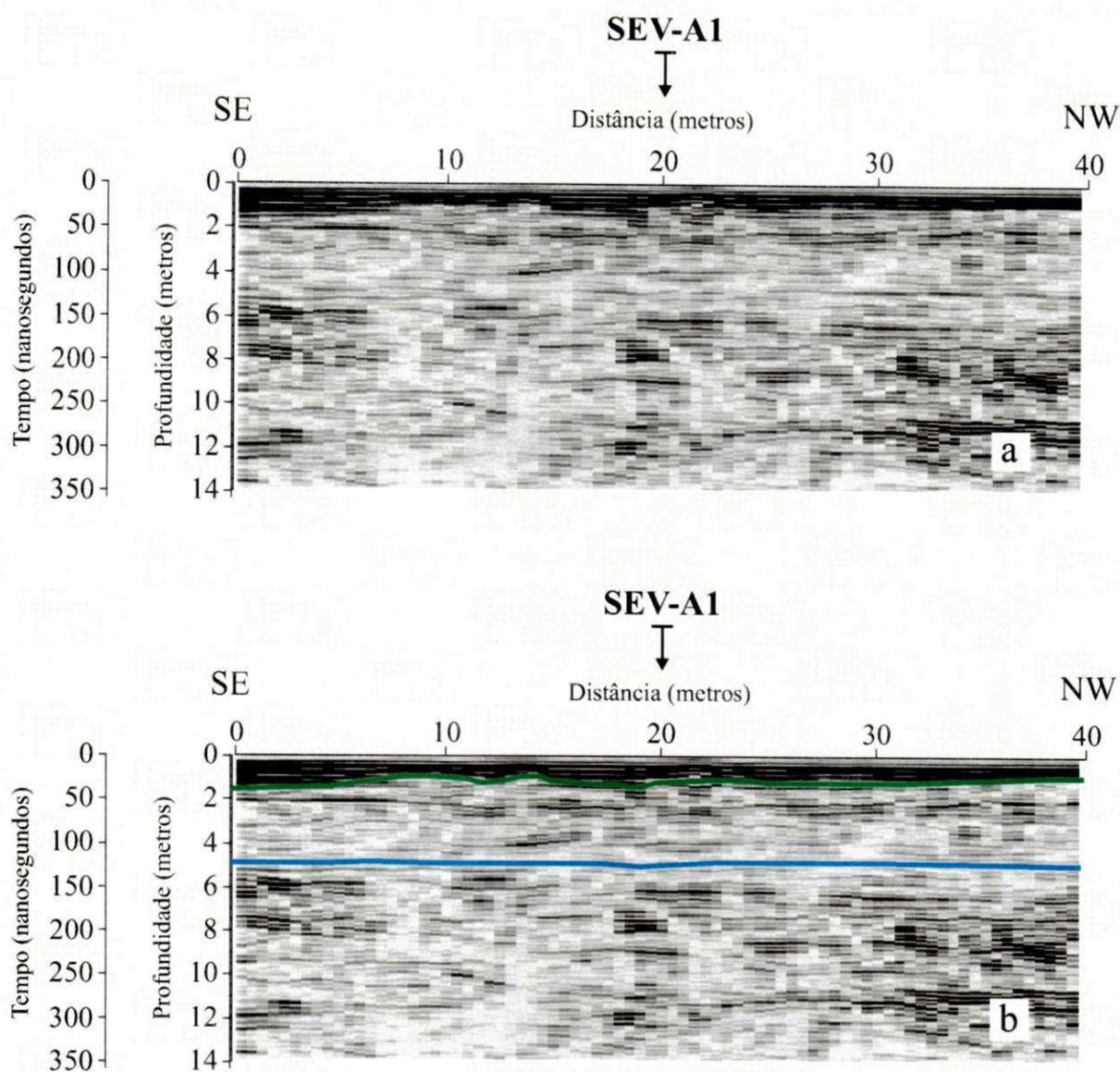


Figura 4.15 - a) Seção GPR A1 adquirida com antenas de 100MHz no mês de maio de 2001. b) Mesmo perfil, com os principais refletos interpretados.

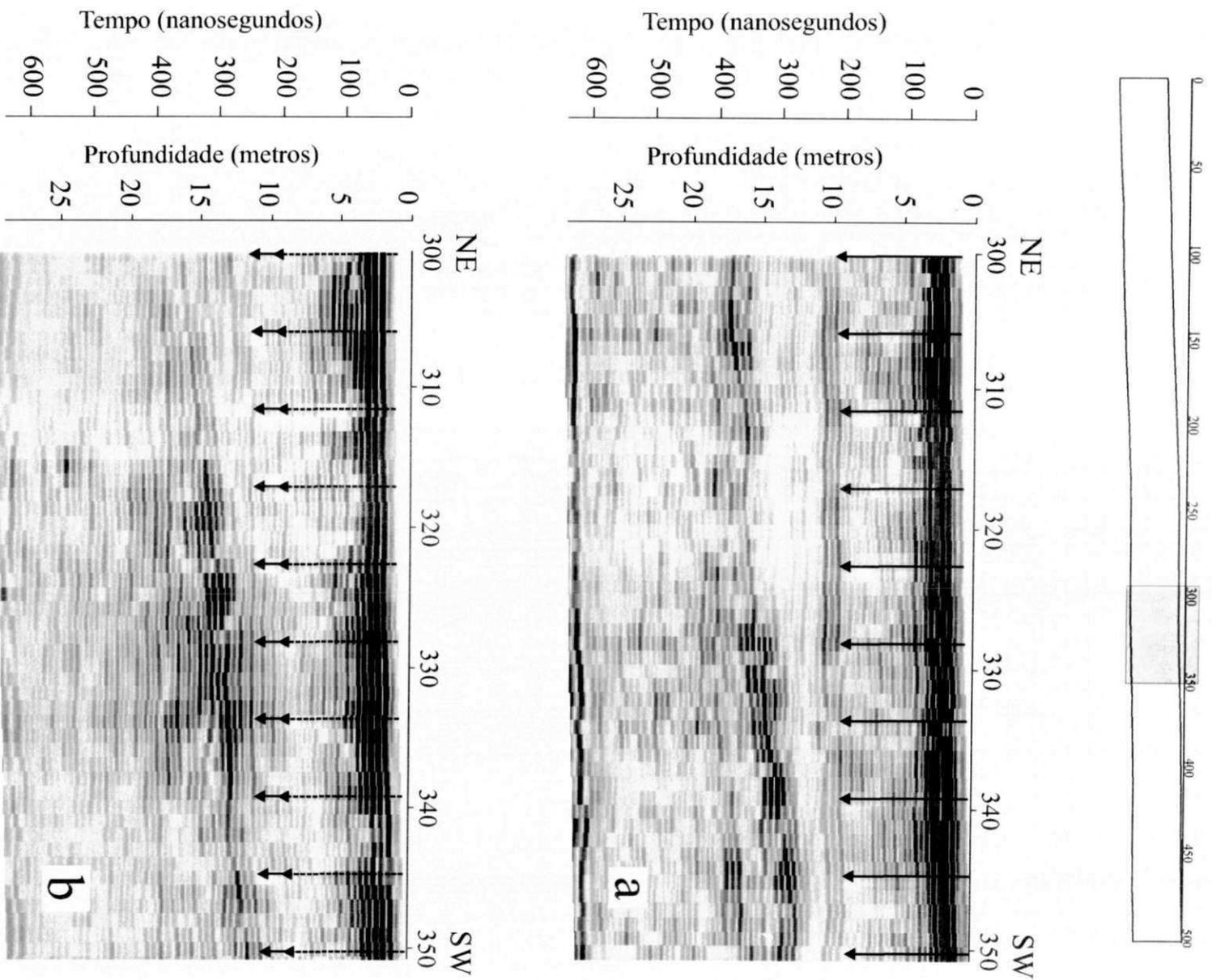


Figura 4.16 - a) detalhe da seção GPR D2-G2 (50MHz) adquirida em maio de 2001, as setas indicam o refletor que representa o nível d'água; b) detalhe de parte da seção GPR D2-G2 (50MHz) adquirida em novembro de 2000, as setas de linha cheia indicam o refletor que representa o nível d'água e as setas pontilhadas mostram a profundidade do nível d'água em maio.

CAPÍTULO 5

5 CONCLUSÕES E CONSIDERAÇÕES

Os resultados apresentados neste trabalho foram possibilitados pela integração de mais de um método de investigação, onde a tradicional pesquisa direta e as modernas metodologias geofísicas se complementaram. Tanto o processo de modelagem das sondagens elétricas verticais (SEV's) quanto o processamento dos dados de radar de penetração no solo (GPR) só foram possíveis, tendo como parâmetros de ajuste os dados fornecidos pelas investigações diretas, através dos furos de sondagem a trado e dos poços de monitoramento de nível d'água.

As SEV's com o arranjo Schlumberger permitiram identificar camadas geolétricas até 30 metros de profundidade com AB/2 máximo de 100m, considerando uma relação de investigação para a área de estudo de 0,15L, próxima à relação proposta por Telford *et al.* (1990) que é de 0,167L.

O GPR possibilitou a investigação até 25m de profundidade com as antenas de 50MHz e até 18m com as antenas de 100MHz. O sinal do topo do lençol freático não está bem marcado como esperado, pois ficou mascarado em parte pelas fortes reflexões das camadas de laterita. Apesar desta dificuldade foi possível observar o topo do lençol freático em todos os perfis com GPR.

Nas investigações geolétricas foram identificados seis horizontes geolétricos: o primeiro horizonte foi associado a uma areia com matéria orgânica, com uma resistividade aparente entre 930 à 4950ohm.m (junho), 311 e 150ohm.m (novembro) e entre 750 à 1800ohm.m (maio), constatando-se que os maiores valores de resistividade sempre são observados nos locais onde foram realizadas as SEV's A1, B1, B2 e C2; o segundo horizonte geolétrico, associado a uma camada de areia seca que apresenta resistividades por volta de 1860 à 9588ohm.m (junho), 1824 à 3386ohm.m (novembro) e 2953 à 9002ohm.m (maio). Estes dois horizontes geolétricos aparecem nos perfis de GPR como as zonas mais superficiais de forte reflexão. Estas camadas, devido a sua elevada permeabilidade, baixa coesão entre os grãos e extração da cobertura vegetal

sobre as mesmas, apresentam um elevado grau de erodibilidade. Na base destas camadas é onde comumente ocorre o processo de *piping*.

O terceiro horizonte geolétrico é caracterizado como uma areia argilosa com resistividade aparente variando entre 650 a 1539ohm.m (junho), 1199 à 1350ohm.m (novembro) e 979 à 1328ohm.m (maio). Neste horizonte a energia de reflexão é atenuada devido a presença de argila no solo e, desta maneira, o mesmo gera uma zona de fraca reflexão.

O quarto horizonte marca a presença do nível d'água em todos os perfis geolétricos pois apresenta os menores valores de resistividade aparente – 300 à 450ohm.m. Nos perfis GPR o topo do lençol freático é definido por um forte refletor subhorizontal que acompanha a topografia abaixo dos 4 metros de profundidade.

O quinto e sexto horizontes geolétricos marcam a presença da rocha na área de estudo, sendo representado por arenitos e conglomerados. Os primeiros possuem resistividades de 2200 à 5850ohm.m (junho), 2422 à 4469ohm.m (novembro) e 2200 à 3133ohm.m (maio), sendo representados no GPR como áreas de fraca reflexão abaixo do nível d'água. Os conglomerados mostram resistividades aparentes de 3760 à 9847ohm.m (junho), 6353 à 9792ohm.m (novembro) e 5211 à 7143ohm.m (maio); estas camadas representam fortes refletores subhorizontais a inclinados.

As investigações geofísicas integradas com as informações geológicas obtidas através dos furos de sondagem a trado e análises granulométricas evidenciam a presença de uma camada de solo predominantemente arenoso próximo ao local onde foram executadas as SEV's A1, B1, B2 e C2. A presença de um solo mais arenoso na base da vertente e o aumento ligeiro da declividade na sua porção mais inferior torna esta região mais susceptível à erosão.

Os dados do nível d'água nos poços nas SEV's e nas seções de GPR possibilitaram acompanhar a variação vertical do lençol freático ao longo de toda vertente, e observar que, do mês de junho de 2000 para o mês de novembro do mesmo ano, o nível d'água desceu, aproximadamente, 1m de profundidade. Já do mês de novembro de 2000 para o mês de maio de 2001, o nível d'água subiu cerca de 1,5m. Isto mostra que o lençol freático atinge a sua maior cota no final do período de chuvas e sua menor cota no período de seca. O gradiente hidráulico se mantém praticamente nulo (<1%), independentemente do período de chuva, ou seja, o ângulo de inclinação da

superfície piezométrica, não varia. O fenômeno de *piping*, que acelera o processo de erosão, se deve provavelmente à retirada da cobertura vegetal e aumento da pluviosidade no período de chuvas. Esses fatores contribuem para a intensificação da percolação de água nos interstícios do solo, fazendo com que o lençol freático fique mais próximo da superfície. Com isso, com a ascensão do nível d'água, este intercepta o talude provocado pelo avanço da erosão e, portanto, ao atingir as camadas de solo predominantemente arenoso, intensifica os processos erosivos internos.

Considerando a semelhança de solos no terço médio e inferior da bacia do Rio Tenente Lira no Município de Sorriso, o processo erosivo interno (*piping*) predominante nesta área é intensificado pela interceptação do nível d'água com o talude existente nas ravinas que se originaram próximas dos rios e córregos, desenvolvendo-se desta forma as grandes voçorocas.

CAPÍTULO 6

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análises Granulométricas; método de ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ALMEIDA, F. G. de, 1997. *A estrutura fundiária como mais uma nova variável a ser considerada no processo de erosão dos solos – Sorriso – MT*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, UFRJ, Rio de Janeiro, RJ, 218p.

AMARAL, D. L.; FONZAR, B. C.; OLIVEIRA FILHO, L. C. de, 1982. Vegetação. As regiões fitoecológicas, sua natureza e seus recursos econômicos. *In*: MME, **Projeto RADAMBRASIL Folha SD-21 (Cuiabá)**, V. 26, Rio de Janeiro, RJ, p. 401 - 452.

ANNAN, A.P., 1993. Practical processing of GPR data. *In*: GOVERNMENT WORKSHOP ON GROUND PENETRATING RADAR, 2nd, 1993, Columbus, Ohio. *Proceedings...*, Columbus, 26p.

ANNAN, A.P. & COSWAY, S.W., 1992. Ground penetrating radar survey design. *In*: SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, 5th, 1992, Oakbrook, Illinois. *Proceedings...*, Oakbrook, SAGEEP, v.2, p.329-352.

ANNAN, A. P., COSWAY, S. W. & REDMAN, J. D., 1991. Water table detection with ground penetrating radar. *In*: INTERNATIONAL CONGRESS OF SOCIETY OF EXPLORATION GEOPHYSICAL, 61, 1991, Houston. *Expanded Abstracts...*, Houston: SEG, p.494-496.

ARAÚJO, S. A. de, 2002. Banco de Dados Georeferenciado da Sub-Bacia do Rio Lira: Uma Contribuição Metodológica para o Monitoramento e Controle Ambiental. *Dissertação de Mestrado*, Instituto de Biociências, UFMT, Cuiabá – MT, 30p.

BARKER, R. D., 1989. Depth of investigation of collinear symmetrical four-electrode arrays. *Geophysics*, 54, p.1031 – 1037.

BARROS, A. M.; SILVA, R. H.; CARDOSO, O. R. F. A.; FREIRE, F. A.; SOUZA JR., J. J.; RIVETTI, M.; LUZ, D. S.; PALMEIRA, R. C. B.; TASSINARI, C. C. G., 1982. Geologia. In: MME, **Projeto RADAMBRASIL Folha SD-21 (Cuiabá)**, V. 26, Rio de Janeiro, RJ, p. 25 - 192.

BERES, M., HAENI, F. P., 1991. Application of ground penetrating radar methods in hidrogeologic studies. *Ground Water*, v.29, n.3, p.375-386.

BOBACHEV, A. A.; MODIN, I. N.; PERVAGO, E. V.; SHEVNIN, V. A., 1999. **IPI-1D – Programs' set for 1D VES data interpretation**. Moscou, Moscou State University, Geological Faculty, Department of Geophysics. www.geol.msu.ru/deps/geophys/rec_labe.htm. IPI_min.doc, 181kb. Acessado em 03/10/2001.

BORGES, W. R., 2002. *Investigações geofísicas na borda da Bacia Sedimentar de São Paulo, utilizando-se GPR e Eletrorresistividade*. Dissertação de Mestrado, Departamento de Geofísica – IAG, USP, Campus de São Paulo, 153p.

BRAGA, A. C. de O., 1997. *Métodos Geolétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica – Formações Rio Claro e Corumbataí, no município de Rio Claro – SP, Rio Claro, SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 169p.

CUTRIM, A.O., 1999. *Estudos hidrogeológicos na Bacia do Paraná, no Município de Rondonópolis*. Tese de Doutorado, Instituto de Biociências, UFMT, Cuiabá – MT, 204p.

DANIELS, J. J., 1996. *Surface Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, London, United Kingdom, 300p.

DAVINO, A., 1970. Importância do método de eletrorresistividade na determinação da natureza do manto de decomposição de rochas cristalinas. *In: Boletim da Sociedade Brasileira de Geologia – SBG*, São Paulo, SP, V. 19, p. 933 – 935.

DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1988. Applications of ground penetrating radar to mining, groundwater and geotechnical projects: Selected case histories. *In: WORKSHOP ON GROUND PROBING RADAR*, 1988, Ontario: Geological Survey of Canada, paper 90-4, p.49-55.

ELIS, V. R., 1998. *Avaliação da aplicabilidade de métodos elétricos de prospecção geofísica no estudo de áreas utilizadas para disposição de resíduos*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro – SP, 264p.

GOLDEN SOFTWARE, INC., 1995. *Surfer™ for Windows V6*. Reference Manual. Golden, Colorado, USA.

HARARI, Z., 1996. Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes. *Journal of Applied Geophysics*, 36: 43 – 52.

McNEILL, J. D. 1980. *Electrical conductivity of soils and rocks*. Geonics Limited, **Technical Note TN-5**, 22p.

MALAGUTTI FILHO, W., 1991. *Utilização de técnicas geofísicas na caracterização de solos e rochas com aplicações na geologia de planejamento urbano*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 2V.

ORELLANA, E., 1972. *Prospeccion geoelectrica en corriente continua*. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 523p.

PORSANI, J.L., 1999. *Ground Penetrating Radar (GPR): Proposta metodológica de emprego em estudos geológico-geotécnicos nas regiões de Rio Claro e Descalvado – SP*. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP, Campus de Rio Claro - SP, 145p.

QUEIROZ, A. & RIJO, L., 1995, *In: Anais do 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, RJ, p. 999-1002.

ROSS, J. L. S. & SANTOS, L. M. dos, 1982. Geomorfologia. *In: MME, Projeto RADAMBRASIL Folha SD-21 (Cuiabá)*, V. 26, Rio de Janeiro, RJ, p. 193 - 256.

ROY, A. & APPARAO, A., 1971. Depth of investigation in direct current methods. *Geophysics*, vol.36(5), 943-959.

SALOMÃO, F.X.T., 1999. Controle e Prevenção dos Processos Erosivos. *In: GUERRA, A.J.T.; SILVA A.S. & BOTELHO R.G.M., Erosão e Conservação dos Solos – Conceitos Teorias e Aplicações*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, p. 229 – 267.

SIQUEIRA, L. P. de, 1989. Bacia dos Parecis. *In: Boletim de Geociências, Petrobrás*, Rio de Janeiro, 3(1/2), jan./jun., p. (3-16).

SOUZA, L. A. P. de; SILVA, R. F. da; IYOMASA, W. S., 1998. Métodos de Investigação. P. 163 – 196. *In: OLIVEIRA, A. M. dos & BRITO, S. N. A. de, Geologia de Engenharia*, ABGE, São Paulo, SP, 586p.

SOUZA, L. A. P. de & RIJO, L., 1995, *In: Anais do 4º Congresso Internacional da Sociedade Brasileira de Geofísica*, Rio de Janeiro, RJ, p. 1003-1006.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P. & SHERIFF, R. E. 1990 *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 770p.

TOPP, G. C., DAVIS, J. L. & ANNAN, A. P., 1980. Electromagnetic determination of soil water content: measurements in coaxial transmission lines. *Water Resources Research*, v.16, n.3, p.574-582.

WARD, S. H., 1997 *Resistivity and Induced Polarization Methods*. Investigations in Geophysics, n.º 5. Geotechnical and Environmental Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Stanley H. Ward, v.I, p. 147 - 189.