

**Ministério de Minas e Energia**  
**CPRM – Serviço Geológico do Brasil**

**“CARTAS DE SUSCETIBILIDADE A MOVIMENTOS  
GRAVITACIONAIS DE MASSA E INUNDAÇÕES”**

**GEOFÍSICA**

**(Torre de Pedra)**

**Autores: Jairo J. C. Andrade; Sergio R. E. de Carvalho; Luiz G. R. Pinto**



**São Paulo, 29 de abril de 2019**

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	3
MATERIAIS e MÉTODOS .....	4
<b>Métodos Elétricos</b> .....	4
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	5
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	6
<b>Equipamentos Utilizados</b> .....	7
AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	8
PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	11
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	11
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	13
INTERPRETAÇÃO.....	16
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	16
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	17
REFERÊNCIAS.....	20
APÊNDICE .....	21

## INTRODUÇÃO

O município de Torre de Pedra (SP) localiza-se no contexto geológico da Bacia do Paraná, onde arenitos das formações Botucatu (origem eólica) e Pirambóia (origem fluvial) encontram-se sob os derrames magmáticos da Formação Serra Geral. Desta forma, temos preponderantemente, na área do município, solos provenientes destes arenitos e daí bastantes suscetíveis a processos erosivos, dentre outros processos geotécnicos que fazem frente à ambição deste trabalho.

Neste contexto, a geofísica (caminhamento elétrico e sondagem elétrica vertical) tornou possível, de forma rápida e eficiente, mensurar em profundidade e lateralmente perfis de alteração de solos, bem como a saturação destes, trazendo à luz respostas geotécnicas do terreno antes desconhecidas. Estas investigações corroboram em várias frentes para a conclusão das áreas mais indicadas à ocupação urbana, determinando a profundidade do topo rochoso, diferença de materiais e permeabilidade dos mesmos. Assim, estes estudos vão além do proposto, atingindo propostas de trabalhos de escalas maiores, com resultados pontuais, mas bastante esclarecedores do contexto geológico-geotécnico e que podem, muitas vezes, ser inferidos para o restante município.

O caminhamento elétrico permite, também, estabelecer contatos laterais entre os materiais, que ajudam na determinação e delimitação de depósitos alúvio/coluvionares. Estes depósitos por sua vez são fundamentais para o planejamento urbano. Tais terrenos (denominados “solos moles”) são geotecnicamente problemáticos ao passo que sua ocupação necessita, além de todo o cuidado ambiental, medidas de engenharia custosas e tecnicamente mais complexas, como troca de solos, fundações mais profundas e métodos construtivos mais aprimorados, soluções estas que nem sempre estão a disposição dos munícipes.

Desta forma, conhecer estes locais e compreender o contexto geológico-geotécnico faz-se importantíssimo para a produção das cartas de suscetibilidade e os estudos geofísicos compreenderam uma ferramenta de apoio para este entendimento, com informações pontuais que ajudaram a contextualizar o município.

No projeto “Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações” foi realizada uma campanha de geofísica terrestre, com levantamento elétrico, objetivando estimar a espessura do solo, extensão dos depósitos sedimentares e profundidade do topo rochoso nas regiões de interesse.

O levantamento se deu na região que abrange o Município de Torre de Pedra, nos dias 9 e 10 de abril de 2019, com equipe composta por um geofísico e um técnico em geociências.

## **MATERIAIS e MÉTODOS**

### **Métodos Elétricos**

Os métodos elétricos utilizam correntes contínuas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Nesse trabalho foi utilizado método de eletrorresistividade a fim de estudar discontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos do projeto. No método de eletrorresistividade, correntes elétricas geradas artificialmente são introduzidas no solo e as diferenças de potencial resultantes são medidas na superfície.

A resistividade elétrica é uma das propriedades físicas mais variáveis. A maior parte dos minerais formadores das rochas é isolante e a corrente elétrica é conduzida através de uma rocha principalmente pela presença de íons nas águas dos poros. Assim, o aumento da porosidade e do conteúdo de sais são os principais fatores que diminuem resistividade de rochas. Secundariamente, a presença de argilo-minerais, minerais sulfetados e granulação grosseira.

A resistividade elétrica é calculada pela seguinte equação:

$$\rho = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (1)$$

Onde (I) é a corrente elétrica introduzida no solo, ( $\Delta V$ ) é a diferença de potencial medida e (K) é um fator geométrico que depende das técnicas e arranjos utilizados nos levantamentos. As técnicas de campo utilizadas foram a Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e o Caminhamento Elétrico (CE).

## Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da SEV consiste numa sucessão de medidas de um parâmetro geológico efetuadas a partir da superfície do terreno (investigação 1D com observação da variação vertical da resistividade elétrica). São injetadas correntes (I) no solo através de dois eletrodos nos pontos A e B, e é medida a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre os outros dois eletrodos nos pontos M e N (Figura 1).

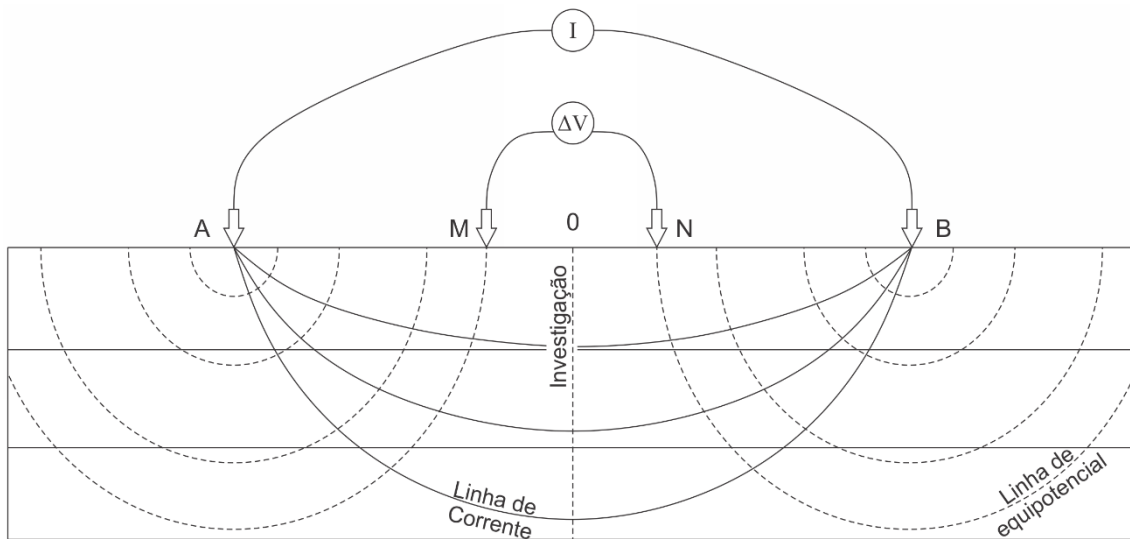


Figura 1 - Técnica da sondagem elétrica vertical (SEV).

Uma vez que se conhece as distâncias  $\overline{AM}$  e  $\overline{AN}$ , pode-se medir a corrente (I) injetada e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), e calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) com a seguinte equação:

$$\rho_a = \pi \cdot \frac{\overline{AM} \cdot \overline{AN}}{\overline{MN}} \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad (2)$$

O arranjo utilizado foi o Schlumberger em que os eletrodos (AB) são afastados do centro do arranjo a cada leitura, investigando cada vez mais profundo, e os eletrodos (MN) se mantêm fixos. As leituras deste arranjo estão menos sujeitas as variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades na superfície topográfica e ruídos produzidos por fontes artificiais (Braga, 2016).

## Caminhamento Elétrico

A técnica do CE se baseia na análise e interpretação de um parâmetro geoeétrico, obtido com base em medidas efetuadas na superfície do terreno, com espaçamento constante entre os eletrodos AMNB. Por meio desta técnica, investigam-se, ao longo de linhas, as variações laterais do parâmetro físico a uma ou mais profundidades determinadas; com isso, a direção da linha de investigação permanece fixa e o centro do arranjo AMNB varia com o seu desenvolvimento. Para o desenvolvimento desta técnica, podem ser usados vários tipos de arranjos de desenvolvimento, como Schlumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.

O Arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo, com espaçamento entre os eletrodos de 5 m, em que os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (Figura 2). Este arranjo apresenta vantagem em relação aos outros arranjos, porque é um arranjo simétrico e, como resultado desta simetria, facilita o melhor posicionamento de uma anomalia. Neste levantamento foram utilizados simultaneamente 10 dipolos de recepção (MN) disposto ao longo do sentido de aquisição de dados (cada dipolo corresponde a um nível de investigação).

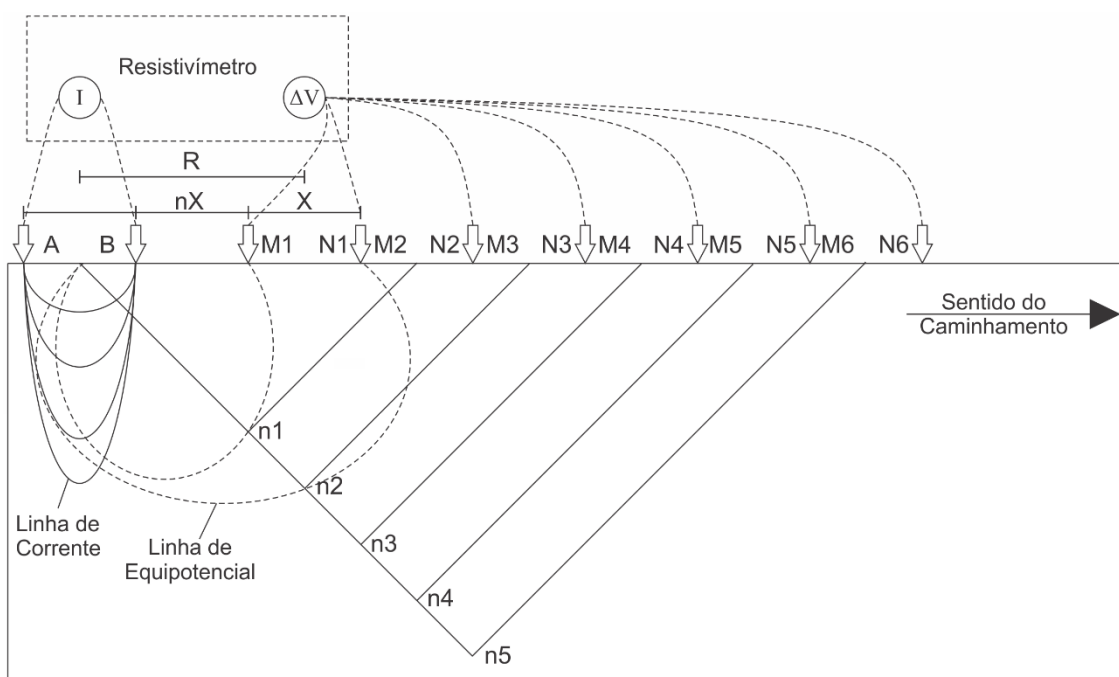


Figura 2 - Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo.

Estes parâmetros foram escolhidos visando obter maior profundidade de investigação e melhor resolução possível.

Deste modo é possível calcular a resistividade aparente ( $\rho_a$ ) com a seguinte equação:

$$\rho_a = 2\pi GX \cdot \frac{\Delta V}{I}$$

Com

$$G = \frac{1}{\frac{1}{n} - \frac{2}{n+1} + \frac{1}{n+2}} \quad (3)$$

Em que: ( $X$ ) é o espaçamento dos dipolos (AB) e (MN) adotado; ( $n$ ) é o nível de investigação correspondente (Braga, 2016).

### Equipamentos Utilizados

No levantamento foi utilizado o resistímetro Syscal Pro (Figura 3), que possui 10 canais de leitura integrados. Para a SEV estavam disponíveis quatro rolos de cabos sendo dois de 100 m e dois de 350 m. Para o CE estava disponível um cabo com abertura máxima, entre cada canal, de 5 m e com 10 canais de medidas cada, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos. Os equipamentos auxiliares foram: duas baterias de 12 V; eletrodos metálicos para injeção de corrente elétrica e medição do potencial elétrico; cabos para conexões entre equipamento e eletrodos; marretas para fixação dos eletrodos e trenas para marcar as posições dos eletrodos.



Figura 3 - Syscal Pro.

As coordenadas foram registradas com o GPS portátil Garmin 62sc, admitindo-se uma precisão máxima horizontal de 5 m e vertical de 10 m. Essas são também as precisões dos produtos geofísicos gerados.

## AQUISIÇÃO DOS DADOS

Foram realizados estudos nas imediações dos 4 pontos planejados, conforme possibilidade do local (Figura 4). Foram realizados 2 CEs e 2 SEVs.

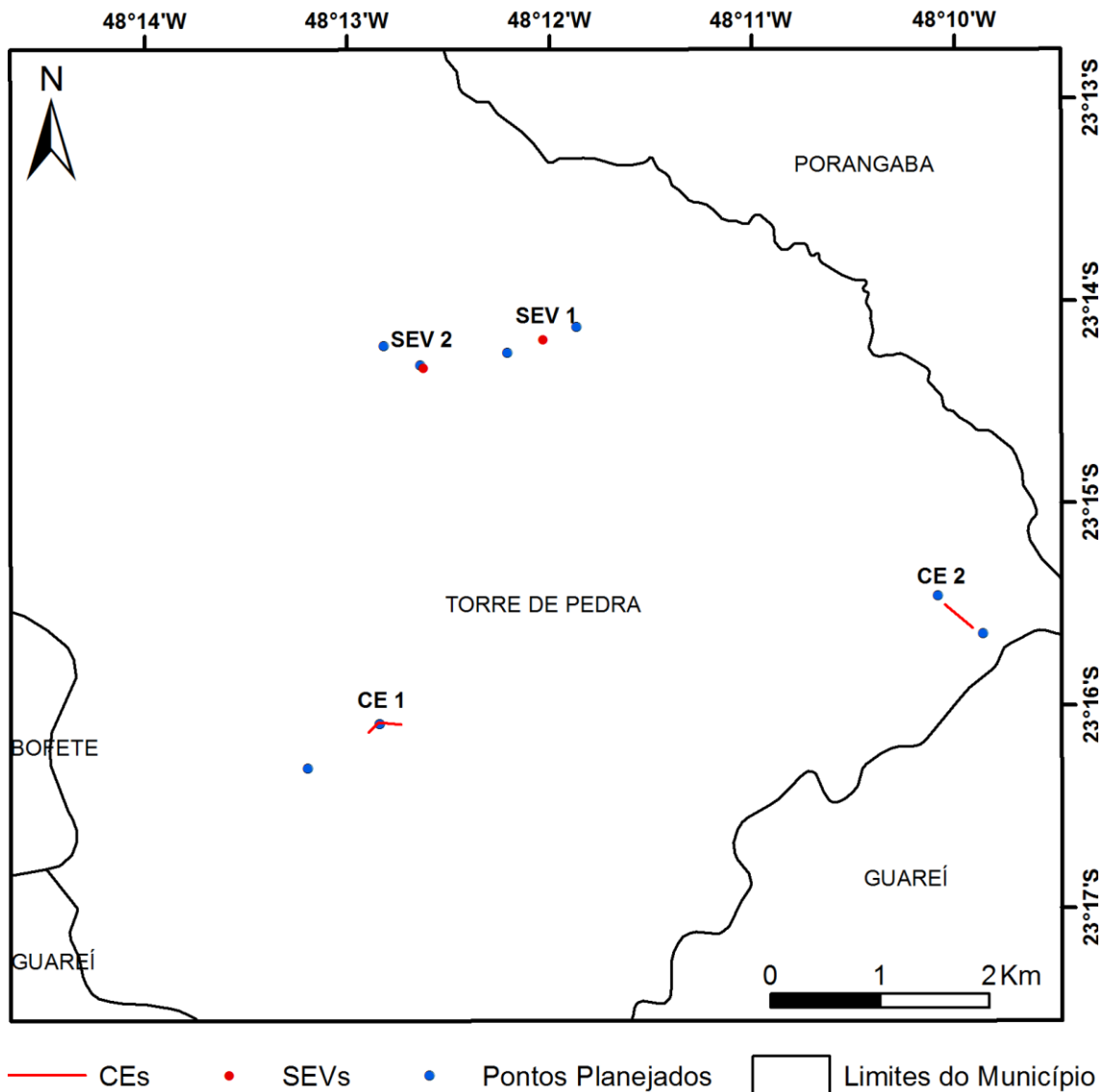


Figura 4 – Localização dos levantamentos geofísicos.



O primeiro CE, Linha 1, foi realizado visando mapear a extensão do aluvião e variação lateral do solo. (Figura 5).



Figura 5 – Área de execução da Linha 1.

O segundo CE, Linha 2, foi realizado visando mapear as interfaces verticais e variação lateral do solo. (Figura 6).



Figura 6 – Área de execução da Linha 2.

As SEVs 1 e 2 (Figura 7 e Figura 8) foram realizadas a fim estabelecer a média da resistividade elétrica do solo e espessura das interfaces verticais

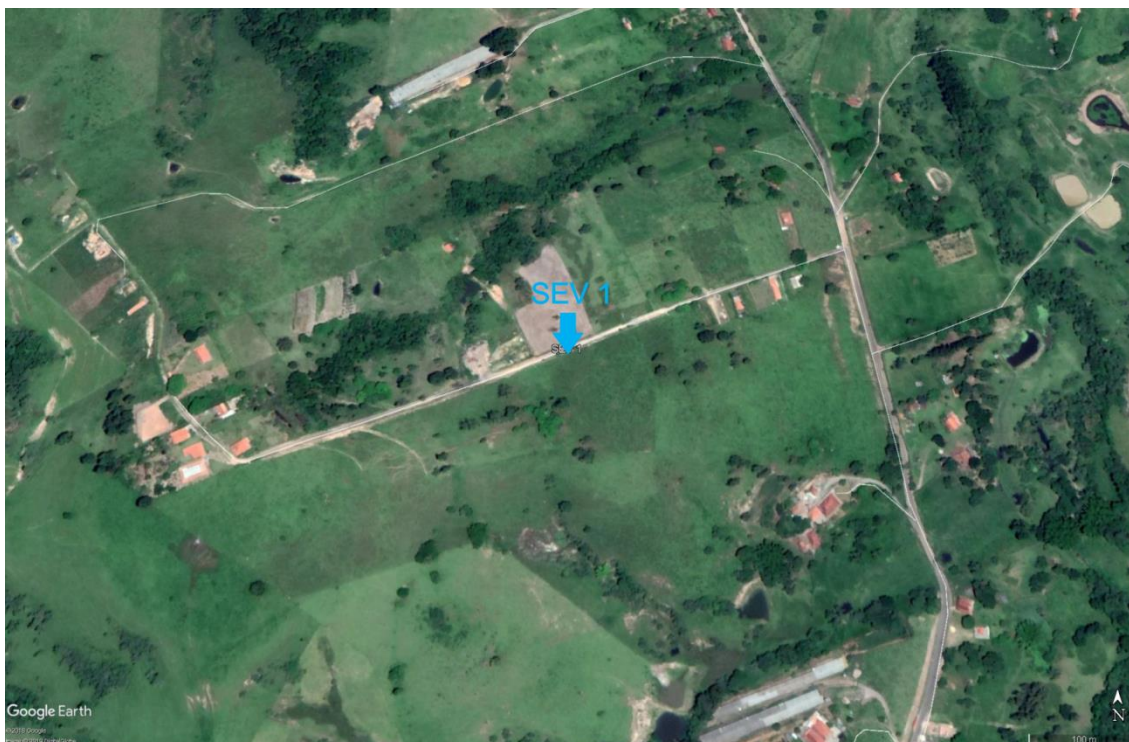


Figura 7 – Área de execução da SEV 1.

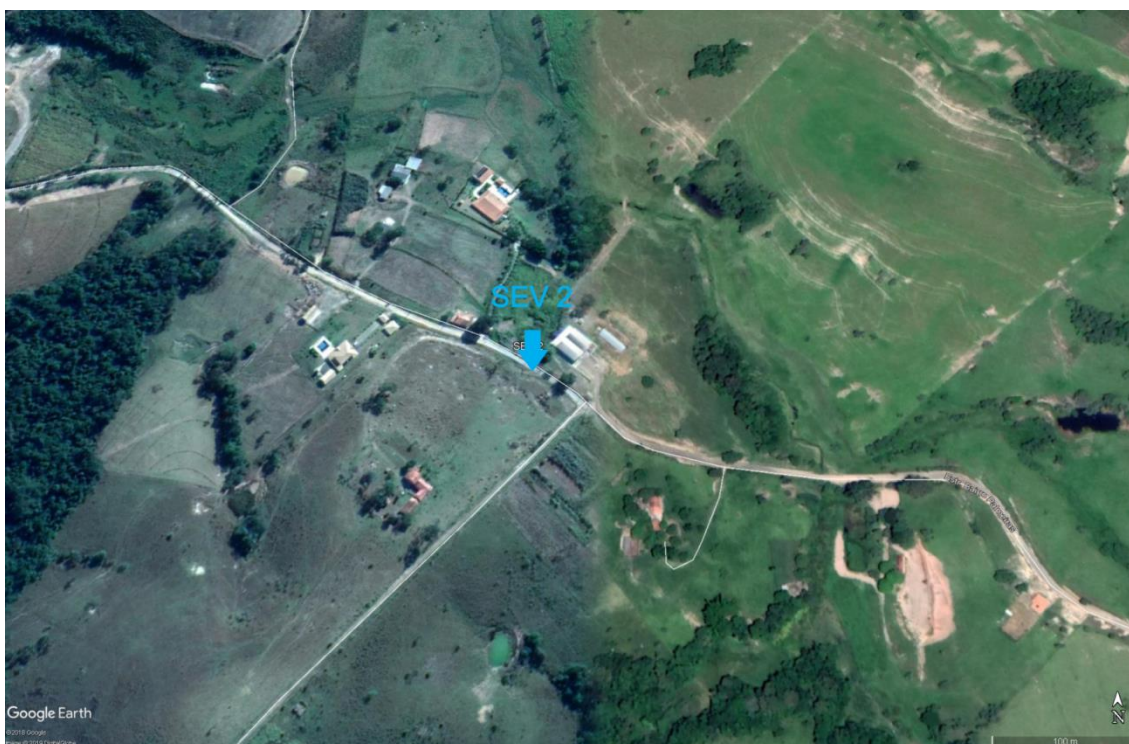


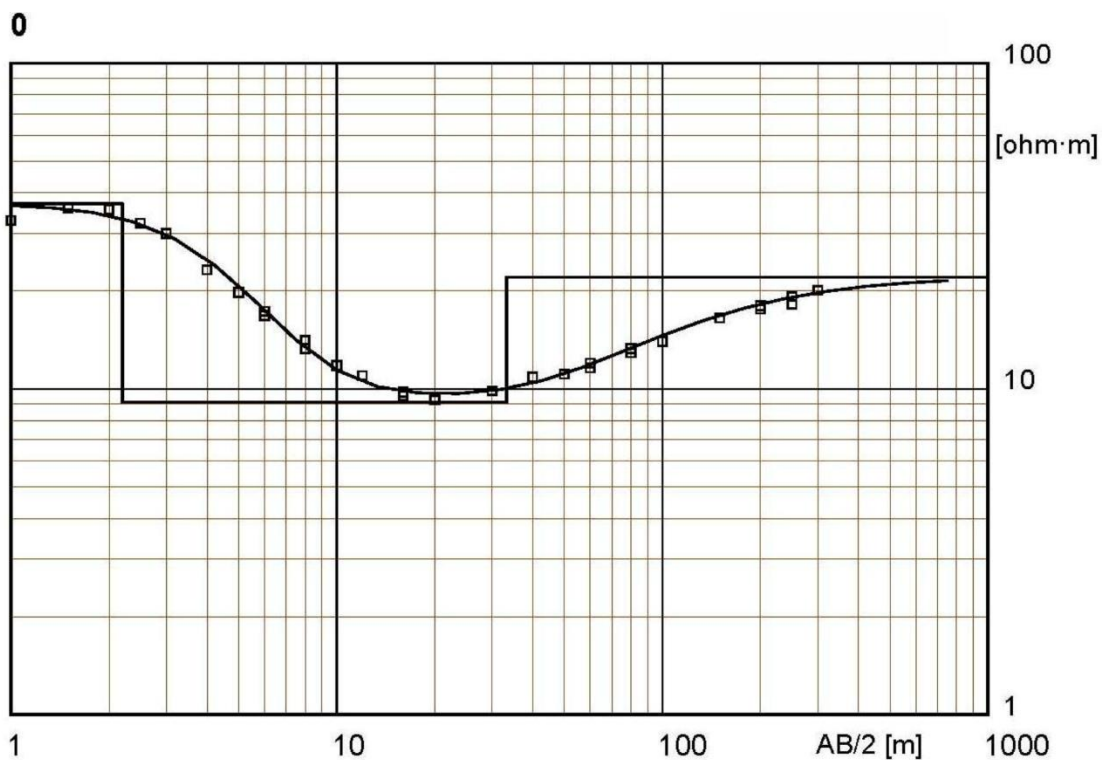
Figura 8 – Área de execução da SEV 2.

# PROCESSAMENTO DOS DADOS

## Sondagem Elétrica Vertical

Para o processamento dos dados da SEV foram utilizados os Softwares Prosys II; versão 03.11.02. desenvolvido por IRIS Instruments e o WinSev; versão 6.3 desenvolvido por W-GeoSoft. O método de inversão utilizado foi automático, realizando mínimas intervenções manuais, apenas quando o ajuste cria modelos muito complexos com várias camadas.

A inversão da SEV 1 (Figura 9) resultou num modelo de 3 camadas geoeletricas.



Localização **X = 48°12'1.85"O** **Y = 23°14'11.66"S** **Z = 586** **Azim = 0**

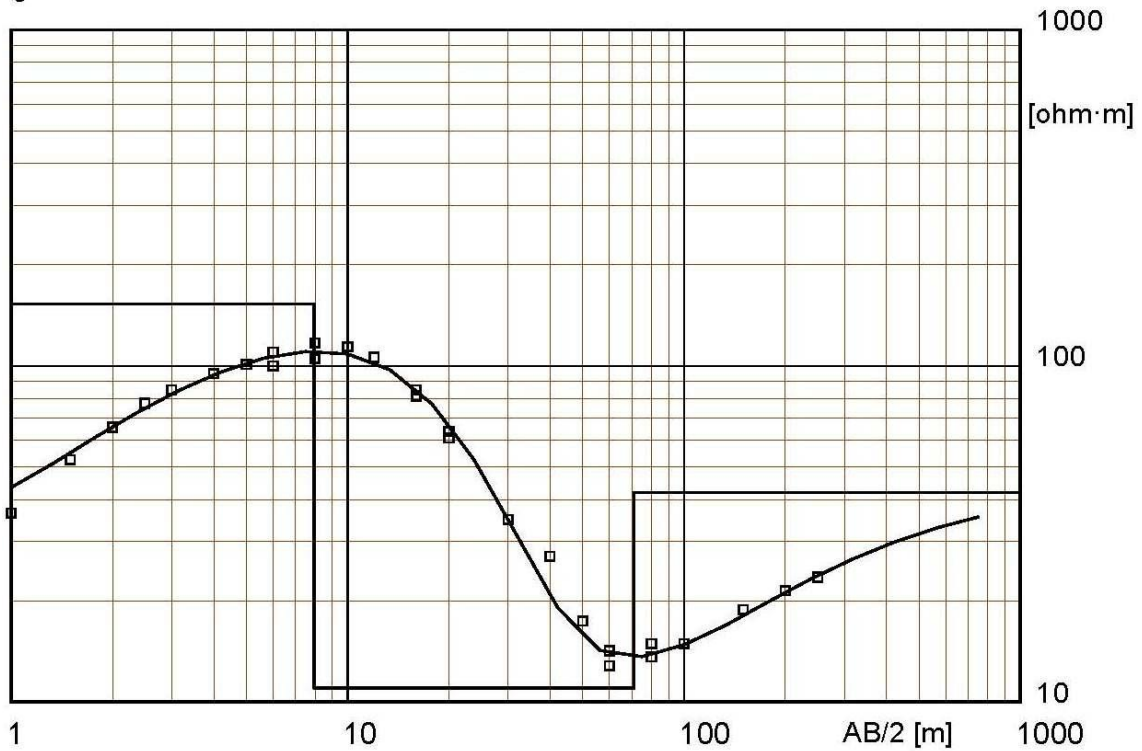
Modelo

Resistividade	Espessura	Profundidade	Cota
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
<b>37</b>	<b>2.2</b>		<b>586</b>
<b>9.1</b>	<b>31</b>	<b>2.2</b>	<b>583.8</b>
<b>22</b>		<b>33</b>	<b>553</b>

Figura 9 – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV 1.

A inversão da SEV 2 (Figura 10) resultou num modelo de 4 camadas geolétricas.

**0**



**Location X = 48°12'37.25"O Y = 23°14'20.03"S Z = 564 Azim = 0**

**Model**

<b>Resistivity</b>	<b>Thickness</b>	<b>Depth</b>	<b>Altitude</b>
<b>[ohm·m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>	<b>[m]</b>
<b>32</b>	<b>.64</b>	<b>.64</b>	<b>564</b>
<b>153</b>	<b>7.3</b>	<b>.64</b>	<b>563.4</b>
<b>11</b>	<b>63</b>	<b>7.9</b>	<b>556.1</b>
<b>42</b>		<b>71</b>	<b>493</b>

*Figura 10 – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV 2.*

As tabelas de dados encontram-se no apêndice.

## **Caminhamento Elétrico**

Para o processamento dos dados do CE foram utilizados os Softwares Prosys II; versão 03.11.02. desenvolvido por IRIS Instruments e o Res2dinv; ver. 3.4; 2D Resistivity and IP Inversion. (desenvolvido por Geotomo Software Malaysia). O método de inversão utilizado foi o robusto e foi utilizado o modelo de discretização com refinamento (Modelo com células com metade do espaçamento).

Estudos preliminares foram realizados para verificar qual espaçamento entre os eletrodos se adequaria melhor ao objetivo do levantamento e verificou-se que o espaçamento de 5 m obteve os melhores resultados.

# LINHA 1

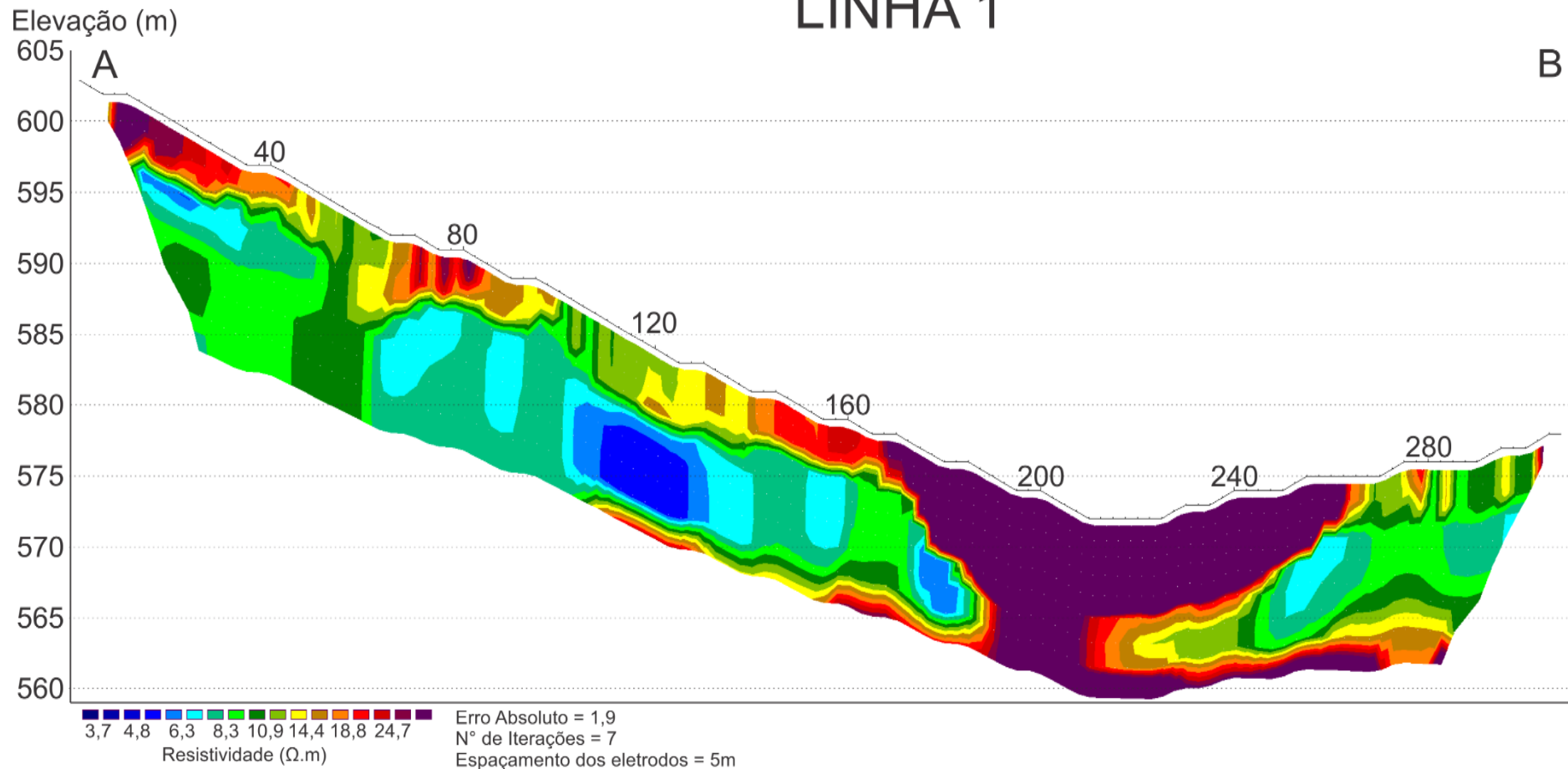


Figura 11 - Seção inversa da Linha 1.

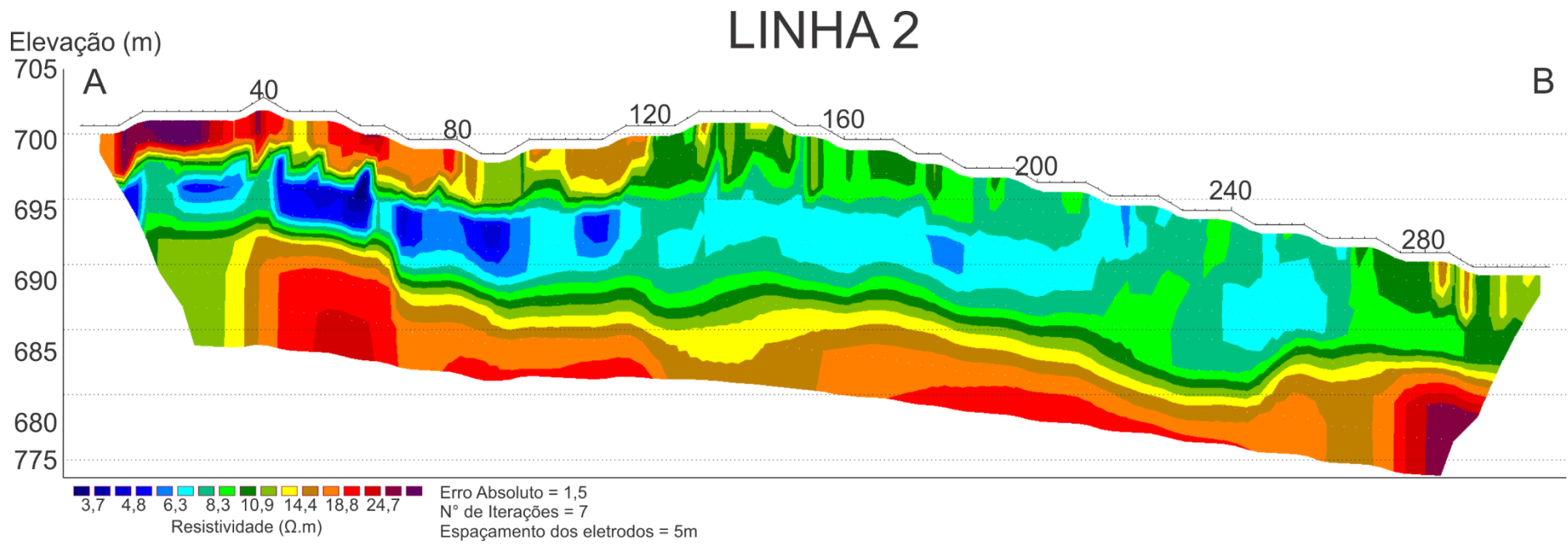


Figura 12 - Seção inversa da Linha 2.

As Pseudo-Seções medidas, calculadas e Seções Invertidas dos CEs encontram-se no apêndice.

# INTERPRETAÇÃO

## Sondagem Elétrica Vertical

As SEVs (Figura 13) foram realizadas a uma distância de aproximadamente 1 km e apresentam pequena variação nos valores de resistividade em ambos os pontos, indicando que esta pequena variação de resistividade pode estar associada a processos erosivo e condições de saturação de uma mesma litologia. O contexto geológico verificado nos afloramentos, nas coberturas e valor da resistividade indicam que a litologia é constituída basicamente por areias e arenito (Telford et al., 1990).

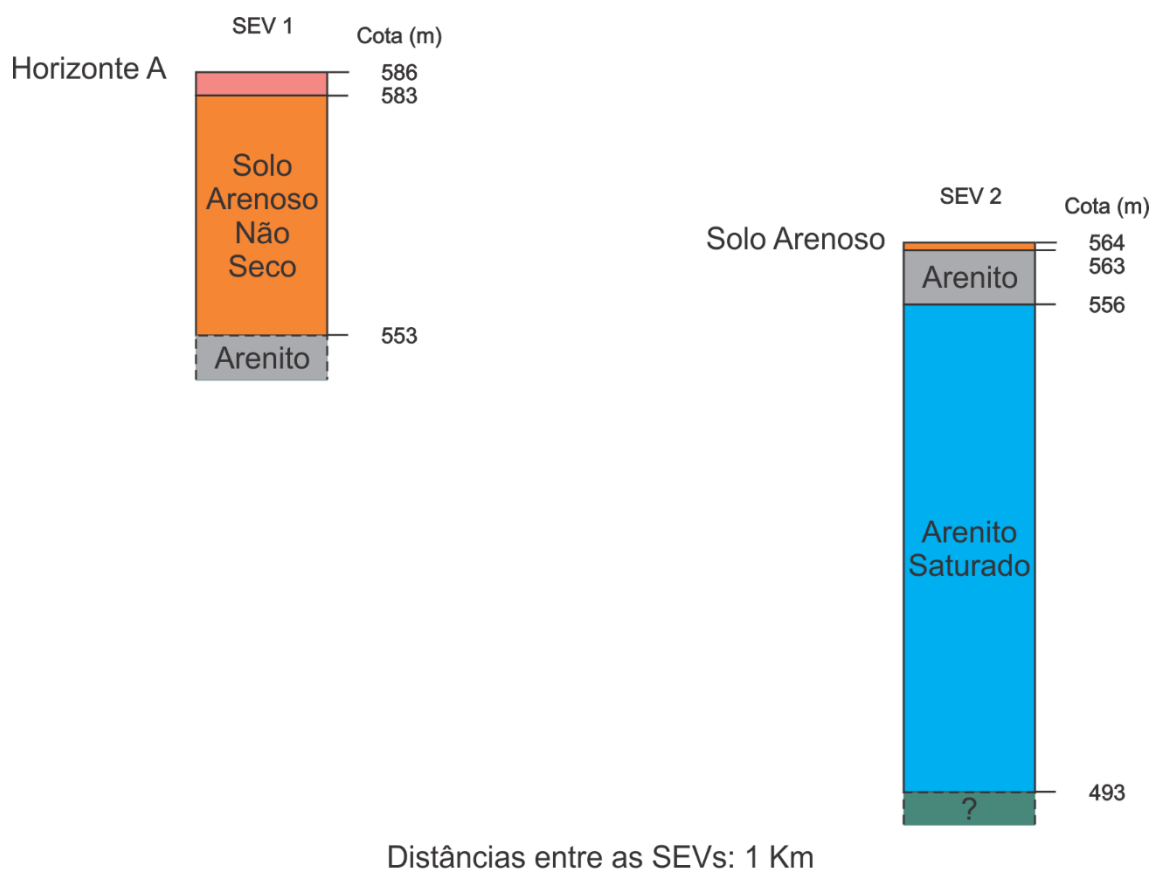


Figura 13 - Interpretação do modelo de camadas das SEVs 1 e 2.

A SEV 2 investigou 71 m e alcançou camada geológica que não pode ser inferida, necessitando de informação direta para correlação com a litologia.



## **Caminhamento Elétrico**

As pequenas variações nos valores das resistividades elétricas vistos nas SEVs, são verificadas também nos CEs. Isto sugere que investigamos basicamente o mesmo material que estaria condicionado a diferentes processos, como grau de alteração.

A Linha 1 (Figura 14) foi interpretada com três principais horizontes: solo arenoso seco, arenito alterado saturado e arenito saturado. O perfil apresenta uma faixa, dentro do vale, que evidencia acúmulo de material com resposta geoeétrica muito diferente da resposta geoeétrica da litologia local, esta faixa foi interpretada como depósitos de alúvio-colúvio. Os aluviões são constituídos por materiais erodidos, retrabalhados, transportados pelo curso d'água e depositados em seus leitos e margens, entremeados a materiais coluvionares, depositados pela ação da gravidade. Os aluviões são também depositados nos fundos e nas margens de lagoas e lagos, sempre associados a ambientes fluviais (Vaz, 1996). A extensão do depósito de alúvio-colúvio é de aproximadamente 90 m, verificado entre as posições 170 e 260 m no perfil. O depósito apresenta aproximadamente 6 m de espessura.

A Linha 2 (Figura 15) apresenta duas interfaces separando três camadas geoeétricas que foram interpretadas de maneira análoga a Linha 1, solo arenoso seco, arenito alterado saturado e arenito saturado. A primeira camada tem espessura média de 3 m e a segunda varia de 3 a 8 m.

# LINHA 1

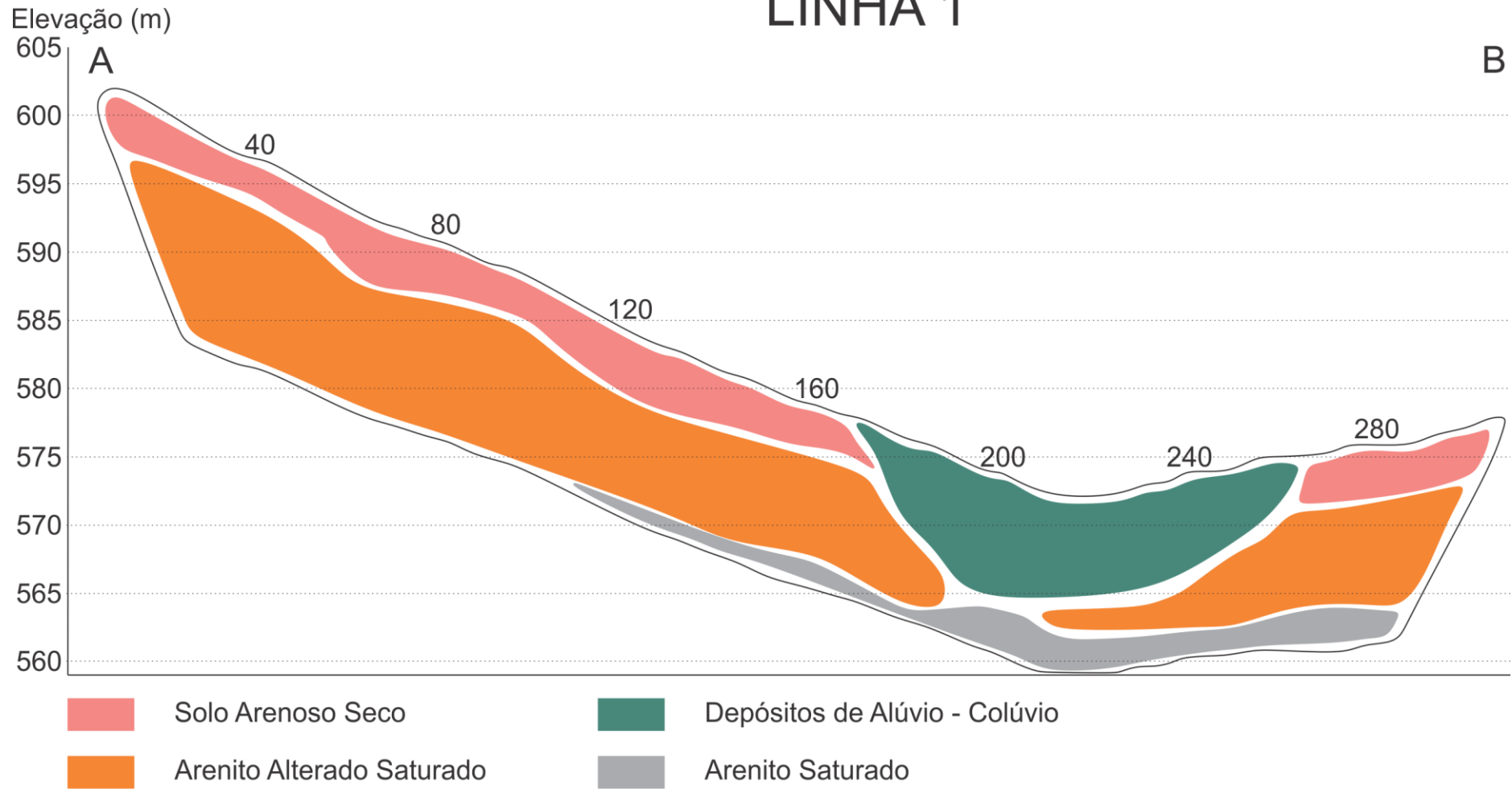


Figura 14 - Linha 1 interpretada.

# LINHA 2

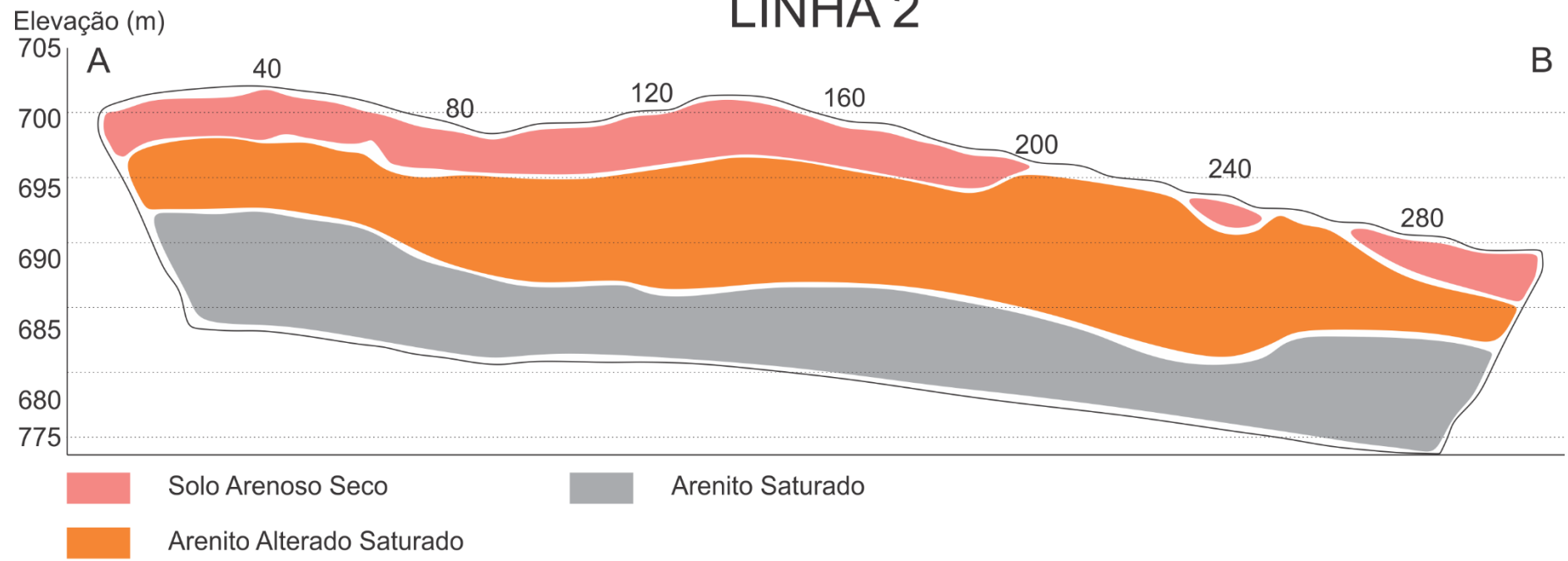


Figura 15 - Linha 2 interpretada.

## REFERÊNCIAS

BRAGA, A.C.O., **Geofísica Aplicada: Métodos Geométricos em Hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de Textos, 2016, 159p.

TELFORD, W.M., GELDART, L.P. & SHERIFF, R.A., **Applied geophysics** 2nd ed. New York: Cambridge University Press, 1990.

VAZ, L. F. **Classificação genética dos solos e dos horizontes de alteração de rochas em regiões tropicais**. In: Rev. Solos e Rochas, v. 19, n. 2, ABMS/ABGE, São Paulo, SP, 1996. p. 117 - 136.

## APÊNDICE

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm·m]
.2	1	49607.7	11375	7.54	32.9
.2	1.5	25453.6	12303	17.36	35.9
.2	2	13046.5	11419	31.1	35.5
.2	2.5	8125.7	12254	48.77	32.3
.2	3	4734.4	11091	70.37	30
.2	4	2193.6	11816	125	23.2
.2	5	1210.3	11985	196	19.8
.2	6	746.9	12209	282	17.3
1	6	3768.1	12326	54.98	16.8
.2	8	311.9	11116	502	14.1
1	8	1504.4	11197	98.96	13.3
1	10	794.9	10549	156	11.8
1	10	799.5	10614	156	11.8
1	12	564.1	11560	225	11
1	16	251.1	10569	401	9.53
4	16	1097.9	10593	94.25	9.77
1	20	168.2	11413	627	9.24
4	20	707.1	11416	151	9.35
4	30	308.7	10859	347	9.86
4	40	195.6	11186	622	10.9
4	50	104	9139	975	11.1
4	60	75.8	8875	1407	12
10	60	188.2	8885	550	11.6
4	80	51.1	9622	2507	13.3
10	80	125.4	9627	990	12.9
10	100	77.9	8637	1555	14
10	150	46.7	9935	3519	16.5
10	200	26.6	9494	6267	17.6
40	200	114.1	9560	1508	18
10	250	12.3	6614	9802	18.2
40	250	53.2	6612	2392	19.2
40	300	35.5	6128	3471	20.1
40	300	35.8	6168	3471	20.1

Figura 16 - Dados da SEV 1.

<b>MN/2</b>	<b>AB/2</b>	<b>DeltaV</b>	<b>I</b>	<b>K</b>	<b>Resistivity</b>
[m]	[m]	[mV]	[mA]	[-]	[ohm·m]
.2	1	53763.5	11108	7.54	36.5
.2	1.5	32397.2	10685	17.36	52.6
.2	2	20064.7	9497	31.1	65.7
.2	2.5	11680	7364	48.77	77.4
.2	3	10957.4	9089	70.37	84.8
.2	4	8382.6	11043	125	94.9
.2	5	5605.3	10929	196	101
.2	6	3440.9	9672	282	100
1	6	19512.2	9720	54.98	110
.2	8	1949.3	9276	502	105
1	8	10941.8	9293	98.96	117
1	10	5764.8	7911	156	114
1	12	4537.2	9633	225	106
1	16	1972.4	9722	401	81.4
4	16	8787.9	9760	94.25	84.9
1	20	1044.4	10731	627	61
4	20	4532.5	10728	151	63.8
4	30	1051.4	10445	347	34.9
4	40	417.9	9603	622	27.1
4	50	197.8	11093	975	17.4
4	60	122.1	12114	1407	14.2
10	60	282.3	12150	550	12.8
4	80	61.6	10337	2507	14.9
10	80	142.3	10369	990	13.6
10	100	115.1	11976	1555	14.9
10	150	46.8	8742	3519	18.8
40	200	120	8475	1508	21.4
10	250	32.2	13410	9802	23.5

Figura 17 - Dados da SEV 2.

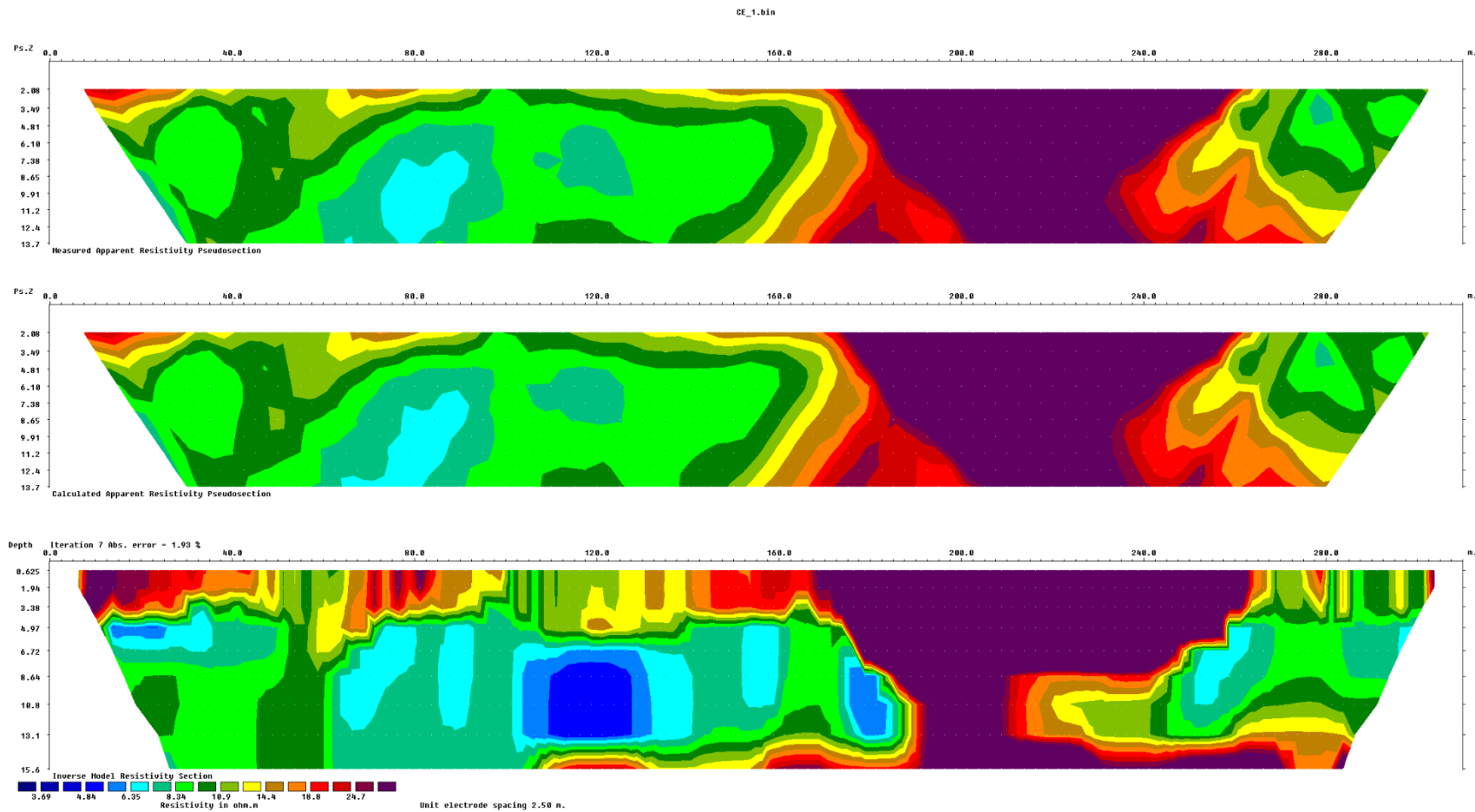


Figura 18 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1.

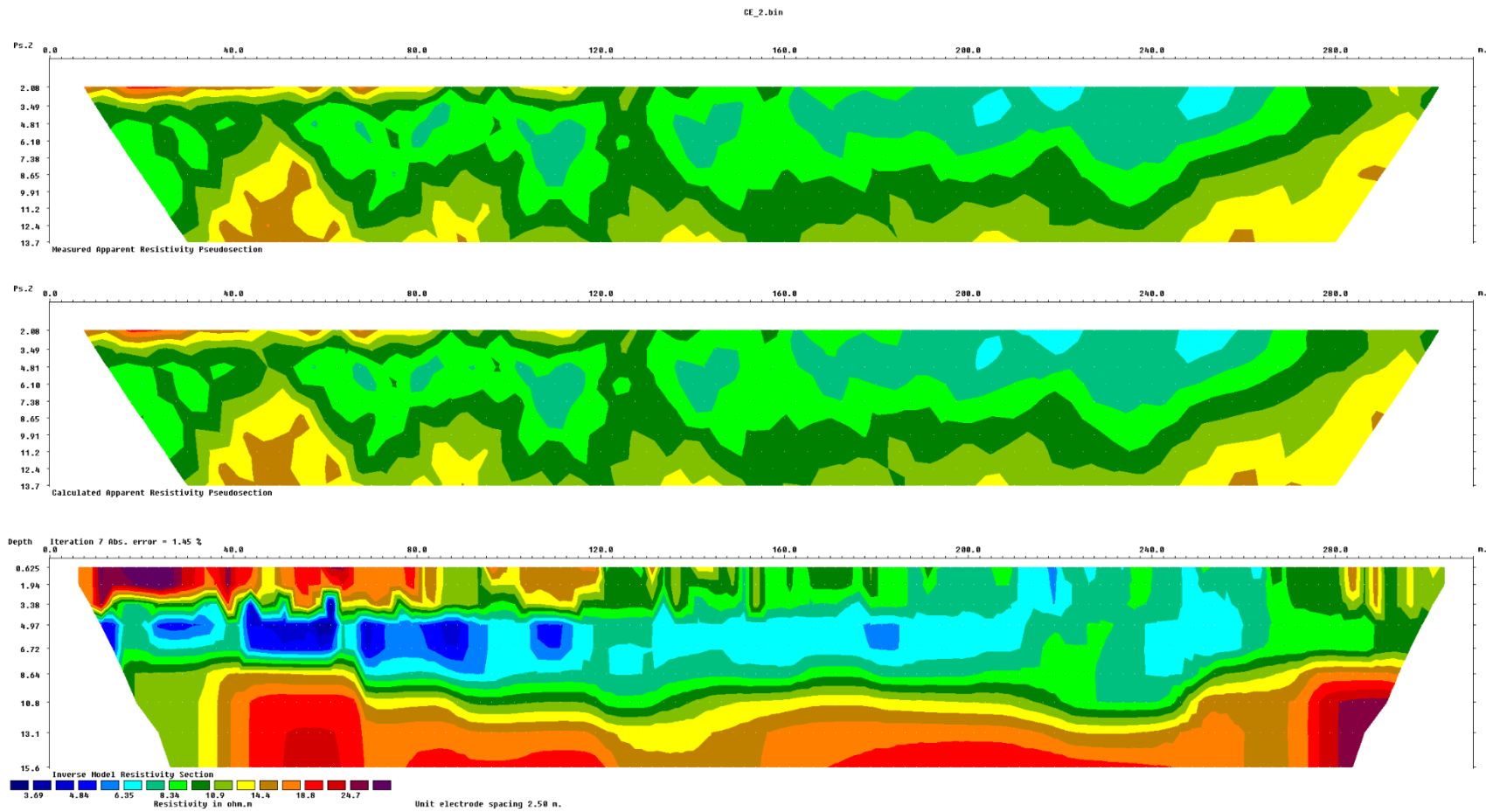


Figura 19 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2.