

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

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

**GEOFÍSICA**

**(São José do Rio Pardo)**

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



**São Paulo, 31 de Agosto de 2018**

## Sumário

INTRODUÇÃO .....	3
MÉDOTOS E MATERIAIS .....	3
<b>Métodos Elétricos</b> .....	3
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	4
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	5
<b>Equipamentos Utilizados</b> .....	6
AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	7
PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	9
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	9
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	11
INTERPRETAÇÃO.....	16
<b>Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	16
<b>Caminhamento Elétrico</b> .....	17
AGRADECIMENTOS.....	19
REFERÊNCIAS.....	19
APÊNDICE .....	20

## INTRODUÇÃO

No projeto “Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações” foi realizada campanha de geofísica terrestre, levantamento elétrico, objetivando estimar a espessura do solo, profundidade do topo do cristalino rochoso e mapear feições e estruturas geológicas de interesse.

O levantamento se deu na região que abrange a cidade de Espírito Santo do Pinhal entre os dias 20 e 22 de Agosto de 2018, com equipe composta por um geofísico e um técnico de geociências.

## MÉTODOS E MATERIAIS

### Métodos Elétricos

Os métodos elétricos utilizam correntes contínuas ou alternadas de baixa frequência para investigar as propriedades elétricas da subsuperfície. Nesse trabalho foram usados os métodos de resistividade a fim de estudar descontinuidades horizontais e verticais nas propriedades elétricas do solo e associá-las aos objetivos do projeto. Nos métodos de resistividade, 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 determinada 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. Dois eletrodos “injetam”, nos pontos A e B, uma corrente (I) no solo e outros dois eletrodos medem a diferença de potencial ( $\Delta V$ ) entre estes pontos M e N (Figura 1).

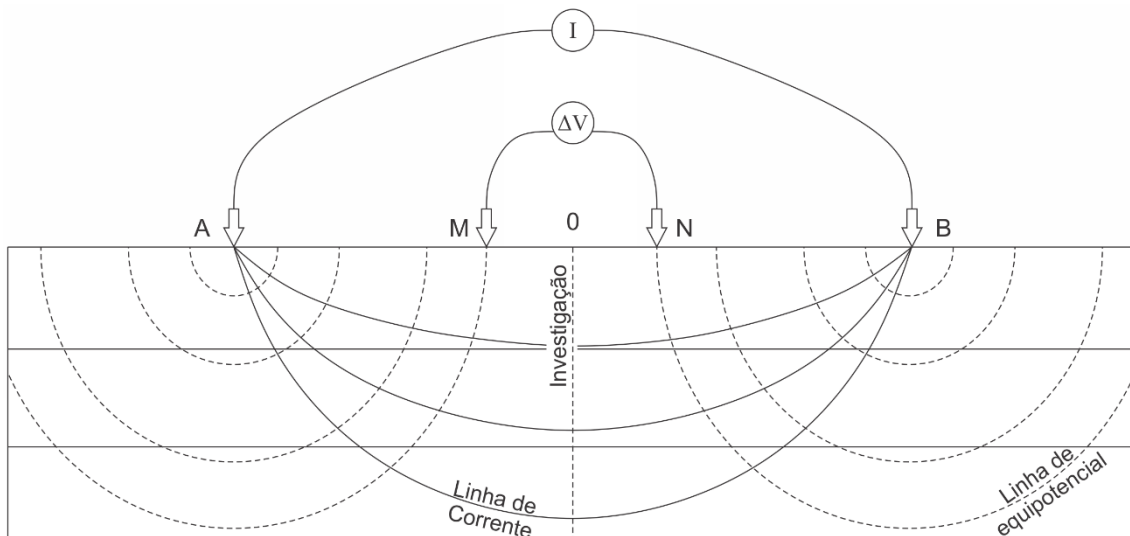


Figura 1 - Técnica da sondagem elétrica vertical (SEV).

Uma vez que se conhece a distância entre os pontos  $\overline{AM}$  e  $\overline{AN}$ , pode-se medir a corrente (I) injetada e a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), é possível 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 geoeletrico, 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 arranjo de desenvolvimento, como Schulumberger, Wenner, gradiente, dipolo-dipolo, polo-dipolo etc.

O Arranjo utilizado foi o dipolo-dipolo em que os eletrodos de corrente (AB) e de potencial (MN) são alinhados em uma mesma direção com espaçamento constante (Figura 2). 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).

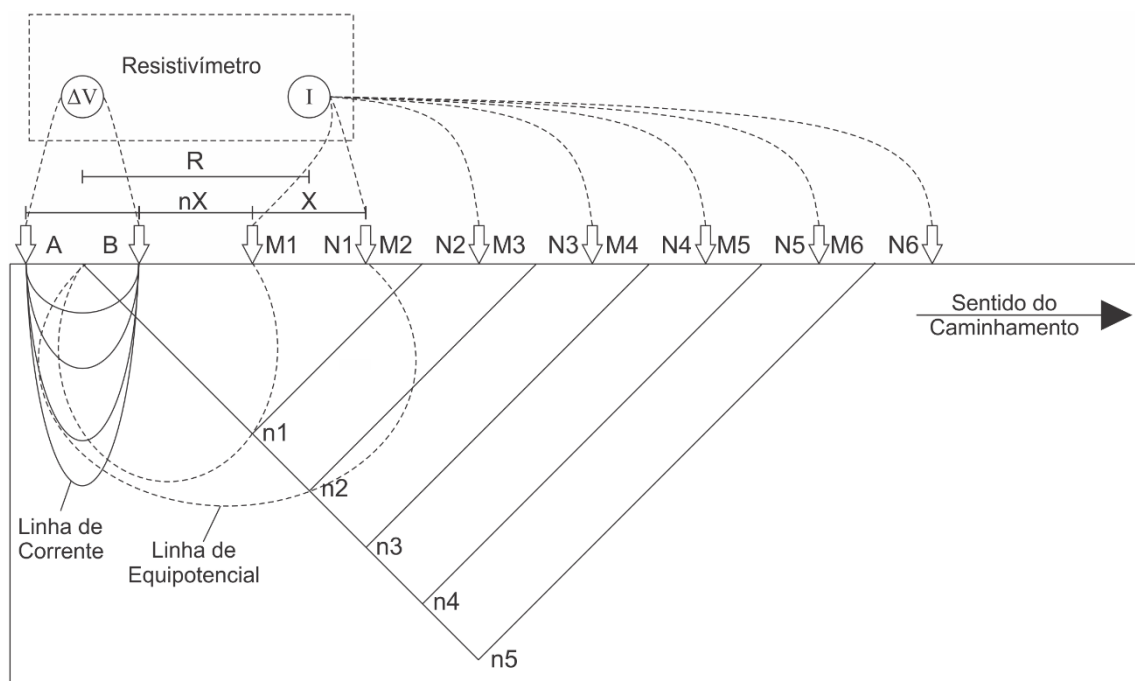


Figura 2 - Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo

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

Nos levantamentos elétricos SEV e CE, utilizou-se o resistivímetro Syscal Pro (Figura 3), que possui 10 canais de leitura integrados. Para a SEV estavam disponíveis 4 rolos de cabos, dois de 100m e 2 de 350m, para o CE estavam disponíveis dois conjuntos de cabos com abertura máxima, entre cada canal, de 5 e 20m com 10 canais de medidas cada, permitindo leituras automáticas em todos os eletrodos. Os equipamentos auxiliares foram: uma bateria 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 um precisão máxima horizontal de 5 m e vertical de 10 m. Essas são também as precisões dos produtos geofísicos gerados.

## AQUISIÇÃO DOS DADOS

Foram realizadas 2 SEVs e 4 CEs. A SEV 1 e os três primeiros CEs, (nomeados de Linha 1) com espaçamento entre os dipolos de 1, 3 e 5 m (Figura 4), foram realizados parcialmente sobrepostos com objetivo de verificar qual abertura atenderia melhor a necessidade do estudo, além de identificar espessura do solo e a profundidade do topo do cristalino rochoso.



Figura 4 - SEV 1 e CE 1 (espaçamento= 1; 3 e 5m), A e B identificam, respectivamente, início e fim do CE.  
Ponto A: (X=46°40'54,07"; Y=22°11'28,07"), Ponto B: (X=46°41'03,06"; Y=22°11'29,11")

Verificou-se que o conjunto de rolos de cabos de até 350m atendiam perfeitamente as necessidades das SEVs e que o melhor espaçamento entre os dipolos para os CEs era o de 5m.

A SEV 2 (Figura 5) foi realizada numa região mais elevada e visava verificar a espessura do solo e profundidade do topo do embasamento. O segundo CE, Linha 2, foi realizada de modo a seccionar estrutura geológica inferida em imagens de satélite. Essa estrutura separa duas áreas com características litológicas distintas. (Figura 6).

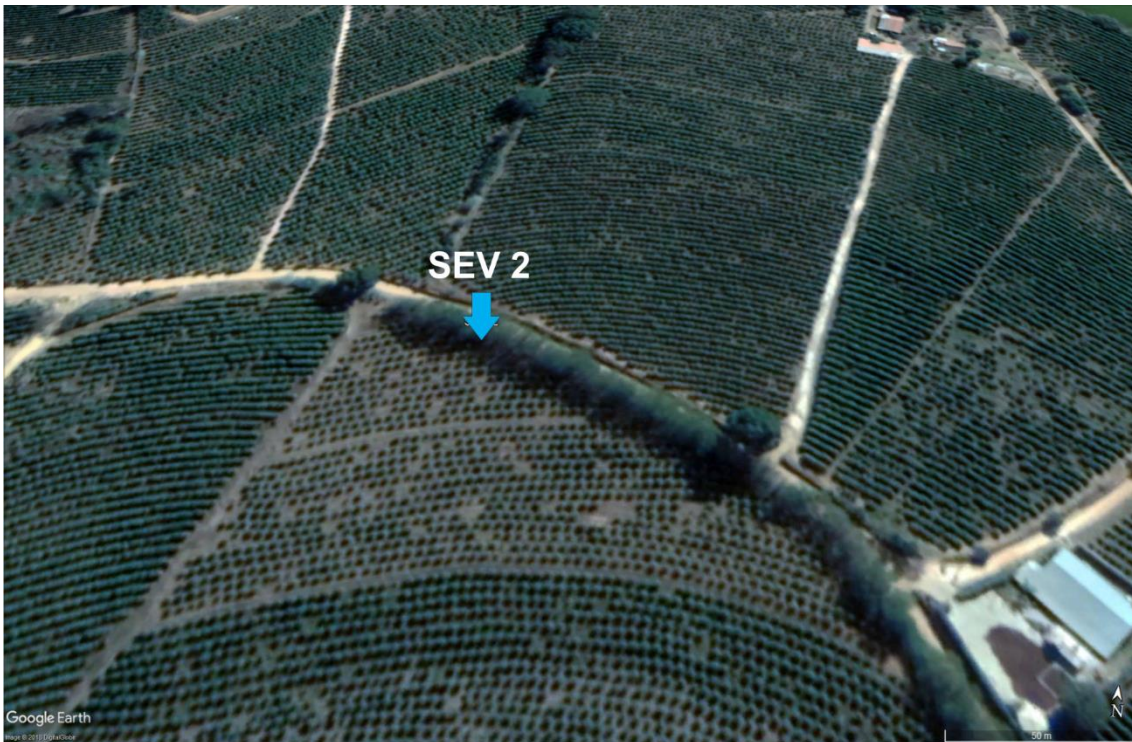


Figura 5 - Localização da SEV 2



Figura 6 - Linha 2 realizada perpendicular a estrutura, A e B identificam, respectivamente, início e fim do CE.  
Ponto A: (X=46°50'37,38"; Y=22°06'41,26"), Ponto B: (X=46°50'23,72"; Y=22°06'43,50")

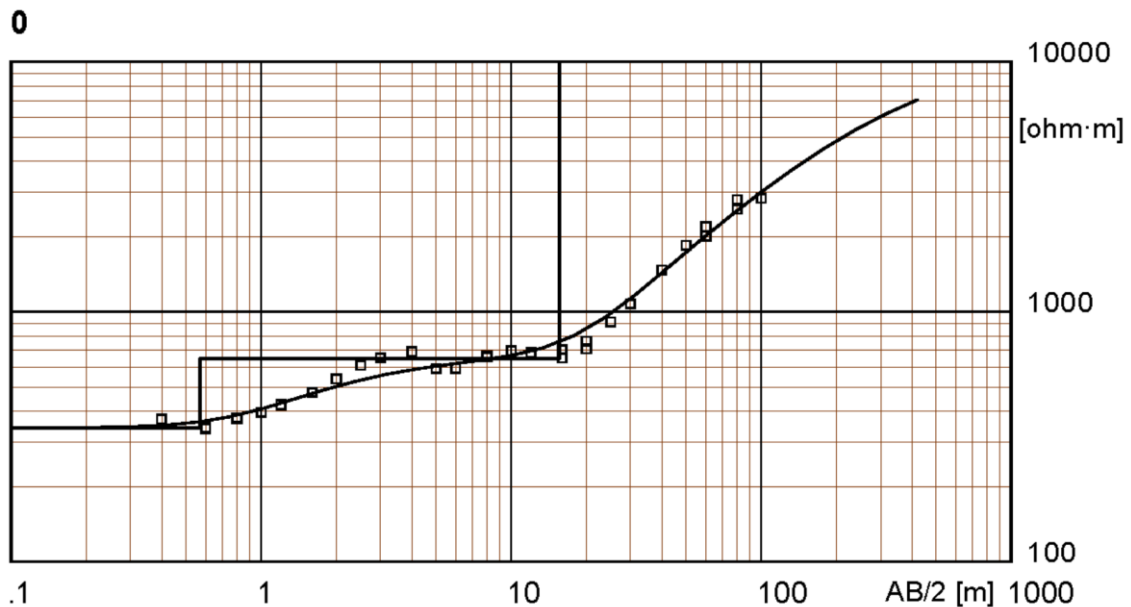


# PROCESSAMENTO DOS DADOS

## Sondagem Elétrica Vertical

Para o processamento dos dados das SEVs 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 7) resultou num modelo de 3 camadas geolétricas.

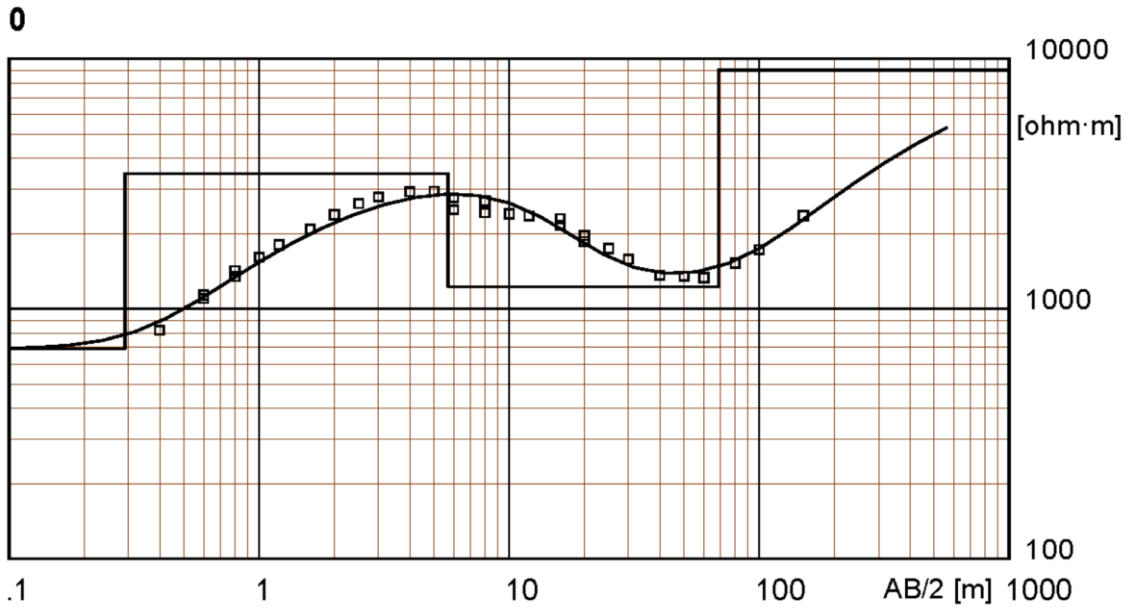


**Location X = 46°41'03.94" Y = 22°11'29.46" Z = 1048 Azim = 0**

<b>Model</b>			
<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>343</b>	<b>.57</b>		<b>1048</b>
<b>648</b>	<b>15</b>	<b>.57</b>	<b>1047.4</b>
<b>10264</b>		<b>16</b>	<b>1032</b>

*Figura 7 - Modelo de camadas Geolétricas da SEV 1*

A inversão da SEV 2 (Figura 8) resultou num modelo de 4 camadas geolétricas.



**Location X = 46°41'15.82" Y = 22°13'06.10" Z = 1223 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>690</b>	<b>.29</b>	<b>.29</b>	<b>1223</b>
<b>3465</b>	<b>5.4</b>	<b>.29</b>	<b>1222.7</b>
<b>1223</b>	<b>63</b>	<b>5.7</b>	<b>1217.3</b>
<b>9001</b>		<b>69</b>	<b>1154</b>

*Figura 8 - Modelo de camadas Geolétricas da SEV 2*

As tabelas de dados das SEVs encontram-se no apêndice.

## **Caminhamento Elétrico**

Para o processamento dos dados dos CEs 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).

Na Linha 1 foram realizados três levantamentos teste para verificar qual espaçamento entre os eletrodos se adequaria melhor ao objetivo do levantamento, que almejava ter maior resolução da variação lateral de resistividade para investigar estruturas geológicas e maior alcance, em profundidade, já que era necessário identificar pelo menos uma interface vertical, quando possível o contato com o embasamento. Foram utilizados espaçamentos de 1; 3 e 5m e verificou-se que o espaçamento de 5m se adequava melhor as necessidades do projeto.

Na Linha 1 (Figura 9), com espaçamento de 1m, não houve alcance, em profundidade, para identificar em detalhes as interfaces verticais e não se verifica grandes variações horizontais de resistividade, salvo trecho entre 17 e 22m.

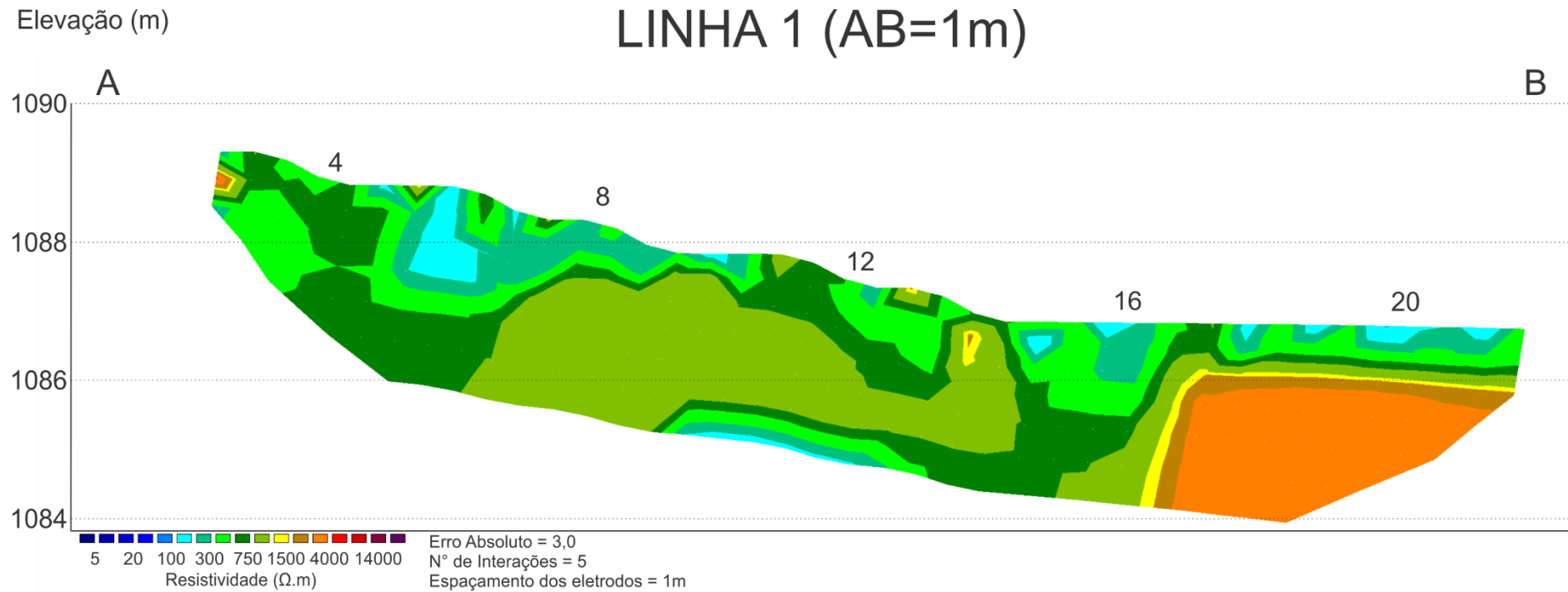


Figura 9 - Linha 1 com espaçamento de 1m entre os eletrodos

Na Linha 1 (Figura 10), com espaçamento de 3m, houve alcance em profundidade para identificar em detalhes as interfaces verticais, mas as variações horizontais de resistividade ainda não eram satisfatória. O equipamento apresentou pane durante este levantamento, que teve de ser interrompido.

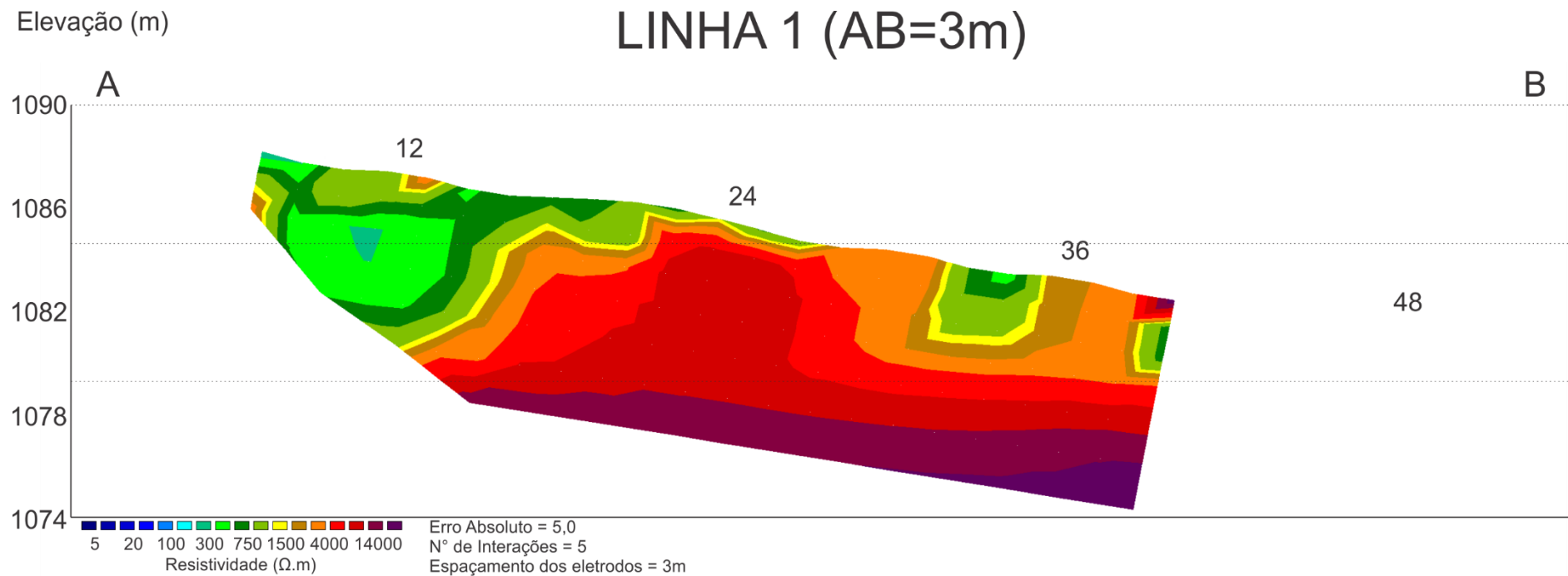


Figura 10 - Linha 1 com espaçamento de 3m entre os eletrodos

Na Linha 1 (Figura 11), com espaçamento de 5m, houve alcance em profundidade para identificar em detalhes as interfaces verticais, e foi possível verificar satisfatoriamente os detalhes nas variações horizontais de resistividade.

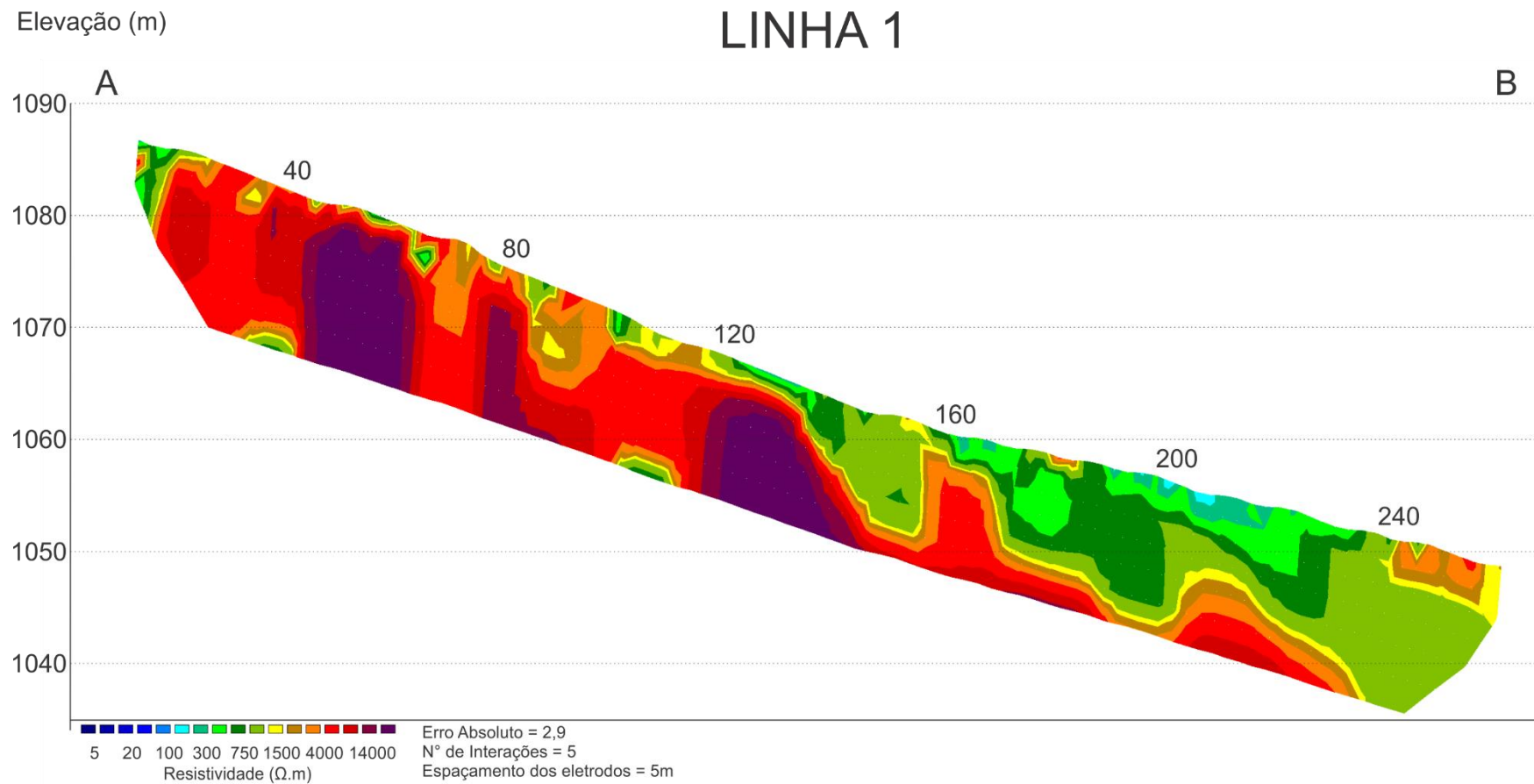


Figura 11 - Linha 1 com espaçamento de 5m entre os eletrodos

Na Linha 2 (Figura 12), com espaçamento de 5m, foi verificado grande variação horizontal de resistividade. Verifica-se que o perfil apresenta três domínios geoeletricos distintos; condutivo entre os trechos de 0 a 180m, resistivo entre 180 e 240m e valores intermediários entre 240 e 400m.

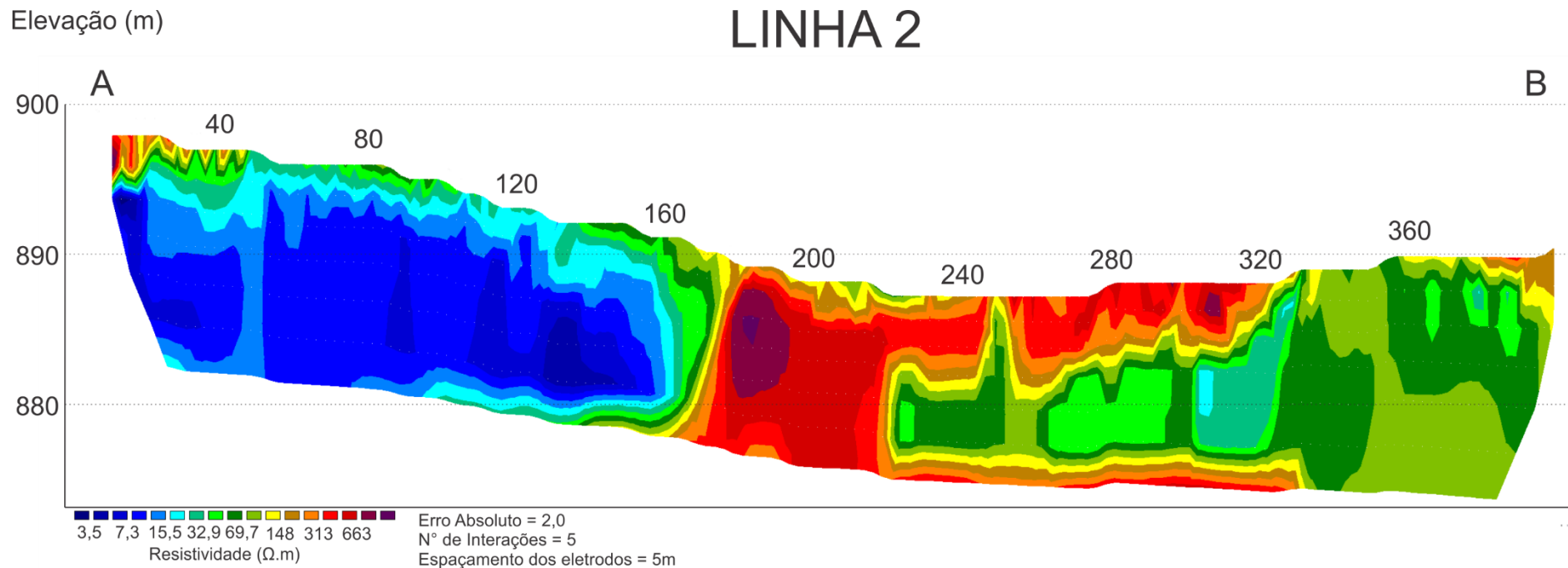


Figura 12 - Linha 2 com espaçamento de 5m entre os eletrodos

As Pseudo-Seções medida, calculada e Seção Invertida dos CEs encontram-se no apêndice.

# INTERPRETAÇÃO

## Sondagem Elétrica Vertical

A SEV 1 apresenta 3 camadas geoeletricas que podem ser interpretadas (Telford et al., 1990) conforme Tabela 1 abaixo:

RES ( $\Omega.m$ )	Espessura (m)	Litologia Associada
343	0,57	Solo Areno-Silte-Argiloso (Horizonte A).
648	15	Solo Areno-Silte-Argiloso
10264		Cristalino rochoso (embasamento)

*Tabela 1 - Interpretação da SEV 1*

A SEV 2 apresenta 4 camadas geoeletricas que podem ser interpretadas conforme Tabela 2 abaixo:

RES ( $\Omega.m$ )	Espessura (m)	Litologia Associada
690	0,29	Solo arenoso (Horizonte A)
3465	5,4	Bloco rochoso (possível composição granítica)
1223	63	Solo arenoso e material não consolidado
9001		Cristalino rochoso (embasamento)

*Tabela 2 - Interpretação da SEV 2*



## Caminhamento Elétrico

A interpretação da Linha 1 (Figura 13) mostra que solo tem espessura bastante disforme, variando de 1 a 15m. O segundo horizonte é formado predominantemente por material não consolidado. A SEV 1 indica que os três blocos em cinza são proeminências do embasamento.

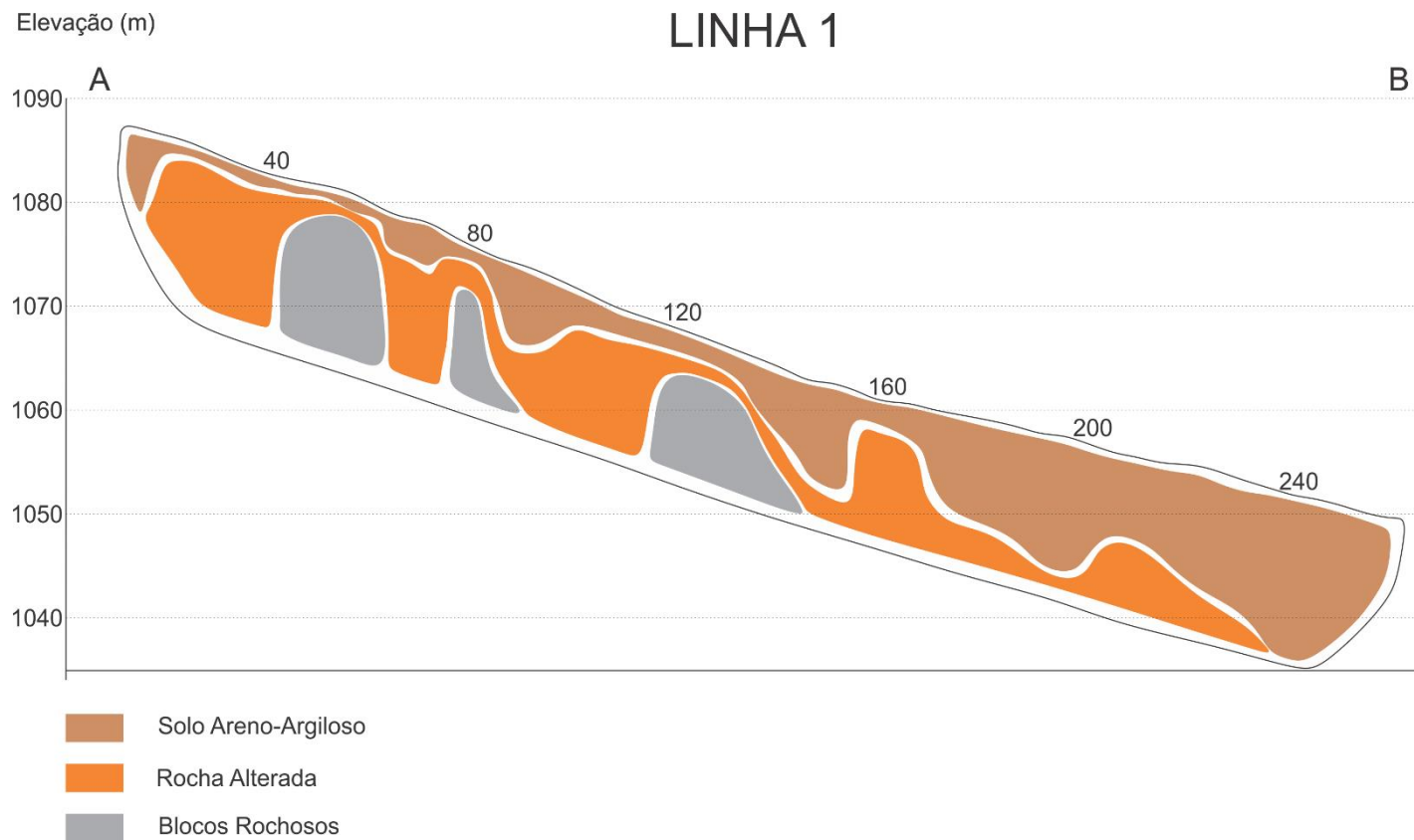


Figura 13 - Linha 1 interpretada

A interpretação da Linha 2 (Figura 14) ressalta a estrutura geológica, inferida por satélite, que corta a seção entre 180 e 240, esta estrutura separa duas zonas com características litológicas distintas. À esquerda da região é predominantemente argilosa e está saturada, e à direita trata-se de rocha alterada, saturada e material não consolidado.

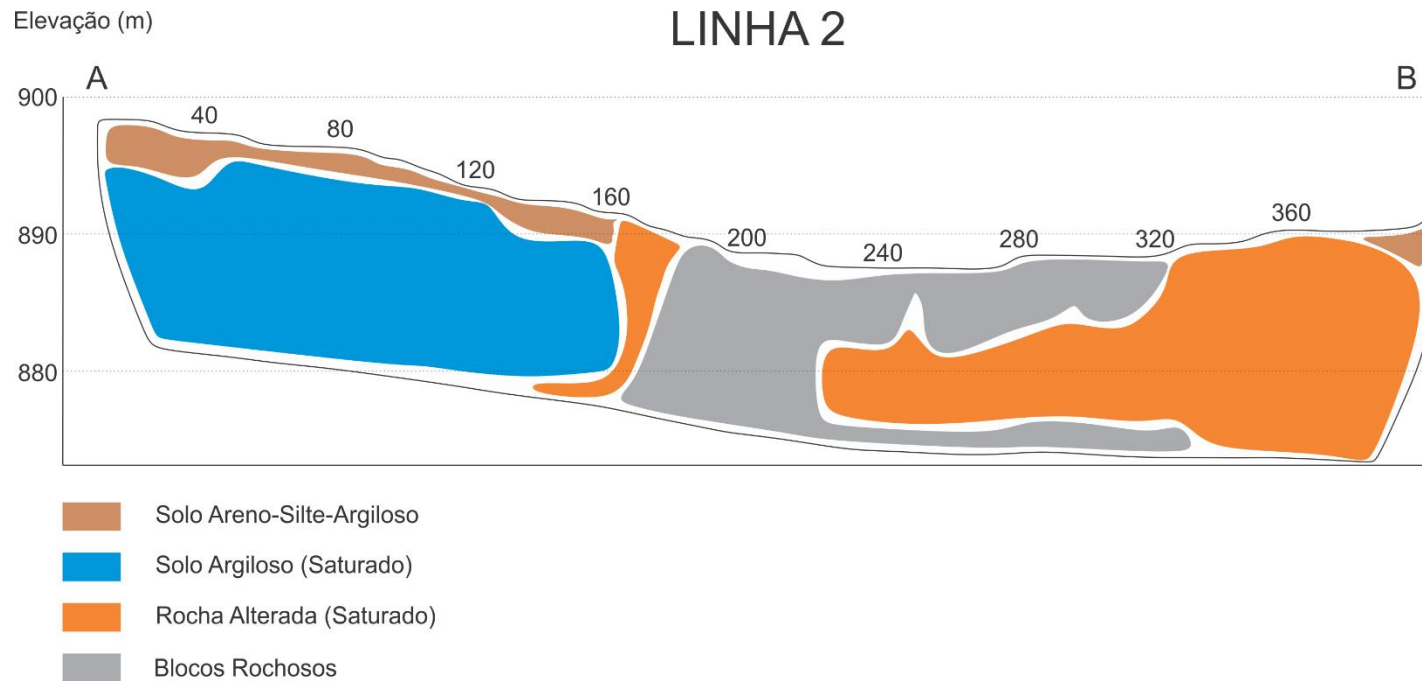


Figura 14 - Linha 2 interpretada

## **AGRADECIMENTOS**

Aos colegas Rafael R. Severino e Anderson Dourado Rodrigues da Silva pela colaboração.

## **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.

## APÊNDICE

Field data and calculated values

<b>MN/2</b> [m]	<b>AB/2</b> [m]	<b>DeltaV</b> [mV]	<b>I</b> [mA]	<b>K</b> [-]	<b>Resistivity</b> [ohm·m]
.1	.4	32339.5	205	2.36	372
.1	.6	35744.5	576	5.5	341
.2	.6	34823.1	254	2.51	344
.1	.8	32952.6	878	9.9	372
.2	.8	32714.2	410	4.71	376
.2	1	33046.9	630	7.54	396
.2	1.2	33484.2	868	11	424
.2	1.6	33648.2	1402	19.79	475
.2	2	31880	1844	31.1	538
.2	2.5	22821.9	1822	48.77	611
.2	3	14161.1	1524	70.37	654
.2	4	10338.3	1864	125	693
.2	5	3522.5	1164	196	593
.2	6	3688.6	1751	282	594
1	6	18887.6	1754	54.98	592
.2	8	2182.1	1655	502	662
1	8	10977.3	1649	98.96	659
1	10	5201.6	1166	156	696
1	12	2572.7	845	225	685
1	16	3104.1	1907	401	653
4	16	12536.5	1679	94.25	704
1	20	2920.6	2580	627	710
4	20	13004.2	2575	151	763
4	25	11879.5	3124	239	909
4	30	6890	2227	347	1074
4	40	6161.6	2610	622	1468
4	50	4081.7	2161	975	1842
4	60	799.8	515	1407	2185
10	60	1925.7	529	550	2002
4	80	3506.4	3136	2507	2803
10	80	8172.2	3148	990	2570
10	100	6325.8	3461	1555	2842

Figura 15 - Dados da SEV 1

Field data and calculated values

<b>MN/2</b> [m]	<b>AB/2</b> [m]	<b>DeltaV</b> [mV]	<b>I</b> [mA]	<b>K</b> [-]	<b>Resistivity</b> [ohm·m]
.1	.4	32236.8	93	2.36	818
.1	.6	32575.8	163	5.5	1099
.2	.6	31153.7	69	2.51	1133
.1	.8	32476.2	239	9.9	1345
.2	.8	31963.2	106	4.71	1420
.2	1	32605.4	153	7.54	1607
.2	1.2	32374.8	198	11	1799
.2	1.6	33005.4	314	19.79	2080
.2	2	33700.7	441	31.1	2377
.2	2.5	32710.1	605	48.77	2637
.2	3	33314.5	838	70.37	2798
.2	4	21483.6	913	125	2941
.2	5	9851.2	654	196	2952
.2	6	9028.2	917	282	2776
1	6	35117.9	776	54.98	2488
.2	8	7124.9	1327	502	2695
1	8	32428.4	1326	98.96	2420
1	10	16579.7	1080	156	2395
1	12	10943	1048	225	2349
1	16	4043.9	751	401	2159
4	16	18274.5	752	94.25	2290
1	20	3113.6	1051	627	1857
4	20	13519.9	1040	151	1963
4	25	10519.7	1445	239	1740
4	30	10831.5	2382	347	1578
4	40	6423.5	2933	622	1362
4	50	3167.8	2290	975	1349
4	60	1851.5	1965	1407	1326
10	60	4826.1	1989	550	1335
4	80	1563.9	2576	2507	1522
10	80	3960.1	2584	990	1517
10	100	3743.2	3384	1555	1720
10	150	2061.4	3082	3519	2354

Figura 16 - Dados da SEV 2

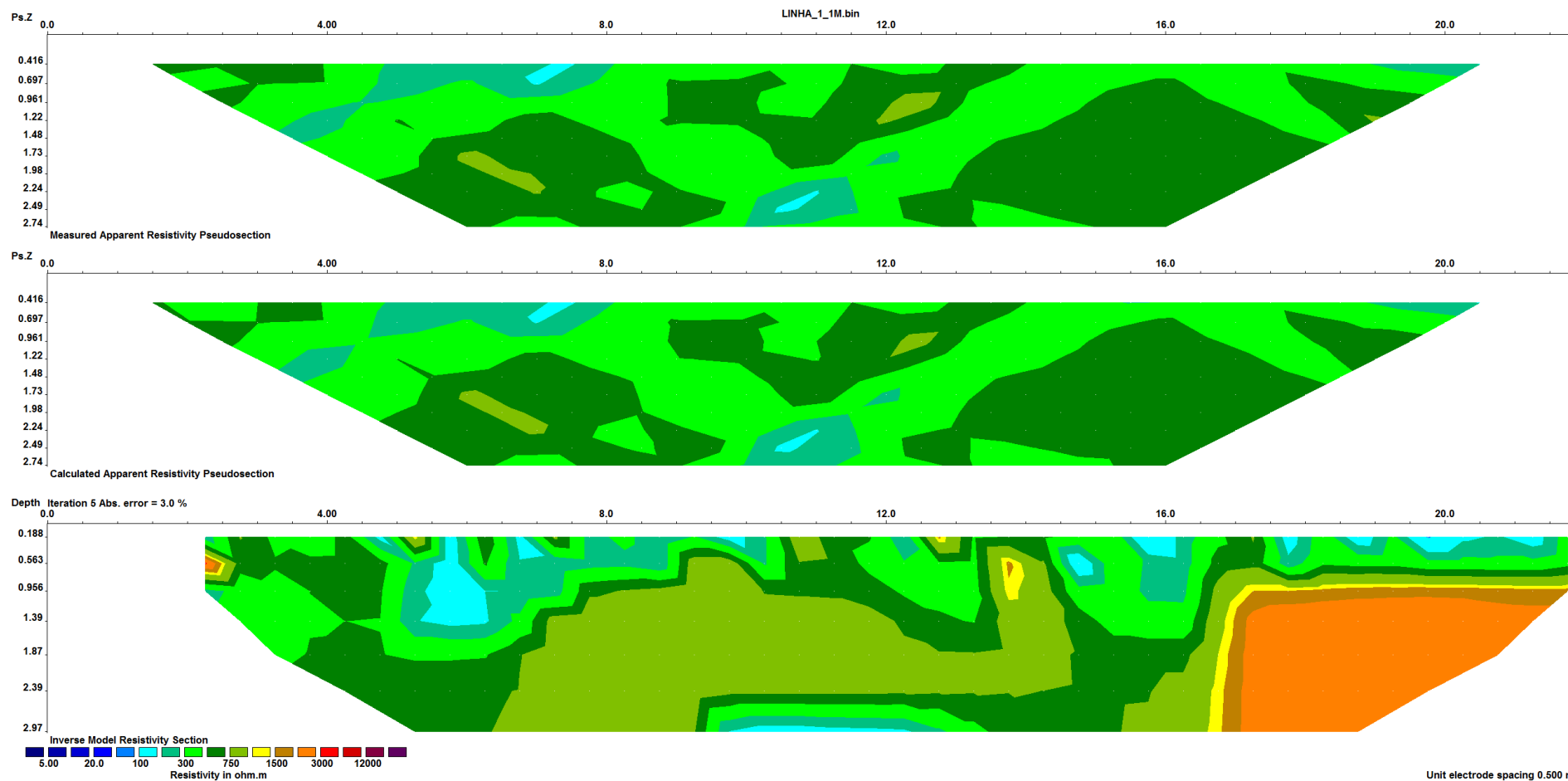


Figura 17 - Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1, espaçamento 1m

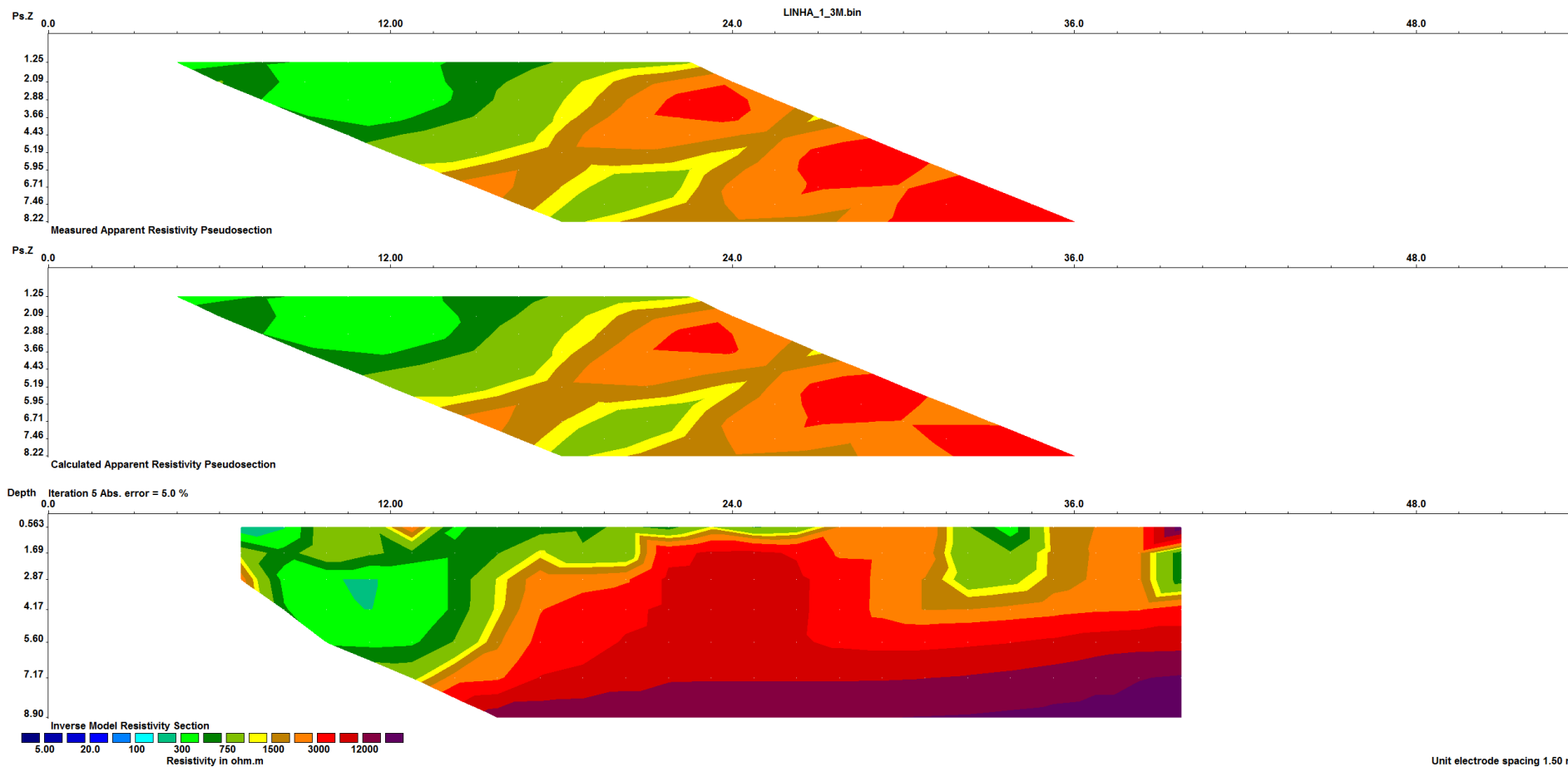


Figura 18 - Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1, espaçamento 3m

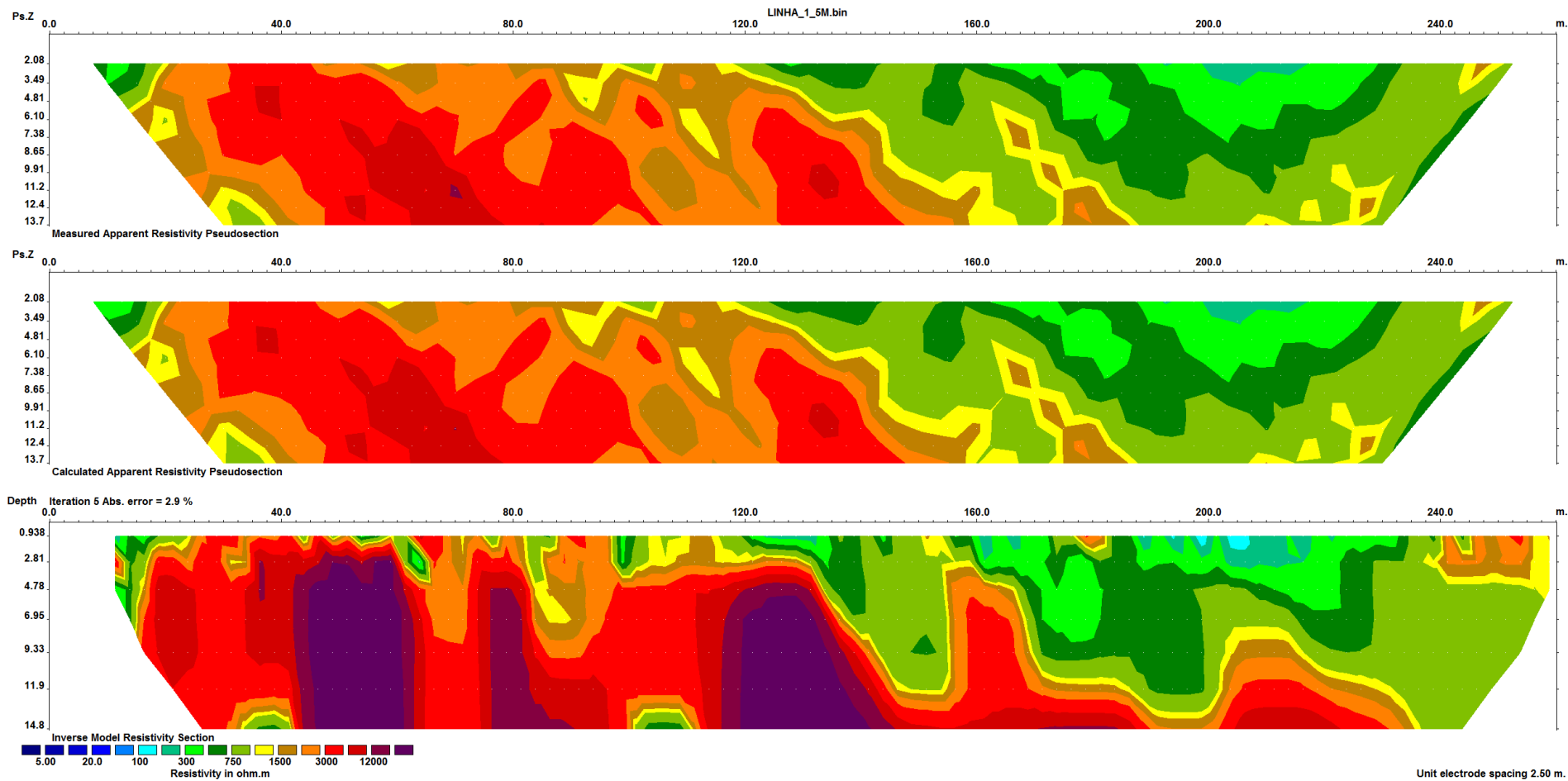


Figura 19 - Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1, espaçamento 5m



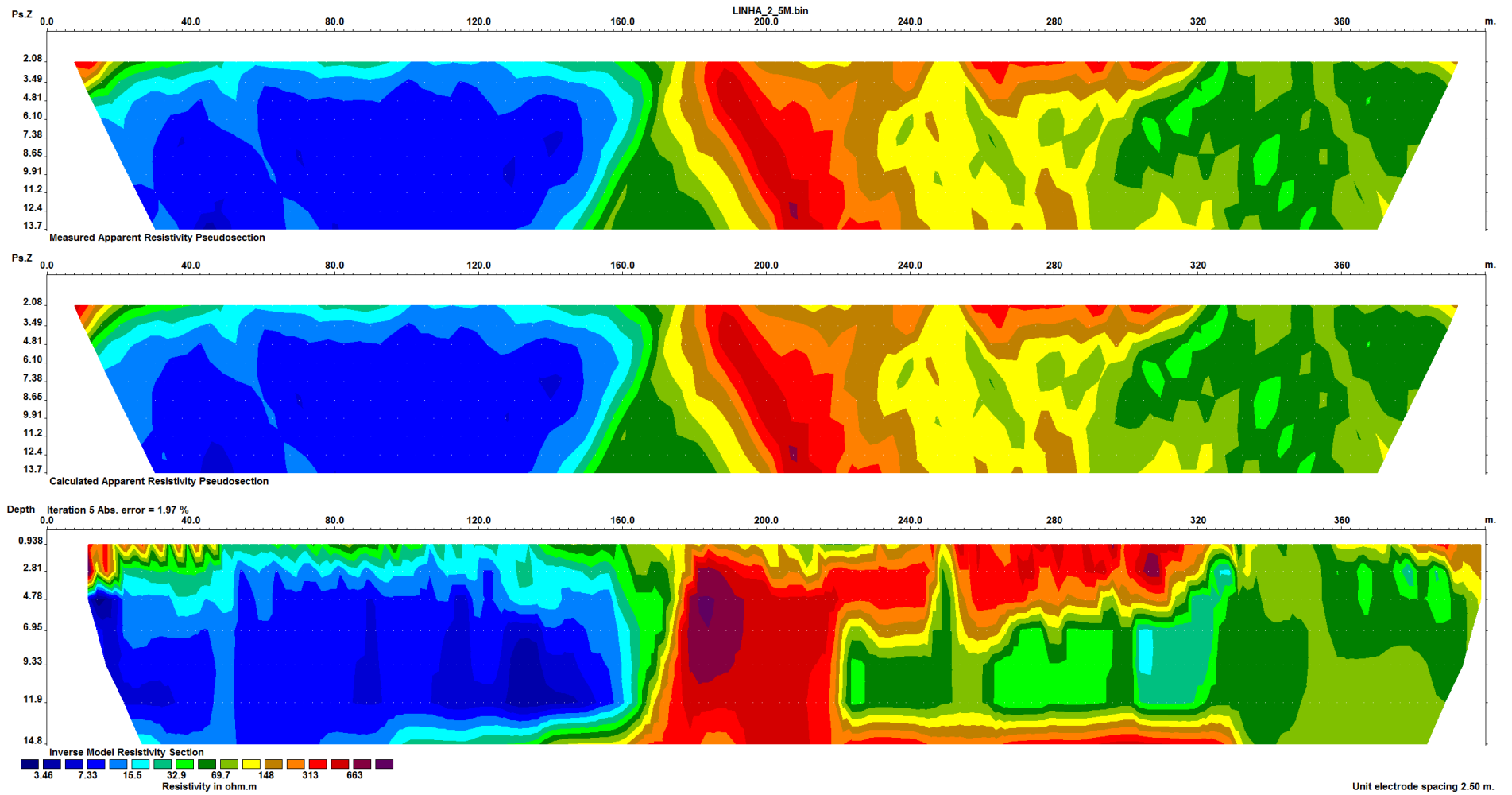


Figura 20 - Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2