

Ministério de Minas e Energia
CPRM – Serviço Geológico do Brasil

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

GEOFÍSICA

(Bragança Paulista)

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



São Paulo, 30 de Outubro de 2018

Sumário

INTRODUÇÃO	3
MÉTODOS E MATERIAIS	3
Métodos Elétricos	3
Sondagem Elétrica Vertical	4
Caminhamento Elétrico	5
Equipamentos Utilizados	6
AQUISIÇÃO DOS DADOS.....	7
PROCESSAMENTO DOS DADOS.....	9
Sondagem Elétrica Vertical	9
Caminhamento Elétrico	10
INTERPRETAÇÃO.....	15
Sondagem Elétrica Vertical	15
Caminhamento Elétrico	16
REFERÊNCIAS.....	21
APÊNDICE	22

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 Bragança Paulista nos dias 20 e 21 de setembro 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 discontinuidades 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, (ΔV) 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. São injetadas correntes (I) no solo através de dois eletrodos nos pontos A e B, e é medida a diferença de potencial (ΔV) entre os outros dois eletrodos nos pontos M e N (Figura 1).

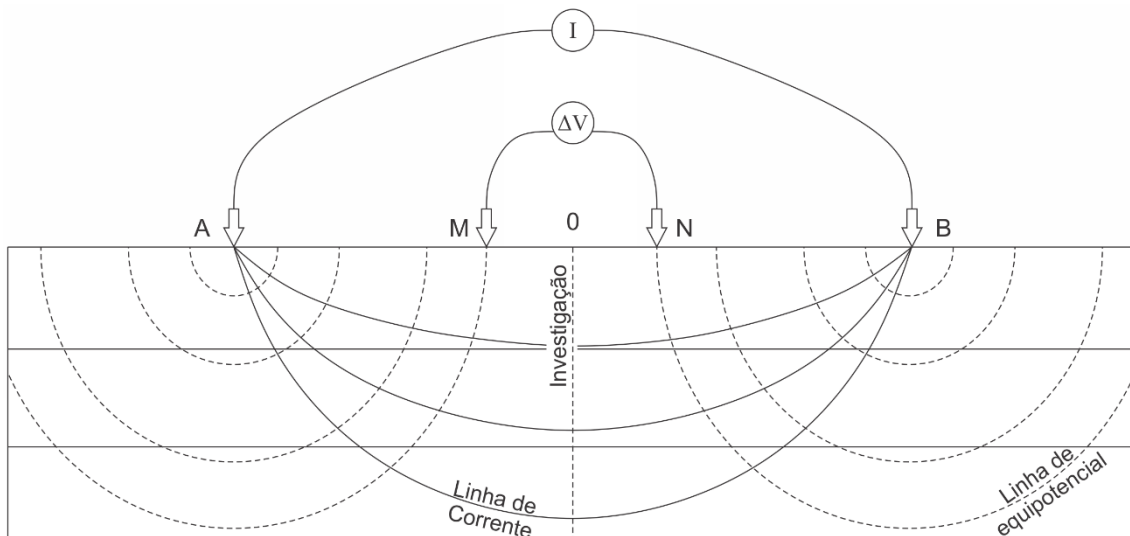


Figura 1 - Técnica da sondagem elétrica vertical (SEV).

Uma vez que se conhece as distâncias \overline{AM} e \overline{AN} , pode-se medir a corrente (I) injetada e a diferença de potencial (ΔV), e calcular a resistividade aparente (ρ_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 mantém 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 arranjos de desenvolvimento, como Schullumberger, 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).

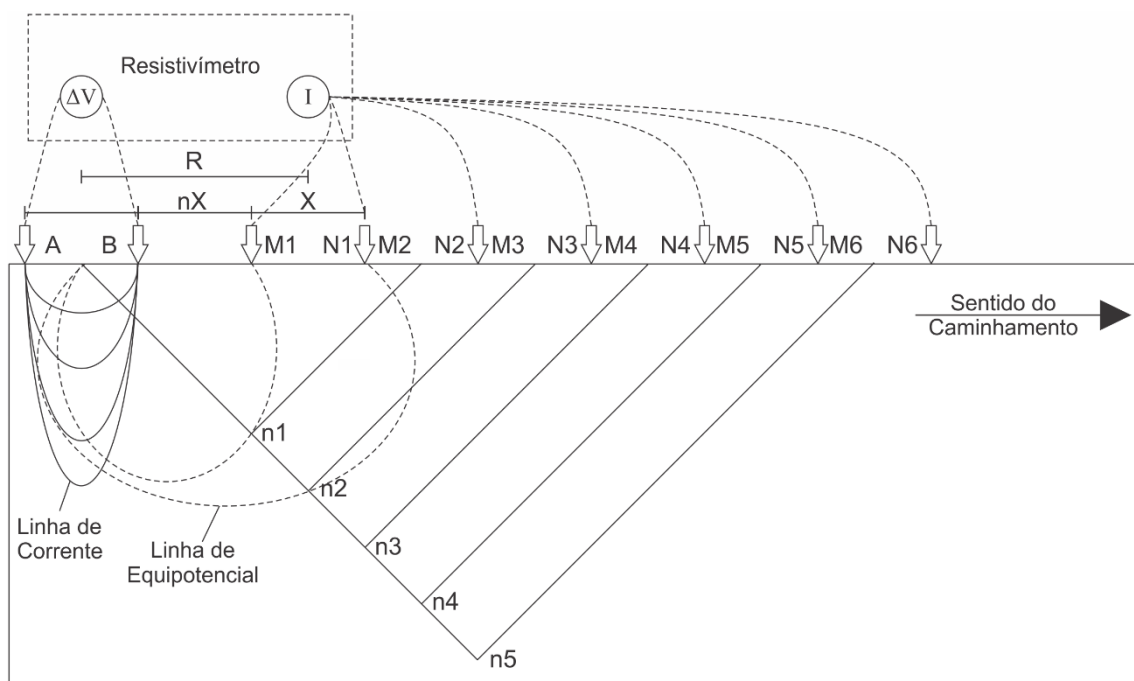


Figura 2 - Esquema do CE, arranjo dipolo-dipolo.

Deste modo é possível calcular a resistividade aparente (ρ_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 resistivímetro Syscal Pro (Figura 3), que possui 10 canais de leitura integrados. Para a SEV estavam disponíveis quatro rolos de cabos sendo dois de 100m e dois 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

Na região foram realizados 3 CEs e 2 SEVs. Os CEs foram realizados objetivando identificar possíveis bacias de enxurrada e depósitos de Tálus. As SEVs visavam estimar a espessuras das camadas litológicas e profundidade do topo do embasamento.

O primeiro CE, Linha 1, foi realizado deslocado da posição original por conta de grande faixa de gasodutos identificados no local (Figura 4). A SEV 1 foi realizada sobre a Linha 1.

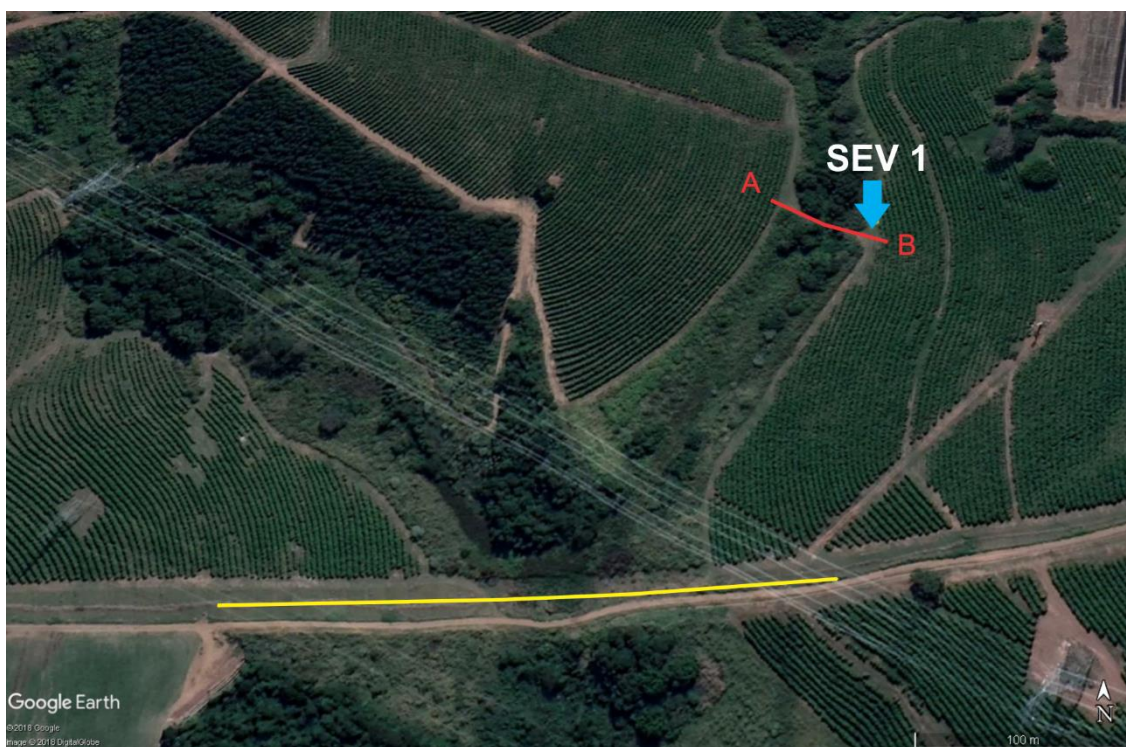


Figura 4 - Linha 1 (vermelho), planejamento inicial da Linha 1 (amarelo) e SEV 1. A e B identificam, respectivamente, início e fim do CE. Ponto A: (X= 46°34'25.60"O; Y= 23° 0'28.80"S), Ponto B: (X= 46°34'23.10"O; Y= 23° 0'30.00"S) e SEV 1: (X= 46°34'23.40"O; Y= 23° 0'29.58"S).

Foram realizados, por questões de logística, dois CEs sobre a programação original da Linha 2, Linha 2_P1 e Linha 2_P2 (Figura 5). A SEV 2 foi realizada sobre a Linha 2.

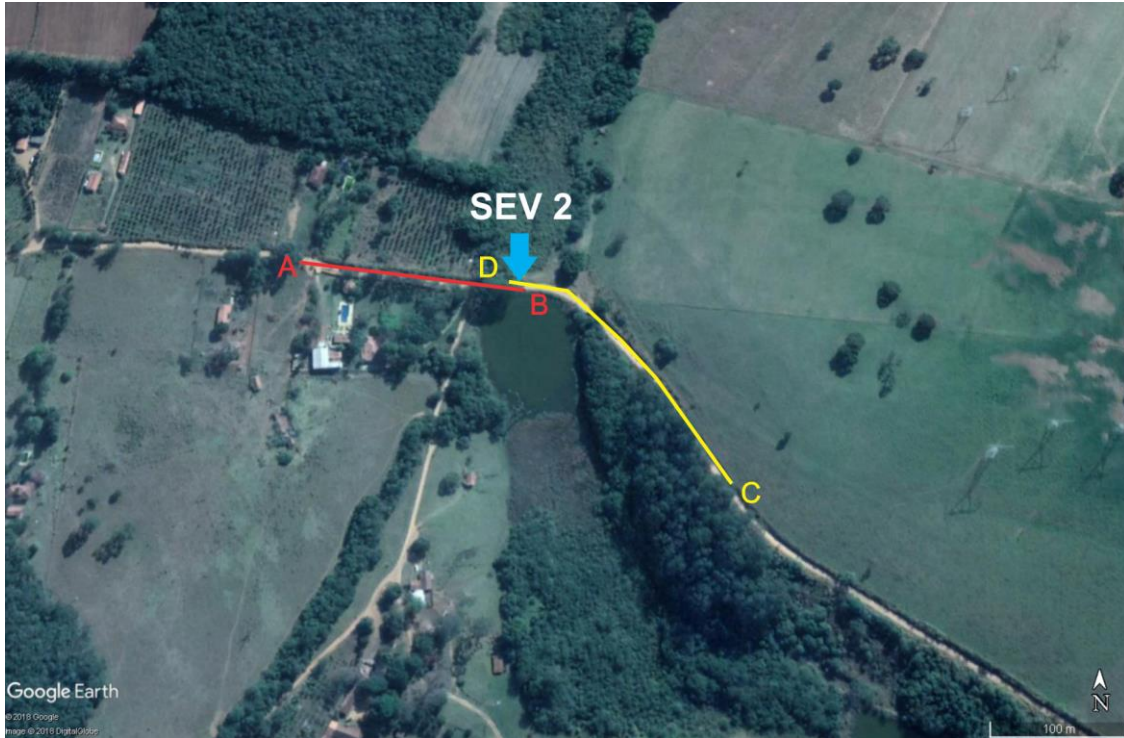


Figura 5 - Linha 2_P1, Linha 2_P2 e SEV 2. A e B identificam, respectivamente, início e fim da Linha 2_P1. C e D identificam, respectivamente, início e fim da Linha 2_P2. Ponto A: (X= 46°37'27.60"O; Y= 22°53'36.20"S), Ponto B: (X= 46°37'21.03"O; Y= 22°53'36.82"S), Ponto C: (X= 46°37'15.24"O; Y= 22°53'42.24"S), Ponto D: (X= 46°37'21.60"O; Y= 22°53'36.68"S) e SEV 2: (X= 46°37'21.33"O; Y= 22°53'36.69"S).

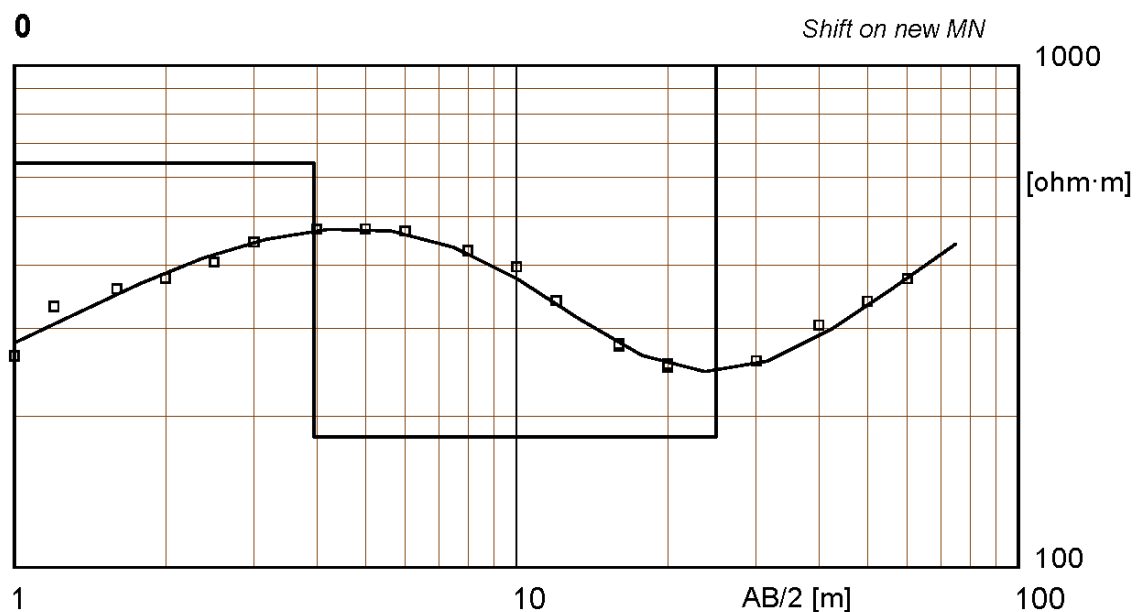
A existência de Tálus e Bacias de Enxurrada nessas áreas é inferida através de interpretações preliminares em imagens de satélite.

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 6) resultou num modelo de 4 camadas geoeletricas.



Location X = 46°34'23.40"O Y = 23° 0'29.58"S Z = 820 Azim = 0

Model	Resistivity	Thickness	Depth	Altitude
	[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
	207	.55		820
	639	3.4	.55	819.4
	182	21	4	816
	1299		25	795

Figura 6 - Modelo de camadas Geoeletricas da SEV 1.

Os modelos geoeletricos de camadas da SEVs 2 e as tabelas de dados 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).

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 5m obteve os melhores resultados.

LINHA 1

Elevação (m)

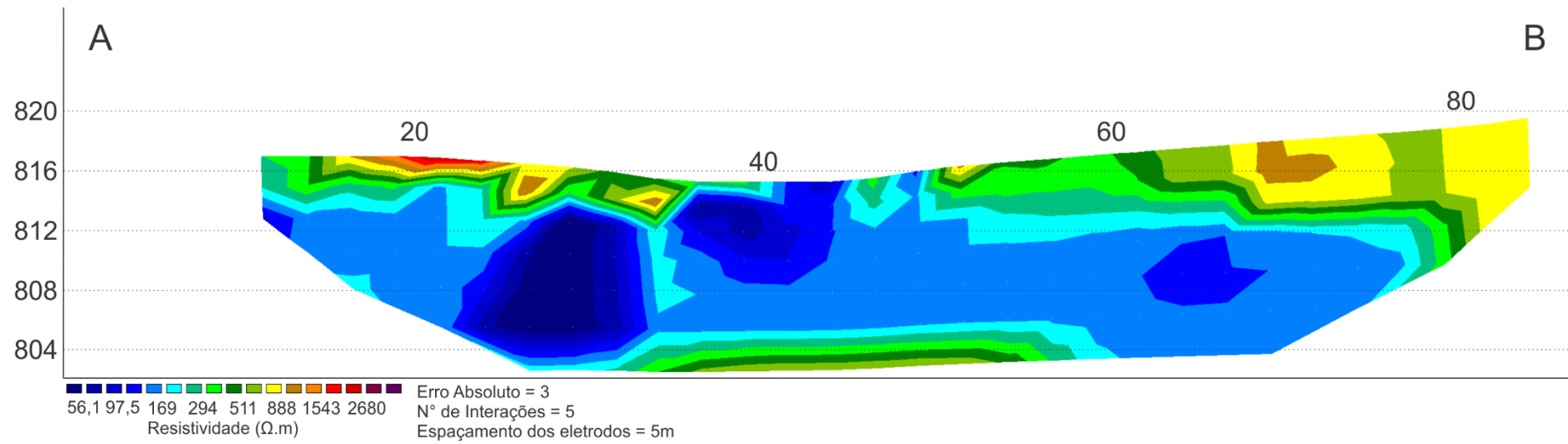


Figura 7 - Seção inversa da Linha 1.

Elevação (m)

LINHA 2_P1

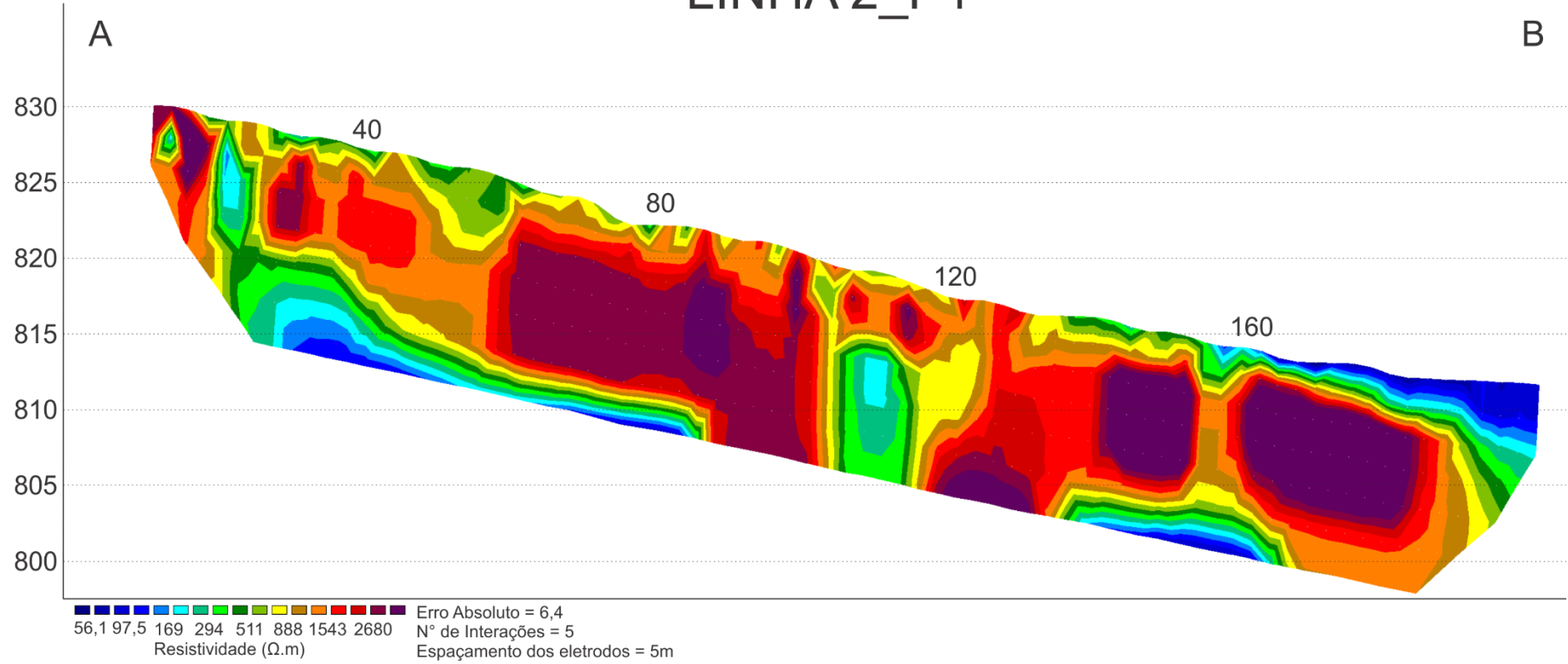


Figura 8 - Seção inversa da Linha 2_P1.

Elevação (m)

LINHA 2_P2

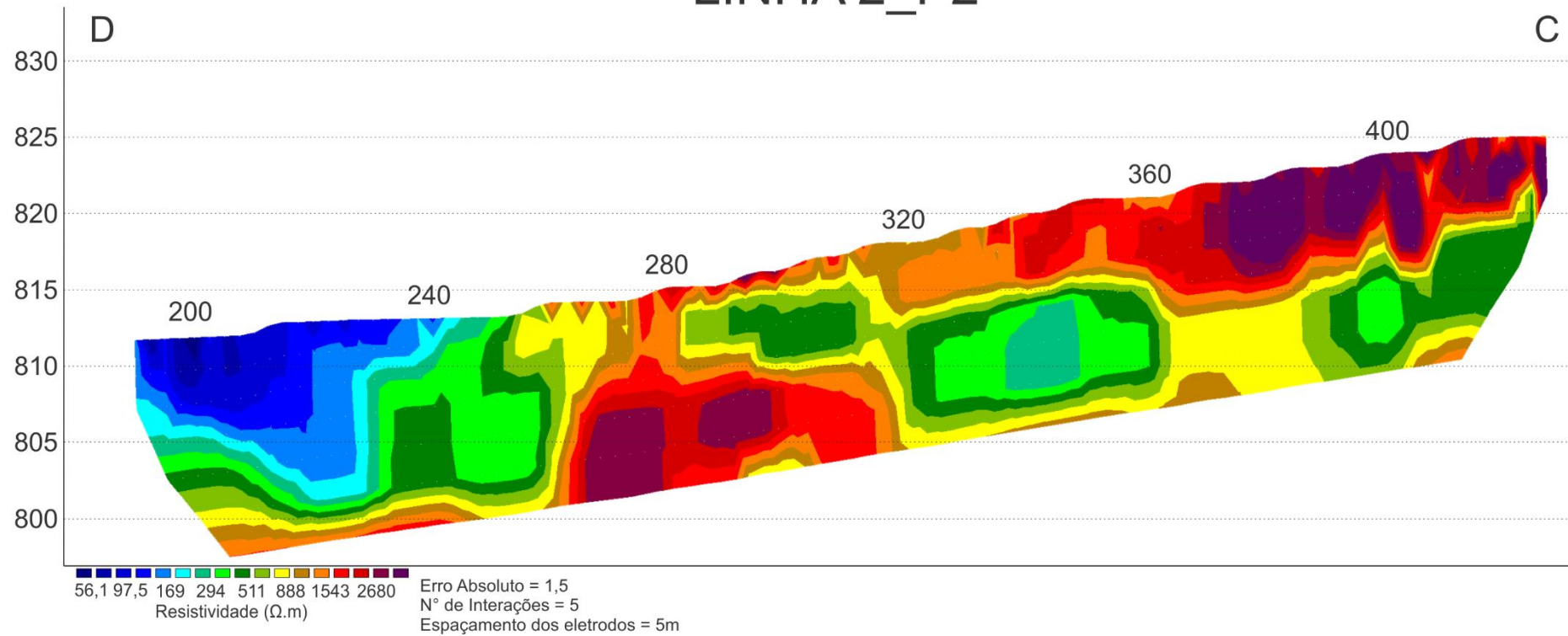


Figura 9 – Seção inversa da Linha 2_P2.

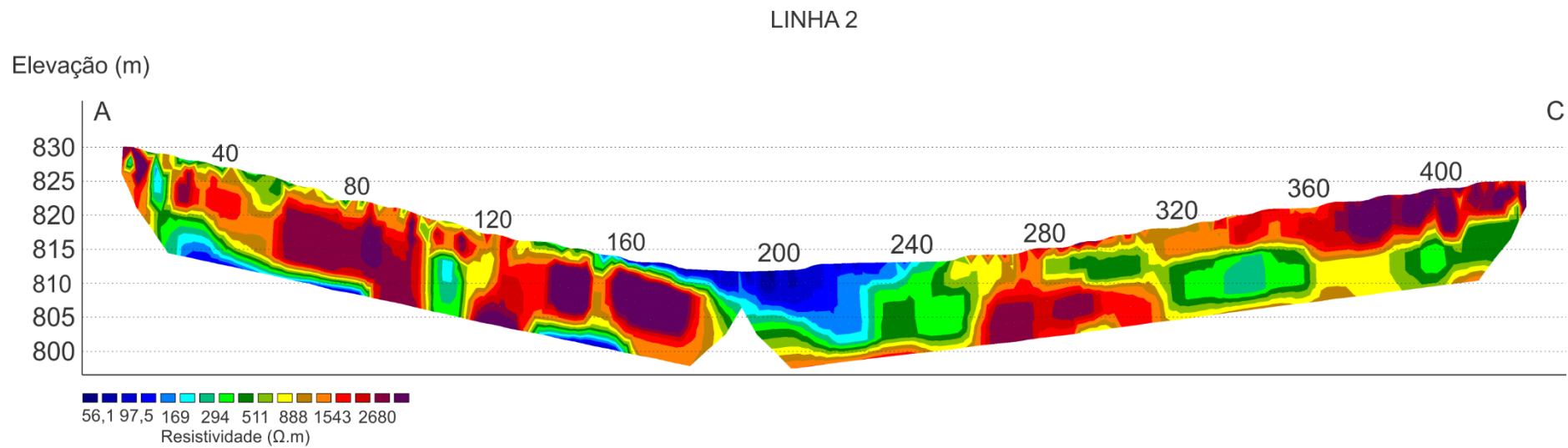


Figura 10 – Junção das Seções inversa da Linha 2.

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

INTERPRETAÇÃO

Sondagem Elétrica Vertical

As SEVs apresentam camadas geoeletricas que podem ser interpretadas (Telford et al., 1990) conforme as tabelas abaixo:

Tabela 1 - Interpretação da SEV 1.

RES (Ω .m)	Espessura (m)	Litologia Associada
207	0,55	Solo arenoso (Horizonte A)
639	3,4	Solo arenoso
182	21	Solo arenoso saturado
1299		Cristalino rochoso (embasamento)

Tabela 2 - Interpretação da SEV 2.

RES (Ω .m)	Espessura (m)	Litologia Associada
57	3,3	Solo arenoso saturado
1101	27	Aglomerado de blocos rochosos
282	89	Solo arenoso saturado
2410		Cristalino rochoso (embasamento)

Caminhamento Elétrico

Os CEs tinham por objetivo mapear a extensão de depósitos de tálus e bacias de enxurrada. Salomão e Antunes (1998) descrevem Depósito de Tálus como sendo. “Formados pela ação da água e, principalmente, da gravidade, compostos predominantemente por blocos de rocha de variados tamanhos, em geral, arredondados, envolvidos ou não por matriz areno-silto-argilosa, frequentemente saturada”. Enxurrada tem como característica, o escoamento superficial concentrado e com alta energia de transporte, que pode estar ou não associada a áreas de domínios dos processos fluviais (TOMINAGA, et al. – 2011).

A Linha 1 foi realizada com restrição de comprimento pois a plantação apresentava densidade que impedia o deslocamento adentro da vegetação e não havia autorização para realizar aberturas de “picadas” naquela área (Figura 4). O modelo da seção inversa de resistividade indica que os limites da zona superficialmente saturada sobre influência da drenagem (domínio fluvial), é de aproximadamente 15m localizada e está localizado entre as posições 35 e 50m do CE (Figura 11), devido à restrição espacial os limites da bacia de enxurrada não puderam ser mapeados.

A SEV 1 foi utilizada na interpretação da Linha 1 e evidencia que o embasamento é raso, estando a aproximadamente 25m de profundidade na posição 70m do CE.

Como podemos ver na interpretação da Linha 2 (Figura 14) a região em azul e marrom, respectivamente, saturada e não saturada, correspondem a um solo areno-silte-argiloso. As regiões em cinza correspondem a materiais consolidados, não necessariamente uniformes, o método não tem resolução para detalhar a matriz entre estas rochas, que na verdade podem ser aglomerados de blocos e/ou matacões acumulados nestas regiões (*in situ*).

A SEV 2 foi utilizada na interpretação da Linha 2 e evidencia que o embasamento é profundo, diferenciando o material consolidado do cristalino rochoso.

LINHA 1

Elevação (m)

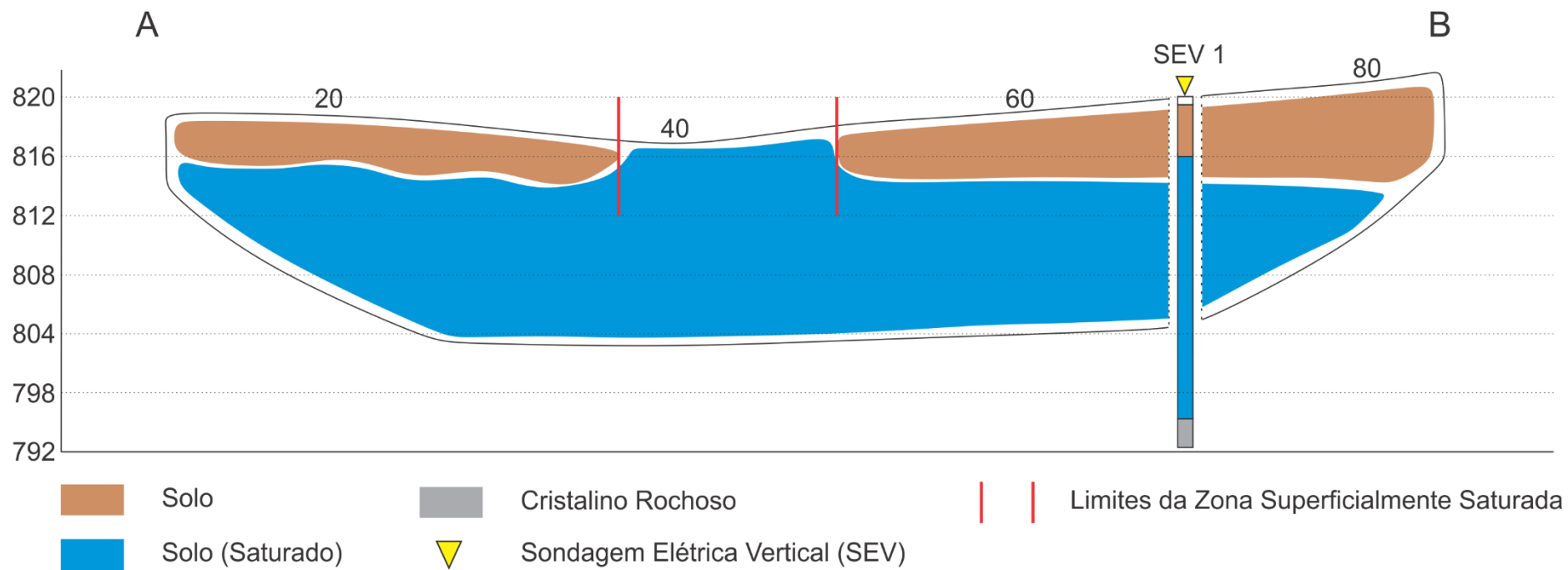
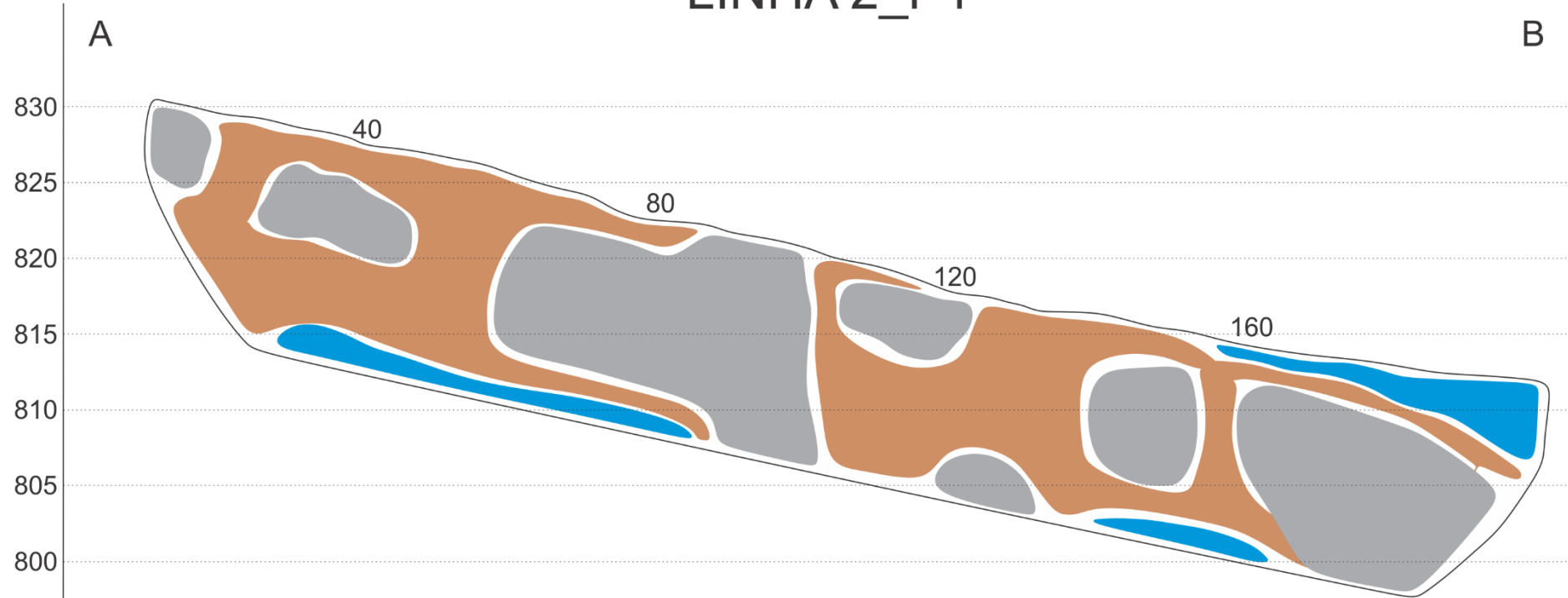


Figura 11 - Linha 1 interpretada.

Elevação (m)

LINHA 2_P1






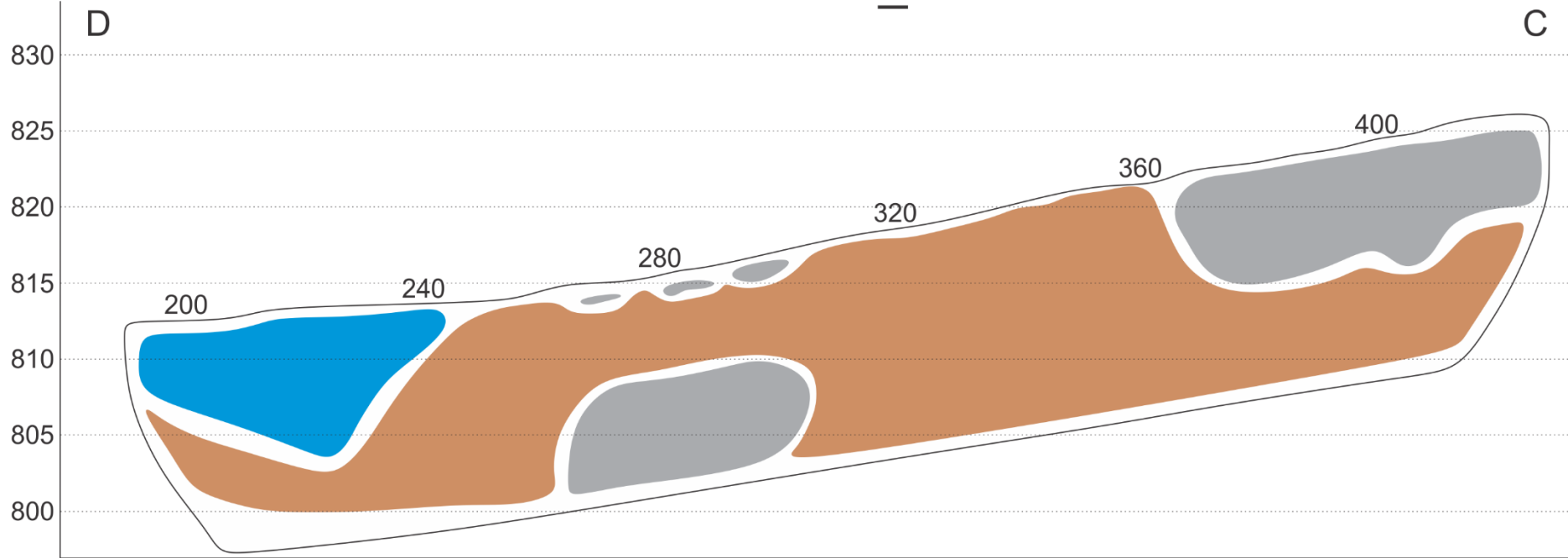
-  Solo Areno-Silte-Argiloso (Não Saturado)
-  Solo Areno-Silte-Argiloso (Saturado)
-  Material Consolidado (Aglomerados de Blocos e/ou Matacões)

Figura 12 - Linha 2_P1 interpretada.

Elevação (m)

LINHA 2_P2






-  Solo Areno-Silte-Argiloso (Não Saturado)
-  Solo Areno-Silte-Argiloso (Saturado)
-  Material Consolidado (Aglomerados de Blocos e/ou Matacões)

Figura 13 - Linha 2_P2 interpretada.

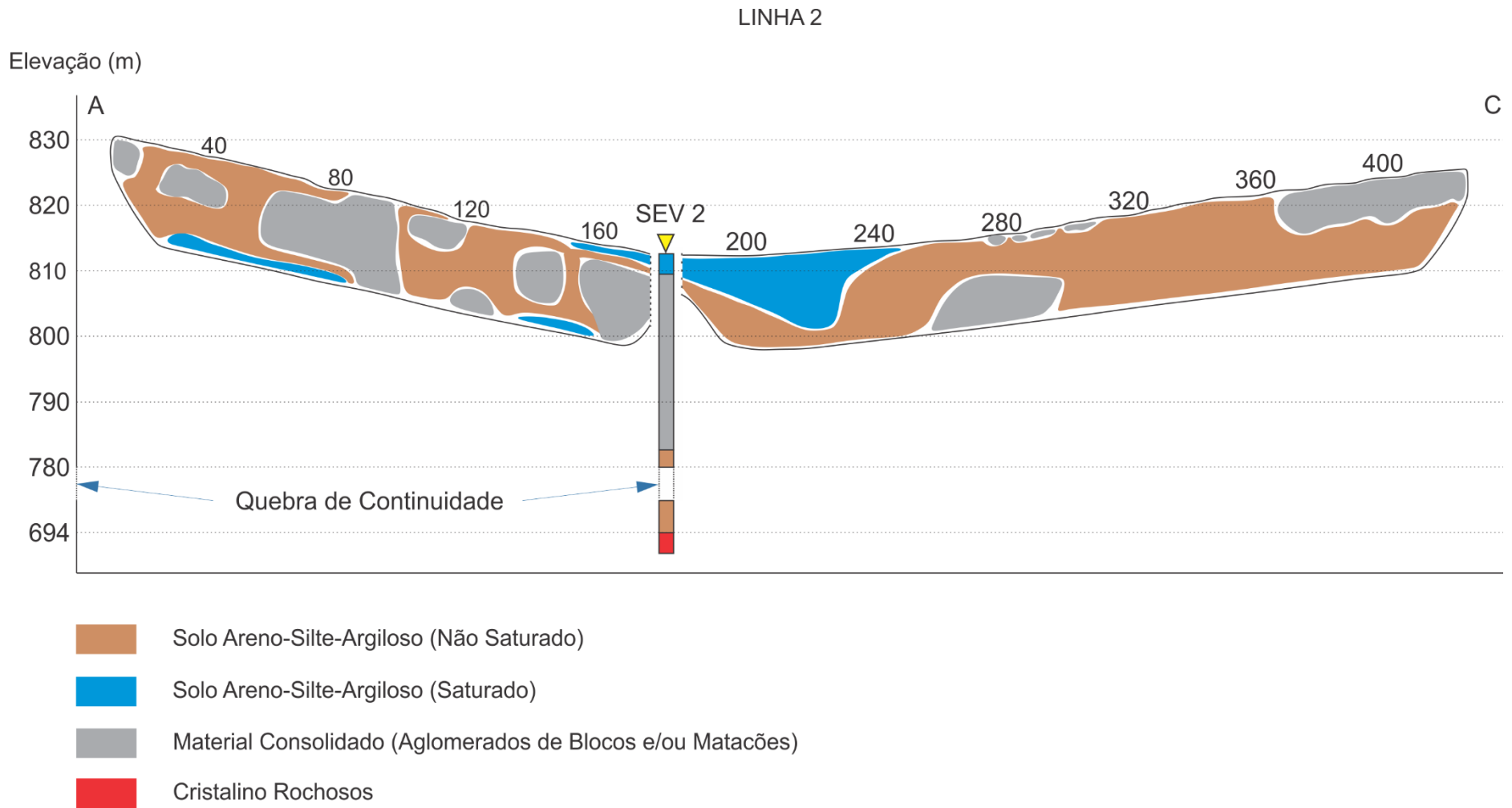


Figura 14 – Junção da Linha 2 e SEV 2 interpretadas.

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.

TOMINAGA, L. K; SANTORO, J; AMARAL, R. (Orgs.) **Desastres Naturais: conhecer para prevenir**. 1.ed/2° reimpressão. São Paulo: Instituto Geológico, 2011. 196 pp.

SALOMÃO, F. X. T.; ANTUNES, F. S. Solos em pedologia. In: OLIVEIRA, A. M. S.; BRITO, S. N. A. (edit.). **Geologia de Engenharia. Associação Brasileira de Geologia de Engenharia**, São Paulo, 1998. p. 87-101.

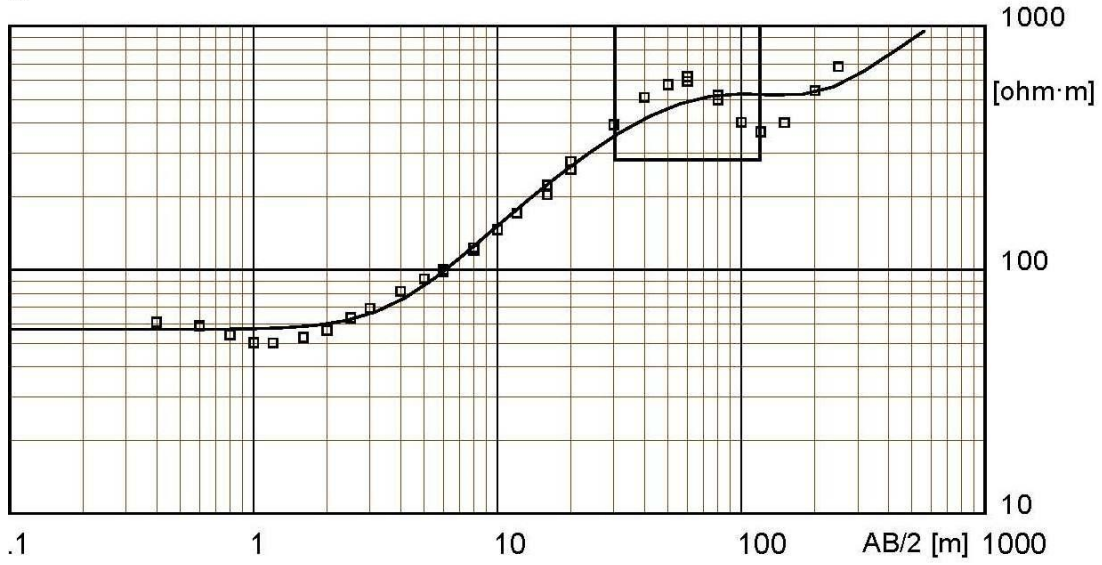
APÊNDICE

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm·m]
.2	1	150228.6	4291	7.54	264
.2	1.2	123601.1	4111	11	331
.2	1.6	73514.9	4058	19.79	359
.2	2	52127.6	4296	31.1	377
.2	2.5	34815.2	4187	48.77	406
.2	3	21509.1	3405	70.37	445
.2	4	17534	4645	125	472
.2	5	10366.7	4299	196	473
.2	6	6552.7	3937	282	469
1	6	36840	3928	54.98	468
.2	8	3343.3	3921	502	428
1	8	18689.7	3922	98.96	428
1	10	8815.8	3147	156	397
1	12	5762.9	3467	225	340
1	16	2632.3	3475	401	276
4	16	11327.9	3484	94.25	279
1	20	1789.6	4010	627	254
4	20	7332.3	4023	151	251
4	30	3230	3968	347	258
4	40	2094	3901	622	304
4	50	1602.2	4201	975	339
4	60	1212.5	4135	1407	376
10	60	3015.3	4131	550	376

Figura 15 - Dados da SEV 1.

0



Location X = 46°37'21.33"O Y = 22°53'36.69"S Z = 813 Azim = 0

Model			
Resistivity	Thickness	Depth	Altitude
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
57	3.3		813
1101	27	3.3	809.7
282	89	30	783
2410		119	694

Figura 16 - Modelo de camadas Geolétricas da SEV 2.

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm·m]
.1	.4	150228.6	5825	2.36	60.9
.1	.6	65279.3	6088	5.5	59
.2	.6	141856.5	6071	2.51	58.6
.1	.8	34612.6	6311	9.9	54.3
.2	.8	72297	6292	4.71	54.1
.2	1	44524.6	6687	7.54	50.2
.2	1.2	28733.7	6320	11	50
.2	1.6	18265.2	6841	19.79	52.8
.2	2	13607.8	7497	31.1	56.4
.2	2.5	9621.6	7393	48.77	63.5
.2	3	7241.9	7333	70.37	69.5
.2	4	4132.4	6336	125	81.5
.2	5	3697.1	7913	196	91.6
.2	6	2522.1	7094	282	100
1	6	12597.8	7080	54.98	97.8
.2	8	1656.1	6780	502	123
1	8	8201.8	6769	98.96	120
1	10	6353	6773	156	146
1	12	5694.5	7503	225	171
1	16	3694.9	6661	401	222
4	16	14342.1	6647	94.25	203
1	20	2328.1	5246	627	278
4	20	8879.9	5201	151	258
4	30	4820.8	4261	347	393
4	40	3929.3	4804	622	509
4	50	1819.4	3090	975	574
4	60	2006.7	4771	1407	592
10	60	5344.8	4752	550	619
4	80	802	4039	2507	498
10	80	2114	4026	990	520
10	100	476.2	1836	1555	403
10	120	491.8	2999	2246	368
10	150	216.1	1898	3519	401
40	200	587.9	1637	1508	542
40	250	601.5	2115	2392	680

Figura 17 - Dados da SEV 2.

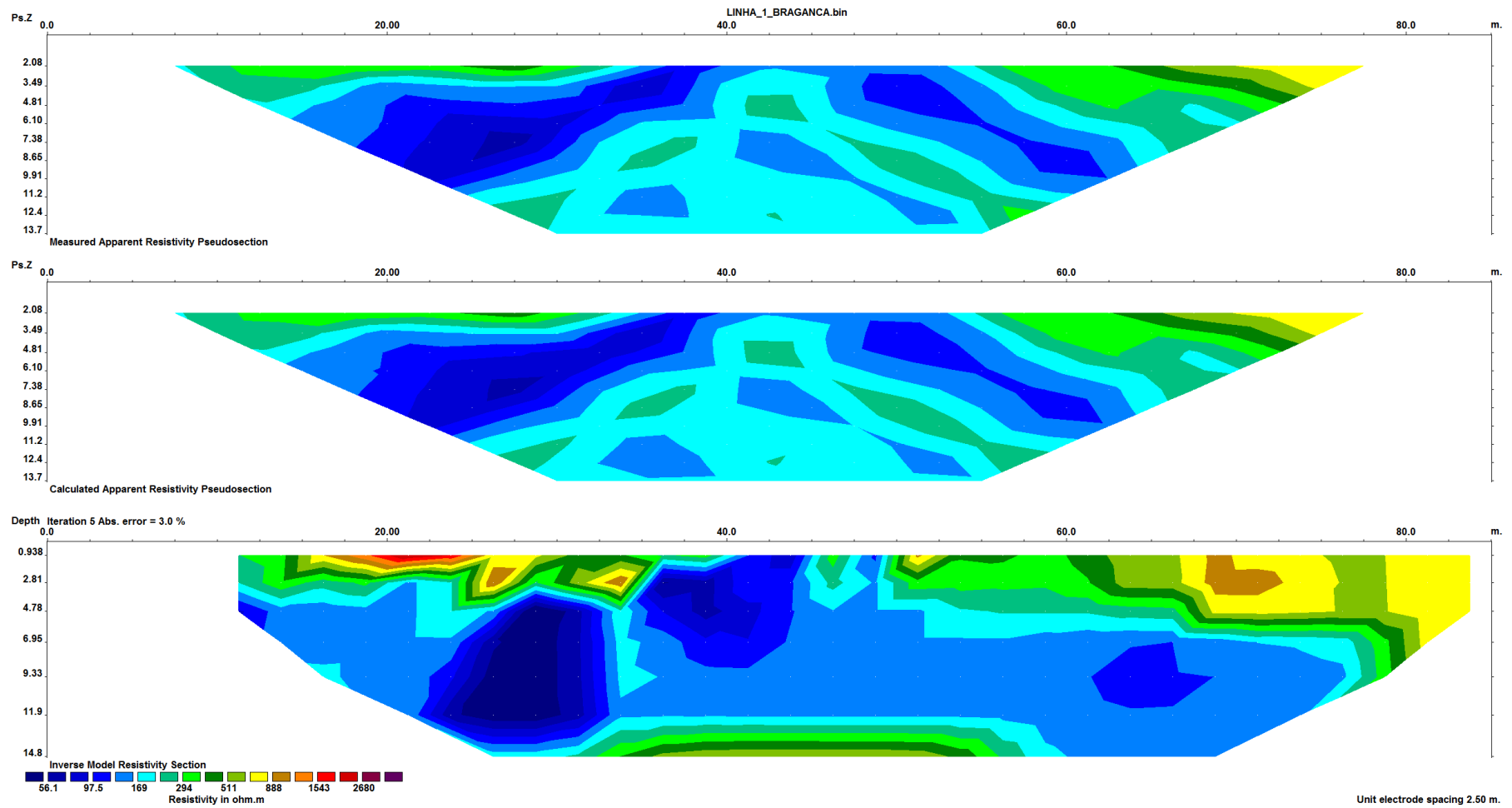


Figura 18 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1.

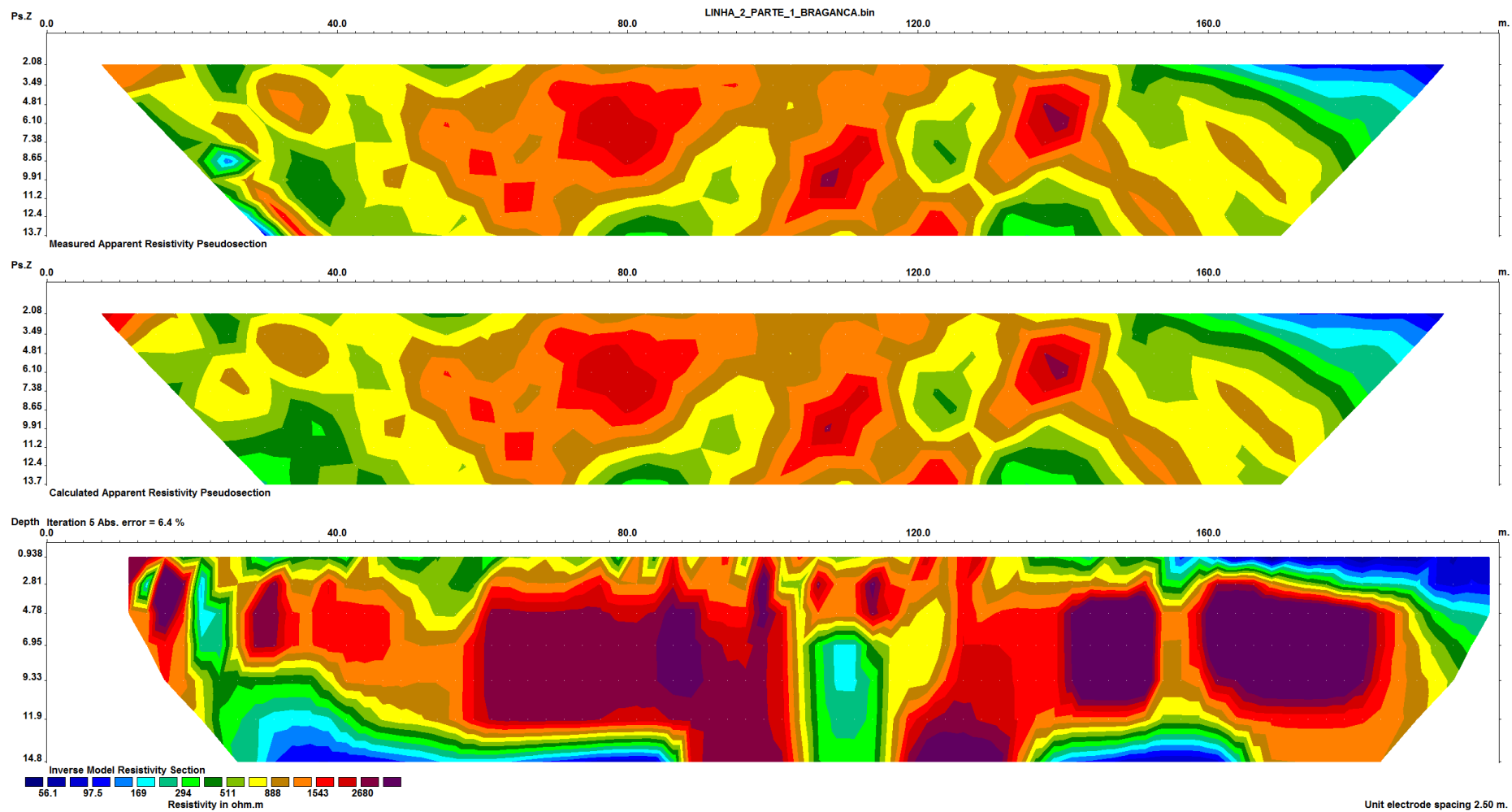


Figura 19 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2_P1.

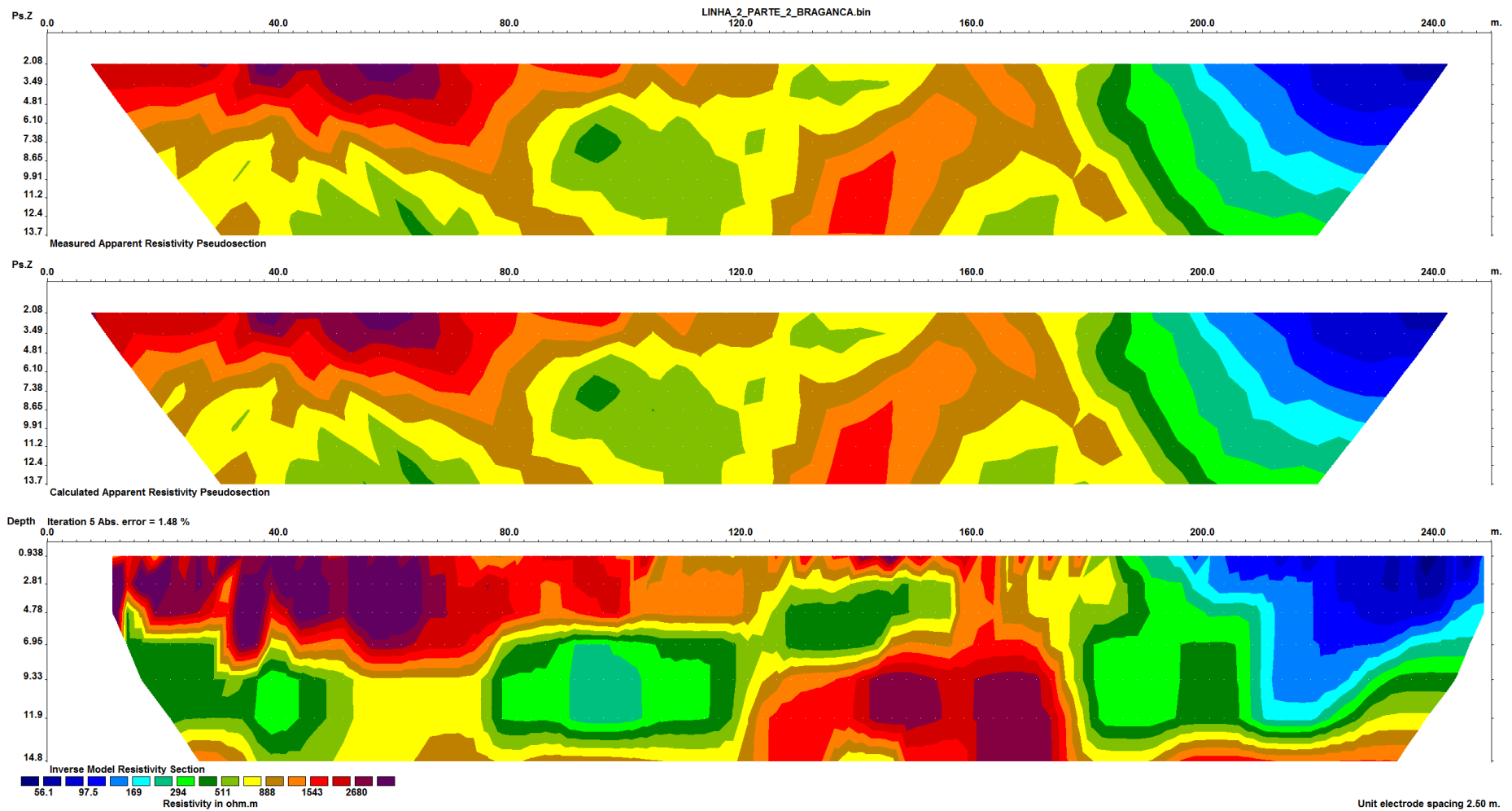


Figura 20 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2_P2.