

**SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL  
CPRM**

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

**RELATÓRIO DE GEOFÍSICA**

**(Brotas - SP)**

**Autores: Jairo J. C. Andrade; Carla C. M. Moraes; Luiz G. R. Pinto**

**São Paulo, 21 de fevereiro de 2020.**

## Sumário

1. INTRODUÇÃO .....	3
2. MATERIAIS e MÉTODOS .....	4
<b>2.1. Métodos Elétricos</b> .....	4
<b>2.2. Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	4
<b>2.3. Caminhamento Elétrico</b> .....	5
<b>2.4. Equipamentos Utilizados</b> .....	7
3. AQUISIÇÃO DOS DADOS .....	8
4. PROCESSAMENTO DOS DADOS .....	13
<b>4.1. Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	13
<b>4.2. Caminhamento Elétrico</b> .....	14
5. INTERPRETAÇÃO.....	17
<b>5.1. Sondagem Elétrica Vertical</b> .....	17
<b>5.2. Caminhamento Elétrico</b> .....	18
6. RESULTADOS .....	23
7. REFERÊNCIAS .....	25
8. APÊNDICE .....	26

## 1. INTRODUÇÃO

No projeto “Cartas de Suscetibilidade a Movimentos Gravitacionais de Massa e Inundações” foi realizada uma campanha de geofísica terrestre, levantamento elétrico, com objetivo de obter dados subsuperficiais dos processos erosivos do tipo *piping* observados na cabeceira do Córrego Santa Maria. O levantamento ocorreu no Município de Brotas, entre os dias 21 e 24 de outubro de 2019, com equipe composta por um geofísico, uma geóloga e um auxiliar de campo.

A expansão urbana desordenada pode gerar graves consequências ao meio ambiente. A falta de planejamento no escoamento de águas pluviais, aliado à baixa coesão de alguns terrenos pode proporcionar o surgimento de voçorocas, cuja evolução pode resultar em riscos geotécnicos para a população ao redor. Neste contexto, a geofísica torna possível, de forma rápida e eficiente, a investigação de perfis de alteração de solos, bem como condição de saturação e processos erosivos 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 litológicos, presença de cavidades e permeabilidade dos solos.

Assim, estes estudos vão além da proposta, atingindo escalas de trabalhos maiores, com resultados pontuais, mas bastante esclarecedores do contexto geológico-geotécnico e que podem, muitas vezes, ser inferidos para o restante do município e também em outras localidades com as mesmas características. Desta forma, conhecer estes locais e compreender estes fenômenos de *piping*, pode ser um insumo importante para a produção das cartas de suscetibilidade a movimentos de massa e os estudos geofísicos compreendem uma ferramenta de apoio para este entendimento.

## 2. MATERIAIS e MÉTODOS

### 2.1. 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 descontinuidades 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.

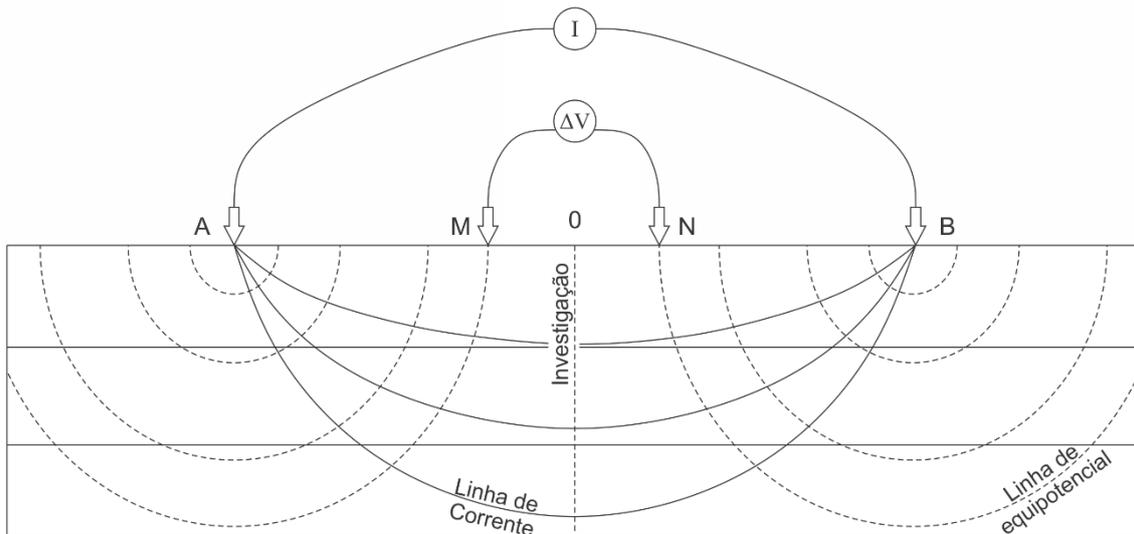
A resistividade elétrica é calculada pela seguinte equação:

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

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).

### 2.2. Sondagem Elétrica Vertical

A técnica da SEV consiste numa sucessão de medidas de um parâmetro geoeletrico 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:

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

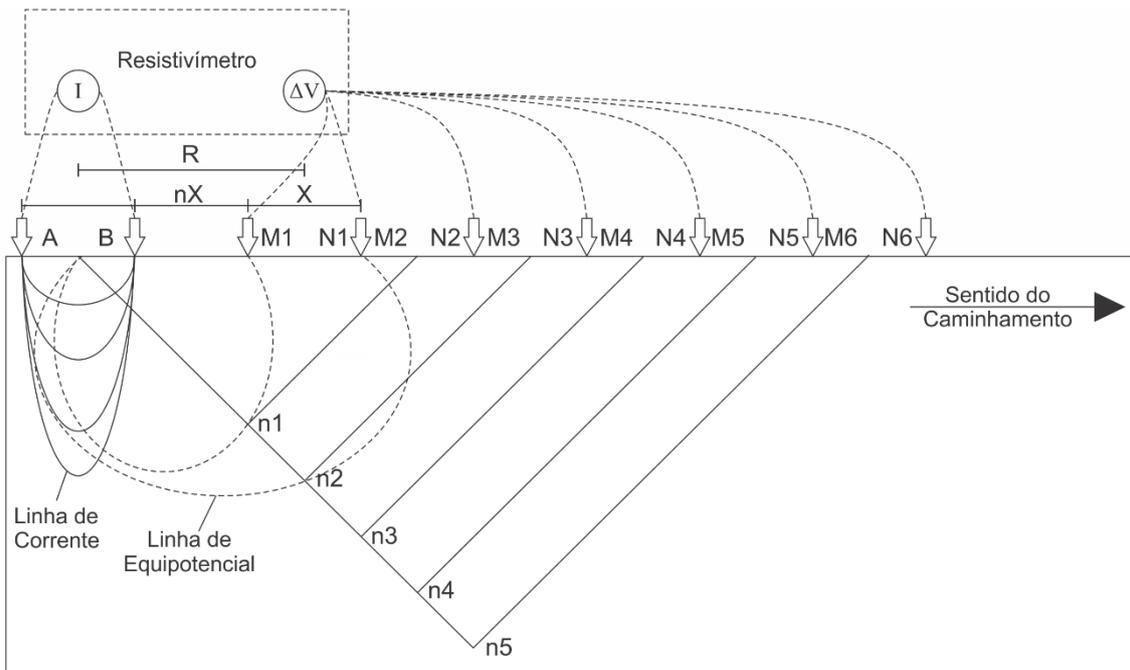
O arranjo utilizado foi o Schlumberger em que os eletrodos (AB) são afastados do centro do arranjo a cada leitura, investigando cada vez mais profundo, e os eletrodos (MN) se mantêm fixos. As leituras deste arranjo estão menos sujeitas as variações laterais no parâmetro físico medido, irregularidades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

### 2.3. 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 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).

#### 2.4. 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 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, 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.





**Figura 5** - Vista aérea a norte da área de pesquisa, onde é possível ver o bairro Jardim Modelo a esquerda e Jardim Felicidade a direita e também o conjunto habitacional em construção Brotas "E".



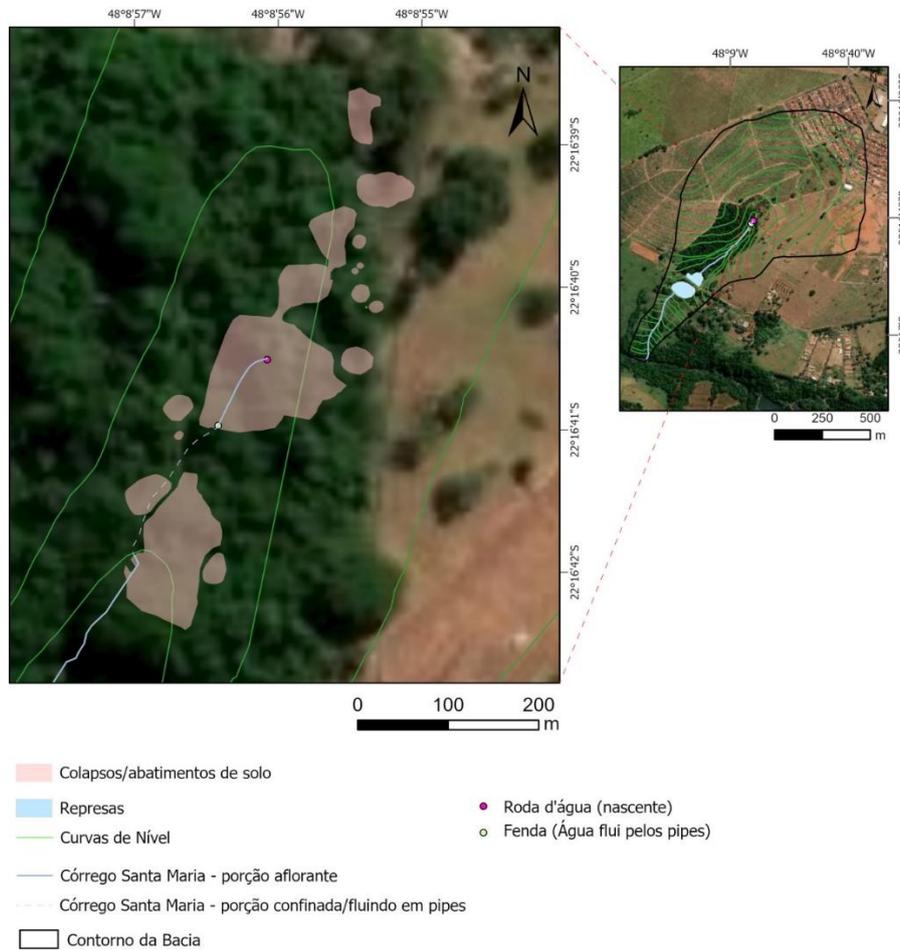
**Figura 6** - Área de pesquisa, com porção reflorestada e mata natural. Ao fundo área em construção do Conjunto Habitacional Brotas "E".

Um polígono de quatro vértices foi escolhido como alvo para a prospecção dos colapsos e abatimentos de solo, englobando áreas com uso e ocupação diversos para que fosse possível compreender o fenômeno erosivo em diferentes contextos (**Figura 7**).



**Figura 7** - Uso e ocupação do solo na área de pesquisa

Numa primeira visita foi feito o reconhecimento da região, delimitando os locais onde os abatimentos do terreno são visíveis e onde existem os colapsos e as fendas (Figura 8), para então se propor a direção e o sentido e os pontos de interesse dos ensaios geofísicos.



**Figura 8** - Detalhamento dos colapsos e abatimentos

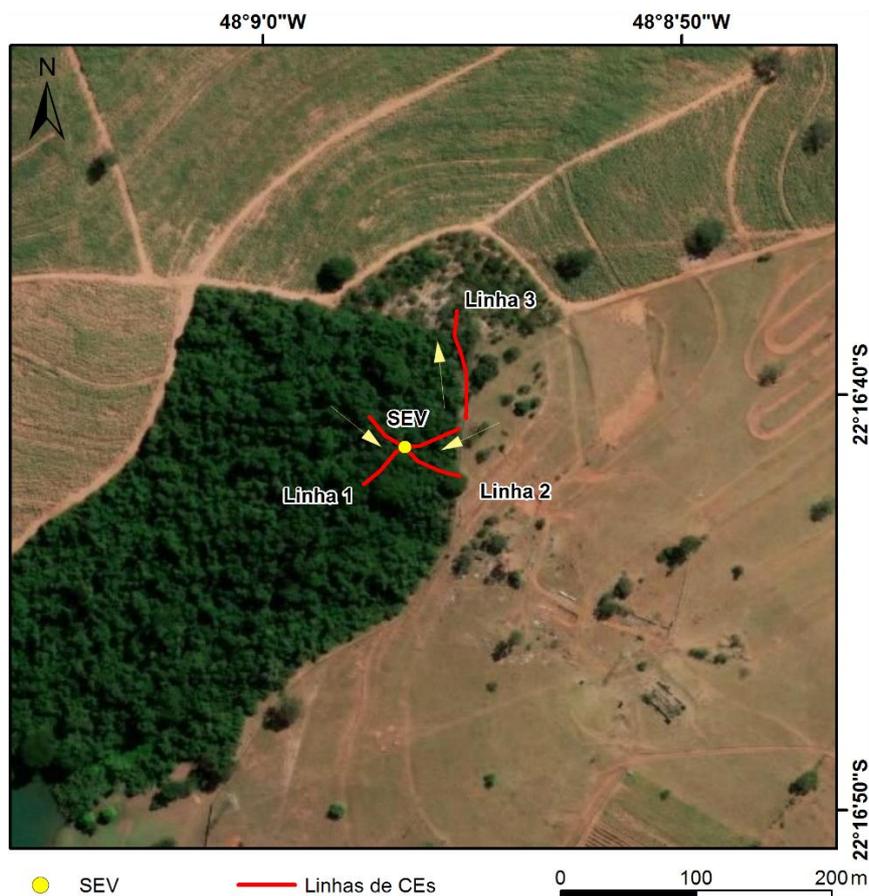
A área em destaque na **Figura 8** apresenta colapsos no solo arenoso e formação de cavernas no arenito (**Figura 9**).



**Figura 9** - Colapsos verificados na área.

Deste modo foi realizado um levantamento geofísico como uma ferramenta auxiliar no entendimento destes processos erosivos. Entender estes fenômenos é essencial para evitar graves impactos ambientais e direcionar o ordenamento do desenvolvimento urbano, resguardando o meio ambiente e o bem-estar da população inserida na área.

Foram realizados três Caminhamentos Elétricos (CEs) e uma Sondagem Elétrica Vertical (SEV) na região. Os CEs foram realizados na tentativa de mapear a localização subterrânea das cavernas e inferir as direções dos fluxos subterrâneos. A SEV foi realizada sobre a principal fenda, com intuito de estabelecer o comportamento geolétrico da cavidade conhecida presente no arenito (Figura 10).



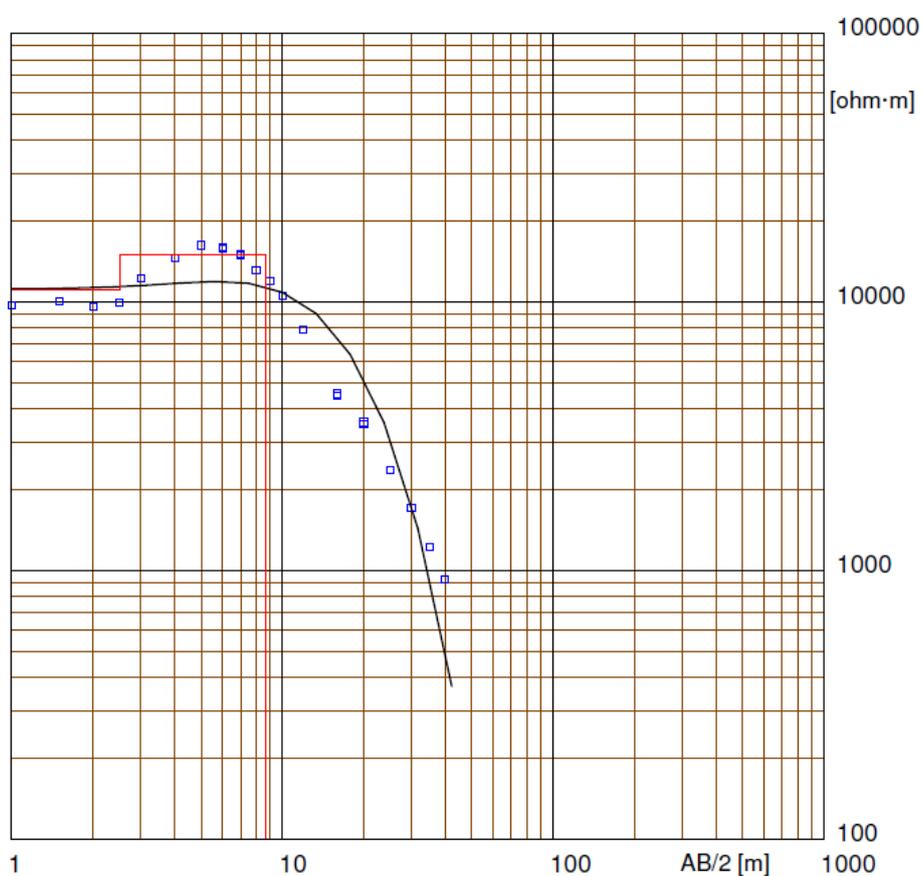
**Figura 10** - Localização dos levantamentos geofísicos, limites na área destacada (as flechas indicam o sentido dos CEs).

## 4. PROCESSAMENTO DOS DADOS

### 4.1. 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 pequenas intervenções manuais na espessura das camadas na tentativa de ajustar o modelo o mais coerente possível com a espessura do afloramento visto no campo.

A inversão da SEV (**Figura 11**) resultou num modelo de 3 camadas geoeletricas.



Location X = 793776 Y = 7533607 Z = 642 Azim = 0

Model			
Resistivity	Thickness	Depth	Altitude
[ohm·m]	[m]	[m]	[m]
11175	2.5	642	
14990	6.2	2.5	639.5
.009		8.7	633.3

**Figura 11** – Ajuste dos dados medidos e calculados da SEV.

As tabelas de dados encontram-se no apêndice.

## 4.2. 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. As Seções inversas de resistividade elétrica são vistas nas **Figuras 12, 13 e 14**.

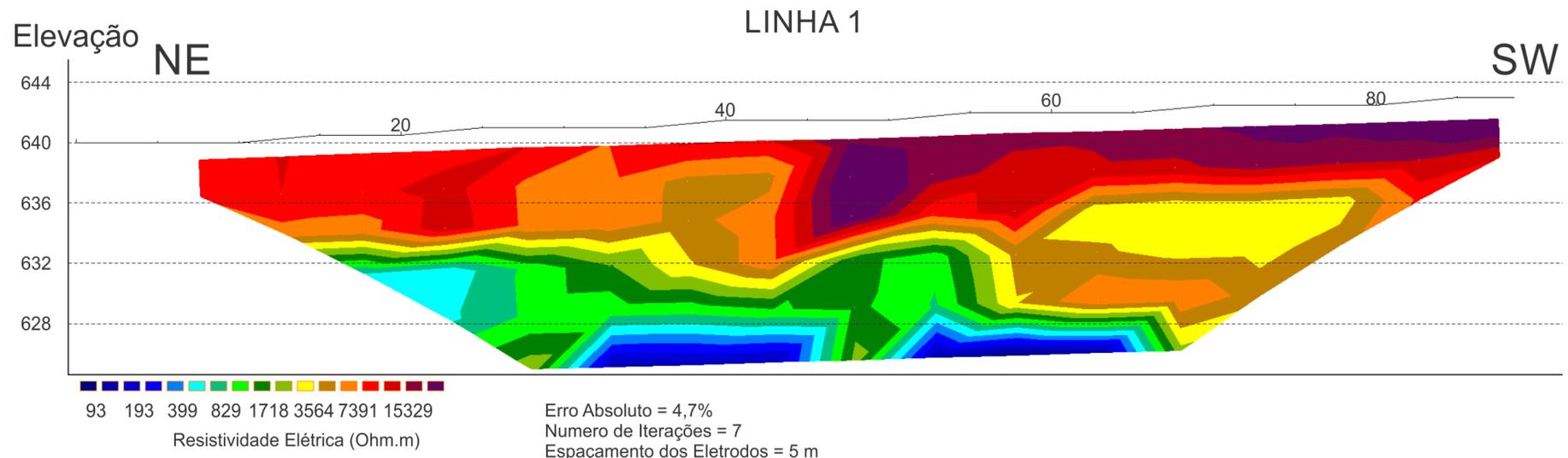
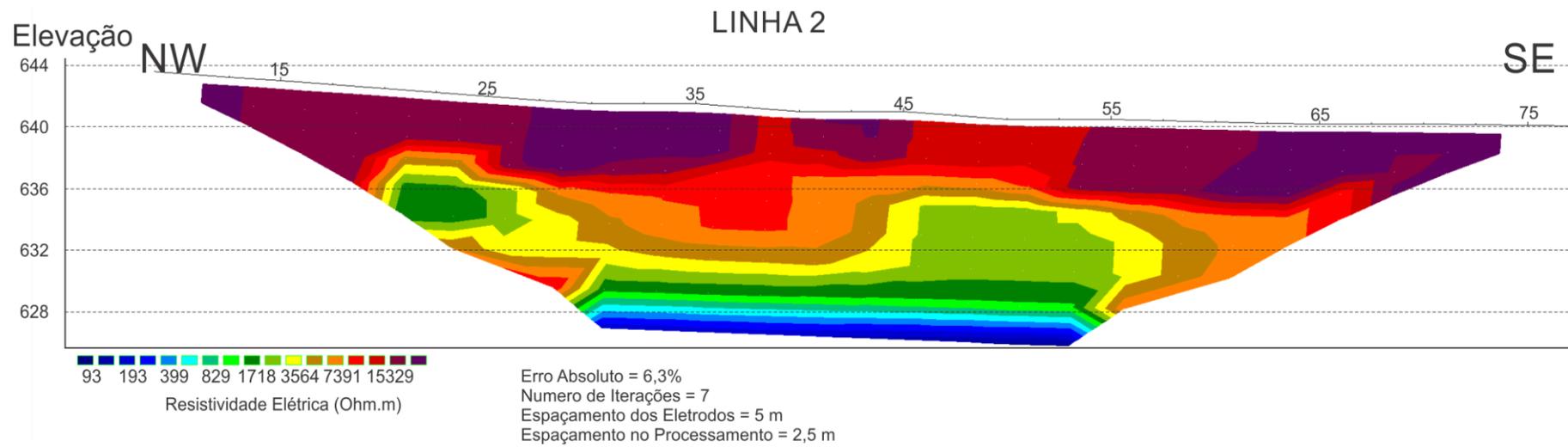
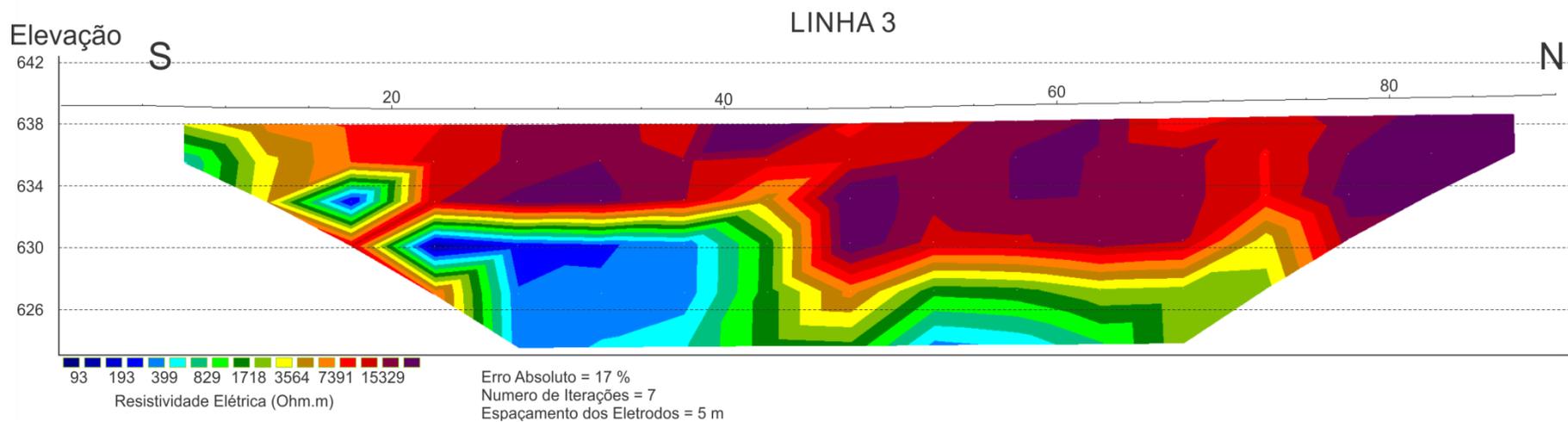


Figura 12 - Seção inversa da Linha 1.



**Figura 13 - Seção inversa da Linha 2.**



**Figura 14** - Seção inversa da Linha 3.

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

## 5. INTERPRETAÇÃO

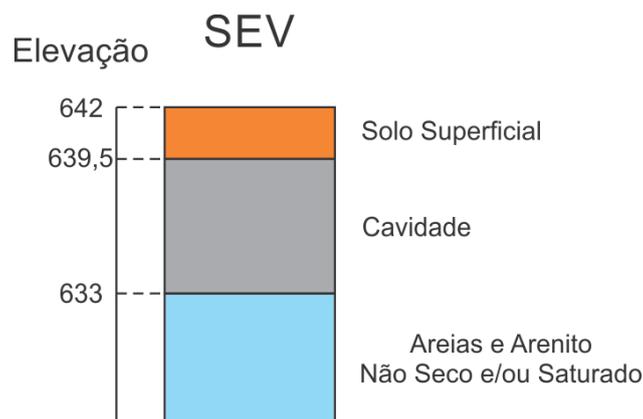
### 5.1. Sondagem Elétrica Vertical

O contexto geológico verificado nos afloramentos e os valores de resistividades indicam que a litologia é constituída basicamente por areias e arenito (Telford et al., 1990). A primeira camada geoeétrica foi correlacionada com areias e/ou arenitos secos, a camada seguinte, com resistividade acima de 12.000 ohm.m, foi correlacionada com a cavidade previamente conhecida (Figura 15), e a última camada foi correlacionada com areias e arenitos não secos e/ou saturados.



**Figura 15** - Cavidade principal. Ensaios geofísicos, SEV e Linha 2, realizados sobre a caverna.

A SEV apresenta modelo geoeétrico de três 3 camadas, interpretadas conforme modelo da Figura 16.



**Figura 16** - Interpretação do modelo de camadas das SEV.

Na etapa de inversão, o processamento de dados da SEV é realizado presumindo a condição ideal onde os modelos de camadas geolétricas estão dispostos em planos, paralelos e horizontais. Uma cavidade subvertical inserida em uma ou mais camadas afeta a qualidade dos resultados, neste caso o modelo não apresenta um bom ajuste entre os dados medidos e os calculados, desta forma a interpretação destes resultados deve ser muito cuidadosa.

Neste trabalho eram conhecidas a localização e a espessura da cavidade e do pacote maciço sobre a caverna. Estes parâmetros foram utilizados no ajuste, mas a confiabilidade da profundidade do contato entre a caverna e a litologia não seca e/ou saturada é baixa, pois o modelo apresenta baixa sensibilidade. O ponto mais relevante na execução da SEV era entender a resposta da resistividade elétrica de uma cavidade dentro de uma litologia arenosa.

## 5.2. Caminhamento Elétrico

O contexto geológico, a interpretação da correlação da SEV realizada sobre a cavidade e os valores de resistividades orientou a interpretação dos perfis com três principais horizontes: solo arenoso seco, solo arenoso e/ou arenito não seco (umidade proveniente de franja capilar e/ou evapotranspiração) e solo arenoso e/ou arenito saturado (Telford et al., 1990).

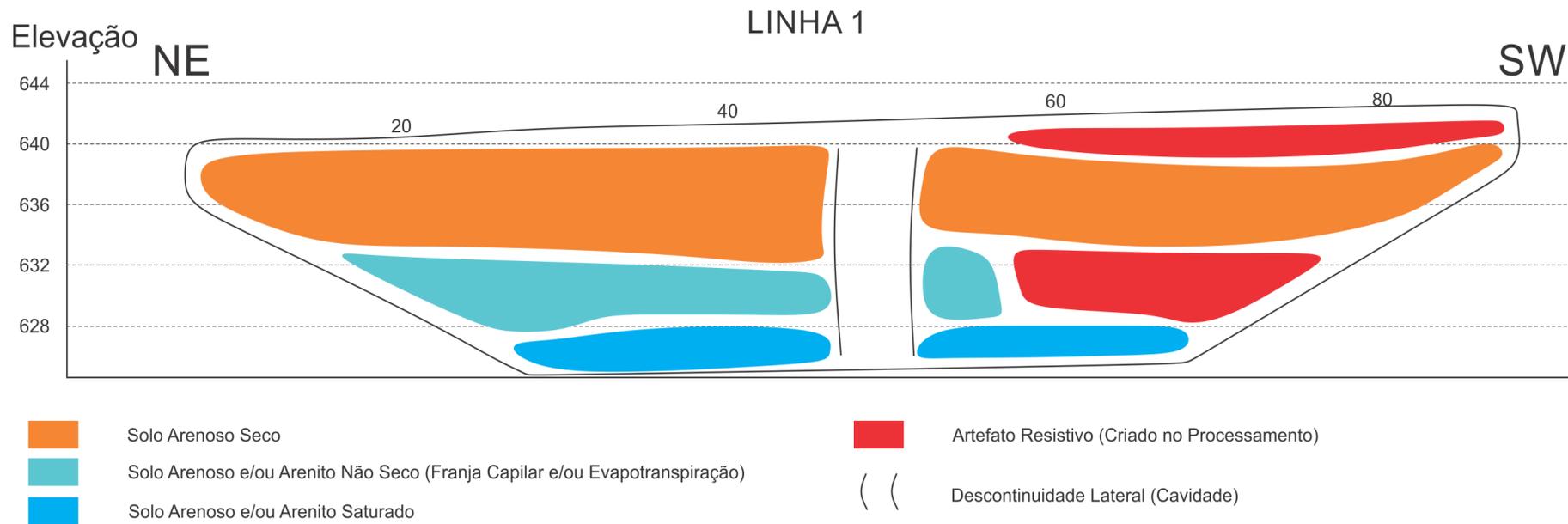
No primeiro horizonte os perfis apresentam algumas discontinuidades laterais, faixas com resistividade elétrica acima de 12.000 ohm.m e, conforme correlacionado na SEV, estas discontinuidades devem estar associadas aos topos das cavidades. A

contribuição lateral dos espaços vazios devem criar corpos resistivos mais largos do que realmente são. Deste modo essas zonas com anomalias resistivas indicam as áreas com maior potencial de localização do topo das cavidades, não exatamente sua dimensão.

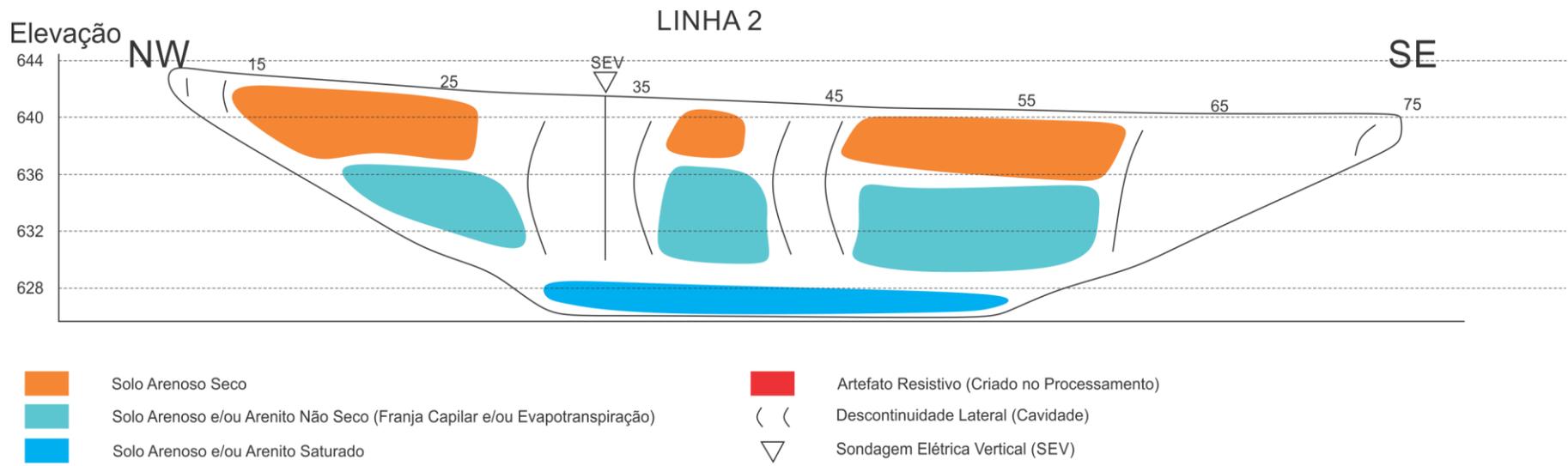
A Linha 1 (Figura 17) apresenta região anômala, com altos resistivos, entre as posições 45 – 55 m do CE, este trecho de 10 m está situado próximo a área onde foi verificada a principal cavidade em campo. Como a cavidade é muito alongada verticalmente, a faixa resistiva verificada entre as posições 60 e 80 m do perfil deve estar associada a um “artefato”, este artefato é um “corpo” obtido no modelo resultante da inversão, não necessariamente condizente com a realidade (DAHLIN & ZHOU 2004).

A Linha 2 (Figura 18) apresenta três regiões anômalas. A primeira fica entre as posições 27 - 37 m, trecho que compreende o ponto onde ficou posicionado o centro da SEV (Figura 15). A segunda e a terceira zona ficam entre as posições 40 - 45 e 62 – 75 m, estas posições ficam próximas a abatimentos visto no solo e que podem chegar a mais de 2 m de profundidade.

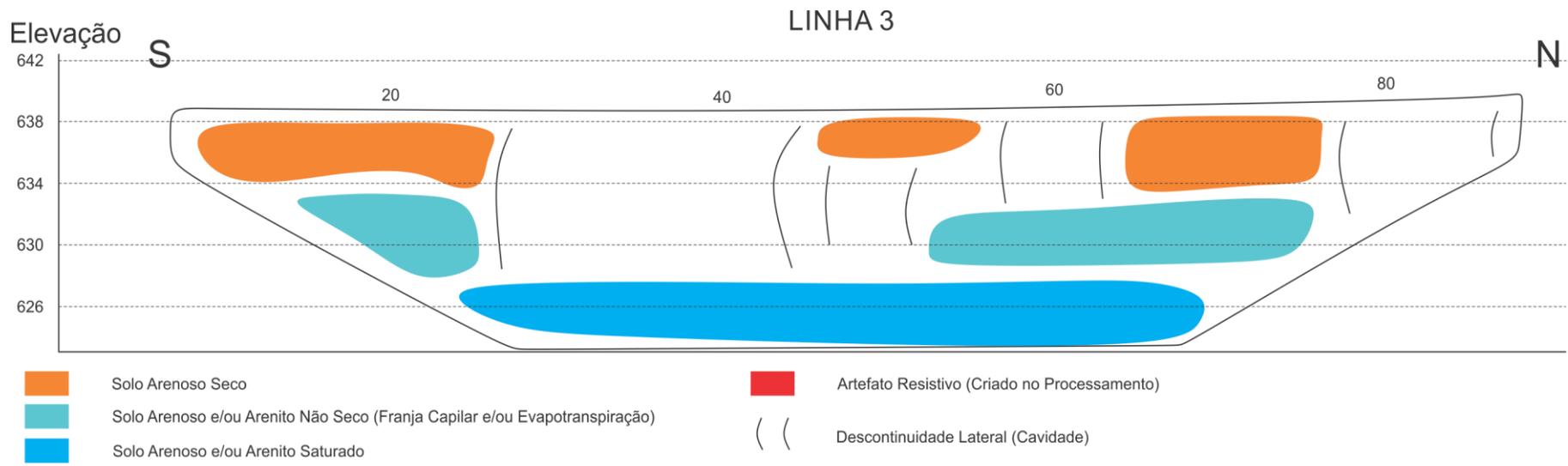
A Linha 3 (Figura 19) apresenta cinco regiões anômalas e este perfil é o que apresenta o maior erro na inversão, de 17 %. Vários abatimentos vistos na superfície do solo na proximidade desta linha indicam que na região existem várias cavidades próximas, isto afeta a qualidade dos dados. Este perfil apresenta maior possibilidade de conter artefatos o que poderia causar interpretações equivocadas. Deste modo foram sinalizados apenas os centros das anomalias, localizadas nas posições 30, 42, 47, 60 e 85 m.



**Figura 17** - Linha 1 interpretada.



**Figura 18** - Linha 2 interpretada.

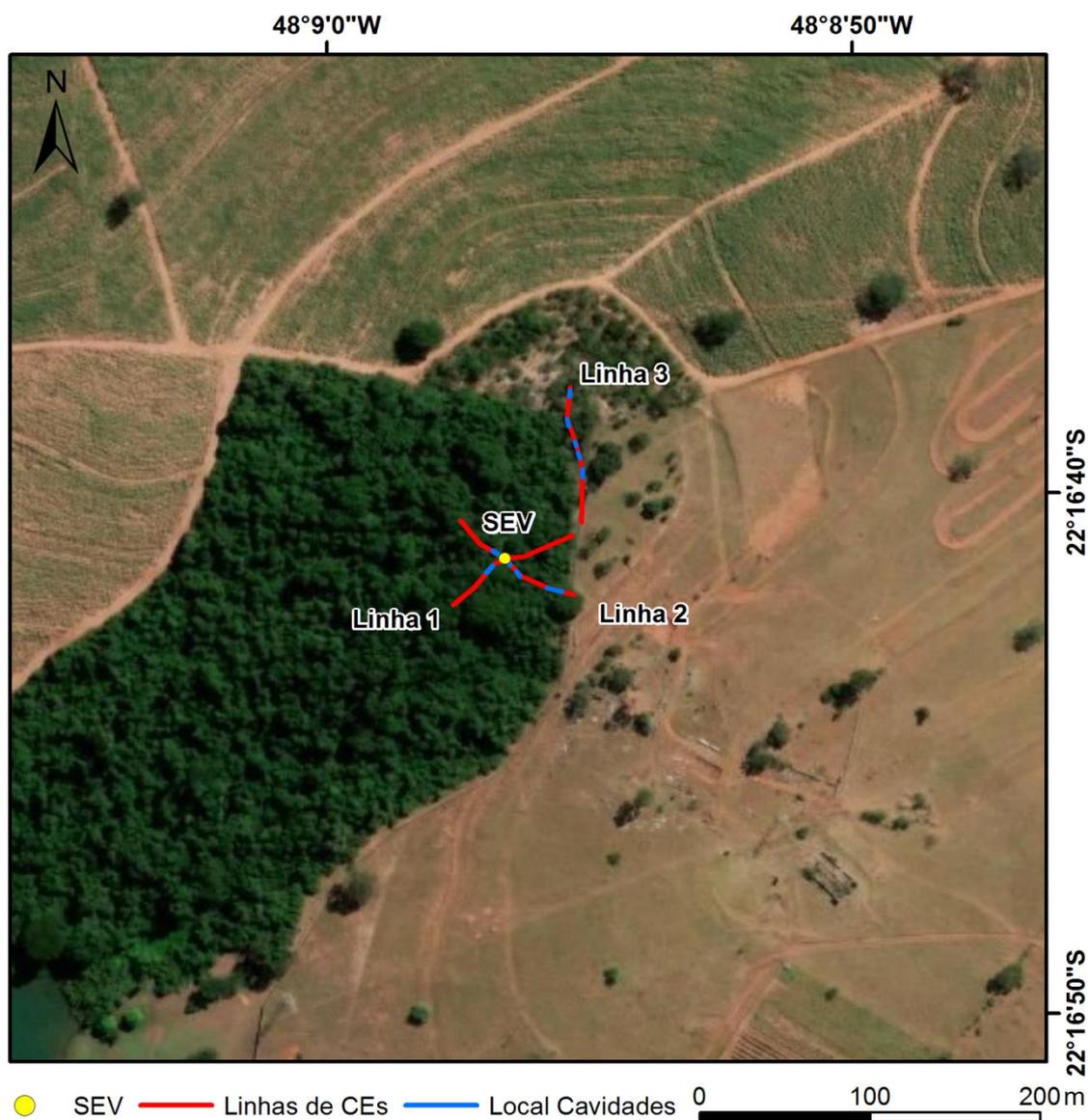


**Figura 19** - Linha 3 interpretada.

## 6. RESULTADOS

Nas regiões onde ocorrem a ausência de material/cavidades, o fluxo de corrente elétrica é dificultado, pois o ar é um excelente isolante elétrico. Os perfis de eletrorresistividade mostraram boa correlação ao indicar as possíveis localizações destas cavidades, inferidos por áreas com valores muito elevados da resistividade elétrica.

A Linha 2, que possui cavidade conhecida localizada aproximadamente na posição 30 m do CE, estabeleceu o parâmetro utilizado para extrapolar os resultados para os demais CEs. As regiões que apresentam valores anômalos de resistividade foram projetadas em superfície, exibindo a provável localização das cavidades na área estudada (**Figura 20**).



**Figura 20** – Em azul estão projetadas as localizações das possíveis cavidades.

As anomalias geolétricas indicam a presença de muitas cavidades, isto sugere que, a área é uma zona de convergência de águas subterrâneas que percolam por caminhos preferenciais, “esculpindo” galerias de cavernas. O mais provável é que nas regiões onde os fluxos se encontram, ocorram os maiores fenômenos de abatimentos e a ocorrência dos maiores colapsos. O processo erosivo ocorre efetivamente dentro da principal drenagem da área, isto indica que o processo natural está sendo potencializado pelo crescimento urbano.

## 7. REFERÊNCIAS

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

DAHLIN, T. & ZHOU, B. **A Numerical Comparison of 2D Resistivity Imaging With 10 Electrode Arrays**. *Geophysical Prospecting*, v.52, p.379-398, 2004.

ROCHA, G., **O Grande Manancial do Cone Sul**. *Estudos Avançados*, Universidade de São Paulo, São Paulo. V. 30, p. 191-213, 1997.

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

## 8. APÊNDICE

Field data and calculated values

MN/2 [m]	AB/2 [m]	DeltaV [mV]	I [mA]	K [-]	Resistivity [ohm·m]
.2	1	150228.6	117	7.54	9681
.2	1.5	112335.3	194	17.36	10052
.2	2	36884	120	31.1	9559
.2	2.5	26647.4	131	48.77	9921
.2	3	24010.3	138	70.37	12244
.2	4	16328.6	140	125	14579
.2	5	7954.3	96	196	16240
.2	6	6574.7	117	282	15847
1	6	40444.4	116	54.98	16044
.2	7	4361.1	111	385	15126
1	7	26043.8	110	75.4	14941
1	8	19547.6	124	98.96	13057
1	9	15206.8	134	126	11968
1	10	8982.5	112	156	10471
1	12	6642.9	158	225	7917
1	16	2853.2	214	401	4475
4	16	10262	213	94.25	4547
1	20	1087.4	160	627	3566
4	20	3713.1	160	151	3510
4	25	2540.5	256	239	2375
4	30	1029.9	210	347	1704
4	35	524.8	204	475	1224
4	40	303.7	204	622	927

Figura 21 - Dados da SEV.

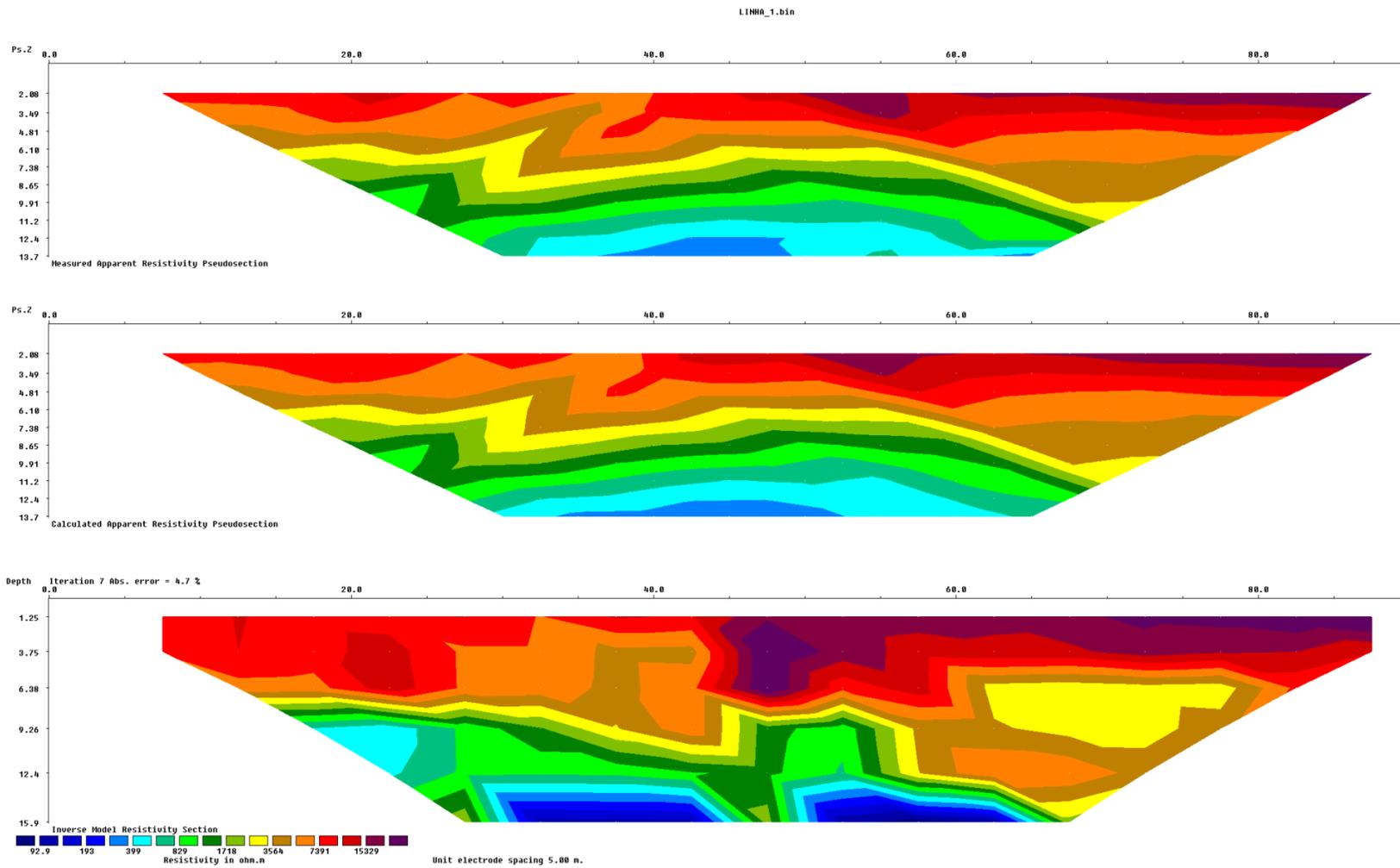
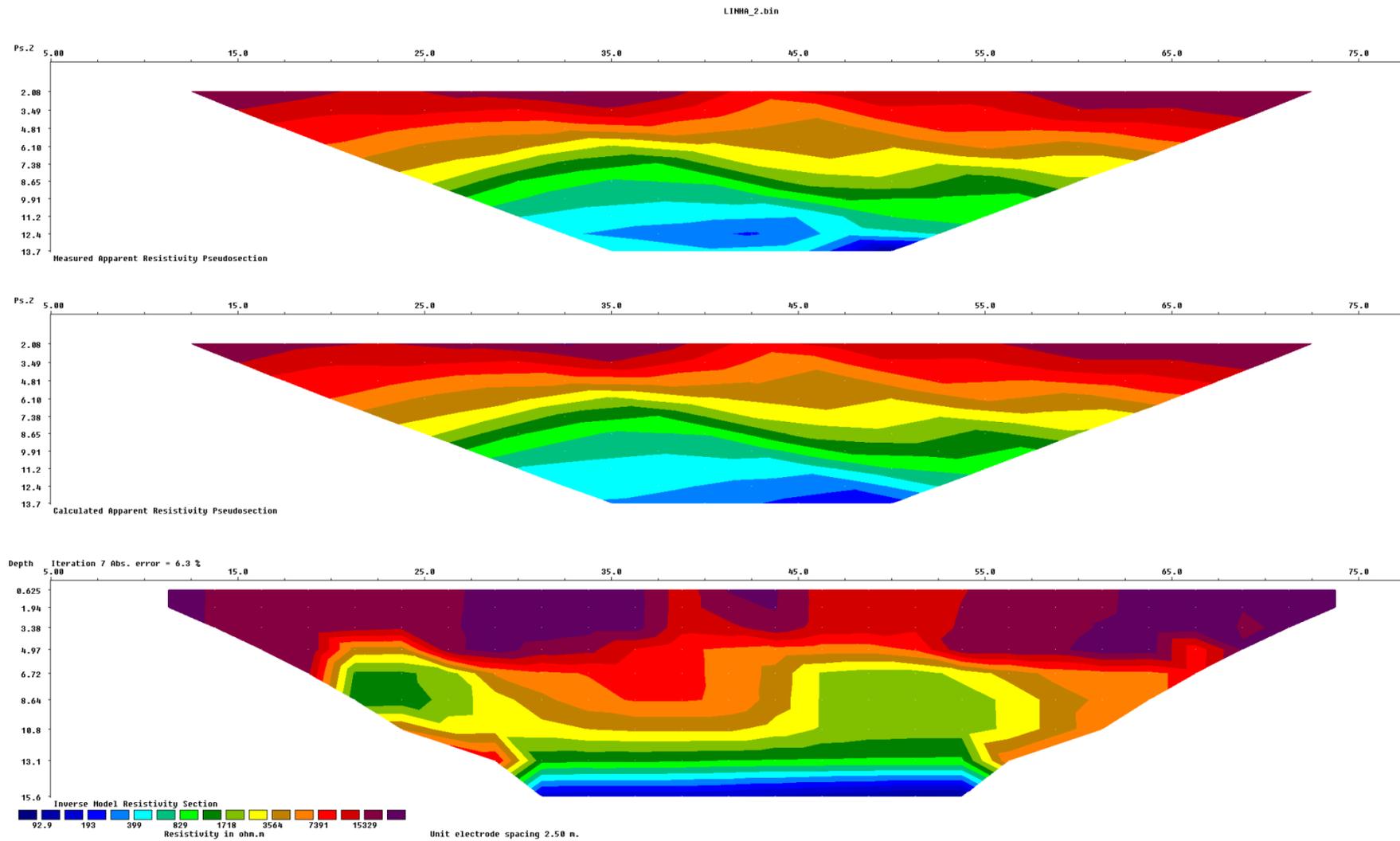


Figura 22 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 1.



**Figura 23** – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 2.

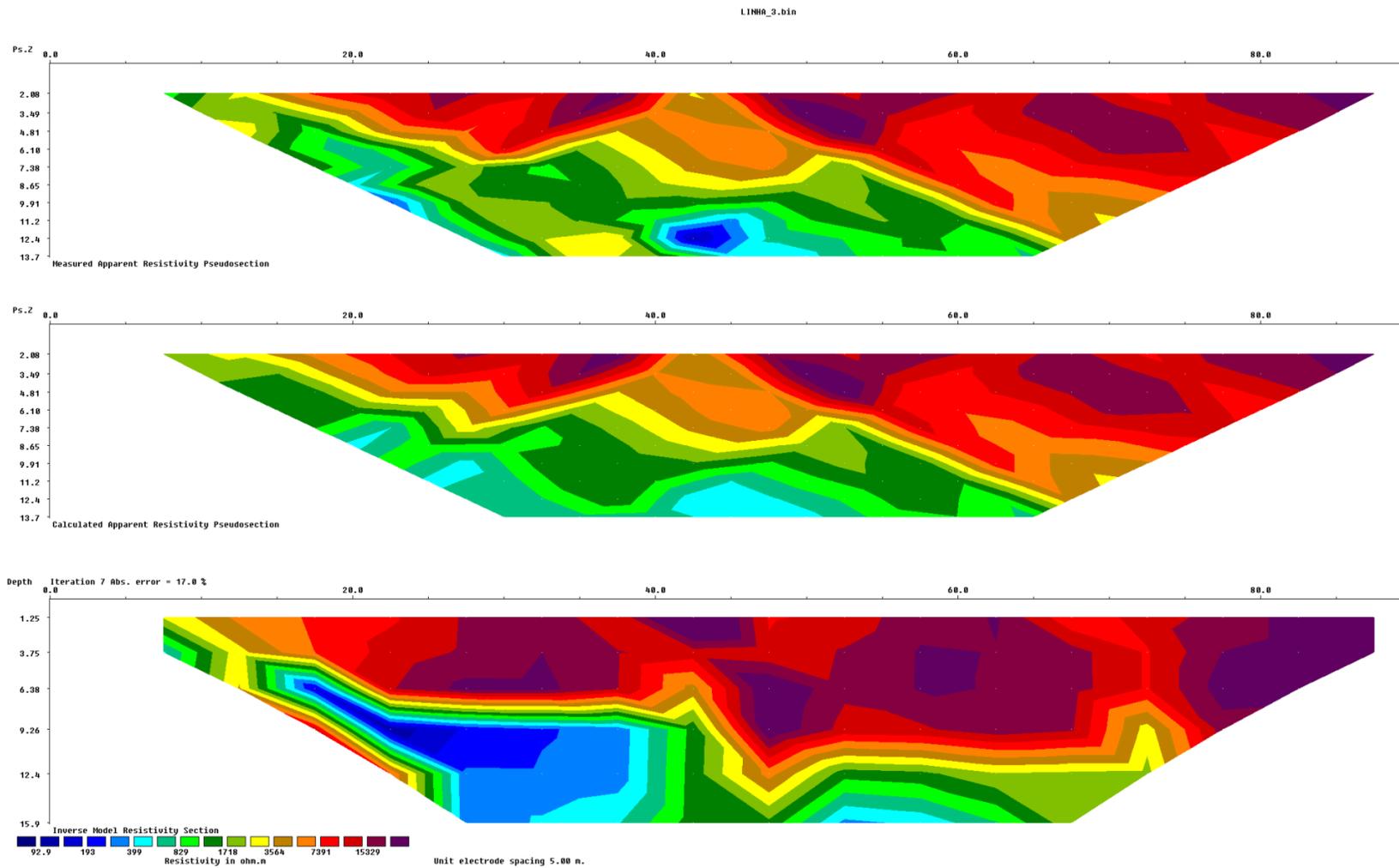


Figura 24 – Pseudo-Seção medida, calculada e Seção Invertida da Linha 3.