



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

AMANDA CECÍLIA NEUHAUSS AGUIAR

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS ARRANJOS DIPOLO-DIPOLO E POLO-DIPOLO  
NA DETECÇÃO DE CAVERNAS NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GOIÁS**

Orientador: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília, DF

Dezembro, 2019



Universidade de Brasília

Instituto de Geociências

AMANDA CECÍLIA NEUHAUSS AGUIAR

**ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS ARRANJOS DIPOLO-DIPOLO E POLO-DIPOLO  
NA DETECÇÃO DE CAVERNAS NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GOIÁS**

Monografia de Conclusão do Curso apresentado  
ao Instituto de Geociências da Universidade de  
Brasília, como parte das exigências para obtenção  
do título de Bacharel em Geofísica.

Orientação: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Brasília, DF

Dezembro, 2019

## Folha de Aprovação

AMANDA CECÍLIA NEUHAUSS AGUIAR

### ANÁLISE DA EFICIÊNCIA DOS ARRANJOS DIPOLO-DIPOLO E POLO-DIPOLO NA DETECÇÃO DE CAVERNAS NA REGIÃO DE MAMBAÍ, GOIÁS

Monografia de Conclusão do Curso de Graduação  
em Bacharelado em Geofísica do Instituto de  
Geociências da Universidade de Brasília

Orientação: Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Aprovado em:

Banca Examinadora

Prof. Dr. Welitom Rodrigues Borges

Instituição: IG/UnB

Assinatura: \_\_\_\_\_

Prof. Dr. José Elói Guimarães Campos

Instituição: IG/UnB

Assinatura: \_\_\_\_\_

Dr. Yawar Hussain

Instituição: FT/UnB

Assinatura: \_\_\_\_\_

AGUIAR, ACN. **Análise da eficiência dos arranjos Dipolo-Dipolo e Polo-Dipolo na detecção de cavernas na região de Mambaí, Goiás.** Monografia (Curso de Graduação em Geofísica), Instituto de Geociências, UnB, Brasília/ DF, 2019, 85p.

### **Resumo**

Na Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio de Vermelho, localizada nos municípios de Mambaí e Buritinópolis – estado de Goiás, ocorrem cavernas em rochas da Formação Lagoa do Jacaré, do Grupo Bambuí. A remoção da vegetação e a implantação de pastagens, nas áreas de ocorrência de cavernas, potencializa o processo de dissolução das rochas e intensifica o rebaixamento do nível da água subterrânea. Deste modo, o mapeamento de cavernas torna-se essencial para um melhor planejamento de uso e ocupação do solo. Assim, o objetivo deste trabalho é localizar cavernas e eventuais cavidades com o método da eletrorresistividade. Antes da realização das etapas de campo, realizaram-se modelagens numéricas com informações geológicas disponíveis, para verificar quais os melhores parâmetros de campo. As simulações numéricas indicaram que os melhores resultados seriam obtidos com os arranjos dipolo-dipolo (DD), polo-dipolo (PD) e Wenner-Schlumberger (WS), usando-se espaçamento entre os eletrodos de no máximo 2,5 metros. Nas etapas de campo realizaram-se aquisições com os 3 arranjos ao longo de uma seção onde tinha-se a informação da posição de uma caverna. Ao longo das aquisições, verificou-se que os resultados obtidos com o arranjo WS não possibilitavam a localização de cavidades, deste modo optou-se por não continuar com as aquisições de dados com este arranjo. Os resultados obtidos com os arranjos DD e PD indicam que as cavidades que possuem algum volume de água em seu interior aparecem como anomalias condutivas. Nas seções de resistividade elétrica obtidas com o arranjo DD, as estruturas rasas de dissolução são melhores resolvidas que nas seções de PD, ao passo que as estruturas mais profundas são mais visíveis nas seções obtidas com o arranjo PD. A integração dos resultados possibilitou a detecção das cavernas Tarimba, Pasto de Vaca I e II, e que há possível conectividade entre estas cavernas e o rio Extrema.

**Palavras-chave:** Mambaí, APA Nascentes do Rio Vermelho, Eletrorresistividade.

AGUIAR, ACN. **Analysis of the efficiency of the Dipole-Dipole and Pole-Dipole arrangements in the detection of caves in Mambaí region, Goiás.** Monography (Undergraduate Course in Geophysics), Institute of Geosciences, UnB, Brasília/ DF, 2019, 85p.

### **Abstract**

In the Sources of Rio de Vermelho Environmental Protection Area, located in the municipalities of Mambaí and Buritinópolis - Goiás state, there are caves in rocks of the Lagoa do Jacaré Formation, of the Bambuí Group. The removal of vegetation and the implantation of pastures in the areas of cave occurrence, potentiates the process of rock dissolution and intensifies the lowering of the groundwater level. Thus, cave mapping becomes essential for better planning of land use and occupation. Consequently, the objective of this work is to locate caves and cavities with the 2D resistivity method. Prior to the field steps, numerical modeling was performed with available geological information to verify the best field parameters. Numerical simulations indicated that the best results would be obtained with the dipole-dipole (DD), pole-dipole (PD) and Wenner-Schlumberger (WS) arrays, using electrode spacing of a maximum of 2.5 meters. In the field stages were made acquisitions with the 3 arrangements along a section where had the information of the position of a cave. Throughout the acquisitions, it was found that the results obtained with the WS arrangement did not allow the location of cavities, so it was decided not to continue with the data acquisitions with this arrangement. The results obtained with the DD and PD arrangements indicate that the cavities that have some volume of water inside them appear as conductive anomalies. In the electrical resistivity sections obtained with the DD arrangement, the dissolution shallow structures are better resolved than in the PD sections, while the deeper structures are more visible in the sections obtained with the PD arrangement. The integration of the results made it possible to detect Tarimba, Pasto de Vaca I and II caves, and that there is possible connectivity between these caves and the Extreme River.

**Key words:** 2D resistivity, Sinkhole, Mambaí.

## **Agradecimentos**

Gostaria de agradecer à todas as pessoas que colaboraram para a realização deste trabalho, tanto diretamente, como indiretamente.

Obrigada Dona Zinha e Seu Antônio, por me receberem tão bem em sua residência e fornecerem todo o suporte para a realização do meu projeto, sem os senhores com certeza não haveria trabalho.

Obrigada, de coração, a todos que foram para campo comigo, Eduardo (Dudu), Marcos, Pedro Brayner e Victor, por aceitaram essa aventura e darem o melhor de si. Obrigada também a todos que me ajudaram e me orientaram durante todo o processo, pela paciência e todo o suporte.

Agradeço ao meu professor orientador e amigo Welitom Borges por todo o apoio na realização do projeto, pelos ensinamentos, pelos conselhos, pela paciência e principalmente por acreditar em mim. Obrigada pela disponibilidade mesmo quando as coisas não estavam indo bem.

Agradeço o professor Rogério Uagoda por me fornecer este projeto e todo o apoio para que ele pudesse ser desenvolvido. Obrigada por me apresentar Mambaí, este lugar maravilhoso com pessoas incríveis que conquistaram meu coração.

Obrigada Mendes e Péricles por me levarem e me trazerem em segurança de Mambaí todas as vezes que precisei, pela disponibilidade e todo apoio em campo. Vocês foram essenciais para que este trabalho tenha sido um sucesso.

Agradeço demais às mulheres da minha vida, por me inspirarem e por criarmos este círculo de apoio e confiança, juntas vamos mais longe! Obrigada Amanda Luma, Bianca, Duda, Kimberly, Moara, Isabele e todas as mulheres que indiretamente me dão forças para continuar lutando por espaço neste meio tão masculino.

Obrigada Celso por todo o apoio emocional e ajuda neste processo que não foi fácil. Obrigada por acreditar em mim e por me levantar em todos os momentos em que estive fraca. Sei que não foi fácil para você, agradeço demais por tudo e espero um dia poder te retribuir todo este cuidado. E acima de tudo, agradeço à nossa amizade e parceria.

Agradeço também a minha família, que desde de sempre me apoiou para que eu tivesse todas as condições para continuar estudando, me sinto muito privilegiada por tudo que

## IV

vocês fizeram por mim. Vocês são a minha base. Em especial à minha mãe, ao meu padrasto, à minha irmã, à minha vó e ao meu pai.

Por fim, agradeço ao Instituto Brasileiro de Desenvolvimento e Sustentabilidade (IABS) e ao Subprojeto Susceptibilidade Hidrológica e parceria ao Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade (ICMBio) pelo suporte financeiro.

## SUMÁRIO

<b>Resumo .....</b>	<b>I</b>
<b>Abstract .....</b>	<b>II</b>
<b>Agradecimentos.....</b>	<b>III</b>
<b>Índice De Figuras.....</b>	<b>VII</b>
<b>Índice De Tabelas .....</b>	<b>XI</b>

### CAPÍTULO 1

<b>1. Introdução.....</b>	<b>1</b>
1.1. Área De Estudo .....	1
1.2. Objetivos .....	2
1.3. Justificativa.....	3
1.4. Contexto Geológico.....	4

### CAPÍTULO 2

<b>2. Revisão Bibliográfica .....</b>	<b>9</b>
---------------------------------------	----------

### CAPÍTULO 3

<b>3. Eletrorresistividade .....</b>	<b>14</b>
3.1. Arranjos Eletródicos.....	19

### CAPÍTULO 4

<b>4. Simulações Numéricas .....</b>	<b>21</b>
--------------------------------------	-----------

### CAPÍTULO 5

<b>5. Aquisição De Dados.....</b>	<b>27</b>
5.1. Teste De Arranjos.....	31

### CAPÍTULO 6

<b>6. Modelagem .....</b>	<b>32</b>
6.1. Filtragem .....	32
6.2. Inversão	34

### CAPÍTULO 7

<b>7. Resultados .....</b>	<b>38</b>
----------------------------	-----------

7.1. Teste De Arranjos Eletródicos .....	38
7.2. Interpretação .....	40
7.2.1. Linha 1 .....	40
7.2.2. Linha 2 .....	43
7.2.3. Linha 3 .....	45
7.2.4. Linha 4 .....	47
7.2.5. Linha 5 .....	49
7.2.6. Linha 6 .....	51
7.2.7. Linha 7 .....	53
7.2.8. Linha 8 .....	55
7.2.9. Linha 9 .....	57
7.2.10. Linha 10 .....	59
7.2.11. Linha 11 .....	61
7.3. Análise Conjunta .....	63

## **CAPÍTULO 8**

<b>8. Conclusões E Recomendações .....</b>	<b>65</b>
<b>Bibliografia.....</b>	<b>68</b>

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização dos Municípios pertencentes à Área De Proteção Nascentes Do Rio Vermelho e ortofoto contendo a área de estudo. ....	2
Figura 2: Mapa geológico da Área De Proteção Ambiental Nascentes Do Rio Vermelho com a localização do local de pesquisa. ....	5
Figura 3: Bloco diagrama do sistema cárstico sugerido para a região de ocorrência das Cavernas Tarimba, Pasto De Vaca I e II, com respectivas fotografias das principais estruturas cársticas (modificado de STEVANOVIĆ, 2015). ....	8
Figura 4: (A) Definição básica de um sólido homogêneo eletricamente uniforme. (B) Circuito elétrico equivalente. ....	15
Figura 5: Representação idealizada do fluxo de corrente elétrica eletrolítico no subsolo homogêneo a partir de um ponto de injeção. ....	16
Figura 6: Representação esquemática da disposição de eletrodos em um arranjo convencional de eletrorresistividade. ....	17
Figura 7: Representação esquemática de uma aquisição de dados de resistividade elétrica com a técnica do Caminhamento Elétrico com o arranjo Wenner para 13 eletrodos. ....	18
Figura 8: Representação esquemática da disposição de eletrodos em investigações de eletrorresistividade. Arranjos (A) Dipolo Dipolo, (B) Pólo Dipolo, (C) Pólo Polo, (D) Wenner Schlumberger, (E) Schlumberger, e (F) Wenner. ....	19
Figura 9: Diagrama esquemático de malhas utilizado no software RES2DMOD (modificado de LOKE (2016)). ....	22
Figura 10: Esquema de uma caverna próxima à área de estudo. (A) Foto de campo mostrando as camadas acima da caverna, cada camada foi delimitada utilizando cores diferentes e (B) diagrama com a interpretação da foto, em que o primeiro limite vermelho separa a camada de solo de um calcário pelítico, o limite amarelo separa o calcário pelítico do calcário intemperizado e o limite verde separa o calcário intemperizado do calcário maciço. No calcário maciço ocorre a formação de uma caverna por dissolução, e dentro dela há uma lâmina d'água e formações de estalactites. ....	23
Figura 11: Inversão de dados sintéticos de espaçamento de 2,5 metros para testar a eficiência de cada arranjo em resolver um problema geológico. (A) modelos de blocos com espaçamento de 2,5 metros baseado em uma caverna conhecida e suas respectivas seções de eletrorresistividade após inversão: (B) Arranjo Wenner-Schlumberger, (C) Arranjo Wenner, (D) Arranjo Dipolo-Dipolo, (E) Arranjo Polo-Dipolo e (F) Arranjo Polo-Polo. ....	24
Figura 12: Inversão de dados sintéticos de espaçamento de 5 metros para testar a eficiência de cada arranjo em resolver um problema geológico. (A) modelos de blocos com espaçamento de 2,5 metros baseado em uma caverna conhecida e suas respectivas seções de eletrorresistividade após	

## VIII

- inversão: (B) Arranjo Wenner-Schlumberger, (C) Arranjo Wenner, (D) Arranjo Dipolo-Dipolo, (E) Arranjo Polo-Dipolo e (F) Arranjo Polo-Polo.....25
- Figura 13: Modelo Digital De Terreno (MDT) com a localização e geometria das cavernas mapeadas pelo grupo de espeleologia grego. Em azul a projeção da Caverna Tarimba, em rosa e amarelo os traçados das Cavernas Pasto De Vaca I e II, respectivamente. ....28
- Figura 14: Ortofoto obtida por drone com a localização das linhas de eletrorresistividade e a projeção das cavernas mapeadas pela GREGO.....29
- Figura 15: Fotografias evidenciam as aquisições de dados em campo. A) Eletrorresistivímetro Syscal Pro em operação. B, C e D) Equipe realizando a disposição dos cabos em campo. E) Disposição dos cabos perpendicular à entrada da caverna. F) Eletrodo dentro do rio Extrema. G) Eletrodo próximo a uma depressão relacionada a um processo de dolinamento. H) Cabo próximo a um buraco proveniente de colapso de cavidade. ....30
- Figura 16: Distribuição dos pontos de resistividade elétrica obtidos no perfil teste com os arranjos: A) Wenner-Schlumberger, B) Dipolo-Dipolo e C) Polo-Dipolo.....31
- Figura 17: Foto da planilha e representação gráfica de topografia inserida em parte de uma linha de resistividade elétrica obtida em campo (software *Prosys II*).....33
- Figura 18: Etapa de conversão dos dados de resistividade elétrica em valores absolutos. A) gráfico de resistividade em cada espaçamento ao longo da linha com os valores negativos brutos B) histograma com os valores negativos ainda presentes C) gráfico de resistividade em cada espaçamento ao longo da linha após transformá-los em valores absolutos D) histograma com apenas valores positivos .....33
- Figura 19: (A) Distribuição dos registros brutos de resistividade elétrica por nível de profundidade da linha de testes obtida com o arranjo dd, e respectivo histograma (B). (C) Distribuição dos registros filtrados de resistividade elétrica por nível de profundidade da linha de testes obtida com o arranjo DD, e respectivo histograma (D).....34
- Figura 20: A) Janela de configuração dos blocos e B) modelo de blocos após ajustes, respectivamente. ....35
- Figura 21: Modelos de resistividade elétrica da L1, arranjo dipolo dipolo, obtidos com as inversões a) mínimos quadrados e B) robusta. ....36
- Figura 22: Distribuição dos erros de resultados de diferentes tipos de inversão aplicados aos dados de resistividade das linhas realizadas na área de pesquisa. ....36
- Figura 23: Histograma de distribuição do erro em função da porcentagem de número de pontos. Gráfico de correlação entre as os valores de resistividade aparente registrados em campo e calculados no modelo direto. A linha verde no histograma representa o intervalo de dados que serão eliminados. No gráfico de correlação os dados eliminados aparecem como pontos vermelhos. ....37

Figura 24:(A) Localização da linha teste na área do trabalho. (B) Modelo geológico com a indicação da localização da Caverna Tarimba. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (C)WS, (D) DD, e (E) PD. ....	39
Figura 25: Modelos de resistividade elétrica das seções L1 a L11 obtidos com os Arranjos DD e PD . ....	41
Figura 26: (A) Localização da Linha 1 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização da Caverna Tarimba.....	43
Figura 27: (A) Localização da Linha 2 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização da Caverna Tarimba (caverna mapeada). ....	44
Figura 28: (A) Localização da Linha 3 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina. ....	46
Figura 29: (A) Localização da Linha 4 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina. ....	48
Figura 30: (A) Localização da Linha 5 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina. ....	50
Figura 31: (A) Localização da Linha 6 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de zonas de cisalhamento e uma eventual cavidade.....	52
Figura 32: (A) Localização da Linha 7 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma caverna mapeada (Caverna Pasto De Vaca I).....	54
Figura 33: (A) Localização da linha 8 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.....	56
Figura 34: (A) Localização da linha 9 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.....	58
Figura 35: Interpretação das seções de eletrorresistividade referentes à Linha 10 .....	60
Figura 36: (A) Localização da Linha 11 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.....	62

Figura 37: Mapa topográfico com a localização das cavernas mapeadas e das possíveis cavidades interpretadas nos modelos de resistividade elétrica.....63

Figura 38: Mapa topográfico com os possíveis traçados das cavidades mapeadas com as seções de resistividade elétrica. ....64

**ÍNDICE DE TABELAS**

Tabela 1: Arranjos eletródicos e respectivas profundidades de investigação, número de pontos antes e após a filtragem, bem como a percentagem de dados removidos nos processos de filtragem dos registros de resistividade elétrica da linha de teste. ....	34
---	----

# ***CAPÍTULO 1***

## **1. INTRODUÇÃO**

A definição de cárste corresponde a uma área calcária ou dolomítica com uma topografia controlada pela combinação de fraturamento e dissolução de tais rochas (CHRISTOFOLETTI, 1990). As paisagens controladas pelo relevo cárstico possuem, além de cavernas, feições como sumidouros, dolinas, depressões e afloramentos rochosos (FORD e WILLIAMS, 2007). Esse sistema geomorfológico é característico da Área de Proteção Ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV), onde está localizada a caverna Tarimba, objeto de estudo do presente trabalho.

A caverna Tarimba possui mais de 11 km de comprimento mapeados até o momento pelo Grupo de Espeleólogos de Goiás (GREGO), com vários salões e condutos em vários níveis, que às vezes podem ser muito estreitos, o que dificulta o mapeamento direto da geometria da caverna. A Tarimba é sem dúvida uma das mais importantes cavernas da região e consta como uma das maiores do país em projeção horizontal (RIBEIRO, FERREIRA, *et al.*, 2018).

### **1.1. ÁREA DE ESTUDO**

A APANRV localiza-se na região nordeste do estado do Goiás e engloba os municípios de Mambaí, Posse, Buritinópolis e Damianópolis (Figura 1). Entre Buritinópolis e Mambaí, nas proximidades do Distrito de Vila Velha que integra os dois municípios, se

encontra o Sistema Cárstico da Tarimba (SCT). Segundo Leuzinger *et al.* (2018), o patrimônio espeleológico do SCT é composto por mais de 110 cavidades naturais.

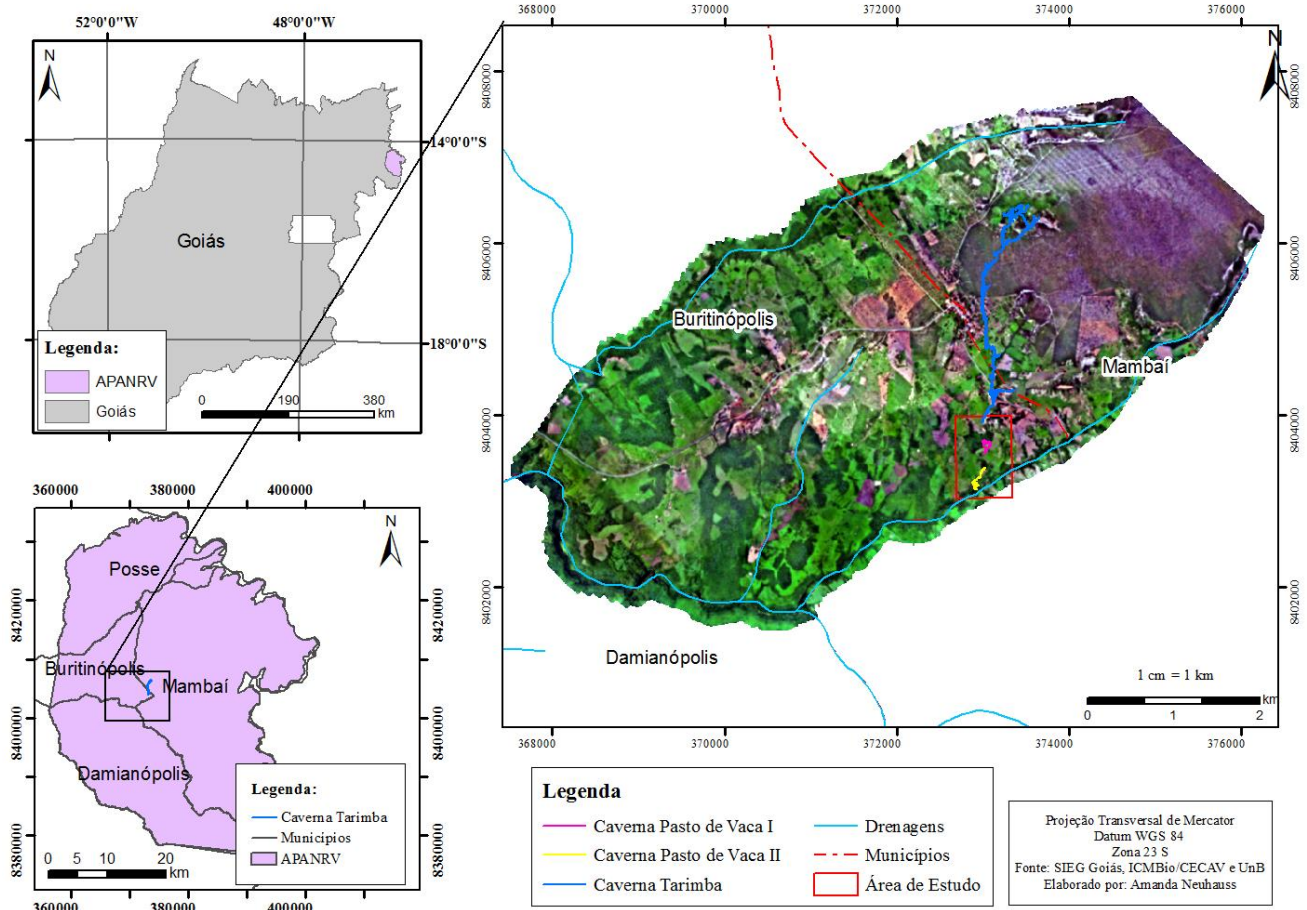


Figura 1: Mapa de localização dos Municípios pertencentes à Área de Proteção Nascentes do Rio Vermelho e Ortofoto contendo a Área de Estudo.

## 1.2. OBJETIVOS

Este trabalho tem como objetivo principal mapear as cavidades da região localizada a sul da Tarimba com a finalidade de comprovar sua conexão com as cavernas Pasto de Vaca I e II, bem como com o Rio Extrema.

Os objetivos específicos são:

- Testar e qualificar os melhores arranjos eletródicos e respectivas resoluções horizontais e verticais, realizando-se simulações numéricas e aquisições de dados em locais com geometria conhecida do subsolo;

- Obter seções 2D de resistividade elétrica de áreas onde prevê-se a ocorrência de cavidades relacionadas ao sistema cárstico da Tarimba;
- Identificar os padrões geoeletricos relacionados às estruturas cársticas e camadas geológicas locais;
- Elaborar um mapa de correlação de anomalias de resistividade elétrica relacionadas às cavidades.

### 1.3. JUSTIFICATIVA

A principal demanda do projeto, no qual vincula-se este trabalho, é verificar o potencial turístico da APANRV. Algumas cavernas da região, como as cavernas Lapa do Penhasco e Funil, são abertas à visitação e movimentam a economia nas cidades da região. Existe a pretensão de ampliação da APA em função da ocorrência de cavernas não mapeadas pela metodologia tradicional de registro topográfico.

A falta de conectividade aparente entre as cavernas Tarimba, Pasto de Vaca I e II impulsionou o desenvolvimento de pesquisas na região da APANRV. A verificação indireta da geometria do sistema cárstico da Tarimba em áreas inacessíveis fornecerá informações essenciais para o melhor controle ambiental do uso e ocupação no solo na região.

Além disso, o projeto pode contribuir para a literatura de geofísica aplicada ao estudo do cárste, que teve um crescimento significativo nas publicações sobre este assunto somente a partir da década de 1990, sobretudo para a região da APA, onde há poucos estudos publicados.

Com o objetivo de aprofundar os estudos na região, a geofísica tem uma excelente aplicação na caracterização do meio e na identificação de cavidades. Mais especificamente, estudos para delimitação da área da Tarimba, caverna a ser estudada neste trabalho, são importantes por ter extrema relevância científica e ambiental.

A Tarimba se encontra em uma área altamente afetada pelo desmatamento, solo exposto e atividade pecuária. A presença de gado é um fator preocupante, que além de problemas erosivos, podem causar contaminação das águas subterrâneas com o carregamento de estrume (RIBEIRO, FERREIRA, *et al.*, 2018). A preocupação com a qualidade da água deve-se, entre outros motivos, por conta de uma descoberta recente, em que a Tarimba abriga uma nova espécie de troglóbias, o *Ituglanis boticário*, fato suficiente para elevar o sistema da

caverna a uma categoria de maior relevância prevista pela legislação brasileira vigente (RIZZATO e BICHUETTE, 2014).

#### 1.4. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de proteção ambiental das Nascentes do Rio Vermelho (APANRV) faz parte da Bacia do São Francisco (BSF), tal como considerada por Alvarenga et al (2012), e da Sub Bacia Sanfranciscana, tal como considerada por Campos e Dardenne (1997). A BSF, por sua vez, está inserida no contexto da Província do Tocantins, mais especificamente na Faixa de dobramentos Brasília (DARDENNE, CORDANI, *et al.*, 2000). Já a Bacia Sanfranciscana, corresponde a sequência sedimentar e vulcânica fanerozoica dentro dos limites da Bacia do São Francisco (ZALÁN e ROMEIRO-SILVA, 2007)

Uma das unidades que compõem a Faixa Brasília são as sequências sedimentares e metassedimentares Paleo- a neoproterozoicas, as quais compreendem os Grupos Araí e Serra da Mesa (Paleo/Mesoproterozoico), Paranoá e Canastra (Mesoproterozoico), Ibiá, Araxá e Vazante (Meso/Neoproterozoico) e Bambuí (Neoproterozoico) (Dardenne, 2000).

A sequência sedimentar, proposta por Campos e Dardenne, 1997, para as unidades fanerozoicas da Bacia Sanfranciscana é definida por grandes unidades separadas por importantes superfícies de discordâncias regionais. As sucessões foram organizadas de acordo com a seguinte nomenclatura: Grupo Santa Fé, Grupo Areado, Grupo Mata da Corda e Grupo Urucuia, representando as coberturas recentes.

A cobertura arenosa Colúvio-Eluvionar cobriu grande parte da APANRV durante o Cenozóico, formando uma cobertura superficial com sedimentos provenientes do retrabalhamento das camadas areníticas do Grupo Urucuia. As Unidades que compõem a Faixa Brasília presentes nesse estudo são restritas ao Grupo Bambuí e os depósitos recentes Colúvio-Eluvionar (Figura 1).

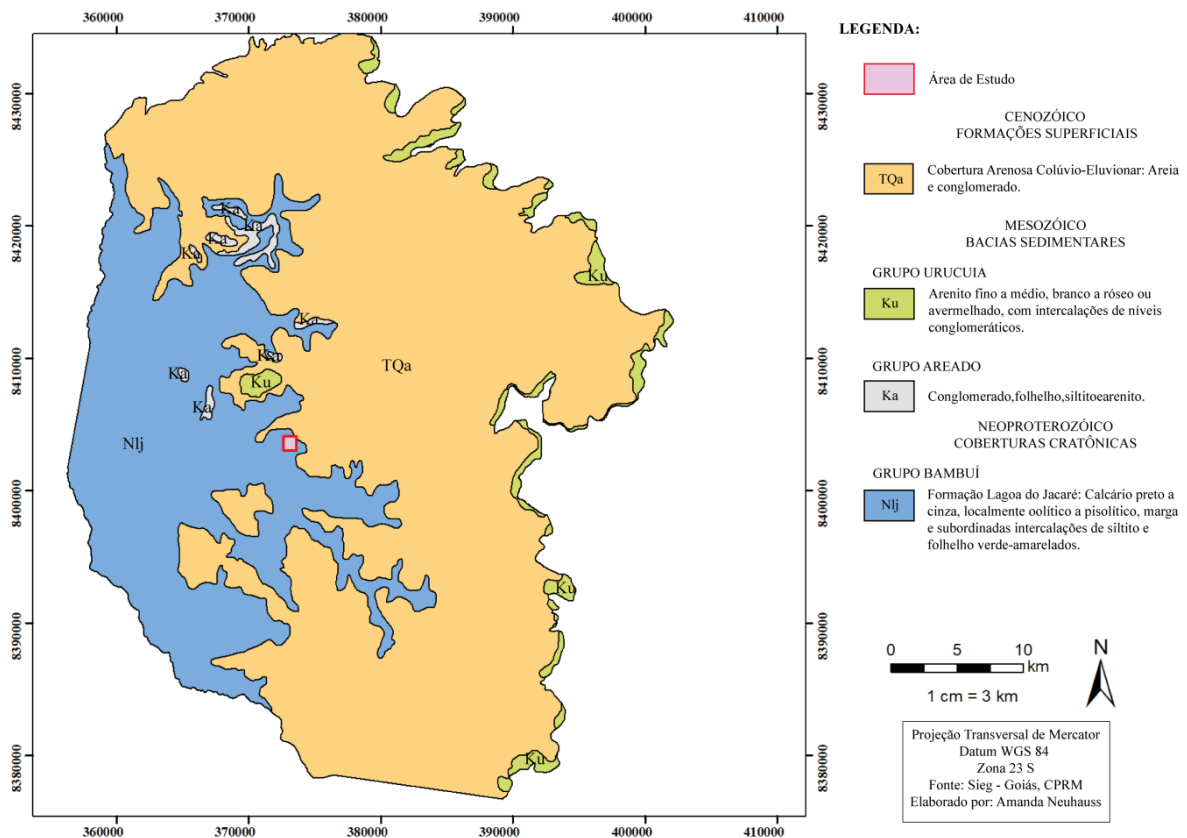


Figura 2: Mapa geológico da Área de Proteção Ambiental Nascentes do Rio Vermelho com a localização do local de pesquisa.

O Grupo Bambuí é subdividido em seis formações, sendo elas, da base para o topo, a Formação Jequitaiá, seguida de formações sequenciais pelito-carbonáticas do Subgrupo Paraopeba: Sete Lagoas, Serra de Santa Helena, Lagoa do Jacaré e Serra da Saudade e no topo, caracterizada por arcóseos, a Formação Três Marias.

A deposição do Grupo Bambuí iniciou-se durante uma sedimentação glaciogênica seguida por uma sucessão de megaciclos regressivos, separados por períodos de subsidência brusca, onde ocorreu um aumento da lâmina d'água com consequente deposição de sedimentos argilosos.

A primeira sedimentação glaciogênica resultou na Formação Jequitaiá, marcando a base do Grupo Bambuí, constituída por paraconglomerados de matriz verde, com seixos de quartzitos, calcário, dolomitos, chert, gnaisses, micaxistos, granitos e rochas vulcânicas.

Após a sedimentação glaciogênica ocorreram uma sucessão de megaciclos regressivos intercalados por períodos de subsidência brusca, que correspondem a um aumento da lâmina d'água e consequente deposição de sedimentos argilosos. A sedimentação iniciou-se com o

Megaciclo I, caracterizado pelos depósitos argilo-carbonatados da Formação Sete Lagoas. As rochas carbonáticas desta unidade constituem lentes numa sequência margosa e pelítica, formando um horizonte contínuo na região cratônicas estável.

O segundo Megaciclo originou os depósitos argilo-carbonatados das formações Serra de Santa Helena e Lagoa do Jacaré. A Formação Serra de Santa Helena caracteriza-se por folhelhos e siltitos com intercalações de arenitos finos e calcários. A Formação Lagoa do Jacaré, presente amplamente na área de estudo é composta por uma intercalação entre calcários oolíticos e pisolíticos, cinza escuro, fétidos, cristalinos, lenticulares com siltitos e margas.

O Megaciclo III, argilo-arenoso, culminou nos depósitos das formações Serra da Saudade e Três Marias. A Formação Serra da Saudade é constituída por folhelhos, siltitos e argilitos, com restritas lentes de calcário. A Formação Três Marias é caracterizada por arcóseos, arenitos arcoseanos e siltitos, com intercalações de rochas conglomeráticas.

A cobertura arenosa Colúvio-Eluvionar, são sedimentos recentes depositados ao longo do limite oeste do Grupo Urucuia, o qual originou os sedimentos deste depósito. Os depósitos sedimentares são compostos por areias vermelhas e conglomerados retrabalhados das camadas areníticas do Grupo Urucuia (CPRM, 2000)

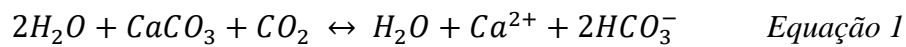
### **1.5 Estruturas Cársticas**

Para que haja o desenvolvimento de feições cársticas, é necessário que existam rochas solúveis de considerável espessura, com presença de fissuras e fraturas para que ocorra passagem de água através delas, além de serem maciças e resistentes. Uma segunda condição é que o local receba uma quantidade moderada de precipitação para que ocorra a dissolução das rochas. Em locais onde existe uma densa vegetação há uma maior facilidade no processo de dissolução da rocha pela água pluvial, uma vez que há maior infiltração de água pelas raízes das árvores. Outro fator facilitador para a dissolução é a amplitude topográfica, que facilita a percolação de águas subterrâneas (CHRISTOFOLETTI, 1990).

As formas cársticas são muitas, entre elas existem as dolinas e as cavernas. As dolinas são depressões ovais, de topografia sinuosa e com rochas aflorantes. O fundo pode estar coberto por uma camada argilosa devido à descalcificação. De tamanho, profundidade e largura variados, as dolinas são formas características do relevo cárstico. As cavernas constituem as feições mais comuns em todas as áreas cársticas. Uma caverna pode ser descrita

como uma feição natural subterrânea vazia, podendo conter ou não um fluxo de água subterrânea na atualidade, podem se estender horizontalmente e verticalmente, e apresentar mais de um nível (CHRISTOFOLETTI, 1990).

A maioria das rochas carbonáticas pode ser considerada um potencial aquífero cárstico, conseqüentemente, as rochas cársticas podem ser uma das formações aquíferas mais importantes do mundo, juntamente com o aluvião (BAKALOWICZ, 2005). Durante a percolação de água com a presença de dióxido de carbono pelas fraturas e fissuras, a rocha é dissolvida, de acordo com o conjunto de reações de equilíbrio mostrado na equação simplificada abaixo (Equação 1).



A dissolução somente ocorre onde há fluxo de água subterrânea, e conseqüente formação de vazios em subsuperfície. Estes vazios aumentam progressivamente e zonas de circulação são desenvolvidas (BAKALOWICZ, 2005). A primeira zona, mais superficial, ou vadosa, a água circula livremente e de forma rápida. Na zona seguinte, inferior, ou freática, a água circula sob pressão hidrostática e todas as juntas e fraturas estão preenchidas (CHRISTOFOLETTI, 1990).

A hidrologia cárstica é caracterizada por pontos de sumidouros, onde desaparecem as águas subaéreas, e ressurgências. O trajeto interior das águas subterrâneas segue sempre o caminho de fraqueza da rocha e tendem a se integrar em outros canais mais bem desenvolvidos (Figura 3). A circulação de água tende a se aprofundar, assim os canais mais superficiais se tornam ameaçados se ocorrer uma fissura ou fratura vertical, estas interligam os dois níveis das galerias, e suspendem o fluxo de água pela zona superior (CHRISTOFOLETTI, 1990).

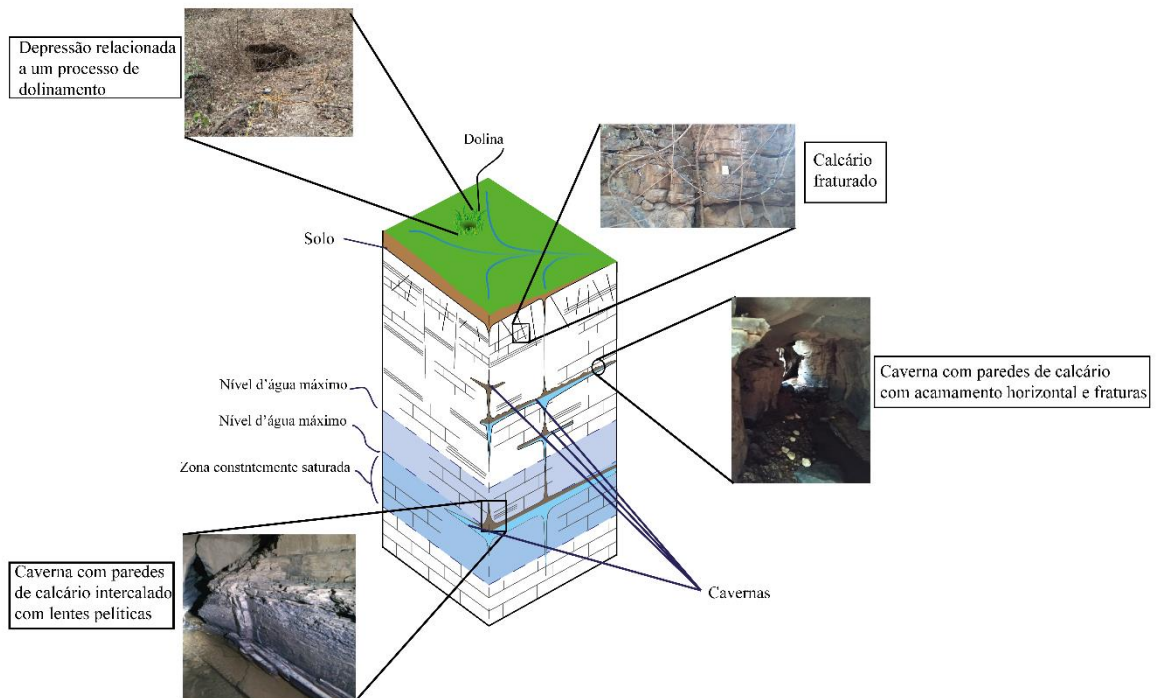


Figura 3: Bloco diagrama do sistema cárstico sugerido para a região de ocorrência das cavernas Tarimba, Pasto de Vaca I e II, com respectivas fotografias das principais estruturas cársticas (modificado de STEVANOVIĆ, 2015).

## ***CAPÍTULO 2***

### **2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

A delimitação de cavernas em regiões cársticas ocorre comumente usando-se métodos de investigação direta e indireta. O método tradicional de investigação direta é o mapeamento da caverna usando-se técnicas de espeleologia e de topografia. A execução de sondagens para identificar cavidades inacessíveis tem altíssimo risco, visto que a perfuração pode levar o sistema cárstico ao colapso. As informações de sondagens também podem trazer informações equivocadas do subsolo (ZHOU, BECK e ADAMS, 2002), visto a complexidade do sistema cárstico. As informações geológicas de perfurações também, em função da heterogeneidade do subsolo, podem induzir na elaboração de modelos geológicos errados (LEUCCI e GIORGI, 2005).

Um dos métodos indiretos de investigação do subsolo é a geofísica. A investigação geofísica fornece modelos do subsolo com a análise de variações de propriedades físicas registradas em superfície. Dadas as dificuldades relacionadas aos métodos diretos, os métodos indiretos possuem maiores vantagens por serem métodos mais ágeis e não invasivos. Dentre os métodos geofísicos, os mais aplicados na identificação de cavernas são a gravimetria, o

radar de penetração do solo (GPR), o potencial espontâneo (SP), a sísmica de reflexão, os métodos eletromagnéticos (EM), e o método que será abordado neste trabalho, a eletrorresistividade.

Os métodos geofísicos de foram utilizados em vários trabalhos, como por exemplo Zhou (2002) no mapeamento de risco cárstico, em Frederick Country, Maryland, região onde ocorreram várias dolinas. No trabalho, o autor realizou uma simulação numérica prévia com diferentes arranjos eletródicos. Posteriormente, a aquisição aconteceu com 56 eletrodos espaçados em 3 metros. Os dados foram processados pelo software RES2DINV e o arranjo que obteve a resposta mais próxima do real foi o dipolo-dipolo e o misto (arranjo composto pela somatória dos arranjos dipolo-dipolo, Schlumberger e Wenner). Os dados de resistividade foram comparados com dados de furo, comprovando a eficácia do método.

Carpio *et al* (2004) apresentaram um estudo em uma área urbana de perigo permanente devido à construção de residências acima de uma mina de materiais de construção durante a expansão desordenada da Cidade do México no século XX. Para a detecção destas cavidades usou-se o método da eletrorresistividade, com a técnica da tomografia elétrica 2D, usando-se os arranjos polo-dipolo e Schlumberger. Os valores de resistividade foram calibrados com valores de furos de sondagem para obter perfis com maior resolução. Os resultados possibilitaram à elaboração de um mapa de resistividade da área onde foi possível ver a distribuição horizontal de corpos resistivos a 12 metros de profundidade. Com os resultados das interpretações foi possível delimitar áreas de maiores riscos geotécnicos.

Leucci *et al* (2005) utilizaram dados integrados de eletrorresistividade e GPR para caracterização do risco estrutural em uma caverna de origem cárstica com potencial arqueológico. A pesquisa foi realizada para avaliar a estabilidade do teto da caverna, composto por rochas carbonáticas. Com os resultados de GPR foi possível detectar descontinuidades nas rochas, interpretadas como fraturas. O trabalho mostrou a importância da integração de dados geofísicos para reduzir a ambiguidade inerente aos métodos.

Rose *et al* (2010) integraram informações de resistividade elétrica, de GPR e de estudos geológicos para caracterização de cavidades em uma área urbana na Itália. Os resultados indicaram a localização dos principais condutos cársticos abaixo da área de estudo e identificar uma área de risco onde possivelmente está a cavidade.

Chalikakiv *et al* (2011) desenvolveram um trabalho com o intuito de fornecer uma visão geral acerca do uso de métodos geofísicos na exploração de áreas cársticas. O trabalho

possui apenas intuito metodológico, com base em uma extensa análise dos resultados científicos publicados, e mostra como cada método responde ao ambiente cárstico.

Kaufmann *et al* (2011) integraram dados de resistividade elétrica e gravimetria para a detecção da Caverna do Unicórnio, localizada nas montanhas do sul de Harz, na Alemanha. A caverna em questão foi escolhida devido à disponibilidade da cartografia da mesma, assim usou-se a gravimetria para identificar a perda de massa relacionada à geometria da cavidade. A eletrorresistividade foi utilizada com o intuito de verificar a resposta resistiva da caverna e tentar detectar a presença ou não de sedimentos no interior das cavidades. Com isso, foi possível identificar os vazios pela perda de massa relativa à rocha hospedeira e pela alta resistividade, onde estão preenchidos por ar, e baixa resistividade onde há presença de sedimentos saturados em água.

Ismail *et al* (2012) realizaram pesquisas com o método da eletrorresistividade em duas áreas cársticas próximas à rodovias no estado do Missouri, EUA. Primeiramente foram adquiridas 11 linhas paralelas com 1,5 metros de espaçamento em duas dimensões espaçadas em 6 metros com objetivo avaliar se o cárste apresenta alguma ameaça para a rodovia e também mapear o topo rochoso. A segunda área está localizada em uma cavidade já conhecida próxima a um cruzamento entre duas rodovias, nela foram adquiridas 17 linhas com 3 metros de espaçamento, espaçadas entre si em 7,5 metros. Os dados foram processados com o intuito de gerar um modelo pseudo-3D para melhorar a interpretação. Na primeira área foi identificado o topo rochoso e nenhuma área de risco, e na segunda área foi possível mapear a cavidade que apresenta fluxo de água. O método geofísico foi corroborado com furos de sondagens, comprovando sua eficácia.

Berglund *et al* (2014) utilizaram os métodos da eletrorresistividade e eletromagnético de baixa frequência (very low frequency – VLF), e um traçador líquido para determinar a relação entre um sumidouro recém-formado e um antigo rio seco em Springfield, EUA. O serviço geológico americano indicou a existência de um rio intermitente passando pela cavidade, gerando dúvida sobre a sua relação com a dolina. Os resultados da eletrorresistividade identificaram uma zona fraturada no calcário e um solo condutivo. O VLF apontou uma zona condutiva na região do sumidouro, indicando uma zona fraturada. O traçador comprovou que o rio intermitente ainda está ativo e drenando o solo pelo sumidouro, o qual agora se tornou um ponto de concentração de fluxo de material na superfície.

Youssef *et al* (2015) realizaram levantamentos de eletrorresistividade de alta resolução a fim de avaliarem as capacidades do método na detecção de cavernas na Arábia Saudita, em três dimensões. Investigações de campo apontaram cavidades em superfície e em subsuperfície. Foram adquiridos dados utilizando o arranjo Dipolo-Dipolo e dois espaçamentos diferentes, a fim de mostrar as limitações de amostragem. Os resultados demonstraram que o arranjo Dipolo-Dipolo com espaçamento de 1 metro obteve sucesso na detecção da cavidade conhecida. Os perfis espaçados em 4.75 metros foram interpolados, possibilitando obter um modelo 3D da cavidade, possibilitando fazer cálculo do seu volume. Foi possível também caracterizar esta cavidade em vazia, preenchida apenas por ar.

Braitenberg *et al* (2016) utilizaram dados gravimétricos aéreos e terrestres na identificação da caverna Grotta Gigante, no nordeste da Itália. O trabalho teve como objetivo mapear cavidades vazias e preenchidas com sedimentos, sendo a primeira a de maior interesse. A caverna foi escolhida por estar em uma região de risco, onde existem edifícios e tráfego de veículos. A caverna foi mapeada internamente com a tecnologia *laser-scan*. Os resultados possibilitaram a identificação das cavidades com as duas metodologias, porém a aquisição terrestre mostrou-se mais eficaz em identificar as cavernas de pequeno porte.

Kidanu *et al* (2016) integraram dados de resistividade elétrica, MASW e borehole para investigação de cavidades em cárstes do Greene County, no estado do Missouri. Foram adquiridas 16 linhas paralelas de eletrorresistividade 2D espaçadas em 6 metros, com espaçamento elétrico de 1,52 metros. Os estudos revelaram que a cavidade foi desenvolvida ao longo de uma superfície natural de drenagem acima de um calcário prodominante fraturado. As baixas resistividades abaixo da superfície da cavidade revelou uma zona de infiltração de água e drenagem de solo quase vertical. Os métodos foram eficazes na identificação das cavidades e fraturas, e seus riscos serão mitigados com as tecnologias apropriadas da engenharia.

Os resultados de todos esses trabalhos revelam o valor e o potencial do uso da geofísica para a pesquisa de cavidades em sistemas cársticos, principalmente em áreas de risco, onde torna-se difícil o uso de métodos invasivos.

Dentre os métodos geofísicos utilizados no mapeamento de cavidades, o método da eletrorresistividade é o que melhor se aplica no contexto do Grupo Bambuí. A eletrorresistividade fornece um imageamento confiável, de alta resolução, capaz de mapear cavidades preenchidas com ar (alta resistividade) ou com sedimentos saturados em água

(baixa resistividade) desde rasas (0 a 5 metros de profundidade) a profundas (até 60 metros de profundidade), dependendo do diâmetro das cavidades e dos espaçamentos entre eletrodos.

## ***CAPÍTULO 3***

### **3. ELETRORRESISTIVIDADE**

Desenvolvido em 1900, o método da eletrorresistividade é um dos mais antigos entre os métodos geofísicos, porém esse somente se popularizou com o avanço computacional que ocorreu por volta dos anos de 1970. Desde então, o método é amplamente utilizado nas mais diversas áreas, como na ambiental, em estudos de água subterrânea e de fontes de poluição, na geotecnia, nos mapeamento de cavernas e falhas, na prospecção mineral, na arqueologia (REYNOLDS, 1997).

Dentro do método da eletrorresistividade podem ser citadas algumas técnicas, como a Sondagem Elétrica Vertical (SEV), técnica 1D de investigação vertical das variações de resistividade do meio; a Perfilagem de Poços, técnica de investigação dentro de poços; e por fim, o Caminhamento Elétrico, técnica de aquisição 2D. Neste trabalho a técnica de aquisição escolhida foi a do caminhamento elétrico 2D, e será explicada mais a frente neste capítulo.

Não obstante, existem três formas em que a corrente elétrica pode ser conduzida pela rocha: condução eletrolítica, em que o fluxo se dá pelo movimento dos íons na água em subsuperfície; eletrônica que corresponde à condução via elétrons livres; e condução dielétrica. A condução eletrolítica é a principal forma de fluxo de corrente dentro do subsolo, visto que os fluidos dos poros atuam como eletrólitos e os grãos pouco contribuem para a

condutividade geral da rocha. A condução eletrônica é importante também quando há presença de minerais condutivos no meio (REYNOLDS, 1997; LOKE, 2004).

Considerando um sólido homogêneo, eletricamente uniforme, de comprimento  $L$ , quando é estabelecida uma corrente  $i$ , o material resiste à passagem dessa corrente com uma resistência  $R$ , resultando em uma diferença de potencial  $\Delta V$  em suas extremidades (Figura 4). A resistência  $R$  desse material é proporcional ao comprimento e inversamente proporcional a sua área como mostrado na equação 1, em que  $\rho$  é a resistividade real.

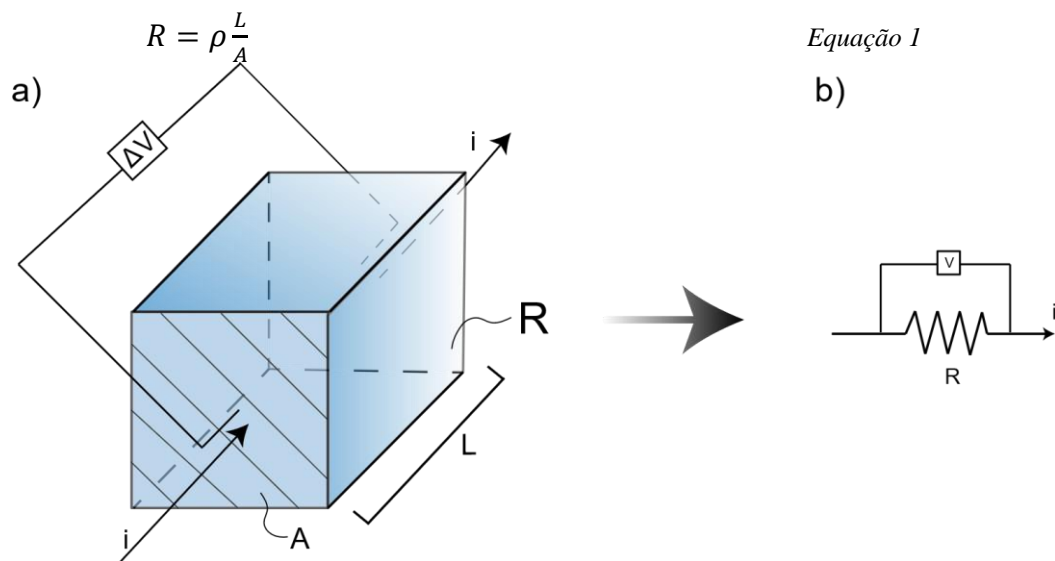


Figura 4: (a) Definição básica de um sólido homogêneo eletricamente uniforme. (b) Circuito elétrico equivalente.

Consequentemente, a lei de Ohm mostra que, para um circuito elétrico, a resistência  $R$  é proporcional ao potencial  $V$  e inversamente proporcional a corrente  $i$ , com isso, a resistividade pode ser dada em termos de área e comprimento do material, potencial e corrente (Equação 2).

$$\rho = \frac{VA}{Li} \quad \text{Equação 2}$$

Logo, o método da eletrorresistividade emprega uma fonte de corrente artificial ( $I$ ), a qual é introduzida em subsuperfície por dois pontos de eletrodos, chamados de eletrodos de corrente, com o objetivo de fazer leituras do potencial ( $\Delta V$ ) entre eles por outros dois pontos de eletrodos, chamados de eletrodos de potencial (TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1990), a fim de determinar a resistividade dos materiais e a sua distribuição em subsuperfície. A corrente e o potencial medido são ambos convertidos em valores de resistividade aparente ( $\rho_a$ ) pela equação 3, onde  $k$  é o fator geométrico.

$$\rho_a = k \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Equação 3}$$

O fator geométrico  $k$  é uma equação que depende da resistência entre os eletrodos de corrente (A e B) e de potencial (M e N), de acordo com a equação 4.

$$k = 2\pi \left[ \frac{1}{AM} - \frac{1}{MB} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{NB} \right] \quad \text{Equação 4}$$

Devido à ausência de uniformização da subsuperfície, a resistividade calculada é chamada de aparente ( $\rho_a$ ), e o seu valor depende da geometria do arranjo eletródico utilizado, definido pelo fator geométrico ( $k$ ) e pelas propriedades físicas do meio, como por exemplo, porosidade, saturação de fluidos, salinidade, composição, entre outros (REYNOLDS, 1997), (TELFORD, GELDART e SHERIFF, 1990). A resistividade aparente calculada não é a resistividade real em subsuperfície, e para determinar esta resistividade real é necessário aplicar o método da inversão (LOKE, 2004), que será abordado mais adiante neste trabalho, na sessão 3.5.

Considerando que a Terra seja um meio homogêneo e isotrópico, a propagação da corrente por um eletrodo na superfície se dá, de forma ideal, por uma superfície semiesférica na subsuperfície (Figura 5).

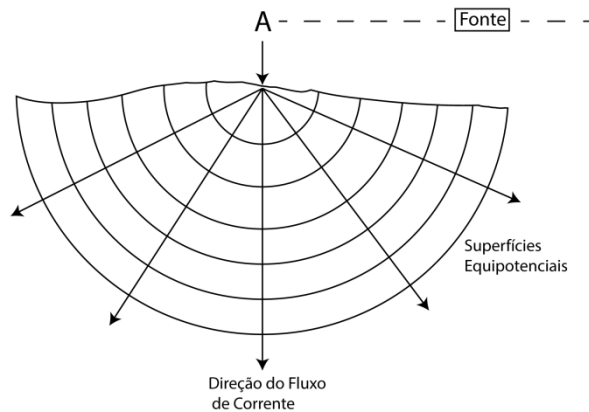


Figura 5: Representação idealizada do fluxo de corrente elétrica eletrolítica no subsolo homogêneo a partir de um ponto de injeção.

A configuração básica dos arranjos eletródicos em uma aquisição é composta por quatro eletrodos, comumente de metal, sendo dois de corrente (A e B) e dois de potencial (M e N; Figura 6), mas esta configuração não é fixa, existindo diversas possibilidades, mostrado na sessão 2.2 a seguir.

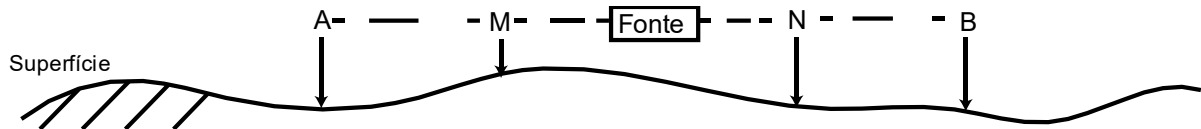


Figura 6: Representação esquemática da disposição de eletrodos em um arranjo convencional de eletrorresistividade.

No caminhamento elétrico, as leituras são feitas a cada dois pares eletródicos, sendo que a aquisição de uma linha possui, normalmente, 25 ou mais eletrodos. Na Figura 7 exemplifica-se um caminhamento elétrico com o arranjo Wenner para uma configuração de 13 eletrodos. Neste exemplo, o espaço entre cada eletrodo é “a”. O primeiro passo é realizar todas as medidas possíveis utilizando o espaçamento **1a**. Para a primeira medida são utilizados os eletrodos 1, 2, 3 e 4, sendo os eletrodos 1 e 4 os de corrente (A e B, respectivamente), e o 2 e 3 de potencial (M e N) respectivamente). Em seguida é feita a segunda medida, utilizando os eletrodos 2, 3, 4 e 5, usados como A, B, M e N, respectivamente. As medidas são feitas ao longo da linha para todos os 13 eletrodos, até completarem as 10 medidas (LOKE, 2005).

Após a finalização dos registros do primeiro nível de profundidade com o espaçamento 1a, iniciam-se os registros de dados do segundo nível para o espaçamento 2a. Para a primeira medida são utilizados os eletrodos 1, 3, 5 e 7 nas posições dos eletrodos A, B, M e N respectivamente. A segunda medida utiliza os eletrodos 2, 4, 6 e 8, e o processo se repete até a última medida nos eletrodos 7, 9, 11 e 13. O mesmo processo é repetido para os espaçamentos 3a e 4a. Quanto maior a cobertura 2D de pontos investigados em subsuperfície, maior será a qualidade do dado.

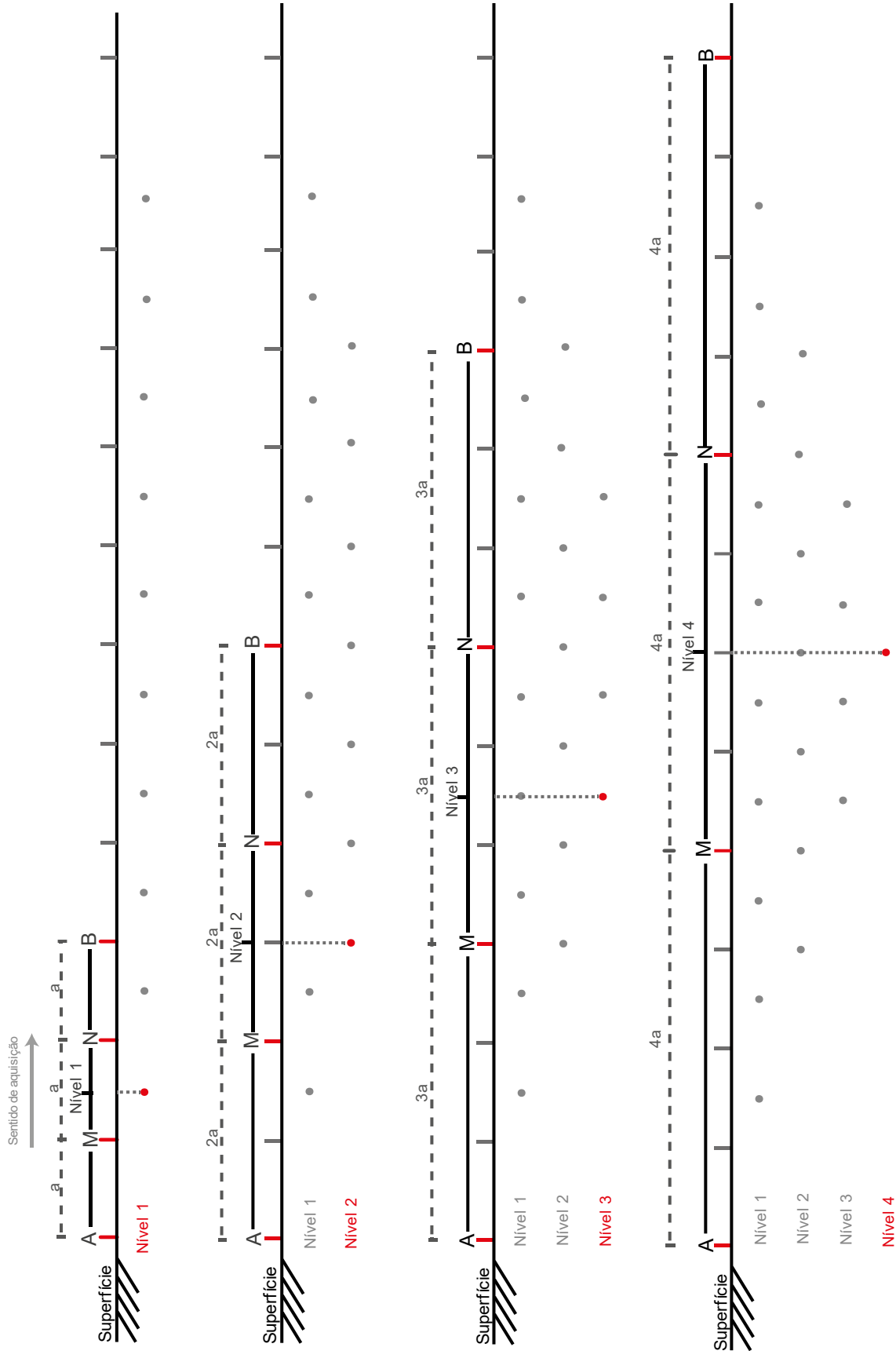


Figura 7: Representação esquemática de uma aquisição de dados de resistividade elétrica com a técnica do caminhamento elétrico com o arranjo Wenner para 13 eletrodos.

### 3.1. ARRANJOS ELETRÓDICOS

Além de diferentes técnicas de aquisição, existem também diferentes arranjos eletródicos que podem ser utilizados. Os dois pares eletródicos podem assumir qualquer configuração na superfície, a escolha depende da estrutura a ser mapeada, do resistímetro e do nível de ruído de fundo (LOKE, 2004). Muitos arranjos têm sido utilizados desde 1950, entre eles o Dipolo-Dipolo (DD), Polo-Dipolo (PD), Polo-Polo (PP), Wenner-Schlumberger (WS), Schlumberger (SC) e Wenner (WN; Figura 4).

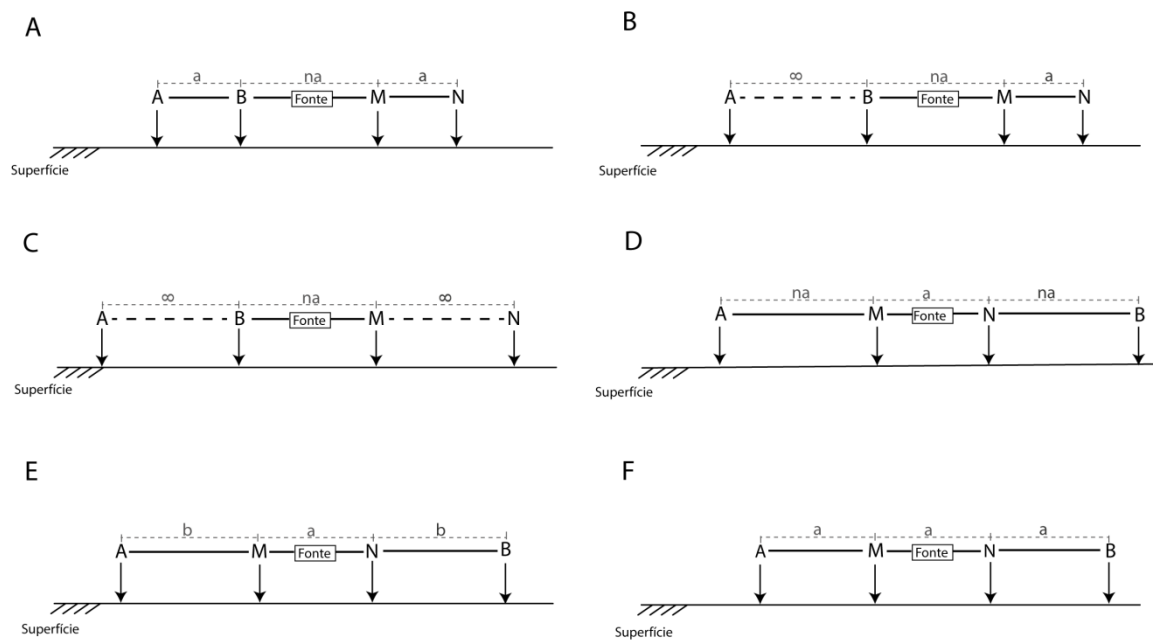


Figura 8: Representação esquemática da disposição de eletrodos em investigações de eletrorresistividade. Arranjos (a) Dipolo dipolo, (b) Pólo dipolo, (c) Pólo polo, (d) Wenner Schlumberger, (e) Schlumberger, e (f) Wenner.

A partir da observação dos arranjos supracitados, é possível inferir que diferentes arranjos possuem diferentes habilidades de imageamento quando aplicados para modelagens geológicas complexas, por exemplo, possuem diferentes resoluções espaciais, diferentes tendências a produzir artefatos nas imagens, nos desvios do modelo de resistividade real e profundidade máxima investigada.

Estudos que mostram a relação entre a razão sinal-ruído e a resolução espacial entre os arranjos PP, PD e DD, revelam que o DD possui maior capacidade de revelar estruturas complexas, porém uma baixa razão sinal-ruído comparada a outros arranjos. O PD possui uma boa relação entre resolução e sinal. O arranjo PP fornece um dado com boa relação com o modelo real, com ruídos moderados, porém os eletrodos remotos limitam a aquisição em regiões pouco acessíveis (SASAKI, 1992; DAHLIN e ZHOU, 2004).

Os arranjos WN e WS possuem muitas semelhanças, e apesar de terem uma alta razão sinal-ruído, possuem uma resolução espacial menor que os outros arranjos. Em geral, a escolha do arranjo depende das condições da área de estudo, da logística de campo e do alvo a ser investigado (DAHLIN e ZHOU, 2004).

No âmbito da investigação em áreas cárstica, é preciso analisar as habilidades dos vários arranjos em distinguir as variações de feições, a escolha pode afetar o reconhecimento nas pseudoseções. Como já foi dito, cada arranjo possui sua vantagem e desvantagem em termos de profundidade de investigação, sensibilidade à variação de estruturas horizontais/verticais e resposta do sinal.

De acordo com o estudo realizado por Zhou, Beck , & Adams (2002), que utilizou três arranjos distintos (WS, WN e DD) para analisar qualitativamente o melhor arranjo para mapeamento de regiões cárticas, foi possível concluir que o DD é o arranjo que fornece, com mais precisão, a delimitação de uma potencial área de caverna. O WS é a alternativa menos efetiva e o WN não consegue distinguir uma potencial área colapsada.

## ***CAPÍTULO 4***

### **4. SIMULAÇÕES NUMÉRICAS**

A modelagem direta no método da eletrorresistividade simula a resposta de diferentes arranjos eletródicos com base em informações de parâmetros físicos do meio. Essa simulação objetiva analisar a eficiência dos diversos parâmetros de aquisição, colaborando na redução de riscos nos levantamentos geofísicos, evitando perda de dados por utilização equivocada de parâmetros em solucionar problemas do contexto geológico a ser estudado. A simulação numérica desta seção foi feita com base na modelagem direta e foi desenvolvido um modelo com a variação de propriedades físicas do meio.

Na etapa de simulação numérica usou-se o *software* RES2DMOD, da Geotomosoft Solutions (Loke, 2016). Este programa de modelagem direta calcula os valores de resistividade aparente em uma pseudo-seção a partir de um modelo de subsuperfície 2D definido pelo usuário. O modelo 2D divide a subsuperfície em blocos utilizando uma malha regular, em que um modelo de grid possui  $j$  linhas e  $i$  colunas, de tal forma que cada nó representa uma resistividade  $\rho_{ij}$ , e quanto mais complexos são os modelos geológicos a serem modelados, mais fina deve ser essa malha (Figura 9).

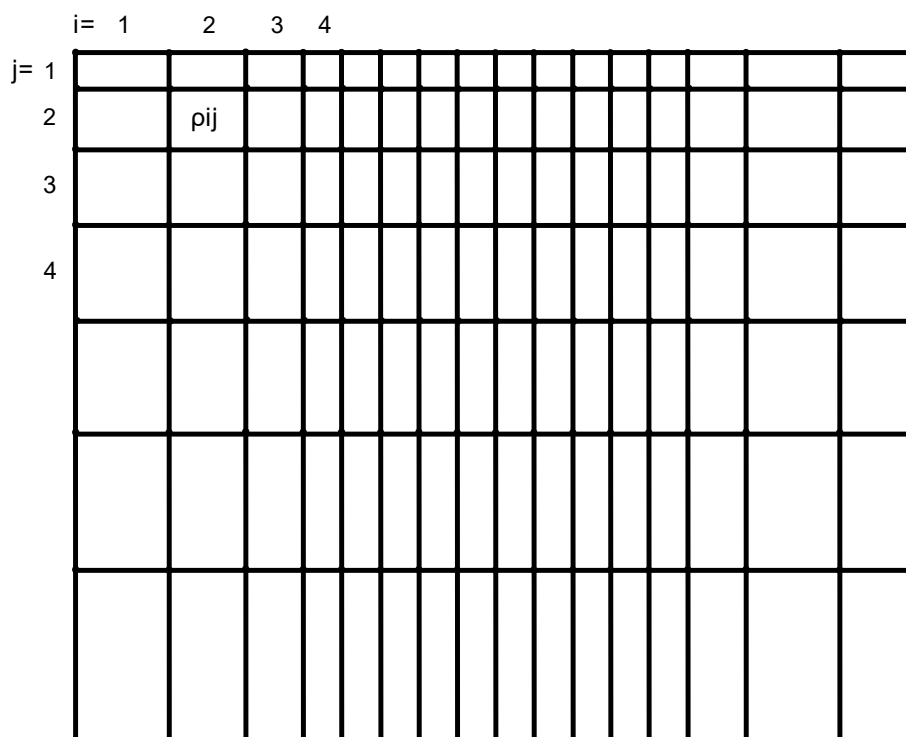


Figura 9: Diagrama esquemático de malhas utilizado no software RES2DMOD (Modificado de LOKE (2016)).

O programa possibilita a escolha de diferentes arranjos eletródicos, o que favorece ao usuário definir qual o arranjo mais apropriado para situações geológicas distintas. As simulações numéricas auxiliam na gestão de tempo de campo, na estimativa de custos, na determinação da profundidade de investigação, e na escolha das resoluções verticais e horizontais. Neste trabalho realizaram-se simulações numéricas com os arranjos Wenner, Wenner-Schlumberger, Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo e Polo-Dipolo. Estes arranjos foram escolhidos em função de bons resultados na identificação de estruturas descontínuas e verticais, como fraturas e cavidades no subsolo.

O modelo sintético consiste na simulação de uma caverna em área carbonática. Uma caverna identificada na região serviu de base para a elaboração do modelo. A caverna simulada possui 4 metros de altura e 5 metros de largura, e ocorre dentro de uma rocha carbonática (Figura 10). No modelo inseriram-se camadas similares às encontradas em campo, que consistem em solo, a segunda uma camada de pelito interdigitada com calcário, a terceira um calcário intemperizado com algumas lentes de pelito, a quarta um calcário maciço, e por último a caverna úmida.

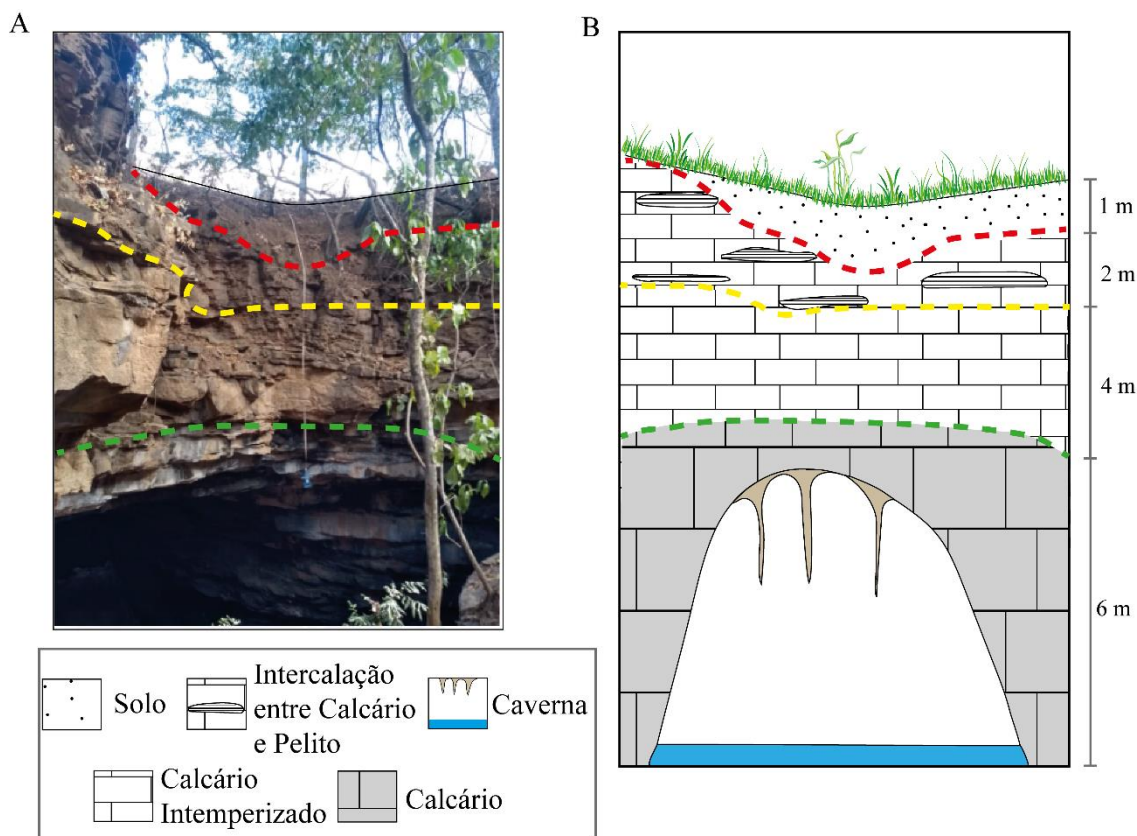


Figura 10: Esquema de uma caverna próxima à Área de estudo. (A) Foto de campo mostrando as camadas acima da caverna, cada camada foi delimitada utilizando cores diferentes e (B) Diagrama com a interpretação da foto, em que o primeiro limite vermelho separa a camada de solo de um calcário pelítico, o limite amarelo separa o calcário pelítico do calcário intemperizado e o limite verde separa o calcário intemperizado do calcário maciço. No calcário maciço ocorre a formação de uma caverna por dissolução, e dentro dela há uma lâmina d'água e formações de estalactites.

Os valores de resistividade usados para cada camada e para a caverna provêm de informações de seções 2D de resistividade elétrica realizadas por Hussain *et al* (informação verbal). Os valores de resistividade usados na modelagem foram 700 Ohm.m para o solo, 74 Ohm.m para os metapelitos, 145 Ohm.m para o calcário intemperizado, 1500 Ohm.m para o calcário maciço, e 5 Ohm.m para a caverna úmida (Figura 11A).

Nas simulações numéricas modelaram-se aquisições usando-se espaçamento entre os eletrodos de 2.5 e de 5 metros, com 2 nós entre os eletrodos (figuras 11 e 12).

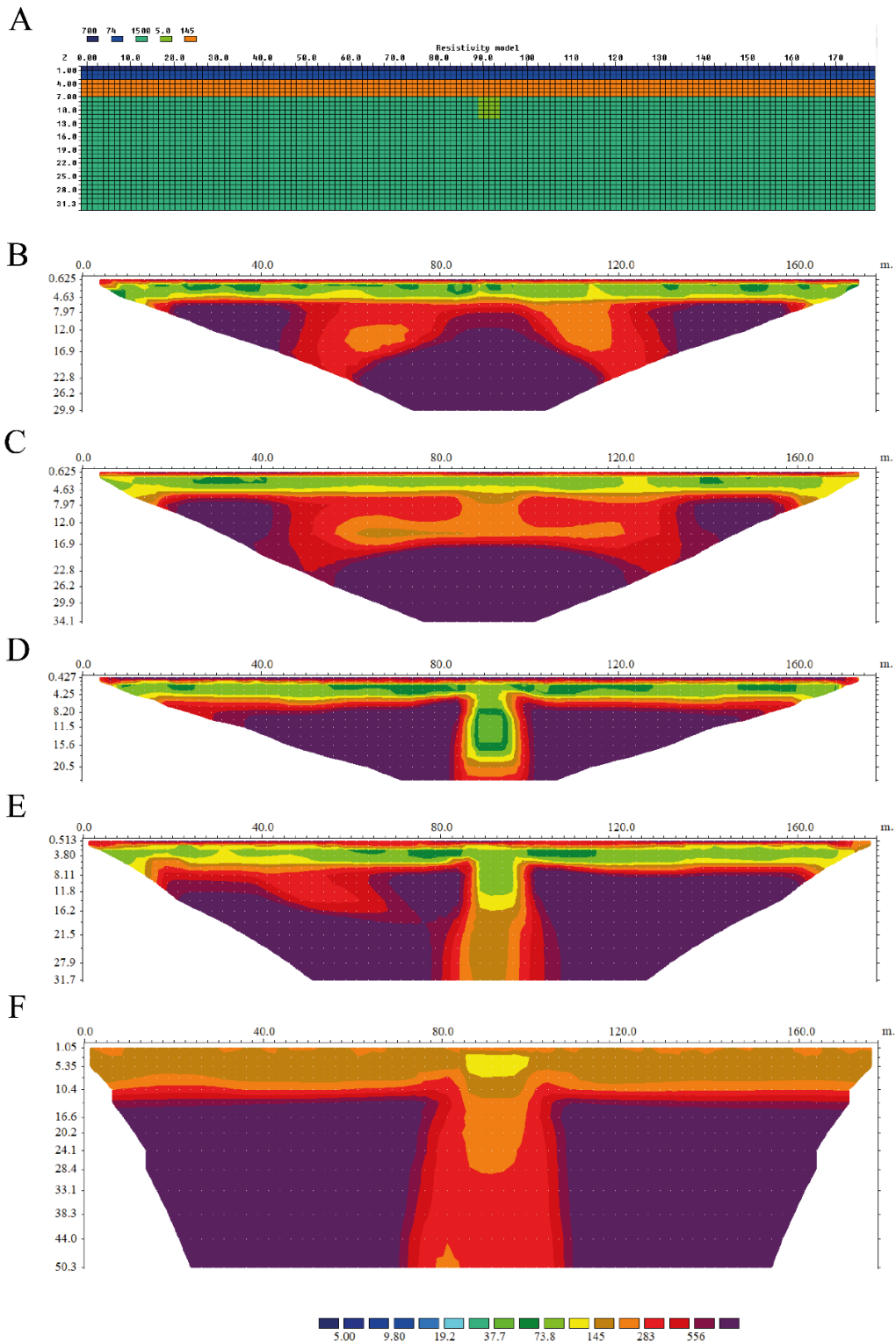


Figura 11: Inversão de dados sintéticos de espaçamento de 2,5 metros para testar a eficiência de cada arranjo em resolver um problema geológico. (A) Modelos de blocos com espaçamento de 2,5 metros baseado em uma caverna conhecida e suas respectivas seções de eletrorresistividade após inversão: (B) Arranjo Wenner-Schlumberger, (C) Arranjo Wenner, (D) Arranjo Dipolo-Dipolo, (E) Arranjo Polo-Dipolo e (F) Arranjo Polo-Polo

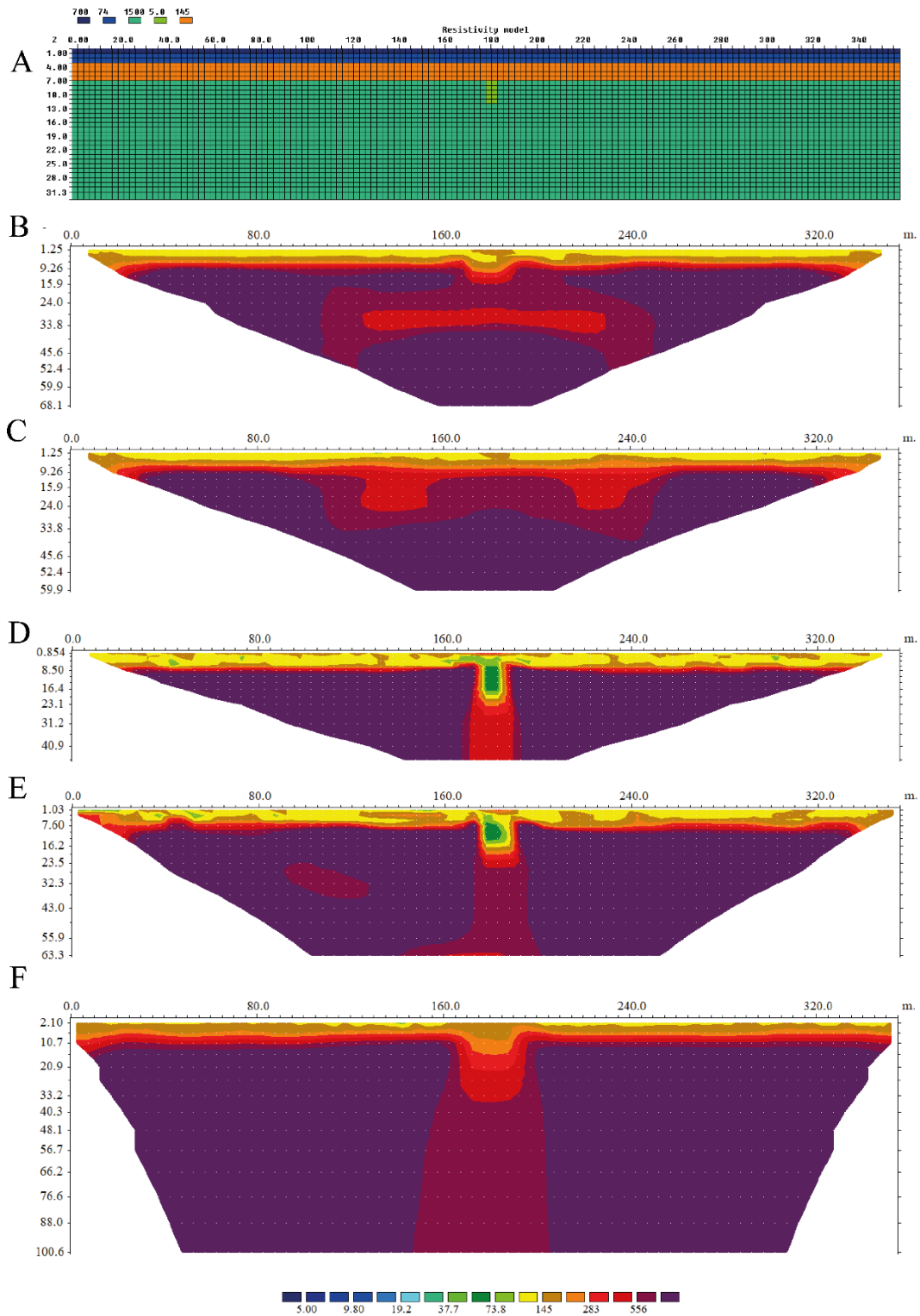


Figura 12: Inversão de dados sintéticos de espaçamento de 5 metros para testar a eficiência de cada arranjo em resolver um problema geológico. (A) Modelos de blocos com espaçamento de 2,5 metros baseado em uma caverna conhecida e suas respectivas seções de eletrorresistividade após inversão: (B) Arranjo Wenner-Schlumberger, (C) Arranjo Wenner, (D) Arranjo Dipolo-Dipolo, (E) Arranjo Polo-Dipolo e (F) Arranjo Polo-Polo

Os valores de resistividade gerados pelo *software* RES2DMOD foram exportados para o *software* RES2DINV, onde geraram-se modelos após a aplicação de rotinas de inversão de dados numéricos. Primeiramente modelaram-se os dados com espaçamento entre os eletrodos de 2,5 metros, e em seguida simularam-se respostas com eletrodos equiespaçados em 5 metros.

Os resultados da simulação numérica obtidos com espaçamento entre os eletrodos de 2,5 metros (Figura 11) indicam que o único arranjo que não conseguiu resolver o problema geológico foi o Wenner. Este arranjo teve uma tendência de horizontalizar as camadas, com isso não foi possível modelar um corpo verticalizado. Além disso, este arranjo foi o que atingiu a menor profundidade de investigação, chegando apenas a 30 metros aproximadamente. Todos os demais mostraram-se eficientes em mapear uma estrutura verticalizada. O arranjo PP, apesar de ter sido capaz de localizar a estrutura vertical, ele é um arranjo que abrange uma maior profundidade, com isso os detalhes das camadas mais rasas foram perdidos. A aplicação deste arranjo seria interessante para mapear estruturas mais profundas do que as que este trabalho visa mapear.

Nas simulações numéricas, realizadas com espaçamento entre os eletrodos de 5 metros, confirmam a ineficiência do arranjo Wenner em resolver estruturas descontínuas.

Apesar do espaçamento de 5 metros ter atingido uma maior profundidade, a resolução das camadas mais rasas ficaram comprometidas com este espaçamento, assim optou-se pelo uso do espaçamento de 2,5 metros nas aquisições de dados em campo.

## CAPÍTULO 5

### 5. AQUISIÇÃO DE DADOS

A aquisição de dados aconteceu em uma área pertencente a Fazenda Pasto de Vacas, municípios de Buritinópolis e Mambaí, GO. A disposição das linhas de resistividade elétrica objetivou cruzar feições cársticas como as cavernas, dolinas e sumidouros evidentes na superfície e em mapas topográficos, e também mapeadas por grupos de espeleólogos (Figura 13).

No campo adquiriram-se dados de resistividade elétrica ao longo de 11 linhas, espaçadas em 60 metros, aproximadamente (Figura 14). Nas aquisições utilizaram-se o resistivímetro *Syscal Pro (Iris instruments)*, acoplados a cabos multieletródicos com 72 conectores (Figura 15). Os eletrodos foram espaçados em 2,5 metros, totalizando seções com 177,5 metros de comprimento.

Os cabos eram conectados entre si por uma *switch box*, totalizando cinco *switch boxes*. As linhas foram montadas na direção EW e adquiridas no sentido oeste para leste. As linhas de aquisição foram configuradas com empilhamento máximo de 1. A partir dos resultados da simulação numérica, foram escolhidas as melhores configurações de campo para o objetivo em questão.

A aquisição foi realizada de oeste para leste (Figura 14), seguindo de L1 para L1', L2 para L2', e assim por diante. As coordenadas do início, meio e fim das linhas foram coletadas utilizando um GPS da marca Garmin, modelo eTrex10, com resolução de 7 metros.

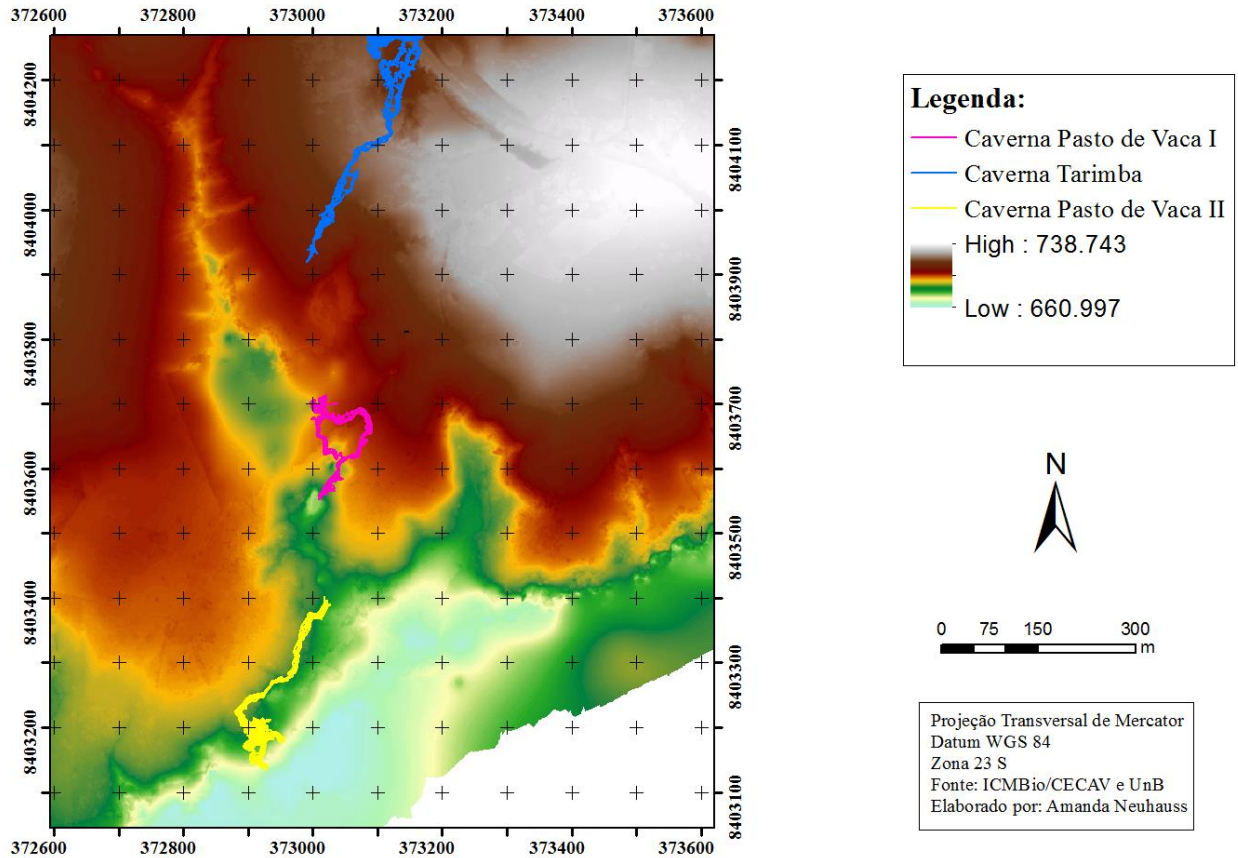


Figura 13: Modelo Digital de Terreno (MDT) com a localização e geometria das cavernas mapeadas pelo grupo de espeleologia GREGO. Em azul a projeção da Caverna Tarimba, em rosa e amarelo os traçados das cavernas Pasto de Vaca I e II, respectivamente.

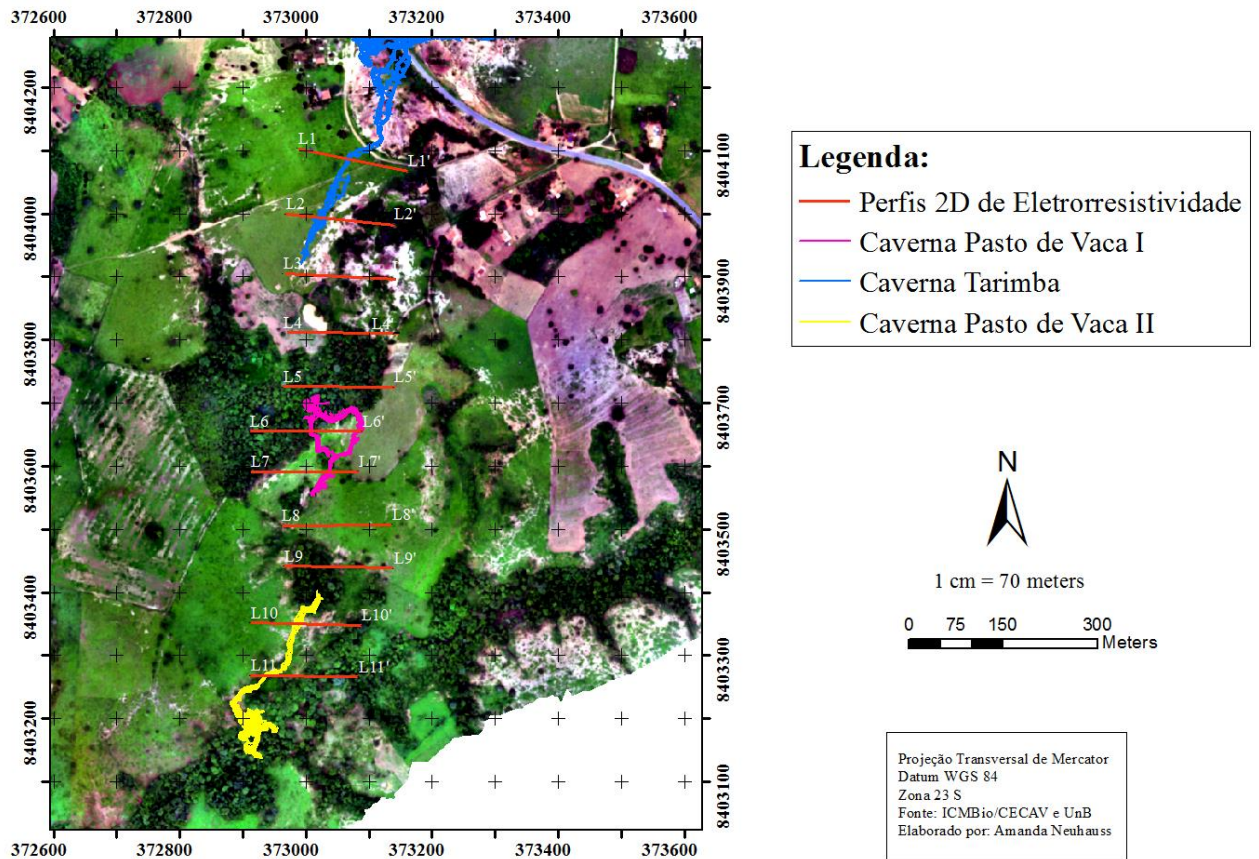


Figura 14: Ortofoto obtida por drone com a localização das linhas de eletrorresistividade e a projeção das cavernas mapeadas pela GREGO.

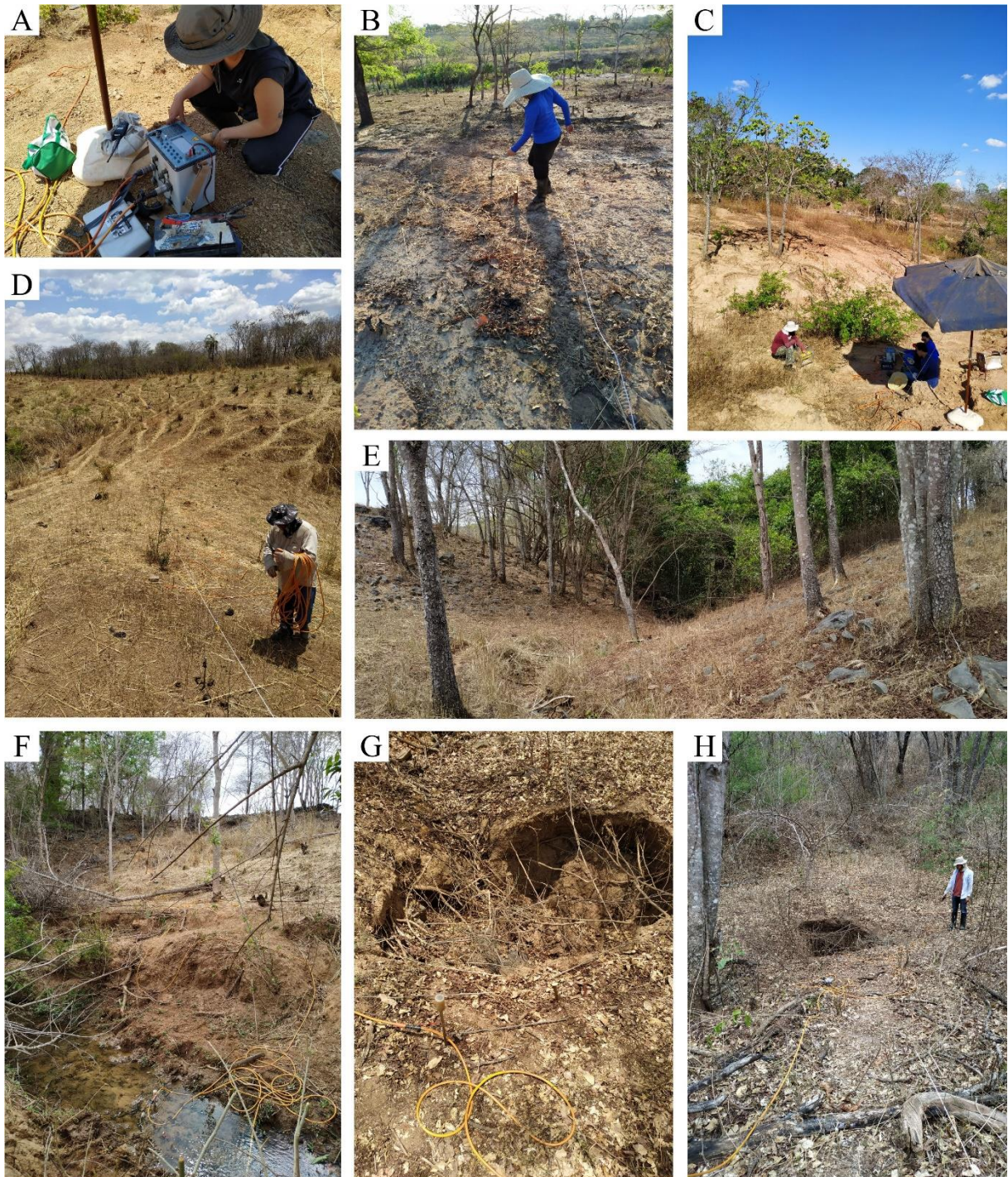


Figura 15: Fotografias evidenciam as aquisições de dados em campo. A) Eletrorresistívmetro Syscal Pro em operação. B, C e D) Equipe realizando a disposição dos cabos em campo. E) Disposição dos cabos perpendicular à entrada da caverna. F) Eletrodo dentro do Rio Extrema. G) Eletrodo próximo a uma depressão relacionada a um processo de dolinamento. H) Cabo próximo a um buraco proveniente de colapso de cavidade.

### 5.1. TESTE DE ARRANJOS

Com o intuito de otimizar o tempo em campo, foi realizado um teste de arranjos para eleger os melhores arranjos para a situação geológica real em questão. No primeiro dia de campo foi feita apenas uma linha, encima de parte da Caverna Tarimba, com os melhores arranjos simulados com a modelagem direta (WS, DD e PD). A região da caverna onde foi feita a aquisição possui aproximadamente 9 metros de largura e profundidade desconhecida.

A região cárstica é caracterizada por conter dolinas e entradas de cavernas por toda sua extensão, desta forma, quanto maior for a linha de aquisição, maior a chance de cruzar por essas áreas. Por este motivo, a alocação de eletrodos remotos tende a ser mais restrita. Por conta da restrição em campo, o arranjo PP foi descartado primeiramente.

Na aquisição dos dados de resistividade elétrica dos testes de arranjos, alguns dados foram perdidos em função da falta de acoplamento do eletrodo no solo, provocada pelo rompimento de fios internos do cabo de multieletrodos. Os dados de campo obtidos com os arranjos WS, DD e PD mostraram boa correspondência horizontal, com diferenças apenas em algumas anomalias verticais (Figura 16).

Após a realização da seção teste, optou-se pela continuidade da aquisição dos dados de campo nas demais linhas, apenas com os arranjos DD e PD, uma vez que os resultados obtidos com o WS não evidenciou a presença da Caverna Tarimba.

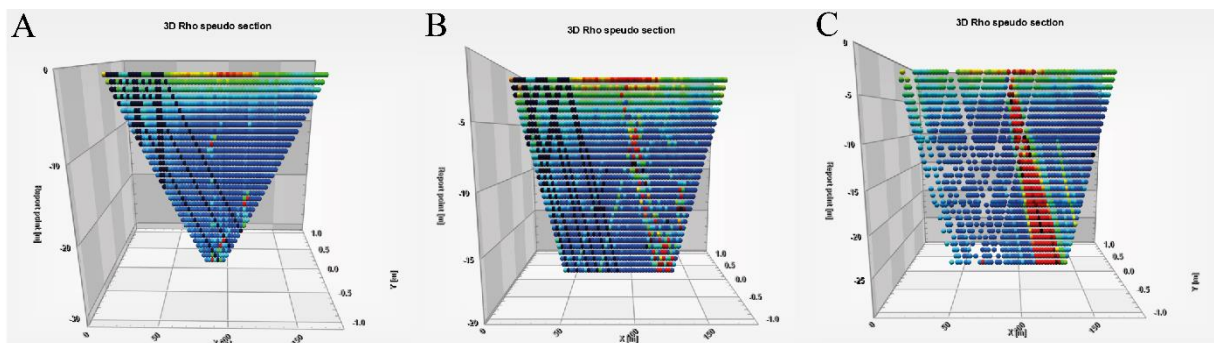


Figura 16: Distribuição dos pontos de resistividade elétrica obtidos no perfil teste com os arranjos: a) Wenner-Schlumberger, b) Dipolo-Dipolo e c) Polo-Dipolo.

# CAPÍTULO 6

## 6. MODELAGEM

Os dados de resistividade elétrica obtidos em campo, passaram por processos de filtragem e modelagem inversa para posteriormente análise e interpretação dos resultados.

### 6.1. FILTRAGEM

A análise da qualidade dos dados de resistividade elétrica ocorreu no *software Prosys II (Iris Instruments)*. Antes da filtragem inseriu-se a topografia das linhas a cada 2,5 metros, dessa forma os resultados serão dispostos em cota e não profundidade (Figura 17). Os registros de topografia proveem do levantamento fotogramétrico realizado com o drone para o Projeto CECAV/ICMBio.

Após a inserção da topografia, transformaram-se os registros de resistividade para valores absolutos, uma vez que há registros de potencial elétrico negativo, os quais não possuem significados físicos, já o que importa é o gradiente do potencial (Figura 18).

Os critérios de filtragem dos dados de resistividade elétrica foram eliminação de registros com elevado valor de resistência de contato (acima de 5 KOhm.m), valores de resistividade elétrica muito próximos de zero (mínimo 5 Ohm.m), e anomalias pontuais (*spikes*) ao longo da pseudoseção (Figura 19). Após a filtragem dos dados notou-se que as maiores perdas (menor que 30%) ocorreram com o arranjo polo dipolo (Tabela 1).

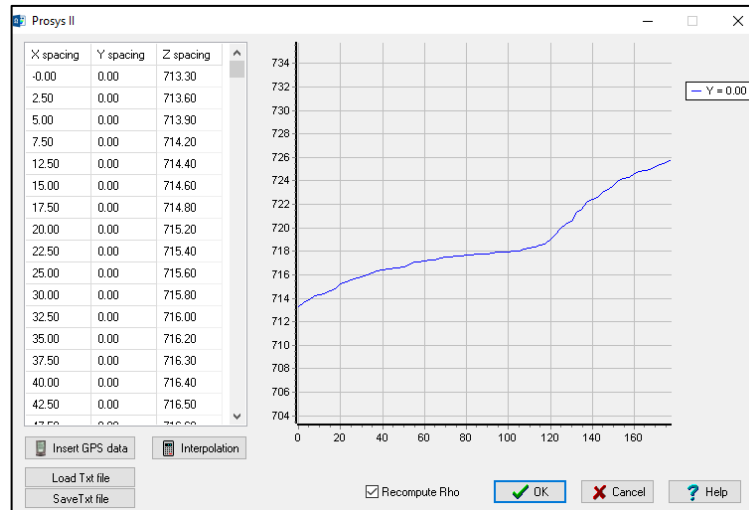


Figura 17: Foto da planilha e representação gráfica de topografia inserida em parte de uma linha de resistividade elétrica obtida em campo (Software PROSYS II).

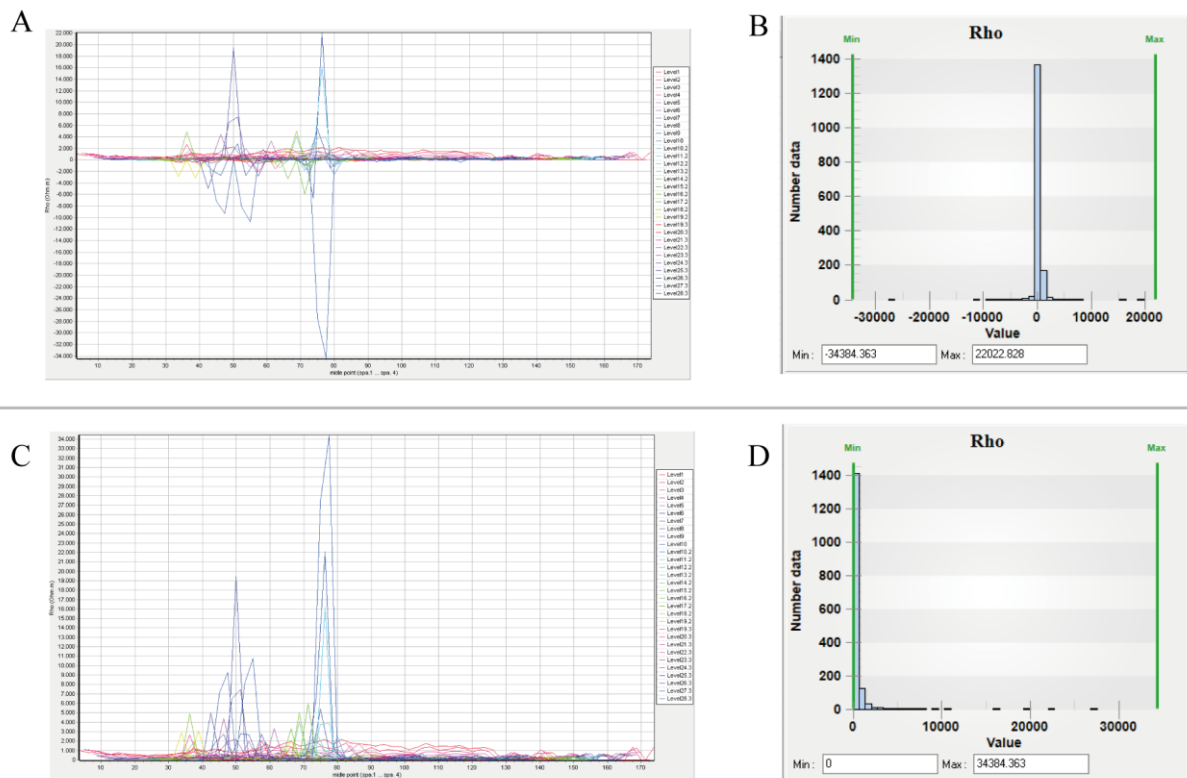


Figura 18: Etapa de conversão dos dados de resistividade elétrica em valores absolutos. a) gráfico de resistividade em cada espaçamento ao longo da linha com os valores negativos brutos b) Histograma com os valores negativos ainda presentes c) gráfico de resistividade em cada espaçamento ao longo da linha após transformá-los em valores absolutos d) Histograma com apenas valores positivos

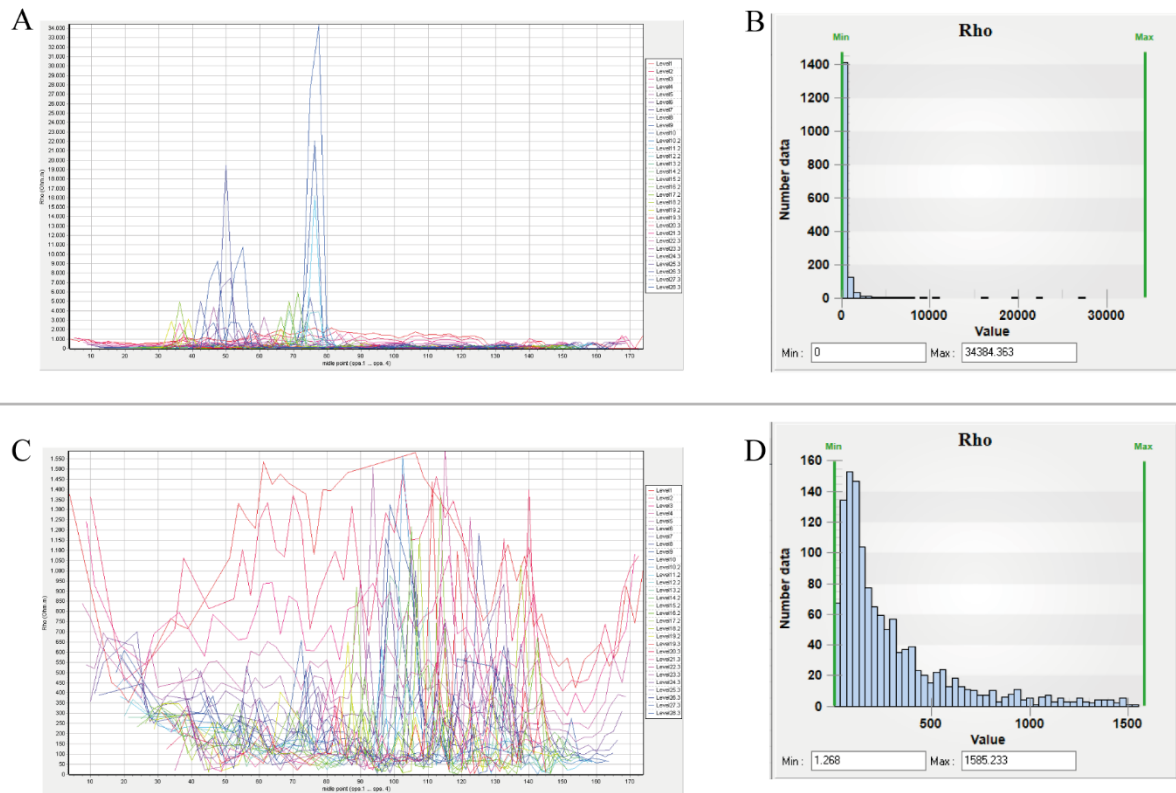


Figura 19: (a) Distribuição dos registros brutos de resistividade elétrica por nível de profundidade da linha de testes obtida com o arranjo DD, e respectivo Histograma (b). (c) Distribuição dos registros filtrados de resistividade elétrica por nível de profundidade da linha de testes obtida com o arranjo DD, e respectivo Histograma (d).

Tabela 1: Arranjos eletródicos e respectivas profundidades de investigação, número de pontos antes e após a filtragem, bem como a porcentagem de dados removidos nos processos de filtragem dos registros de resistividade elétrica da Linha de Teste.

	Profundidade de investigação	Número de dados iniciais	Número de dados finais	% perda
Wenner-Schlumberger	34	1216	1004	17,43421
Dipolo-Dipolo	23	1605	1294	19,37695
Polo-Dipolo	30	1665	1230	26,12613

## 6.2. INVERSÃO

Após a etapa de filtragem dos dados no *Prosys II*, os dados foram convertidos para o software RES2DINV, onde aconteceram eventuais filtrações e a modelagem inversa dos dados. O RES2DINV é um programa que, a partir de dados de investigações de eletrorresistividade, determina um modelo elétrico 2D da subsuperfície com a aplicação de uma rotina matemática de inversão.

Para a regularização do modelo físico, optou-se pela homogeneização das espessuras das camadas do modelo. Assim usou-se a função “change thickness of layers” para ajustar as camadas (Figura 20).

Outra etapa de modelagem consistiu em aplicar um peso maior no filtro de suavização horizontal, o que possibilita ressaltar as estruturas verticais. Nesta etapa modificou-se a opção “vertical to horizontal flatness filter ratio” com peso 2 para realçar essas estruturas.

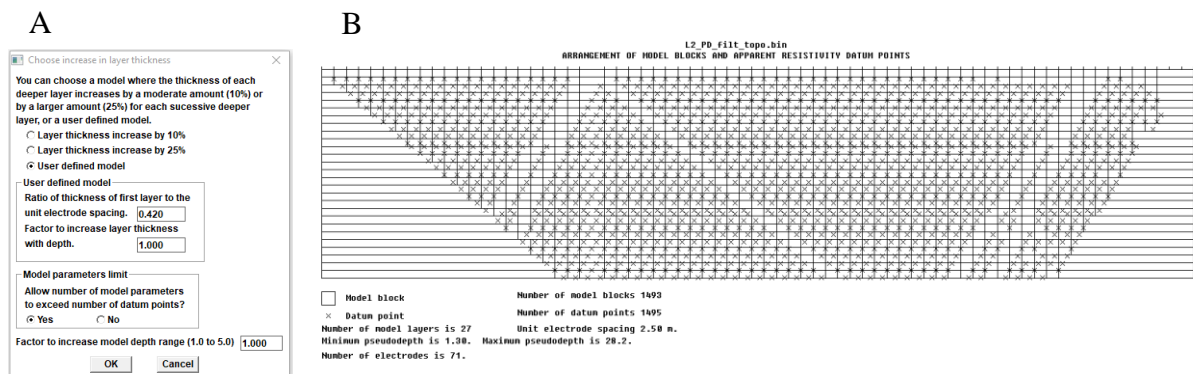


Figura 20:A) janela de configuração dos blocos e B) modelo de blocos após ajustes, respectivamente.

Por último, foi escolhida a melhor função numérica para realizar a inversão dos dados. O *software* fornece 3 opções principais: a inversão “mínimos quadrados”, esta inversão utiliza uma restrição de suavidade, na maioria dos casos esta restrição resulta em modelos com valores de resistividade variando suavemente; a inversão combinada utiliza dois métodos e deve ser aplicado em situação incomuns, onde a sensibilidade dos valores do modelo de blocos são distorcidos por conta da grande variação de resistividade; por fim, a inversão do tipo Robusta, utilizada quando é esperado limites fortes, bem definidos, como por exemplo zonas de cisalhamentos (Figura 21).

Na comparação dos resultados obtidos após as inversões (Figura 21) notam-se melhores definições limites na seção robusta. Para realizar a escolha da melhor inversão, foi feita uma análise do erro RMS e do erro absoluto de cada linha (Figura 22). Após a análise dos erros notaram-se menores erros usando-se a inversão robusta, deste modo a mesma foi usada nos demais dados.

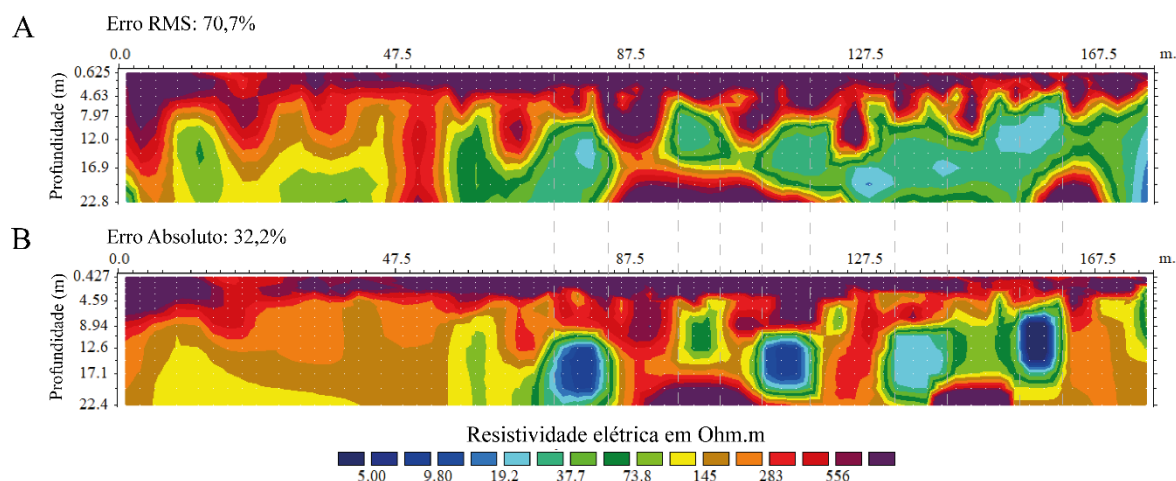


Figura 21: Modelos de resistividade elétrica da L1, arranjo dipolo dipolo, obtidos com as inversões a) mínimos quadrados e b) robusta.

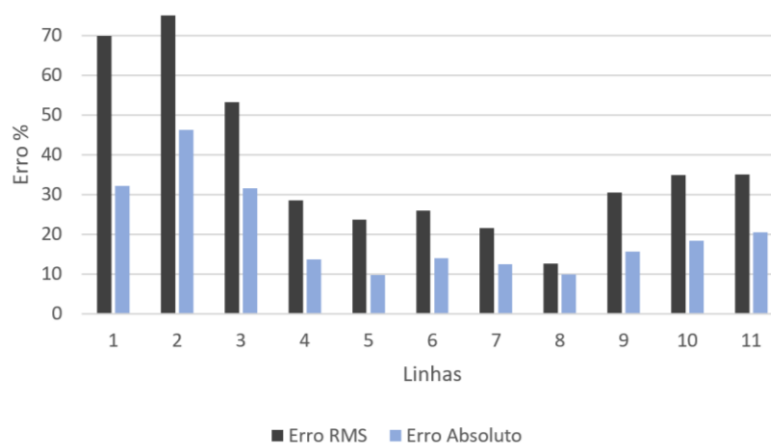


Figura 22: Distribuição de erros de resultados de diferentes tipos de inversão aplicados aos dados de resistividade das linhas realizadas na área de pesquisa.

Em alguns conjuntos de dados houve a necessidade de aplicar uma filtragem dos dados baseada no erro individual de cada ponto, ou seja, no processo de filtragem há possibilidade de comparar-se o erro do processo de modelagem em cada ponto amostrado e filtrar-se os pontos de grande discrepância. No programa Res2dinv, este processo é nomeado como *error statistics*.

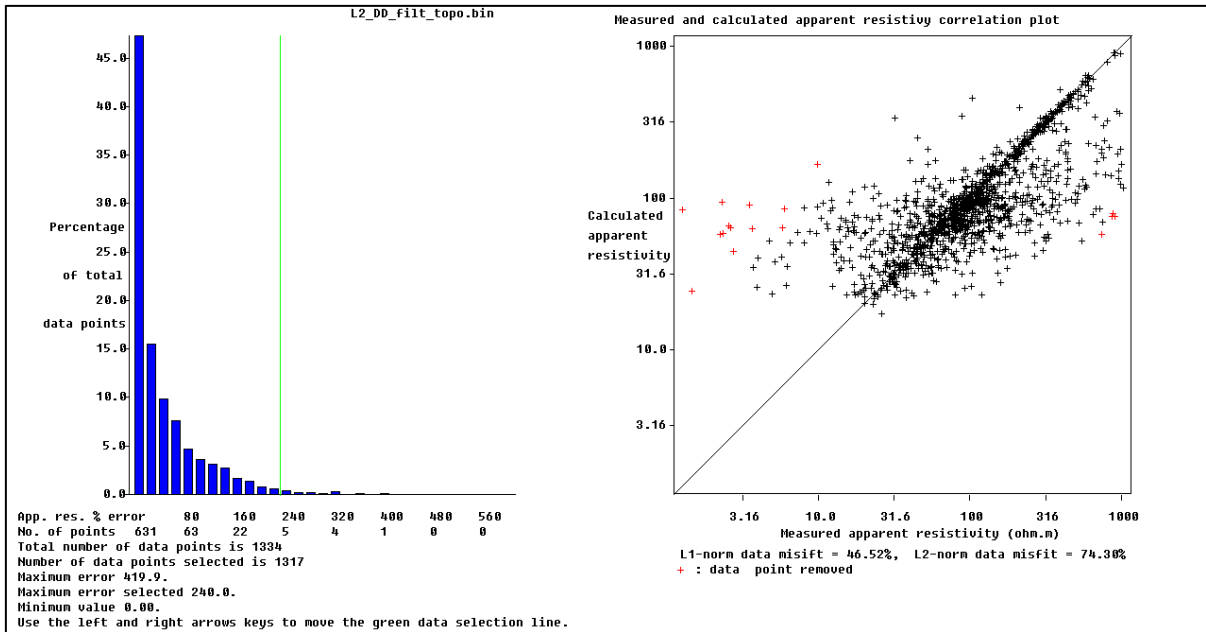


Figura 23: Histograma de distribuição do erro em função da porcentagem de número de pontos. Gráfico de correlação entre os valores de resistividade aparente registrados em campo e calculados no modelo direto. A em verde no histograma representa o intervalo de dados que serão eliminados. No gráfico de correlação os dados eliminados aparecem como pontos vermelhos.

# ***CAPÍTULO 7***

## **7. RESULTADOS**

Nesta sessão serão apresentados os resultados dos testes de arranjos realizados no início do campo e os resultados das 11 linhas de eletrorresistividade.

### **7.1. TESTE DE ARRANJOS ELETRÓDICOS**

Nesta etapa definiram-se as melhores configurações eletródicas de campo analisando-se resultados obtidos com os arranjos Dipolo-Dipolo, Polo-Dipolo e Wenner-Schlumberger. Conforme descrito anteriormente, as aquisições aconteceram sobre uma área onde tinha-se conhecimento da presença de uma caverna com 9 metros de largura. Ao analisar as três sessões de resistividade elétrica notam-se que elas possuem sensibilidades distintas.

Os arranjos DD e PD aparentam ter maior similaridade, foram capazes de mapear as mesmas cavidades, é possível notar ainda as suas diferenças, em que o DD mapeou com maior resolução os primeiros metros, enquanto o PD atingiu maiores profundidades. O Wenner-Schlumberger, apesar de ter uma penetratividade maior que a do PD, e ter a menor porcentagem de perda de dados durante o processo de modelagem de dado, o mesmo não foi capaz de mapear a cavidade conhecida (Figura 24).

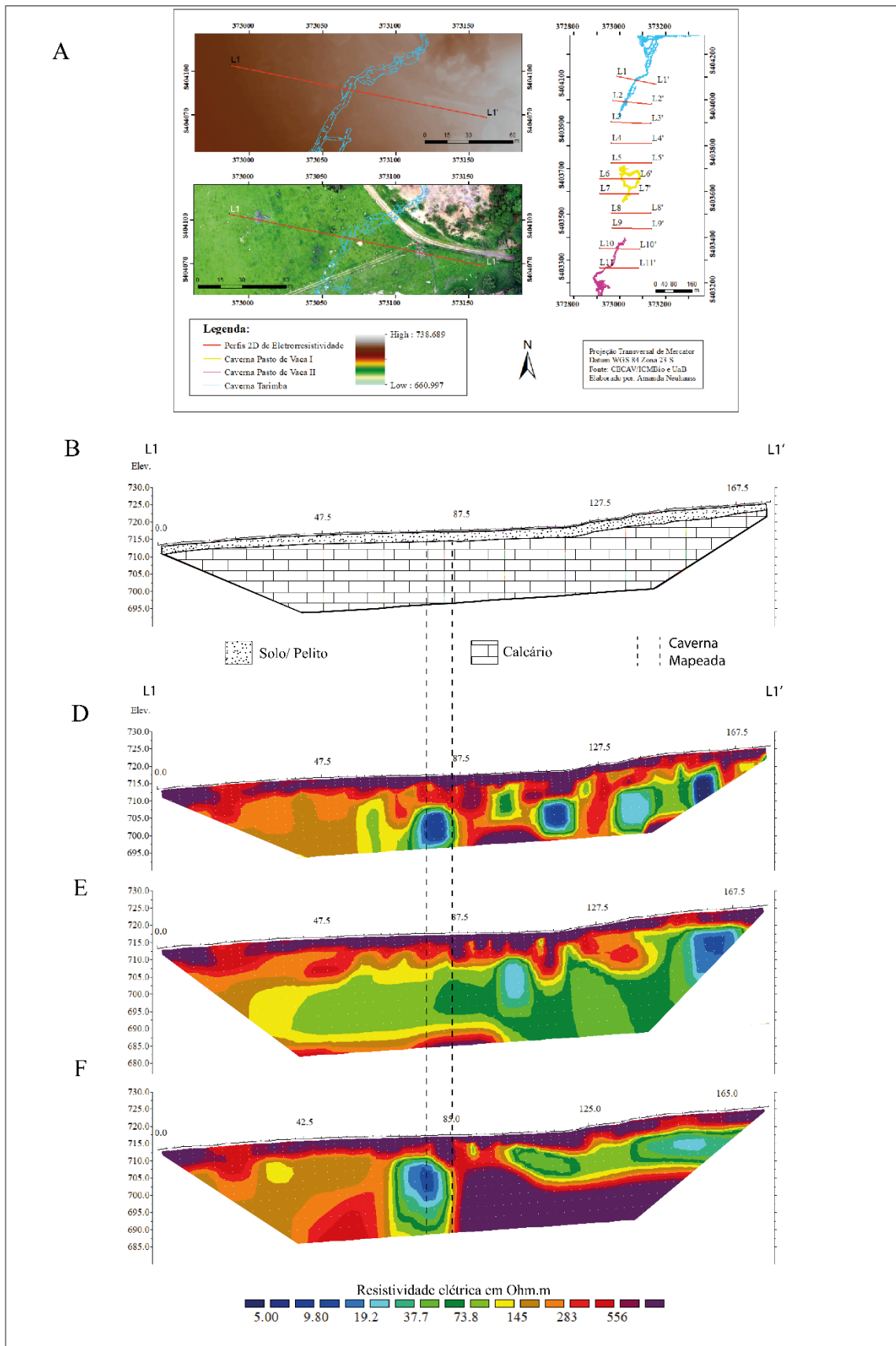


Figura 24:(A) Localização da Linha Teste na área do trabalho. (B) Modelo geológico com a indicação da localização da Caverna Tarimba. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (C)WS, (D) DD, e (E) PD.

## 7.2. INTERPRETAÇÃO

Os resultados da modelagem inversa dos dados de resistividade DD e PD foram analisados em conjunto com o objetivo de identificar relações entre si a fim de localizar fraturas e zonas de possíveis vazios. Para isso os perfis foram criados utilizando a mesma escala vertical, horizontal e *Datum* (Figura 25).

Neste trabalho, optou-se pelo uso de faixas de valores de resistividade para delimitar cada feição. O objetivo da interpretação dos dados foi, a partir da análise de contrastes de valores de resistividade, identificar as principais estruturas relacionadas ao sistema cárstico, como por exemplo as camadas esperadas de pelitos e calcários, e as estruturas, como vazios, falhas e cisalhamentos.

### 7.2.1. LINHA 1

A Linha 1 encontra-se em uma área de pasto, onde a topografia cresce de oeste para leste. A caverna mapeada cruza a linha de aquisição nos 77,5 metros de distância do início do perfil (Figura 26).

Analisando os valores de resistividade elétrica da Linha 1 é possível identificar padrões de resistividade característicos de regiões cársticas. Os valores de alta resistividade, maiores que 556 Ohm.m, localizados nos primeiros 5 metros de profundidade estão correlacionados, devido à distância, com resquícios de deposição de sedimentos Colúvio-Eluvionares. A camada de calcário maciço foi interpretada como sendo a última camada, com alta resistividade, maior que 556 Ohm.m.

A camada amplamente distribuída pela seção de resistividades intermediárias, variando entre 145 e 283 Ohm.m, foi interpretada como o calcário intercalado com pelito. Nela é possível identificar estruturas como vazios, estrutura circular com resistividades baixas variando entre 5 e 37,5 Ohm.m, falhas, estrutura linear vertical onde existe grande contraste entre alta e baixa resistividade descrevendo o limite entre o calcário e a caverna mapeada, e zonas de cisalhamento, estruturas verticais onde é possível observar resistividades menores que as circundantes.

A primeira cavidade, da esquerda para a direita, foi identificada como sendo a Caverna Tarimba, e outras três possivelmente são dutos secundários com passagens estreitas não mapeados pelos espeleólogos.

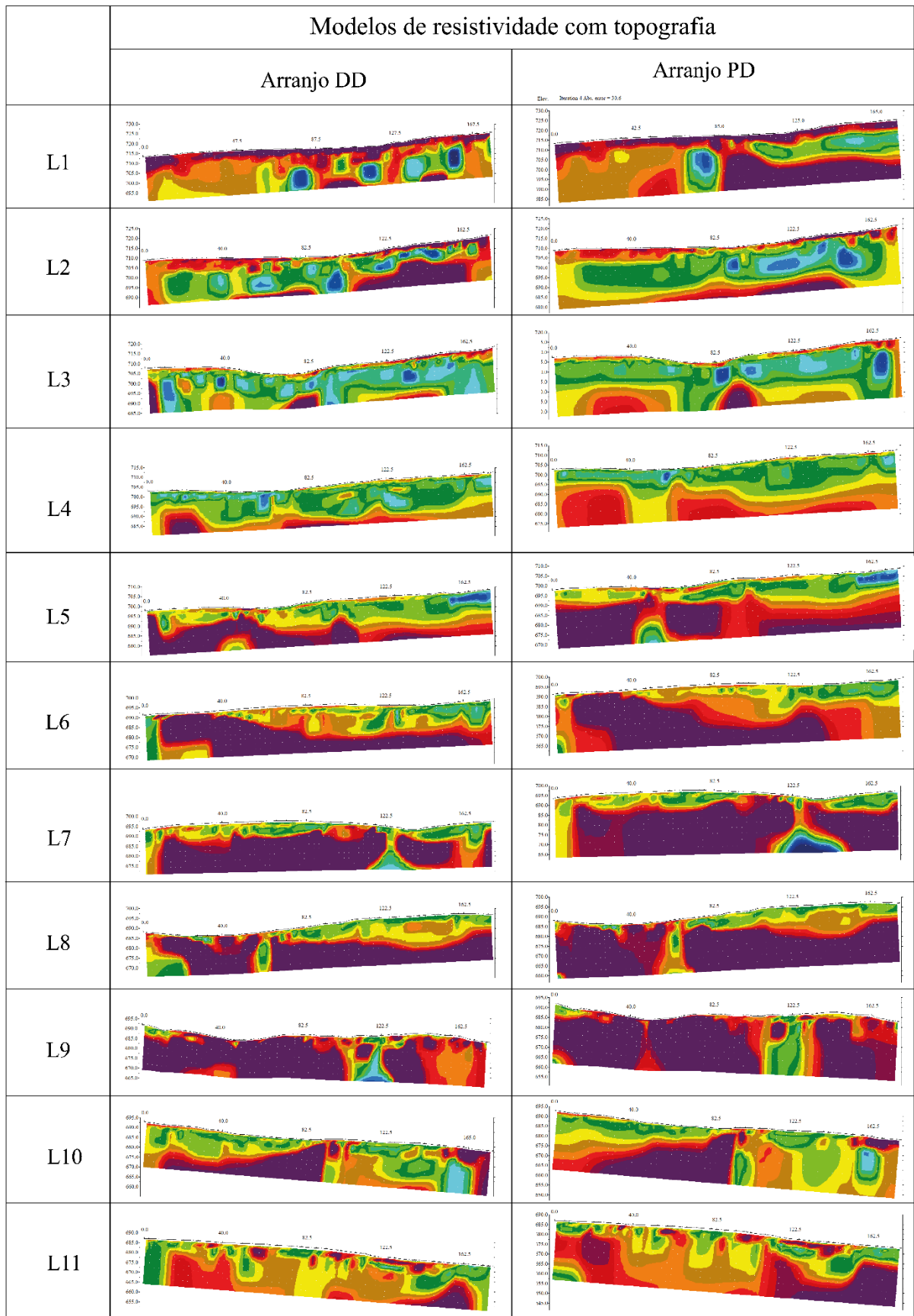
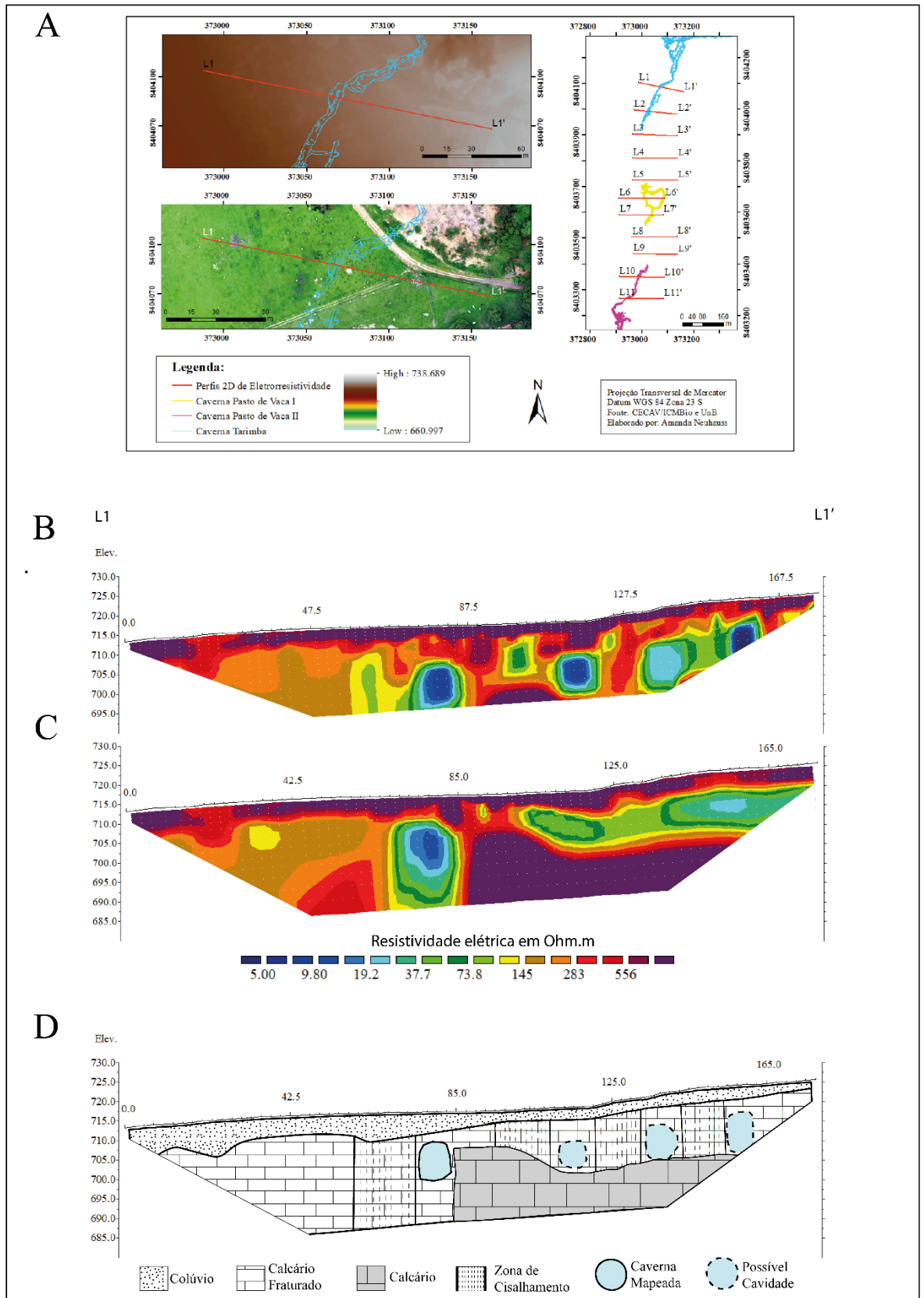


Figura 25: Modelos de resistividade elétrica das seções L1 a L11 obtidos com os arranjos DD e PD.



*Figura 26: (A) Localização da Linha 1 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização da Caverna Tarimba.*

### **7.2.2. LINHA 2**

No modelo de resistividade elétrica obtido para a Linha 2, observa-se, na parte superficial das seções uma camada residual de alta resistividade interpretada como os depósitos Colúvio-Aluvionais (Figura 27). Esta primeira camada mostra uma espessura de 3 a 5 metros, com uma resistividade elétrica superior a 283 Ohm.m.

O calcário aparece ainda como sendo a última camada, a 20 metros de profundidade, aproximadamente, com valores de resistividade maiores que 556 Ohm.m.

A camada acima do calcário foi interpretada como sendo a camada de calcário fraturado com presença de lentes de pelitos. Esta camada abrange toda a seção entre 5 e 20 metros de profundidade, e resistividades intermediárias variando entre 73 a 145 Ohm.m. Nesta camada notam-se inúmeras zonas de baixa resistividade interpretadas como zonas de cisalhamento e cavernas úmidas.

As estruturas circulares de baixa resistividade, entre 5 e 19,2 Ohm.m foram interpretadas nesta linha como sendo cavernas com águas ou com sedimentos saturados. A primeira caverna corresponde ao duto da Caverna Tarimba, e as 4 seguintes podem ser interpretadas como dutos estreitos da Caverna Tarimba que não são possíveis de serem mapeados por espeleólogos.

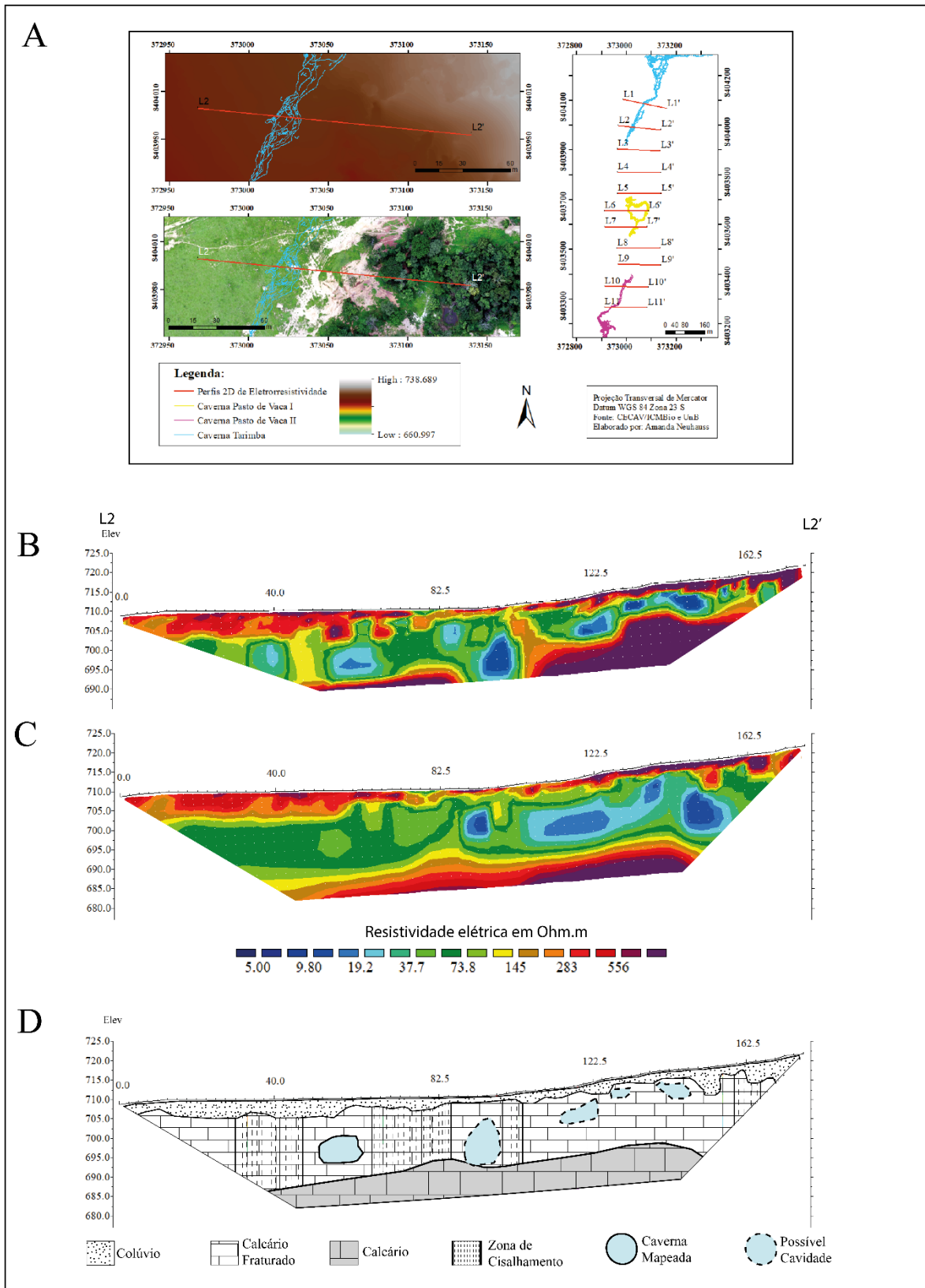


Figura 27: (A) Localização da Linha 2 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização da Caverna Tarimba (Caverna mapeada).

### 7.2.3. LINHA 3

Na seção 3 ainda é possível localizar uma fina camada resistiva ao longo da Linha 3, com aproximadamente 2 metros de profundidade, e com resistividade acima de 283 Ohm.m (). Com o modelo definiu-se o calcário como sendo a última camada de alta resistividade (acima de 556 Ohm.m).

Entre os sedimentos da primeira camada e o calcário na última camada, encontra-se uma camada de resistividade intermediária ao longo de toda a seção. A resistividade desta camada varia entre 37,7 e 115 Ohm.m, entre 5 e 17,5 metros de profundidade. Os limites das camadas são bem definidos por discordâncias. Nesta camada é onde se encontram as zonas de fraquezas saturadas, o que justifica a faixa de resistividade relativamente mais baixa.

No mapa topográfico da área (Figura 28A) nota-se um baixo topográfico oval, entre as linhas 3 e 4, e outra na linha 5. Esses baixos topográficos refletem áreas de subsidência, onde existem duas dolinas. Na Linha 3, entre as posições 45 e 87,5 metros, nota-se um padrão condutivo, que possivelmente relaciona-se com uma área colapsada, com fluxo de água subterrânea. Esta teoria é corroborada com relatos dos donos da propriedade, que afirmam a ocorrência de um colapso de caverna e surgimento de uma dolina por volta dos anos 1960.

Logo abaixo da zona colapsada foi identificada uma zona fraturada, possivelmente o que tornou a região relativamente mais condutiva. Nesta seção foram identificados ainda nesta camada quatro possíveis cavidades rasas com fluxo de água, com baixas resistividades de até 19,2 Ohm.m.

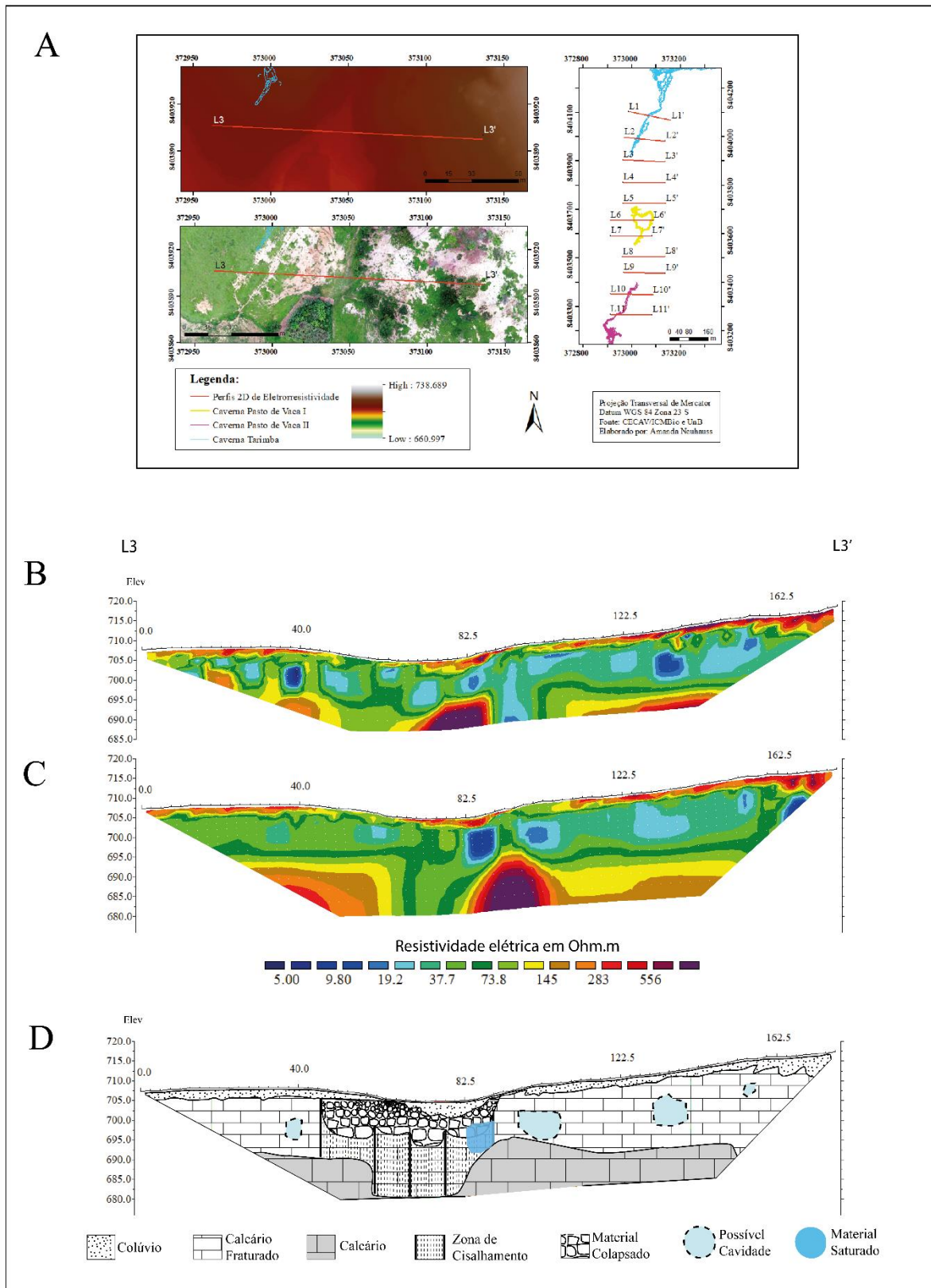


Figura 28: (A) Localização da Linha 3 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina.

#### 7.2.4. LINHA 4

Na seção 4 aparece novamente uma fina camada resistiva, a partir de 75 metros desde o início do perfil, com aproximadamente 1 metro de profundidade (Figura 29). A última camada resistiva, acima dos 556 Ohm.m, aparece a partir dos 10 metros de profundidade, com a superfície horizontalizada. A camada intermediária, de resistividades intermediárias entre 37,7 a 145 Ohm.m, abrange lateralmente toda a seção. Essas três camadas principais possuem limites bem marcados por contraste de resistividade, e foram interpretadas como sendo, respectivamente, o depósito de colúvio, o calcário e o calcário fraturado.

A Linha 4 está na mesma região da dolina identificada na Linha 3. Apesar da linha de aquisição ter sido posicionada nas bordas da área colapsada, foi possível identificar feições que podem estar relacionadas com o colapso. Entre 40 e 72 metros do início do perfil está presente uma região com feições verticalizadas e de baixa resistividade e uma feição arredondada com maior condutividade, indicando que a área possivelmente está inserida em uma zona de colapso, onde possivelmente existe um fluxo de água subterrânea, definida como sendo uma região de material saturado. Abaixo desta zona colapsada está localizada uma feição vertical de resistividade intermediária atravessando a camada de maior resistividade. Esta estrutura é interpretada como uma zona de cisalhamento, onde o calcário aparenta estar mais fraco, o que justificaria o formato vertical e a baixa resistividade. A aproximadamente 125 metros de distância do início do perfil está localizada uma estrutura condutiva quase circular, interpretada na seção como sendo uma possível cavidade com água ou materiais saturados.

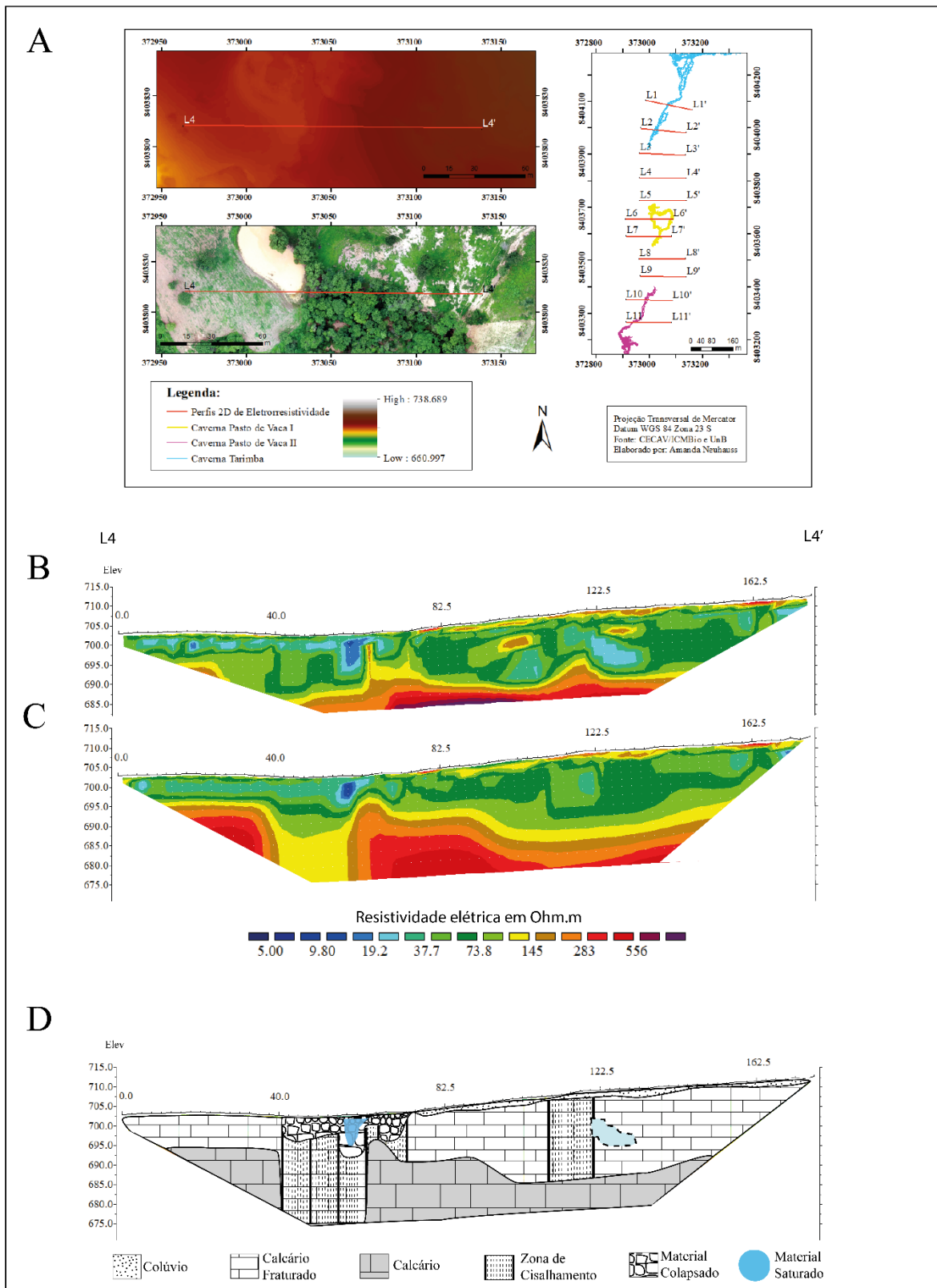


Figura 29: (A) Localização da Linha 4 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina.

### 7.2.5. LINHA 5

A Linha 5 está contida maioritariamente em uma mata nativa desenvolvida em uma fina camada de neossolo, sobreposta a camadas de calcários e presença de cavernas (Figura 30). A topografia é crescente de oeste para leste, com uma pequena depressão na primeira metade da linha.

Esta seção apresenta uma primeira camada com resistividades intermediárias variando entre 73,8 a 283 Ohm.m, e abrange toda a seção até aproximadamente 10 metros de profundidade. A última camada, de maior resistividade, acima de 556 Ohm.m, aparenta estar horizontalizada, iniciando a partir dos 10 metros de profundidade. A primeira camada foi interpretada como sendo o calcário fraturado e a camada resistiva como sendo o calcário.

Na camada interpretada como calcário é possível identificar feições verticalizadas de resistividades relativamente menores, a partir de 40 metros do início do perfil. Estas feições foram interpretadas como sendo zonas de cisalhamento, e logo abaixo foi identificado uma estrutura condutiva, com resistividade menor que 20 Ohm.m, de formato circular, interpretada como uma caverna. Esse conjunto de estruturas provavelmente contribuíram para causar o colapso localizado na superfície, entre os 42,5 e 60 metros. Diferente das zonas de colapso das linhas 3 e 4, esta apresenta resistividades comparativamente maiores, o que pode significar que o fluxo de água do nível superior flui para a caverna de nível inferior.

A partir dos 102,5 metros na seção, entre as cotas 687,5 a 697,5 metros aparece uma estrutura oval condutiva. Esta estrutura é interpretada como sendo uma cavidade, que pode relacionar-se aos condutos da Caverna Tarimba.

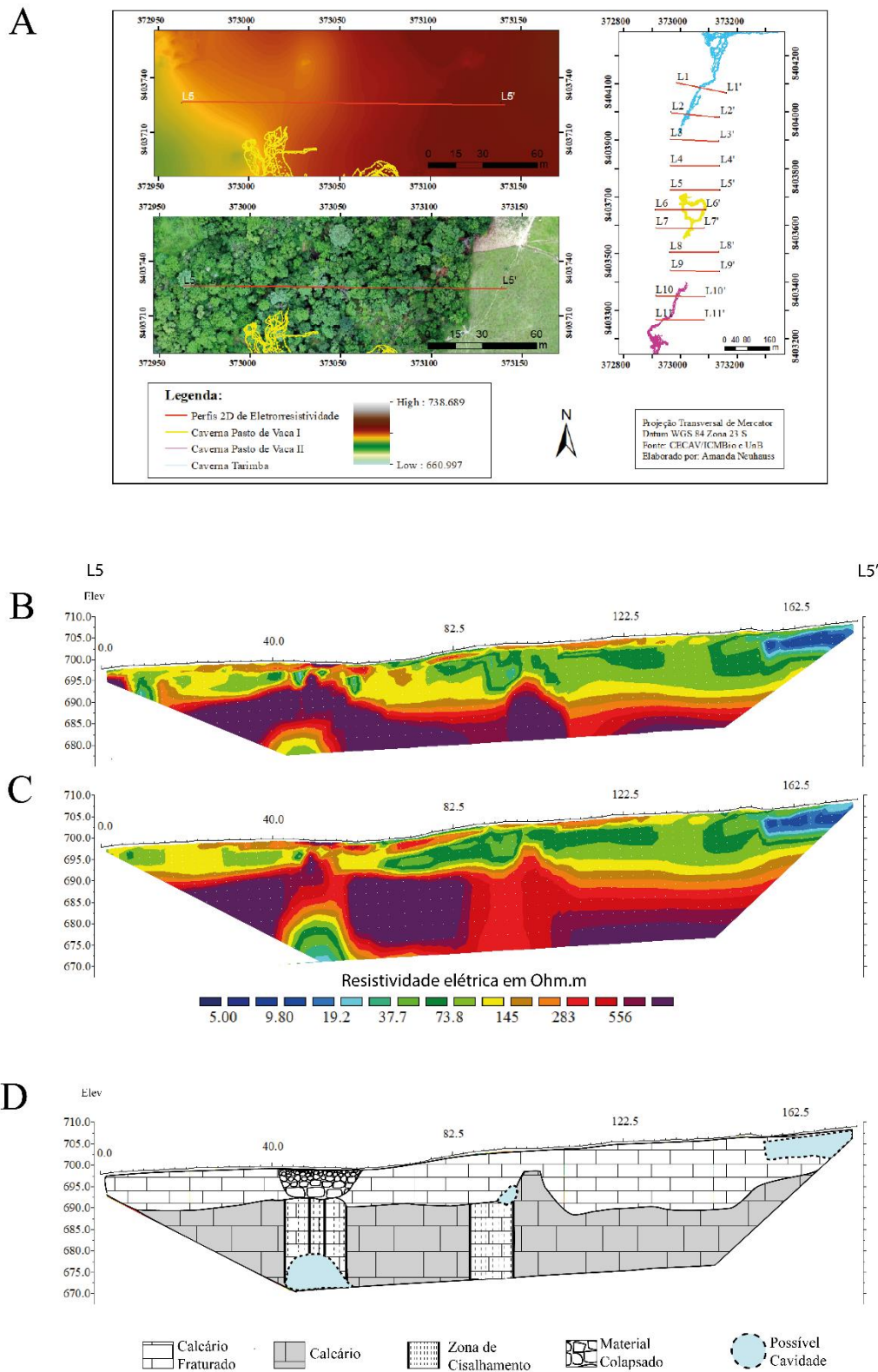


Figura 30: (A) Localização da Linha 5 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação da localização de uma dolina.

### 7.2.6. LINHA 6

Na imagem aérea (Figura 31A) observa-se que a linha está localizada em uma área de vegetação densa e mais a leste há presença de pasto. A topografia é suavemente crescente de oeste para leste.

Nas seções de resistividade elétrica delimitam-se duas camadas com faixas de resistividade distintas (Figura 31). A primeira camada mais rasa, chega até 20 metros de profundidade, se estende lateralmente ao longo do perfil a partir dos 35 metros até o final, possui a menor resistividade, entre 73,8 a 283 Ohm.m. Nesta camada notam-se feições verticalizadas condutivas o que sugere a presença de zonas de cisalhamento, esta camada foi interpretada como sendo o calcário fraturado.

No final do perfil, abaixo da área de pasto, está localizada uma região de maior condutividade, com resistividade entre 37,7 a 73,8 Ohm.m, indicando ser uma lente pelítica ou apenas um calcário fraturado saturado.

Por último identifica-se uma camada de calcário de alta resistividade, que estende-se por toda a extensão do perfil, o topo está mais raso no início, e atinge sua maior profundidade no final da seção.

Entre 127,5 e 130 metros do início do perfil está localizada uma anomalia condutiva de 6 metros altura. Esta anomalia pode ser um conduto da Caverna Pasto de Vaca I não mapeado pelos espeleólogos. O duto mapeado que cruza a linha nos 94 metros não aparece na seção. Uma hipótese para isto ter ocorrido está relacionada com a largura da caverna, pois como ela possui apenas 3 metros, teoricamente na aquisição a amostragem não foi suficiente para resolver as suas dimensões. O segundo duto da Caverna Pasto de Vaca I está cruzando a linha de aquisição em 170 metros, por isso não foi possível identificar anomalias referentes à essa caverna.

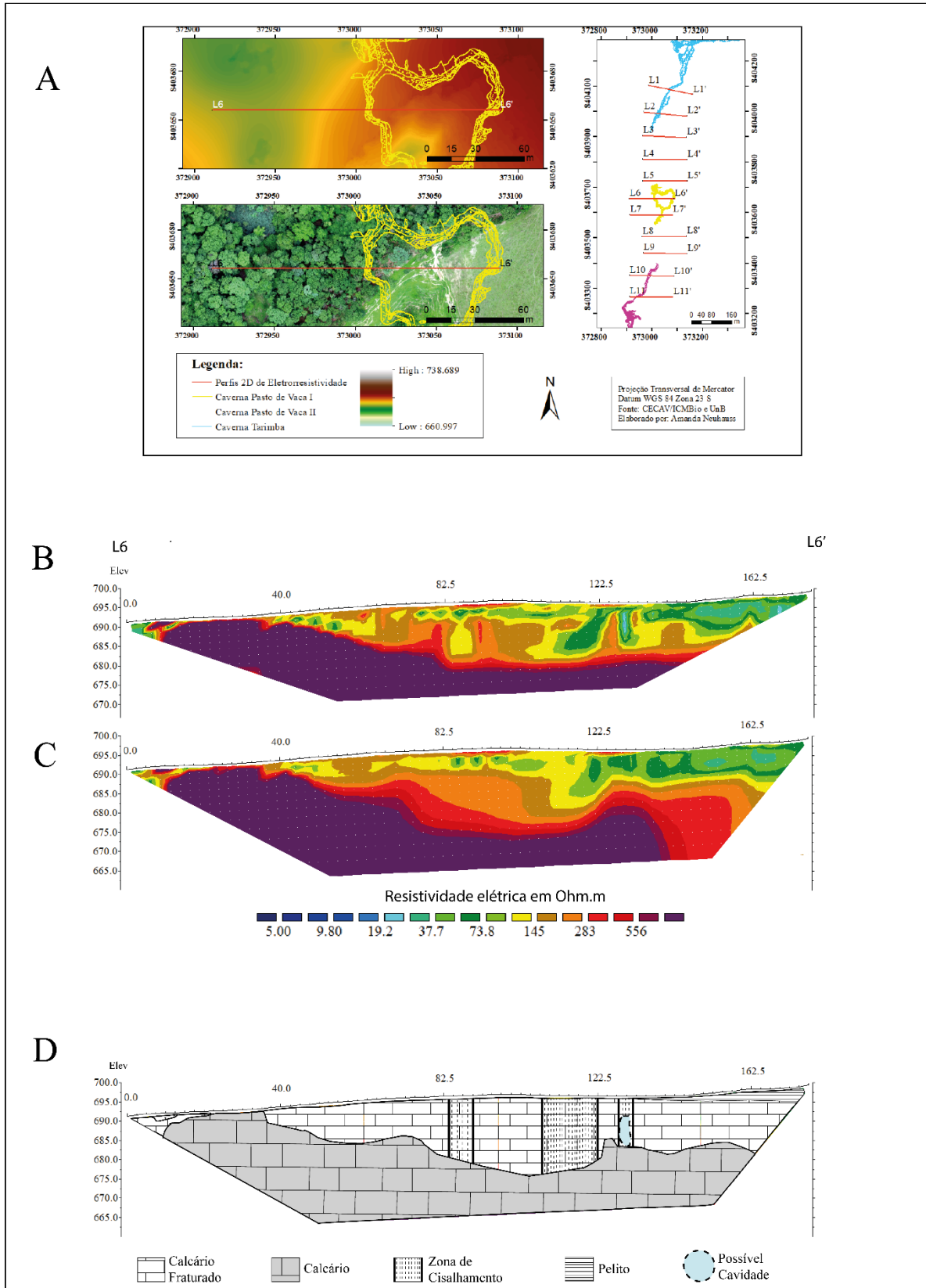


Figura 31: (A) Localização da Linha 6 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de zonas de cisalhamento e uma eventual cavidade.

### 7.2.7. LINHA 7

A linha 7 está localizada predominantemente em uma área de pasto, e a oeste está contida em uma região de vegetação densa. A topografia aparece plana com uma depressão na segunda metade, por onde passa um duto da caverna Pasto de Vaca I (Figura 32).

A seção apresenta uma primeira camada, de aproximadamente 15 metros, com resistividade variando entre 37,7 a 283 Ohm.m. Esta camada se estende ao longo do perfil, desaparecendo onde ocorre um baixo topográfico e reaparecendo em seguida onde há elevação do terreno. A camada resistiva logo abaixo, horizontal, com resistividade acima de 556 Ohm.m, se estende por toda seção, com uma espessura aproximada de 25 metros. Conforme a topografia abaixa, ela aflora na superfície. A primeira camada foi interpretada como o calcário fraturado e a segunda como sendo o calcário.

Exatamente onde ocorre o rebaixamento da topografia, a camada interpretada como calcário aparece fraturada, e nela, na cota 695 metros, ocorre uma anomalia altamente condutiva com formato oval, coincidindo com a localização do duto da Caverna Pasto de Vaca I. Outra evidência relevante é mostrada no MDT (Figura 32A), onde a posição do duto da caverna ocorre em um baixo topográfico seguindo um caminho passando pela Linha 8 e desaparecendo após a Linha 9. Este lineamento, entre as três linhas, relaciona-se possivelmente à caverna Pasto de Vaca I, e o fato dela ter causado um rebaixamento da topografia pode significar que os dutos estão mais superficiais nesta região, drenando como um funil os sedimentos da superfície por ela.

O começo desta linha iniciou em cima de uma pequena dolina colapsada, de aproximadamente 2 metros de largura e 0,5 metros de profundidade (figuras 15G e 15H), na seção é mostrado que nos primeiros eletrodos e nos primeiros metros de profundidade encontra-se uma anomalia condutiva de pequena dimensão, podendo significar que a região colapsada possui sedimentos saturados.

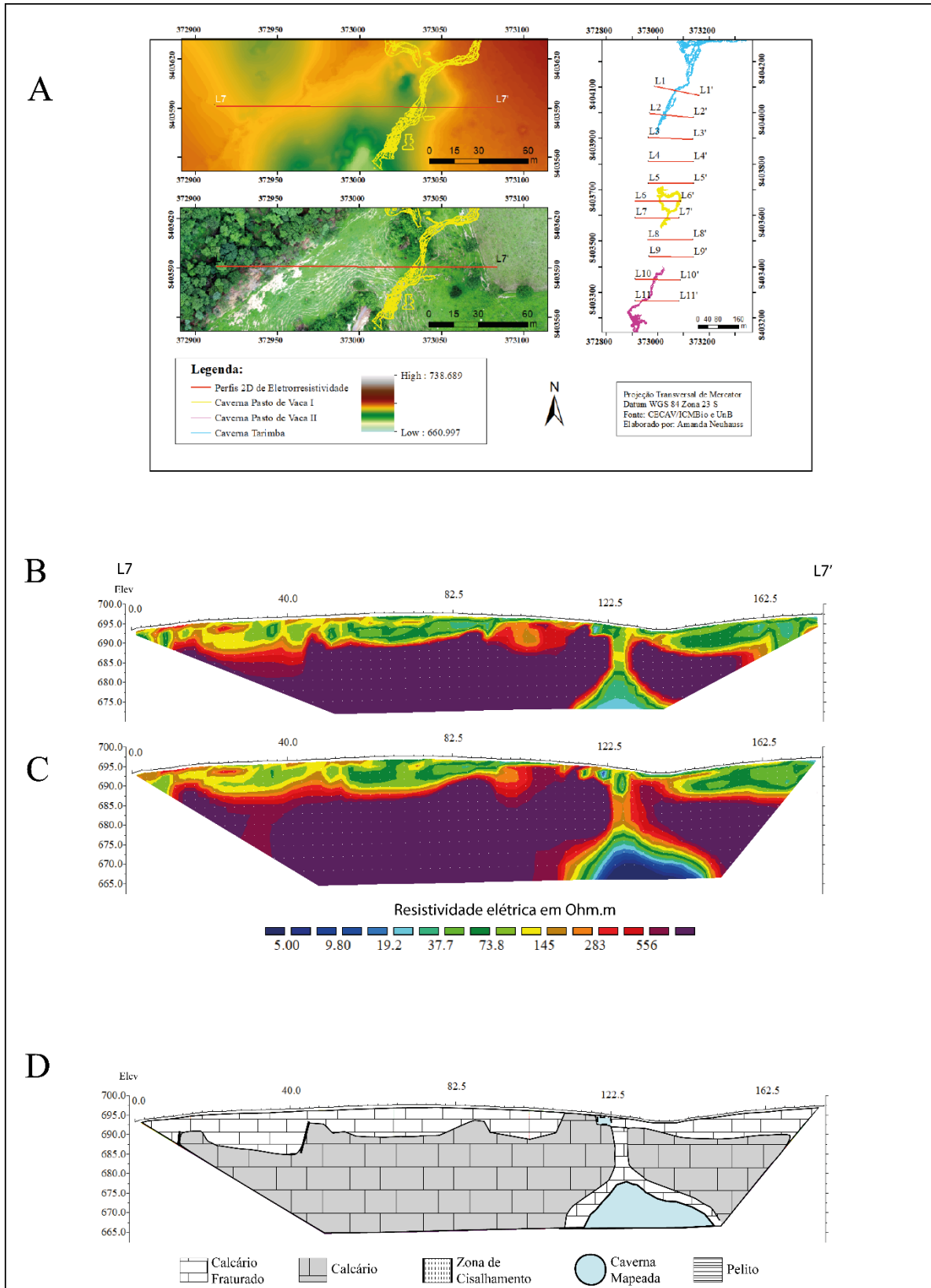


Figura 32: (A) Localização da Linha 7 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma caverna mapeada (Caverna Pasto de Vaca I).

### 7.2.8. LINHA 8

A Linha 8 está contida em uma área de pasto com topografia crescente de oeste para leste, com uma pequena depressão no início a oeste (Figura 33).

Esta seção apresenta três faixas de resistividades bem marcantes, uma primeira mais condutiva, uma mediana com resistividades intermediárias e por último uma de alta resistividade. A primeira camada (pelito), mais condutiva, está na faixa de resistividade entre 37,5 e 73,8 Ohm.m, inicia-se a partir dos 70 metros desde o início do perfil, e possui espessura média de 5 metros.

A terceira camada com alta resistividade, acima de 556 Ohm.m, horizontalizada, possui aproximadamente 25 metros de espessura e se estende ao longo de todo perfil. Esta camada foi interpretada como sendo a camada de calcário. Entre a primeira e a última camada encontra-se uma camada de resistividade intermediária (calcário fraturado), com resistividade entre 283 e 556 Ohm.m, a partir de 45 metros a partir de início do perfil.

Nos 30 metros iniciais do perfil, coincidindo com a região onde há uma depressão na topografia, nos primeiros metros de profundidade, quase na superfície, está localizado um corpo condutivo. Este corpo condutivo possivelmente está relacionado com um duto pertencente à Caverna Pasto de Vaca I. Esta depressão é contínua desde a linha anterior, e entre elas há um ponto de ressurgência e sumidouro, confirmando a hipótese de fluxo de água pelas cavernas.

A camada interpretada como calcário fraturado, ocorre também em uma zona fraturada do calcário maciço, em uma feição verticalizada chamada de zona cisalhada. Nesta feição verticalizada encontra-se uma feição oval de baixa resistividade, que pode também ser interpretada como sendo uma zona onde há a formação de uma caverna.

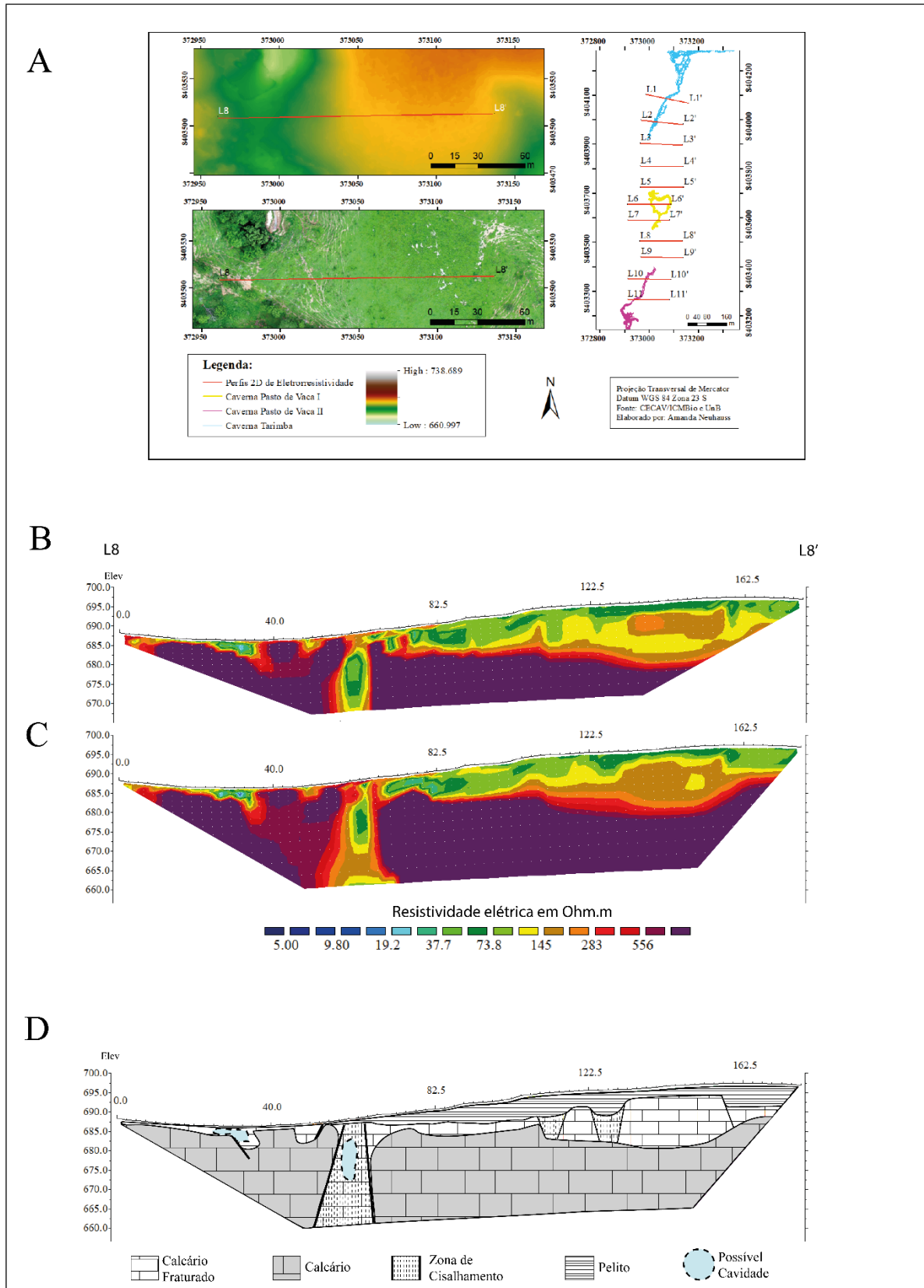


Figura 33: (A) Localização da Linha 8 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.

### 7.2.9. LINHA 9

A Linha 9 está localizada em uma área onde há um rio intermitente, como a aquisição foi no final da temporada de estiagem, o rio estava seco. Este rio segue um caminho até a entrada de uma caverna (Figura 34A). Dessa forma a topografia segue o relevo do rio na porção oeste da linha, e na porção leste a topografia se mantém aproximadamente plana.

Conforme as linhas vão se aproximando do Rio Extrema, a topografia desce e o calcário passa a aflorar em vários pontos (Figura 34). Nesta linha o calcário estava aflorando em praticamente toda extensão, exceto onde a topografia era mais alta, nos primeiros metros, o que corrobora com o resultado do modelo geoeletrico.

Esta seção apresenta uma grande camada altamente resistiva, acima de 556 Ohm.m com algumas anomalias condutivas verticalizadas. Esta camada resistiva aparenta ser maciça, sem variações de resistividades em seu interior, e por isso foi interpretada como sendo o calcário. Acima desta camada, onde ocorrem resistividades intermediárias, entre 145 a 283 Ohm.m, principalmente no começo do perfil a oeste, até 30 metros de distância do início do perfil, com 5 metros de profundidade, e no final a partir de 82,5 metros do início do perfil, até o final deste, com profundidade média de 10 metros.

Algumas feições relativamente condutivas foram observadas nesta seção. A primeira é uma feição verticalizada, ocorre a 47,5 metros do início do perfil, possui uma pequena espessura e corta o perfil até a cota mais profunda. Esta feição vertical é coincidente com a posição intermitente, e foi interpretada como sendo uma fratura que está em estágio inicial de dissolução. A segunda feição condutiva está localizada na camada de resistividade intermediária, interpretada como sendo o calcário fraturado, a 120 metros do início do perfil, a 5 metros de profundidade, aproximadamente. Esta feição condutiva foi interpretada como sendo uma cavidade preenchida por água ou material saturado. A última feição está localizada a 20 metros de profundidade, a 110 metros do início do perfil, e possui resistividade menor que 19,2 Ohm.m. Esta feição foi interpretada como sendo uma cavidade com água ou material saturado.

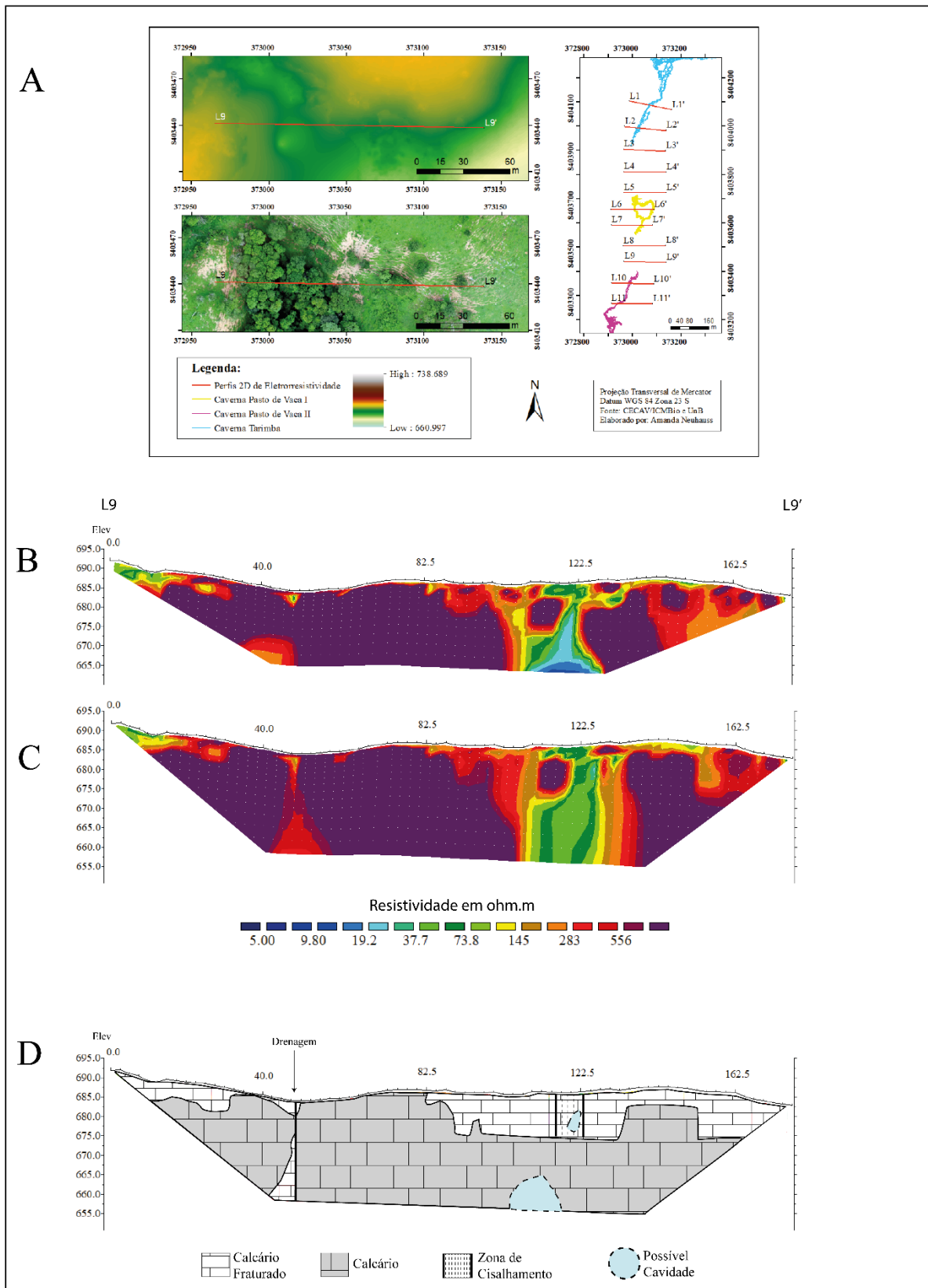


Figura 34: (A) Localização da Linha 9 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.

### 7.2.10. LINHA 10

Iniciando a interpretação pela análise do MDT, é possível notar que não existem alinhamentos na região, o que pode significar que o duto mapeado da caverna Pasto de Vaca II está mais profundo ou mudou a direção. A seção de resistividade apresenta diversas faixas de valores de resistividade. A camada mais resistiva encontra-se na região central da seção, com resistividades maiores que 556 Ohm.m. Esta camada possui uma certa horizontalidade, sem levar em consideração a topografia, e acima dela, do início até a metade do perfil, está localizada uma camada de baixa resistividade, entre 73,8 a 145 Ohm.m. estas camadas podem ser interpretadas como uma fina lente pelítica depositada sobre uma camada de calcário.

O limite da camada interpretada como sendo a camada de calcário é abrupto, marcado por uma feição verticalizada condutiva no centro da seção, em aproximadamente 92,5 metros. Ao lado desta camada, se encontra uma camada de resistividade intermediária, entre 145 e 283 Ohm.m. Esta camada apresenta também limites verticalizados de baixa resistividade e a leste, no final do perfil, a 152,5 metros do início do perfil, a primeira camada resistiva reaparece. Estas feições condutivas foram interpretadas como sendo planos de fraqueza, delimitando uma camada intermediária, interpretada como sendo a camada de calcário fraturado.

No contato entre o calcário e o calcário fraturado, a 92,5 metros do início do perfil, está localizada uma feição condutiva, com resistividade menor que 17,7 Ohm.m, de bordas arredondadas. Esta feição foi interpretada como sendo uma área saturada, onde pode estar havendo fluxo de água e dando origem a formação de um duto de uma caverna. Outra anomalia condutiva arredondada ocorre no final do perfil, a 150 metros, a qual foi interpretada como sendo uma possível cavidade preenchida por água, na imagem de drone (Figura 32a) mostra que o final do perfil está localizado em uma área de mata mais densa, corroborando com a interpretação.

O duto mapeado da caverna Pasto de Vaca II não aparece na seção, e duas hipóteses foram formuladas. A primeira está relacionada com o erro dos GPS utilizados tanto na aquisição de eletrorresistividade como no mapeamento dos dutos pelos espeleólogos, o que tornaria a anomalia central a cavidade mapeada. Esta hipótese não tem muitas forças pois a diferença entre a cavidade mapeada e a anomalia no perfil seria de 22,5 metros de distâncias. A segunda Hipótese seria que a caverna está muito profunda neste ponto e não foi possível ser mapeada.

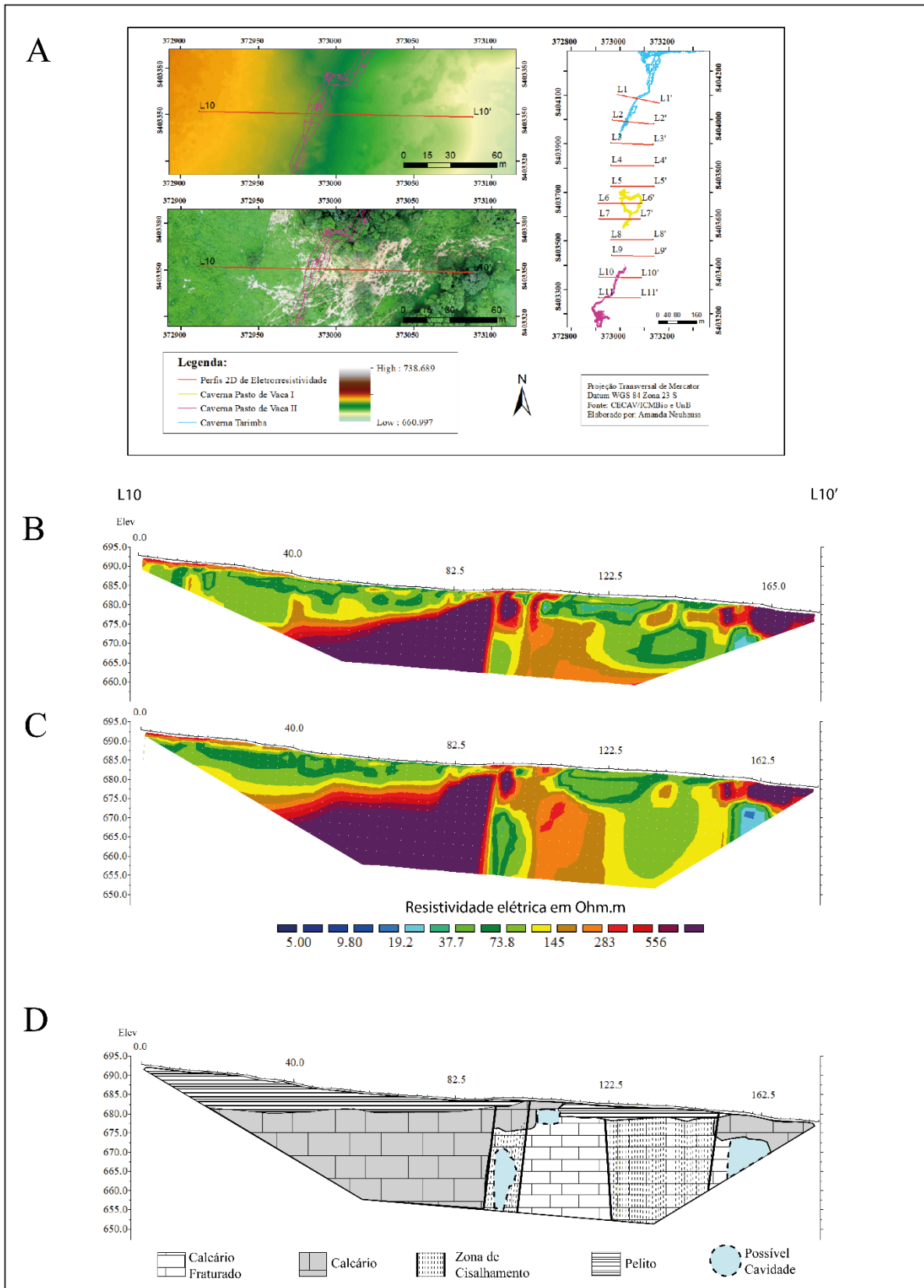


Figura 35: Interpretação das seções de Eletrorresistividade referentes à Linha 10

### 7.2.11. LINHA 11

Esta última linha está localizada na parte mais baixa da área de estudo, iniciando a 690 metros de elevação e terminando no Rio extrema a 672,5 metros de altitude. Analisando o MDT da linha e a imagem do drone (Figura 33a) é possível observar que a caverna Pasto de Vaca II se encontra em um baixo topográfico, onde ocorre uma vegetação mais densa. Observa-se ainda uma feição de depressão que pode estar relacionada com uma zona colapsada no final da linha, a 125 metros de distância do início do perfil. O final da linha, próximo dos 177,5 metros, estava passando o Rio Extrema, no penúltimo eletrodo, como mostrado na figura 13F.

Analisando o perfil de resistividade foi possível definir duas faixas de resistividade principais. A primeira ocorre na parte mais profunda do perfil, com elevados valores de resistividade, maiores que 556 Ohm.m, e em formatos de torres. Esta camada resistiva foi interpretada como sendo o calcário maciço. A segunda camada, acima desta camada resistiva, com características mais condutivas foi interpretada como sendo a camada de calcário fraturado.

A partir dos 120 metros do início do perfil, a 5 metros de profundidade, ocorre uma anomalia condutiva horizontalizada. Considerando o contexto fraturado da região, a porção leste da seção 11 apresenta uma forma de canal condutivo, uma feição que liga a anomalia ao final do perfil, onde está localizado o Rio Extrema. A zona colapsada observada no MDT, possivelmente está relacionada com o canal condutivo da seção, que pode ser interpretado como um duto de caverna que direciona a água em subsuperfície até o Rio Extrema.

A caverna mapeada a 22,5 metros do início do perfil não foi observada no perfil de resistividade. Uma hipótese para isto ter ocorrido está relacionada com a largura da caverna, de 2,5 metros, igual ao espaçamento entre eletrodos, logo foi investigado um ou nenhum ponto dentro da caverna, impossibilitando o mapeamento da mesma.

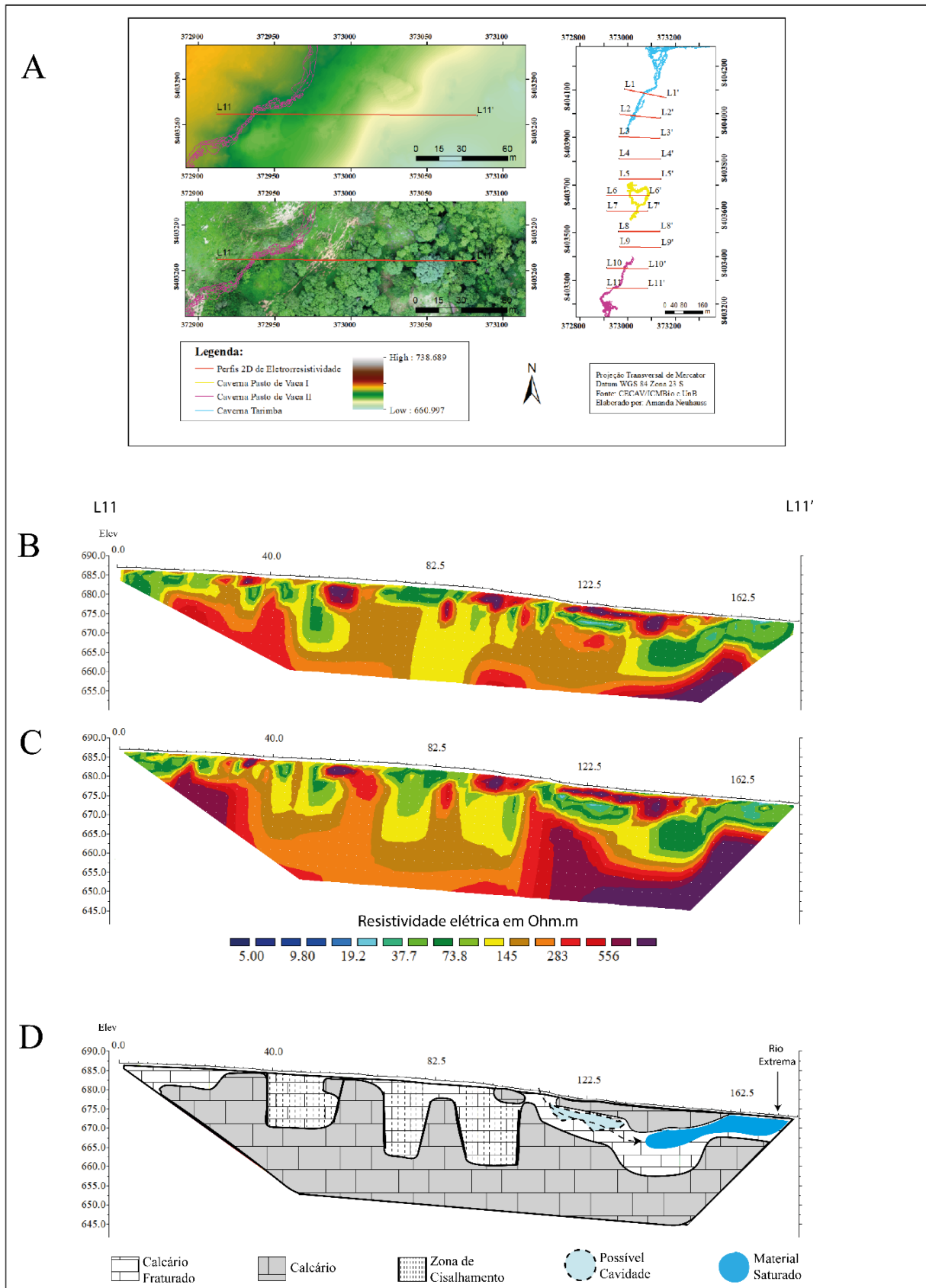


Figura 36: (A) Localização da Linha 11 na área do trabalho. Modelos de resistividade elétrica obtidos com os arranjos (B) DD e (C) PD. (D) Modelo geológico elaborado a partir dos resultados com a indicação de uma possível caverna.

### 7.3. ANÁLISE CONJUNTA

A integração dos modelos geoeletricos e suas respectivas interpretações, com o mapa topográfico e a projeção das cavernas elaborada pela GREGO, possibilitou a elaboração de um mapa de anomalias referentes a posição de cavernas, entradas de cavernas e drenagens (Figura 37).

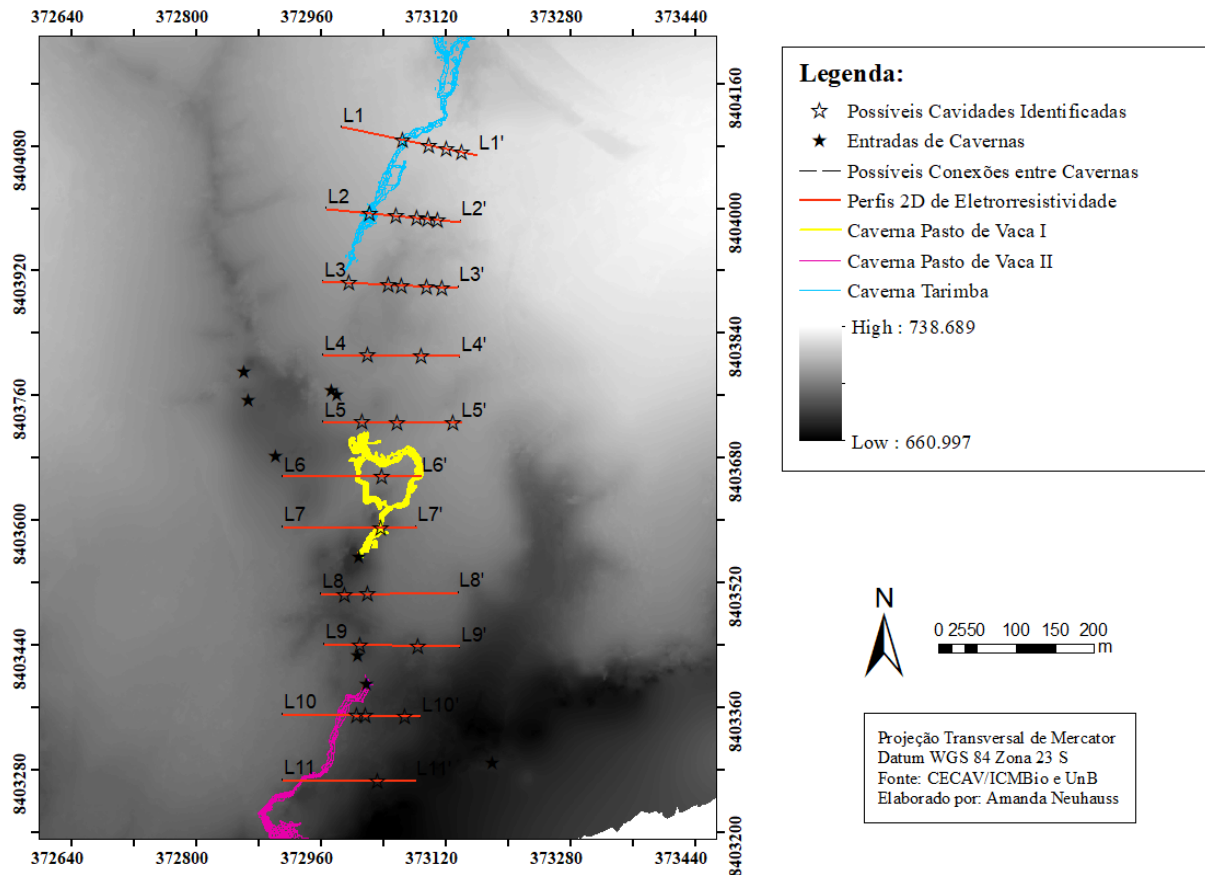


Figura 37: Mapa topográfico com a localização das cavernas mapeadas e das possíveis cavidades interpretadas nos modelos de resistividade elétrica.

Ao examinar a ocorrência de anomalias, cavernas (estrelas vazias e preenchidas, respectivamente) e o mapa topográfico (Figura 37), notam-se determinadas tendências de ocorrências de cavidades, que podem significar continuidades entre as cavernas. Para visualizar melhor essas ocorrências, usou-se o *software* Adobe Illustrator na interpretação de possíveis conexões entre as cavernas (Figura 38). Entre a Caverna Tarimba e a Caverna Pasto de Vaca I é possível detectar duas possíveis conexões. Ambas ocorrem em um relativo baixo topográfico, e o percurso mais a oeste segue pelas zonas colapsadas, interpretadas nas linhas 3, 4 e 5. Entre a caverna Pasto de Vaca I e II possui uma possível conexão, iniciando no baixo topográfico e finalizando na Caverna Pasto de Vaca II. Entre a Caverna Pasto de Vaca II e o Rio Extrema

possui uma conexão, iniciando no baixo topográfico da Caverna Pasto de Vaca I, atravessando as linhas 8, 9, 10 e 11, até chegar no Rio Extrema. Outras possíveis conexões entre a Tarimba, Pasto de Vaca I e II e o Rio Extrema podem ser interpretadas.

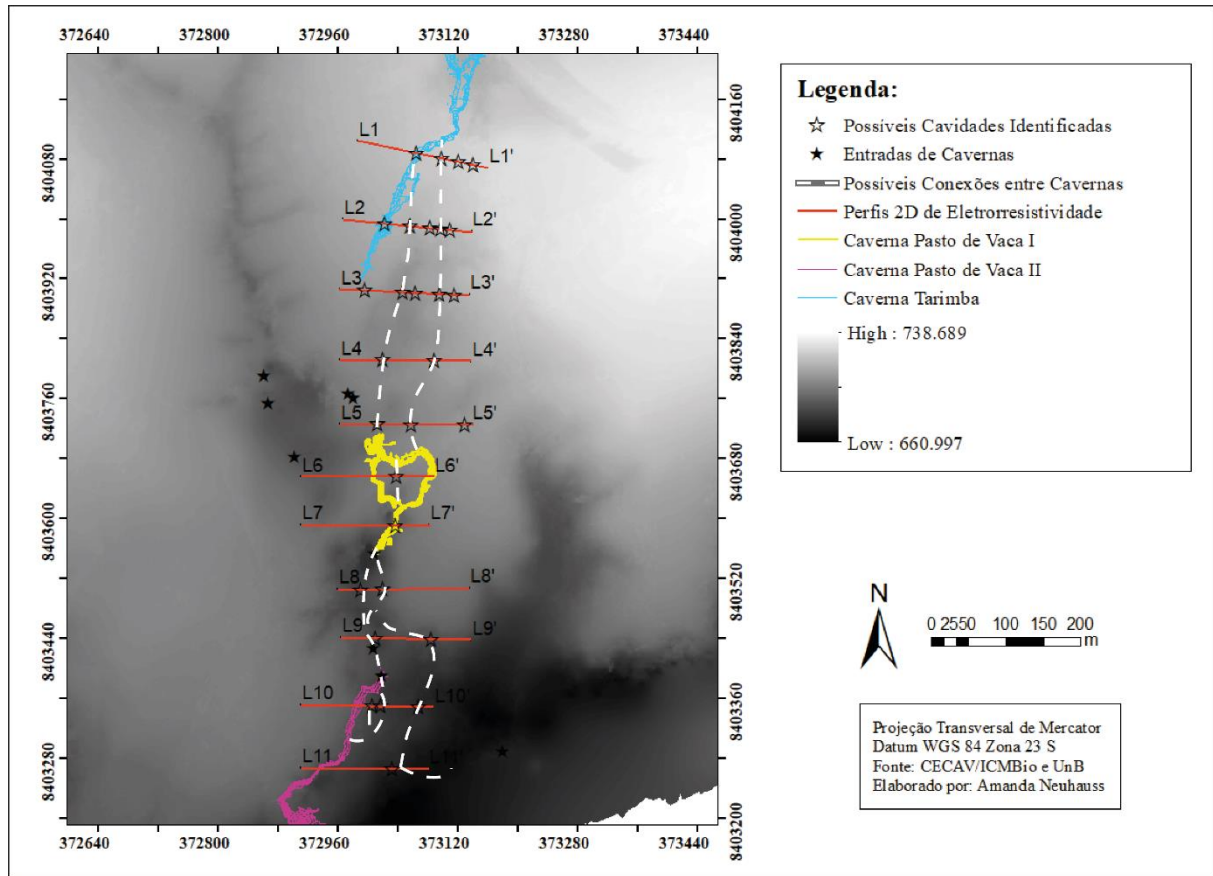


Figura 38: Mapa topográfico com os possíveis traçados das cavidades mapeadas com as seções de resistividade elétrica.

## ***CAPÍTULO 8***

### **8. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES**

Os resultados das simulações numéricas auxiliaram na escolha do melhor espaçamento e dos melhores arranjos para determinar cavidades na região de Mambaí. As simulações mostraram efetividade devido ao conhecimento prévio das resistividades elétricas das camadas de calcário maciço, calcário fraturado, pelitos e solos coluvionares. Com estas informações dimensionaram-se as aquisições com os arranjos dipolo-dipolo, polo-dipolo e Wenner-Schlumberger. O espaçamento de 2,5 metros, nas simulações numéricas, mostrou-se eficiente para resolver a maioria dos condutos cársticos.

Os resultados dos testes de arranjos eletródicos em campo, sobre a projeção da Caverna Tarimba, mostraram que o modelo de resistividade elétrica obtida com o arranjo Wenner-Schlumberger não identificou cavidades. Somente os arranjos dipolo-dipolo e polo-dipolo identificaram a anomalia relacionada à Caverna Tarimba. Assim, os testes foram essenciais para a continuidade das aquisições de dados e minimização do tempo em campo.

Os perfis 2D de Eletrorresistividade realizadas na área da caverna Tarimba, Pasto de Vaca I e II possibilitaram a identificação de camadas de calcários maciços e fraturados, além de camadas/lentes de pelitos interdigitando os calcários. Os resultados obtidos com as

pseudoseções 2D de Dipolo-Dipolo possibilitaram o imageamento dos primeiros metros de profundidade com maior resolução. Já os modelos de resistividade elétrica obtidos com o arranjo Polo-Dipolo possibilitaram o imageamento de maiores profundidades. Os resultados de ambos arranjos possibilitou a detecção de feições cársticas, como dutos de cavidades, zonas de cisalhamentos e dolinas colapsadas.

As cavernas já mapeadas foram identificadas nos modelos de resistividade elétrica, com exceção de três locais. O primeiro foi referente às linhas 6 e 11, em que a caverna mapeada possui largura menor do que a resolução utilizada neste trabalho. Também não foi possível detectar a cavidade na Linha 10, provavelmente por ela estar a uma profundidade maior que a alcançada na aquisição. Outra hipótese estaria relacionada com os erros dos GPS utilizados no levantamento geofísico e no mapeamento espeleológico.

Após uma análise do MDT da área de estudo, observam-se em vários pontos por onde passam dutos de cavernas, uma topografia rebaixada, provavelmente devido ao fluxo de água pela superfície que carrega sedimentos para o interior das cavidades. Analisando a ortofoto gerada pelo drone, as regiões onde há entradas de cavernas, e também nas regiões de baixo topográfico devido às cavernas, a vegetação aparece densa, evidência de áreas úmidas. As anomalias condutivas presentes nas seções foram interpretadas como sendo as cavidades, e a baixa resistividade indica presença de água nestas cavidades.

Com a integração do mapa topográfico da área, como também os locais de ocorrência de anomalias referentes às cavernas, conclui-se que as cavernas Tarimba, Pasto de Vaca I e II possuem conectividade entre si e ligação com o Rio extrema em mais de um ponto em subsuperfície.

Os resultados obtidos com o método da eletrorresistividade neste trabalho indicam que a metodologia é eficaz no mapeamento de cavernas, de forma totalmente não invasiva, segura, acessível e de alta resolução.

Para os próximos trabalhos recomenda-se adensar as investigações de resistividade elétrica em regiões com alta ambiguidade, com o objetivo de obter um modelo de maior detalhe do subsolo.

Outros métodos geofísicos são recomendados, como o Potencial Espontâneo (SP), sobre as linhas já existentes, com o intuito de confirmar o fluxo de água subterrânea dentro das cavernas. O GPR não é indicado na região devido a condutividade das primeiras camadas, interpretadas como sendo o pelito e o calcário fraturado, o que impede a penetrabilidade do

sinal em subsuperfície. É recomendado ainda realizar aquisição de microgravimetria, para identificar variações de densidades em subsuperfície.

## **BIBLIOGRAFIA**

ALVARENGA, C. J. S. et al. Estratigrafia da borda ocidental da Bacia do São Francisco. **Petrobras**, Rio de Janeiro, p. 145-164, Novembro 2012.

BAKALOWICZ, M. Karst groundwater: A challenge for new resources. **Hydrogeology Journal** , p. 148-160, Janeiro 2005.

BERGLUND, J. L.; MICKUS, K.; GOUZIE, D. Determining a relationship between a newly forming sinkhole and a former dry stream using electric resistivity tomography and very low-frequency electromagnetics in a urban karst setting. **Society of Exploration Geophysicists and American Association of Petroleum Geologist, Interpretation**, p. SF17-SF27, 2014.

BRAITENBERG, C.; SAMPIETRO, ; PIVETTA,. Gravity for Detecting Caves: Airborne and Terrestrial Simulations Based on a Comprehensive Karstic Cave Benchmark. **Pure and Applied Geophysics, Cross Mark**, p. 1243-1264, 2016.

CAMPOS, J. E. G.; DARDENNE, M. A. Origem e evolução tectônica da Bacia Sanfranciscana. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 27, n. 3, p. 283-294, 1997.

CARPIO, R. G. A.; AL, E. Use of resistivity measurements to detect urban caves in Mexico City and to assess the related hazard. **Natural Hazards and Earth System Sciences** , p. 541-547, 2004.

CHALIKAKIS, K.; PLAGNES,. Contribution of geophysical methods to karst-system exploration: an overview. **Hydrogeology Journal**, p. 1169-1180, 2011.

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, v. 1980, 1990.

DAHLIN, T. D.; ZHOU,. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. In: ENGINEERS, E. A. O. G. &. **Geophysical Prospecting**. [S.l.]: [s.n.], 2004. p. 379-398.

DARDENNE, M. A. Síntese sobre a estratigrafia do grupo Bambuí no Brasil Central, Recife, 1978.

DARDENNE, M. A. et al. The Brasília fold belt. **Tectonic Evolution of South America**, Rio de Janeiro: 31st International Geological Congress, p. 231-263, 2000.

FORD, D.; WILLIAMS, P. **Karst hydrogeology and geomorphology**. [S.l.]: John Wiley & Sons, v. 578 pp, 2007.

ISMAIL, A.; ANDERSON, N. 2-D and 3-D Resistivity Imaging of Karst Sites in Missouri, USA. **Environmental and Engineering Geoscience** , p. 281-293, 2012.

KAUFMANN, G.; ROMANOV, D.; NIELBOCK, R. Cave detection using multiple geophysical methods: Unicorn cave, Harz Mountains, Germany. **Geophysics**, p. B71-B77, 2011.

KIDANU, S. T.; TORGASHOV, E. V.; VARNAVINA, A. V. ERT-based Investigation of a Sinkhole in Greene County, Missouri. **Aims Geosciences**, p. 99-115, 2016.

LEUCCI, G.; GIORGI, L. Integrated geophysical surveys to assess the structural conditions of a karstic cave of archaeological importance. **Natural Hazards and Earth System Science, Copernicus Publications**, p. 17-22, 2005.

LEUZINGER, M. D.; SANTANA, P. C.; SOUZA, L. R. L. R. Áreas de Proteção Ambiental – Desafio do desenvolvimento territorial sustentável. Instituto CEUB de Pesquisa e Desenvolvimento, v. 348 pp, 2018.

LOKE, M. H. **Tutorial: 2-D and 3-D electrical imaging surveys**. [S.l.]: [s.n.], 2004.

LOKE, M. H. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. **Journal of Applied Geophysics**, p. 65, 2013.

LOKE, M. H. **Rapid 2D resistivity and I.P. forward modeling using the finite-difference and finite-element methods**. : [s.n.], 2016.

REYNOLDS, J. M. **An introduction to Applied and Environmental Geophysics.** [S.l.]: Wiley, 1997.

RIBEIRO, A. A. et al. **RELATÓRIO DE VISTORIA TÉCNICA EM CAVERNAS E SUAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO.** Brasília-DF. 2018.

RIBEIRO, A. A. et al. **RELATÓRIO DE VISTORIA TÉCNICA EM CAVERNAS E SUAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA NA ÁREA DE PROTEÇÃO AMBIENTAL DAS NASCENTES DO RIO VERMELHO.** Centro Nacional de Pesquisa e Conservação de Cavernas – ICMBio/CECAV. 2018.

RIZZATO, P. P.; BICHUETTE, M. E. Ituglanis boticario, a new troglomorphic catfish (Teleostei: Siluriformes: Trichomycteridae) from Mambaí karst area, central Brazil. **Sociedade Brasileira de Zoologia** , p. 577-598, 2014.

ROSE, M. D.; AL, E. Towards an integrated approach for characterization of sinkhole hazards in urban environments: the unstable coastal site of Casalabate, Lecce, Italy. **Journal of Geophysics and engineering**, p. 143-154, 2010.

SASAKI, Y. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. **Geophysical Prospecting**, p. 453–463, 1992.

SECRETARIA DE INDÚSTRIA E COMÉRCIO – SUPERINTENDÊNCIA DE GEOLOGIA E MINERAÇÃO. **Hidrogeologia do Estado de Goiás.** [S.l.], p. 115. 2003.

SERVIÇO GEOLÓGICO BRASILEIRO - CPRM. **Geologia e Recursos Minerais do Estado de Goiás e do Distrito Federal.** PROGRAMA LEVANTAMENTOS GEOLÓGICOS BÁSICOS DO BRASIL. [S.l.]. 2000.

STEVANOVIĆ, Z. **Karst Aquifers – Characterization and Engineering.** [S.l.]: Springer, 2015. 692 pp p.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. **Applied Geophysics.** [S.l.]: Cambridge University Press, 1990.

YOUSSEF, A. M. Sinkhole detection using electrical resistivity tomography in Saudi Arabia. **Journal of Geophysics and engineering**, p. 655-663, 2015.

ZALÁN, P. V.; ROMEIRO-SILVA, P. C. Bacia do São Francisco. **Boletim de Geociencias da PETROBRAS**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 561-571, 2007.

ZHOU, W.; BECK, B. F.; ADAMS, A. L. Effective electrode array in mapping karst hazards in electrical resistivity tomography. **Environmental Geology**, p. 922–928, 2002.