



**Universidade de Brasília - UnB  
Instituto de Geociências - IGD**

**DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO EM  
AQUÍFEROS FRATURADOS COM AUXÍLIO DE  
ELETORRESISTIVIDADE E PERFILAGEM ÓTICA: ESTUDO DE  
CASO EM PETROLINA, PE**

**Aline Isabel de Pádua**

**Orientador: José Eloi Guimarães Campos**

Área de Concentração: **Hidrogeologia e Meio Ambiente**  
Linha de pesquisa: **Gestão de Recursos Hídricos Subterrâneos**

**Brasília, dezembro de 2018.**



**Universidade de Brasília - UnB**  
**Instituto de Geociências - IGD**

**DETERMINAÇÃO DAS CONDIÇÕES DE CIRCULAÇÃO EM  
AQUÍFEROS FRATURADOS COM AUXÍLIO DE  
ELETORRESISTIVIDADE E PERFILAGEM ÓTICA: ESTUDO DE  
CASO EM PETROLINA, PE**

**Aline Isabel de Pádua**

Banca Examinadora:

Prof. Dr. José Eloi Guimarães Campos (Orientador)

Prof. Dr. Carlos Tadeu Carvalho do Nascimento (FUP/UnB)

Prof. Dr. Augusto Cesar Bittencourt Pires (IG/UnB)

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a todos que de alguma forma contribuíram para a elaboração desta dissertação de mestrado.

Aos meus pais, Paulo e Maria, e minha irmã, Andreia, por todo carinho e apoio. Aos amigos da pós-graduação que enfrentam as mesmas dificuldades de prazos e conteúdo, e, ainda assim estão dispostos ajudar, em especial, Kamylla e André. Agradeço também aos chefes e colegas de trabalho da Ambientare pelo apoio para a finalização desta etapa.

Gostaria de agradecer aos que contribuíram para as aquisições dos dados em Petrolina, os técnicos Mendes e Léo e o professor Luciano. Agradeço também aos proprietários dos sítios onde as pesquisas foram executadas pela gentil recepção.

E, principalmente, a pessoa que tornou a elaboração e finalização deste trabalho possível, ao Professor Eloi, por ser de fato um orientador!

Obrigada.

## RESUMO

O município de Petrolina, no estado de Pernambuco, foi escolhido para área de estudo por apresentar características representativas da região semiárida do Brasil e pela restrita disponibilidade de recursos hídricos, essencialmente, para consumo humano/animal e para agricultura. O substrato rochoso é composto por granitoides e metassedimentos correlacionados à Faixa Riacho do Pontal. A água subterrânea da região ocorre em aquíferos fraturados, em que a água é transmitida através das fraturas e fissuras e a forma de circulação ainda é pouco conhecida. Três métodos foram aplicados como metodologia para o entendimento do fluxo da água subterrânea: investigações com aplicação do método geofísico de eletrorresistividade, perfilagem ótica de alta resolução em poços e dados estruturais locais e regionais. Para a obtenção dos dados de eletrorresistividade foram realizadas 4 linhas de levantamento em uma das áreas em que um sistema de recarga artificial havia sido instalado, no qual a água foi injetada com auxílio de caminhões pipas em um curto espaço de tempo. Os resultados permitiram a delimitação de padrões geoeletrônicos após a percolação da água. Os dados estruturais foram coletados em campo e comparados com os lineamentos obtidos de imagens orbitais para avaliar as direções das fraturas subverticais e verticais. A resposta foi compatível com o modelo previsional decorrente da deformação regional com fraturas de direção principal N40-60E, além de outras famílias subsidiárias. A perfilagem ótica de alta resolução foi importante para avaliação direta dos dados de poços, uma vez que fornece instantaneamente informações de litologia e estruturas naquele local. A perfilagem foi aplicada em 11 poços e permitiu a observação das rochas em profundidade, em sua maioria, com bandamento gnáissico, além de fraturas verticais, horizontais e sub-horizontais. A partir dos resultados obtidos e integrados foi possível elaborar um modelo conceitual de fluxo com destaque para as camadas geológicas, influência do solo no processo de infiltração da água e discriminação das zonas fraturadas. As fraturas verticais são fundamentais para a recarga dos aquíferos, enquanto as estruturas sub-horizontais são importantes para o fluxo lateral e interconexão das anisotropias. O arranjo das diferentes estruturas permite prever entradas d'água a maiores profundidades, a existência de aquíferos fraturados confinados e a presença de porosidade intergranular nas zonas de saprolitos e rochas alteradas. O entendimento de como se dá o fluxo subterrâneo nos aquíferos da região possibilita a melhor gestão e ampliação do uso desse importante recurso.

**Palavras chave:** aquífero fraturado, região semiárida do nordeste, eletrorresistividade, perfilagem ótica, fluxo subterrâneo.

## ABSTRACT

The Petrolina County in Pernambuco State, Brazil, was chosen as study area once it shows characteristics representative of semiarid region and restrict water resources availability, essential to human/animal consumption and agriculture. The geology consists of granite / gneiss and metasediments correlated to the Riacho do Pontal Belt. The groundwater in the region occurs in fractured aquifers, where circulation model is still unknown. Three methods were applied for the groundwater flow understanding: the electric resistivity geophysical method; high resolution optical profiling in wells and local/regional structural data. To obtaining the electric resistivity data 4 survey lines were carried out in one site in which an artificial recharge system had been installed, in which water was injected in a short time. The results allowed the delimitation of geoelectric sign after the water percolation. The structural data were collected in the field and compared with the lineaments obtained from orbital images to evaluate the directions of sub vertical and vertical fractures. The response was consistent with the estimated model resulting from the regional deformation with main direction fractures N40-60E, in addition to other less important families. The high- resolution optical profiling was an important for direct wells evaluation, since it provides instantly lithology and structures information at that location. The profiling was applied in 11 wells and allowed the observation of rocks at depths, with gneiss pattern, as well as horizontal and vertical fractures. From the results obtained and integrated it was possible to purpose a conceptual flow model with emphasis on the geological layers, influence of the soil in the process of water infiltration, and discrimination of fractured zones. Vertical fractures are fundamental to the aquifers recharge, while the sub-horizontal structures are important to lateral flow and anisotropies interconnectivity. The arrangement of the different structures allows the prediction of water inputs up to greater depths; the existence of fractured confined aquifers and the presence of intergranular porosity in the saprolite and weathered rocks zones. The understanding of the groundwater flow in the region aquifers allows the better management and expansion of the use of these important resources.

**Keywords:** fractured aquifer, northeast semiarid region, electric resistivity, optical profiling, groundwater flow.

# SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Apresentação.....	1
1.2. Justificativas .....	2
1.3. Objetivos .....	3
1.4. Localização da Área de Estudo .....	3
1.5. Materiais e Métodos .....	3
<b>2. REFERENCIAL TEÓRICO.....</b>	<b>5</b>
2.1. Características da Área .....	5
2.2. Geologia.....	6
2.3. Aquíferos.....	9
2.4. Método da Resistividade Elétrica .....	12
2.4.1. Resistividade das Rochas e Minerais.....	13
2.4.2. Aplicação da Eletrorresistividade.....	15
2.5. Perfilagem Ótica .....	17
<b>3. AQUISIÇÃO DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>	<b>19</b>
3.1. Eletrorresistividade.....	19
3.1.1. Aquisição de dados .....	19
3.1.2. Resultados.....	23
3.1.3. Discussões .....	41
3.2. Análise Estrutural .....	44
3.2.1. Aquisição de dados .....	44
3.2.2. Resultados.....	45
3.2.3. Discussões .....	47
3.3. Perfilagem Ótica.....	47
3.3.1. Aquisição de dados .....	47
3.3.2. Resultados.....	50
3.3.3. Discussões .....	63
3.4. Modelo Conceitual de Fluxo.....	64
<b>4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>67</b>
4.1. Conclusões.....	67
4.2. Recomendações.....	69
<b>5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>71</b>
<b>6. APÊNDICES.....</b>	<b>74</b>

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1-1. Mapa de localização do município de Petrolina-PE, e sua situação no estado de Pernambuco e as localidades investigadas. ....	4
Figura 2-1. Distribuição da pluviosidade média mensal (1991-2017), na Estação Petrolina, PE. Fonte: INMET. ....	5
Figura 2-2. Detalhe em gnaisse com bandas ricas em biotita e bandas quartzo-feldspáticas. ....	7
Figura 2-3. Mármore bandado exibindo dobras isoclinais. ....	7
Figura 2-4. Seção geológica da Faixa Riacho do Pontal e porção norte do Cráton do São Francisco, com indicação dos domínios externo e interno da faixa dobrada (Uhlein <i>et al.</i> 2011).	8
Figura 2-5. Par de fraturamento mostrando alteração ao longo dos planos de aberturas, pelos quais há percolação preferencial de fluidos. ....	8
Figura 2-6. Detalhe do maior desenvolvimento do solo sobre zona de interseção de fraturas. ....	9
Figura 2-7. Principais domínios sedimentares e cristalinos (CPRM, 2016). ....	10
Figura 2-8. Valores típicos de resistividades observados nas rochas (Palacky 1987, adaptado de Borges 2007). ....	13
Figura 2-9. Ponte de injeção de corrente e comportamento no meio homogêneo (Braga 1997). .	14
Figura 2-10. Ilustração esquemática do funcionamento do método de eletrorresistividade (Braga 1997). ....	14
Figura 2-11. Arranjos eletródicos utilizados nos métodos elétricos (Borges 2007, adaptado de Loke 2004). ....	16
Figura 2- 12. Disposição dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo (Braga 2005). ....	17
Figura 3-1 Sistema piloto de recarga artificial instalado em uma área rural de Petrolina-PE. ....	19
Figura 3-2. Configuração do arranjo de eletrorresistividade utilizada. ....	20
Figura 3-3. Fotografias que evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento Super Sting e o local do sistema de recarga artificial. ....	21
Figura 3-4. Linhas de levantamento. ....	21
Figura 3-5. Compilação das seções realizadas na Linha 1 no primeiro e segundo dia de levantamento. ....	24

Figura 3-6. Compilação das seções realizadas na Linha 1 realizadas no terceiro e quarto dias de levantamento. ....	25
Figura 3-7. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, antes da infiltração. .	27
Figura 3-8. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, após infiltração de 7 mil litros de água. ....	27
Figura 3-9. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, após a infiltração de 56 mil litros de água. ....	28
Figura 3-10. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, ao final do levantamento. ....	28
Figura 3-11. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 2, antes da infiltração.	29
Figura 3-12. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 2, ao final do levantamento. ....	29
Figura 3-13. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 3, antes da infiltração.	30
Figura 3-14. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 3, ao final do levantamento. ....	30
Figura 3-15. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 4, antes da infiltração.	31
Figura 3-16. Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 4, ao final do levantamento. ....	31
Figura 3-17. Representação da planilha de dados importada para o Oasis Montaj. ....	33
Figura 3-18. Histograma com todos os dados. ....	33
Figura 3-19. Histograma após a filtragem passa baixa. ....	34
Figura 3-20. Grid da Linha 1 inicial. ....	35
Figura 3-21. Grid da Linha 1 após 1023 minutos (~17 horas) e 7.000 litros de água injetados. ...	35
Figura 3-22. Grid da Linha 1 após 1317 minutos (~22 horas) e 14.000 litros de água injetados.	35
Figura 3-23. Grid da Linha 1 após 1648 minutos (~27 horas) e 21.000 litros de água injetados.	35
Figura 3-24. Grid da Linha 1 após 2295 minutos (~38 horas) e 28.000 litros de água injetados.	36
Figura 3-25. Grid da Linha 1 após 2633 minutos (~43 horas) e 35.000 litros de água injetados.	36

Figura 3-26. Grid da Linha 1 após 2676 minutos (~44 horas) e 35.000 litros de água injetados.	36
Figura 3-27. Grid da Linha 1 após 2722 minutos (~45 horas) e 42.000 litros de água injetados.	36
Figura 3-28. Grid da Linha 1 após 2989 minutos (~50 horas) e 42.000 litros de água injetados.	37
Figura 3-29. Grid da Linha 1 após 3187 minutos (~53 horas) e 42.000 litros de água injetados.	37
Figura 3-30. Modelo pseudo-3D gerado antes da injeção de água.	39
Figura 3-31. Modelo pseudo-3D gerado após a injeção da infiltração de água.	40
Figura 3-32. Variação da espessura do solo.	43
Figura 3-33. Modelo com base nas respostas geolétricas.	44
Figura 3-34. Modelo geológico para a área de estudo obtido a partir dos dados invertidos da pseudosseção geolétrica da Linha 1.	44
Figura 3-35. Fotos que ilustram a observação das características estruturais em pedra desativada situada próximo à cidade de Petrolina.	45
Figura 3-36. Lineamentos estruturais.	46
Figura 3-37. Roseta de fraturas com base nos lineamentos estruturais.	46
Figura 3-38. Roseta de fraturas com dados medidos com campo.	47
Figura 3-39. Localização dos poços em que foram realizadas as perfilagens óticas.	48
Figura 3-40. Fotos que mostram a aquisição de dados com o perfilador ótico em campo.	49
Figura 3-41. Poço Jair 2, do lado esquerdo pode ser observado a trincheira usada para o sistema de recarga artificial.	50
Figura 3-42. Aquisição de dados no Poço Jair 3, o único seco na propriedade.	50
Figura 3-43. Aquisição de dados no Poço Mandacaru 1, é possível observar muita poeira no local devido a perfuração do poço ter ocorrido no mesmo dia da realização da perfilagem.	51
Figura 3-44. Aquisição de dados no Poço Mandacaru 2 acompanhada pelo proprietário.	51
Figura 3-45. Barragem localizada na propriedade do Sr. Nivaldo.	51
Figura 3-46. Aquisição de dados no Poço Nivaldo 1.	51
Figura 3-47. Poço Jair 1.	52

Figura 3-48. Poço Jair 2. ....	53
Figura 3-49. Poço Jair 3. ....	54
Figura 3-50. Poço Jair 4. ....	55
Figura 3-51. Poço Jair 5. ....	56
Figura 3-52. Poço Jair 6. ....	57
Figura 3-53. Poço Mandacaru 1. ....	58
Figura 3-54. Poço Mandacaru 2. ....	59
Figura 3-55. Poço Nivaldo 1. ....	60
Figura 3-56. Poço Nivaldo 2. ....	61
Figura 3-57. Poço Nivaldo 3. ....	62
Figura 3-58. Bloco diagrama ilustrando de forma esquemática o modelo de fluxo na região estudada. ....	65

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1-1. Características das águas superficiais e subterrâneas (adaptado de CPRM 2008). ....	1
Tabela 2-1. Média das temperaturas máximas e mínimas no município de estudo (1991-2017)..	6
Tabela 3-1. Informações sobre os levantamentos realizados na Linha 1 no Primeiro e Segundo dia de levantamento.....	22
Tabela 3-2. Informações sobre os levantamentos realizados na Linha 1 no Terceiro e Quarto dias do levantamento. ....	22
Tabela 3-3. Dados da Linha 1 com o tempo. ....	32
Para a compilação e apresentação de um modelo pseudo-3D foram utilizados os dados em formato XYZ gerados pelo Res2dinv juntamente com o arquivo de localização e topografia. Os dois arquivos de saída foram preparados para o software Oasis Montaj, um antes e um depois da etapa de injeção de água, contendo as informações apresentadas na Tabela 3-4.....	38
Tabela 3-5. Modelo de dados de entrada para o Oasis Montaj. ....	38
Tabela 3-6. Informações sobre os poços investigados. ....	50

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUÇÃO

### 1.1. Apresentação

O Brasil é um país de dimensões continentais que apresenta grande disponibilidade hídrica, mas com diversos desafios e problemas a serem superados (BRASIL 2007). A distribuição dos recursos hídricos não é uniforme, com regiões de grande escassez e baixa qualidade da água (ANA 2005).

Do total da água disponível na Terra, 97% está nos mares e oceanos e cerca de 2% congeladas nas regiões polares. Dentre a água doce disponível para consumo humano, agrícola e industrial, 97% do total está inserida no conjunto dos recursos hídricos subterrâneos (CPRM 2008). Apenas 15,6% dos municípios brasileiros utilizam exclusivamente água subterrânea para abastecimento (IBGE 2002).

No território ocorrem diferentes condições fisioclimáticas e geológicas, o que permitiu a formação de sistemas aquíferos, alguns deles com extensão regional e potencial para suprir água em quantidade e qualidade para a população. A água subterrânea é importante alternativa diante da crise hídrica a que diversas regiões são submetidas, principalmente, onde as principais fontes de abastecimento são superficiais. Além do custo por produção para o abastecimento urbano poder ser reduzido em até 10 vezes (Freire *et al.* 1998) a Tabela 1-1 apresenta outras vantagens com relação à utilização da água subterrânea em comparação ao uso dos recursos hídricos superficiais.

**Tabela 1-1.** Características das águas superficiais e subterrâneas (adaptado de CPRM 2008).

<b>Característica</b>	<b>Águas Subterrâneas</b>	<b>Águas Superficiais</b>
Localização	Ocorre em áreas extensas e mais contínuas.	São pontuais ou limitados a cursos d'águas.
Fluxo e disponibilidade	São menos influenciadas por fatores climáticos. A regularização do fluxo subterrâneo pode ser feita por meio de uma distribuição espacial e temporal apropriada de bombeamentos e recarga artificial.	Períodos de estiagem e de mais alta demanda influenciam na disponibilidade das águas superficiais. Implica em obras hidráulicas de alto custo.
Variabilidade sazonal e anual	O armazenamento é feito no próprio aquífero. Os recursos estão quase sempre preservados da evaporação direta e os transbordamentos são pequenos e podem ser evitados controlando os níveis d'água através de bombeamento.	As flutuações são muito pronunciadas no fluxo superficial. Ocorrem perdas por transbordamentos em períodos de excesso de água e grande perda por evaporação em períodos de estiagem.
Energia	Os custos para a construção dos poços são relativamente pequenos, porém os custos operacionais são elevados.	Custos elevados, com construção de reservatórios e tratamento, além de bombeamento.
Qualidade da água	É menos vulnerável a contaminação, porém o tratamento, caso aconteça, é mais complexo e, algumas vezes, irreversível.	São vulneráveis a contaminação e o tratamento, geralmente, é de alto custo.

Diante do exposto, pesquisas relacionadas a quantidade, qualidade e gerenciamento de fontes subterrâneas são de grande importância e a gestão sustentável visa satisfazer as necessidades atuais sem comprometer a capacidade das gerações futuras. Estudos regionais sobre água subterrânea são escassos e com poucas informações precisas, os primeiros ocorreram na primeira metade do século 20. O mais completo estudo hidrogeológico de caracterização regional de aquíferos foi realizado no Nordeste do Brasil no período de 1965 a 1975 pela Superintendência do Desenvolvimento do Nordeste - SUDENE, e constituiu o “Inventário Hidrogeológico Básico do Nordeste” (Zoby & Matos 2002).

Entre as regiões brasileiras, o Nordeste é o local que merece grande atenção em relação ao abastecimento de água para suprir as necessidades da população. É característico da região o clima semiárido, baixo índice de pluviosidade, evaporação elevada e alta susceptibilidade aos efeitos da desertificação. Seu subsolo é constituído em torno de 60% por rochas pré-cambrianas, genericamente chamadas de cristalinas, e nestas rochas a água subterrânea ocorre em sistemas interconectados de fendas, fraturas e descontinuidades, formando reservatórios descontínuos, aleatórios e com extensões limitadas (Feitosa & Diniz 2011).

O tipo de aquífero dominante na região é classificado como fraturado ou fissural, onde a capacidade de armazenamento está condicionada a quantidade de fraturas, suas aberturas e intercomunicação, permitindo a circulação e o fluxo de água (Custódio & Llamas 1996 e Fetter 2004). Entretanto, seu entendimento quanto a circulação e o comportamento da recarga apresentam grande complexidade.

O município onde foram executados os trabalhos de campo foi Petrolina, estado de Pernambuco, escolhido por ser um local representativo das demais características da região e devido ao fato de existirem estudos sobre qualidade e quantidade da água subterrânea. Foram utilizados dados estruturais, perfis de eletrorresistividade e perfilador ótico de alta resolução para ampliar-se o entendimento da circulação da água nos aquíferos.

## **1.2. Justificativas**

Essa pesquisa foi desenvolvida para ampliar o entendimento de como se dá a circulação da água subterrânea em aquíferos fraturados do tipo cristalino e mais especificamente os existentes na região de estudo. Com isso será possível contribuir com o conhecimento sobre seu comportamento e auxiliar as estratégias do gerenciamento desse recurso.

Embora muitas pesquisas já se tenham sido realizadas nestes tipos de aquíferos, ainda existe uma grande lacuna no conhecimento de como a água circula em meios fraturados em climas semiáridos, desde os mecanismos de recarga efetiva até a interconexão das anisotropias e profundidades de circulação das águas.

### **1.3. Objetivos**

O objetivo principal desta pesquisa é a elaboração do modelo de fluxo subterrâneo com suporte dos modelos geofísico e estrutural, incluindo a verificação do comportamento das diferentes famílias de fraturas.

O outro objetivo central é ampliar o conhecimento do fluxo subterrâneo para estabelecer melhores diretrizes para a exploração e gerenciamento desse recurso.

Como metas secundárias destacam-se: o desenvolvimento de estudo geofísico (com variação no tempo e no espaço); a verificação de estruturas em superfície e em profundidade (com auxílio de perfilador ótico) e a verificação do padrão de fluxo a partir de dados construtivos de poços.

### **1.4. Localização da Área de Estudo**

O estado de Pernambuco possui uma área de 98076.021 km<sup>2</sup> e, de acordo com o último censo, uma população de 876.448 habitantes (IBGE 2010). O município de Petrolina está inserido no estado de Pernambuco, a 730 km da capital Recife (Figura 1-1) e o acesso é feito pela BR-232/110; PE-360; e BR 316/428/122.

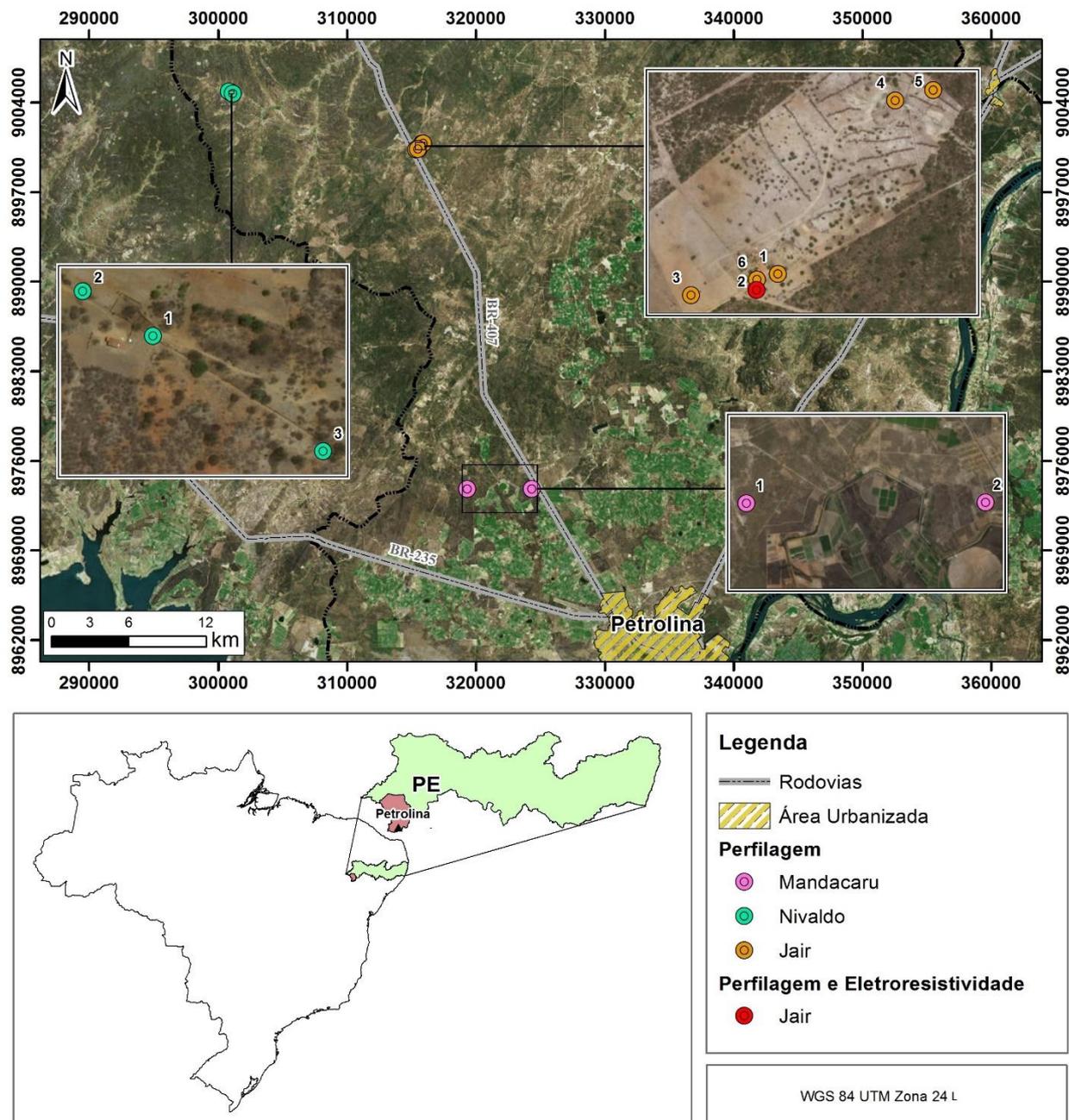
A área de Petrolina ocupa 4.737 km<sup>2</sup> e representa 4,81% do estado. O município está localizado na mesorregião São Francisco e na Microrregião Petrolina do Estado de Pernambuco, limitando-se a norte com Dormentes, a sul com Estado da Bahia, a leste com Lagoa Grande, e a oeste com Estado da Bahia e Afrânio. Os pontos de investigação situam-se em dois sítios e uma comunidade, situados na zona rural da cidade.

### **1.5. Materiais e Métodos**

Para o desenvolvimento da pesquisa foram utilizados o método geofísico de eletrorresistividade e o perfilador ótico de alta resolução integrado a dados sobre construção de poços, solos e geomorfologia. Os dados foram complementados com as informações estruturais medidas em campo e de lineamentos sobre imagens de satélite.

O detalhamento dos métodos será apresentado em cada item específico dedicado a cada técnica empregada na pesquisa.

É importante frisar que todos os materiais e métodos aplicados no desenvolvimento desta pesquisa tiveram como base um referencial teórico próprio, com uso de softwares específicos, além de adaptações aplicadas quando necessárias.



**Figura 1-1.** Mapa de localização do município de Petrolina-PE, e sua situação no estado de Pernambuco e as localidades investigadas.

## CAPÍTULO 2

### 2. REFERENCIAL TEÓRICO

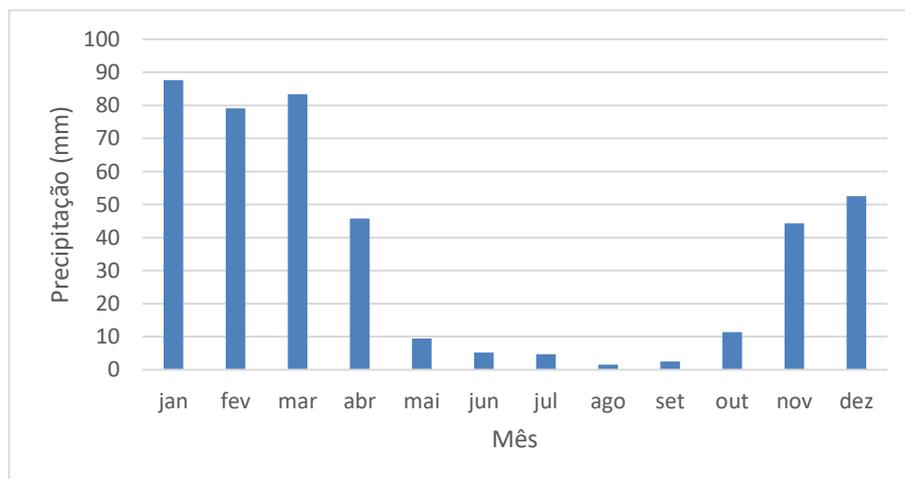
#### 2.1. Características da Área

O município de Petrolina está inserido na unidade geoambiental da Depressão Sertaneja, que representa a paisagem típica do semiárido nordestino, caracterizada por uma superfície de pediplanação bastante monótona, relevo predominantemente suave ondulado, cortada por vales estreitos, com vertentes dissecadas. Elevações residuais, cristas e/ou outeiros pontuam a linha do horizonte. Esses relevos isolados testemunham os ciclos intensos de erosão que atingiram grande parte do sertão nordestino (CPRM 2005).

Ocorrem Planossolos, mal drenados, com fertilidade natural moderada e problemas de salinização; solos Nitossolos não Cálcicos, rasos e fertilidade natural alta; Argissolos drenados e com fertilidade natural média e os Neossolos Litólicos rasos, pedregosos e fertilidade natural média (CPRM, 2005).

De acordo com classificação de Köppen, a região apresenta clima semiárido quente com chuvas de verão. O regime pluviométrico destaca dois períodos distintos: um que se estende de novembro a abril, correspondente à estação chuvosa; e outro, de maio a outubro, correspondente à estação seca. Os maiores registros pluviométricos ocorrem no mês de janeiro, apresentando médias superiores a 87 mm. Por outro lado, os menores são registrados no mês de agosto, com médias inferiores a 2 mm.

Os dados pluviométricos coletados referem-se ao período de vinte e seis anos, que são os mais recentes da estação, obtidos no município de Petrolina (Figura 2-1).



**Figura 2-1.** Distribuição da pluviosidade média mensal (1991-2017), na Estação Petrolina, PE. Fonte: INMET.

As médias das temperaturas máximas e mínimas no município são apresentadas na Tabela 2-1. Os meses com as maiores médias de temperatura máxima correspondem ao período chuvoso.

**Tabela 2-1.** Média das temperaturas máximas e mínimas no município de estudo (1991-2017).  
Fonte: INMET.

Descrição	MESES											
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
Temperatura máxima média (°C)	33,5	33,1	32,5	32,9	31,6	30,0	29,8	30,8	32,4	34,2	34,7	34,1
Temperatura mínima média (°C)	23,2	23,7	23,8	23,3	22,4	21,3	20,2	20,4	21,3	22,7	23,4	23,8

Petrolina é de grande importância para a região, junto com a cidade vizinha Juazeiro/BA formam o maior aglomerado urbano do semiárido. Apresenta o maior PIB do estado de Pernambuco, em relação a atividades econômicas agropecuárias. De acordo com o último censo do IBGE, realizado em 2010, sua população é de 293.962 habitantes. Integra, em conjunto com os municípios de Lagoa Grande, Santa Maria da Boa Vista, Orocó e Cabrobó, estes localizados em Pernambuco, e os municípios baianos de Juazeiro, Casa Nova, Curaçá e Sobradinho, a Região Administrativa Integrada de Desenvolvimento do Polo Petrolina e Juazeiro, maior exportador de frutas e segundo maior polo vitivinicultor do Brasil.

Administrativamente, o município é composto pelos distritos Sede, Curral Queimado, Rajada e pelos povoados de Cristália, Nova Descoberta, Tapera, Izacolândia Pedrinhas, Uruás, Lagoa dos Carneiros, Caatinginha, Caititu, Cruz de Salinas, Pau Ferro, Atalho, Caiçara, Barreto, Lagoa dos Cavalos, Barreiro, Varzinha, Lagoa da Pedra, Lajedo, Jatobá, Amargoza, Aranzel e Angico Alto.

## 2.2. Geologia

O Brasil é dividido em dez Províncias Estruturais, a Província Borborema abrange grande parte do Nordeste e todo o estado de Pernambuco onde são identificados os seguintes elementos tectônicos: Maciço Mediano Pernambuco-Alagoas, Sistema de Dobramento Pajeú-Paraíba, Sistema de Dobramento Piancó-Alto Brígida e o Maciço Mediano de Teixeira. O Sertão de Francisco, no qual está inserida a área de estudo, é classificado como Maciço Mediano Pernambuco-Alagoas, marcada pela ocorrência corpos granítico-dioríticos e rochas do complexo gnáissico-migmatítico, enquanto os sistemas de dobramento são predominantemente constituídos pelos metamorfitos xistosos deformados por dobras (PRH-PERNAMBUCO 1998).

Rochas cristalinas de diferentes tipos (granitoides e metassedimentares), de graus metamórficos distintos e de idades variando do arqueano ao neoproterozoico formam o substrato geológico do município de Petrolina. Dentre os tipos de rocha mais comuns estão os gnaisses bandados ricos em biotita (Figura 2-2), granitos leucocráticos, granulitos félsicos, xistos e mármore bandados (Figura 2-3), sendo todos cortados por veios de quartzo de segregação metamórfica.

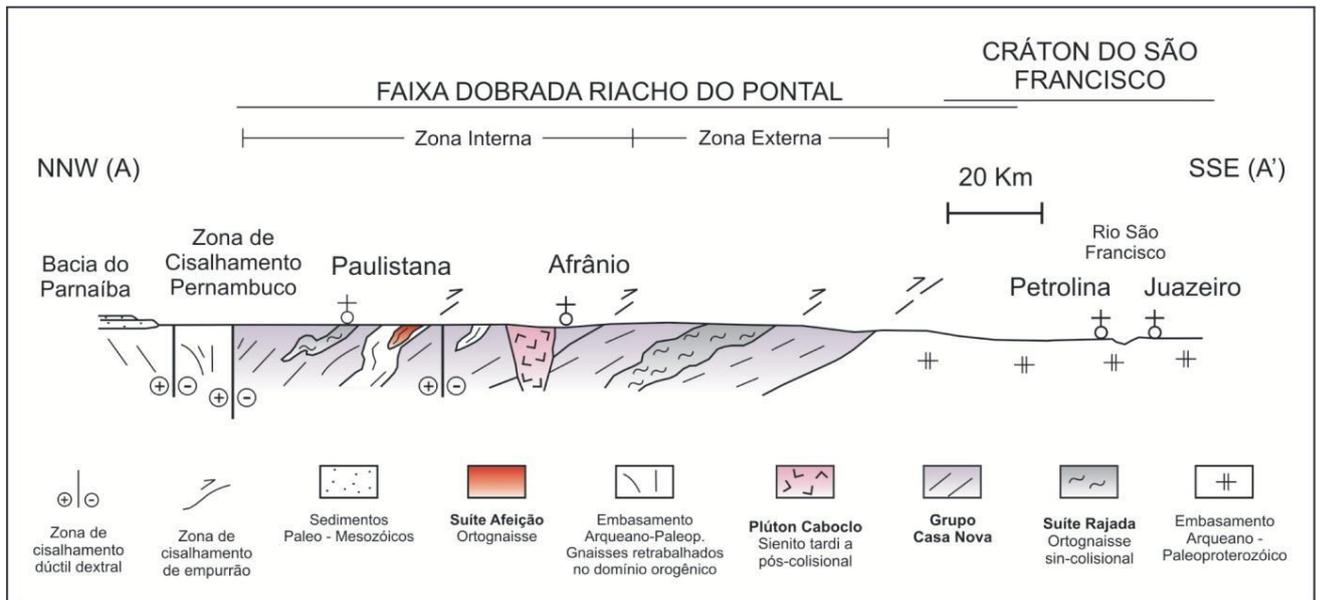


**Figura 2-2.** Detalhe em gnaiss com bandas ricas em biotita e bandas quartzo-feldspáticas.



**Figura 2-3.** Mármore bandado exibindo dobras isoclinais.

A região da Faixa Riacho do Pontal insere-se no sertão do São Francisco - na área central do chamado “Polígono das Secas” (Uhlein *et al.* 2011). Do ponto de vista estrutural, a área apresenta falhas, fraturas, zonas de cisalhamento contracionais e transcorrentes e diques (Figura 2-4). As principais falhas/zonas de cisalhamento separam blocos distintos. Na porção norte do município as falhas/zonas de cisalhamento contracionais tem direção preferencial NE-SW. Na porção leste da área do município ocorrem falhas/zonas de cisalhamento transcorrentes dextrais. As falhas e fraturas encobertas possuem direção preferencial NE-SW e N-S (Silva 2016 apud BELTRÃO *et al.* 2005).



**Figura 2-4.** Seção geológica da Faixa Riacho do Pontal e porção norte do Cráton do São Francisco, com indicação dos domínios externo e interno da faixa dobrada (Uhlein *et al.* 2011).

Estas rochas apresentam-se intensamente fraturadas com fraturas verticais com diferentes atitudes, além de fraturas de alívio horizontais (Figura 2-5) que exibem espaçamento métrico e que são muito importantes para a interconexão de fraturas de mergulho em alto ângulo. Nas áreas de exposição das zonas de fratura os solos apresentam espessuras consideravelmente maiores (podendo alcançar 2 metros de espessura) (Figura 2-6).



**Figura 2-5.** Par de fraturamento mostrando alteração ao longo dos planos de aberturas, pelos quais há percolação preferencial de fluidos.



**Figura 2-6.** Detalhe do maior desenvolvimento do solo sobre zona de interseção de fraturas.

Alguns corredores de cisalhamento regionais também são mapeados. As coberturas de solos e regolitos são pouco espessas e junto às calhas das principais drenagens intermitentes os sedimentos aluvionares podem acumular espessuras de 5 a 10 metros. As espessuras dos aluviões em geral são superestimadas pois, em muitos casos, é difícil distinguir os sedimentos arenosos finos dos aluviões, da porção alterada do topo rochoso (camadas de saprolito). O uso de fotografias aéreas e imagens de satélite podem auxiliar na determinação e mapeamento dos paleovales. Os sedimentos aluvionares são em seu maior volume, finos, entretanto, podem ocorrer localmente fácies mais grossas. A rede de drenagem é controlada pelos lineamentos que são de particular importância para a locação dos poços tubulares profundos com maior produtividade.

Lineamentos longos com padrão geral N45°E, compondo amplas zonas de falhas e cisalhamentos são facilmente reconhecíveis na cartografia geológica. Em menor densidade e com registro menos intenso, ocorrem falhas de direção geral N15°W. Em campo não se observa evidências ou registros de atividade neotectônica remobilizando e reativando as falhas e zonas de cisalhamento. De qualquer forma as zonas aquíferas da região são definidas pela conexão das fraturas de extensão e pares conjugados de cisalhamento o que resulta em um reservatório do tipo fraturado.

### **2.3. Aquíferos**

No Brasil, regiões de bacias sedimentares dão origem a aquíferos porosos e representam aproximadamente 48% do território, e os terrenos cristalinos constituem os aquíferos cársticos-fraturados e aquíferos fraturados, 52% da área do país (Figura 2-7 - Zoby 2002). Em geral, áreas de bacias sedimentares apresentam água de melhor qualidade e sua exploração é mais simples. O

Estado de Pernambuco tem uma área de 98.937,84 km<sup>2</sup>, onde 85.484,03 km<sup>2</sup> (84%) correspondem ao aquífero fissural, 13.453,81km<sup>2</sup> (13%) aos aquíferos intersticiais e apenas 3% aos depósitos aluviais (Costa Filho & Costa 2000).

Os aquíferos intersticiais ou porosos podem ocorrer em bacias sedimentares de maior espessura com elevada potencialidade e os relacionados a depósitos recentes com pouca espessura e baixo potencial, no geral são associados às grandes bacias sedimentares do Proterozoico/Paleozoico, Proterozoico/Mesozoico e Paleozoico e bacias menores do Mesozoico e Cenozoico. São 27 sistemas aquíferos de porosidade granular com área de recarga de 2,76 milhões de km<sup>2</sup>. Quanto aos aquíferos fraturados, estes coincidem com o Cráton do Amazonas e os cinturões de dobramento do Neoproterozoico, englobando parte do Cráton São Francisco, predominantemente, rochas de alto grau metamórfico (gnaisses-migmatitos-granito e granulito), com rochas máficas e ultramáficas subordinadas, além de restos de associações metavulcanossedimentares de baixo a médio grau metamórfico (Hirata *et al.* 2010).

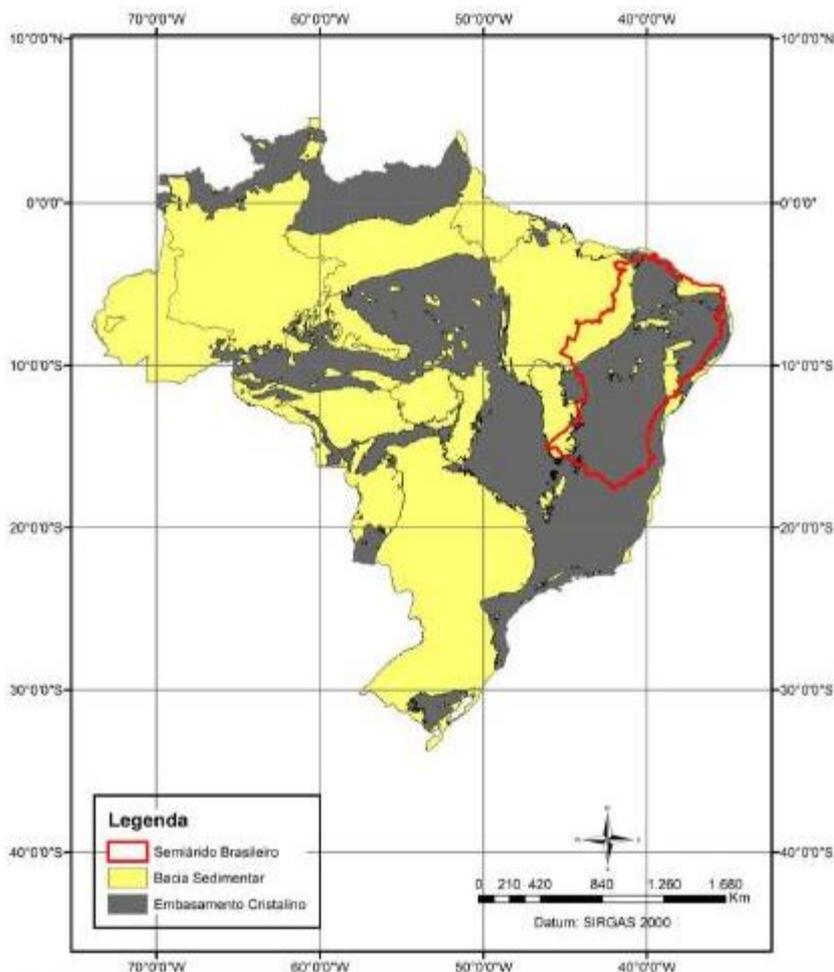


Figura 2-7. Principais domínios sedimentares e cristalinos (CPRM, 2016).

Apesar de sua importância estratégica, os aquíferos fraturados em meios cristalinos ainda não têm seus sistemas de circulação de águas bem conhecidos. A principal lacuna do conhecimento é relativa à forma de recarga, transferência de águas para os diferentes sistemas de fraturas e como se dá a descarga das águas para os aluviões. Esse tipo de aquífero apresenta dificuldade de circulação e renovação das águas, fato que gera uma progressiva salinização, decorrente, sobretudo, da evaporação e evapotranspiração que se processa na zona mais próxima à superfície, com concentração dos sais em profundidade (Costa Filho & Costa 2000 e Costa *et al.* 2006).

Por suas constantes discontinuidades, fraca homogeneidade e forte anisotropia não apresentam parâmetros hidrodinâmicos constantes, a água contida restringe-se aos vazios secundários proporcionados pelas aberturas de falhas, fraturas e fissuras decorrentes de esforços tectônicos ou alívio de pressão. A condutividade hidráulica e o armazenamento de água dependem dos seguintes fatores ligados às anisotropias e à matriz rochosa:

- Amplitude das fraturas;
- Abertura das fraturas;
- Forma e rugosidade das paredes das anisotropias;
- Frequência ou espalhamento dos planos de fraturas;
- Número de famílias ou sistemas de fissuras;
- Orientação e posição dos planos (direção e mergulho);
- Porosidade e permeabilidade da matriz;
- Propriedades do material que preenche as fissuras;
- Interconexão dos planos no espaço;
- Distribuição da amplitude da fissura no sistema que determina a heterogeneidade e a anisotropia.

Rochas mais resistentes apresentam fraturas mais abertas e maior fluxo, porém o volume de água por metro cúbico de maciço rochoso é menor, pela baixa densidade de fraturas, já nas rochas menos resistentes pode ocorrer maior volume de água armazenada. A orientação das estruturas das rochas também influencia no quebramento e conexão das fraturas, que por ser muito restrita o movimento das águas na zona saturada ocorre predominantemente na vertical, oposto do que ocorre nos aquíferos porosos (PERH-PE 1999)

A área para manter o nível de água nos aquíferos é chamada de zona de recarga, que pode ser direta ou indireta. A zona de recarga direta ocorre onde as águas da chuva se infiltram diretamente através de suas áreas de afloramento e fissuras das rochas, a magnitude dessa recarga depende, entre outros fatores, da natureza do solo e do tempo de permanência dos excedentes do balanço hídrico. O tempo de permanência varia de acordo com a declividade do

solo e a cobertura vegetal (José Filho 1996). Já a recarga indireta ocorre onde o abastecimento do aquífero se dá a partir da drenagem superficial das águas e do fluxo indireto (Barbosa & Matos 2008).

Na delimitação de Petrolina estão duas Unidades de Planejamento definidas de acordo com as bacias hidrográficas de Pernambuco, a Unidade de Planejamento Hídrico UP 13 – Bacia Riacho do Pontal e o Grupo de Bacias de Pequenos Rios Interiores 8 – GI8. Esses dois grupos são caracterizados por serem formados inteiramente de aquíferos fissurais do embasamento cristalino fraturado, com baixas vazões e água salinizada (PERH-PE 1999).

Segundo o Projeto Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea (CPRM 2005), no município de Petrolina, a água subterrânea é explorada, em sua maioria, por meio de poços tubulares para uso doméstico e dessedentação animal. A água foi considerada salina (> 1500 mg/l de Sólidos Totais Dissolvidos - STD) em 57% dos poços cadastrados, 27% salobra (501 a 1500 mg/l de STD) e apenas 16% doce (< 1500 mg/l de STD).

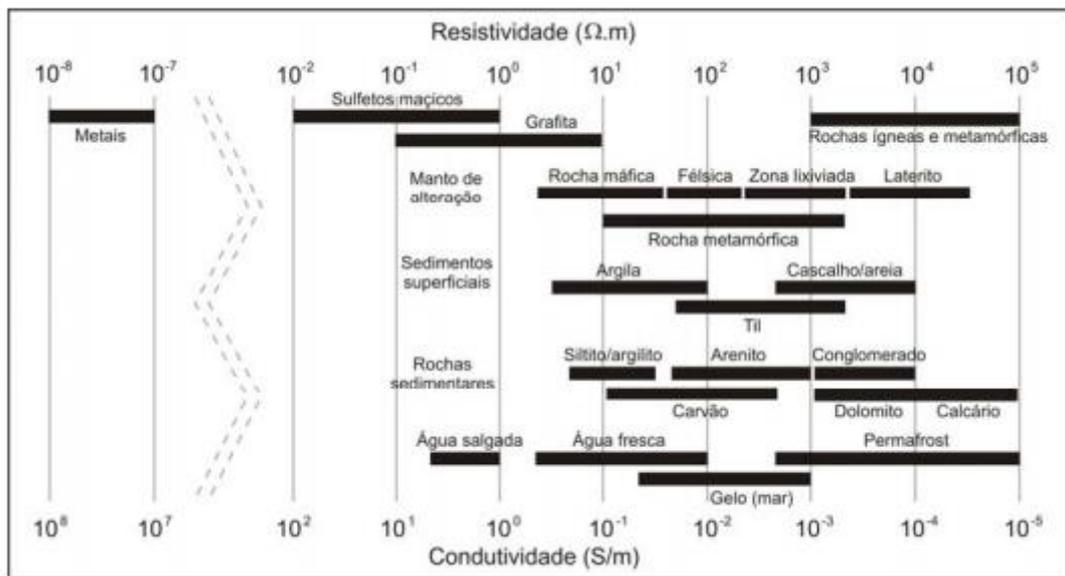
#### **2.4. Método da Resistividade Elétrica**

A geofísica apresenta como objetivo investigar a subsuperfície através das propriedades físicas do meio. Entre essas propriedades presentes nos materiais geológicos está o parâmetro físico de resistividade/condutividade elétrica, o que se torna aplicável para a caracterização da integridade física de materiais geológicos, em termos de alteração, fraturamento e saturação, além de possibilitar a identificação de litotipos sem a necessidade de amostragem ou reconhecimento direto (Braga 2016). A partir de medições no potencial elétrico na superfície pode-se determinar, no subsolo, a existência de corpos minerais e reconhecer estruturas geológicas (Telford *et al.* 1990).

A maior parte das rochas conduz eletricidade por processos iônicos, através dos poros ou ao longo de fissuras e fraturas (Kearey *et al.* 2009). Segundo McNeill (1980) a condutividade é determinada nos solos e rochas pelos seguintes fatores: porosidade, quantidade de água que preenche os poros; concentração de sólidos totais dissolvidos na água, temperatura e fase de estado da água presente nos poros e quantidade e composição de coloides.

As rochas sedimentares, em sua maioria, apresentam baixos valores de resistividade, principalmente por essas rochas possuírem alta porosidade, fato que ocorre durante os processos e condições de sedimentação. As rochas ígneas, quando não fraturadas, são bastante resistivas. As rochas que possuem minerais de argila apresentam elevada condutividade, pois estes minerais apresentam um caminho alternativo de baixa resistência para a condução da corrente elétrica, uma camada difusa que tem liberdade para mover-se quando sujeita a ação de um campo elétrico (Luís 2005).

A Figura 2-8 apresenta intervalos de resistividade e condutividade encontrados para alguns materiais.



**Figura 2-8.** Valores típicos de resistividades observados nas rochas (Palacky 1987, adaptado de Borges 2007).

#### 2.4.1. Resistividade das Rochas e Minerais

A resistividade ( $\rho$ ) é a propriedade que representa a habilidade dos materiais em transmitir corrente elétrica, independente dos fatores geométricos, que é definida como a resistência em Ohms entre as faces opostas de um cubo de aresta unitária desse material (Luis 2005). Num cilindro condutor de resistência  $\delta R$ , comprimento  $\delta L$  e área  $\delta A$ , a resistividade  $\rho$  é dada pela fórmula (Equação 1):

$$\rho = \frac{\delta R \delta A}{\delta L} \quad \text{Equação 1}$$

A Lei de Ohm (Equação 2) define que a corrente ( $I$ ) é proporcional a diferença de potencial ( $V$ ) para os materiais, e essa constante de proporcionalidade é a resistência ( $R$ ).

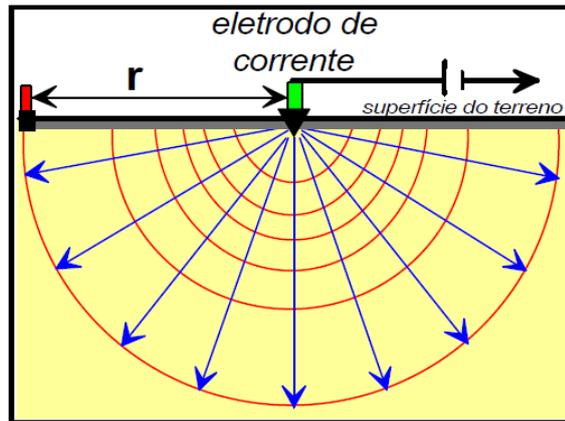
$$\delta V = \delta R \cdot I \quad \text{Equação 2}$$

Com as equações 1 e 2 obtemos:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \frac{\rho I}{\delta A} = \rho i \quad \text{Equação 3}$$

Onde  $i$  é a densidade de corrente ( $A/m^2$ ).

A corrente flui radialmente através do eletrodo de corrente, e um voltímetro mede a resistividade do meio. A resposta no subsolo ocorre em linhas equipotenciais de voltagem, que cruzam com as linhas de corrente (Figura 2-9).



**Figura 2-9.** Ponte de injeção de corrente e comportamento no meio homogêneo (Braga 1997).

Onde a densidade de corrente será:

$$i = \frac{I}{2\pi r^2} \quad \text{Equação 4}$$

Da equação 3 obtém-se:

$$\frac{\delta V}{\delta L} = \rho i = \rho \frac{I}{2\pi r^2} \quad \text{Equação 5}$$

Considerando o potencial em um ponto qualquer do meio:

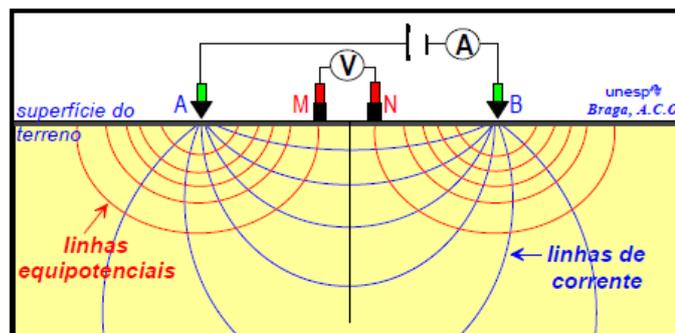
$$Vr = \int_r^\infty \delta V = \int_r^\infty \frac{\rho I}{2\pi r^2} = \frac{\rho I}{2\pi r} \quad \text{Equação 6}$$

Reescrevendo a equação 6, temos que a resistividade é:

$$\rho = 2\pi r \frac{V}{I} \quad \text{Equação 7}$$

O princípio da eletrorresistividade é baseado na passagem pelo solo de uma corrente contínua (I), transmitida por um par de eletrodos (A e B) ligados a uma fonte emissora, essa diferença de potencial é medida por outros dois eletrodos (M e N).

A Figura 2-10 evidencia o esquema da aquisição de dados, onde são colocados na superfície de investigação dois eletrodos de corrente (A e B) e dois eletrodos de potencial (M e N).



**Figura 2-10.** Ilustração esquemática do funcionamento do método de eletrorresistividade (Braga 1997).

A profundidade de investigação alcançada depende da configuração dos eletrodos, o que

ocorre devido ao solo não ser um meio perfeitamente homogêneo. Quando existe heterogeneidade, os resultantes do campo elétrico nos eletrodos M e N são proporcionais à intensidade da corrente introduzida no meio e a configuração eletródica usada (Equação 6 e Equação 7).

$$V_M = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} \right) \quad \text{Equação 8}$$

$$V_N = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AN} - \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Equação 9}$$

A diferença de potencial será:

$$\Delta V_{MN} = V_M - V_N \quad \text{Equação 10}$$

$$\Delta V_{MN} = \frac{I\rho}{2\pi} \left( \frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN} \right) \quad \text{Equação 11}$$

Na aplicação do método de eletrorresistividade em um meio heterogêneo a resistividade de fato medida representa a média ponderada de todas as resistividades verdadeiras em volume de material em subsuperfície, porém obtém-se uma resistividade aparente ( $\rho_a$ ), que é calculada pela seguinte equação:

$$\rho_a = K \cdot \frac{\Delta V}{I} \quad \text{Equação 12}$$

Em que K representa o fator geométrico que depende do arranjo do quadripolo ABMN (Equação 13).

$$K = \frac{2\pi}{\frac{1}{AM} - \frac{1}{BM} - \frac{1}{AN} + \frac{1}{BN}} \quad \text{Equação 13}$$

Entre os métodos geoeletricos estão a eletrorresistividade, o potencial espontâneo e a polarização induzida, sendo que o método da resistividade elétrica é o mais aplicado para estudos em hidrogeologia.

#### 2.4.2. Aplicação da Eletrorresistividade

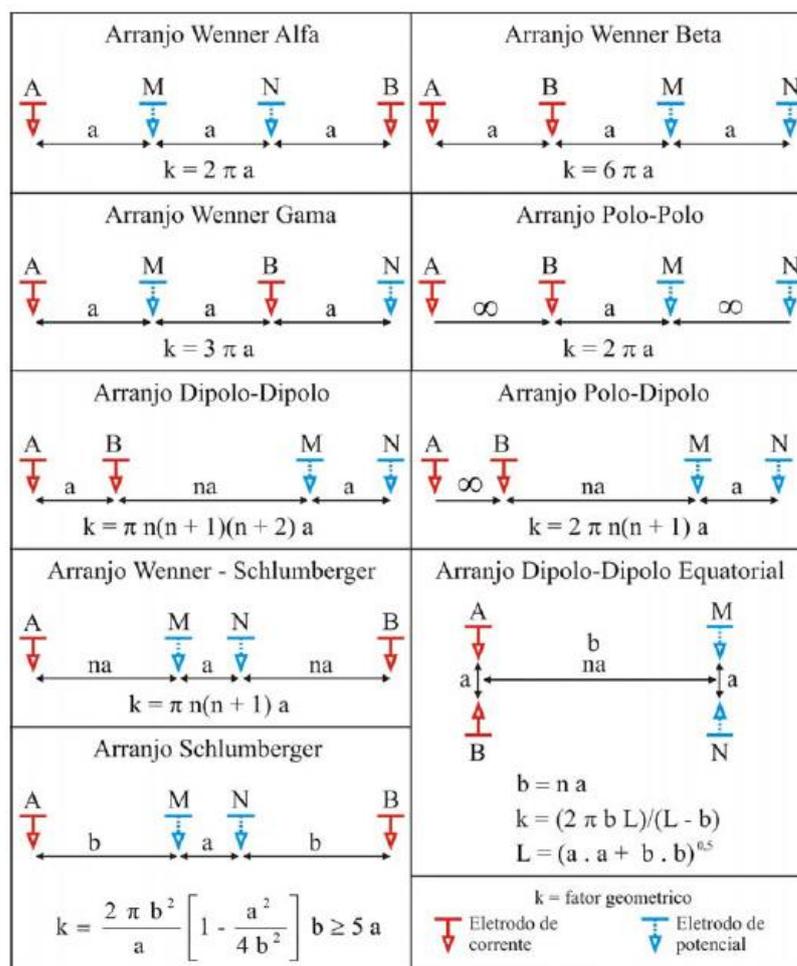
Um dos métodos geofísicos mais consagrados em estudos hidrogeológicos no Nordeste Brasileiro é a eletrorresistividade, que se popularizou principalmente pelo custo dos equipamentos e pela ausência de outros métodos com um mesmo nível de precisão no estudo, sobretudo, de estratos horizontais.

Entre as vantagens da aplicação, está o fato de a qualidade dos dados ser aumentada devido aos resultados qualitativos que são obtidos através de uma fonte controlada de dimensões conhecidas. E como desvantagem, pode-se destacar sua relação sinal/ruído, devido à alta sensibilidade com pequenas variações de condutibilidade próximo a superfície.

Braga (2016) detalha as três técnicas de investigação que são possíveis no método, que incluem a sondagem elétrica vertical (SEV), o caminhamento elétrico e a perfilagem elétrica.

Neste trabalho será aplicada a técnica de caminhamento elétrico, pelo fato de os alvos de interesse serem variações laterais da resistividade do subsolo, sendo muito adequado para detectar contatos geológicos verticais ou inclinados, mineralizações, diques, fraturamentos e/ou falhamentos e outros corpos ou estruturas que se apresentem como heterogeneidades laterais deste parâmetro (Gallas 1998).

As configurações usadas na definição dos dois eletrodos de corrente e os dois eletrodos de potencial são diversas (Figura 2-11).



**Figura 2-11.** Arranjos eletródicos utilizados nos métodos elétricos (Borges 2007, adaptado de Loke 2004).

Para este levantamento de dados foi utilizado o arranjo dipolo-dipolo em que as leituras são efetuadas em várias profundidades de investigação, o que fornece informações verticais e laterais de resistividade. Os eletrodos AB e MN são igualmente espaçados entre si, e se deslocam ao longo do perfil de aquisição (Figura 2- 12). Quando a distância entre o ponto central de MN e o ponto central de AB for grande comparativamente à distância entre eles ( $x$ ), o campo elétrico gerado pela injeção AB aproxima-se do campo gerado por um dipolo elétrico, que é muito sensível às variações da resistividade do meio. Este fato torna este dispositivo particularmente vocacionado para a detecção de falhas com circulação de fluido (Luis 2005).

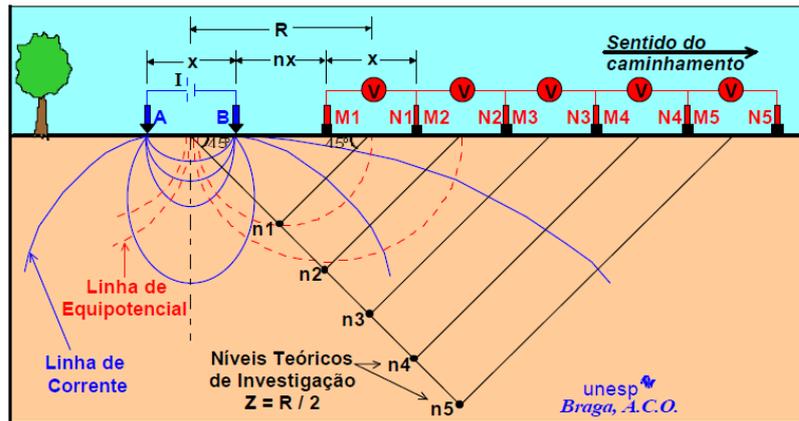


Figura 2- 12. Disposição dos eletrodos no arranjo dipolo-dipolo (Braga 2005).

Segundo Telford (1990) para se atingir a profundidade de investigação desejada, o espaçamento entre os eletrodos deve ser maior, de cerca de 4 vezes a profundidade desejada. Porém outros fatores interferem na profundidade, como, por exemplo, ruídos culturais, variações geológicas laterais, topografia da superfície e do substrato rochoso (Borges 2007).

## 2.5. Perfilagem Ótica

A perfilagem de poços foi desenvolvida desencadeada pela dificuldade de se reconstituir uma litologia a partir da amostragem, onde importantes propriedades das rochas se tornam difíceis de serem avaliadas (CPRM 2008).

O primeiro perfilador ótico foi desenvolvido como um sistema autônomo em 1987 (Williams & Johnson 2004). Paillet *et al.* (1990) apresentaram um estudo geral sobre o uso do perfilador ótico nas paredes dos poços em aquíferos fraturados.

As primeiras aplicações da perfilagem ótica no mercado brasileiro de água subterrânea se deram no final da década de 80, o método surpreendeu em seus resultados e foi rapidamente assimilado pelos perfiladores de poços e consultores da área, acostumados a se depararem com inúmeras incógnitas quando da execução de programas de manutenção preventiva ou não e em planejamentos de novos poços. Por se tratar de uma sonda que é introduzida no poço para se obter dados contínuos de seu interior, o método empregado é uma perfilagem. Esta investiga o poço tratando com fenômenos de produção, transmissão e detecção de radiações eletromagnéticas, ou seja, parte física denominada ótica. Assim sendo, os autores compreendem que o termo correto para tal metodologia é perfilagem ótica, que não deixa de ser uma perfilagem geofísica (Camargo *et al.* 1988). Como o método não apenas filma o poço, mas permite a determinação das atitudes de planos (fraturas, bandamento gnáissico, acamamento), além da direção do fluxo, pode ser considerado como um perfilador e não simplesmente como equipamento de vídeo inspeção.

O equipamento fornece uma imagem de alta resolução, que consiste na geração de uma imagem da parede do poço captada por uma câmera digital, a partir da reflexão da parede do poço, através da emissão de luz branca vinda de LEDs contidos na própria ferramenta de perfilagem em uma lente olho de peixe que permite sondar 360°. A imagem é orientada de modo que não há rotação, esta orientação é feita através de magnetômetros e acelerômetros triaxiais. Estes sensores permitem traçar a trajetória do poço, fornecendo sua inclinação, direção e a caracterização de estruturas geológicas para poços não revestidos. Em poços revestidos, o sensor ótico, permite analisar o estado do revestimento, a qualidade da água do poço e o volume de contaminante quando houver. O ângulo de incidência da luz é variável, assim o sistema é capaz de manter o foco da parede do poço, mesmo variando o diâmetro (Guerra 2010).

Geralmente as ferramentas usadas são de 1,4 - 2,8 m de comprimento e 40 - 50 mm de diâmetro, e o diâmetro máximo do furo em que as imagens podem ser recolhidas são 300 mm. As resoluções verticais e horizontais comuns de imagens são 0,5; 1 ou 2 mm e 180, 360 ou 720 pixels por linha, respectivamente. A velocidade de registro para imagens depende da resolução vertical e horizontal selecionada e do projeto do sistema e do tipo de cabo, as velocidades de registro típicas para a maioria dos sistemas são da ordem de 1 m/min. A câmera mede a intensidade do espectro de cores em vermelho, verde e azul e intensidade da luz é predefinida antes ou, em alguns sistemas, pode ser ajustada durante o registro (Williams & Johnson 2004).

Litologia e estruturas tais como fraturas, infiltrações da fratura, foliação, e planos de acamamento são visualizadas diretamente nas imagens do perfilador. Nery & Macari (2015) apresentaram a integração de dados de perfilagem ótica e com outras perfilagens geofísicas, que possibilitaram sequencias, diferenciar e identificar características texturais em rochas básicas. Reginato & Ahlert (2012) utilizaram a perfilagem ótica para avaliar poços tubulares que captam água subterrânea de aquíferos fraturados, onde os resultados permitiram identificar características e problemas construtivos dos poços e estruturas que correspondem às entradas de água no aquífero.

As imagens de OTV podem ser coletadas em intervalos com ar ou de água limpa. Lama de perfuração, precipitação química, crescimento bacteriano e outras condições que afetam a clareza da água do poço ou produzem revestimentos na parede interferem na qualidade das imagens (Williams & Johnson 2004).

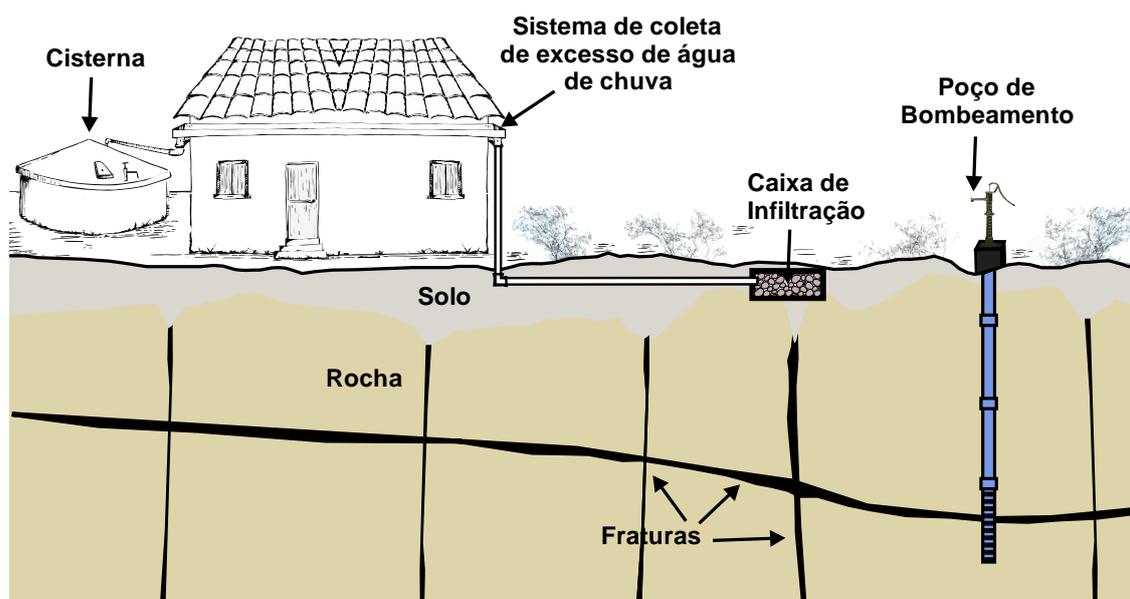
## CAPÍTULO 3

### 3. AQUISIÇÃO DE DADOS, RESULTADOS E DISCUSSÕES

#### 3.1. Eletrorresistividade

##### 3.1.1. Aquisição de dados

A aquisição de dados elétricos 2D foi desenvolvida entre os dias 10 e 13 de junho de 2016, com objetivo de verificar eventuais mudanças no padrão de eletrorresistividade com o processo simultâneo de recarga artificial do aquífero. A área investigada está localizada em uma propriedade rural, situada a aproximadamente 40 km de Petrolina. Neste local foi instalado, anteriormente, o sistema de recarga artificial composto por uma caixa de infiltração e um poço tubular (Figura 3-1) (Silva 2016). O local foi escolhido em função da facilidade para a captação de água pluvial através de telhados próximos, da existência de poços tubulares e da necessidade de água para as atividades na propriedade local.

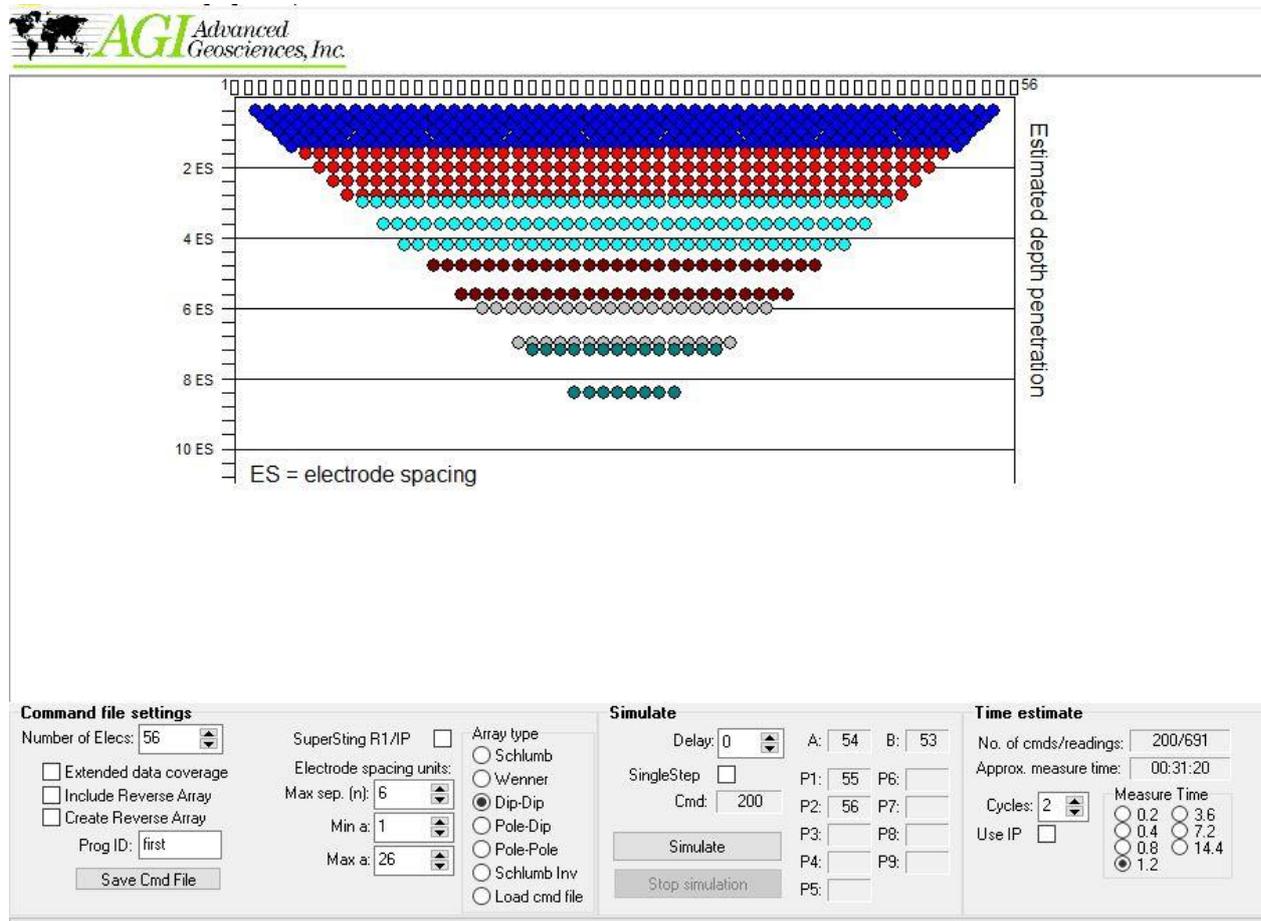


**Figura 3-1** Sistema piloto de recarga artificial instalado em uma área rural de Petrolina-PE.

Neste trabalho foi utilizado o equipamento *Super Sting R8 IP* (Figura 3-3), com 56 canais. Foram medidos em campo dados de resistência de contato dos eletrodos e o solo e a resistividade aparente. Na região de estudo os valores de resistência de contato são elevados, isso ocorre devido ao fato do solo ser seco, o que dificultada a passagem de corrente no meio. Para amenizar esse fato a área foi umedecida nos pontos de fixação dos eletrodos.

A configuração de eletrorresistividade para aquisição dos dados foi realizada no software AGISSAdm, os eletrodos foram configurados com o arranjo dipolo-dipolo e espaçados a cada 2 metros, atingindo-se a profundidade média de 22 metros. A Figura 3-2 mostra a interface do

software com os pontos amostrados e a profundidade de alcance estimada. O tempo de aquisição médio para o arranjo configurado foi de 40 minutos. Os dados de campo foram modelados nos softwares Res2dinv e Oasis Montaj.



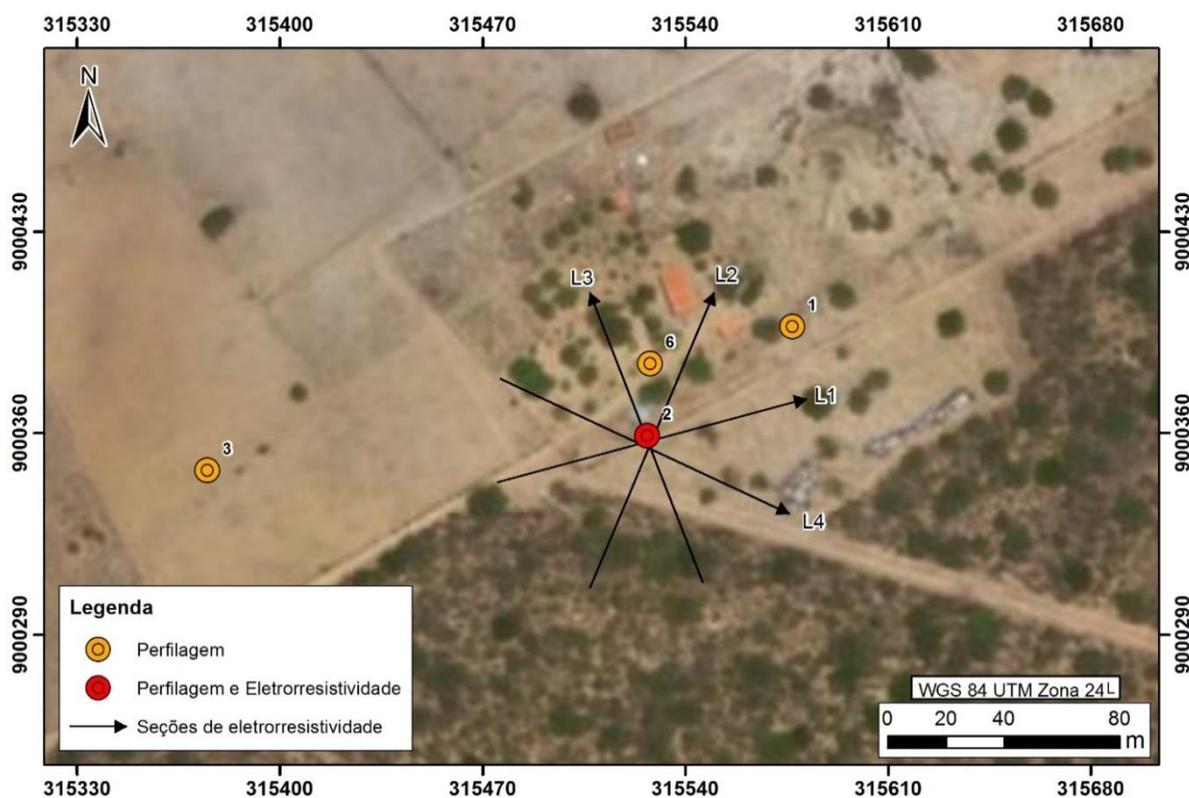
**Figura 3-2. Configuração do arranjo de eletrorresistividade utilizada.**

Na Figura 3-3 são mostradas fotos da aquisição dos dados de eletrorresistividade e evidenciado o sistema de recarga artificial instalado, que é composto por uma trincheira de 2 metros de profundidade, 3,5 metros comprimento e 1,2 metro de largura, preenchida por cascalhos e blocos de quartzo de veio.

Foram realizadas quatro linhas de aquisição com 110 metros de extensão, e perfis dispostos de forma radial (Figura 3-4 a Figura 3-7). O poço com a trincheira de recarga está identificado com a cor vermelha na figura. As leituras de resistividade ocorreram em três momentos distintos na Linha 1: antes, durante e depois da infiltração de água na trincheira. Nos demais perfis foram realizadas leituras antes e depois do processo de injeção de água.



**Figura 3-3.** Fotografias que evidenciam a aquisição de dados de eletrorresistividade com o equipamento Super Sting e o local do sistema de recarga artificial.



**Figura 3-4.** Linhas de levantamento.

Inicialmente foi realizada a aquisição de dados nas quatro linhas com a área seca. No segundo e no terceiro dia de aquisição foi injetada na trincheira de infiltração água fornecida por caminhões pipa, cada um com 7.000 litros de água. Durante a injeção de água foram feitas leituras constantes ao longo da Linha 1, com o objetivo de verificar o comportamento da infiltração. No terceiro dia foram adquiridas todas as linhas novamente, para comparação das áreas antes e depois da infiltração.

Durante a execução do levantamento, notou-se que havia um vazamento próximo ao poço, o que interferiu nos resultados pelo fato da área não estar completamente seca nos levantamentos iniciais.

A Tabela 3-1 e Tabela 3-2 descrevem as informações referentes ao acompanhamento da infiltração ao longo da Linha 1. Os arquivos estão nomeados na seguinte ordem: L1, dia de execução e número do perfil. Também são apresentadas informações sobre a injeção de água pelos caminhões pipa e sobre o conserto do vazamento presente na área do poço.

<b>Linha</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Água Infiltrada (litros)</b>	<b>Observação</b>
L1.1	16:51	17:26		
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	
L1.2.1	9:54	10:34		
L1.2.2	10:36	11:16		
L1.2.3	11:22	11:59		
L1.2.4	12:07	12:54		
L1.2.5	14:02	14:40		
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	
L1.2.6	14:48	15:26		
L1.2.7	15:30	14:08		
L1.2.8	16:10	16:48		
L1.2.9	16:55	17:33		
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	
L1.2.10	17:37	18:14		
L1.2.11	18:16	18:54	7000	
L1.2.12	18:55	19:33		
L1.2.13	19:37	20:16	7000	
L1.2.14	20:19	20:47		Erro na leitura dos dados
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	

**Tabela 3-1.** Informações sobre os levantamentos realizados na Linha 1 no Primeiro e Segundo dia de levantamento.

<b>Água Infiltrada (litros)</b>	<b>Hora inicial</b>	<b>Hora final</b>	<b>Água Infiltrada (litros)</b>	<b>Observação</b>
L1.3.1	7:06	7:42		
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	Conserto do Vazamento
L1.3.2	12:44	13:26		
L1.3.3	13:27	14:08		
<b>Caminhão Pipa</b>			7000	
L1.3.4	14:13	14:57		
L1.3.5	15:00	15:42		
L1.3.6	15:43	16:02		Erro na leitura dos dados
L1.3.7	16:26	17:06		
L1.3.8	17:08	17:48		
L1.3.9	17:51	18:32		
L1.3.10	18:40	19:20		
L1.3.11	20:04	20:46		
L1.3.12	20:58	21:39		
L1.3.13	21:58	22:35		Erro na leitura dos dados
L1.4.1	5:08	5:49		
L1.4.2	6:00	6:39		
L1.4.3	6:40	7:18		

**Tabela 3-2.** Informações sobre os levantamentos realizados na Linha 1 no Terceiro e Quarto dias do levantamento.

No total, foram injetados 42 mil litros de água. Houve erro na aquisição de três linhas de eletrorresistividade que ocorreram devido a bateria fraca do equipamento no momento de leitura dos dados.

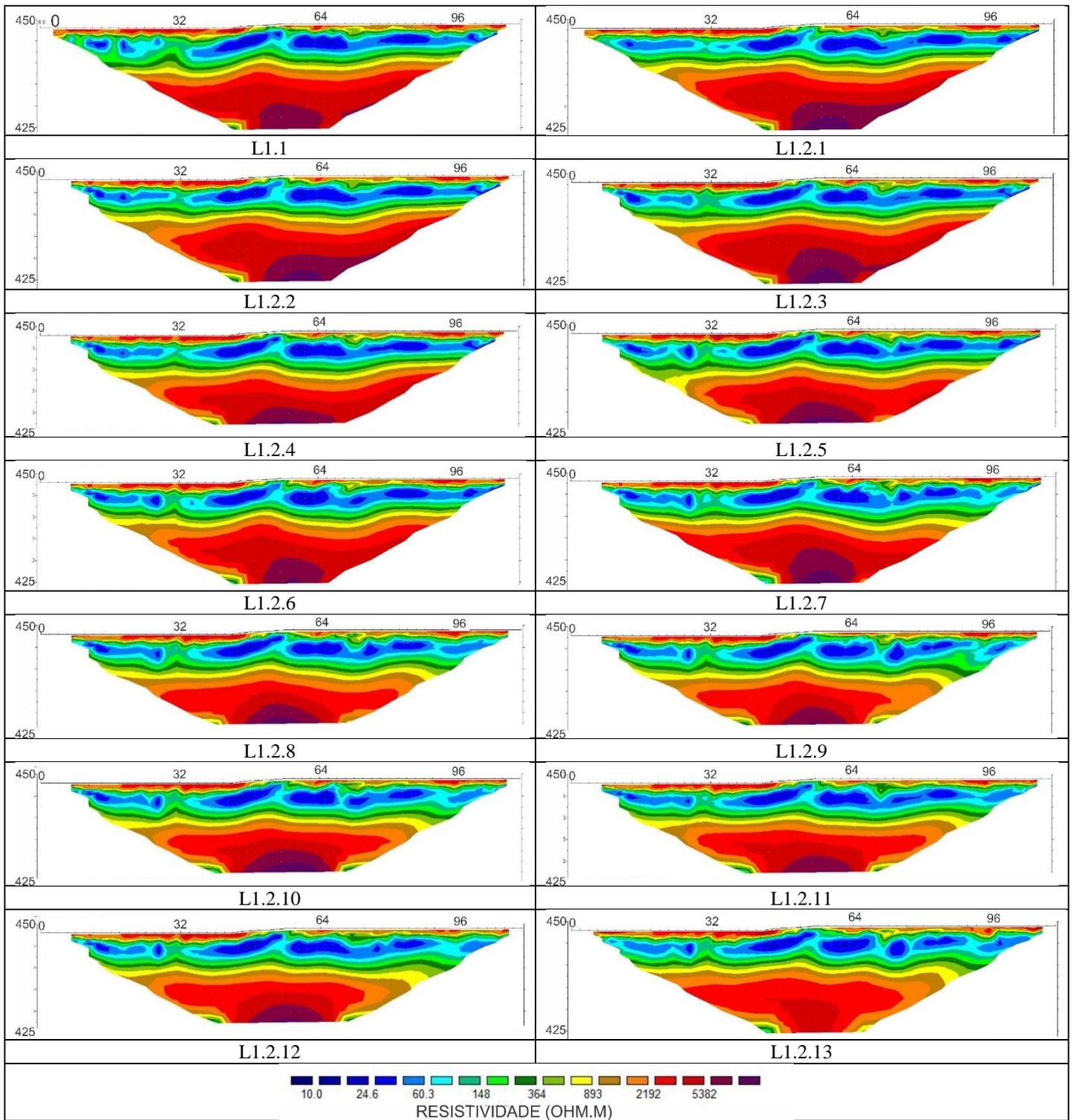
### **3.1.2. Resultados**

Os produtos da modelagem 2D são apresentados nas figuras seguintes (Figura 3-6 a Figura 3-16). Para a elaboração dos perfis foi realizado apenas uma filtragem dos dados espúrios e a inversão de mínimos quadrados no software Res2dinv. A inversão tem por objetivo determinar a resistividade nos blocos retangulares que irão produzir uma pseudosseção de resistividade aparente a qual coincida ou se aproxime das medidas de campo. É realizada por meio da redução dos valores de resistividade medidos em campo, dos dados calculados e ajustando a resistividade nos blocos do modelo (Borges 2007). Essa diferença é representada pelo erro médio quadrático (*Root Mean Square - RMS*). Os dados coletados apresentaram RMS, entre 25 e 32, provavelmente pelo fato de a área de estudo apresentar alta resistência de contato.

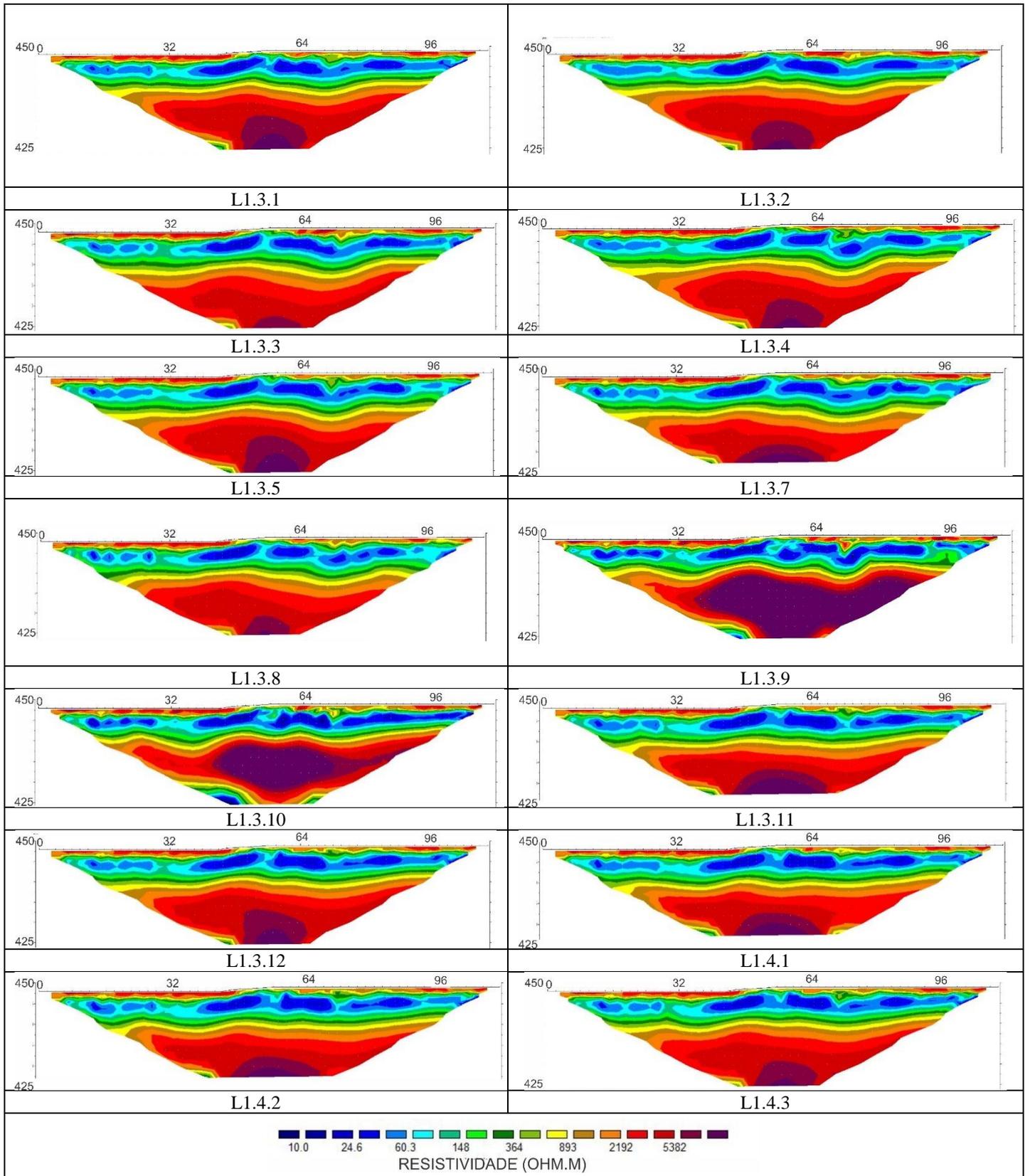
O efeito da topografia nas medições foi corrigido pelo programa no modelo de inversão. Na metodologia da inclusão da topografia, os nós da superfície da malha são deslocados para cima ou para baixo de modo que coincidam com a topografia real, pela mesma quantidade dos nós da superfície ao longo da mesma linha de malha vertical (Loke 2000). Nas seções geradas, o fator 1 foi aplicado ao exagero vertical para melhor visualização dos dados. Para apresentação dos dados foi escolhida uma escala de cor logarítmica com o valor de mínimo de contorno de 10 e valor de contorno de 1,567;

A Figura 3-6 apresenta uma compilação de todas as seções de investigação geolétrica realizadas na Linha 1, e para uma visualização em maior detalhe foram escolhidas quatro seções em momentos distintos da aquisição (Figura 3-7 a Figura 3-10): na área seca, durante a injeção da água e no final do processo. É possível identificar diferentes camadas geolétricas e suas respostas em relação a infiltração.

As seções geolétricas da Linha 2 que ocorrerão no início e ao final do levantamento são apresentadas na Figura 3-11 e Figura 3-12; a Figura 3-13 e Figura 3-14 apresentam os resultados da Linha 3 e a Linha 4 é apresentada na Figura 3-15 e Figura 3-16.



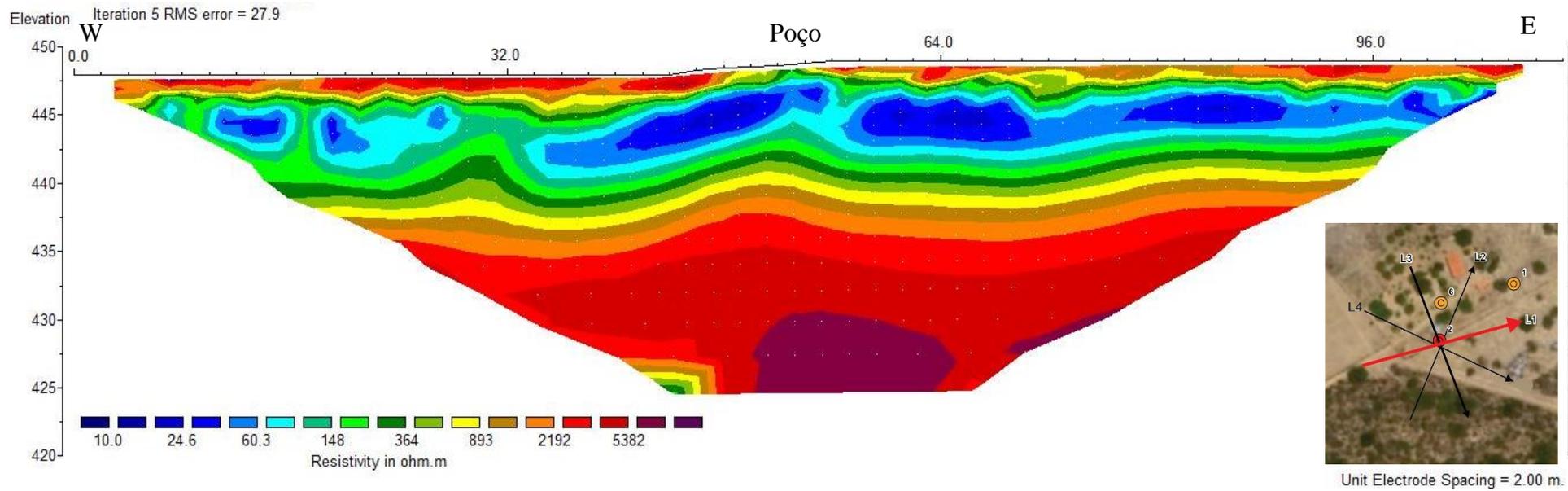
**Figura 3-5.** Compilação das seções realizadas na Linha 1 no primeiro e segundo dia de levantamento.



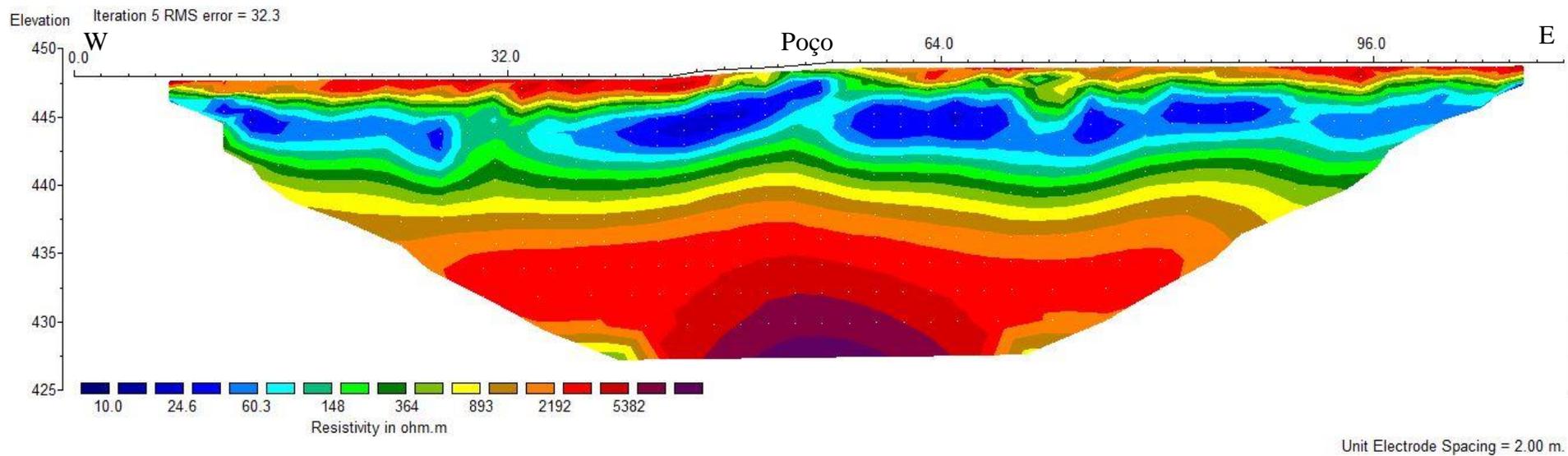
**Figura 3-6.** Compilação das seções realizadas na Linha 1 realizadas no terceiro e quarto dias de levantamento.

A avaliação visual das seções (Figura 3-4) mostra que em alguns momentos ocorreu variação significativa do padrão geofísico, com aumento da área com alta resistividade ou diminuição desta área ou ainda mudança da zona de transição entre áreas de maior ou menor resistividade. Tais variações são explicadas pelos seguintes argumentos:

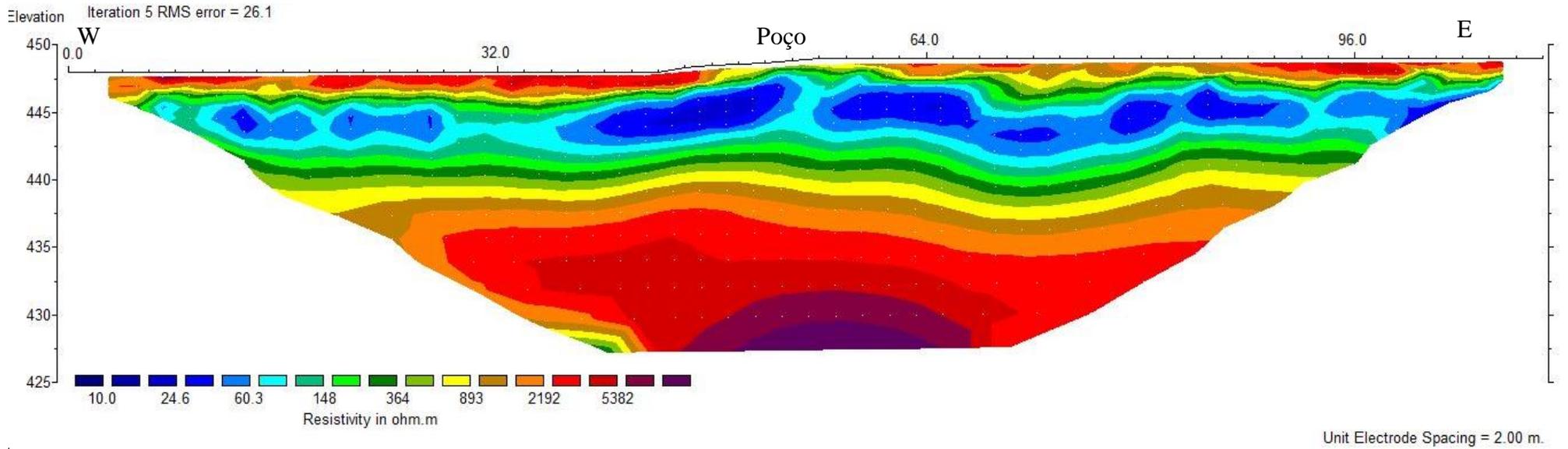
- o aumento da área resistiva é interpretado pela chegada da água de infiltração que apresenta baixa condutividade elétrica (de 156,7  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ) com relação à água do aquífero local que é de 4.440  $\mu\text{S}/\text{cm}$ ;
- a diminuição da áreas resistiva é atribuída à mistura da água de infiltração com sais dissolvidos presentes na zona de saprolito e rocha alterada e
- a mudança da zona de transição é explicada pela interação da água infiltrada através da caixa de infiltração em zonas de pequenas fraturas.



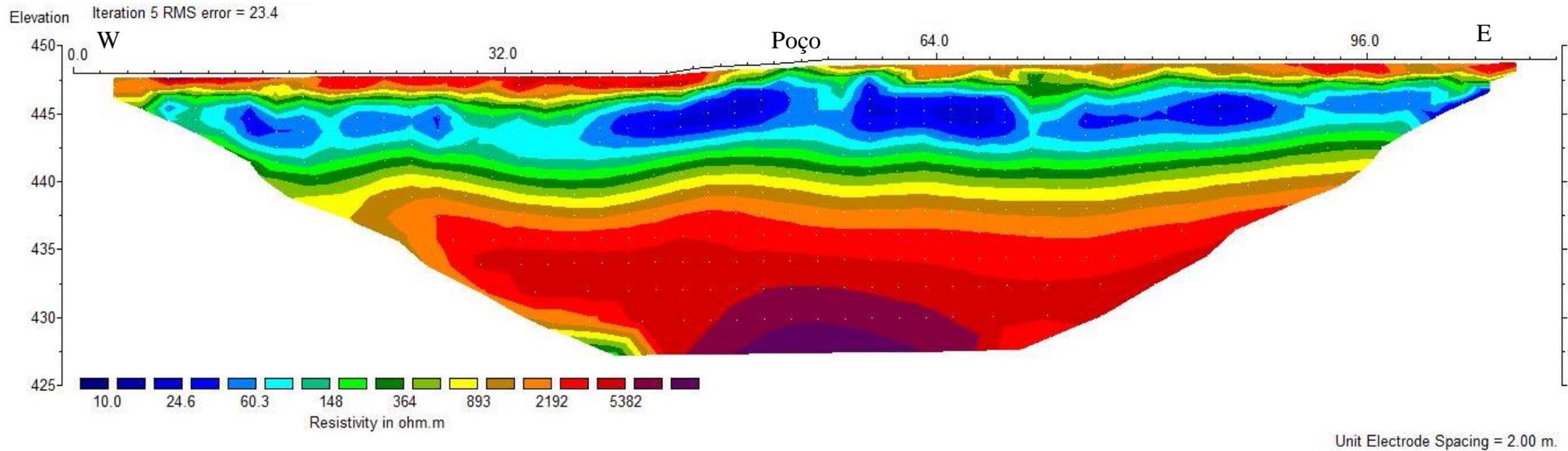
**Figura 3-7.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, antes da infiltração.



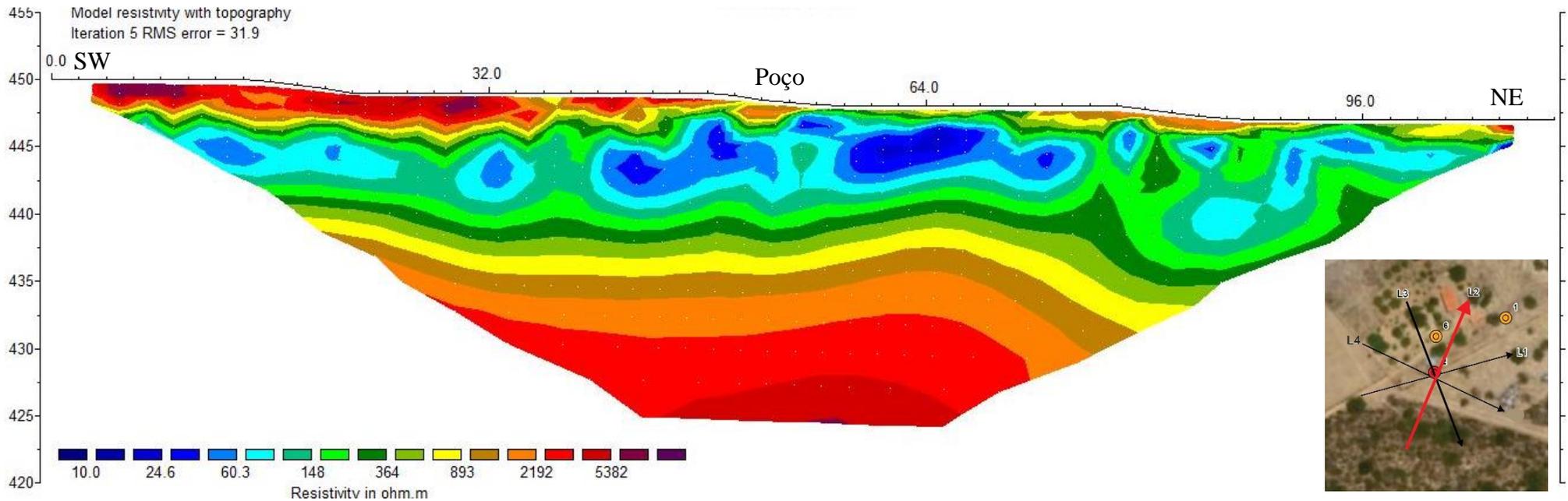
**Figura 3-8.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, após infiltração de 7 mil litros de água.



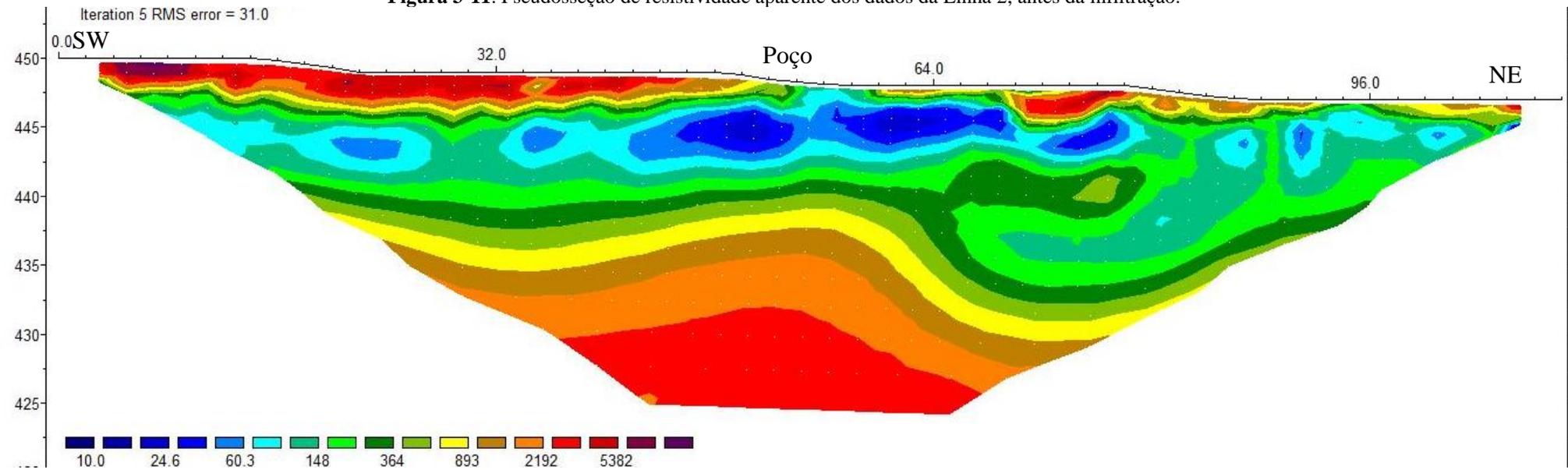
**Figura 3-9.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, após a infiltração de 56 mil litros de água.



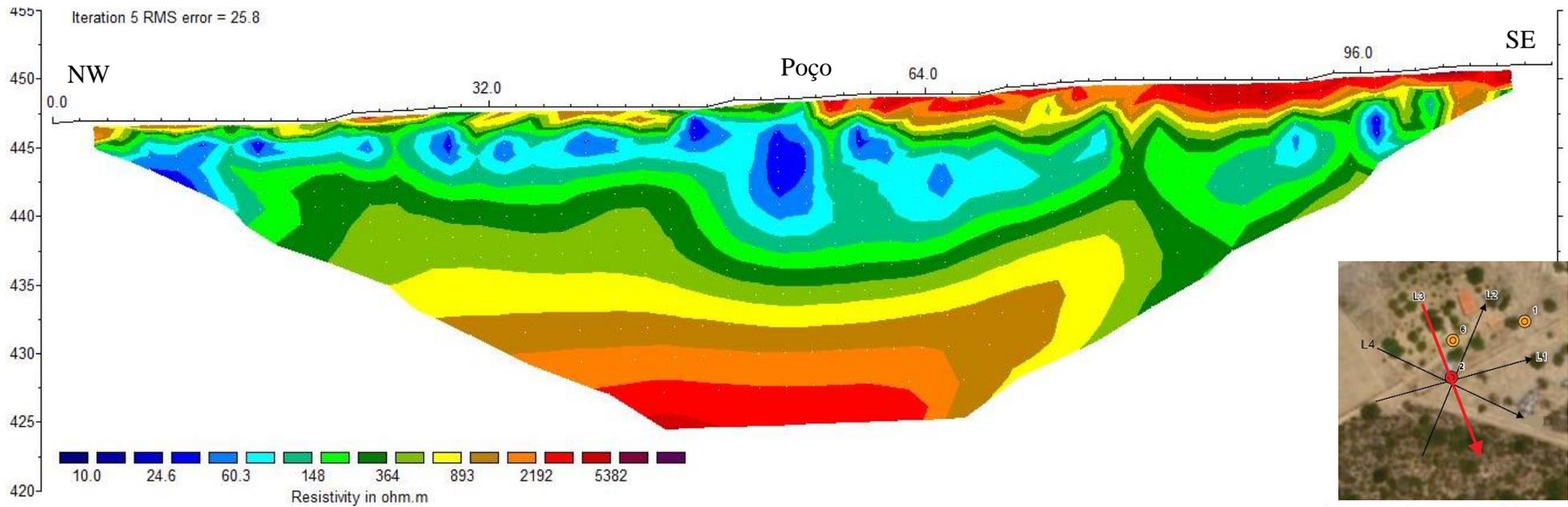
**Figura 3-10.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 1, ao final do levantamento.



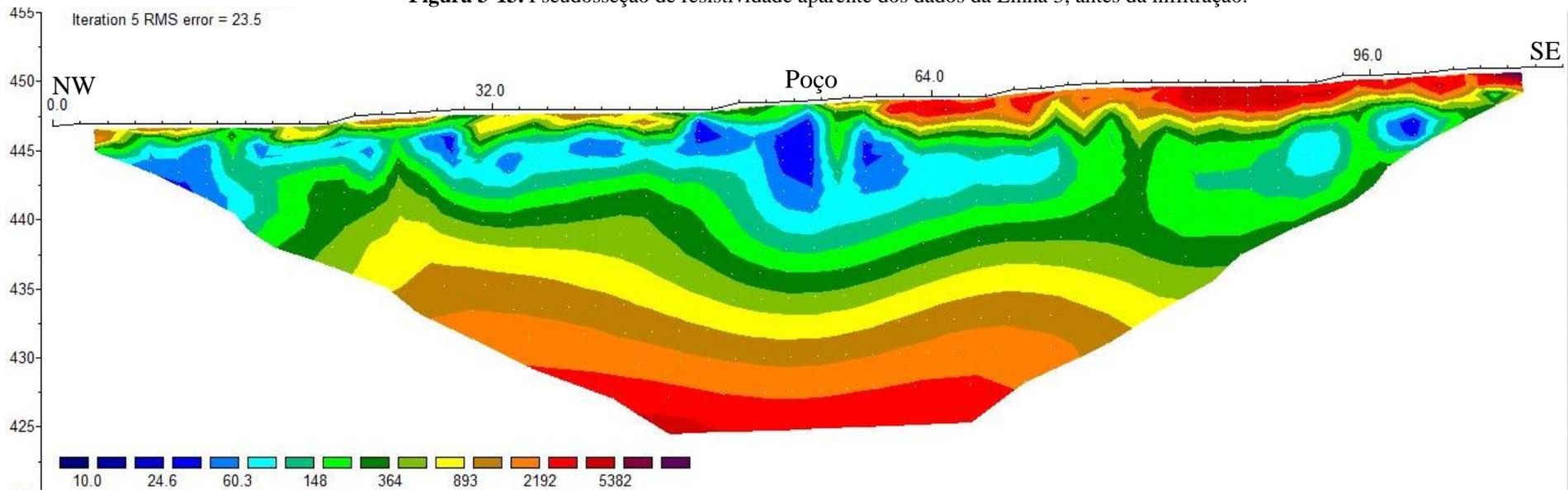
**Figura 3-11.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 2, antes da infiltração.



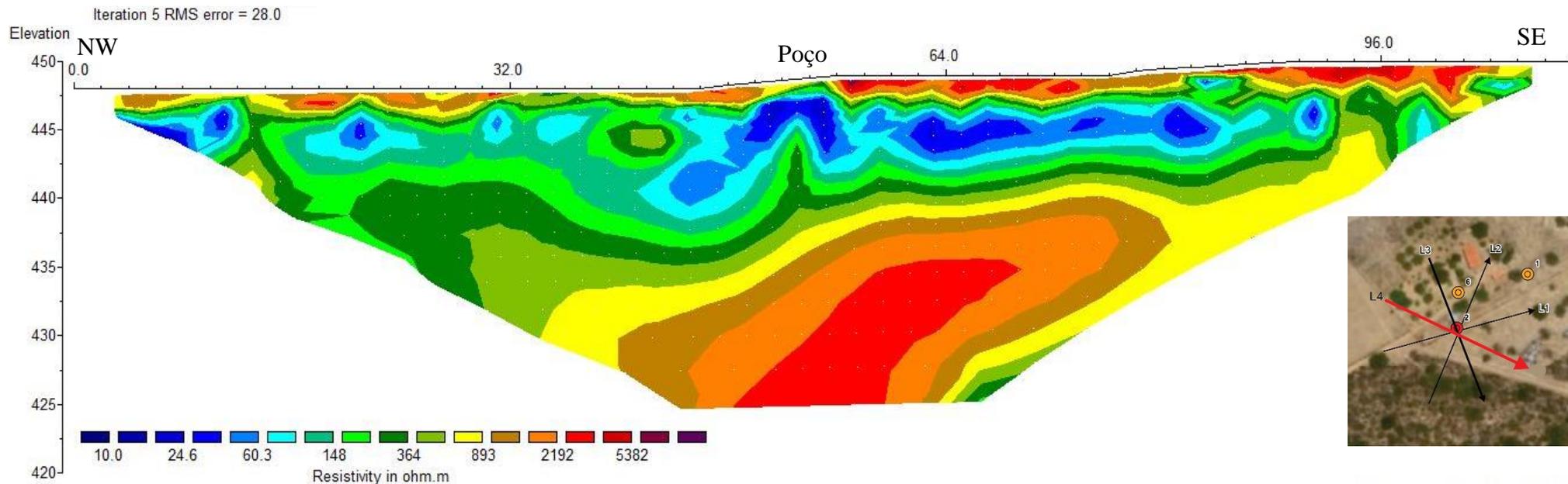
**Figura 3-12.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 2, ao final do levantamento.



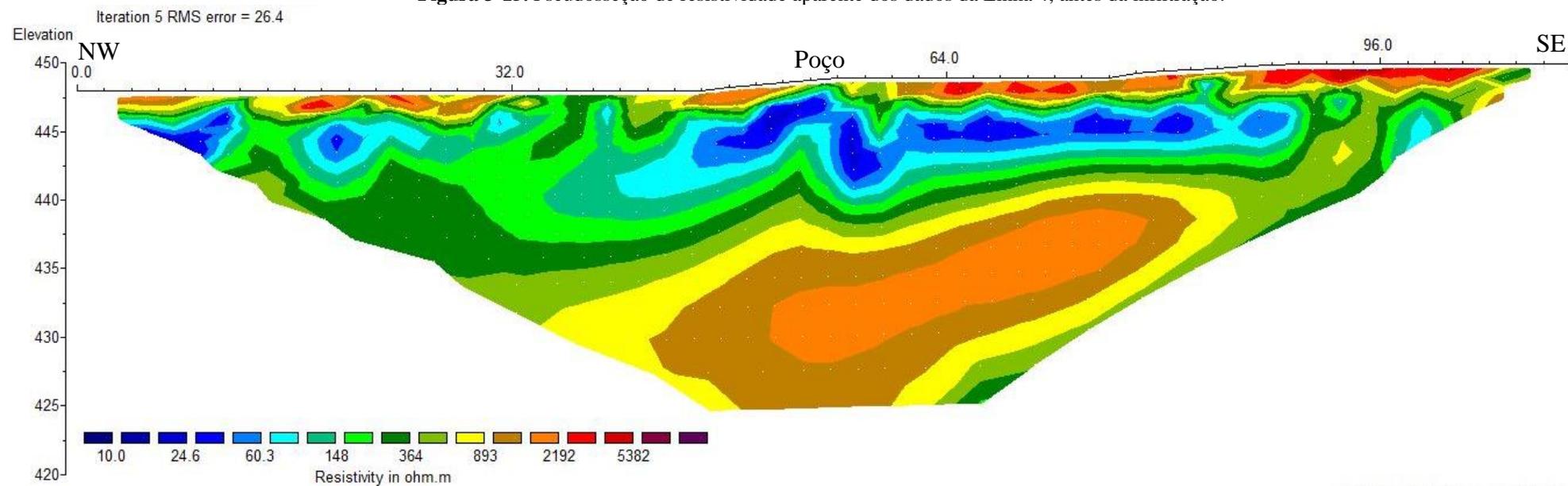
**Figura 3-13.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 3, antes da infiltração.



**Figura 3-14.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 3, ao final do levantamento.



**Figura 3-15.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 4, antes da infiltração.



**Figura 3-16.** Pseudosseção de resistividade aparente dos dados da Linha 4, ao final do levantamento.

Os dados de eletrorresistividade da Linha 1 também foram processados no software Oasis Montaj com o objetivo de evidenciar o efeito da infiltração ao longo do tempo. As 28 linhas de aquisição são apresentadas na Tabela 3-3, onde os dados foram organizados e importados no programa em forma de planilhas, foi destacado o tempo em minutos após cada leitura. A Figura 3-17 apresenta as nove colunas de dados que serão utilizadas pelo software.

**Tabela 3-3.** Dados da Linha 1 com o tempo.

Linha	Hora_Inicial	Dia	Tempo desde a Primeira leitura (min)	Analise	Número da linha do Oasis Montaj
L1.1	16:51	1	0	L1_0	1
<b>Caminhão Pipa</b>					
L1.2.1	09:54	2	1023	L1_1023	2
L1.2.2	10:36	2	1065	L1_1065	3
L1.2.3	11:22	2	1111	L1_1111	4
L1.2.4	12:07	2	1156	L1_1156	5
L1.2.5	14:02	2	1271	L1_1271	6
<b>Caminhão Pipa</b>					
L1.2.6	14:48	2	1317	L1_1317	7
L1.2.7	15:30	2	1359	L1_1359	8
L1.2.8	16:10	2	1399	L1_1399	9
L1.2.9	16:55	2	1444	L1_1444	10
<b>Caminhão Pipa</b>					
L1.2.10	17:37	2	1486	L1_1486	11
L1.2.11	18:16	2	1525	L1_1525	12
L1.2.12	18:55	2	1564	L1_1564	13
L1.2.13	19:37	2	1606	L1_1606	14
L1.2.14	20:19	2	1648	L1_1648	15
<b>Caminhão Pipa</b>					
L1.3.1	07:06	3	2295	L1_2295	16
<b>Caminhão Pipa</b>					
Conserto do vazamento					
L1.3.2	12:44	3	2633	L1_2633	17
L1.3.3	13:27	3	2676	L1_2676	18
<b>Caminhão Pipa</b>					
L1.3.4	14:13	3	2722	L1_2722	19
L1.3.5	15:00	3	2769	L1_2769	20
L1.3.6	15:43	3	2812	L1_2812	21
L1.3.7	16:26	3	2855	L1_2855	22
L1.3.8	17:08	3	2897	L1_2897	23
L1.3.9	17:51	3	2940	L1_2940	24
L1.3.10	18:40	3	2989	L1_2989	25
L1.3.11	20:04	3	3073	L1_3073	26
L1.3.12	20:58	3	3127	L1_3127	27
L1.3.13	21:58	3	3187	L1_3187	28

L1:0	Linha	Posicao	Coord E	Coord N	Cota	Resist	Topo	Prof	Nivel
0.0	1	73.00	315544.500	9000364.000	448.60	1230.50	449.00	0.40	1
1.0	1	77.00	315548.000	9000364.500	448.62	1292.30	449.00	0.38	1
2.0	1	79.00	315550.000	9000365.000	448.63	1171.60	449.00	0.37	1
3.0	1	105.00	315577.000	9000371.500	448.70	2651.00	449.00	0.30	1
4.0	1	75.00	315546.000	9000364.000	448.61	1961.70	449.00	0.39	1
5.0	1	83.00	315555.000	9000366.000	448.64	1636.30	449.00	0.36	1
6.0	1	71.00	315543.000	9000363.500	448.59	1328.10	449.00	0.41	1
7.0	1	69.00	315541.000	9000362.500	448.59	2285.00	449.00	0.41	1
8.0	1	67.00	315539.000	9000361.500	448.58	2612.00	449.00	0.42	1
9.0	1	65.00	315536.500	9000361.000	448.57	1975.40	449.00	0.43	1
10.0	1	63.00	315534.000	9000361.000	448.56	2177.80	449.00	0.44	1
11.0	1	3.00	315478.000	9000344.000	447.63	684.03	448.00	0.37	1

Figura 3-17. Representação da planilha de dados importada para o Oasis Montaj.

Inicialmente, pode ser verificado pelo histograma de resistividade que os dados apresentavam grande variação (Figura 3-18), com valor máximo de 30.604,8 ohm.m e valor mínimo de 9,5 ohm.m. Para isso foi aplicado um filtro passa baixa com o valor limite de 8000 ohm.m (Figura 3-19), esse tipo de filtro elimina todos os valores que estão acima do determinado e resultou na filtragem de 75 pontos.

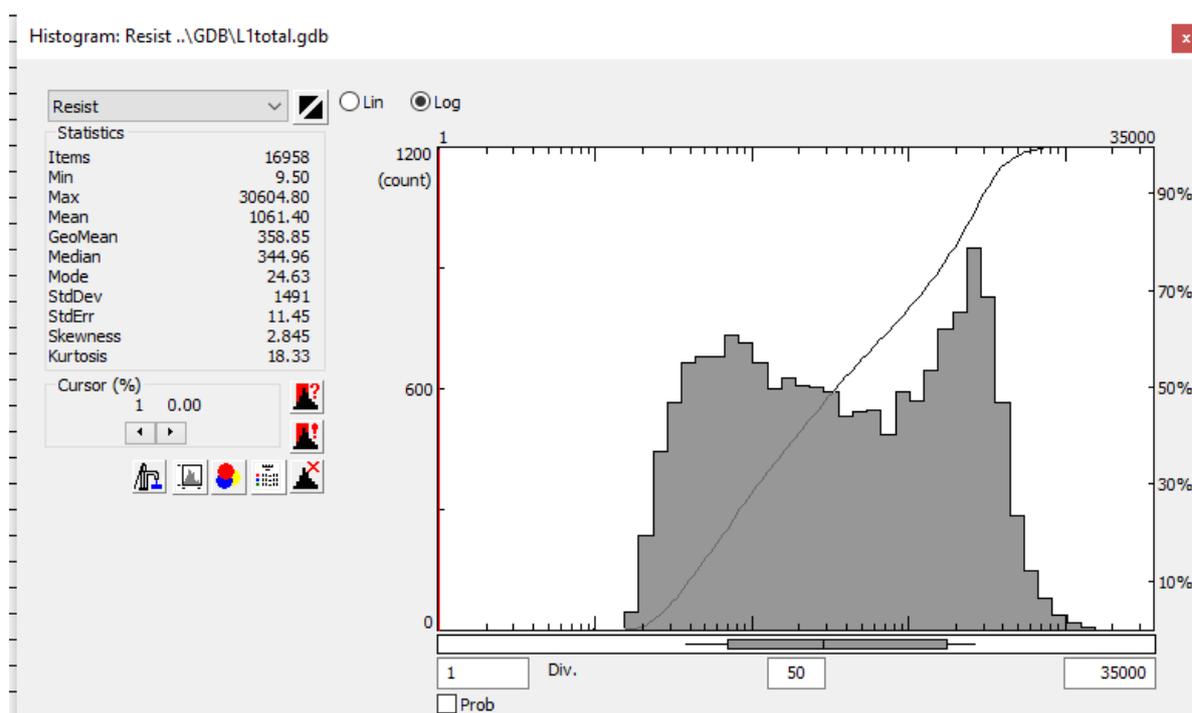
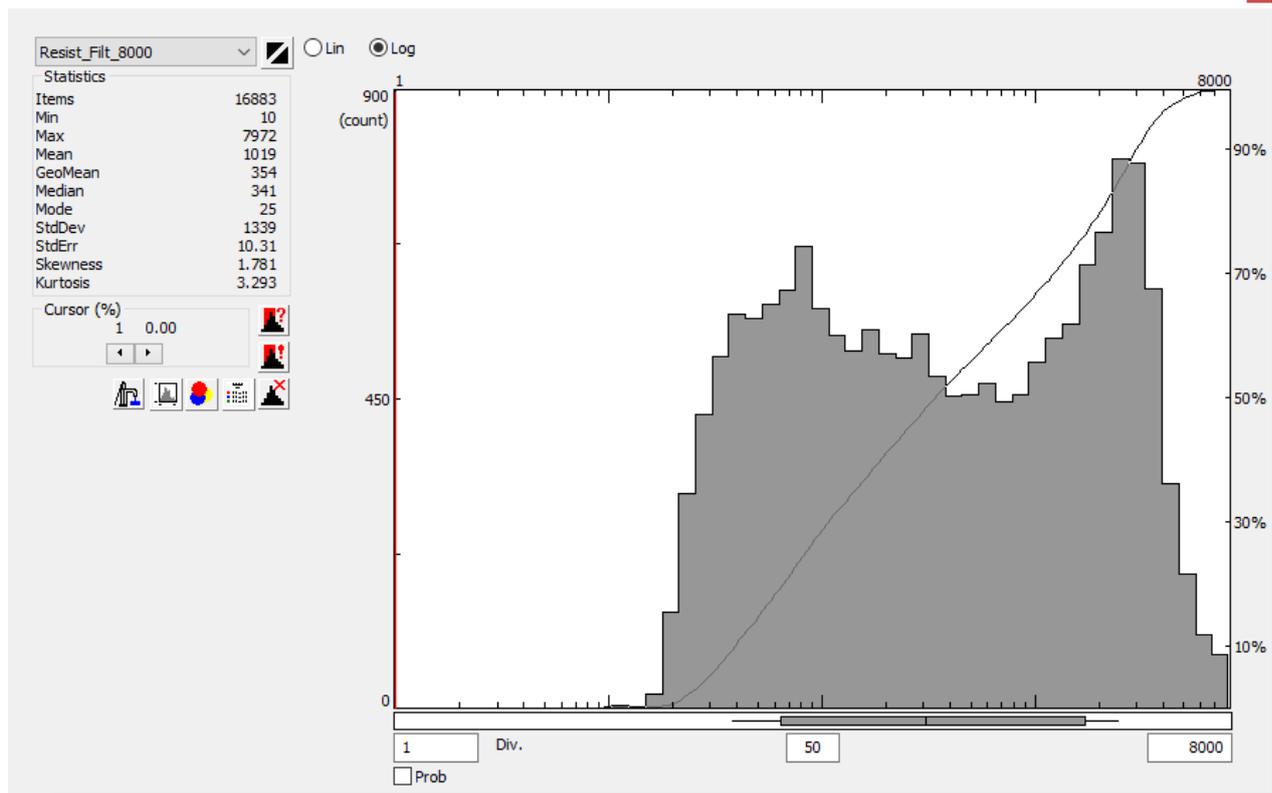
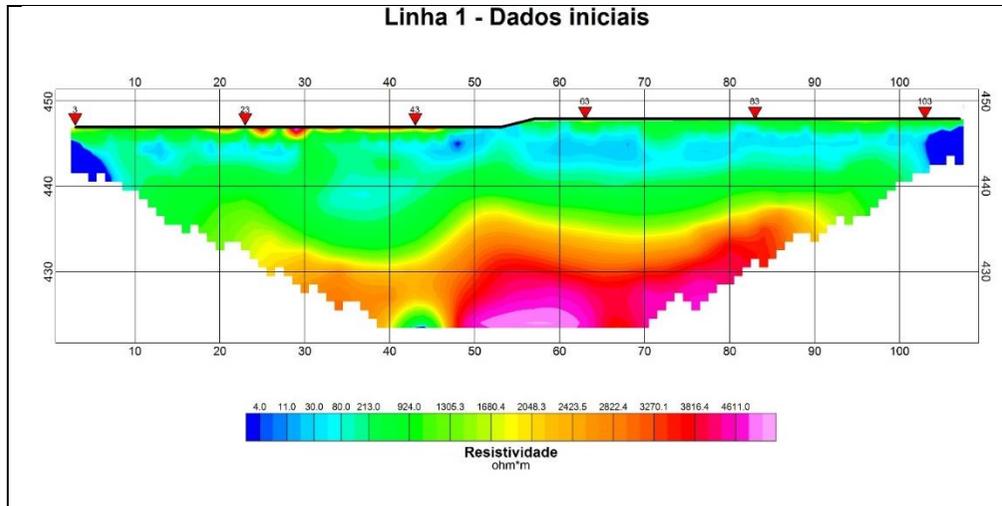


Figura 3-18. Histograma com todos os dados.

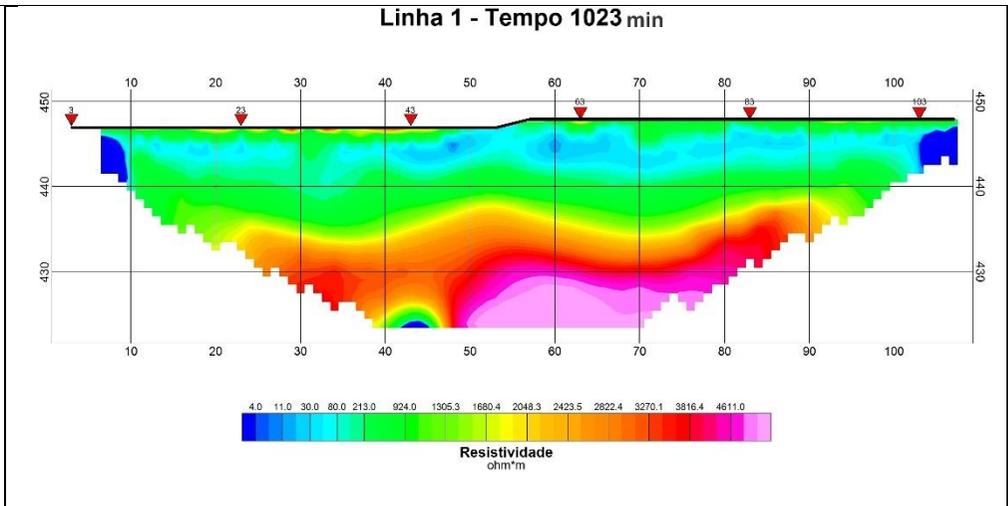


**Figura 3-19.** Histograma após a filtragem passa baixa.

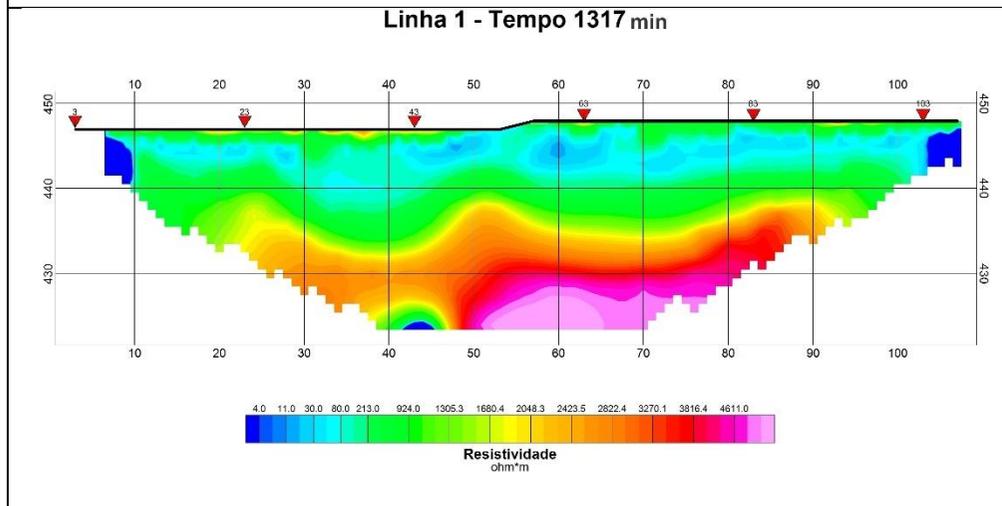
No Oasis Montaj foram gerados grids da seção de eletroresistividade inicial e após a injeção de cada caminhão pipa, no decorrer dos seguintes tempos em minutos: 1023, 1317, 1648, 2295, 2633, 2676, 2722, 2989, 3187. Os resultados são evidenciados da Figura 3-21 a Figura 3-29.



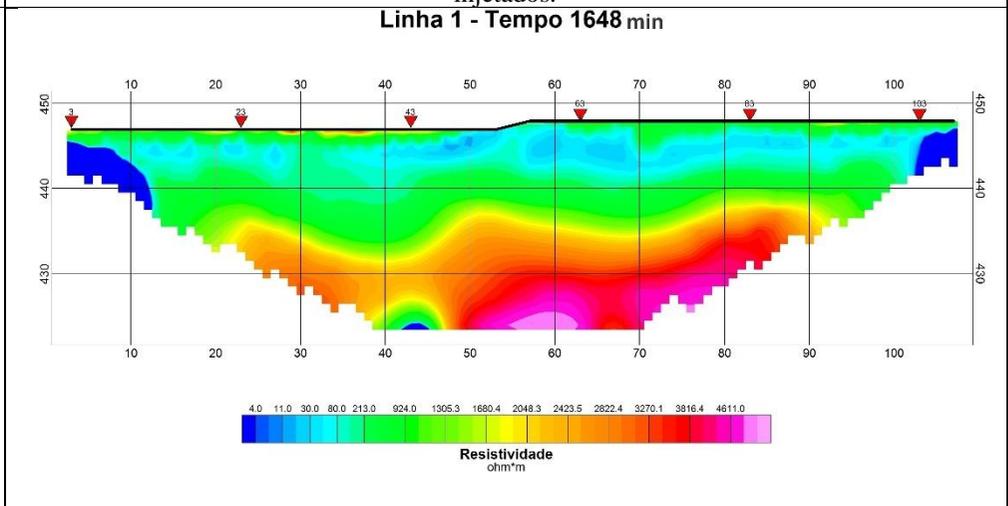
**Figura 3-20.** Grid da Linha 1 inicial.



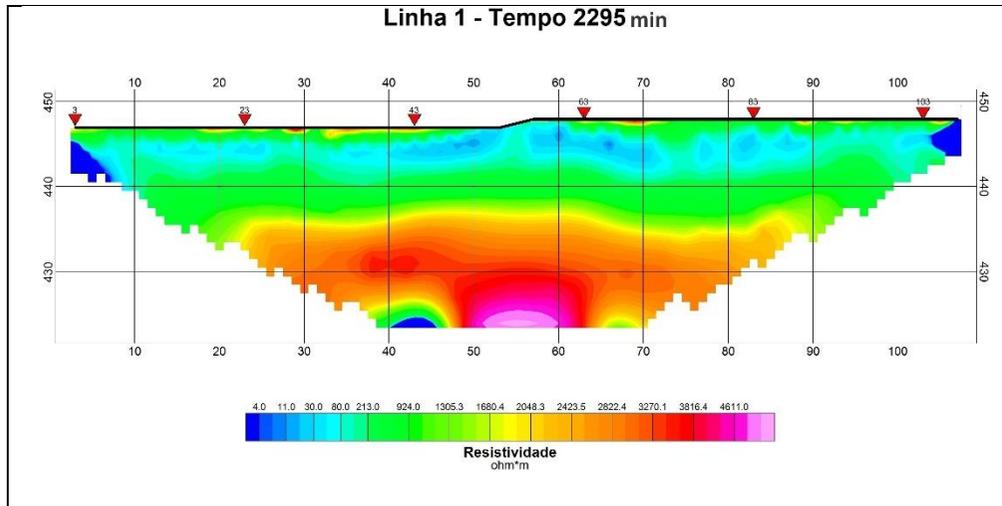
**Figura 3-21.** Grid da Linha 1 após 1023 minutos (~17 horas) e 7.000 litros de água injetados.



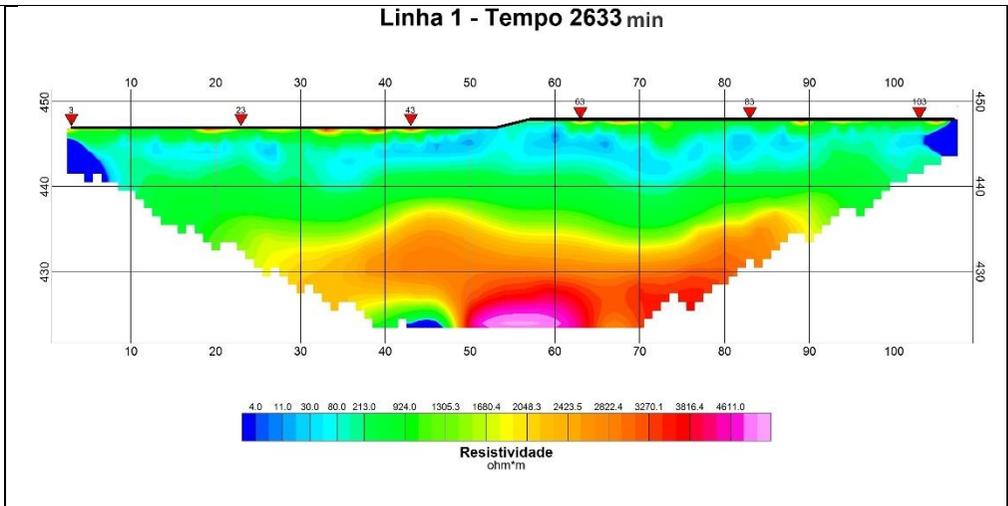
**Figura 3-22.** Grid da Linha 1 após 1317 minutos (~22 horas) e 14.000 litros de água injetados.



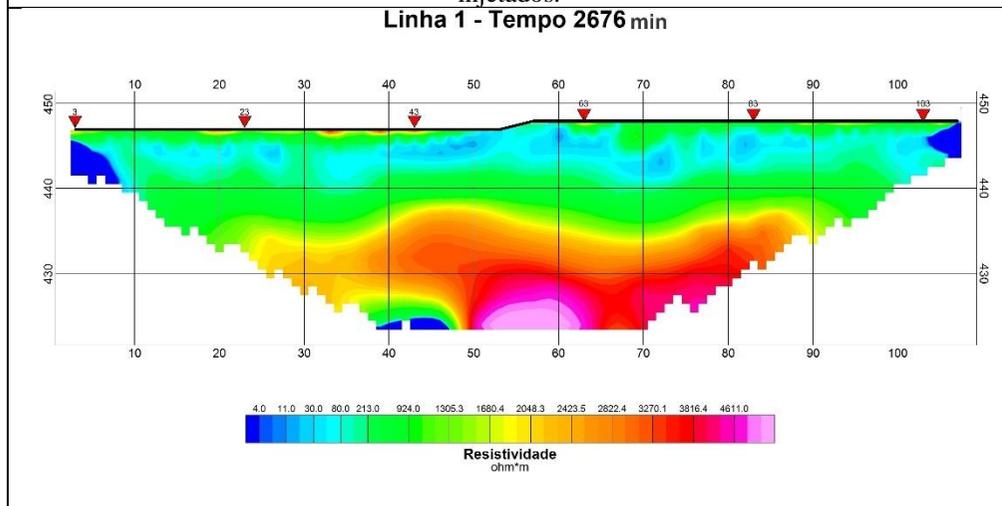
**Figura 3-23.** Grid da Linha 1 após 1648 minutos (~27 horas) e 21.000 litros de água injetados.



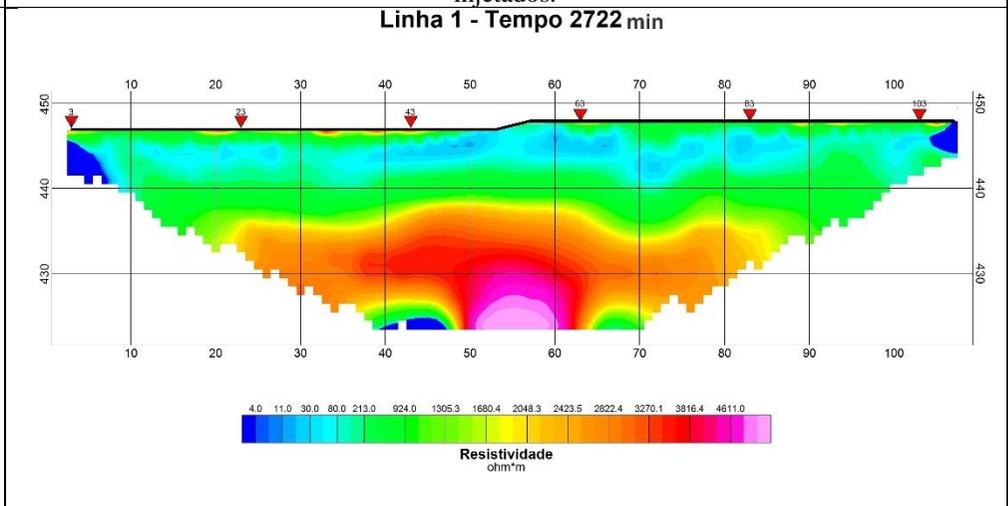
**Figura 3-24.** Grid da Linha 1 após 2295 minutos (~38 horas) e 28.000 litros de água injetados.



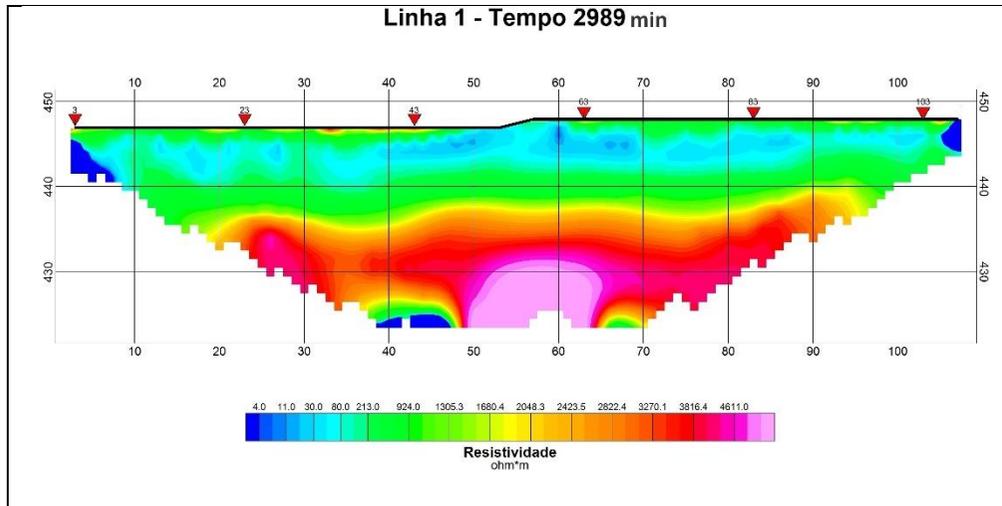
**Figura 3-25.** Grid da Linha 1 após 2633 minutos (~43 horas) e 35.000 litros de água injetados.



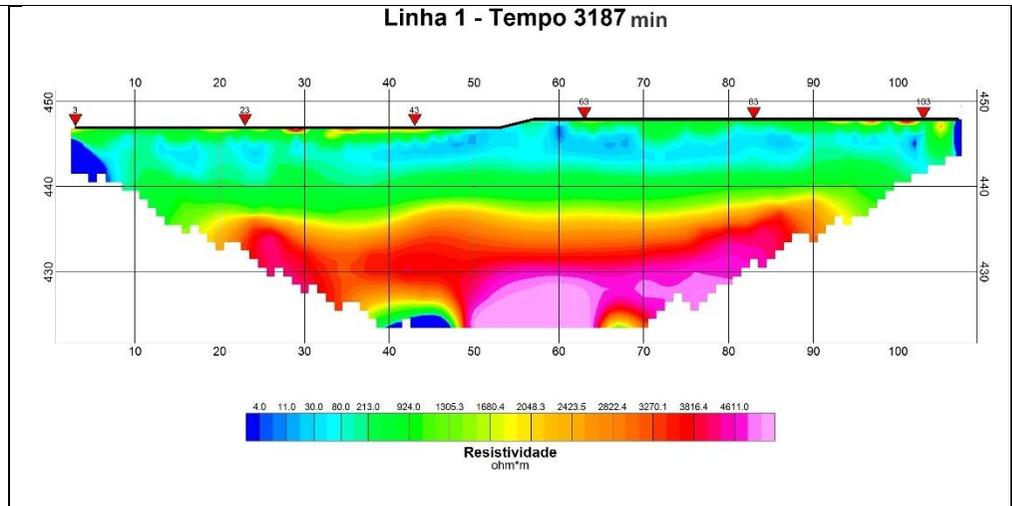
**Figura 3-26.** Grid da Linha 1 após 2676 minutos (~44 horas) e 35.000 litros de água injetados.



**Figura 3-27.** Grid da Linha 1 após 2722 minutos (~45 horas) e 42.000 litros de água injetados.



**Figura 3-28.** Grid da Linha 1 após 2989 minutos (~50 horas) e 42.000 litros de água injetados.



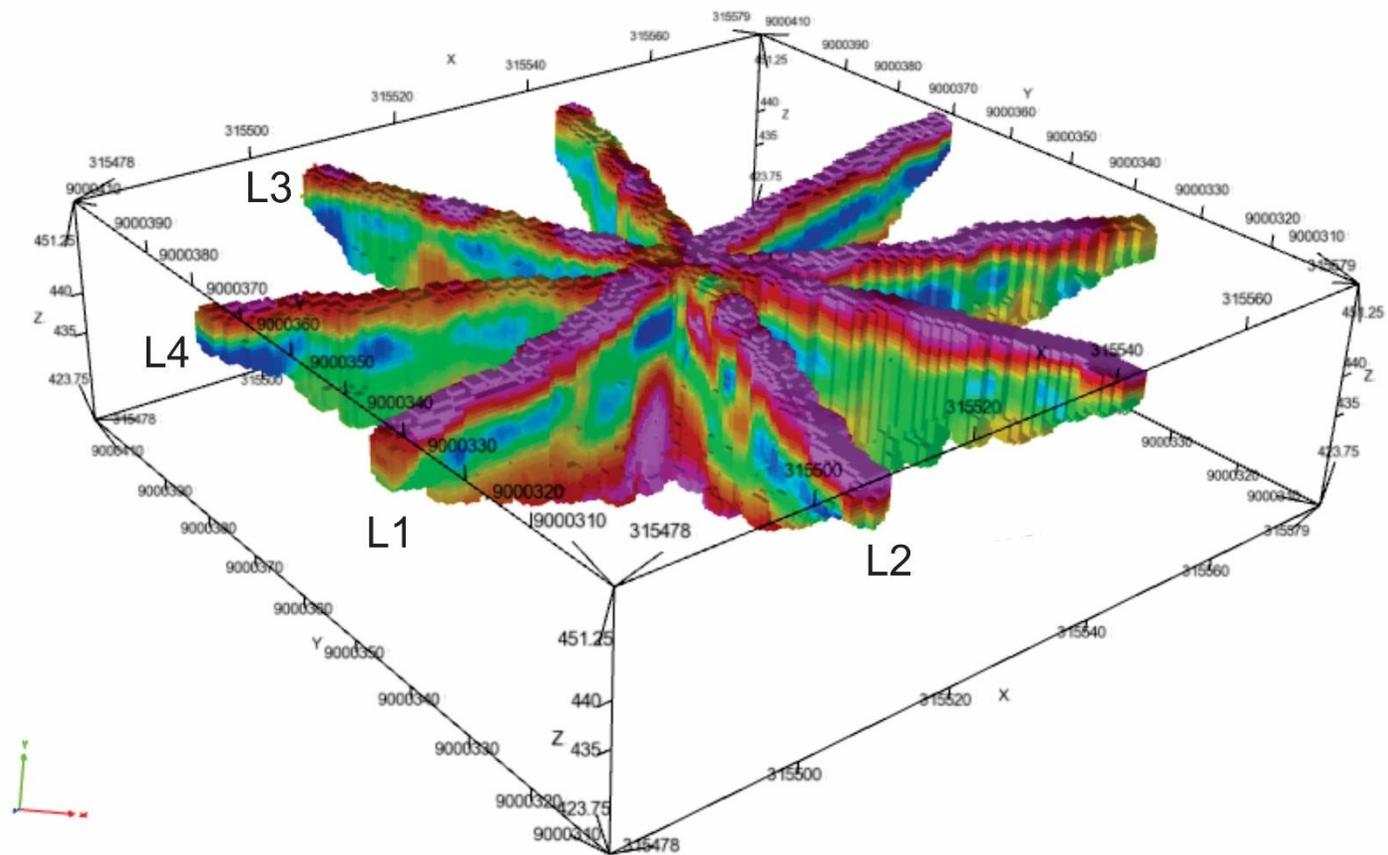
**Figura 3-29.** Grid da Linha 1 após 3187 minutos (~53 horas) e 42.000 litros de água injetados.

Para a compilação e apresentação de um modelo pseudo-3D foram utilizados os dados em formato XYZ gerados pelo Res2dinv juntamente com o arquivo de localização e topografia. Os dois arquivos de saída foram preparados para o software Oasis Montaj, um antes e um depois da etapa de injeção de água, contendo as informações apresentadas na Tabela 3-4.

**Tabela 3-5.** Modelo de dados de entrada para o Oasis Montaj.

Linha	Posição	Coord E	Coord N	Cota	Resistividade	Topografia	Profundidade	Nível
-------	---------	---------	---------	------	---------------	------------	--------------	-------

Foi usado o método de interpolação da *krigagem*, com o tamanho da célula de 0,5 metros. O modelo pseudo-3D foi gerado a partir do grid elaborado para cada nível, o *voxel* permite a visualização da continuação dos horizontes de acordo com os valores de eletrorresistividade. Neste caso são bem definidas as mesmas camadas geológicas interpretadas nos perfis 2D. A Figura 3-30 e Figura 3-31 apresentam uma das visões do modelo gerado. Esta ferramenta permite a elaboração de um arquivo em formato pdf rotacional (Apêndice I), para uma melhor visualização do modelo.



**Figura 3-30.** Modelo pseudo-3D gerado antes da injeção de água.

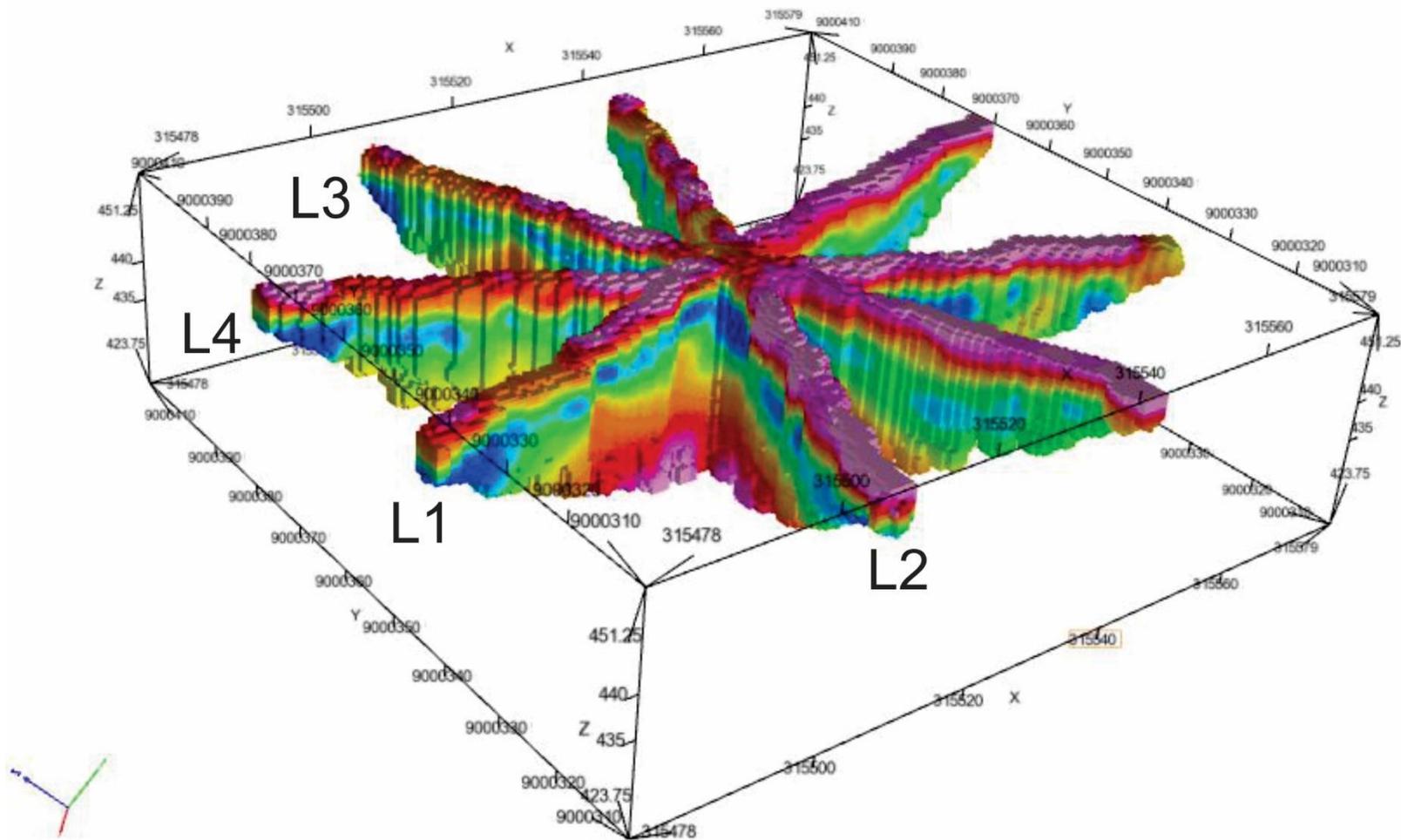


Figura 3-31. Modelo pseudo-3D gerado após a injeção da infiltração de água.

### 3.1.3. Discussões

A interpretação dos dados objetivou caracterizar os materiais geológicos de subsuperfície através dos valores de resistividade obtidos e espessura das camadas observadas.

A avaliação detalhada da Linha 1, tanto no software Res2dinv como no Oasis Montaj, mostram que a resposta geolétrica do meio responde à injeção da água. Na Figura 3-6, onde são apresentadas todas as seções realizadas ao longo dessa linha conforme a injeção de água era efetuada, é possível notar que a camada mais superficial, até 2,2 metros de profundidade, apresenta altos valores de resistividade que se mantém constantes quase em todas as seções. Porém, em algumas imagens é possível notar que essa camada superficial sofreu alteração de resistividade entre as posições 68-72. A camada de mais baixa resistividade (representada pela cor azul), com espessura aproximada de 5 metros, apresenta variações na sua homogeneidade ao longo dos levantamentos. A zona mais profunda, abaixo de 10 metros, com altos valores de resistividade ( $<2192$  ohm.m) apresentou alterações em alguns momentos das investigações. Nas imagens apresentadas nas Figura 3-7 a Figura 3-10 é possível observar que após a infiltração de 7 mil litros de água, principalmente nos extremos da seção, um espessamento da zona de menor resistividade. Após a injeção de 42 mil litros é possível observar a 72 metros que a água injetada penetra mais de 5 metros no saprolito. Após o final do experimento o sistema volta a um padrão com variação mais horizontal similar ao observado antes do início do estudo. Este fato mostra que a área apresenta uma tendência de rápido espalhamento nas interfaces solo-saprolito e saprolito-rocha sã.

As seções elaboradas no Oasis Montaj apresentadas na Figura 3-20 até Figura 3-29 corroboram com os dados dos Res2dinv e evidenciam as mesmas camadas observadas, porém com algumas diferenças nas respostas. A camada mais superficial, pouco espessa e com altos valores de resistividade é menos evidenciada e aparece de forma discreta nas imagens. A alteração mais significativa ocorre entre as posições 30-40 na camada mais resistiva (representa pelas cores azul e verde) onde, inicialmente, apresenta um “rebaixamento” em relação ao restante do horizonte e se apresenta mais uniforme ao final do processo. Essa posição é próxima ao local em que havia um vazamento nos levantamentos iniciais que pode ter gerado interferência nessa zona. A camada mais profunda ( $>2000$  ohm.m), segue apresentando altos valores de resistividade, porém nos dados do Oasis Montaj, ficou mais explícita a interferência da infiltração também neste material, que indica provável porosidade secundária.

A Linha 2 apresentou uma variação significativa do padrão geolétrico antes e depois da injeção de água. Este fato é particularmente evidente entre a posição 70-78 onde houve um aprofundamento da zona de alta de resistividade na camada superficial, aproximadamente 2,5 metros de profundidade. Entre os eletrodos 64-100 foi perceptível uma mudança marcante entre as cotas de 445 e 430 metros em que zonas com resistividade na faixa 800 ohm.m passam para

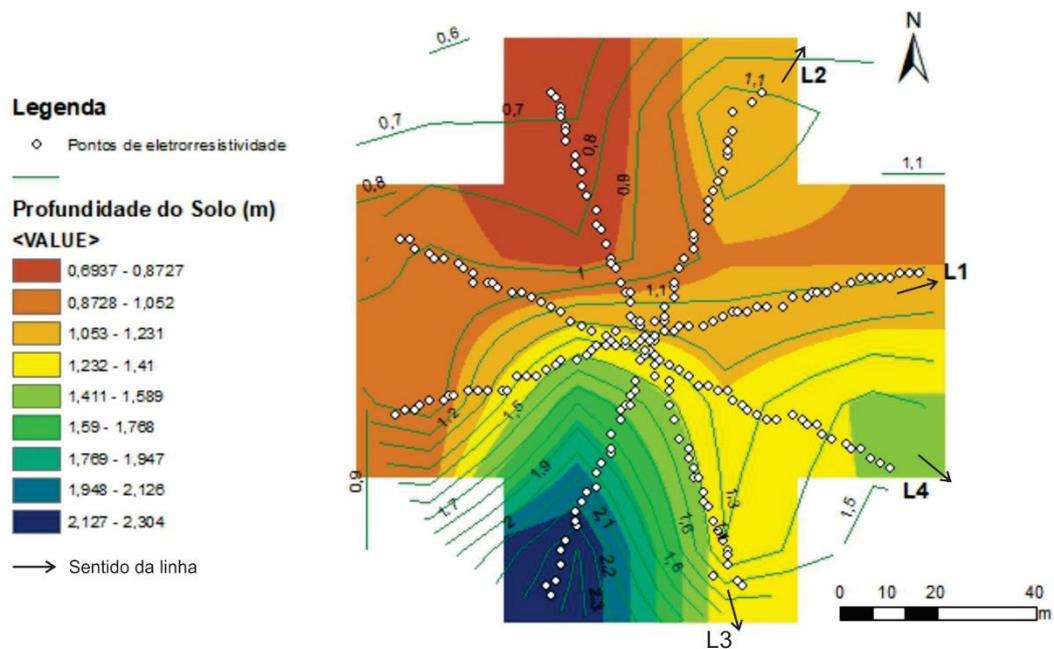
ordem de grandeza de 350 ohm.m. O início da Linha 2 (0 – 56) apresenta solo com até 3 metros de profundidade e sofre pouca alteração após o processo de injeção da água.

A Linha 3 foi a que demonstrou menor modificação entre o padrão antes e depois da injeção de água ao longo dos 20 metros de profundidade investigados. Aparentemente houve apenas uma perturbação abaixo da trincheira de infiltração na zona central da seção de levantamento.

A Linha 4 mostrou mudança significativa da resposta geométrica em camadas mais profundas, em que os valores acima de 2200 ohm.m (representados pela cor vermelha) sofrem alteração após a injeção de água, mantendo-se uniforme com a camada laranja de menor resistividade que estava ao seu redor inicialmente. A zona resistiva da porção central apresenta uma menor espessura em relação ao levantamento realizado antes do procedimento de injeção de água. A partir da posição 86 tem-se uma alteração abaixo da cota 440, apresentado uma diminuição da resistividade (na cor verde).

O modelo pseudo-3D gerado possibilita a visualização em diversos ângulos do levantamento. Através das imagens geradas notam-se os mesmos horizontes geométricos que foram interpretados nas seções de eletroresistividade 2 D. A camada superficial apresenta altos valores de resistividade e variação na espessura. Logo abaixo são perceptíveis a zona de menor resistividade e o horizonte geométrico mais profundo, com altos valores de resistividade (<2000 ohm.m). Entre as camadas descritas ocorrem zonas de transição com valores intermediários (representados pela cor verde). Comparando os dois modelos, antes e depois do processo de injeção de água, é possível notar diferenças principalmente no centro do levantamento e na zona de baixa resistividade. Em outros ângulos observam-se locais não sofreram grandes alterações após a infiltração ou houve rápida absorção e espalhamento da água.

Os dados de eletroresistividade possibilitaram a elaboração de um mapa relativo à espessura do solo presente na área investigada. A Figura 3-32 foi elaborada no software ArcGis 10.1 onde foi utilizada a interpolação IDW, que é a Ponderação do Inverso da Distância, com o tamanho da célula 30 e isolinhas com intervalos de 1. Os valores foram divididos em nove classes variando de 0,6 a 2,3 metros. É possível observar que os solos são mais espessos na parte sudeste e sudoeste.



**Figura 3-32. Variação da espessura do solo.**

A partir das seções geradas foi proposto um modelo de camadas baseado na resposta da eletrorresistividade (conforme Lima 2010). A Figura 3-33 e Figura 3-34 ilustram as cinco camadas interpretadas:

- Solo arenoso seco - possui resistividade elétrica alta, acima de 200 ohm.m. A espessura média foi de 1,8 metros e foi correlacionada como cobertura de solo arenosa com baixa umidade ou praticamente seco, como observado pela distribuição das chuvas à época da aquisição dos dados (ausência de precipitação);
- Solo areno-argiloso úmido - é a camada com menor espessura observada, aproximadamente 1 metro, com valores de resistividade intermediários e foi interpretada como solo areno-argiloso úmido;
- Rocha alterada ou saprolito úmido - este horizonte geoeletrico apresenta espessura aproximada de 5 metros e expressivo decaimento dos valores de resistividade das seções, corresponde a zona úmida;
- Rocha alterada seca ou com menor umidade que a camada anterior - ocorre a partir dos 8 metros de profundidade e os valores de resistividade voltam a se elevar (890 – 2192 ohm.m);
- Rocha sã com variações na quantidade bandas ricas em minerais máficos e quartzo-feldspáticos - relaciona-se a rocha sã, a partir de 10 metros de profundidade e valores de resistividade acima de 2912 ohm.m.

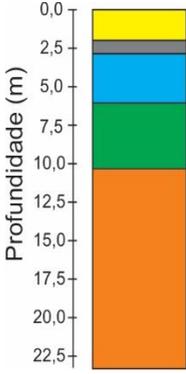
Modelo Geolétrico	Descrição Geológica	Espessura Média (m)	Resistividade (ohm.m)
	Solo Arenoso seco	2,3	2192 - 5380
	Solo Areno-argiloso úmido	1,0	148 - 360
	Saprolito úmido	5,0	10 - 60
	Saprolito seco	3,0	893 - 2192
	Rocha sã	<10	<2192

Figura 3-33. Modelo com base nas respostas geoeletricas.

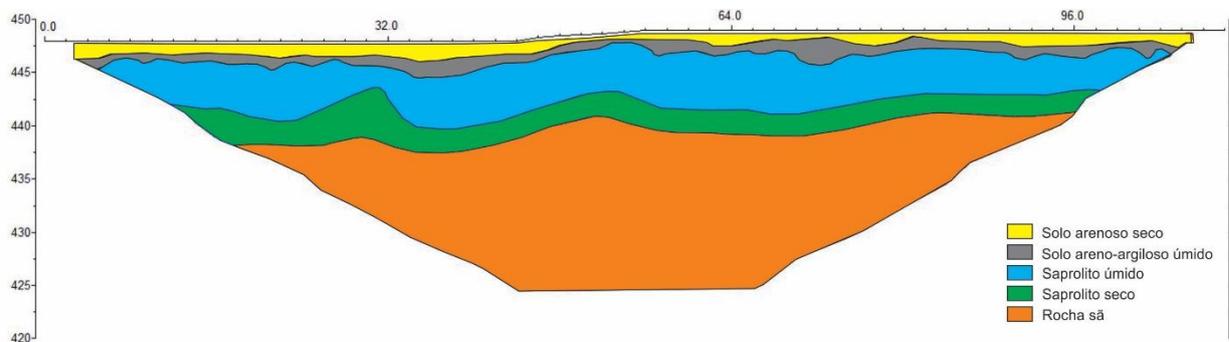


Figura 3-34. Modelo geológico para a área de estudo obtido a partir dos dados invertidos da pseudoseção geoeletrica da Linha 1.

## 3.2. Análise Estrutural

### 3.2.1. Aquisição de dados

Para análise dos dados estruturais da região, inicialmente a área de estudo foi avaliada a partir de imagens orbitais com o objetivo de se escolher áreas mais propícias para os estudos de fraturamento. Com este procedimento foram escolhidas áreas de uma antiga pedreira atualmente desativada e outras porções em que foi caracterizada, pela imagem, a presença de solos rasos e, portanto, com maior chance de se observar em superfície a exposição dos planos de fraturas (Figura 3-35).

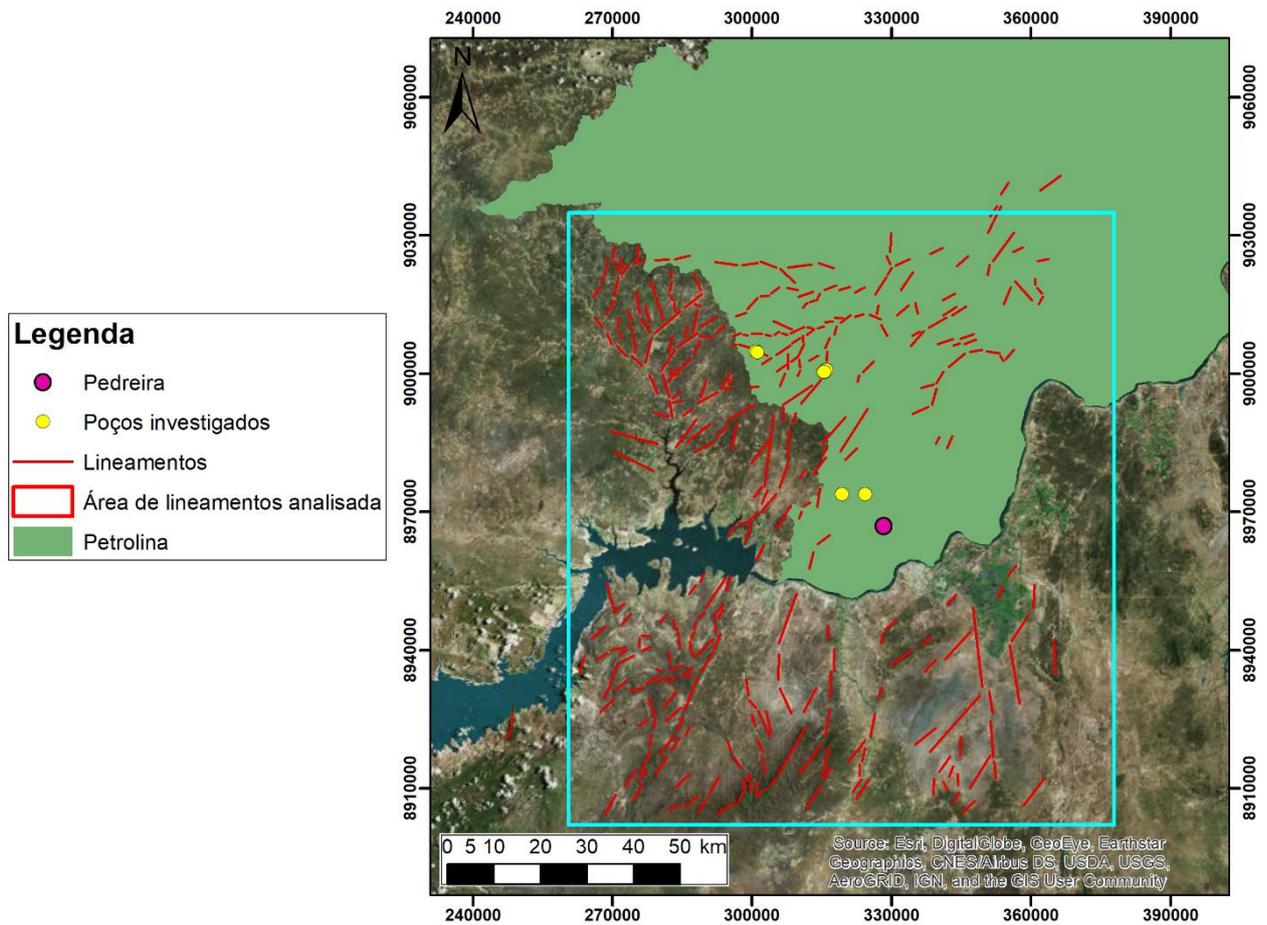


**Figura 3-35.** Fotos que ilustram a observação das características estruturais em pedra desativada situada próximo à cidade de Petrolina.

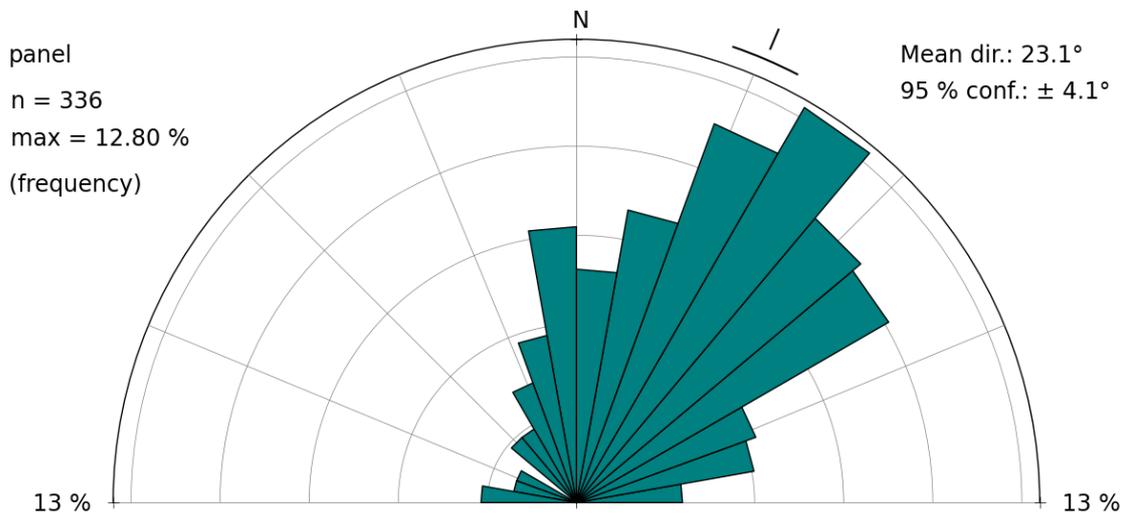
As atitudes das fraturas foram medidas e seu tratamento estatístico foi realizado com o objetivo de se comparar os dados de superfície com aqueles obtidos a partir dos estudos de eletrorresistividade e perfilagem ótica dos poços.

### **3.2.2. Resultados**

Os dados foram tratados no software OpenStereo com o objetivo de representar, em plano, os elementos lineares observados preservando seus ângulos. A Figura 3-36 representa as medidas observadas em escala regional, que foram utilizadas para a elaboração da roseta de fraturas (Figura 3-37).

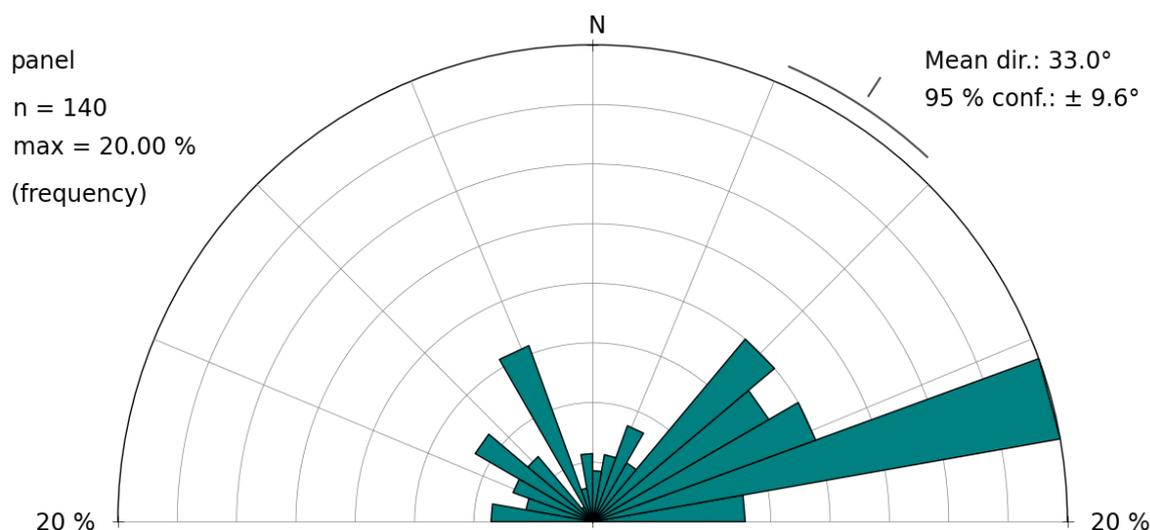


**Figura 3-36.** Lineamentos estruturais.



**Figura 3-37.** Roseta de fraturas com base nos lineamentos estruturais.

A Figura 3-38 mostra a meia roseta de fraturas verticais ou de alto ângulo de mergulho medidas em exposições rochosas em antiga pedreira desativada situada próximo à cidade de Petrolina. Este diagrama indica que as estruturas de direção NW/SE são predominantes, sendo as famílias de direção N20W até N50W amplamente dominantes.



**Figura 3-38.** Roseta de fraturas com dados medidos com campo.

### 3.2.3. Discussões

Os dados estruturais possibilitaram correlacionar as medidas realizadas em campo com os lineamentos regionais delimitados a partir de imagens de satélite. As rosetas de fraturas verticais / subverticais elaboradas são ambas coerentes com a determinação da direção principal N40-60E, como a família predominante, o que representa a principal direção de anisotropias de alto ângulo observada na região.

Além destas existem estruturas subordinadas compondo duas outras famílias de direção NS e N40W. De forma geral, estas famílias de anisotropias representam fraturas pequenas, mas que também têm papel importante nos sistemas de fluxo, principalmente na interconexão com as estruturas principais (maiores e mais contínuas).

Como a região em estudo se situa geologicamente na Faixa Riacho do Pontal (Bizzi *et al.* 2003, Uhlein *et al.* 2011) formada por uma compressão aproximadamente de norte para sul, as estruturas geradas em um modelo previsional deverão ser aproximadamente: fraturas de extensão de direção EW (perpendiculares à compressão máxima); fraturas dilatacionais de direção aproximada NS (paralelas à compressão Máxima) e fraturas de direção NW e NE de cisalhamento (compondo os pares de cisalhamento).

Assim, a principal família presente na área estudada é compatível com uma das direções do par conjugado de cisalhamento que provavelmente foram reativadas em processos neotectônicos.

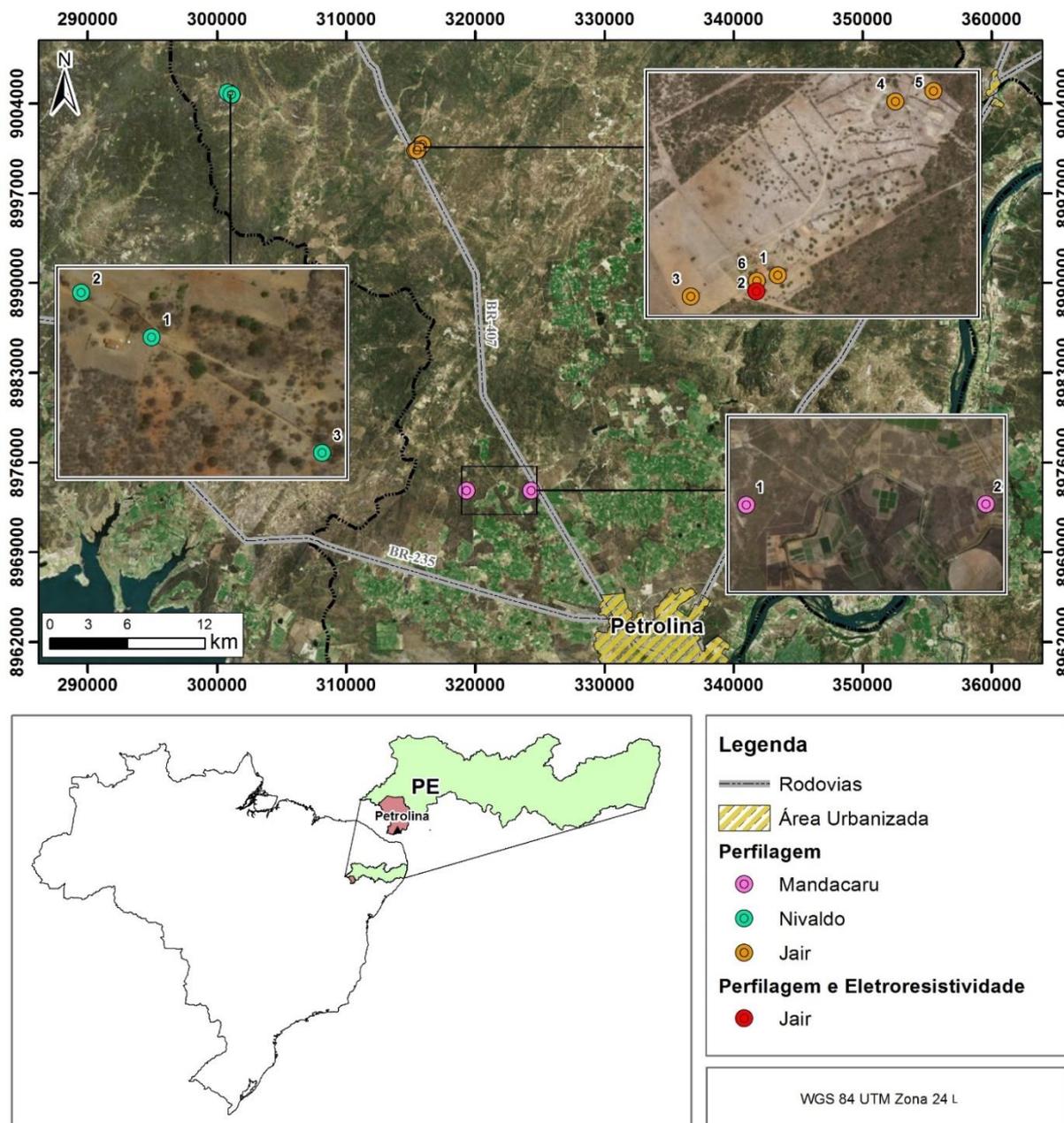
## 3.3. Perfilagem Ótica

### 3.3.1. Aquisição de dados

A metodologia empregada no desenvolvimento dessa pesquisa, envolveu a utilização de um equipamento de perfilagem ótica de alta resolução (*High-Resolution Optical Televiewer*) da marca *Robertson Geologging*, que permitiu avaliar as características construtivas do poço e suas

estruturas geológicas. A maior profundidade que o perfilador ótico disponível alcança é 150 metros.

A aquisição de dados em campo ocorreu entre os dias 2 e 10 de dezembro de 2017, em três diferentes localidades de Petrolina: Sítio do Nivaldo, Sítio do Jair e Assentamento Mandacaru, que podem ser observados na Figura 3-39.



**Figura 3-39.** Localização dos poços em que foram realizadas as perfisagens óticas.

A Figura 3-40 apresenta evidências fotográficas do trabalho de campo com o equipamento. O primeiro procedimento necessário é verificar a estrutura dos poços e se não estavam obstruídos, com a finalidade de garantir a integridade da ferramenta. Onze poços foram investigados com auxílio desta técnica. A Tabela 3-6 apresenta a nomenclatura, coordenadas, profundidade e algumas observações sobre os poços.

Para aquisição dos dados são utilizados dois softwares, o RG Winlogger e o OPTV Logger. Esses softwares permitem visualização de importantes informações da sonda, como profundidade, velocidade de registro, transmissão de dados e andamento da gravação.



**Figura 3-40.** Fotos que mostram a aquisição de dados com o perfilador ótico em campo.

Nome do Poço	Coordenadas (UTM, zona 24S)		Profundidade (m)	Observações do poço
Poço Jair 1	315577	9000397	71,08	Próximo a Caixa d'água
Poço Jair 2	315527	9000359	84,5	Poço da Caixa de infiltração
Poço Jair 3	315375	9000347	77,75	Próximo ao mandacaru
Poço Jair 4	315850	9000803	56,97	Próximo à represa
Poço Jair 5	315938	9000827	60,11	Próximo à represa
Poço Jair 6	315528	9000384	92,16	Próximo ao umbuzeiro
Poço Mandacaru 1	319344	8973817	47,11	Poço do Sr. João
Poço Mandacaru 2	324349	8973840	59,55	Poço do Sr. Paulo
Poço Nivaldo 1	300951	9004841	66,18	-
Poço Nivaldo 2	300867	9004895	66,1	-
Poço Nivaldo 3	301155	9004702	60,86	-

**Tabela 3-6.** Informações sobre os poços investigados.

### 3.3.2. Resultados

Foram selecionados trechos representativos das filmagens realizadas para análise dos dados, apresentados nas figuras abaixo. As imagens foram extraídas do software OPTV Logger com destaque para as informações de profundidade, exibidos no canto superior esquerdo.

A Figura 3-41 e Figura 3-42 representam alguns momentos das aquisições de dados no sítio do Sr. Jair. Os resultados dos seis poços filmados na propriedade são apresentados da Figura 3-47 a Figura 3-52, onde os poços variaram de 56 a 92 metros de profundidade.



**Figura 3-41.** Poço Jair 2, do lado esquerdo pode ser observado a trincheira usada para o sistema de recarga artificial.



**Figura 3-42.** Aquisição de dados no Poço Jair 3, o único seco na propriedade.

As aquisições de dados no assentamento Mandacaru são mostradas nas Figura 3-43 e Figura 3-44. Os resultados de perfilagem ótica coletados nas duas propriedades são apresentados na Figura 3-53 e Figura 3-54, uma observação importante na interpretação dos dados é que o Poço Mandacaru 1 foi perfurado no mesmo dia da filmagem do poço.



**Figura 3-43.** Aquisição de dados no Poço Mandacaru 1, é possível observar muita poeira no local devido a perfuração do poço ter ocorrido no mesmo dia da realização da perfilagem.



**Figura 3-44.** Aquisição de dados no Poço Mandacaru 2 acompanhada pelo proprietário.

A Figura 3-45 e Figura 3-46 apresentam fotos de uma barragem e a aquisição de dados de perfilagem ótica na propriedade do Sr. Nivaldo. Os três poços do sítio são apresentados da Figura 3-55 a Figura 3-57. Todos os poços da propriedade são secos e atingiram profundidade variando de 60 a 66 metros.



**Figura 3-45.** Barragem localizada na propriedade do Sr. Nivaldo.



**Figura 3-46.** Aquisição de dados no Poço Nivaldo 1.

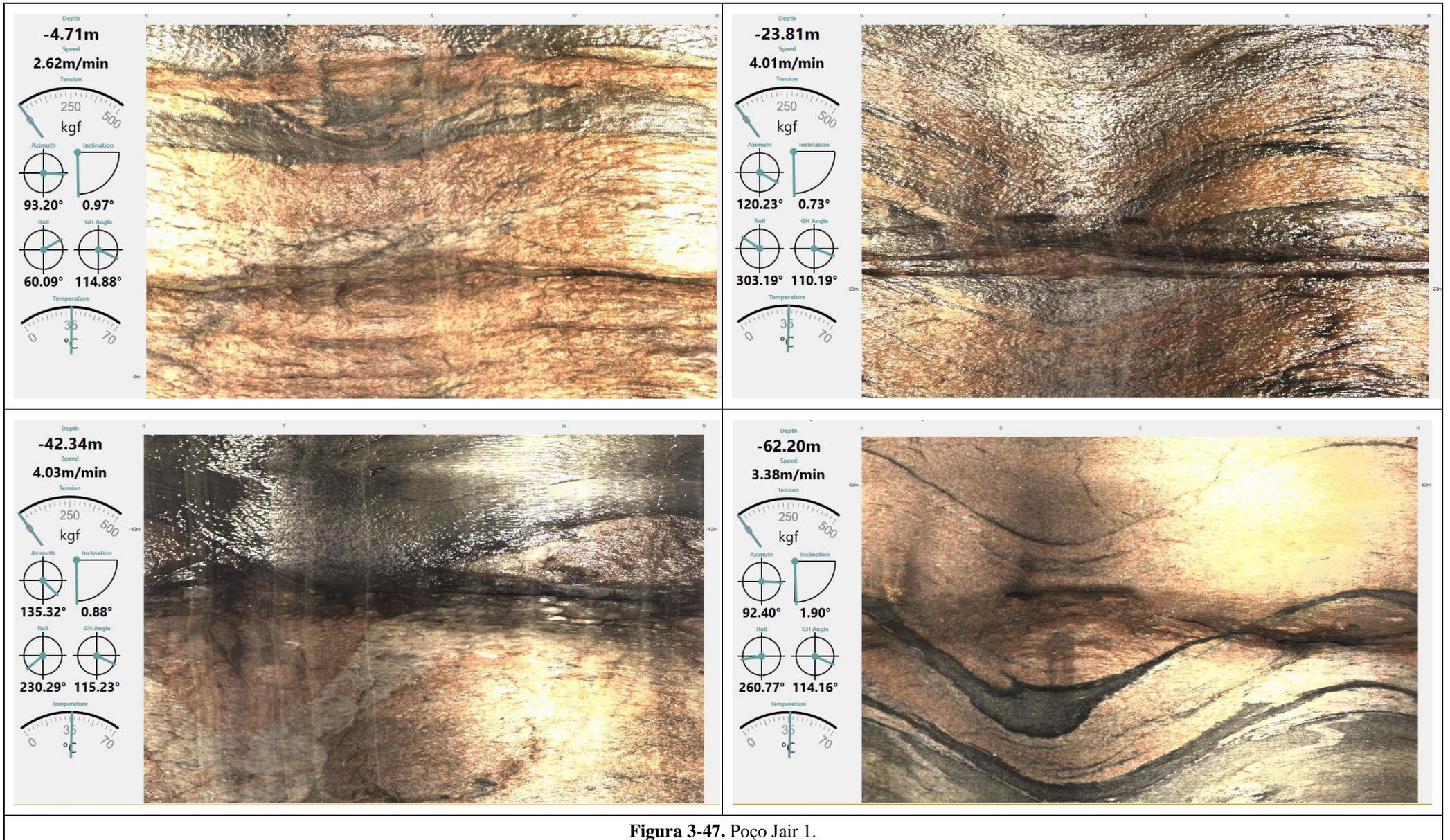


Figura 3-47. Poço Jair 1.

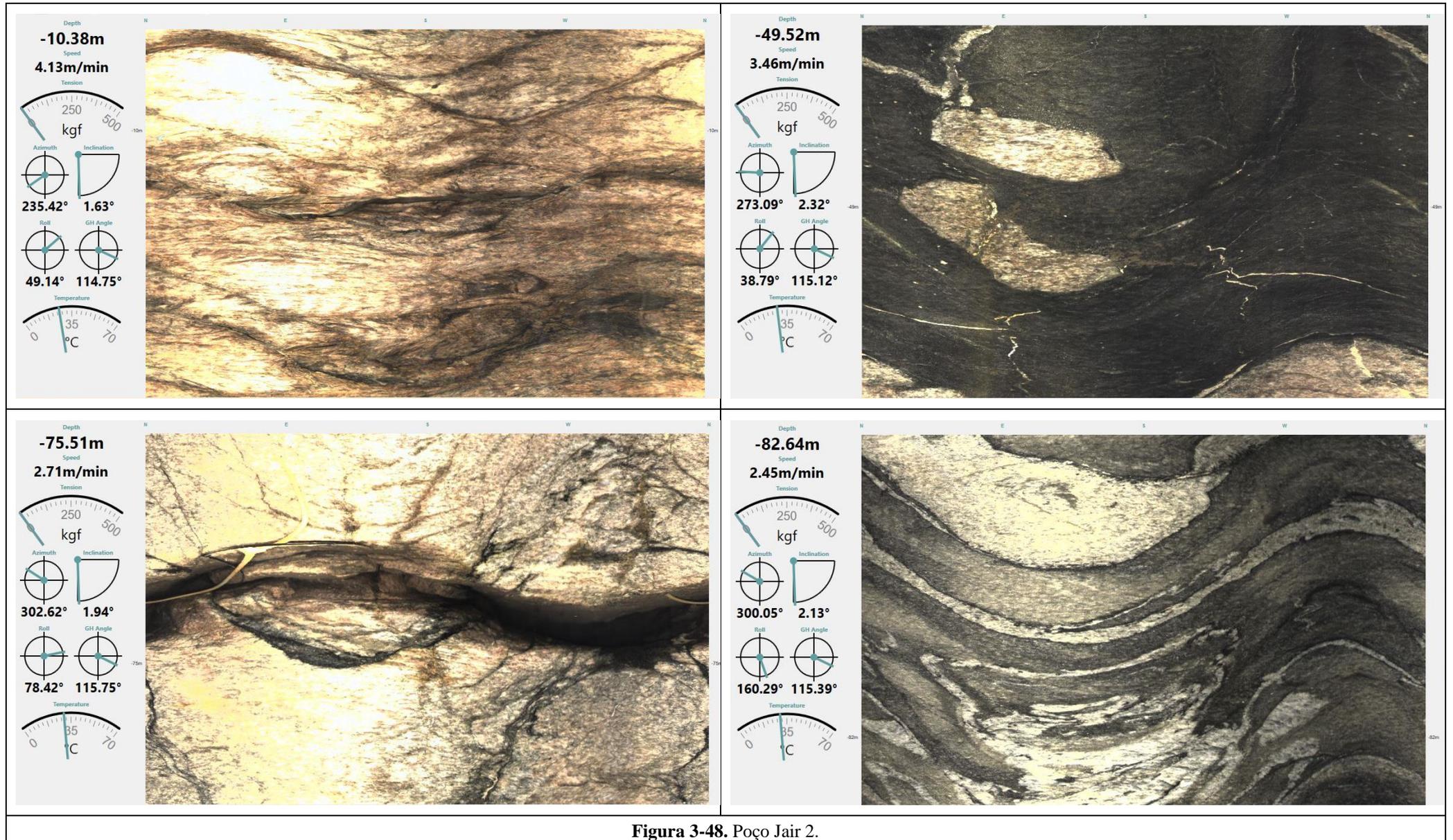


Figura 3-48. Poço Jair 2.

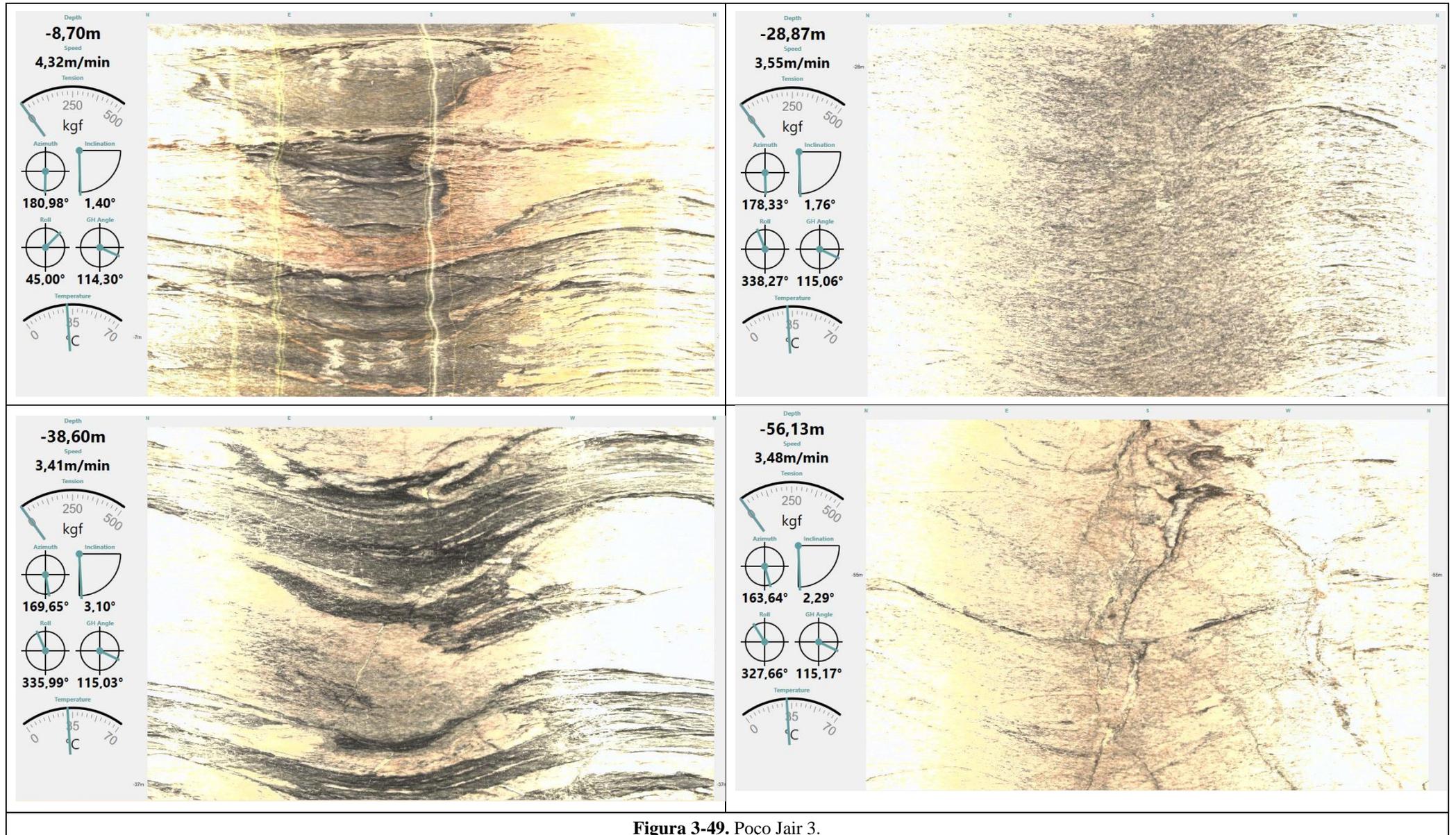


Figura 3-49. Poço Jair 3.

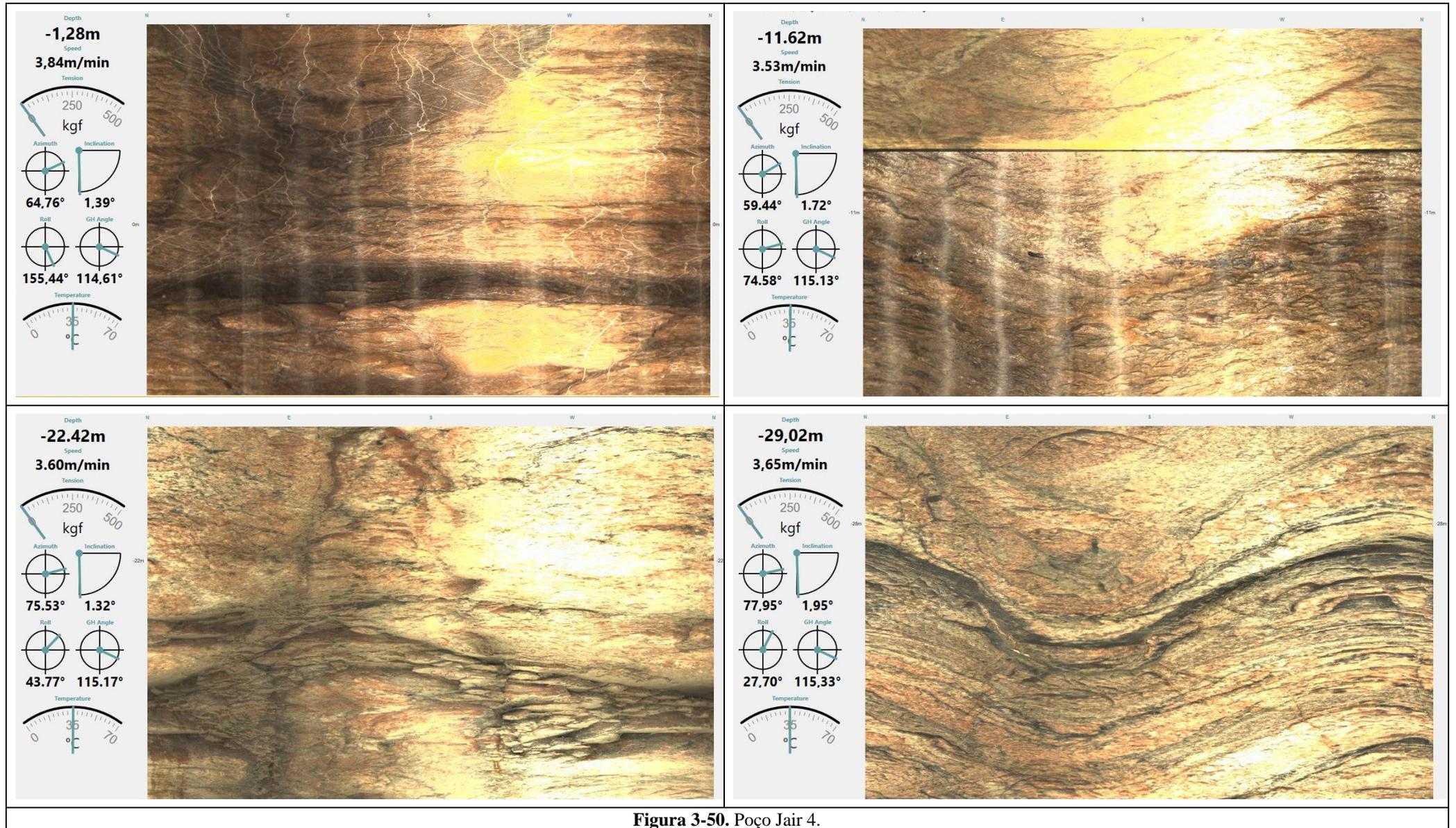


Figura 3-50. Poço Jair 4.

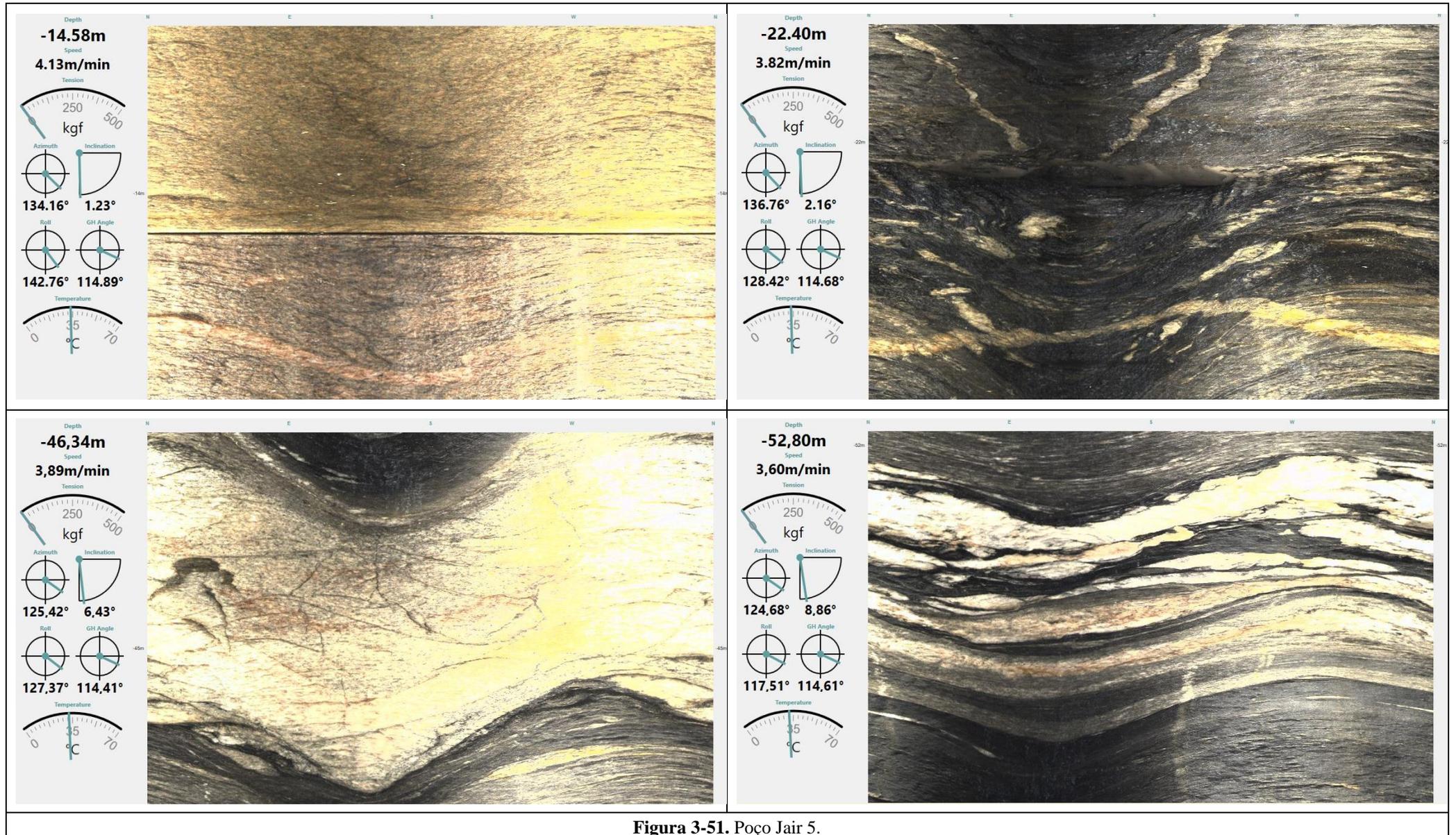


Figura 3-51. Poço Jair 5.

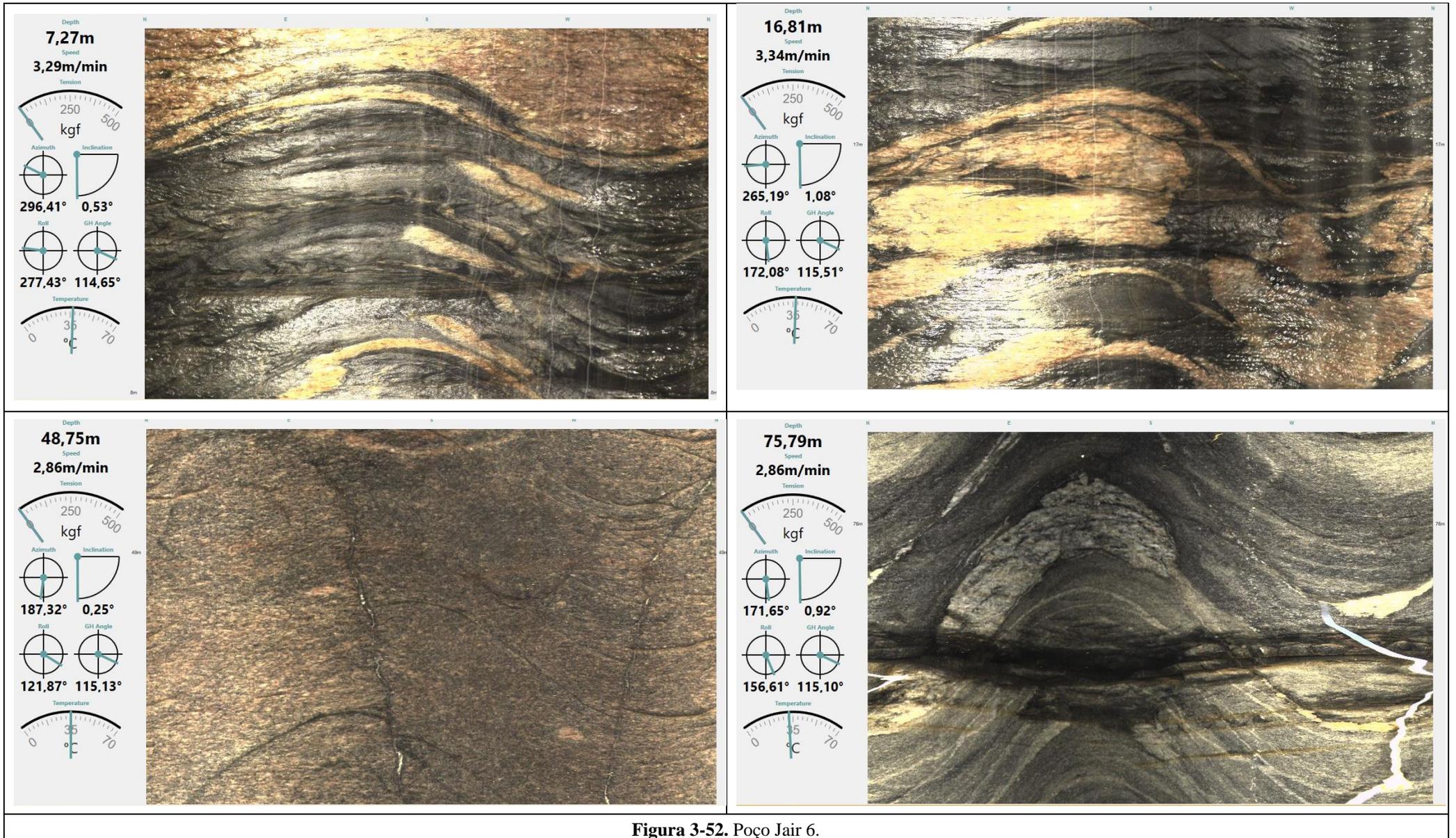


Figura 3-52. Poço Jair 6.

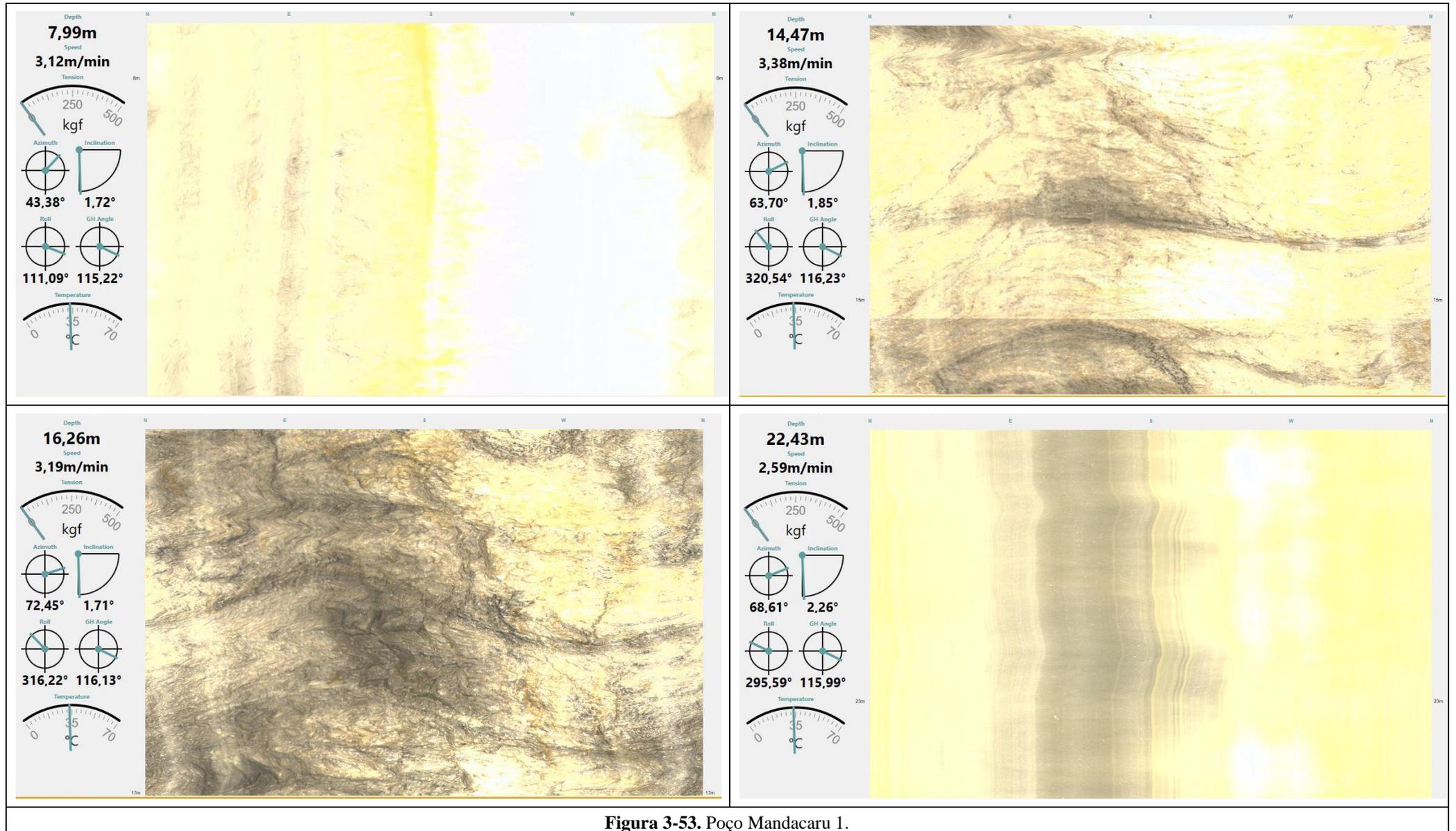


Figura 3-53. Poço Mandacaru 1.

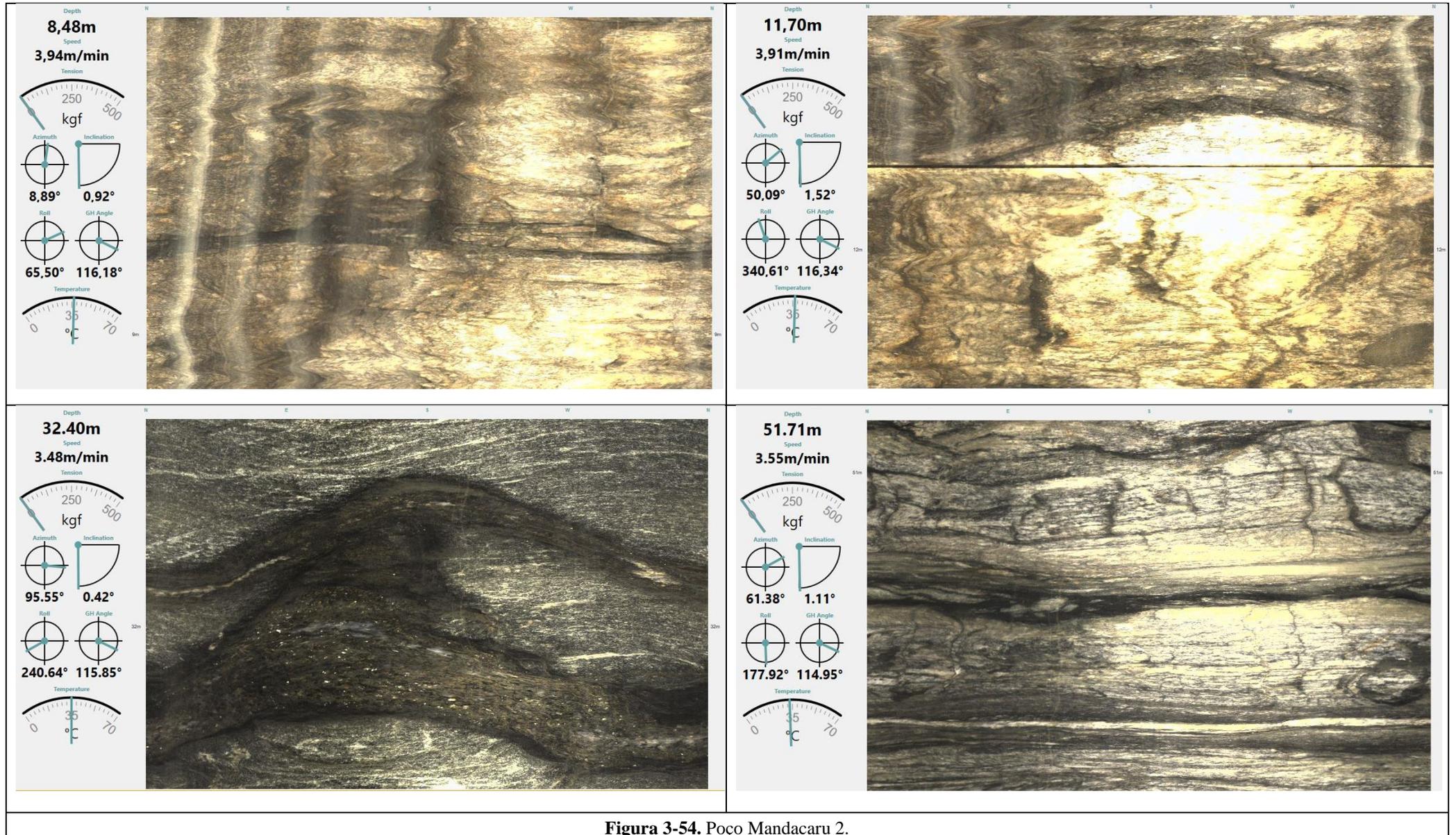


Figura 3-54. Poço Mandacaru 2.

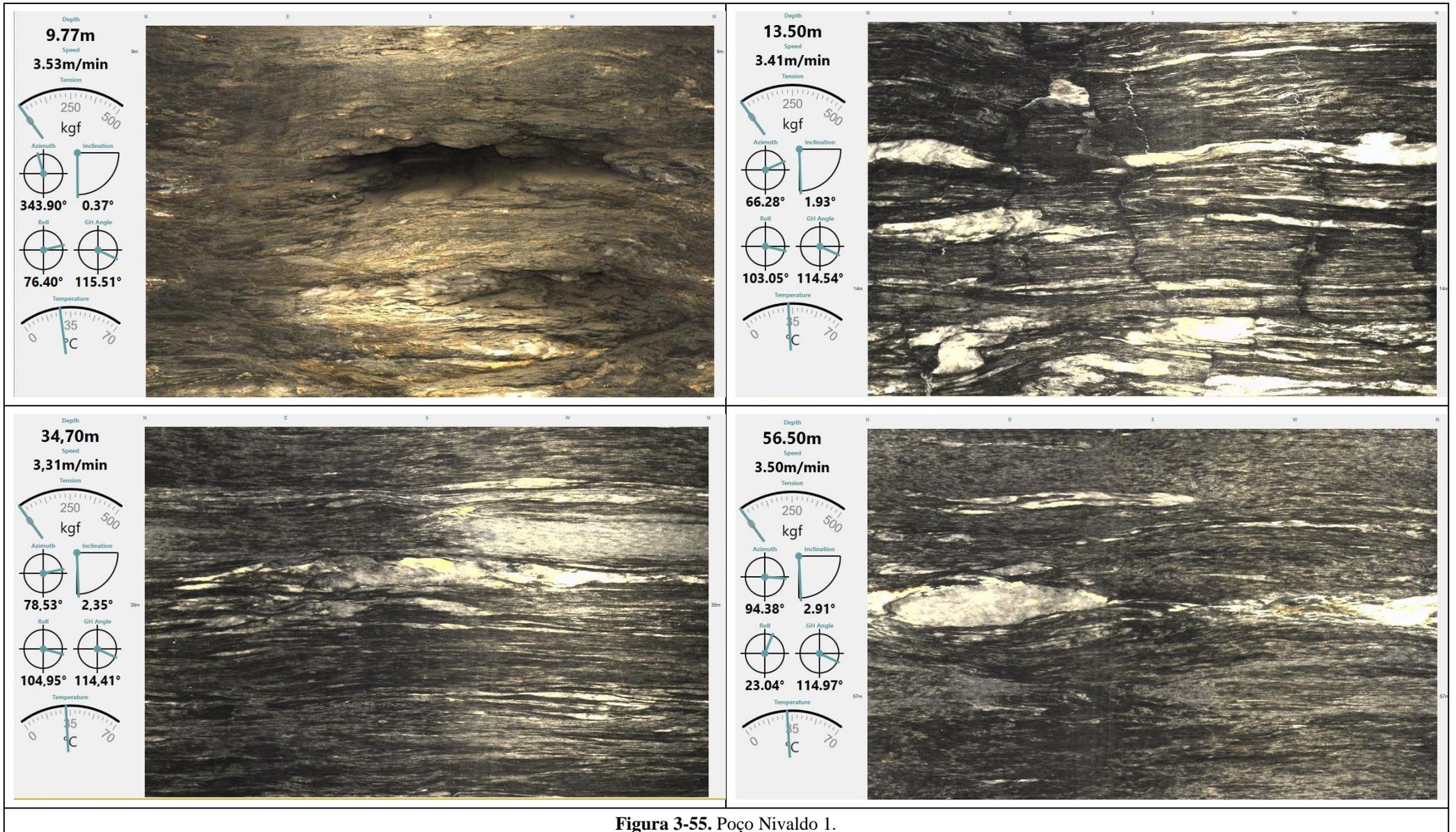


Figura 3-55. Poço Nivaldo 1.

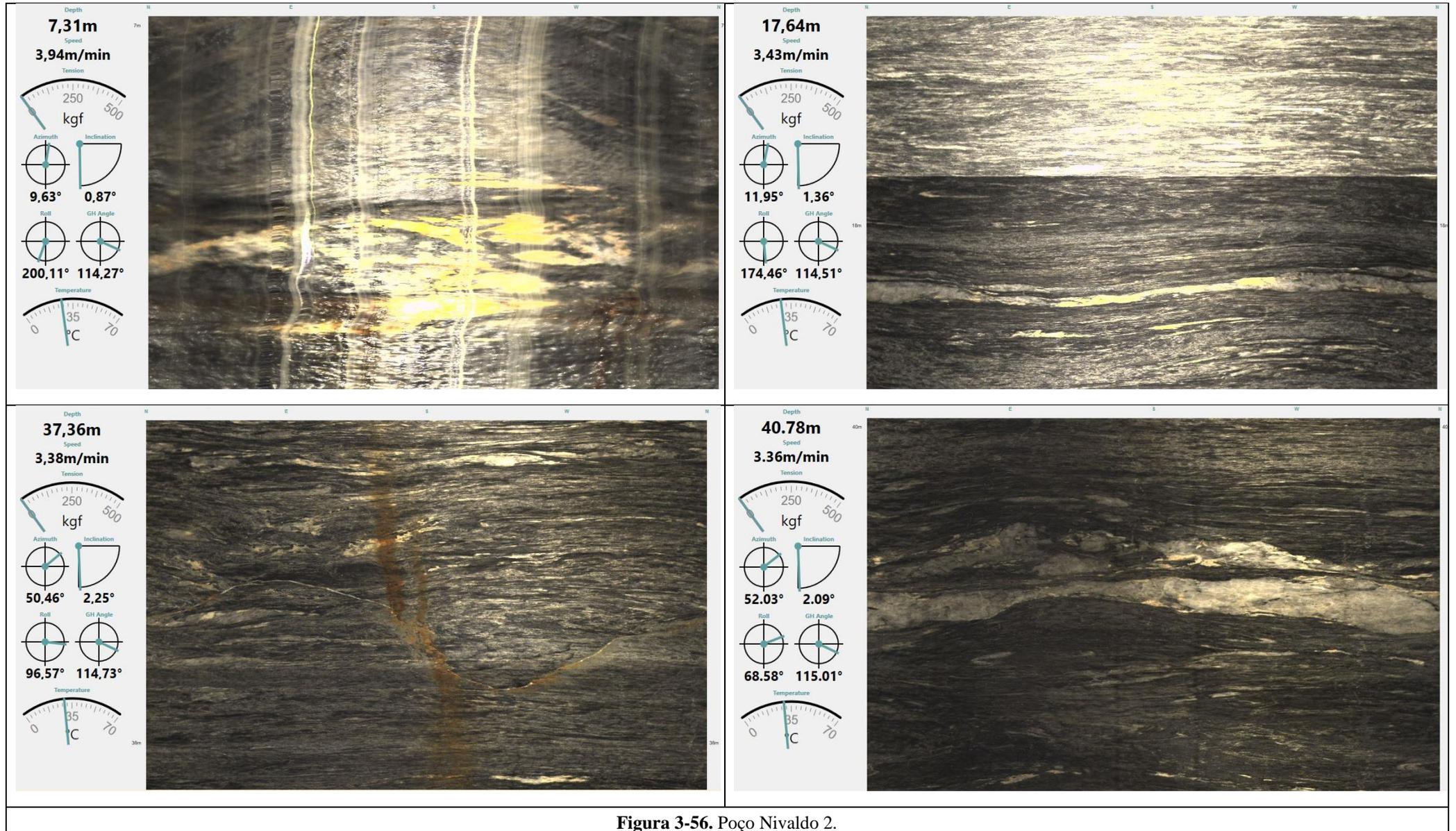


Figura 3-56. Poço Nivaldo 2.

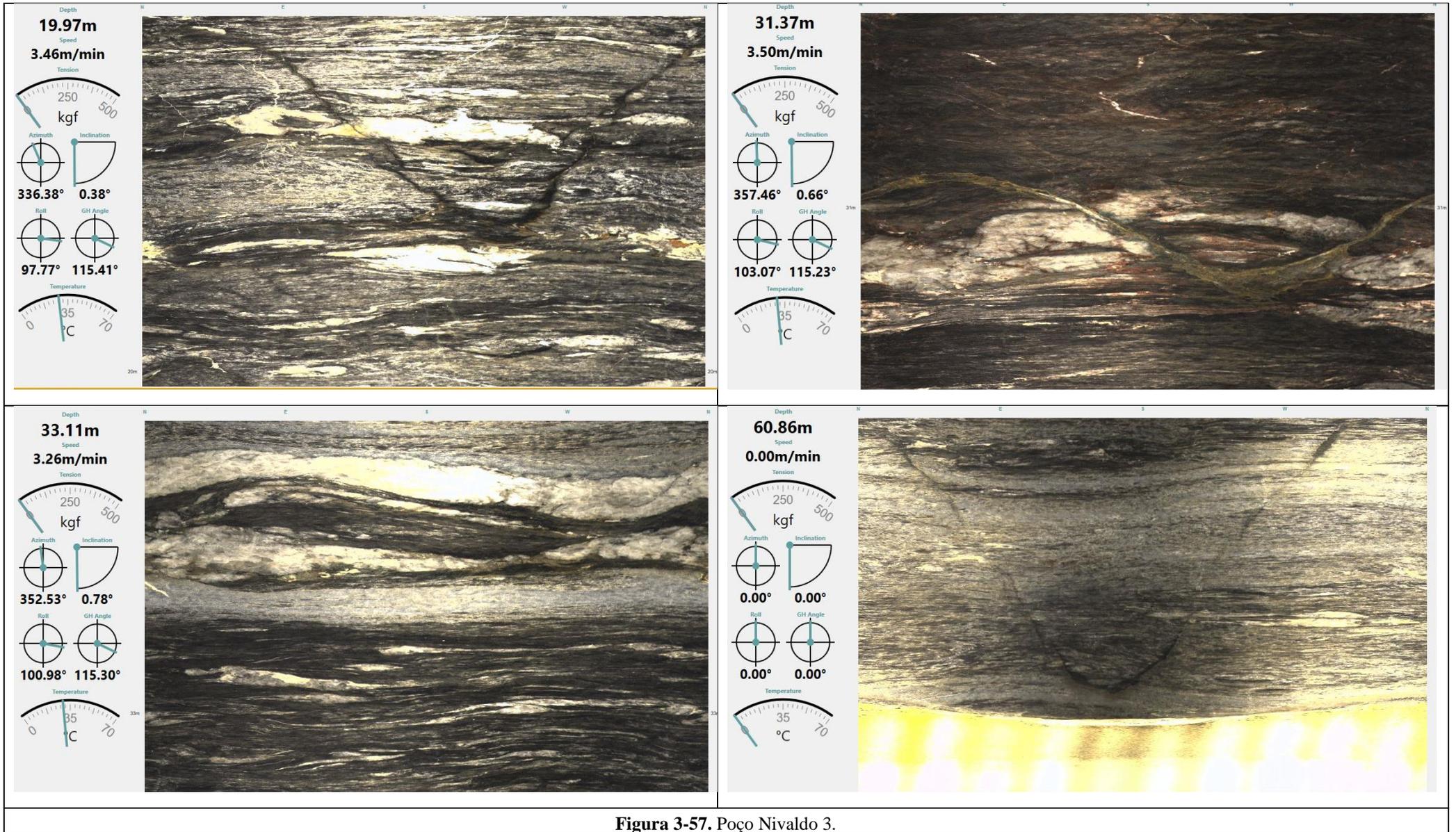


Figura 3-57. Poço Nivaldo 3.

### 3.3.3. Discussões

O perfilador ótico permite identificar estruturas como fraturas secas ou preenchidas, foliações e a litologia do poço. As imagens podem ser coletadas em poços secos ou com água limpa, uma vez que algumas condições dificultam a visualização dos dados como, por exemplo, lama de perfuração, precipitação química e crescimento bacteriano (Willians & Johnson 1994).

No Sítio do Sr. Jair foram investigados seis poços, dentre os quais cinco produtores e um seco (Poço Jair 3). São apresentas, da Figura 3-47 a Figura 3-52, imagens de bandamento gnáissico com amplo predomínio de minerais quartzo-feldspáticos e fraturas sub-horizontais com maiores aberturas, que podem ser observadas nas zonas saturadas e não saturadas dos poços. No Poço Jair 1 o revestimento atinge 3,70 metros, a rocha se apresenta fresca em alguns pontos, principalmente depois das fraturas horizontais, e seca em outros. Ocorrem fraturas horizontais a 4,71; 7,30; 20,57; 23,81; 42,34 e 62,20 metros. O nível freático é evidenciado em 56 metros.

No Poço Jair 2 (Figura 3-48) ocorre uma fratura horizontal com 0,5 cm de abertura truncando o bandamento gnáissico que é ondulado a 75,51 metros. Esta é a única entrada d'água neste poço, responsável pela vazão de 4,1 m<sup>3</sup>/h e nível d'água em 46 metros. A partir dos 48 metros de profundidade a rocha apresenta predominância de minerais máficos.

O Poço Jair 3 (Figura 3-49) é o único seco no sítio, ele foi perfurado até uma profundidade de 77 metros, apresenta cor mais clara, rochas secas e uma fratura em alto ângulo, fechada a 56,13 metros.

O nível d'água do Poço Jair 4 é em 11,62 metros (Figura 3-50). Observam-se micro fraturas subverticais e o cruzamento de uma fratura em alto ângulo com outra horizontal a 22,42 metros. No Poço Jair 5 o nível freático é evidenciado a 14,5 metros e observa-se uma fratura na mesma profundidade que é observada no Poço Jair 4, em 22,40 metros. Esse poço foi perfurado até os 60 metros.

O Poço Jair 6 apresenta uma fratura horizontal a 75,79 a qual pode ser correlacionada com a fratura observada no Poço Jair 2. Esta correlação é direta em função do relevo local e da curta distância entre estes poços.

No assentamento Mandacaru foram investigados dois poços (Sr. João e Sr. Paulo). No poço Mandacaru 1 (Figura 3-53) não foi possível obter boas imagens, provavelmente pelo fato do poço ter sido perfurado no mesmo dia da sondagem e os particulados em suspensão bloquearam a luz e dificultaram a tomada de imagens. O poço foi perfurado até os 47 metros e se encontra seco após a finalização da perfuração. No poço Mandacaru 2 (Figura 3-54), com 60 metros de profundidade, foi observado o mesmo padrão, com bandamento gnáissico e predomínio de minerais máficos. Neste poço são observadas as seguintes feições: fratura horizontal seca a 8,42 metros; nível freático a 11,70 metros e fratura horizontal de alívio com deslocamento do bandamento gnáissico a 51,71 metros.

A Figura 3-55, Figura 3-56 e Figura 3-57 apresentam os resultados do sítio do Sr Nivaldo, no local foram investigados três poços, todos secos. Os poços foram escavados até uma profundidade de 66 metros. O padrão de imagens observado varia com relação aos outros dois locais investigados. Nas imagens são observadas rochas com bandamento gnáissico e predomínio de minerais máficos, são observadas fraturas horizontais e verticais preenchidas com material mineral ou secas. É possível observar o processo de oxidação no Poço Nivaldo 2. No Poço Nivaldo 3 ocorrem fraturas com  $\sim 45^\circ$  de mergulho a 19,97 e 60,86 metros.

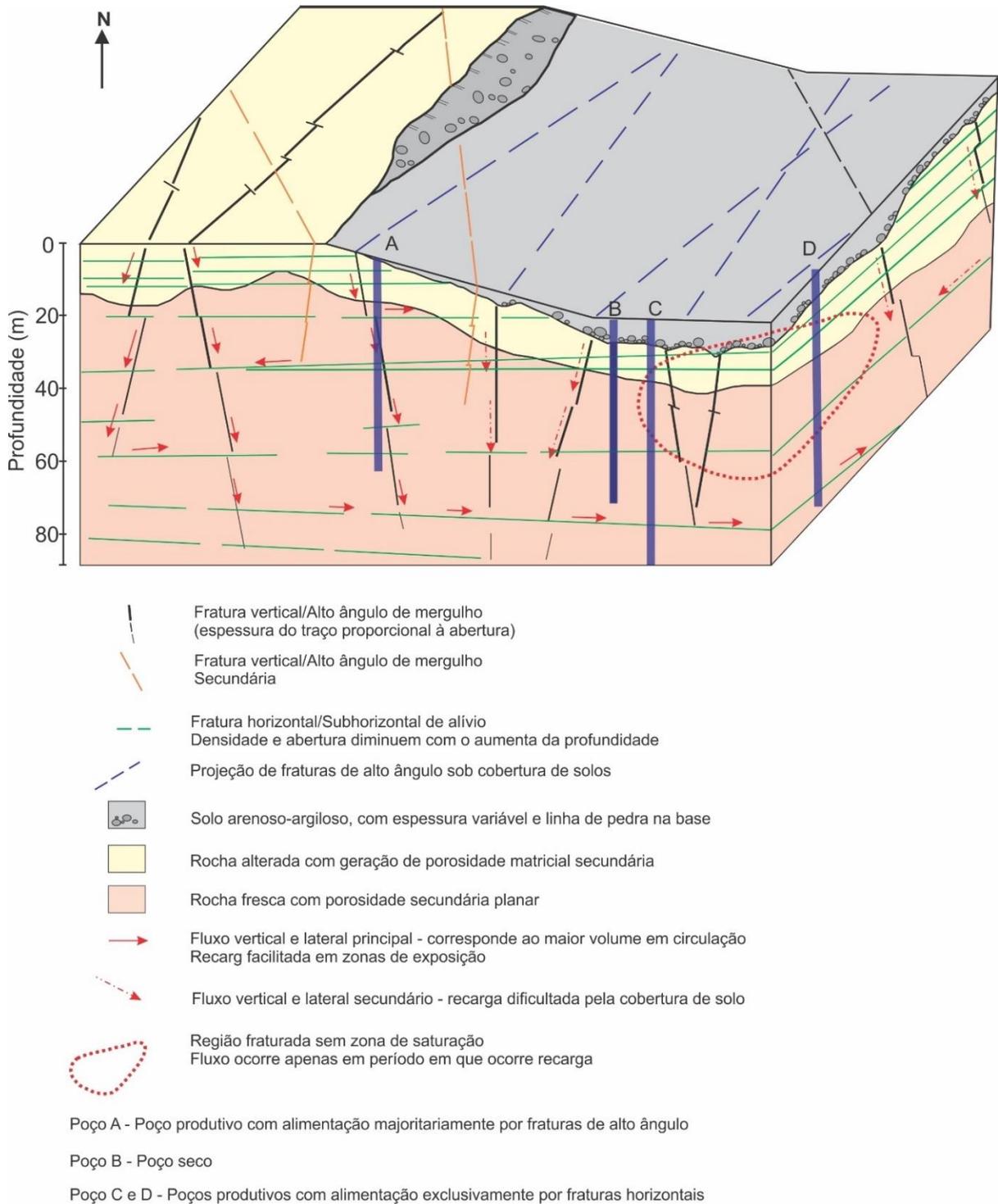
### **3.4. Modelo Conceitual de Fluxo**

Considerando as informações obtidas com a aplicação dos métodos e técnicas expostos nos tópicos anteriores foi possível elaborar o modelo conceitual de fluxo (Figura 3-58) da área estudada. O fluxo da água subterrânea na rocha com baixa porosidade primária vai depender da densidade, conectividade, abertura e atitude das fraturas. O modelo propõe de forma esquemática os tipos de estruturas e fluxo que compõem o sistema. O modelo proposto segue os critérios propostos por Silva (2008 e 2015) para sistema aquífero similar.

As fraturas verticais e com alto ângulo são as principais estruturas que controlam recarga a partir de águas de precipitação. Fraturas expostas em maciços de rochas aflorantes e subaflorantes são as mais favoráveis à recarga, uma vez que parte da chuva se infiltra diretamente após a precipitação ou após restrito escoamento do excedente pluvial.

Fraturas verticais / subverticais que ocorrem sob solos mais espessos (latossolos, planossolos e luvisolos) apresentam condições de infiltração menos favoráveis, pois parte das águas de precipitação deverá ficar retida, principalmente para aumentar a umidade destas coberturas e na forma de evapotranspiração pela demanda hídrica da vegetação. Assim, é considerado que o manto de intemperismo mais espesso funciona como uma barreira à recarga local, de forma que o fluxo vertical pode ser dividido em principal (em estruturas aflorantes ou subaflorantes) e secundário (em estruturas que ocorrem sob solos mais espessos). A condição dos solos mais espessos como barreiras ao fluxo fica evidenciada em função do regime de chuvas da região que são, na média, restritas ( $\sim 400$  a  $500$  mm/ano) e ainda muito concentradas em alguns meses do ano (entre dezembro e março).

A presença de horizontes saprolíticos espessos também é considerada uma barreira ao fluxo uma vez que nestas condições as rochas se tornam plásticas facilitando o selamento das estruturas que em rocha fresca permanecem abertas. A maior plasticidade do material é alcançada pela transformação dos silicatos em massas de argilominerais que apresentam comportamento flexível. Estes horizontes saprolíticos ainda apresentam um aspecto negativo quanto à produção de íons responsáveis por aumentar a salinização das rochas, uma vez que se comporta como uma fonte de grande disponibilidade de cátions e ânions.



**Figura 3-58.** Bloco diagrama ilustrando de forma esquemática o modelo de fluxo na região estudada.

As fraturas horizontais / sub-horizontais, por outro lado, não são importantes para a recarga dos sistemas, mas sim pela interconexão de estruturas verticais e pelo espalhamento das águas de infiltração por fluxo lateral, que dependem do ângulo de mergulho destas estruturas (mesmo que de baixo caimento). A importância das fraturas de baixo ângulo é corroborada pelo estudo de poços próximos entre si que mostram que a única entrada d'água é representada por uma fratura horizontal aberta a cerca de 75 metros de profundidade (Sítio do Sr. Jair).

Em função do arranjo dos sistemas de fraturas verticais e suas relações com as sub-horizontais é possível ocorrer áreas no maciço em que não há fluxo vertical por infiltração de águas de chuvas, mas podem ocorrer poços produtivos alimentados por fraturas sub-horizontais (como explicitado na Figura 3-58).

Para a recarga do Poço A infere-se que a água alcance o poço por meio de descontinuidades verticais com alto ângulo e a recarga se dá pela precipitação e infiltração direta em fraturas que interceptam a superfície, conforme corroborado pela análise dos dados estruturais da área. O Poço B representa um exemplo das investigações realizadas em poços secos, como no caso do Sítio do Sr. Nivaldo, onde as fraturas de pequena abertura são preenchidas com materiais argilosos que impede a circulação da água que infiltra ocorrendo uma zona de isolamento do fluxo. As fraturas observadas nos poços Jair 2 (Figura 3-48) e Jair 6 (Figura 3-52) que ocorrem a, aproximadamente, 75 metros de profundidade e são possivelmente conectadas pela proximidade dos locais foram ilustradas no modelo representadas pelos Poços C e D, que são poços produtivos alimentados por fraturas exclusivamente horizontais. No sítio do Sr. Jair o único poço seco é o Jair 3 (Figura 3-49) que atingiu 77 metros de profundidade, e que pela proximidade com os poços Jair 2 e 6 e pela diferença de topografia, seria indicado furar mais dois/três metros para se confirmar que a mesma fratura intercepta também este poço. Neste caso um poço seco pode se transformar em um poço produtor alimentado por uma fratura horizontal/ sub-horizontal.

## CAPÍTULO 4

### 4. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

#### 4.1. Conclusões

A região Nordeste do Brasil apresenta, historicamente, dificuldades em relação ao abastecimento de água da população, como consequência principal da sua condição climática, restrita disponibilidade de recursos hídricos subterrâneos e questões quanto aos aspectos qualitativos e quantitativos da água. O município de Petrolina localizado no semiárido de Pernambuco foi escolhido para o desenvolvimento desta pesquisa e três sítios da zona rural foram adotados para a aplicação de técnicas de estudos hidrogeológicos. A área apresenta embasamento cristalino e a água subterrânea presente circula, principalmente, em fraturas e falhas. Esse tipo de aquífero apresenta maior complexidade quanto ao fluxo quando comparado aos aquíferos porosos, e seu entendimento é de fundamental importância, tendo em conta que no estado de Pernambuco ele representa 84% dos aquíferos.

O estudo em aquíferos fraturados se torna mais complexo pelo fato da circulação da água depender de diversos fatores, incluindo: abertura e amplitude das fraturas, porosidade e permeabilidade da matriz, propriedade do material que preenche as fissuras, interconexão dos planos, entre outros. A circulação limitada condiciona maior salinização da água presente, muitas vezes tornando-a imprópria para a utilização e consumo sem o tratamento adequado para a diminuição da quantidade de sais dissolvidos.

A análise do sistema de circulação nos aquíferos fraturados de Petrolina permite a expansão dos resultados para outras regiões do semiárido nordestino com as mesmas características. As informações coletadas forneceram subsídios para a elaboração de um modelo de fluxo subterrâneo.

A base de informações necessárias para a geração do modelo de fluxo foi adquirida com três metodologias: eletrorresistividade, perfilagem ótica e análise de dados estruturais da região. O método de investigação geofísica de eletrorresistividade foi escolhido com base em estudos anteriores para a mesma aplicação e a perfilagem ótica de alta resolução é uma ferramenta que apresenta a possibilidade de integração das informações. Os dados estruturais foram coletados em campo e comparados com os lineamentos observados nas imagens de satélite.

Para a aquisição de dados de eletrorresistividade foi realizado caminhamento elétrico com arranjo dipolo-dipolo que atingiu aproximadamente 23 metros de investigação. Esta técnica possibilitou a identificação de cinco horizontes com base nas respostas eletrorresistivas, incluindo: primeira camada de solo arenoso seco, segunda de solo areno-argiloso úmido, terceira

camada interpretada como saprolito úmido, seguida pelo saprolito seco e por fim o material interpretado como rocha sã.

Para simular o comportamento da água no subsolo foi instalado um sistema de recarga artificial com injeção de água em uma trincheira preenchida por cascalho grosso de quartzo de veio. Esse sistema foi monitorado com diversas leituras de eletrorresistividade ao longo da Linha 1, e o processo e permitiu identificar as camadas que sofreram alteração com o procedimento. Foi possível observar que a camada superficial interpretada como solo arenoso seco, não sofre grandes alterações com a infiltração, uma possível consequência do rápido espalhamento da água no contato rocha alterada + saprolito com o solo, uma vez que a trincheira de infiltração foi escavada até esta profundidade. A zona mais condutiva apresenta variações mais perceptíveis, e ao final do processo é visualizada como uma camada mais homogênea. A camada mais profunda, identificada como rocha sã, apresenta variações suaves em alguns pontos, fato que pode ocorrer devido a existência de porosidade secundária no material ou de pequenas fissuras na rocha.

As informações da estruturação rúptil da região foram obtidas através de dados coletados em campo, a maioria, em uma pedreira desativada e em imagens de satélite. As atitudes das fraturas e dos lineamentos observados foram tratadas e representadas em rosetas de fraturas, esse procedimento permitiu correlacionar os dados e determinar a direção principal das fraturas verticais e subverticais como família predominante N40-60E. Outras duas famílias representativas são observadas nas direções NS e N40W. Esse resultado é compatível com a geologia da região que é associada à Faixa Riacho do Pontal, que foi formada por uma compressão de norte para sul, tendo o Cráton do São Francisco como anteparo da deformação regional.

A perfilagem ótica é uma ferramenta que possibilita uma análise direta e instantânea da litologia e estruturas através da filmagem em alta resolução de poços perfurados na região. Foram investigados 11 poços em três sítios. Os resultados possibilitaram a observação da litologia, com predomínio de bandamento gnáissico com minerais quartzo-feldspático e bandas ricas em minerais máficos. Por meio das filmagens pode-se evidenciar a importância das fraturas horizontais/sub-horizontais na circulação do fluxo subterrâneo, em geral, apresentando maior abertura do que as fraturas verticais e subverticais. Também foi possível observar a continuidade lateral destas fraturas, que alimentam poços à mesma profundidade em com distâncias de cerca de 80 metros entre si.

A integração dos dados obtidos possibilitou a elaboração de um modelo conceitual de fluxo subterrâneo, correlacionando os resultados obtidos. Buscou-se destacar as diferentes situações observadas com os dados adquiridos em campo. Foram representadas fraturas verticais de alto ângulo principais e secundárias, e sua relevância no fluxo no sentido de transmitir a água

infiltrada das chuvas para maiores profundidades no maciço rochoso. As fraturas horizontais e sub-horizontais são responsáveis pelo espalhamento da água e infiltração por fluxo lateral, além da conexão das anisotropias de alto ângulo. No modelo se buscou representar exemplos de poços a partir da comparação com casos reais, nos quais foi possível discriminar poços alimentados pela mesma fratura de baixo ângulo; poços secos que interceptaram fratura de alto ângulo abaixo de solos espessos; fraturas preenchidas com material argiloso ou sem conexão com as fraturas verticais com fluxo e em direção oposta à inclinação do relevo. Outra situação corroborada pelos dados geofísicos, e representada no modelo conceitual, foi a influência dos horizontes saprolíticos que dificulta o processo de infiltração, pois a água pode ficar retida na forma de umidade na porosidade intergranular gerada pela alteração de feldspatos e minerais ferromagnesianos.

Os dados gerados, interpretados e apresentados nessa dissertação contribuem para a ampliação do conhecimento sobre o fluxo subterrâneo em regiões semiáridas onde a água subterrânea ocorre em aquíferos fraturados. O trabalho destaca a importância dos solos que para a recarga dos aquíferos funcionam de forma inversamente proporcional a sua espessura, isto é, quanto menor sua espessura, mais adequadas suas condições de recarga e vice-versa. Tal comportamento é oposto ao observado em áreas de climas chuvosos com superávits hídricos em períodos mais prolongados do ano.

A observação e descrição dos fenômenos hidrogeológicos durante a perfuração de poços tubulares nos sítios de pesquisa também é considerada uma ferramenta importante para se ampliar o conhecimento do fluxo subterrâneo. A descrição do poço Jair 6 foi utilizada para exemplificar esta afirmação:

- a perfuração ocorreu sem nenhuma entrada de águas até 75,5 metros (o poço permanecia seco mesmo depois de interceptar fraturas abertas sem fluxo);
- a 75,79 metros a perfuração alcança uma fratura horizontal aberta responsável pela vazão de 4,1 m<sup>3</sup>/hora e
- o poço apresenta nível estático a 14,8 metros após estabilização, confirmando a condição de confinamento do aquífero.

#### **4.2. Recomendações**

Como recomendação para aumentar o entendimento do fluxo da água subterrânea, e para auxiliar em futuras pesquisas, sugere-se aplicar as seguintes técnicas:

- Realizar tratamento digital dos dados de perfilagem ótica visando determinar a atitude das estruturas observadas pela aplicação de software específico, além de medição da abertura das estruturas abertas;

- Realizar perfis de eletrorresistividade para investigação mais profunda em intervalos de tempo maiores de forma a se monitorar em maior intervalo de tempo após a injeção da água;
- Acompanhar a perfuração de um número maior de poços, pois durante o desenvolvimento deste tipo de ação é possível gerar importantes informações quanto a profundidade de entrada d'água, profundidade do nível estático após estabilização, eventual confinamento do aquífero, dentre outras;
- Associar resultados de estudos geoquímicos com características hidráulicas dos poços para previsão de questões sobre a qualidade da água que circula nas fraturas;
- Intensificar os estudos de estatística de fraturas (medidas em campo e obtidas de lineamentos estruturais) para correlação com processos de reativação neotectônica que eventualmente ocorram na região.

## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANA - Agência Nacional de Águas (Brasil), 2005. Disponibilidade e Demandas de Recursos Hídricos no Brasil. Estudo Técnico Preliminar. 134p.
- Barbosa, C.M.S & Matos, A. 2008. Conceitos e diretrizes para recarga artificial de aquíferos. *In* Anais do XV Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. 12p.
- Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C., Vidotti, R. M., Gonçalves, J. H. (eds). 2003. Geologia Tectônica e Recursos Minerais do Brasil. 1ª ed. Brasília: CPRM- Serviço Geológico do Brasil.692 p.ISBN 85-230-0790-3.
- Borges, W.R. 2007. Caracterização geofísica de alvos rasos com aplicações no planejamento urbano e meio ambiente: estudo sobre o sítio controlado do IAG/USP. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP. 256p.
- Braga, A.C.O. 1997. Métodos Geoelétricos aplicados na caracterização geológica e geotécnica - Formações Rio Claro e Corumbataí, no Município de Rio Claro-SP. Rio Claro. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências e Ciências Exatas, UNESP Campus de Rio Claro, SP. 169 p.
- Braga, A.C.O. 2005. Métodos geoeletricos aplicado: módulo: hidrogeologia. Rio Claro, SP: DGA / UNESP.91p.
- Braga, A.C.O. 2016. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. São Paulo. Oficina de Textos. 157p.
- BRASIL - Ministério do Meio Ambiente. 2007. Águas Subterrâneas – Um recurso a ser conhecido e protegido. 40p.
- Camargo, A.; Pentead, R.A.; Goebel, W. 1988. Perfilagem Ótica em Poços Tubulares. *In*: V Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas. São Paulo, SP. 10p.
- Costa, A.M.B.; Melo, J.G.; Silva, F.M. 2006. Aspectos da salinização das águas do aquífero cristalino no Estado do Rio Grande do Norte, nordeste do Brasil. *Águas Subterrâneas*, 20(1):67-82.
- Costa Filho, M.J. 1996. Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural. São Paulo: USP. Tese de Doutorado.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2005. Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea - Diagnóstico do Município de Petrolina, Relatório Final. 47p.
- CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 2008. Hidrogeologia - Conceitos e Aplicações 3ª Edição - Revisada e Ampliada. 835 p.
- Custodio, E.; Llamas, M.R. 1996. Hidrología subterrânea. 2º ed. Barcelona: Ediciones Omega, 1157 p.
- Feitosa, F.A.C. & Diniz, J.A.O. 2011. Água subterrânea no cristalino da região semiárida brasileira. *In*: II Congresso Internacional de Meio Ambiente Subterrâneo. 4p.
- Fetter, C.W. 2004. Applied Hydrogeology. 4º ed. EUA: Prentice Hall. 615 p.
- Filho, W.D.C & Costa, W.D. 2000. Caracterização hidrogeológica do estado de Pernambuco. *In*: 1st Joint World Congress on Groundwater, Fortaleza, CE. 19p.
- Freire, C.C.; Pereira, J.S.; Ribeiro; M.M.R.; Kirchheim, R. 1998. A importância dos recursos hídricos subterrâneos. Simpósio Internacional Sobre Recursos Hídricos (Gramado). Porto Alegre: ABRH.
- Gallas, J.D.F. 1998. Eletroresistividade aplicada à prospecção de água subterrânea em áreas de

- rochas cristalinas. *In*: Workshop de Geofísica Aplicada II, Rio Claro, SP. CDROM, Arquivo Wga09.RTF.
- GOVERNO DO ESTADO DE PERNAMBUCO. 1999. Plano Estadual de Recursos Hídricos – PERH, Documento Síntese. Secretaria de Recursos Hídricos. Recife, 215p.
- Guerra, K. J. 2010, Aplicação de método geofísico em estudo hidrogeológico, no município de Nova Lima - MG, caracterização de aquíferos em área urbana. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais. 143 p.
- Hirata, R.; Zoby, J.L.G.; Oliveira, F.R. 2010. Água subterrânea: reserva estratégica ou emergencial. *In*: Águas do Brasil: análises estratégicas.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2002. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico. Rio de Janeiro. CDROM.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. 2010. Disponível em <<https://cidades.ibge.gov.br/brasil/pe/petrolina/panorama>>. Acesso em 05 de maio de 2018.
- INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2012. Disponível em <<http://www.inmet.gov.br/>>. Acesso em 05 de maio de 2018.
- Kearey, P.; Brooks, M.; HILL, I. 2009. Geofísica de exploração. Tradução Maria Cristina Moreira Coelho. São Paulo: Oficina de Texto 438 p.
- Lima, O.A.L. 2010. Estruturas geoeletrica e hidroquímica do sistema aquífero cristalino da Bacia do Alto Rio Curaçá, semiárido da Bahia. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 28(3):445-461.
- Loke, M.H. 2000. Electrical imaging surveys for environmental and engineering studies: A practical guide to 2-D and 3-D surveys. Notes. 61p.
- Loke, M.H. 2004. Tutorial: 2-D and 3-D Electrical Imaging Surveys. Geotomo Software, Res2dinv 3.5 Software.136p.
- Luís, J. 2005. Geofísica Ambiental. Métodos Eléctricos. Universidade do Algarve. Portugal. Disponível em [http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas\\_cap3.pdf](http://w3.ualg.pt/~jluis/files/folhas_cap3.pdf). Acesso em 05 de maio de 2018.
- McNeill, J.D. 1980. Eletromagnetics terrain conductivity measurement at low induction numbers. Tech. Note TN-6. Geonics Ltd. Mississauga, Ont. Canadá. 13p.
- Nery, Geraldo & Macari, Renato. (2006). Estudo do comportamento da perfilagem ótica e geofísica na Formação Serra Geral. 10.14295/ras.v0i0.22603. 21p.
- Paillet, F.L., Barton, C., Luthi, S., Rambow, F., Zemanek, J.R. 1990. Borehole imaging and its application in well logging - an overview. Borehole Imaging, Society of Professional Well Log Analysts, Inc., 6001 Gulf Freeway, Suite C129, Reprint Series, Houston, Texas. p. 3-23.
- Palacky, G. 1987. Resistivity Characteristics of Geological Targets. *In*: Nabighian, M., Ed., Electromagnetic Methods in Applied Geophysics-Theory, Society of Exploration Geophysicists Tulsa, OK, 53-129.
- Reginato, P.A.R. & Ahlert, S. 2012. Utilização da Perfilagem Ótica na Avaliação de Poços Tubulares. *In*: 3º Congresso Internacional de Tecnologias para o Meio Ambiente. Bento Gonçalves, RS. 7p.
- Robertson Geologging. Hi-resolution optical televiewer. Disponível em: <<http://www.geologging.com/slimhole-logging/optical-televiewer-rgdip/>> Acesso em 02 de julho de 2016.
- Silva, L.F. 2008. Geologia estrutural e geoquímica aplicados ao estudo do aquífero localizado na área do Complexo Mínero-industrial (URA/INB) de Caetité, Bahia. Monografia de Graduação, IGEO/UFRJ, 70 p.
- Silva, L.F. 2015. Modelo conceitual do aquífero fraturado da área da Jazida de Urânio de Caetité,

- Bahia: Implicações para o fluxo subterrâneo. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 130p.
- Silva, P.S. 2016. Avaliação de viabilidade de aplicação de técnicas de recarga artificial em aquíferos fraturados, Petrolina, PE. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília. 113p.
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. E. 1990. Applied Geophysics. 2<sup>nd</sup> Edition. Cambridge University Press. 770p.
- Uhlein, A.; Caxito, F.A.; Sanglard, J.C.D.; Uhlein, G.J.; Suckau, G.L. 2011. Estratigrafia e tectônica das faixas neoproterozoicas da porção norte do Cráton do São Francisco. *Geonomos*, 19(2):8-31.
- Williams, J.H. & Johnson, C.D. 2004. Acoustic and optical borehole-wall imaging for fractured-rock aquifer studies. *In: Journal of Applied Geophysics*, 55(1-2):151-159.
- Zoby, J.L.G. & MATOS, B. 2000. Águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na Política Nacional de Recursos Hídricos. *In: Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas*, Florianópolis: ABAS, CD-ROM.

## **6. APÊNDICES**

**Apêndice A** - Arquivo pseudo-3D de investigação antes do processo de infiltração.

**Apêndice B** - Arquivo pseudo-3D de investigação após o processo de infiltração.