



Universidade Federal  
de Campina Grande



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE  
CENTRO DE TECNOLOGIA DE RECURSOS NATURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA E GESTÃO DE  
RECURSOS NATURAIS**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A PRODUÇÃO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA NAS FORMAÇÕES SERRA DOS MARTINS E  
CAMPOS NOVOS – UM ESTUDO GEOFÍSICO-GEOLÓGICO**

**ADRIANA DO CARMO MENEZES ECHEVERRI**

Campina Grande

2025

**ADRIANA DO CARMO MENEZES ECHEVERRI**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A PRODUÇÃO DE ÁGUA  
SUBTERRÂNEA NAS FORMAÇÕES SERRA DOS MARTINS E CAMPOS  
NOVOS – UM ESTUDO GEOFÍSICO-GEOLÓGICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de mestre em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Área de concentração: Engenharia de Recursos Naturais

Orientador: José Agnelo Soares

Coorientador: Guilherme dos Santos Teles

Campina Grande

2025

E18a Echeverri, Adriana do Carmo Menezes.  
Avaliação do potencial para a produção de água subterrânea nas formações Serra dos Martins e Campos Novos : um estudo geofísico-geológico / Adriana do Carmo Menezes Echeverri. – Campina Grande, 2025.  
118 f. : il. color.  
Dissertação (Mestrado em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2025.  
"Orientação: Prof. Dr. José Agnelo Soares, Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles".  
Referências.  
1. Hidrologia das Águas Subterrâneas. 2. Hidrogeofísica. 3. Hidrogeologia Hidroquímica. 4. Eletroresistividade. 5. Potabilidade. 6. Formação Serra dos Martins. 7. Formação Campos Novos. I. Soares, José Agnelo. II. Teles, Guilherme dos Santos. III. Título.

CDU 556.3(813.3)(043)

**ADRIANA DO CARMO MENEZES ECHEVERRI**

**AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A PRODUÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA  
NAS FORMAÇÕES SERRA DOS MARTINS E CAMPOS NOVOS – UM ESTUDO  
GEOFÍSICO-GEOLÓGICO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais da Universidade Federal de Campina Grande, como requisito parcial para obtenção do título de mestre/doutor em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 27/02/2025

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof. Dr. José Agnelo Soares (Orientador)  
Universidade Federal de Campina Grande – UFCG

---

Prof. Dr. Francisco Cezar Nogueira (membro interno)  
Universidade Federal da Paraíba – UFCG

---

Prof. Dra. Paula Stein (membro externo)  
Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO  
**UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE**  
POS-GRADUACAO EM ENGENHARIA E GESTAO DE RECURSOS NATURAIS  
Rua Aprigio Veloso, 882, - Bairro Universitario, Campina Grande/PB, CEP 58429-900

## **FOLHA DE ASSINATURA PARA TESES E DISSERTAÇÕES**

**Adriana do Carmo Menezes Echeverri** □

**"AVALIAÇÃO DO POTENCIAL PARA A PRODUÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NAS FORMAÇÕES SERRA DOS MARTINS E CAMPOS NOVOS – UM ESTUDO GEOFÍSICO-GEOLÓGICO"** □.

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais como pré-requisito para obtenção do título de Mestre Engenharia e Gestão de Recursos Naturais.

Aprovada em: 27/02/2025

Dr.(a.) **José Agnelo Soares** (Orientador PPGEGRN).

Dr.(a.) **Guilherme dos Santos Teles/UFCG** (Coorientador).

Dr.(a.) **Francisco Cezar Costa Nogueira/PPGGRN** (Examinador Interno).

Dr.(a.) **Paulo Stein/UFRN** (Examinador Externo).



Documento assinado eletronicamente por **JOSE AGNELO SOARES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2025, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **GUILHERME DOS SANTOS TELES, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 27/02/2025, às 15:04, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **PAULA STEIN, Usuário Externo**, em 19/03/2025, às 14:34, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



Documento assinado eletronicamente por **FRANCISCO CEZAR COSTA NOGUEIRA, PROFESSOR(A) DO MAGISTERIO SUPERIOR**, em 24/03/2025, às 10:41, conforme horário oficial de Brasília, com fundamento no art. 8º, caput, da [Portaria SEI nº 002, de 25 de outubro de 2018](#).



A autenticidade deste documento pode ser conferida no site <https://sei.ufcg.edu.br/autenticidade>, informando o código verificador **5208887** e o código CRC **6975D515**.

Referência: Processo nº 23096.002220/2025-18

SEI nº 5208887

Aos meus Velinhos, Julia e Ruberval.

Com muito Amor e eterna gratidão.

## AGRADECIMENTOS

A jornada que me trouxe até aqui não seria possível sem o apoio incondicional de pessoas especiais que sempre acreditaram em mim e me fortaleceram nos momentos desafiadores.

Aos meus pais, Julia e Ruberval, meu eterno agradecimento pela base sólida que me deram, pelos ensinamentos de vida, e por nunca medirem esforços para que eu pudesse alcançar meus sonhos. Vocês são minha inspiração diária e minha maior segurança.

Ao meu orientador, Prof. Dr. José Agnelo Soares, por sua paciência, dedicação e por compartilhar comigo não apenas conhecimentos acadêmicos, mas também por ter confiado em mim, mesmo quando eu mesma pensava que era incapaz de cumprir essa missão. Sua orientação foi essencial para que este trabalho se concretizasse.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Guilherme dos Santos Teles, por sua orientação, dedicação e disponibilidade ao longo deste trabalho. A sua expertise em compartilhar conhecimento foram inspirações valiosas durante o processo. Muito obrigado pela sua amizade e por estar ao meu lado nessa jornada.

Às colegas do LabPetro, Anne, Juliana, Mariana, Jaqueline, Gerlane, e ao Melque, minha sincera gratidão pela parceria, apoio e trocas enriquecedoras ao longo desta trajetória. Cada conversa, ideia compartilhada e momento de descontração contribuíram significativamente para tornar essa experiência mais leve e enriquecedora. Agradeço pela camaradagem, pelas colaborações nos desafios diários e pela motivação que encontrei em cada um de vocês. Este trabalho também reflete o impacto positivo da convivência e da união que construímos juntos.

Ao meu marido, Carlos, por ser meu porto seguro, meu incentivador, e por me lembrar, nos momentos difíceis, da minha capacidade. Obrigada por acreditar em mim quando eu mesma duvidava e por caminhar ao meu lado em todos os momentos.

E ao meu filho, Miguelito, que é minha maior motivação. Sua alegria e pureza enchem minha vida de sentido e me lembram do porquê eu busco ser melhor a cada dia.

A todos vocês, minha gratidão infinita. Este momento é tão meu quanto de vocês.



Registro aqui meu profundo agradecimento à **CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior)** pela concessão da bolsa de estudos, e à **FAPESQ (Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba)** que foi essencial para a realização deste trabalho. O apoio financeiro proporcionado pela CAPES e FAPESQ contribuiu significativamente para minha formação acadêmica e profissional. Reconheço a importância desse investimento na pesquisa e educação brasileira, e sou imensamente grata por ter sido beneficiada por esses programas.

Obrigada por acreditarem no potencial transformador da ciência e no impacto que ela gera na sociedade.

“O correr da vida embrulha tudo, a vida é assim: esquenta e esfria, aperta e daí afrouxa, sossega e depois desinquieta. O que ela quer da gente é coragem.”

Guimarães Rosa. Grande Sertão: Veredas.

## RESUMO

O presente estudo verificou a viabilidade para produção de água subterrânea das formações Serra dos Martins - FSM (Ocorrências 1 e 2) e Campos Novos/Basalto Macau – FCN/BM (Ocorrência 3), utilizando levantamentos geofísicos, ensaios petrofísicos e análises físico-químicas. A investigação geofísica indicou que as Ocorrências 1 e 2 apresentaram uma camada superficial resistiva até 30 m de profundidade (zona não saturada), uma camada condutiva entre 30 e 80 m (saturada em água) e uma camada altamente resistiva a partir de 80 m (embasamento cristalino). Os ensaios petrofísicos indicaram porosidades médias de 20,3% (Ocorrência 1) e 8,1% (Ocorrência 2). A FSM, constituída por arenitos subjacentes a uma crosta laterítica superficial, demonstrou maior probabilidade de produção de água subterrânea, com volumes estimados em 270 milhões m<sup>3</sup> para a Ocorrência 1 e 521 milhões m<sup>3</sup> para a Ocorrência 2. Entretanto, essas águas necessitam de tratamento prévio para consumo humano devido aos valores de pH, cor, dureza total, sódio, alumínio, ferro total, sulfato, amônia, cloreto e sólidos dissolvidos totais superiores aos Valores Máximos Permitidos estabelecidos na Portaria 888/2021. Já a FCN/BM (Ocorrência 3), constituída por argilas bentoníticas (FCN) e basaltos (BM), indicou, por meio do levantamento geofísico, uma camada condutiva superficial variando de 30 a 90 m de profundidade, sobreposta a uma camada de rocha alterada. A presença de embasamento cristalino foi observada a partir de 59 m. Os ensaios petrofísicos apresentaram porosidades primárias variando de 4% a 16% nos gnaisses alterados e 0,7% a 1,4% nos basaltos. Os gnaisses alterados são provenientes do Complexo Serrinha-Pedro Velho, subjacente à FCN/BM, que indicam conter o aquífero. Para a Ocorrência 3, estimou-se um volume de 59 milhões m<sup>3</sup> de água subterrânea. A maioria dos poços, de onde se retirou as amostras de água, estavam localizados sobre o Complexo Serrinha-Pedro Velho (P-31, P-33, P-35, P-47, P-51, P-56 e P-59). Os resultados físico-químicos indicaram que a água extraída por esses poços possui concentrações superiores aos patamares de potabilidade para turbidez, cor, dureza total, sódio, ferro, cloreto, amônia e SDT, necessitando de tratamento prévio para consumo humano. Essas águas são classificadas como doces, com pH variando em torno da neutralidade.

**Palavras-chave:** Hidrogeofísica; hidrogeologia hidroquímica; eletrorresistividade; potabilidade.

## ABSTRACT

The present study assessed the feasibility of groundwater production from the Serra dos Martins Formation - FSM (Occurrences 1 and 2) and the Campos Novos/Macau Basalt Formation – FCN/BM (Occurrence 3), using geophysical surveys, petrophysical tests, and physicochemical analyses. The geophysical investigation revealed that Occurrences 1 and 2 exhibited a resistive superficial layer up to 30 m deep (unsaturated zone), a conductive layer between 30 and 80 m (water-saturated zone), and a highly resistive layer from 80 m onward (crystalline basement). The petrophysical tests indicated average porosities of 20.3% (Occurrence 1) and 8.1% (Occurrence 2). The FSM, composed of sandstones underlying a superficial lateritic crust, showed greater potential for groundwater production, with estimated volumes of 65.3 million m<sup>3</sup> for Occurrence 1 and 521 million m<sup>3</sup> for Occurrence 2. However, these waters require pre-treatment for human consumption due to levels of pH, color, total hardness, sodium, aluminum, total iron, sulfate, ammonia, chloride, and TDS exceeding the limits established by Ordinance 888/2021. As for FCN/BM (Occurrence 3), composed of bentonitic clays (FCN) and basalts (BM), the geophysical survey indicated a superficial conductive layer ranging from 30 to 90 m in depth, overlying a layer of altered rock between 27 and 59 m. The presence of crystalline basement was observed from 59 m onward. The petrophysical tests revealed primary porosities ranging from 4% to 16% in the altered gneisses and from 0.7% to 1.4% in the basalts. The altered gneisses, originating from the Serrinha-Pedro Velho Complex underlying the FCN/BM, were identified as containing the aquifer. For Occurrence 3, an estimated groundwater volume of 59 million m<sup>3</sup> was determined. Most of the wells from which water samples were collected were located in the Serrinha-Pedro Velho Complex. The physicochemical results indicated that the water extracted from these wells had concentrations exceeding potable water standards for turbidity, color, total hardness, sodium, iron, chloride, ammonia, and TDS, thus requiring pre-treatment for human consumption. Salinity levels classified these waters as fresh, with pH values close to neutrality.

**Palavras -chave:** Hidrogeophysics; hidrogeology; hidrochemistry; electroresistivity; potability.

## SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
1.1.	OBJETIVOS.....	2
1.1.1.	<b>Objetivo geral</b> .....	2
1.1.2.	<b>Objetivos específicos</b> .....	2
1.2.	ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS.....	2
1.2.1.	<b>Aspectos Socioeconômicos</b> .....	2
1.2.2.	<b>Aspectos Ambientais</b> .....	3
1.3.	OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL.....	4
2.	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	6
2.1.	CONTEXTO GEOLÓGICO.....	8
3.	REVISÃO DA LITERATURA.....	17
4.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA.....	20
4.1.	MÉTODOS GEOELÉTRICOS.....	20
4.1.1.	<b>Eletrorresistividade</b> .....	20
4.1.	RESISTIVIDADE DAS ROCHAS E MINERAIS .....	25
4.2.	SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL.....	27
4.3.	ARRANJOS DE CAMPO .....	27
4.4.	PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CAMPO.....	29
5.	METODOLOGIA .....	30
5.1.	CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA .....	30
5.1.1.	<b>Pesquisa em banco de dados georreferenciados</b> .....	30
5.1.2.	<b>Descrição Geológica</b> .....	30
5.2.	INVESTIGAÇÃO HIDROGEOFÍSICA.....	30
5.2.1.	<b>Processamento dos dados de campo</b> .....	31
5.3.	ANÁLISE PETROFÍSICA.....	31
5.4.	ANÁLISE PETROGRÁFICA.....	35
5.4.1.	<b>Descrição macroscópica de rochas</b> .....	35
5.4.2.	<b>Descrição microscópica de lâminas delgadas</b> .....	35
5.5.	CÁLCULO DO VOLUME DE ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	36
5.6.	ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA.....	37
6.	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	38
6.1.	INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DA ELETRORRESISTIVIDADE.....	38

6.1.1.	<b>Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa</b> .....	38
6.1.2.	<b>Ocorrência 2 – Nova Floresta</b> .....	44
6.1.3.	<b>Ocorrência 3 – Sossego</b> .....	53
6.2.	<b>ANÁLISE PETROFÍSICA</b> .....	60
6.2.1.	<b>Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa</b> .....	60
6.2.2.	<b>Ocorrência 2 – Nova Floresta</b> .....	61
6.2.3.	<b>Ocorrência 3 - Sossêgo</b> .....	63
6.3.	<b>ANÁLISE PETROGRÁFICA</b> .....	66
6.4.	<b>CÁLCULO DA RESERVA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA</b> .....	69
6.4.1.	<b>Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa</b> .....	69
6.4.2.	<b>Ocorrência 2 – Nova Floresta</b> .....	71
6.4.3.	<b>Ocorrência 3 – Sossêgo</b> .....	73
6.5.	<b>ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA</b> .....	76
6.5.1.	<b>Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa</b> .....	76
6.5.2.	<b>Ocorrência 2 – Nova Floresta</b> .....	86
6.5.3.	<b>Ocorrência 3 – Sossêgo</b> .....	94
7.	<b>CONCLUSÃO</b> .....	101
2.	<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	104

## LISTA DE FIGURAS

	Pág.
<b>Capítulo II – Caracterização Da Área De Estudo</b>	
<b>Figura 1.</b> Localização das áreas de estudo, as ocorrências 1, 2 e 3.	8
<b>Figura 2.</b> Esboço geológico-tectônico da Província Borborema.	9
<b>Figura 3.</b> Mapa litológico regional.	11
<b>Figura 4.</b> Perfil hidrogeológico esquemático da área do município de Areia.	13
<b>Figura 5.</b> (A) Conglomerado laterítico; (B) crosta laterítica; (C) rocha da FSM; (D) arenito médio silicificado e conglomerático da FSM.	14
<b>Capítulo IV – Fundamentação Teórica</b>	
<b>Figura 6.</b> Meio homogêneo de forma cilíndrica.	21
<b>Figura 7.</b> Potencial no semiespaço gerado pela injeção de corrente em um ponto.	22
<b>Figura 8.</b> Medição da diferença de potencial entre dois pontos afastados do ponto de injeção de corrente.	22
<b>Figura 9.</b> Configuração tetraeletródica usual de campo.	23
<b>Figura 10.</b> Resistividades nos meios homogêneo e heterogêneo.	24
<b>Figura 11.</b> Faixas de variação nos valores de resistividade de solos, sedimentos e rochas.	26
<b>Figura 12.</b> Configuração do arranjo gradiente multinível.	29
<b>Capítulo V - Metodologia</b>	
<b>Figura 13.</b> Eletrorresistivímetro Bodenseewerk GGA 30, do Laboratório de Petrofísica da UFCG.	31
<b>Figura 14.</b> (A) Plugadeira portátil com motor a gasolina, acompanhada de conjunto de brocas e hastes, reservatório de água e pulverizadores; (B) plugadeira de bancada; (C) serra de bancada, para dimensionamento das amostras; e (D) retificadora de plugues.	32
<b>Figura 15.</b> (A) Amostras da Ocorrência 1, em forma de cilindro, para a análise de porosidade; (B) balança de precisão para a pesagem das amostras cilíndricas; (C) Permoporosímetro Ultraporoperm 500 disponível no Laboratório de Petrofísica da UFCG.	33
<b>Figura 16.</b> (A) Lâminas delgadas analisadas e (B) microscópio Carl Zeiss utilizado.	36

- Figura 17.** Medidor portátil multiparâmetros HI98194. (A) Sonda e medidor; e (B) conjunto completo. Fonte: Portal Hanna Instruments (2024). 37

## Capítulo VI – Resultados e Discussão

<b>Figura 18.</b> Localização das linhas geofísicas registradas na Ocorrência 1.	38
<b>Figura 19.</b> Seção geométrica Barra L1.	40
<b>Figura 20.</b> Seção geométrica Barra L2.	40
<b>Figura 21.</b> Seção geométrica Barra L3.	41
<b>Figura 22.</b> Seção geométrica Barra L4.	41
<b>Figura 23.</b> Seção geométrica Barra L6.	42
<b>Figura 24.</b> Seção geométrica Barra L5.	43
<b>Figura 25.</b> Seção geométrica Barra L7.	43
<b>Figura 26.</b> Localização das linhas geofísicas registradas na Ocorrência 2.	45
<b>Figura 27.</b> Seção geométrica NF-02.	46
<b>Figura 28:</b> Seção geométrica NF-03	47
<b>Figura 29:</b> Seção geométrica NF-04.	48
<b>Figura 30:</b> Seção geométrica NF-05.	49
<b>Figura 31:</b> Seção geométrica NF-06.	50
<b>Figura 32.</b> Seção geométrica NF-07.	51
<b>Figura 33.</b> Seção geométrica NF-01.	52
<b>Figura 34.</b> Localização dos poços na Ocorrência 3 - Sossêgo e entorno.	54
<b>Figura 35.</b> Seção geométrica Sossêgo L1.	55
<b>Figura 36.</b> Seção geométrica Sossêgo L2.	56
<b>Figura 37.</b> Seção geométrica Sossêgo L3.	57
<b>Figura 38.</b> Seção geométrica Sossêgo L4.	58
<b>Figura 39.</b> Seção geométrica Sossêgo L5.	59
<b>Figura 40.</b> Localização das amostras coletadas na Ocorrência 1 - Barra de Santa Rosa.	60
<b>Figura 41.</b> Localização das amostras de rocha coletadas na Ocorrência 2 – Nova Floresta.	62
<b>Figura 42.</b> Localização das amostras de rocha coletadas na Ocorrência 3 - Sossêgo.	64
<b>Figura 43.</b> Configuração das Formação Campos Novos em diferentes escalas: (a) adaptado de <i>Earthstar Geographics</i> , SGB-CPRM, Oliveira <i>et al.</i> , 2014. Carta Litoestratigráfica 1:1.000.000; (b) adaptado de SBG-CPRM, Cavalcante <i>et al.</i> , 2018. FOLHA PICUÍ SB.24-Z-B-VI. 1:100.000.	66

- Figura 44.** (A) Imagem do MEV sobre a lâmina da amostra A7 (ou lâmina P7); (B) Fotomicrografia correspondente da área analisada pelo MEV. Nota: Qz: quartzo, Kln: caulinita, Fsp: feldspato. 67
- Figura 45.** (A) Análise do MEV no ponto 41, localizado sobre cristal de feldspato dissolvido; (B) espectro dos elementos químicos presentes; (C) gráfico da fração atômica, em %, dos elementos químicos; (D) gráfico da fração de peso, em %, no mesmo ponto. 68
- Figura 46.** (A) Análise do MEV no ponto 39, localizado sobre cristal de caulinita; (B) espectro dos elementos químicos presentes; (C) gráfico da fração atômica, em %, dos elementos químicos; e (D) gráfico da fração de peso, em %. 69
- Figura 47.** Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 1. A camada saturada em água é vista nas cores azul e roxo. 70
- Figura 48.** Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 2$ ;  $R_w = 2,64 \Omega m$ ) para a Ocorrência 1. 71
- Figura 49.** Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 2. 72
- Figura 50.** Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 1,4$ ;  $R_w = 2,96 \Omega m$ ) para a Ocorrência 2. 73
- Figura 51.** (A) Amostra coletada no ponto 3: gnaiss alterado em leito de estrada de terra, erodida pela ação da chuva. (B) Amostra coletada no ponto 4: Gnaiss branco alterado, com aspecto arenoso, misturado a basalto. 74
- Figura 52.** Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 3. 74
- Figura 53.** Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 1,4$ ;  $R_w = 2,45 \Omega m$ ) para a Ocorrência 3. 75
- Figura 54.** Localização dos poços na Ocorrência 1 e entorno. 76
- Figura 55.** Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L. 80
- Figura 56.** Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L. 80
- Figura 57.** Concentrações de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L. 82
- Figura 58.** Valores de pH em relação aos limites inferior e superior, iguais a 6 e 9, respectivamente. 82

<b>Figura 59.</b> Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L.	83
<b>Figura 60.</b> Concentrações de Alumínio superiores aos VMP de 0,2 mg/L.	84
<b>Figura 61.</b> Concentrações de Ferro Total superiores aos VMP de 0,3 mg/L.	84
<b>Figura 62.</b> Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L.	85
<b>Figura 63.</b> Concentrações de Sulfato superiores aos VMP de 250 mg/L.	86
<b>Figura 64.</b> Localização dos poços na Ocorrência 2 – Nova Floresta.	87
<b>Figura 65.</b> Valores de pH em relação aos limites inferior e superior, iguais a 6 e 9, respectivamente.	90
<b>Figura 66.</b> Valores de Cor superiores aos VMP de 15 mg Pt-Co/L.	91
<b>Figura 67.</b> Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L.	91
<b>Figura 68.</b> Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L.	92
<b>Figura 69.</b> Concentrações de Alumínio superiores aos VMP de 0,2 mg/L.	92
<b>Figura 70.</b> Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L.	93
<b>Figure 71.</b> Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L.	93
<b>Figura 72.</b> Concentrações de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L.	94
<b>Figura 73.</b> Localização dos poços na Ocorrência 3 e entorno.	95
<b>Figura 74.</b> Valores de Turbidez superiores aos VMP de 5 µT.	97
<b>Figura 75.</b> Valores de Cor superiores aos VMP de 15 mg Pt-Co/L.	97
<b>Figura 76.</b> Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L.	98
<b>Figura 77.</b> Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L.	98
<b>Figura 78.</b> Concentrações de Ferro Total superiores aos VMP de 0,3 mg/L.	99
<b>Figura 79.</b> Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L.	99
<b>Figura 80.</b> Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L.	100
<b>Figura 81.</b> Valores de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L.	100

## LISTA DE TABELAS

	Pág.
<b>Capítulo VI – Resultados e Discussão</b>	
<b>Tabela 1.</b> Resultados da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 1 - Barra de Santa Rosa.	61
<b>Tabela 2.</b> Resultados da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 2 - Nova Floresta.	63
<b>Tabela 3.</b> Resultados da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 3 - Sossêgo.	64
<b>Tabela 4.</b> Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 1 e entorno.	78
<b>Tabela 5.</b> Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 2.	88
<b>Tabela 6.</b> Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 3 e entorno.	96

**LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS**

- AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba
- ANA – Agência Nacional das Águas
- SBG - Serviço Geológico do Brasil
- BM – Basalto Macau
- CE – Caminhamento Elétrico
- CTRN - Centro de Tecnologia e Recursos Naturais
- CPRM – Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais / Atual SBG
- ER – Eletrorresistividade
- ERT – Tomografia Elétrica
- FCN – Formação Campos Novos
- FSM – Formação Serra dos Martins
- GeoSBG – Serviço de Geociências do SBG
- GOD - *Groundwater confinement* × *Overall lithology* × *Depth to groundwater table*
- IBGE Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
- IFPB – Instituto Federal da Paraíba
- ILS - Índice de Saturação de Langelier
- IP – Polarização Induzida
- LabPetro – Laboratório de Petrofísica da UAMG/UFCEG
- LD – Limite De Detecção Mínimo
- MEV – Microscópio Eletrônico de Varredura
- MS – Ministério da Saúde
- ODS – Objetivos do Desenvolvimento Sustentável
- ONU – Organização das Nações Unidas
- pH – Potencial Hidrogeniônico
- PPGEGRN - Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Gestão de Recursos Naturais
- SDT – Sólidos Dissolvidos Totais
- SEV – Sondagem Elétrica Vertical
- SIAGAS - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas

SIG-AESA – Sistema de Informações Geográficas da AESA

SNIR – Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos

SP – Potencial Espontâneo

UAMG - Unidade Acadêmica de Mineralogia e Geologia

UFCG - Universidade Federal de Campina Grande

UFOPA - Universidade Federal do Oeste do Pará

UFPE – Universidade Federal de Pernambuco

UTM - *Universal Transverse Mercator*

VLf - *Very Low Frequency*

VMP - Valores Máximos Permitidos

## 1. INTRODUÇÃO

A região nordeste do Brasil é notadamente conhecida por sua escassez hídrica, que se expressa pela falta de água para consumo da população e agropecuária. Em toda a região nordeste, falta água nas torneiras de 27,6% dos nordestinos e 72% da população não possui esgotamento sanitário (Gitel e Peres, 2020).

Na área rural são utilizados dispositivos para a captação e armazenamento de água da chuva, tais como calhas que a direcionam para cisternas e açudes. Alternativamente, caminhões pipa são bastante utilizados para minimizar a falta de abastecimento de água. Além disso, a água subterrânea é uma boa alternativa, já que esse recurso está presente no local, o que demanda menor custo para transporte, armazenamento e distribuição.

Situadas em uma região de deficiência hídrica, as microrregiões do Curimataú e Seridó da Paraíba encontram-se sobre sedimentos das formações Serra dos Martins e Campos Novos, cujo potencial para o armazenamento e a produção de água subterrânea é ainda desconhecido.

As rochas sedimentares em geral apresentam propriedades de armazenamento e de transmissibilidade de água muito superiores às das rochas ígneas ou metamórficas, constituindo-se em reservatórios granulares com maior potencial para a produção de água subterrânea. A porosidade, por exemplo, que é a propriedade que controla a capacidade de armazenamento de água, varia geralmente entre 10% e 20% em rochas sedimentares coerentes e 25 a 50% nas rochas sedimentares incoerentes; enquanto em rochas ígneas tipo granito varia de 0,05% a 4%, nos basaltos de 2% a 12%, e nas metamórficas varia de 0,2% a 0,5% (Feitosa *et al.*, 2008). Dessa forma, espera-se que as formações sedimentares sejam reservatórios ideais de água subterrânea, tanto em termos de quantidade quanto em qualidade.

A presente pesquisa visa avaliar o potencial dos depósitos sedimentares das formações Serra dos Martins e Campos Novos, nas microrregiões do Curimataú e Seridó paraibanos, para a produção de água subterrânea para abastecimento da população local.

## **1.1. OBJETIVOS**

### **1.1.1. Objetivo geral**

Avaliar o potencial das formações Serra dos Martins e Campos Novos para a produção de água subterrânea, considerando aspectos hidrogeológicos, químicos e ambientais que possam influenciar a sua disponibilidade e utilização sustentável. O estudo deve incluir a caracterização das litologias predominantes e a definição dos parâmetros físico-químicos da água, de forma a possibilitar sua adequação para consumo humano e outras finalidades.

### **1.1.2. Objetivos específicos**

- Registrar dados geofísicos em campo, coletar amostras de rochas e realizar ensaios petrofísicos em laboratório.
- Realizar a caracterização petrográfica das formações Serra dos Martins e Campos Novos.
- Avaliar o potencial hídrico das áreas investigadas para a produção de água subterrânea, considerando as análises geofísicas, petrográficas e petrofísica das rochas.
- Avaliar a qualidade da água subterrânea quanto aos parâmetros físico-químicos.
- Calcular o volume de água subterrânea disponível nas formações.

## **1.2. ASPECTOS SOCIOECONÔMICOS E AMBIENTAIS**

A produção de água subterrânea no semiárido paraibano envolve diversos aspectos socioeconômicos e ambientais importantes, dados os desafios específicos da região, marcada por sua escassez hídrica e pela dependência das comunidades locais em relação a essa fonte de água.

### **1.2.1. Aspectos Socioeconômicos**

Dependência Econômica e Social da Água Subterrânea: No semiárido paraibano, a água subterrânea é essencial para o abastecimento doméstico e para o uso agrícola, especialmente em comunidades rurais onde não há rios ou açudes perenes. Pequenos agricultores dependem dessa fonte de água para irrigação de culturas de subsistência, o que garante a segurança alimentar e contribui para a economia local (Azevedo, 2017; Aguiar, 2015).

- **Custos de Perfuração e Manutenção de Poços:** A escavação de poços é um processo caro, exigindo maquinário especializado. Os custos de perfuração e manutenção ainda são uma barreira significativa para comunidades mais carentes. O investimento por meio de iniciativas do governo é fundamental para sustentar as atividades econômicas locais, mas também pressiona a economia das famílias e de pequenos negócios (Costa da Cruz *et al.*, 2022).
- **Geração de Emprego e Renda:** A presença de água subterrânea acessível possibilita a prática agrícola, que cria empregos locais e diversifica a economia regional. Além disso, o uso sustentável dessa água pode promover o desenvolvimento de pequenas cadeias produtivas de hortaliças, frutas e produtos regionais, dinamizando a economia e proporcionando uma alternativa à pecuária extensiva (Silva e Martins, 2024; Ribeiro *et al.*, 2024).

### 1.2.2. Aspectos Ambientais

- **Superexploração e Exaustão dos Aquíferos:** A captação excessiva de água subterrânea pode levar ao esgotamento dos aquíferos, ameaçando sua sustentabilidade. O semiárido paraibano enfrenta o risco de diminuição dos níveis de água nos aquíferos devido à superexploração, agravada pela escassez de recarga natural, já que as chuvas são poucas e irregulares. Neste sentido, é preciso realizar a exploração sustentável deste recurso mineral (Ramos, 2021; Fontes Junior, 2021; Valões *et al.* 2022).
- **Contaminação dos Recursos Hídricos:** A contaminação por esgoto doméstico nos aglomerados urbanos e o uso de agrotóxicos e fertilizantes em atividades agrícolas no semiárido podem contaminar os aquíferos, especialmente em áreas onde a prática da agricultura intensiva é incentivada como meio de aumentar a produção. Com isso, resíduos químicos podem infiltrar-se no solo e alcançar os reservatórios subterrâneos, reduzindo a qualidade da água e apresentando riscos à saúde (Rios e Rabelo, 2021; Rios, 2021; Costa, 2023; Silva *et al.* 2024; Tôrres *et al.*, 2024).
- **Impactos na Biodiversidade e no Solo:** A exploração da água subterrânea afeta o equilíbrio ambiental, pois a disponibilidade de água influencia diretamente a vegetação nativa e a fauna local. A retirada excessiva de água pode impactar os ecossistemas ao reduzir a umidade do solo e enfraquecer a vegetação típica da

caatinga, que tem um papel essencial na manutenção do microclima e na proteção do solo contra a erosão (Silva Júnior, 2020).

- **Recarga Natural e Conservação dos Aquíferos:** No semiárido paraibano, a baixa recarga natural dos aquíferos é um desafio, pois as chuvas são irregulares e insuficientes para recompor os níveis de água de forma rápida. Para preservar esses recursos, é essencial promover práticas de conservação, como o uso racional e técnicas de captação de água de chuva, que possam ajudar a reabastecer os aquíferos e reduzir a pressão sobre eles (Mélo *et al.*, 2024; Magalhães, 2021).

A produção de água subterrânea no semiárido paraibano é crucial para a sobrevivência e desenvolvimento econômico da região, mas exige um equilíbrio cuidadoso entre exploração e conservação. Políticas públicas voltadas para o manejo sustentável dos recursos hídricos, o controle da qualidade da água e o apoio às comunidades locais são fundamentais para assegurar a disponibilidade desse recurso vital sem comprometer os ecossistemas locais.

### 1.3. OBJETIVOS DO DESENVOLVIMENTO SUSTENTÁVEL

A produção de água subterrânea no semiárido paraibano contribui para vários Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030 da ONU, dada a importância dessa fonte hídrica para as comunidades locais. Os principais ODS relacionados são:

- **ODS 1 – Erradicação da Pobreza:** A água é um recurso básico para o desenvolvimento econômico e social. No semiárido, a água subterrânea permite a realização de atividades agrícolas e econômicas que geram renda e reduzem a pobreza, especialmente em comunidades rurais, proporcionando um futuro mais estável e promissor.
- **ODS 2 – Fome Zero e Agricultura Sustentável:** A agricultura familiar, essencial para a segurança alimentar da região, depende da água subterrânea para irrigação. A utilização sustentável dos aquíferos possibilita a produção de alimentos, reduz a insegurança alimentar e contribui para a geração de renda, criando condições para a agricultura em condições de seca.

- **ODS 3 – Saúde e Bem-Estar:** A qualidade da água subterrânea impacta a saúde das comunidades. Evitar a contaminação dos aquíferos e monitorar a qualidade da água contribuem para reduzir doenças relacionadas ao consumo de água contaminada, promovendo o bem-estar da população.
- **ODS 6 – Água Potável e Saneamento:** Esse objetivo visa garantir a disponibilidade e o gerenciamento sustentável da água para todos. No semiárido, onde a escassez hídrica é uma constante, a água subterrânea é uma das principais fontes de abastecimento para consumo doméstico e irrigação agrícola. Gerir de forma sustentável esse recurso é crucial para assegurar água potável e acessível para as comunidades.
- **ODS 12 – Consumo e Produção Responsáveis:** O uso racional da água subterrânea está alinhado com o consumo responsável. Práticas sustentáveis de extração, como técnicas que evitem desperdício e incentivem a recarga dos aquíferos, ajudam a conservar esse recurso e minimizam os impactos ambientais associados.
- **ODS 13 – Ação Contra a Mudança Global do Clima:** Com o agravamento das secas pela mudança climática, o manejo adequado da água subterrânea torna-se vital. A preservação dos aquíferos e a recarga através de técnicas como a captação de água de chuva aumentam a resiliência das comunidades locais frente aos períodos prolongados de estiagem.
- **ODS 15 – Vida Terrestre:** A água subterrânea tem um papel importante na preservação dos ecossistemas do semiárido, especialmente da vegetação da caatinga. A exploração consciente do recurso contribui para a conservação da biodiversidade, uma vez que o equilíbrio hídrico afeta diretamente a fauna e a flora locais.

A gestão e a utilização sustentável da água subterrânea no semiárido paraibano são essenciais para o desenvolvimento socioeconômico e ambiental da região e contribuem diretamente para a realização de múltiplos ODS. Proteger e conservar os aquíferos asseguram tanto a segurança hídrica como a promoção de um desenvolvimento equilibrado e resiliente para as populações locais.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

As áreas de estudo estão situadas nas microrregiões do Curimataú Ocidental e Seridó Oriental Paraibano. O acesso às áreas é feito pelas rodovias BR-104, PB-137 e PB-167, que interligam Campina Grande a Barra de Santa Rosa, Cuité, Nova Floresta, Picuí e Sossego; e rodovia BR-230, que liga Campina Grande a Olivedos. As referidas áreas foram escolhidas devido à localização das formações sedimentares Serra dos Martins (FSM) e Campos Novos (FCN), que apresentam características geológicas e fisiográficas que podem contribuir para a acumulação de água subterrânea. A proximidade da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), onde está o Laboratório de Petrofísica (LabPetro), também é um fator de relevância pelo acesso a seus equipamentos e logística.

A FSM é uma unidade sedimentar de origem continental que apresenta as seguintes características fisiográficas: coberturas sedimentares residuais descontínuas; morfologias planares e tabulares; bordas erodidas por dissecação; espessuras entre 5 e 120 m, assentando-se em discordâncias sobre rochas pré-cambrianas (Marques, 2016). A FSM cobre parcialmente vários maciços cristalinos no Nordeste Brasileiro, entre as cotas 650 e 700 m. A sua cronologia é ainda objeto de discussão, mas sabe-se que a elevação da FSM às suas cotas atuais foi resultado da inversão do relevo. Este fenômeno foi causado por reativações tectônicas cenozoicas e pelo soerguimento cenozoico resultante do vulcanismo neógeno (Maia *et al.*, 2016). Já a FCN, originada da alteração das cinzas do vulcanismo Macau (Cenozoico), são formas com pouca extensão, geralmente com topos irregulares e vertentes íngremes. A gênese e localização destes edifícios vulcânicos estaria relacionada com atuação de *hot spot*, o mesmo que gerou o Arquipélago de Fernando de Noronha, onde, posteriormente, a erosão removeu as partes externas, deixando exposto, na atualidade, as antigas chaminés (Costa *et al.*, 2020).

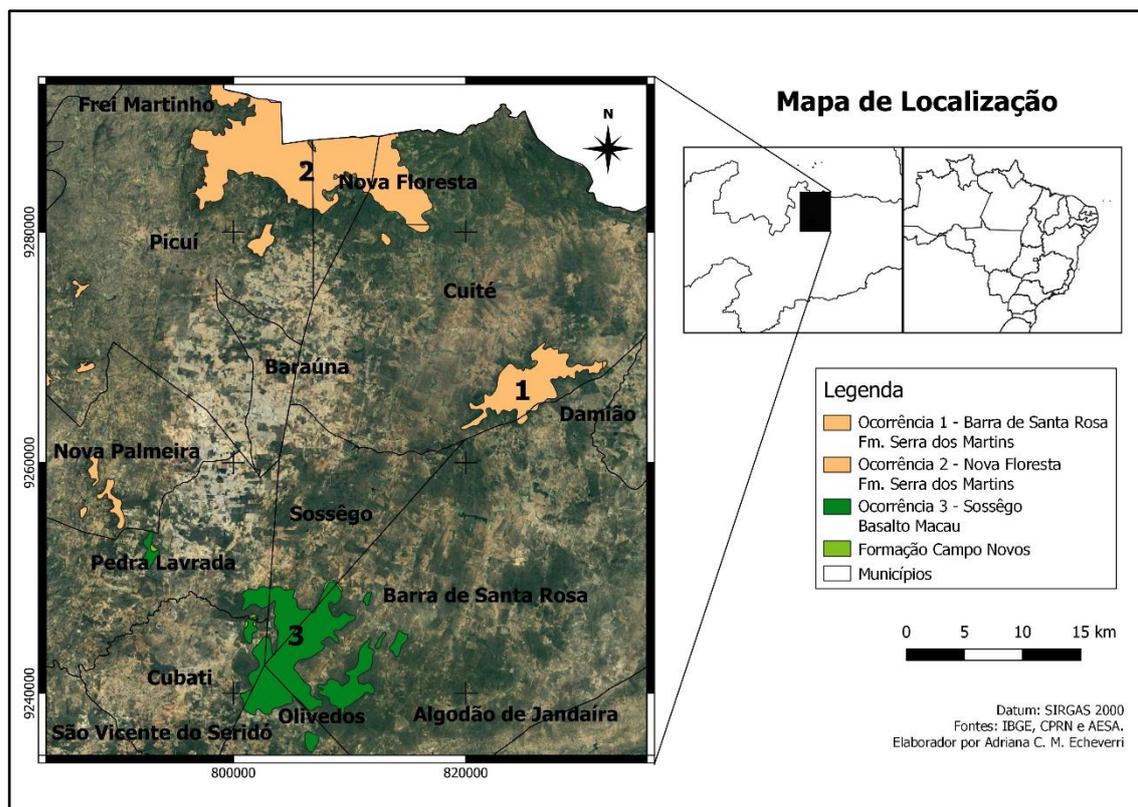
O Estado da Paraíba é dominado por rochas do embasamento cristalino, ocupando, ao menos,  $\frac{3}{4}$  da sua extensão territorial. Contudo, algumas formações sedimentares podem ser observadas, as quais podem conter reservatórios de água. As formações Serra dos Martins e Campos Novos são duas dessas ocorrências, as quais são objeto deste estudo. Essas formações sedimentares foram mapeadas na Paraíba (CPRM, 2021) nos municípios

de Picuí, Cuité, Nova Floresta, Barra de Santa Rosa, Sossego, Olivedos, Araruna, Cacimba de Dentro, Dona Inês, Solânea, Bananeiras e Areia.

No âmbito deste estudo, apenas as ocorrências 1, 2 e 3 do mapa da Figura 1 serão consideradas. A investigação destas ocorrências sedimentares foi organizada em função da seguinte distribuição geográfica:

- Ocorrência 1: Nomeada “Barra de Santa Rosa” por encontrar-se mais próxima da cidade homônima. Esta ocorrência se divide entre os municípios de Cuité e de Barra de Santa Rosa, sendo composta pelos litotipos da Formação Serra dos Martins. Localiza-se integralmente na microrregião do Curimataú Ocidental (Figura 1).
- Ocorrência 2: Nomeada “Nova Floresta”, se divide entre os municípios de Picuí, Nova Floresta e Cuité. Esta ocorrência sedimentar também é composta pelos litotipos da Formação Serra dos Martins. Encontra-se nas microrregiões do Seridó Oriental e Curimataú Ocidental (Figura 1).
- Ocorrência 3: Nomeada “Sossêgo”, se divide entre os municípios de Barra de Santa Rosa, Sossêgo, Pedra Lavrada e Cubati. Esta ocorrência sedimentar é a única investigada neste projeto que é composta pelos litotipos da Formação Campos Novos. Está localizada na microrregião do Curimataú Ocidental (Figura 1).

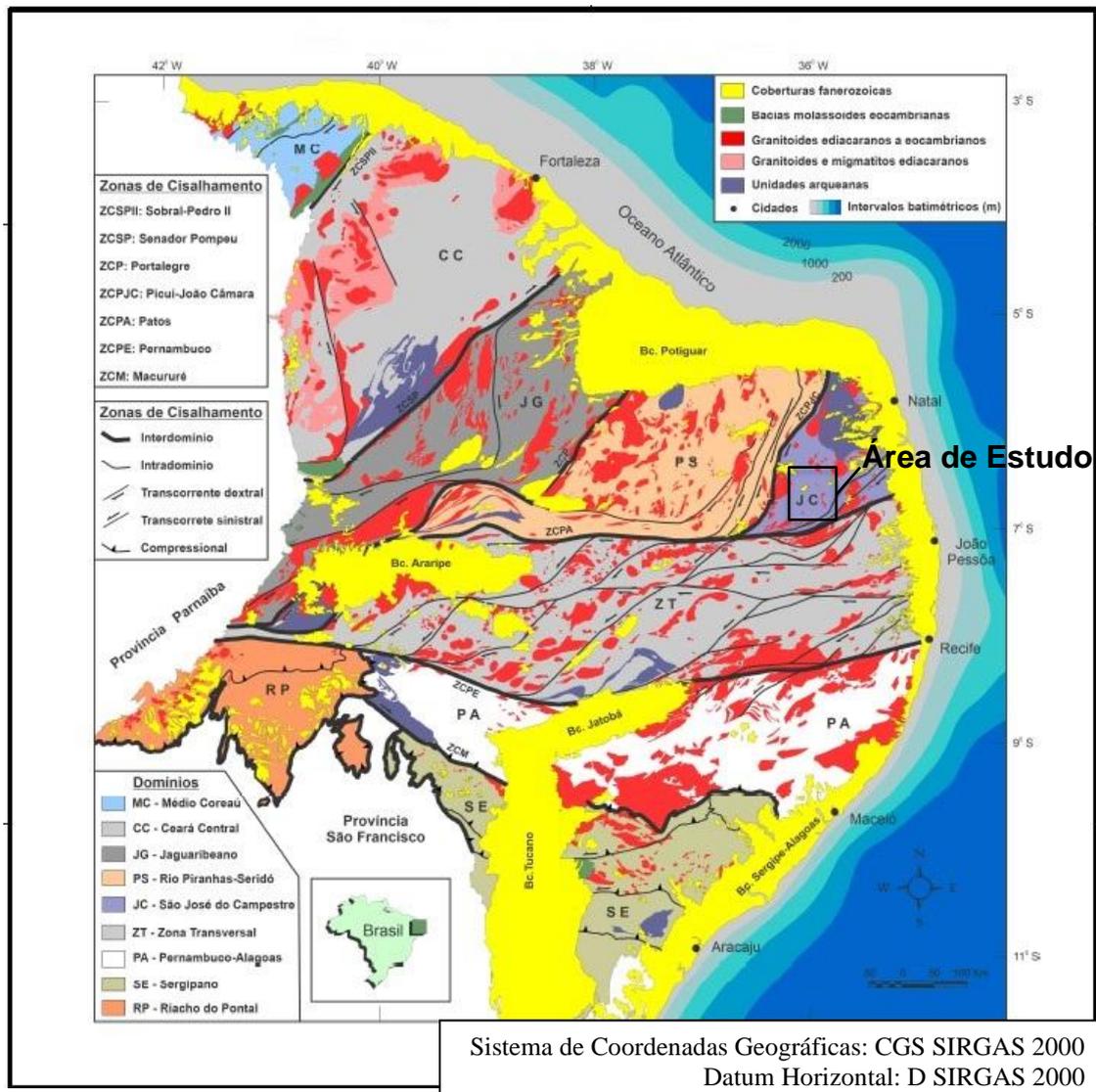
Figura 1 - Localização das áreas de estudo das ocorrências 1, 2 e 3. Adaptado de IBGE, CPRM, AESA e Google Earth.



## 2.1. CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo está no domínio da Província Borborema (PB), um domínio geológico-estrutural localizado no Nordeste do Brasil, limitado a sul pelo Cráton do São Francisco, a oeste pela Bacia do Parnaíba e a norte e leste pelas bacias costeiras (Figura 2). Segundo Oliveira (2008), a Província Borborema é apresentada como o resultado da ocorrência e superposição de mais de uma orogênese ao longo do tempo, sendo a sua complexidade tectônica atribuída à aglutinação de terrenos alóctones de diferentes origens, separados por grandes zonas de cisalhamento. Contudo, alguns pesquisadores afirmam a existência apenas de faixas dobradas ensiálicas, cujos sedimentos neoproterozoicos, depositados sobre embasamento arqueano a paleoproterozoico, foram afetados pela Orogênese Brasileira (Neves, 2003; Neves *et al*, 2006).

Figura 2 – Esboço geológico-tectônico da Província Borborema. Fonte: Santos *et al.* (2021).



Segundo Almeida *et al.* (1981), a Província Borborema é caracterizada por domínios gnáissico-migmatíticos com idades que variam do Arqueano ao Paleoproterozoico, que ocorrem sotopostos ou em contato tectônico com domínios cedo a tarde neoproterozoicos, abrangendo sequências de rochas supracrustais intrudidas por volumoso magmatismo granítico, sendo fortemente deformada durante a Orogênese Brasileira-Panafricana (Brito Neves *et al.*, 2000, 2014). Vários autores, baseados em dados estruturais, geofísicos e geocronológicos, dividem a Província Borborema em domínios ou subprovíncias limitadas por lineamentos e/ou zonas de cisalhamento de escala regional a continental (Brito Neves *et al.*, 2000; Van Schmus *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2010; Santos *et al.*, 2017, 2018; Araújo Neto *et al.*, 2021). A área de estudo está localizada no Domínio São

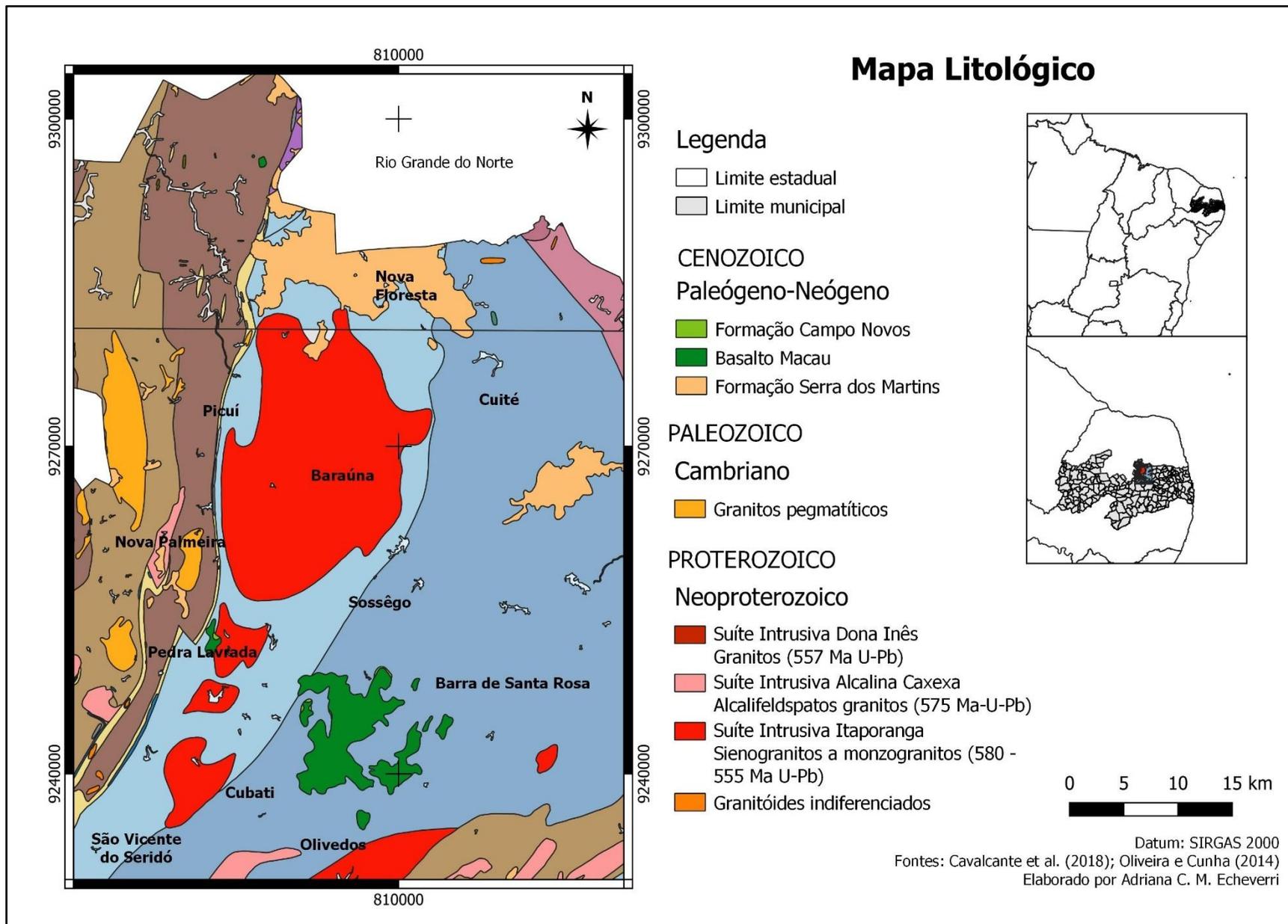
José do Campestre, entre as Zonas de Cisalhamento Picuí-João Câmara e Patos (Figura 2).

Segundo Marques (2016), a Província da Borborema originou-se em três ciclos de pulsos de soerguimentos que passaram por fortes processos erosivos, resultando em três macro-unidades morfoestruturais. O primeiro pulso foi o soerguimento que elevou o nível superior inicial de toda a província, de 650-700 m para 800-900 m (domo), confeccionando o Planalto da Borborema; o segundo foi o rebaixamento que originou o ciclo do Baixo Sertão ou Depressão Sertaneja, entre as cotas 100-300 m; o terceiro pulso foi o rebaixamento e está associado às flexuras litorâneas, com formação das planícies litorâneas e seus terraços com cotas 0-100 m (Depressão Litorânea).

Nesta área são encontradas rochas do embasamento cristalino pré-cambriano e depósitos sedimentares das formações Serra dos Martins (FSM) e Campos Novos (FCN). Segundo Almeida (1969), a Formação Serra dos Martins é composta, a partir de sua base, por arenitos homogêneos e friáveis, de coloração esbranquiçada, mal selecionados, localmente conglomeráticos e caulíníticos, com camadas silicificadas. Já na sua porção intermediária são encontradas camadas de arenitos argilosos, homogêneos, de cor amarela avermelhada, com grãos de quartzo sub angulosos a arredondados. No topo da formação ocorre uma crosta laterítica de cor vermelha a roxa, com seixos de quartzo angulosos, mal selecionados (Guimarães *et al.*, 2008).

A Figura 3 apresenta o mapa litológico da região, adaptado do Serviço Geológico do Brasil (CPRM, 2024) e utilizando mapas das bases de dados do IBGE (2024) e AESA (2024).

Figure 3 - Mapa litológico regional. Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2018) e Oliveira & Cunha (2014).

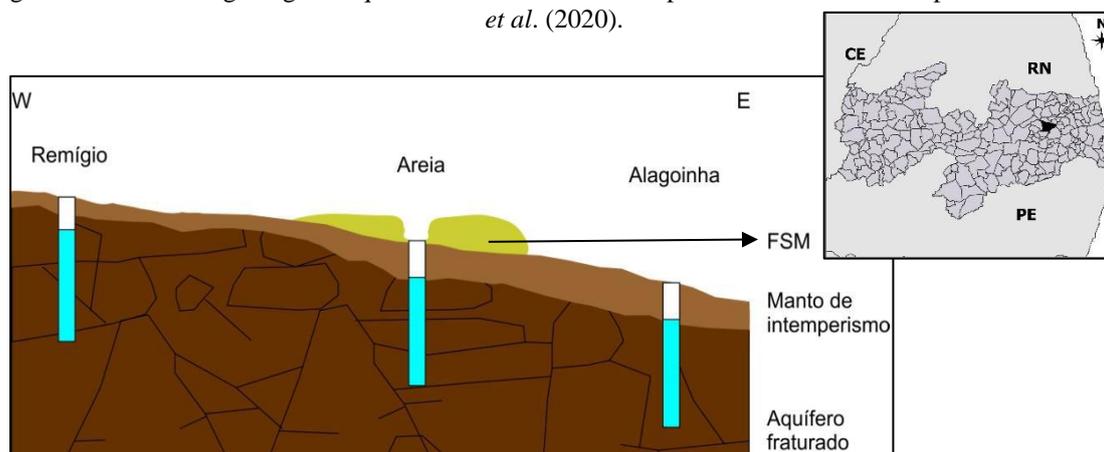


Nota: Continua na próxima página.



Assim como no município de Areia, a FSM ocorre capeando o embasamento cristalino, juntamente com o seu manto de intemperismo (Figura 4). Segundo Oliveira *et al.* (2020), a FSM e o manto de intemperismo favorecem as condições de infiltração e armazenamento das águas de recarga no aquífero fraturado. A presença de vegetação também propicia a percolação das águas meteóricas.

Figure 4 - Perfil hidrogeológico esquemático da área do município de Areia. Fonte: Adaptado de Oliveira *et al.* (2020).

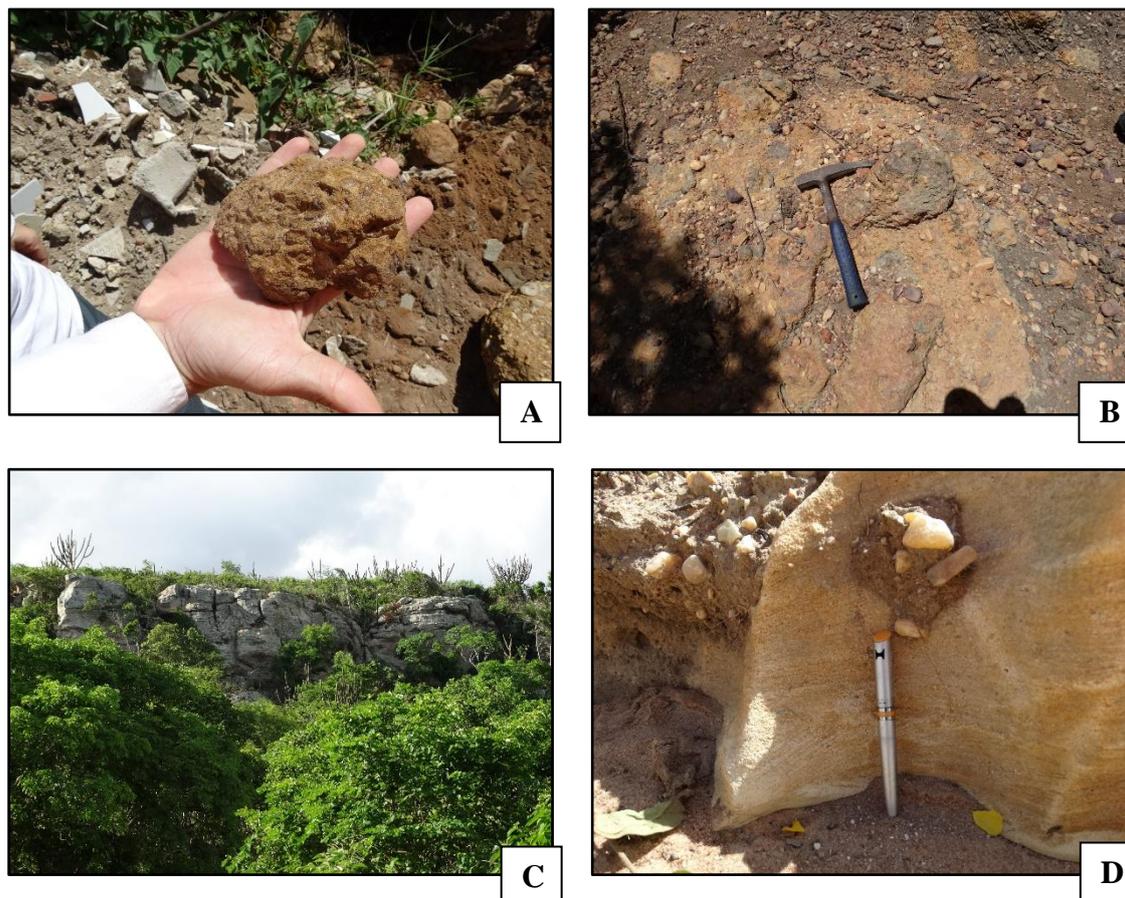


Segundo Coelho (2022), a porção superior da FSM encontra-se frequentemente silicificada ou protegida por duricrosta ferruginosa ou laterítica, o que ajuda na preservação do relevo pretérito e atual contra a ação dos processos erosivos (Maia *et al.*, 2016), inclusive aqueles atuantes nas escarpas (Figura 5). De acordo com as informações contidas no Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte, a Formação Serra do Martins se caracteriza como arenitos médios a conglomeráticos (Figuras 5), arenitos argilosos e crosta laterítica com seixos de quartzo (Angelim *et al.*, 2006). A duricrosta apresenta significativa diversidade em relação à rocha parental, envolvendo diversos processos genéticos, grande variabilidade de composições químicas, físicas e morfológicas, e ocorrência em diversos locais. Segundo estudo realizado por Coelho (2022), as lateritas desenvolveram-se a partir das rochas cristalinas do embasamento Pré-Cambriano, envolvendo o desenvolvimento de perfis lateríticos *in situ*.

De acordo com Oliveira (2008), fases de intemperismo e de aplainamentos na superfície do Planalto da Borborema possibilitaram a sedimentação da FSM, de origem fluvial, cuja deposição provavelmente ocorreu após 70 Ma (Pós-Campaniano até o Paleoceno ou Eoceno). Um soerguimento subsequente, possivelmente elevou a superfície da Borborema e com ela os sedimentos da FSM às altitudes atuais de até 920 m. Ainda

segundo Oliveira (2008), em consequência, se iniciou um novo aplainamento, denominado Cariris Velhos, atualmente exposto em patamares de cotas entre 200 e 420 m no Estado da Paraíba. Esse aplainamento resultou na dissecação da FSM, cujos testemunhos originaram os depósitos nos topos dos platôs atuais, interpostos a rochas magmáticas (desde o Oligoceno até o Mioceno).

Figura 5 – (A) Conglomerado laterítico; (B) crosta laterítica; (C) rocha da FSM; (D) arenito médio silicificado e conglomerático da FSM.



A Formação Campos Novos é descrita na literatura como composta por arenitos localmente silicificados e argilitos, estes últimos explorados comercialmente pelo conteúdo de argila do grupo das bentonitas, que ocorrem na região de Cubati, Pedra Lavrada e Boa Vista (Lages *et al.*, 2008). Nesta região encontra-se uma associação de vulcanismo do tipo fissural formado por basaltos e olivina basaltos amigdalóides, nos quais possuem na alteração das cinzas e poeira destes derrames, a provável origem das citadas bentonitas. Já em Boa Vista, ocorre um sistema deposicional flúvio-lacustre composto por laminações plano-paralelas nos argilitos, confirmando deposição por decantação, sobreposto e truncado por arenitos conglomeráticos, arenitos arcoseanos bem selecionados, subangulosos de granulação média a fina, com estratificações cruzadas

tangenciais e paleocanais preenchidos por conglomerados de base e arenitos médios a grossos, erodindo os argilitos (Lages *et al.*, 2008). As lavas almofadadas observadas em algumas áreas confirmam um regime aquoso a subaquoso para o derrame. A geometria da bacia se apresenta em formato meio-gráben com depocentro no sopé da Serra do Monte, que teve sua compartimentação controlada pela reativação da zona de cisalhamento de mesmo nome (Lages *et al.*, 2008). A continuidade de movimentos extensionais, após o preenchimento dos sedimentos, é atestada pelos falhamentos normais existentes em todo o depósito bentonítico e arenítico (Lages *et al.*, 2008). A área-fonte possui aporte de sedimentos indicativos de sentido NW, enquanto a matéria fossilífera caracterizada por troncos silicificados, folhas e demais fragmentos vegetais suportam o sistema deposicional e indicam a relação de profundidade entre os argilitos bentônicos (Lages *et al.*, 2008).

Souza *et al.* (2007), por meio do método de datação  $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ , obtiveram idades de 30,5 Ma (Oligoceno/Pupeliano) e 20,5 Ma (Mioceno/Aquitano) para o basalto inferior e superior, respectivamente, da região de Boa Vista, localizando-os no limite do vulcanismo basáltico de Macau-RN.

Na Folha Boqueirão SB.24-Z-D-III (Lages e Marinho, 2012), Estado da Paraíba, pode-se observar que o mapeamento realizado se restringiu a ocorrência da FCN aos limites da bacia visto que, a norte da cidade de Boqueirão, também incluída anteriormente como FCN, não foram observados litotipos correlatos a esta bacia, e sim a presença de litotipos pré-cambrianos (mármore, leuco-ortognaisses, metapiroxenitos, formações ferríferas etc.). Neste contexto a extensão do centro vulcânico abrange dimensões consideráveis (atingindo cerca de 80 km<sup>2</sup>) na área da Folha Boqueirão, no entanto, a ocorrência da FCN está limitada à faixa NE-SW contígua às encostas da Serra do Monte que serviu de anteparo para a deposição dos sedimentos (Lages *et al.*, 2008).

De acordo com Alves (2020), a Formação Campos Novos ocorre de forma a preencher depressões do embasamento cristalino, sendo formada por argilas montmoriloníticas de cores verde, creme e roxa, com arenitos grossos silicificados na base, podendo ocorrer arenitos sílticos com níveis argilosos e blocos de calcedônia intercalados. Seus sedimentos são continentais e depositados em ambiente de águas rasas, calmas e pouco profundas, em bacias tipo lacustre, fato confirmado com base na presença de madeira silicificada e fósseis de gastrópodes com moldes perfeitamente conservados.

O Magmatismo Macau (Sial, 1976) ou Magmatismo Cenozoico (Souza *et al.*, 2007) representam a atividade magmática mais recente registrada na Plataforma Sul-Americana (NGONGE *et al.*, 2016), os quais foram agrupados inicialmente por Sial (1976), como parte de uma suíte basáltica alcalina de idade terciária. Segundo Barros *et al.* (2021), esses eventos incluem *necks*, *plugs*, pequenos derrames e diques de composição alcalina, dispostos ao longo de um alinhamento N-S na região central dos estados do Rio Grande do Norte e da Paraíba, com cerca de 350 km de comprimento e 60 km de largura (Sial, 1976). Originalmente descritas na literatura como Formação Macau (Mayer, 1974), as rochas associadas ao Magmatismo Macau (Sial, 1976) são majoritariamente olivina basaltos, basanitos e ankaratritos, com ocorrências locais de nefelinitos (Rodrigues, 1976). Apresentam textura muito fina a microporfirítica, com xenocristais de olivina e piroxênio, além de estruturas de fluxo magmático e xenólitos ultramáficos. Segundo Sial (1976), o magma parental dessas rochas foi gerado por fusão parcial do manto sob altas pressões. Essa origem mantélica é corroborada pela identificação de xenólitos provenientes do manto (Oliveira *et al.*, 2013; Silveira, 2006).

### 3. REVISÃO DA LITERATURA

O método geofísico da eletrorresistividade é muito utilizado na prospecção de água subterrânea, tanto em rochas sedimentares quanto em rochas cristalinas. Diversos autores têm usado este método para a caracterização hidrogeológica a fim de identificar locais favoráveis para a instalação de poços de abastecimento.

Oliveira (2020) utilizou a eletrorresistividade para o reconhecimento hidrogeológico e prospecção de água subterrânea na região de Areia-PB. Em seu estudo, o método demonstrou bons resultados na identificação de contrastes resistivos em subsuperfície, indicando a presença de fraturamentos saturados em água. Nas regiões de baixa favorabilidade hidrogeológica, os resultados da eletrorresistividade em 2D demonstraram ser suficientemente eficazes para mapear contatos geológicos e descontinuidades do maciço. No formato 3D o autor conseguiu analisar a tridimensionalidade da anomalia condutiva, importante para um possível planejamento de perfuração de poços para captação de água subterrânea, no qual é necessário levar em consideração a direção de caimento da fratura e realizar a locação para captação da água nas zonas mais condutivas do terreno. Oliveira (2020) afirma que, com modelos de eletrorresistividade 3D, é possível evitar que dois ou mais poços sejam perfurados em uma mesma zona condutiva e capturem água de um mesmo conjunto de fraturas, prevenindo-se assim que a produção de um poço seja influenciada pela produção do outro e promovendo a preservação da reserva de água subterrânea, com o intuito de evitar a contaminação do aquífero por captações diversas.

Silva *et al.* (2021) utilizaram os métodos VLF (*Very Low Frequency*) e eletrorresistividade na caracterização do modelo de fenda de acumulação da água subterrânea em terrenos cristalinos em uma fazenda no município de Santo Antônio-RN. O uso integrado desses métodos e imagens aéreas permitiram identificar fraturas, a forte relação entre as anomalias indicadas pelas seções de resistividade aparente e os perfis de VLF, permitindo caracterizar o modelo de acúmulo de água subterrânea como riachofenda.

Monteiro e Lucena (2021) analisaram o grau de proteção natural do Aquífero Barreiras numa região onde ocorre o uso de fertilização química. O caráter hidráulico não confinado deste aquífero confere uma maior susceptibilidade à contaminação, que pode

ser causada pela lixiviação de excedentes da fertilização não assimilada pela plantação. Os referidos autores usaram dados hidrogeofísicos, obtidos a partir de modelos inversos de sondagens elétricas verticais (SEVs), em conjunto com registros de perfis de poços, o que possibilitou a aquisição de cartografias de condutância longitudinal e vulnerabilidade do aquífero com o método GOD - *Groundwater confinement*  $\times$  *Overall lithology*  $\times$  *Depth to groundwater table*.

Messias *et al.* (2019) realizaram um estudo geofísico na região do Alto Tacutu – Alto Essequibo, no sudeste da Guiana Inglesa, com o objetivo de encontrar água subterrânea por meio de levantamentos de resistividade elétrica, nas áreas de porosidade controlada por zonas de fraturas, utilizando os arranjos dipolo-dipolo e dipolo gradiente. A fim de avaliar a efetividade do método, foram instalados poços nas zonas onde foram registradas baixas resistividades. Observou-se que o fluxo de água obtido logo após a perfuração dos poços é fortemente controlado pelo grau de fraturamento das rochas ígneas que compõem o embasamento cristalino. Na maioria dos poços foi observada forte diminuição da resistividade elétrica com o aumento do grau de fraturamento. Além disso, uma diminuição consistente na vazão dos poços foi observada com o aumento da resistividade característica. Messias *et al.* (2019) concluíram que regiões profundas com baixos valores de resistividade elétrica nas seções geoeletricas são potenciais indicadores da presença de zonas de fratura interconectadas no embasamento cristalino, constituindo-se em zonas preferenciais para a perfuração de poços para a produção de água subterrânea.

Batista (2019) testou diferentes configurações do método da eletrorresistividade para investigar aquíferos fissurais na região do município de Campina Grande-PB. A região possui zonas de fraturas subverticais no embasamento cristalino, além de rochas alteradas e/ou sedimentos aluviais. A autora aplicou as técnicas de múltiplas sondagens elétricas verticais (SEVs), utilizando os arranjos Schlumberger, caminhamento elétrico (CE), gradiente multinível total e parcial. Os resultados mostraram que o caminhamento elétrico multinível pelo arranjo gradiente apresentou maior clareza na detecção das zonas de fraturas em relação às configurações que usaram sondagens elétricas verticais. As seções geoeletricas indicaram a presença de estruturas acumuladoras de água subterrânea nas anomalias de baixa resistividade elétrica, correlacionáveis a fraturamentos e/ou alterações na permeabilidade do meio. O caminhamento elétrico pelo arranjo gradiente apresentou vantagens operacionais em relação às demais configurações, sendo que o arranjo gradiente total forneceu uma imagem de maior resolução que o arranjo gradiente parcial.

Oliveira *et al.* (2021) realizaram um estudo geológico, hidrogeológico e geofísico na região de Nova Mamoré-RO, aplicando os métodos de eletrorresistividade associada a técnica de caminhamento elétrico (CE). A geologia local é constituída por coberturas sedimentares que se sobrepõem a litótipos do embasamento cristalino, tal como as formações sedimentares objeto do presente estudo. De acordo com os autores, a eletrorresistividade, assim como a maioria das técnicas de geofísica de prospecção para águas subterrâneas, reduz o erro nas locações de poços, mas não é um método essencialmente assertivo. Portanto, as sugestões dadas devem ser interpretadas como pontos favoráveis, onde há uma maior probabilidade, de acordo com as análises geofísicas e geológicas, de ocorrência de zonas fraturadas preenchidas com água no embasamento. Adicionalmente, os autores apontam a importância de execução de poços pioneiros, visando a descrição estratigráfica do material perfurado e sondagens de aferição, correlacionando-os posteriormente com dados obtidos da eletrorresistividade, possibilitando um maior acerto no cálculo da porosidade e permeabilidade do material geológico e das vazões possíveis.

Siqueira Neto *et al.* (2023) verificaram a oscilação do nível freático do aquífero livre da Formação Alter do Chão e a possível relação com os alagamentos permanentes no entorno da Universidade Federal do Oeste do Pará - UFOPA. Foram aplicadas as técnicas de Sondagem Elétrica Vertical (SEV) e Caminhamento Elétrico (CE). Além de identificar o perfil litológico local, os resultados indicaram oscilação de 7 m do nível d'água do aquífero e o CE possibilitou associar uma anomalia altamente resistiva da cobertura laterítica como a principal causa dos alagamentos na área investigada, por evitar a infiltração da água no solo.

## **4. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA**

### **4.1. MÉTODOS GEOELÉTRICOS**

Dentro dos métodos geofísicos de prospecção, os métodos geoeletricos são um grupo no qual estão inseridos os métodos elétricos e os eletromagnéticos, sendo o grupo dos métodos geoeletricos constituído pelos métodos da eletrorresistividade (ER), polarização induzida (IP) e potencial espontâneo (SP). Com os métodos geoeletricos é possível verificar os contrastes de propriedades físicas, tais como resistividade elétrica, cargabilidade e potencial natural entre os materiais geológicos que formam o substrato, e caracterizam-se por medir em superfície a resposta do substrato geológico à excitação por campos elétricos de origem natural ou superficial (Oliveira, 2020).

Os métodos geofísicos, mais especificamente os métodos elétricos, são de natureza não invasiva, ou seja, não alteram o meio físico e são de fácil aplicação e rapidez em grandes áreas e custo relativamente baixo, se comparado aos métodos invasivos (Braga, 2006).

#### **4.1.1. Eletrorresistividade**

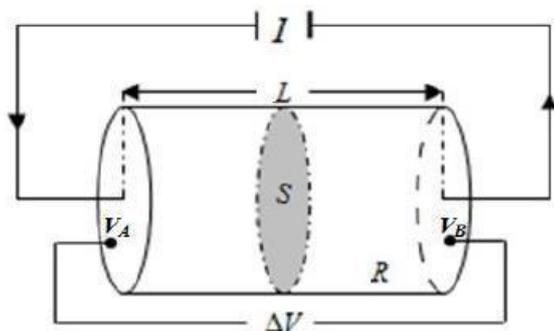
O método geofísico da eletrorresistividade é considerado o mais importante em pesquisas hidrogeológicas (Magalhães e Lucena, 2023). O seu princípio é baseado na determinação da resistividade elétrica dos solos e rochas, que concomitantemente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas. A resistividade elétrica é a propriedade física que apresenta um maior intervalo de valores possíveis em comparação com outras grandezas físicas medidas por outros métodos geofísicos. Neste sentido, o método da eletrorresistividade é amplamente utilizado na prospecção geofísica, na exploração mineral e na investigação de aquíferos subterrâneos, entre outras aplicações (Soares *et al.*, 2022).

Segundo Braga (2006), os diversos tipos litológicos apresentam como uma de suas características o parâmetro físico da resistividade elétrica que serve para exprimir seus estados, em termos de alteração, fraturamento, saturação etc., e até defini-los litologicamente sem a necessidades de métodos diretos de prospecção, tais como sondagens, registros de perfis de poços etc. Tratando-se da prospecção de água subterrânea, o método da eletrorresistividade apresenta boa resposta na identificação da

presença de água em descontinuidades da rocha, profundidade do topo rochoso e espessura de sedimentos, reconhecimento das características hidrogeológicas e as condições de fluxo de água subterrânea, identificação de diferentes camadas litológicas e estruturas tectônicas (Saraiva, 2010).

Baseada na Lei de Ohm, a relação entre resistividade ( $\rho$ ) e a resistência ( $R$ ) de um condutor homogêneo é dada pela Equação 1.

Figura 6 – Meio homogêneo de forma cilíndrica. Fonte: Batista (2020).



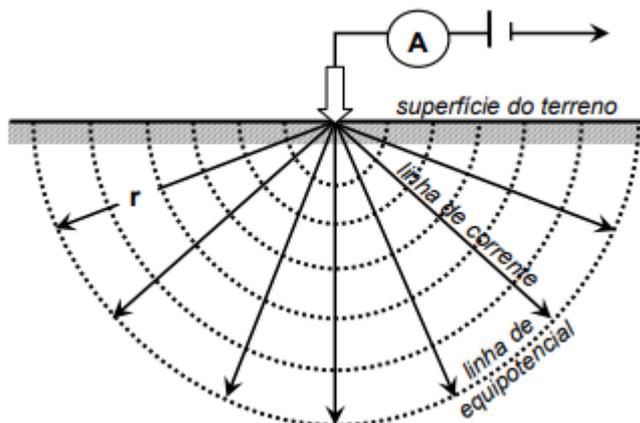
$$R = \rho L/S (\Omega) \quad (1)$$

Na qual  $L$  é o comprimento,  $S$  é a seção transversal do condutor e  $\rho$  é um coeficiente que depende da natureza e do estado físico do meio e recebe o nome de resistividade (Figura 6). Então a resistividade elétrica pode ser definida como:

$$\rho = R S/L (\Omega m) \quad (2)$$

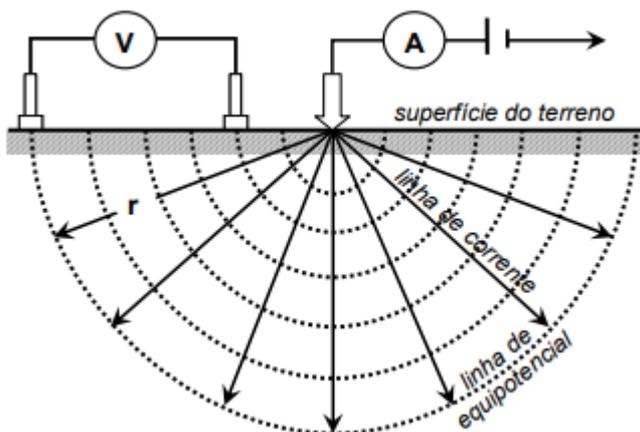
A resistividade é o produto da resistência elétrica por uma unidade de comprimento, sendo que a sua unidade no Sistema Internacional é ohm.metro ( $\Omega m$ ). Assim, a resistividade pode ser definida como a dificuldade de propagação da corrente elétrica em um meio geológico (Orellana, 1972 *apud* Magalhães e Lucena, 2023), enfatizando-se a condutividade iônica, sobretudo no deslocamento dos íons nas águas contidas nos poros (Braga, 2016). Em qualquer corpo tridimensional, a corrente elétrica não flui por um único caminho, como apresentado na Figura 7.

Figura 7 - Potencial no semiespaço gerado pela injeção de corrente em um ponto. Fonte: Braga (2006).



Tendo em vista uma bateria conectada ao solo (Figura 8), através de cabos e eletrodos, por dois pontos distantes um do outro, o solo, que não é um isolante perfeito, conduz a corrente elétrica gerada pela bateria. Nesta fase admite-se que a resistividade do solo é uniforme.

Figura 8 – Medição da diferença de potencial entre dois pontos afastados do ponto de injeção de corrente. Fonte: Braga (2006).



Usando-se a Equação 1 no semiespaço, obtém-se:  $R = \rho r / 2\pi r^2 = \rho / 2\pi r$ , substituindo em  $V = R I$  (Lei de Ohm), resulta em:

$$V = \rho I / 2\pi r \quad (3)$$

Então, considerando que o solo possui uma resistividade constante, pode-se definir sua resistividade como:

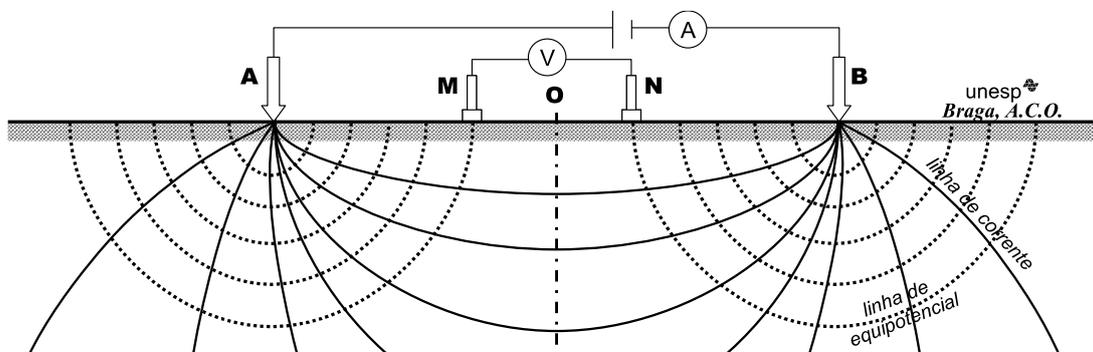
$$\rho = 2\pi r V / I \quad (4)$$

Na qual  $V$  é o potencial,  $I$  é a corrente elétrica,  $\rho$  é a resistividade elétrica e  $r$  é a distância entre o eletrodo de corrente e o ponto onde o potencial é medido.

Conectando-se um cabo condutor de uma bateria até um eletrodo de corrente, como apresentado na Figura 8, é possível medir o valor de intensidade da corrente  $I$ ; e conectando-se um voltímetro a dois eletrodos, um próximo ao eletrodo de corrente e o outro mais afastado (distância  $r$ ), é possível medir a diferença de potencial ( $\Delta V$ ), entre esses dois pontos.

Na prática, esse procedimento não é comum devido à grande distância entre os eletrodos de corrente. Assim, é necessário reduzir a distância entre os quatro eletrodos. Na configuração mais comum, utiliza-se quatro eletrodos (AMNB), conforme demonstrado na Figura 9.

Figura 9 - Configuração tetraeletródica usual de campo. Fonte: Braga (2016).



Frequentemente, os arranjos de campo dos principais métodos geoeletricos consistem em quatro eletrodos cravados na superfície do terreno. De acordo com a Figura 9, a corrente elétrica ( $I$ ) é aplicada no subsolo através dos eletrodos A e B, e a tensão ( $V$ ) criada é medida pelos eletrodos M e N. Considerando-se que o meio é homogêneo e usando a Equação 3, as tensões nos eletrodos M e N são dadas pelas Equações 5 e 6.

$$V_M = I\rho / 2\pi (1/AM - 1/BM) \quad (5)$$

$$V_N = I\rho / 2\pi (1/AN - 1/BN) \quad (6)$$

A diferença de tensão medida no equipamento para a posição dos eletrodos MN será  $\Delta VMN = VM - VN$ , logo:

$$\Delta VMN = I\rho / 2\pi (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN) \quad (7)$$

Assim o cálculo da resistividade ( $\rho$ ) do meio investigado será realizado com as Equações 8 e 9.

$$\rho = K \Delta V / I \quad (8)$$

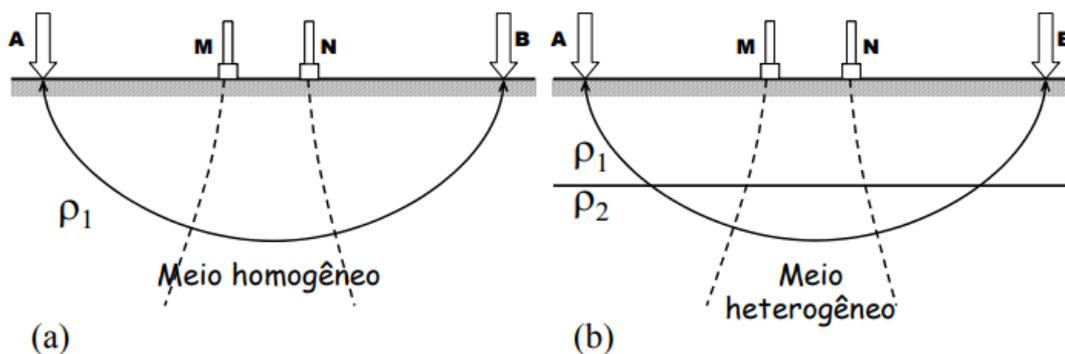
onde

$$K = 2\pi (1/AM - 1/BM - 1/AN + 1/BN)^{-1} \quad (9)$$

Logo, o uso do método da eletrorresistividade no campo é baseado na capacidade do equipamento em aplicar uma corrente elétrica no subsolo a diferentes profundidades de investigação e calcular as resistividades dos materiais geológicos nestas profundidades (Braga, 2006).

Utilizando-se o mesmo arranjo de eletrodos para realizar medições sobre um meio homogêneo (Figura 10a), a diferença de tensão  $\Delta V$  será diferente da registrada num meio heterogêneo (Figura 10b) porque o campo elétrico sofre modificações conforme a heterogeneidade dos materiais geológicos.

Figura 10 - Resistividades nos meios homogêneo (a) e heterogêneo (b). Fonte: Braga (2006).



Visto que o subsolo, na realidade, é um meio heterogêneo, a medida registrada representa uma média ponderada de todas as resistividades em um volume de material relativamente grande em subsuperfície. Neste caso obtém-se a resistividade aparente ( $\rho_a$ ), que se toma como base para a interpretação final, sendo a sua unidade ohm.metro (Braga, 2006).

Os mecanismos pelo qual a corrente elétrica se propaga nos solos e nas rochas são caracterizados pela sua condutividade ( $\sigma$ ), que pode ser expressa numericamente como o inverso da resistividade, ou seja:

$$\sigma = 1 / \rho \quad (\text{Siemens/m}) \quad (10)$$

Existem dois tipos de condutividade: a eletrônica e a iônica. A condutividade em foco é a iônica, que se deve ao deslocamento dos íons existentes na água contida nos poros de uma massa de rocha, nos sedimentos inconsolidados e nas fissuras das rochas. A resistividade das rochas que possuem condutividade iônica é razão decrescente da quantidade de água, da natureza de sais dissolvidos e da porosidade total comunicante (Braga, 2006).

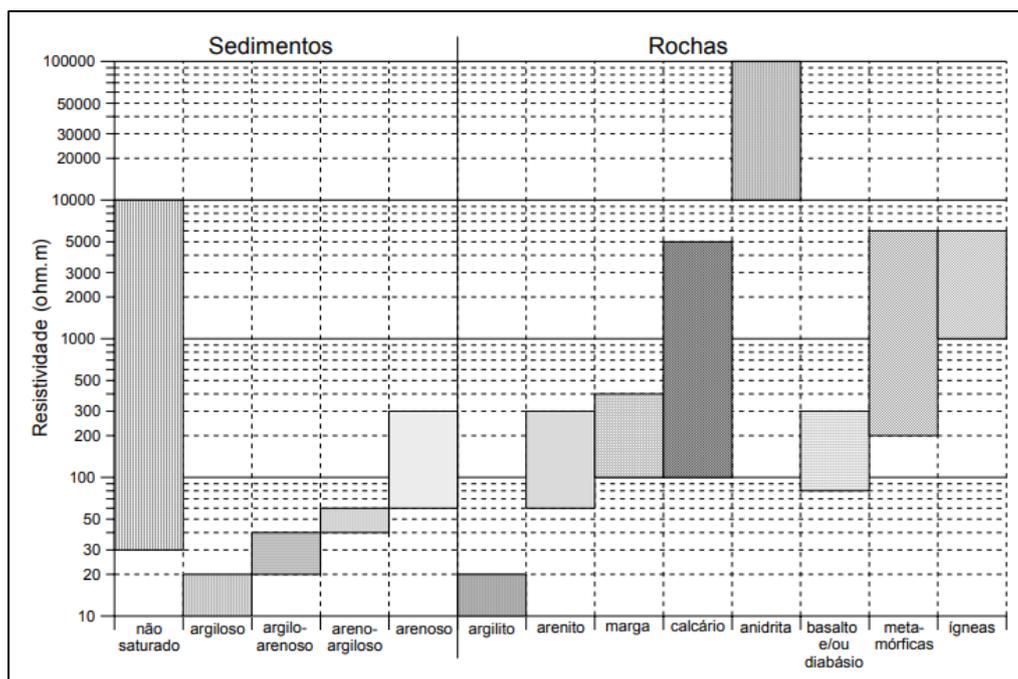
Além da investigação de descontinuidades horizontais e verticais do solo e das rochas, o método da eletrorresistividade é utilizado na identificação de corpos tridimensionais de condutividade elétrica anômala e em investigações na engenharia civil, tais como compactação de aterros e verificação de superfícies isolantes.

#### **4.1. RESISTIVIDADE DAS ROCHAS E MINERAIS**

Considera-se uma rocha condutora de corrente elétrica como sendo um agregado de minerais sólidos, líquidos e gases, na qual a sua resistividade é influenciada por vários fatores, como discutido em Braga (2006).

A propriedade física da resistividade elétrica ( $\rho$ ) é a dificuldade que um determinado meio oferece à passagem de uma corrente elétrica ( $I$ ), correspondendo ao inverso da condutividade elétrica ( $\sigma = 1 / \rho$ ). A resistividade é a propriedade física mais significativa dos materiais que constituem o subsolo. Um mesmo tipo de rocha, sedimento ou solo pode apresentar mais de um valor de resistividade, conforme pode ser observado na Figura 11.

Figura 11 - Faixas de variação nos valores de resistividade de solos, sedimentos e rochas.  
Fonte: Braga (2006).



A fim de realizar uma correlação apropriada com a geologia de uma determinada área, são fundamentais a localização geográfica e o entendimento da geologia local em termos estratigráficos. Contudo, para a interpretação dos dados do método da eletrorresistividade, alguns critérios podem ser observados e seguidos: 1. na área investigada, as margens de variação são bem mais reduzidas e, em geral, podem identificar as rochas em função das resistividades; 2. a partir de registros de estudos anteriores (SEVs, perfilagens elétricas, mapeamento geológico, perfis geológicos de poços confiáveis etc.), o modelo final pode ser determinado (Braga, 2006).

Como mencionado anteriormente, as águas que preenchem os poros e fraturas podem apresentar uma variação ampla de resistividades, entretanto, de valores baixos. Na maioria dos casos, estas soluções aquosas contêm diversos sais minerais dissolvidos, sendo um dos principais o cloreto de sódio (NaCl). A resistividade das águas é proporcionalmente inversa à concentração destes sais (Braga, 2006).

A quantidade e a classe desses sais obedecem a natureza das rochas nas quais as águas tenham percolado em seu fluxo superficial ou subterrâneo. As rochas na natureza são formadas principalmente por minerais como quartzo, silicatos ou calcita, os quais são considerados isolantes em termos de propagação da corrente elétrica, ou seja, são mal

condutoras de eletricidade. Há casos em que as rochas possuem quantidade apreciável de minerais semicondutores, tais como pirita, pirrotita ou magnetita, que podem ser considerados condutores (Braga, 2006).

Na prática, todas as rochas possuem poros que podem estar preenchidos com eletrólitos. A razão entre as resistividades global das rochas e a do eletrólito pode ser determinada por meio do coeficiente Fator de Formação (F), de modo que  $F = \rho_r / \rho_a$ , no qual  $\rho_r$  é a resistividade média da rocha (matriz e poros incluídos) e  $\rho_a$  é a resistividade da solução de saturação dos poros. O fator de formação determina, a partir de levantamentos geofísicos por eletrorresistividade, uma estimativa bem realista das porosidades de diferentes formações geológicas (Braga, 2006).

Nos solos secos localizados acima do nível d'água, seus valores são considerados atípicos, não identificando os materiais em subsuperfície em termos litológicos. Nesta situação, as variações das resistividades refletem somente as variações de saturação existentes (Braga, 2006).

## **4.2. SONDAGEM ELÉTRICA VERTICAL**

A técnica adotada neste estudo foi a sondagem elétrica vertical (SEV), utilizada para investigar em profundidade os diferentes tipos e situações geológicas, a fim de determinar as suas espessuras e resistividades e/ou cargabilidades a partir de um ponto fixo na superfície do terreno.

Para se obter maior eficácia desta técnica, as prospecções devem ser realizadas, preferivelmente, em terrenos constituídos por camadas lateralmente homogêneas, concernente ao parâmetro físico estudado, e limitadas por planos paralelos à superfície (estratificação das camadas). A SEV é uma técnica que compreende o deslocamento dos eletrodos em relação a um ponto central fixo, a fim de investigar variações de resistividade em profundidade. Quanto maior a distância entre os eletrodos de corrente (AB), maior é a profundidade teórica de investigação (Magalhães e Lucena, 2023).

## **4.3. ARRANJOS DE CAMPO**

Para a aplicação do método da eletrorresistividade é preciso adotar um determinado tipo de arranjo de eletrodos, que consiste na maneira como os eletrodos de injeção de

corrente e de medição do potencial elétrico são dispostos no terreno (Messias *et al.*, 2019). Existem algumas configurações dos eletrodos A, B, M e N que devem ser adotadas de acordo com fatores inerentes à área a ser investigada. Dentre estes, destacam-se os arranjos de configurações Wenner, Schlumberger, polo-polo, polo-dipolo, dipolo-dipolo e gradiente. Para a escolha do arranjo mais apropriado, é necessário considerar: a logística de campo em relação ao tempo de aquisição dos dados; as características das estruturas geológicas, que precisam ser delineadas; o grau de heterogeneidade do subsolo; a suscetibilidade do arranjo às variações verticais e laterais na distribuição da resistividade subsuperficial; e a profundidade efetiva de investigação que o arranjo pode proporcionar (Gandolfo, 2005).

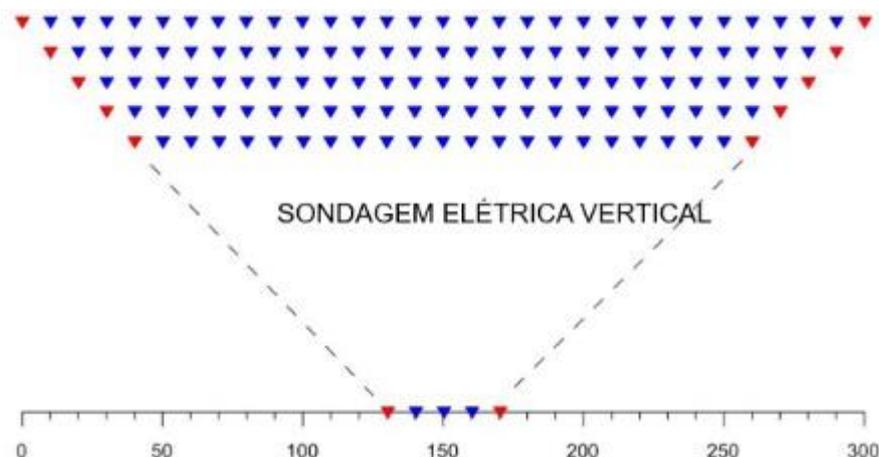
Dahlin & Zhou (2004) conduziram simulações numéricas para comparar a resolução e a eficiência do método da eletrorresistividade usando dez diferentes tipos de arranjo de eletrodos. Eles concluíram que os arranjos dipolo-dipolo e gradiente apresentam alta resolução e vantagens logísticas em comparação com os demais tipos de arranjo.

Aizebeokhai & Oyeyemi (2014) também avaliaram a eficiência do arranjo gradiente e concluíram que tal arranjo apresenta melhor logística de aquisição de dados e resulta em imagens geoeletricas de maior resolução quando comparado ao arranjo Wenner.

Martorana *et al.* (2017) geraram dados sintéticos de levantamentos de eletrorresistividade para quatro diferentes arranjos de eletrodos (dipolo-dipolo, polo-dipolo, Schlumberger e gradiente). Os resultados mostraram que, para obter imagens geoeletricas com boa resolução, e ao mesmo tempo realizar a aquisição de dados com uma elevada velocidade, é recomendável usar os arranjos dipolo-dipolo ou gradiente. No entanto, a relação sinal-ruído do arranjo gradiente é melhor do que a do dipolo-dipolo (Dahlin & Zhou, 2004; Soares & Batista, 2019).

Diante do exposto acima, o arranjo gradiente multinível foi escolhido para a realização dos levantamentos geofísicos deste estudo, pois caracteriza-se por estabelecer uma linha de transmissão de corrente AB com centro fixo, com medições realizadas entre os eletrodos MN (Figura 12), os quais são deslocados ao longo do intervalo AB. Assim, possibilitando a execução de vários gradientes simultaneamente, superpostos, com diferentes extensões de seção AB (Dahlin & Zhou, 2004).

Figura 12 - Configuração do arranjo gradiente multinível. Fonte: Guedes Sobrinho (2024).



De acordo com Braga (2007), a vantagem desse arranjo é a agilidade na obtenção de dados, visto que o centro do arranjo permanece fixo e somente os eletrodos de potencial MN são deslocados ao longo das seções a serem investigadas, além de apresentar boa resolução vertical e lateral, com boa razão sinal/ruído.

#### 4.4. PROCESSAMENTO DOS DADOS DE CAMPO

O processamento ou inversão dos dados registrados no campo resulta em imagens geoeletricas da subsuperfície e foi realizada utilizando o *software* RES2DINV (Geotomo, 2003). Esse programa divide a subsuperfície em uma quantidade finita de blocos retangulares cujo arranjo de blocos é definido pela distribuição espacial dos dados registrados no campo. A inversão de dados é baseada no método dos mínimos quadrados, sendo aplicado o algoritmo de inversão *smoothness-constrained least-squares*, que consiste na minimização da diferença entre os valores calculados de resistividade aparente e os medidos em campo, fazendo o ajuste da resistividade de cada bloco (Groot-Hedlin & Constable, 1990; Sasaki, 1992; Loke & Barker, 1996). A profundidade final da imagem gerada está diretamente relacionada com a geometria do arranjo de eletrodos utilizado e com os valores de resistividade das unidades geológicas.

O volume da rocha saturada com água pode ser estimado considerando o intervalo da resistividade elétrica característico para unidades geológicas sedimentares saturadas com água (Braga, 2016) e suas respectivas áreas nas seções geoeletricas registradas.

## **5. METODOLOGIA**

### **5.1. CARACTERIZAÇÃO GEOLÓGICA**

A prospecção hidrogeológica envolveu uma abordagem multidisciplinar para a identificação de locais propícios à locação de poços para a captação de água subterrânea. Neste sentido, a caracterização geológica constituiu uma etapa elementar da prospecção hidrogeológica, a qual foi desenvolvida de acordo com o descrito a seguir:

#### **5.1.1. Pesquisa em banco de dados georreferenciados**

Esta etapa consiste na pesquisa de bases cartográficas georreferenciadas da área de estudo, disponíveis em domínios públicos como o GeoSGB da CPRM, SIG-AESA e portal de mapas do IBGE.

#### **5.1.2. Descrição Geológica**

Esta etapa envolveu trabalhos de campo para realização da descrição geológica das áreas de ocorrência das formações Serra do Martins e Campos Novos. Foram realizadas coleta de amostras (georreferenciadas) de diferentes litotipos, descrições petrográficas das rochas e lâminas delgadas, e registro fotográfico.

### **5.2. INVESTIGAÇÃO HIDROGEOFÍSICA**

O método da eletrorresistividade, combinado com a técnica SEV e arranjo gradiente multinível foi escolhido para o levantamento dos dados geofísicos, pois este conjunto oferece boa resposta na identificação da presença de água nas rochas e discontinuidades, da profundidade do topo rochoso e espessura de sedimentos, além da identificação de diferentes camadas litológicas e estruturas tectônicas.

Os parâmetros adotados para o registro dos dados em campo buscaram conciliar a profundidade de investigação com a resolução necessárias em cada linha. A profundidade de investigação desejada foi de aproximadamente 100 metros, conseqüentemente adotou-se um afastamento máximo entre os eletrodos de corrente igual a 500 metros. Para tornar possível o registro de uma linha em um dia de trabalho em campo, foi preciso adotar a separação mínima entre eletrodos de medição de potencial igual a 20 metros, resultando em 144 medições para cada linha.

Em cada área selecionada foram registrados os dados de resistividade elétrica do subsolo de acordo com os pontos de injeção de corrente elétrica ao longo de linhas com extensões de até 500 metros, dispostas ao longo de estradas rurais. Os dados foram obtidos por meio do equipamento de fabricação alemã de marca Bodenseewerk GGA 30 (Figura 13), disponível no Laboratório de Petrofísica da UAMG/UFCG, com 27 eletrodos de metal condutor, sendo 1 deles o aterramento e 4 ativos a cada leitura de dados.

Figura 13 – Eletrorresistivímetro Bodenseewerk GGA 30, do Laboratório de Petrofísica da UFCG.



### 5.2.1. Processamento dos dados de campo

Para o processamento dos dados obtidos em campo, utilizou-se o *software* RES2DINV (Geotomo, 2003), que forneceu as imagens geelétricas bidimensionais da subsuperfície. Essas imagens representam a distribuição espacial da resistividade elétrica ao longo de um perfil vertical do terreno.

### 5.3. ANÁLISE PETROFÍSICA

A água ocupa apenas os espaços porosos das rochas, de modo que é necessário medir a porosidade das rochas a fim de se estimar as reservas de água subterrânea que se encontram nas áreas investigadas. Para tanto, foram coletadas amostras de rochas em afloramentos nas ocorrências estudadas. Algumas amostras foram coletadas como amostras de mão e outras com o auxílio de uma plugadeira portátil abastecida com gasolina (Figura 14A). Das amostras de mão, foram confeccionados cilindros com o auxílio de plugadeira de bancada (Figura 14B) e serra (Figura 14C). Eventuais correções no formato dos cilindros foram realizadas por uma retificadora de bancada (Figura 14D).

Figura 14 – (A) Plugadeira portátil com motor a gasolina, acompanhada de conjunto de brocas e hastes, reservatório de água e pulverizadores; (B) plugadeira de bancada; (C) serra de bancada, para dimensionamento das amostras; e (D) retificadora de plugues.



A



B



C



D

As amostras cilíndricas (plugues) resultantes (Figura 15A), com dimensões de 38 mm de diâmetro e 5 cm de comprimento, foram deixadas em estufa por 24 horas a 90°C, a fim de remover qualquer umidade. Em seguida, as amostras tiveram suas dimensões medidas com um paquímetro, ou seja, foram anotadas 3 medidas de cada dimensão, comprimento e diâmetro, em cada amostra. A média aritmética calculada de cada amostra foi usada para o cálculo do volume do corpo cilíndrico, através da Equação 11.

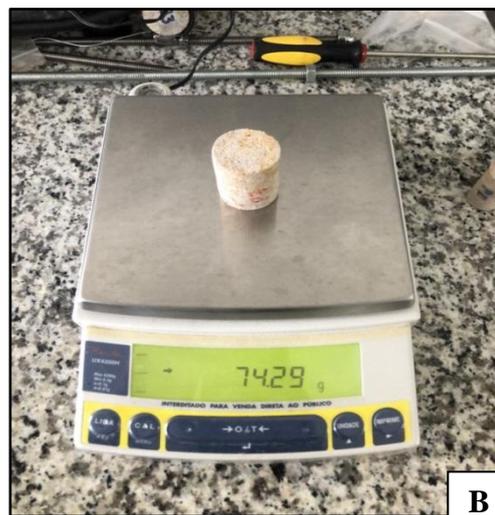
$$V = \pi r^2 h \quad (11)$$

Onde: r = raio e h = altura

A massa também é medida com uma balança de precisão (Figura 15B) para o cálculo da densidade.

Com a finalização da preparação dos cilindros, estes foram analisados em um permoporosímetro (Figura 15C), para a obtenção do volume de grãos. Deste modo, tem-se a porosidade e a densidade total dos grãos nas amostras.

Figura 15 – (A) Amostras da Ocorrência 1, em forma de cilindro, para a análise de porosidade; (B) balança de precisão para a pesagem das amostras cilíndricas; (C) Permoporosímetro Ultraporperm 500 disponível no Laboratório de Petrofísica da UFCG.



O volume de poros é a diferença entre volume da amostra e volume de grãos, tal como apresentado na Equação 12.

$$V_{poros} = V_{amostra} - V_{grãos} \quad (12)$$

O volume da amostra é obtido através da Equação 11, e o volume de grãos, a densidade dos grãos, o volume dos poros e a porosidade são fornecidos pelo permoporosímetro. A porosidade é a razão entre o volume de poros e o volume da amostra, multiplicado por 100:

$$\phi = \frac{V_{poros}}{V_{amostra}} \times 100 \quad (13)$$

Sendo a densidade de grãos dada por:

$$D_{grãos} = \frac{M_{grãos}}{V_{grãos}} \quad (14)$$

E a densidade total da amostra por:

$$D_{amostra} = \frac{M_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (15)$$

O cálculo de reservas de água subterrânea está baseado em duas expressões que relacionam a resistividade elétrica da rocha saturada com a resistividade elétrica da água que satura a rocha, a porosidade da rocha, um coeficiente de tortuosidade dos seus canais permeáveis e um expoente de cimentação, o qual depende do tipo de rocha.

Archie (1942) propôs o chamado Fator de Formação ( $F$ ), o qual corresponde à razão entre a resistividade elétrica da rocha saturada com água ( $R_o$ ) e a resistividade da água que satura a rocha ( $R_w$ ).

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (16)$$

Mais tarde, Winsauer *et al.* (1952) propuseram que o Fator de Formação seria uma função da porosidade ( $\phi$ ), do coeficiente de tortuosidade ( $a$ ) e do expoente de cimentação ( $m$ ).

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (17)$$

Juntando as duas equações e aplicando a função logarítmica chega-se a:

$$\log(\emptyset) = \frac{[\log(a) - \log(F)]}{m} \quad (18)$$

Portanto, conhecendo-se as resistividades da rocha saturada e do fluido saturante, além do intervalo de variação da porosidade, pode-se estimar os valores dos parâmetros  $a$  e  $m$ . Com isso é possível calcular o valor de porosidade saturada com água conhecendo-se o valor de resistividade elétrica da rocha.

Os valores de resistividade elétrica da rocha saturada com água são extraídos das seções geoeletricas, enquanto a resistividade da água que satura a rocha é obtida através da medição de campo ou análise laboratorial da condutividade elétrica de amostras de água coletadas em poços localizados na região investigada.

Através da geração de modelos tridimensionais das áreas investigadas, pela interpolação das seções geoeletricas e aplicação da Equação 18, é possível estimar o volume de água contida no subsolo.

## 5.4. ANÁLISE PETROGRÁFICA

### 5.4.1. Descrição macroscópica de rochas

Inicialmente foram selecionadas amostras representativas das Ocorrências 1, 2 e 3. Em seguida as amostras foram descritas com o uso de lupa de mão no local de coleta e/ou no Laboratório de Petrofísica da UAMG. Feita a seleção das amostras, foram confeccionados os plugues e lâminas delgadas.

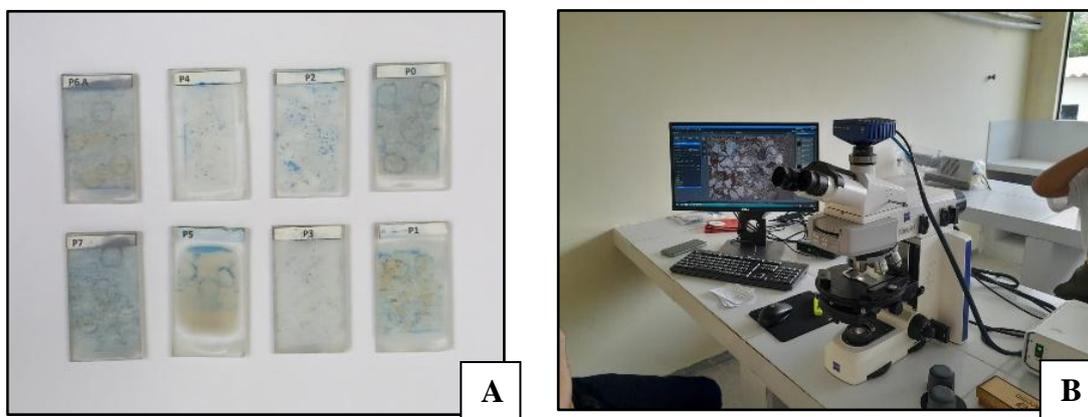
### 5.4.2. Descrição microscópica de lâminas delgadas

Dentre as amostras macroscópicas e plugues, foram selecionadas amostras para confecção de lâminas para uma descrição petrográfica e fotomicrografia, utilizando abreviações de Whitney e Evans (2010) para indicação dos minerais. O objetivo principal foi analisar e identificar minerais, poros e suas características, tais como forma, quantidade e conectividade.

As seções delgadas (Figura 16A) foram confeccionadas no Laboratório de Laminação Geolab, em Pernambuco e analisadas com o microscópio Carl Zeiss Axio Scope A1 (Figura 16B) do Laboratório Didático de Microscopia Petrográfica da Unidade

Acadêmica de Mineralogia e Geologia (UAMG) da UFCG. A petrografia foi feita de acordo com os manuais de Nesse (2004) e Dana (1981).

Figura 16 – (A) Lâminas delgadas analisadas e (B) microscópio Carl Zeiss utilizado.



#### 5.4.2.1. Identificação de minerais por MEV

Complementarmente à petrografia, as lâminas foram analisadas no Microscópio Eletrônico de Varredura (MEV), a fim de identificar a composição química dos minerais presentes. Essas análises foram realizadas no Laboratório de Avaliação e Desenvolvimento de Biomateriais do Nordeste (CERTBIO) da UFCG. O equipamento utilizado é da marca TESCAN, modelo VEGA 4, com tensão variável de até 30 kV, com alto vácuo (7 a 150 Pa), equipado com detectores para elétrons secundários e elétrons retro espalhados. O MEV do laboratório também possui um sensor EDS (Detector de Energia Dispersiva) acoplado, que auxilia no mapeamento dos elementos presentes.

Esse método produz imagens de alta resolução das lâminas analisadas e ajuda na identificação dos minerais através de disparos de um feixe de elétrons na amostra, tendo como resposta a composição química das áreas escolhidas dentro de cada lâmina.

### 5.5. CÁLCULO DO VOLUME DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Os dados resultantes da geração das imagens geoeletricas foram exportados para o *software* Voxler, a fim de gerar um modelo tridimensional para cada ocorrência. Antes da exportação, o processamento dos dados consistiu no georreferenciamento dos dados (realizado com o auxílio do *software* Grapher) e na aplicação da técnica de interpolação pelo método do inverso do quadrado da distância. O Voxler pode calcular o volume da rocha contido na camada com valores de resistividade elétrica da rocha saturada em água.

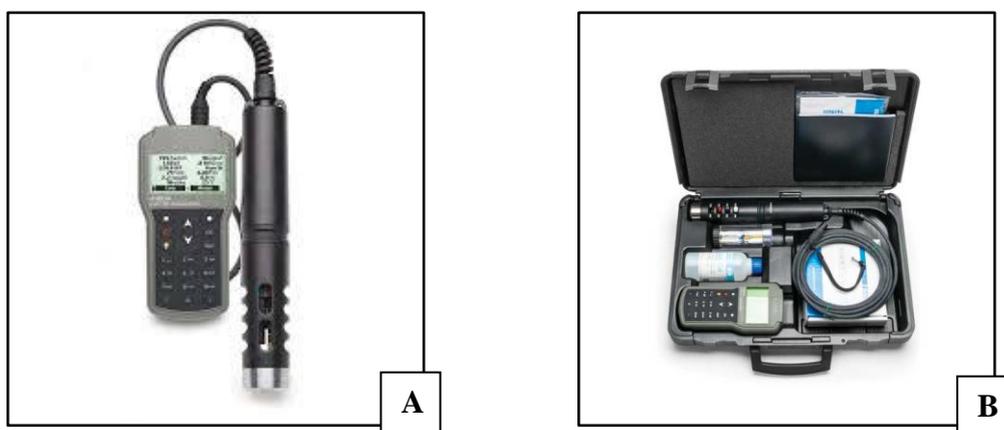
Como resultado deste processamento, obteve-se um modelo pseudo-3D com a identificação das camadas de rocha saturáveis em água. Considerando que as camadas realmente saturadas em água correspondem àquelas com resistividades entre 40 e 300  $\Omega\text{m}$ , utilizou-se, finalmente, o *software* Excell da Microsoft para calcular o volume de água reservada.

## 5.6. ANÁLISE DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

Para esta etapa foi realizado um levantamento dos poços existentes nas áreas das ocorrências, por meio de uma busca no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas do Serviço Geológico do Brasil - SIAGAS/CPRM, a fim de obter informações como coordenadas dos poços, profundidades totais, profundidades do nível d'água encontrado durante a perfuração, nível estático, nível dinâmico, parâmetros físico-químicos da água dos poços, perfis litológicos e construtivos dos poços, e usos da água. Em seguida, foram realizadas visitas de campo a fim de verificar a localização dos poços cadastrados naquele sistema e coleta das amostras de água para análise físico-químicas. Adicionalmente, os dados obtidos no SIAGAS foram confrontados com as informações dadas pelos proprietários dos poços, no intuito de obter as reais características dos poços existentes.

No momento da coleta das amostras, estas foram submetidas a uma análise prévia de suas características físico-químicas, tais como condutividade elétrica, pH, potencial de oxirredução, temperatura, salinidade e sólidos dissolvidos totais. Para tanto, foi utilizado uma sonda multiparâmetro da empresa HANNA Instruments, modelo HI98194 (Figura 17).

Figura 17 - Medidor portátil multiparâmetros HI98194. (A) Sonda e medidor; e (B) conjunto completo. Fonte: Portal Hanna Instruments (2024).



## 6. RESULTADOS E DISCUSSÃO

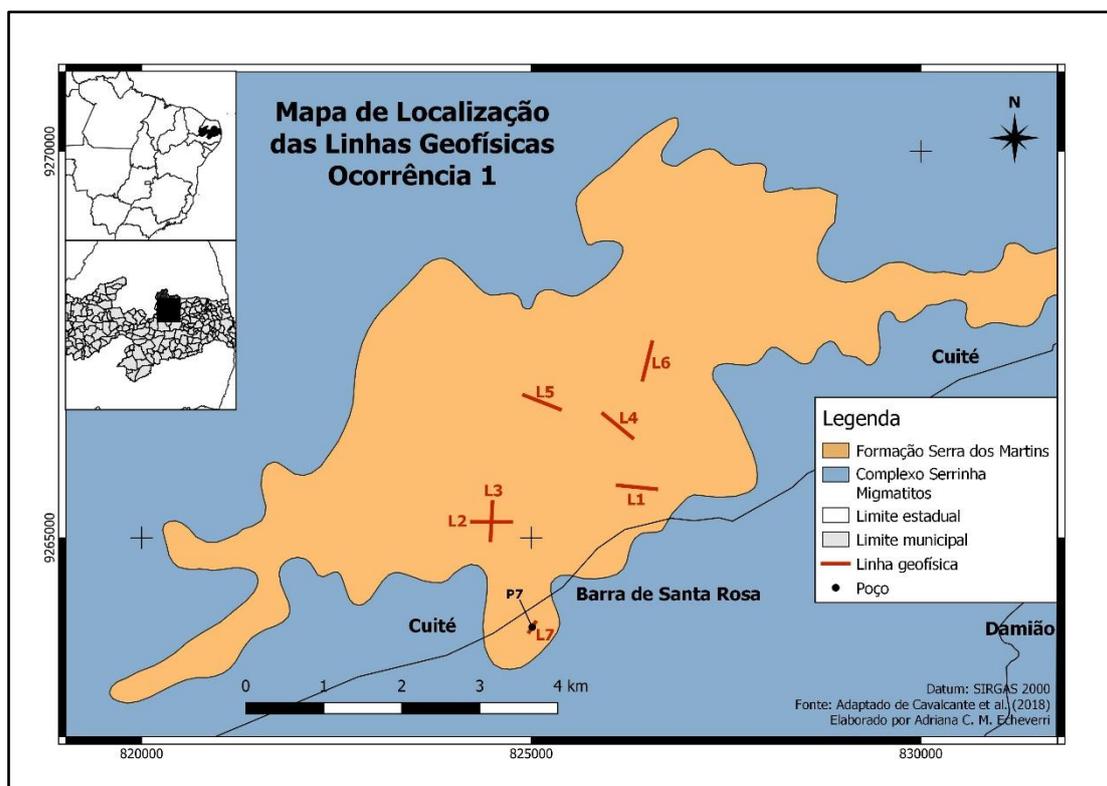
### 6.1. INTERPRETAÇÃO DOS DADOS DA ELETORRESISTIVIDADE

Os levantamentos hidrogeofísicos foram realizados pelo método da eletrorresistividade aplicados na modalidade tomografia elétrica (ERT). A disposição das linhas geofísicas no terreno buscou uma distribuição areal representativa da ocorrência sedimentar e seguindo o lineamento das estradas de terra, a fim de facilitar o manuseio dos cabos e eletrodos.

#### 6.1.1. Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa

No caso da Ocorrência 1, as sete linhas executadas se encontram localizadas conforme apresentado na Figura 18. As linhas L2 e L3 foram levantadas no cruzamento de duas estradas, com o intuito de verificar as extensões transversal e longitudinal das camadas de rocha e eventual aquífero.

Figura 18 - Localização das linhas geofísicas registradas na Ocorrência 1.  
Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2018).



No caso da linha 7 (Figura 18), o objetivo era confrontar a descrição do poço P-7, relatada pelo proprietário do terreno, com as informações extraídas da seção geométrica

correspondente. Como a profundidade máxima de tal poço é 35 metros, não havia necessidade de investigar até 100 metros de profundidade. Por essa razão, adotou-se um afastamento máximo entre os eletrodos de corrente igual a 150 metros. Por outro lado, a separação mínima entre eletrodos de medição de potencial foi de 5 metros, aumentando assim a resolução da imagem geométrica, resultando em 210 medições.

As seções geométricas que resultaram do processamento dos dados registrados em campo para as sete linhas localizadas na Ocorrência 1 estão indicadas nas Figuras 19 a 25.

Figura 19 - Seção geoeletrica Barra L1.

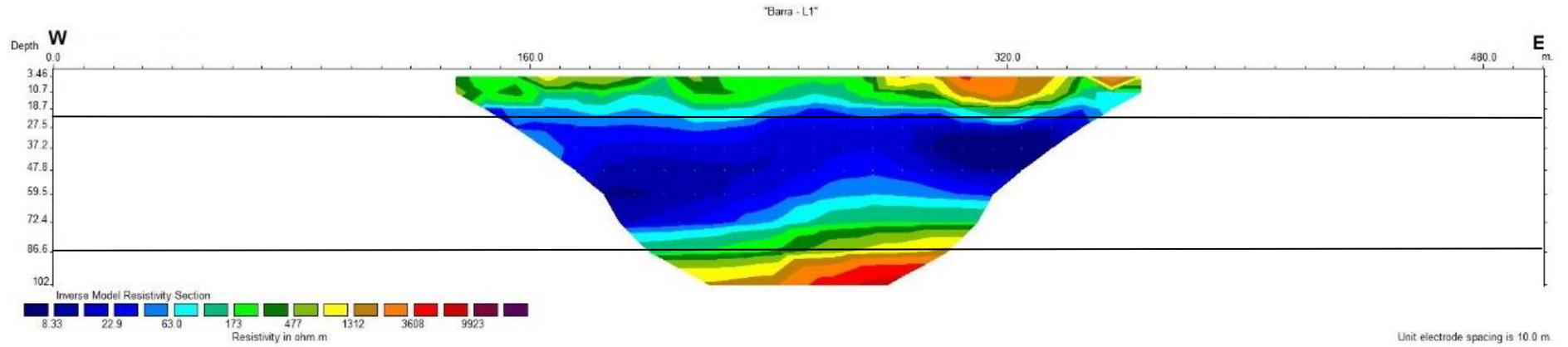


Figura 20 - Seção geoeletrica Barra L2.

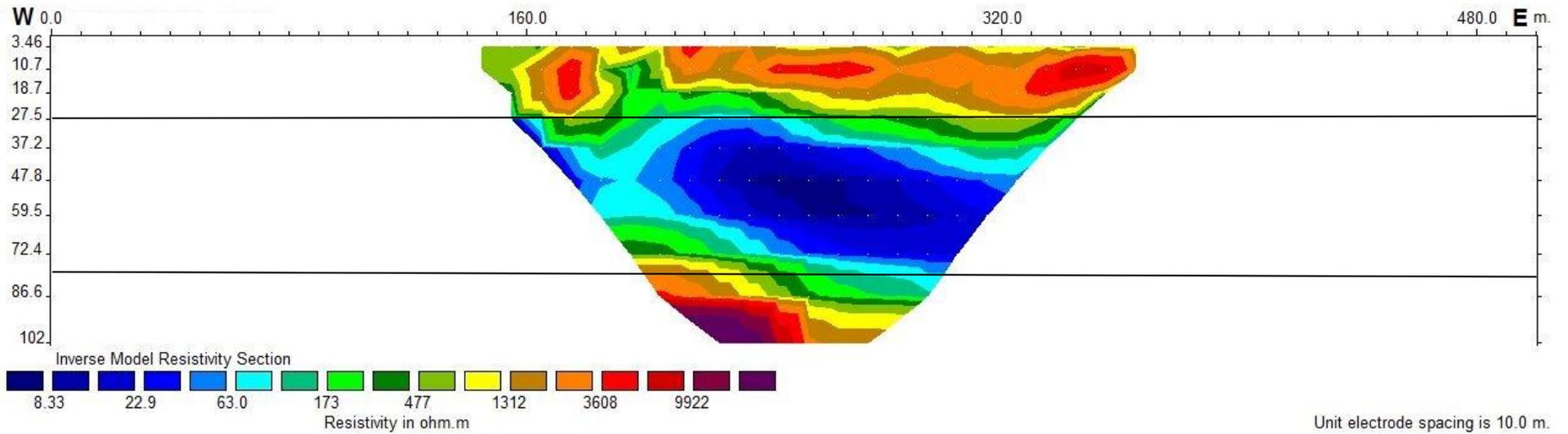


Figura 21 - Seção geolétrica Barra L3.

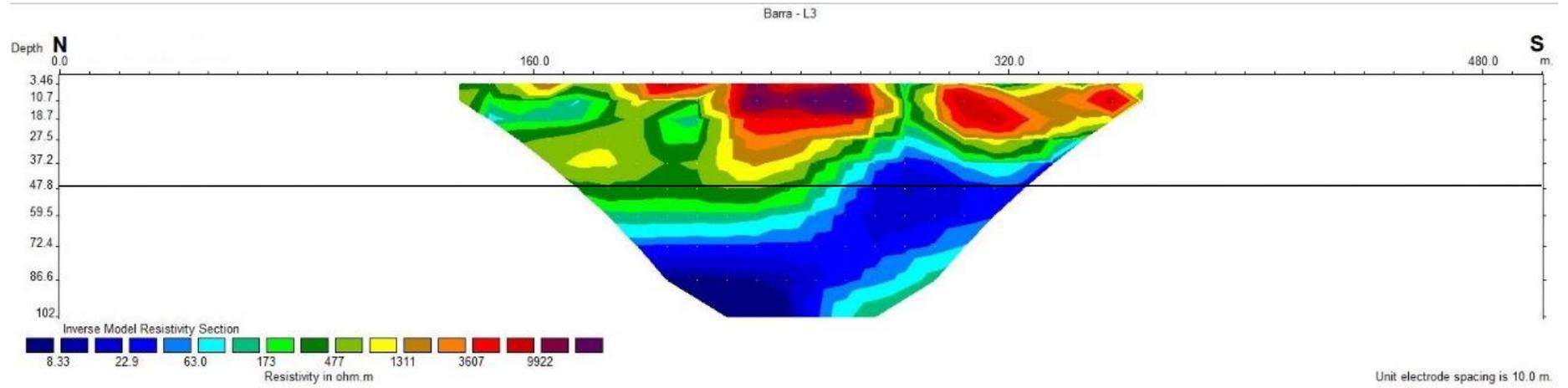


Figura 22 - Seção geolétrica Barra L4.

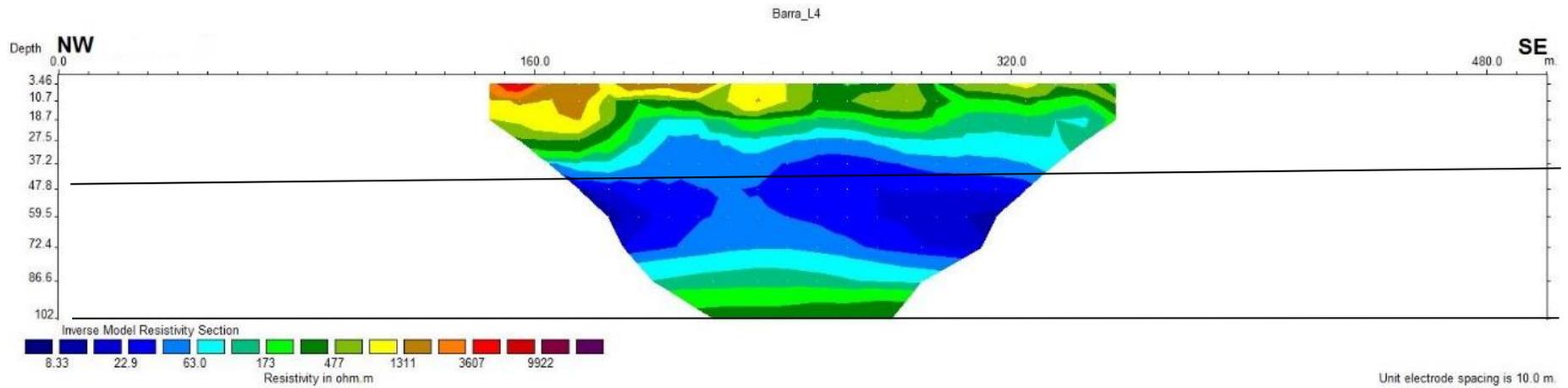
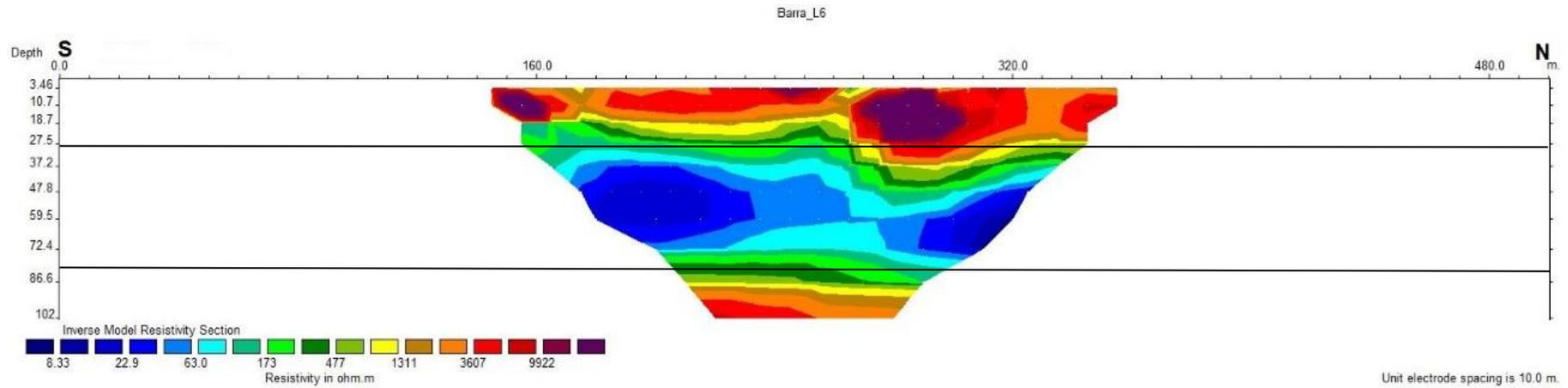


Figura 23 - Seção geoeletrica Barra L6.



Na maioria das seções geoeletricas (seções das linhas 1, 2, 3, 4 e 6), observa-se que a subsuperfície apresenta três diferentes camadas (Figuras 19 a 23). A camada 1 é resistiva e vai da superfície do terreno até cerca de 20 a 30 metros de profundidade. A camada 2, sotoposta à 1, é condutiva e se encontra até 80 metros de profundidade. A baixa resistividade elétrica da camada 2 indica que ela se encontra saturada com água. Por fim, a camada 3, que se encontra abaixo da camada 2, apresenta alta resistividade elétrica, sugerindo que aquela pode ser constituída por rochas do embasamento cristalino.

Figura 24 - Seção geolétrica Barra L5.

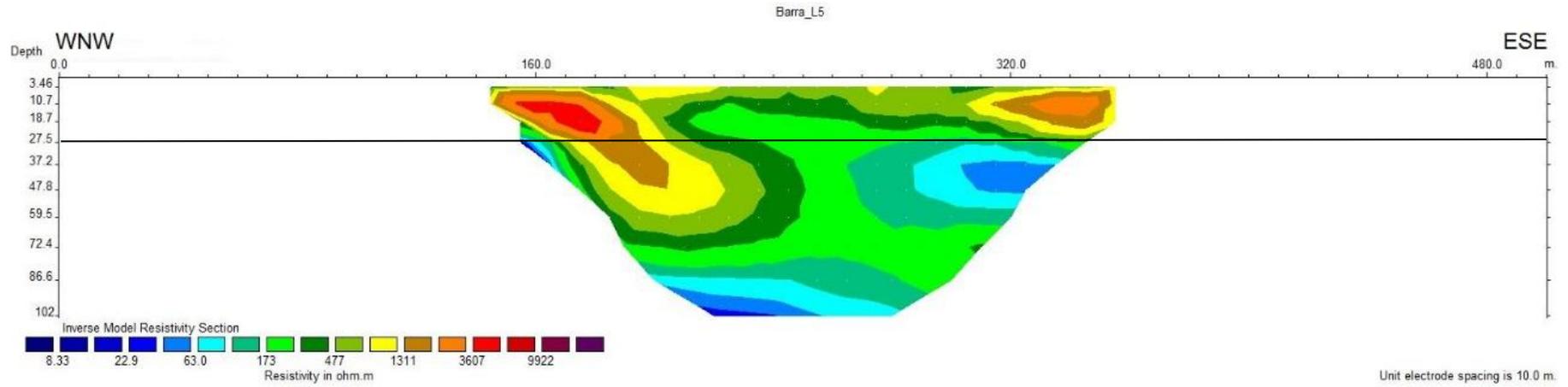
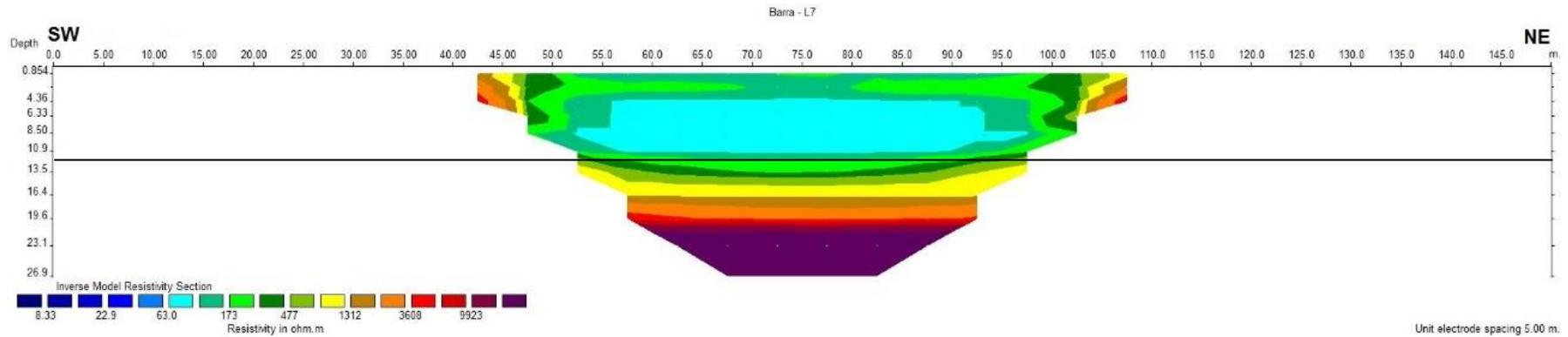


Figura 25 - Seção geolétrica Barra L7.



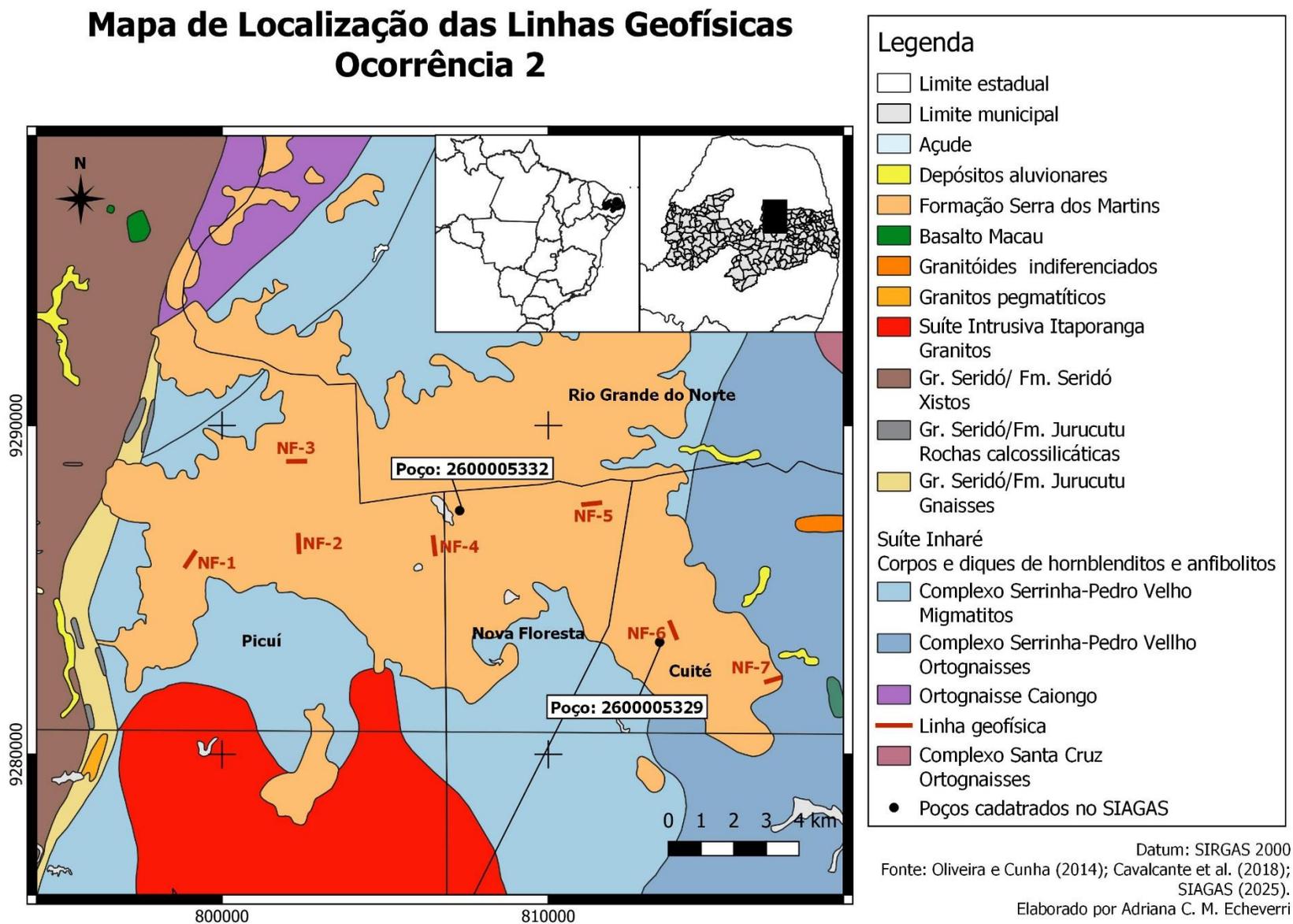
Localmente ocorrem desvios em relação a esse modelo predominante, como se pode observar nas seções geoeletricas das linhas 5 e 7 (Figuras 24 e 25). Na linha 5 (Figura 24) a configuração da subsuperfície diverge do padrão predominante para a Ocorrência 1, sugerindo a ação de processos locais diferenciados de sedimentação e/ou evolução estrutural.

A linha 7 (Figura 25) se encontra em um local onde, durante o período chuvoso, se forma uma lagoa (aquífero aflorante). Na posição central dessa linha há um poço produtivo (P-7). Na seção da linha 7 vê-se que ocorre uma camada superficial condutiva, a qual se estende até a profundidade aproximada de 12 metros, que corresponde aos sedimentos saturados, seguida por um intervalo de resistividade elétrica que cresce continuamente da base da camada condutiva até cerca de 20 metros de profundidade. Essa camada com resistividade variável foi interpretada como sendo composta pela rocha cristalina alterada. Abaixo dos 20 metros de profundidade se observa uma camada homogênea de elevada resistividade elétrica, a qual foi interpretada como rocha sã do embasamento cristalino.

#### **6.1.2. Ocorrência 2 – Nova Floresta**

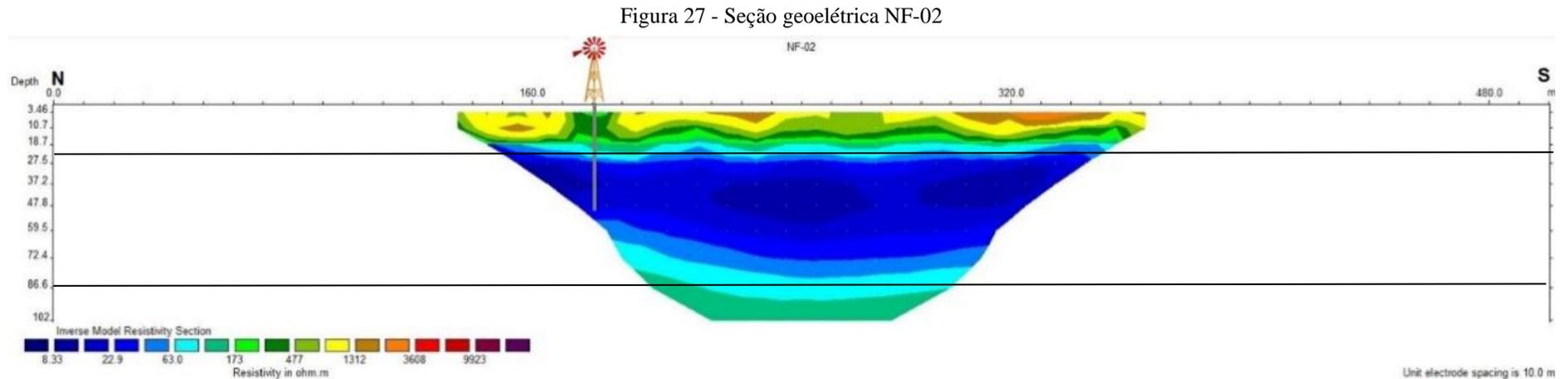
Para a Ocorrência 2, o levantamento geofísico foi realizado conforme a disposição das linhas mostradas na Figura 26, e as seções geoeletricas, resultantes são apresentadas nas Figuras 27 a 33.

Figura 26 - Localização das linhas geofísicas registradas na Ocorrência 2. Fonte: Adaptado de Oliveira e Cunha (2014), e Cavalcante *et al.* (2018).



As seções geolétricas NF-02 a 07 são similares quanto ao comportamento da resistividade. Até aproximadamente 20m, a resistividade apresenta-se alta; entre aproximadamente 20m a 90m está uma camada condutiva, onde pode estar contida a água subterrânea; a partir da profundidade de 90m, as resistividades voltam a aumentar, indicando a presença de rochas do embasamento cristalino.

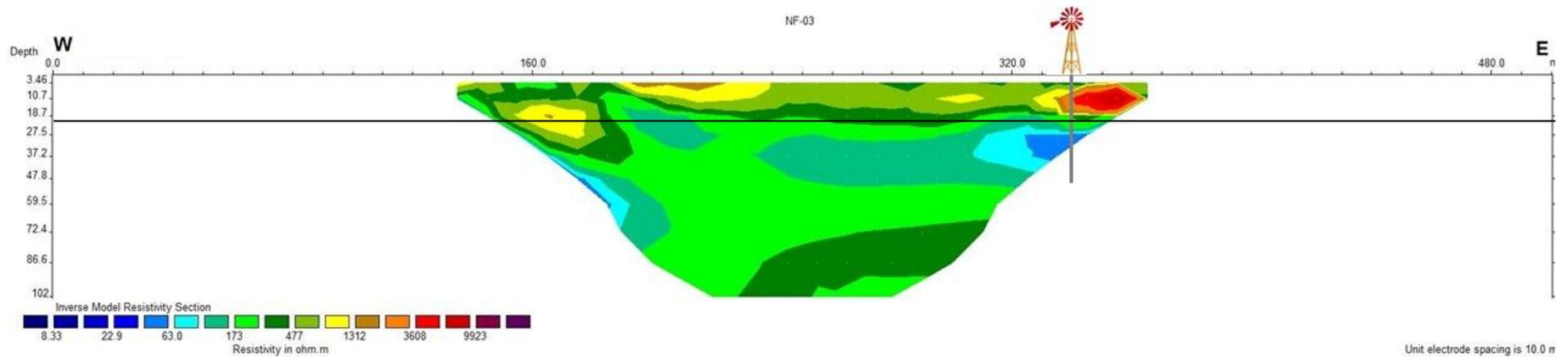
Na seção geolétrica da linha NF-02 (Figura 27) há um poço de abastecimento distando aproximadamente 100 metros da linha, na altura da posição 180m. Segundo o proprietário, o poço possui vazão igual a 3000 litros/hora e o nível da água foi encontrado a 23 metros de profundidade (que coincide com a profundidade do topo do aquífero, como indicado na seção geolétrica).



Nota: Observa-se um poço próximo ao eletrodo da posição 180m. Sua vazão é de 3000 litros/hora e a água subterrânea foi encontrada a 23 metros de profundidade durante a perfuração.

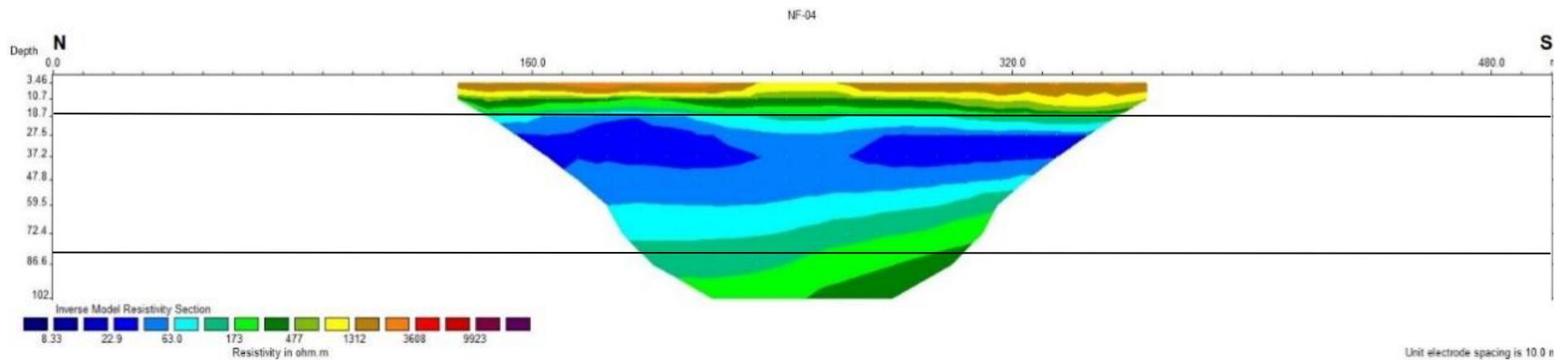
Considerando-se que valores de resistividade entre 40 e 300  $\Omega\text{m}$  podem indicar água em rochas sedimentares, tem-se a indicação da presença de água abaixo de cerca de 20 metros de profundidade na seção geoeletrica NF-03. As resistividades mais altas (em comparação com a linha NF-04, por exemplo) também sugerem menor saturação de água. Uma observação interessante é que há um poço de abastecimento (com catavento) a cerca de 50 metros afastado perpendicularmente à linha NF-03 na altura da posição 340m, onde a seção geoeletrica apresenta uma mancha azul (Figura 28).

Figura 28 - Seção geoeletrica NF-03. Nota: Observa-se um poço próximo a posição 340m.



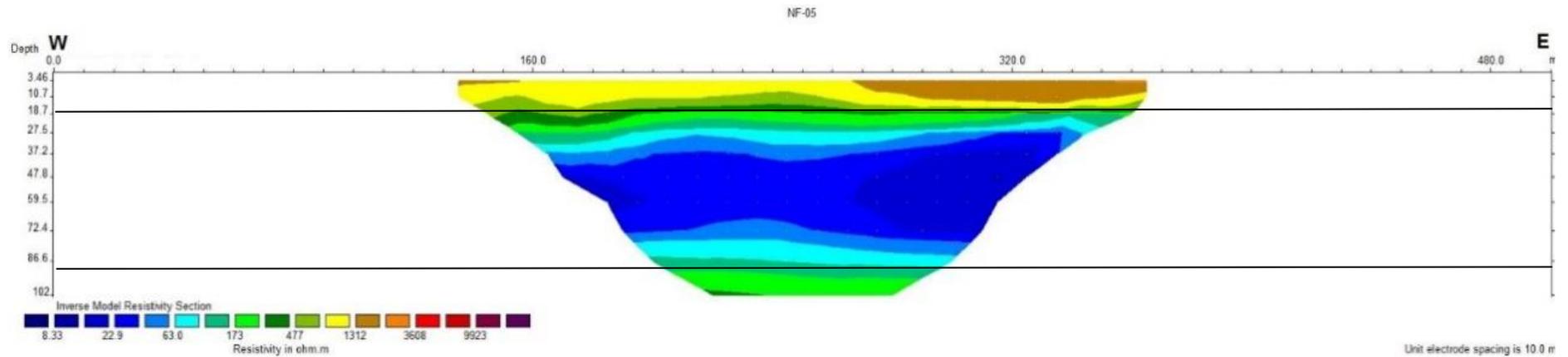
A linha geofísica NF-04 (Figura 29) está localizada no centro da Ocorrência 2 (Figura 26), próxima à cidade de Nova Floresta. De acordo com o Sistemas de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) do Serviço Geológico do Brasil, o poço cadastrado 2600005332 distante 1,2 km NE, indica que os primeiros 30 metros é constituído por arenito médio da Formação Serra dos Martins, sendo que o nível estático da água está a 13 metros de profundidade.

Figura 29 - Seção geométrica NF-04.



A seção NF-05 (Figura 30) exibe o mesmo padrão geral, mas com menor espessura da camada resistiva superficial e com valores de resistividade menores, tanto para a camada resistiva superficial quanto para a camada resistiva na base da seção.

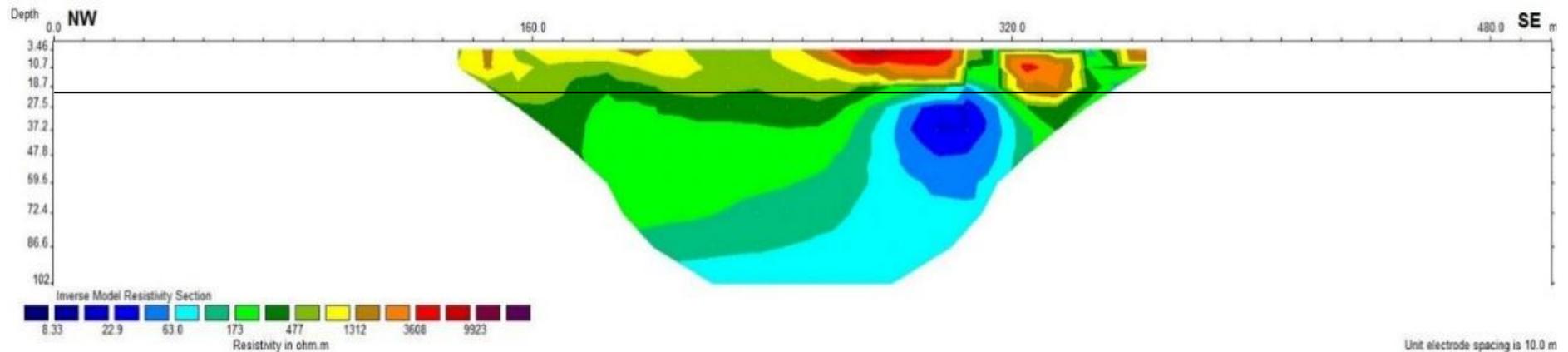
Figura 30 - Seção geolétrica NF-05.



A seção NF-06 (Figura 31) exibe um padrão diferente das imagens de linhas anteriores. A camada resistiva na base da linha não existe aqui e a camada condutiva, que geralmente ocorre abaixo de 25 a 30 metros de profundidade, estende-se para profundidades além da base da imagem. Por outro lado, a camada resistiva mais rasa também é observada nessa imagem. De acordo com moradores locais, há vários poços com boa vazão na vizinhança. Inclusive há um bem perto da linha. Infelizmente, está localizado fora da imagem (a uns 10 metros de distância na direção perpendicular à linha, na posição 380m). O proprietário desse poço relatou que o teste de vazão indicou uma vazão de 4200 L/h e que o poço começou a dar água na profundidade de 36 metros. Há ainda um relato de outro poço bem produtivo próximo do início da linha (extremidade NW).

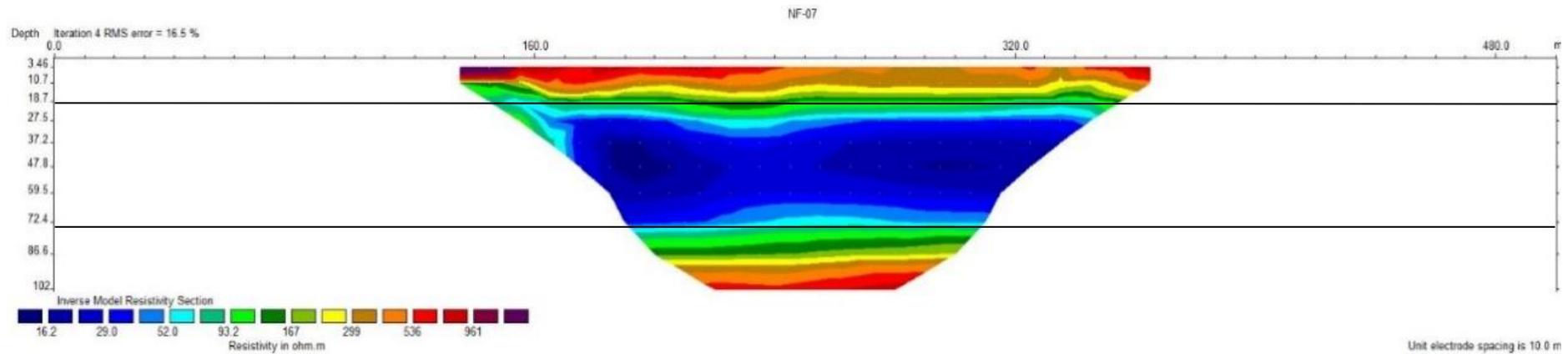
De acordo com o (SIAGAS), o poço cadastrado 2600005329 distante 518 metros SW, indica que os primeiros 31 metros é constituído por arenito médio da Formação Serra dos Martins, sendo que o nível estático da água está a 6 metros de profundidade.

Figura 31 - Seção geoeletrica NF-06.



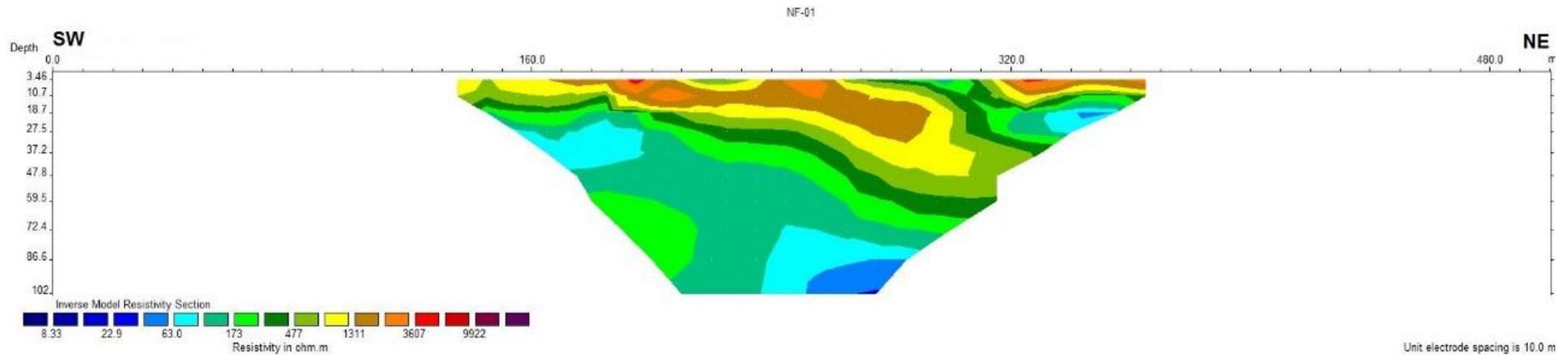
A imagem geolétrica da linha NF-07 (Figura 32) parece-se com as linhas obtidas na Ocorrência 1. Uma camada superficial resistiva sobreposta a uma camada condutiva que vai de aproximadamente 25 m até 75 m de profundidade. Sotoposta a essas camadas, outra camada resistiva. A aproximadamente 50 metros distante, no sentido norte dessa linha, mais ou menos coincidindo com o centro dela, há um poço que, segundo os locais, possui vazão igual a 200 litros/hora.

Figura 32 - Seção geolétrica NF-07.



Em princípio, a exceção está na seção geolétrica NF-01 (Figura 33), a qual apresentou camadas subverticais, alternando-se entre condutiva e resistiva de sudoeste para nordeste. Esse comportamento geolétrico pode ser explicado pela composição litológica das camadas com matriz mais arenosa, contrastando com a presença de material cimentado nas camadas alternantes.

Figura 33 - Seção geolétrica NF-01.

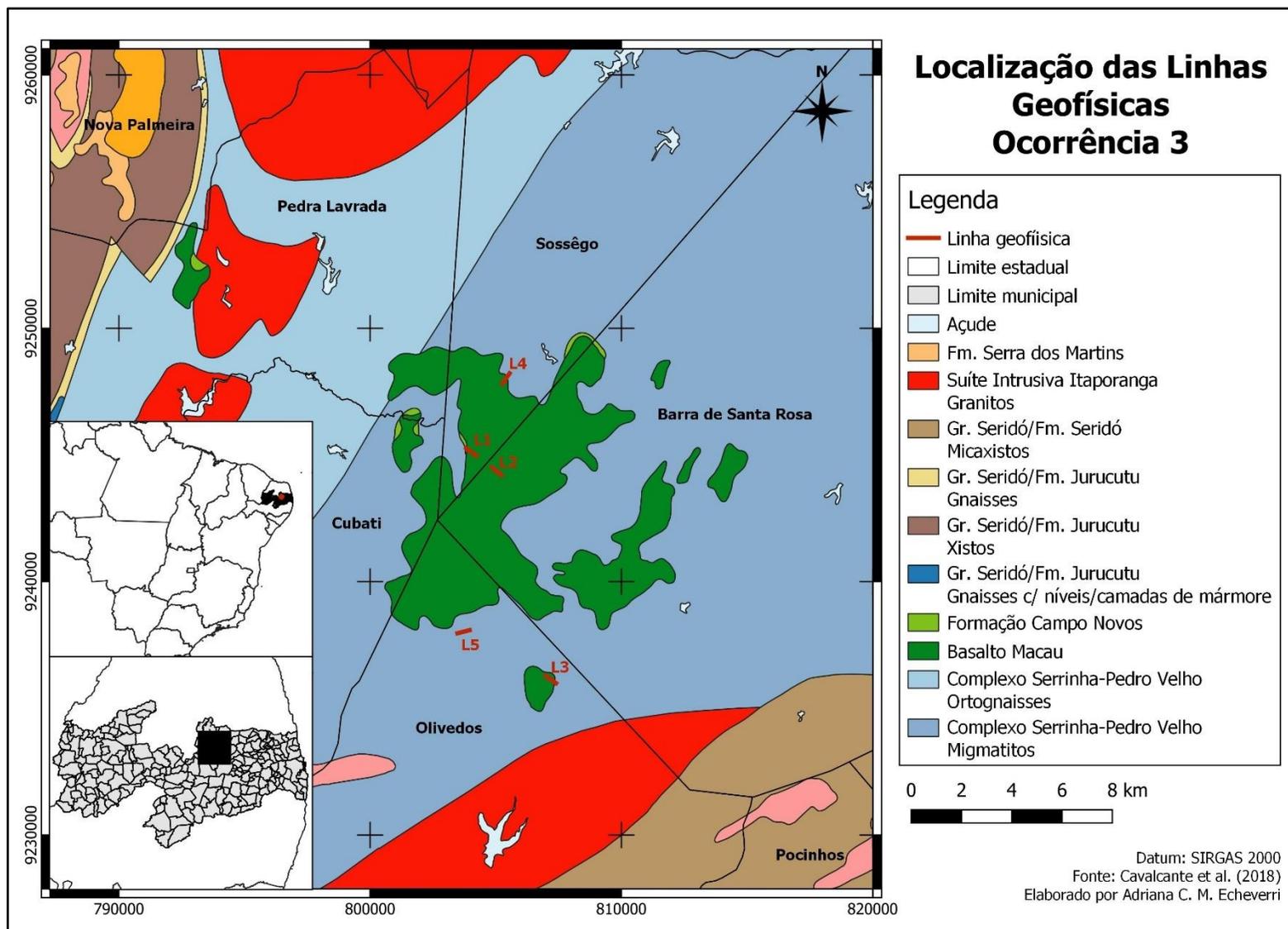


### **6.1.3. Ocorrência 3 – Sossego**

Seguindo o mesmo procedimento, o levantamento geofísico foi realizado de forma a obter a distribuição areal representativa da Ocorrência 3, cuja disposição é apresentada na Figura 34.

O processamento dos dados resultou em cinco imagens geométricas, as quais são apresentadas nas Figuras 35 a 39.

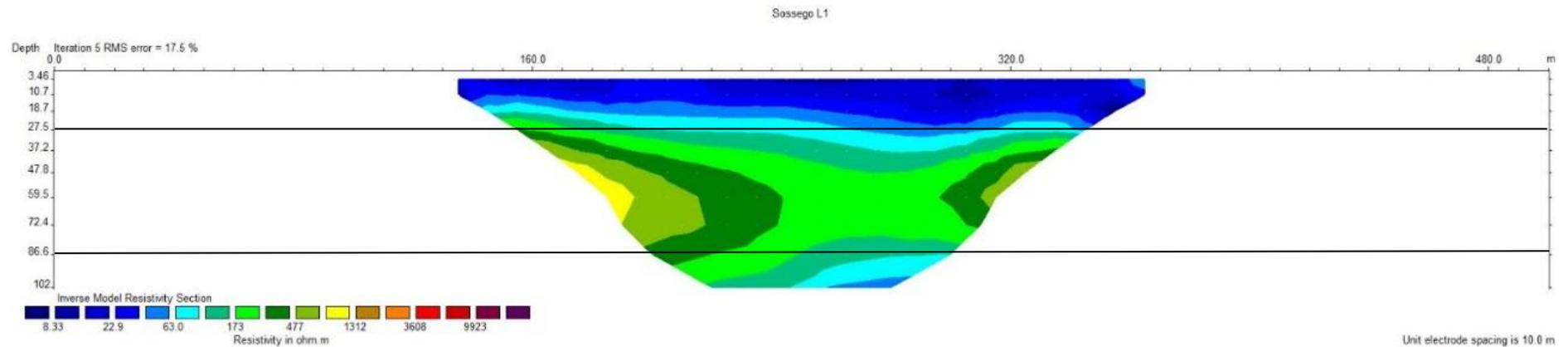
Figura 34 - Localização das linhas geofísicas registradas na Ocorrência 3 – Sossêgo e entorno. Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2018).



Nesta Ocorrência 3, as seções geolétricas registradas apresentaram um comportamento destoante das Ocorrências 1 e 2. As seções L1, L3, L4 e L5 apresentam uma camada condutiva na sua porção superficial, até a profundidade aproximada de 30 metros.

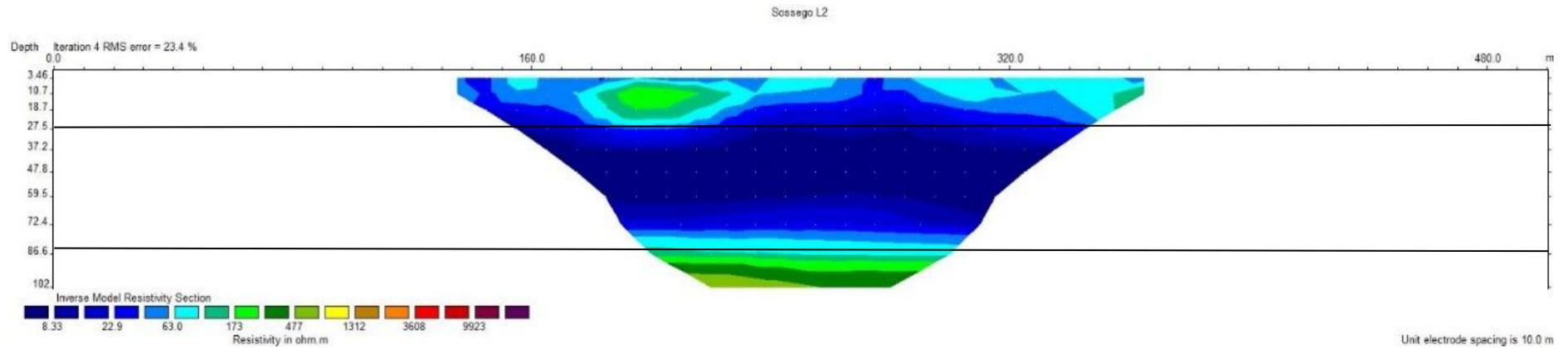
Na seção L1 (Figura 35), a partir dos 30 m, encontra-se uma camada mais resistiva até a profundidade de aproximadamente 90m. A partir dos 90 metros, a condutividade volta a aumentar.

Figura 35 - Seção geolétrica Sossêgo L1.



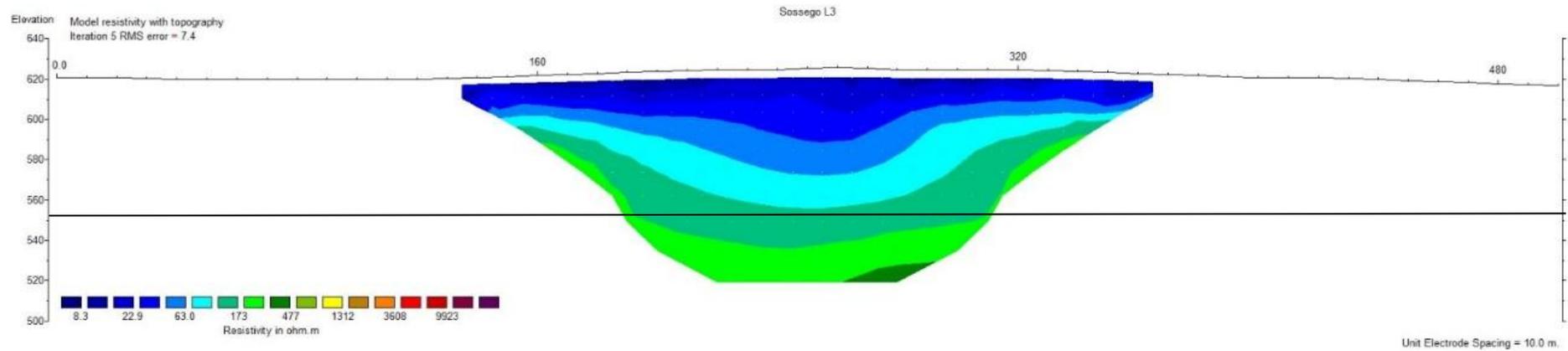
Na seção L2 (Figura 36), a camada condutiva inicia-se na superfície e atinge os valores mais altos até a profundidade de aproximadamente 90 metros, lembrando que a condutividade ( $\sigma$ ) é o inverso da resistividade ( $\rho$ ), ou seja,  $\sigma = 1/\rho$ . Os valores de resistividade voltam a aumentar a partir dos 90 metros de profundidade.

Figura 36 - Seção geoeletrica Sossêgo L2.



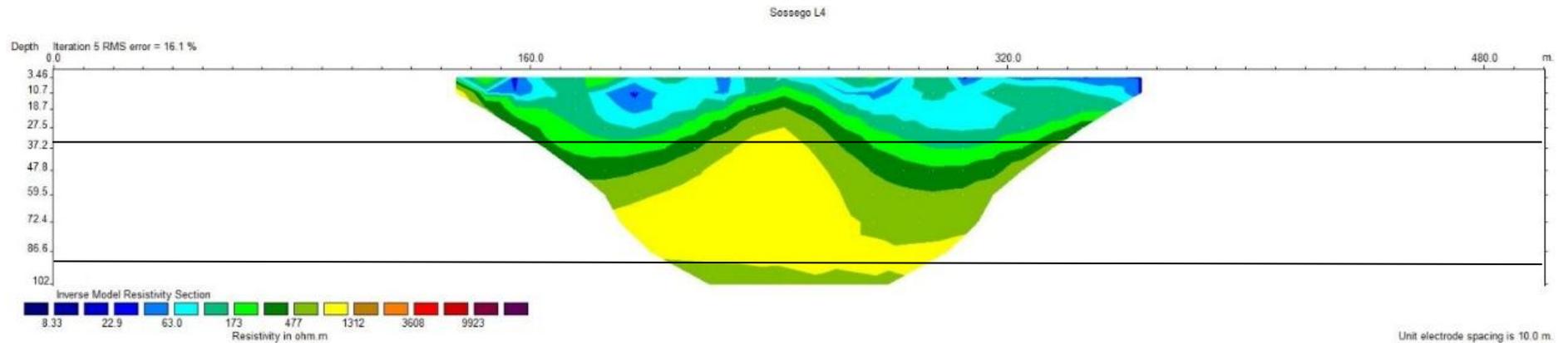
A seção L3 (Figura 37), em teoria, é totalmente condutiva. Observa-se que os valores de resistividade vão aumentando com a profundidade, mas não o suficiente para indicar a presença de rocha cristalina.

Figura 37 - Seção geolétrica Sossego L3.



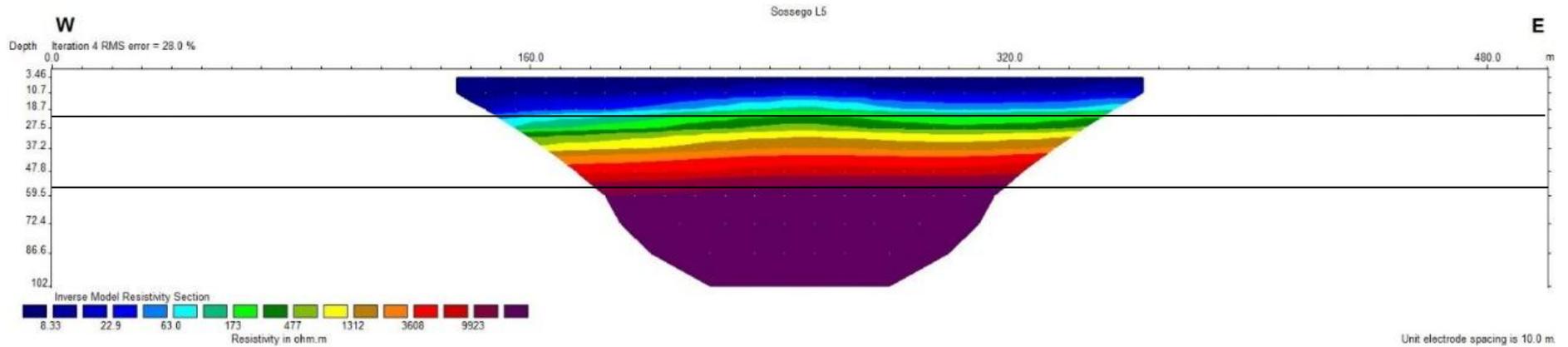
Novamente, a camada superficial é a porção mais condutiva na seção L4 (Figura 38). Contudo, a base desta camada não é regular, sendo mais rasa (cerca de 10 metros de profundidade) na porção central, próximo ao eletrodo 240 metros, e mais profunda próximo aos eletrodos 180 e 300 metros, atingindo até a profundidade aproximada de 37 metros. Entre 37 e 90 metros segue uma camada mais resistiva, voltando os valores de resistividade a se reduzirem a partir de 90 metros.

Figura 38 - Seção geoeletrica Sossego L4.



A seção L5 (Figura 39) foi a única que indicou a presença de rocha cristalina a partir de 59 metros de profundidade, representada pela camada roxa. Uma camada de rocha alterada está entre as profundidades de 27 e 59 metros, enquanto a camada condutiva encontra-se na superfície, até a profundidade aproximada de 27 metros. A seção L5 está localizada ao sul da Ocorrência 3, numa localidade denominada Campo do Muro.

Figura 39 - Seção geolétrica Sossego L5.



## 6.2. ANÁLISE PETROFÍSICA

### 6.2.1. Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa

Foram coletadas oito amostras de rocha para análise petrofísica. A localização destas amostras é apresentada na Figura 40. As coordenadas UTM das amostras e os resultados obtidos na análise petrofísica são apresentados na Tabela 1. A porosidade das amostras varia de 4,7% a 36,1%, com valor médio de 20,3%.

Figura 40 - Localização das amostras coletadas na Ocorrência 1 - Barra de Santa Rosa.

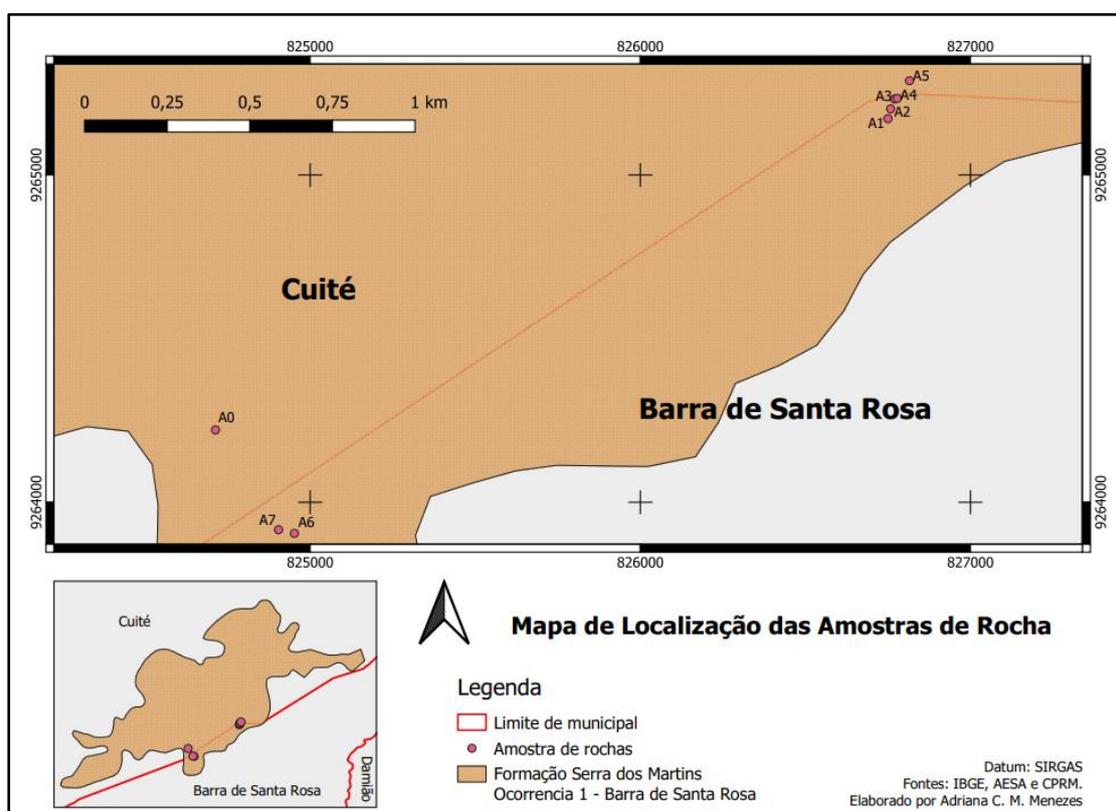


Tabela 1 – Resultados da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 1 - Barra de Santa Rosa.

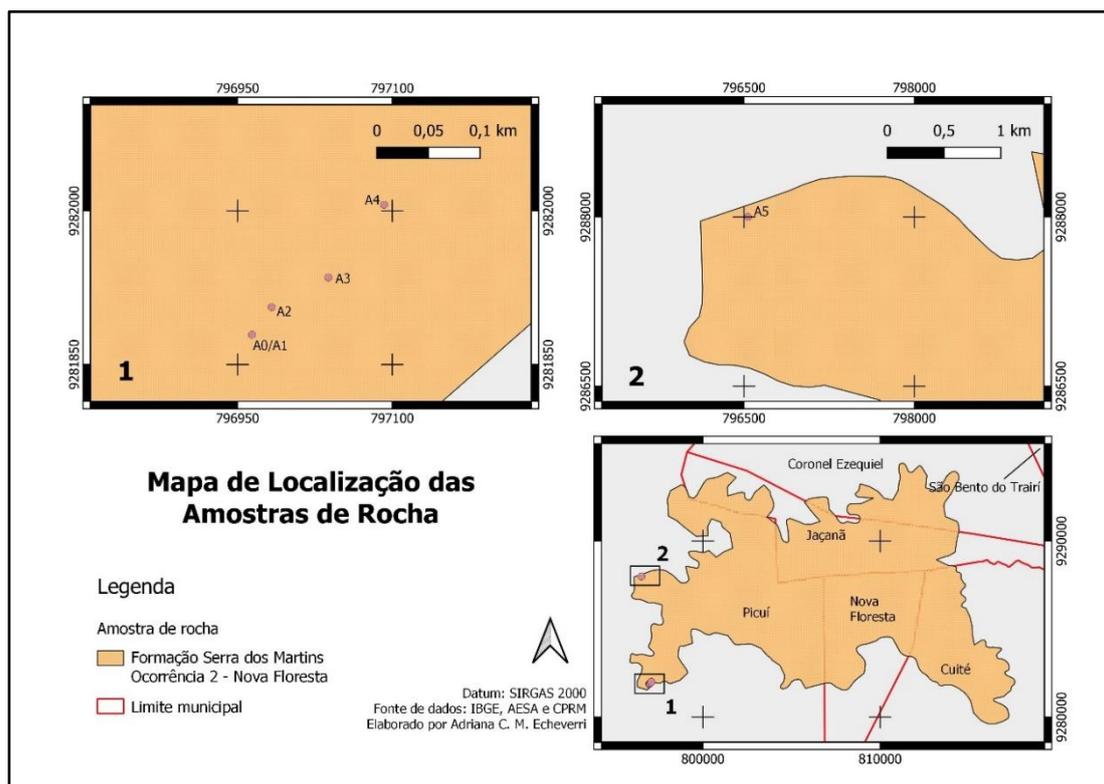
Amostra	Latitude UTM (24S)	Longitude UTM (24S)	Densidade da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)
A0	9264221	824713	1,711	2,678	36,1
A1	9265172	826750	1,837	2,591	29,1
A2	9265202	826758	2,171	2,465	11,9
A3	9265232	826770	2,229	2,340	4,7
A4	9265234	826778	2,237	2,365	5,4
A5	9265288	826815	1,881	2,375	20,8
A6	9263905	824952	1,927	2,422	20,4
A7	9263916	824904	1,706	2,584	34,0
Média			1,962	2,478	20,3

Deste modo, as amostras A3 e A4 indicaram os valores mais baixos de porosidade (<10%), enquanto os valores mais altos estão nas amostras A0 e A7 (>30%). Segundo Feitosa *et al.* (2008), os arenitos apresentam porosidades inferiores às areias pouco consolidadas devido a presença de cimento e o efeito da compactação de parte dos poros, que é o nosso caso. Em casos extremos, a porosidade dos arenitos pode ser inferior a 1%. Considerando este valor como parâmetro de comparação, existe a possibilidade da Ocorrência 1 ser um ótimo reservatório de água subterrânea. Entretanto, nem todos os poros da rocha devem estar saturados em água. Para que este sistema de armazenamento possa ser viável, ou seja, produza água para abastecimento, ele deve possuir uma permeabilidade elevada ou uma conexão entre os poros.

### 6.2.2. Ocorrência 2 – Nova Floresta

Nesta Ocorrência 2 foram coletadas seis amostras para a análise petrofísica: cinco foram coletadas no mesmo afloramento, as amostras A0 a A4; e a amostra A5 foi coletada em afloramento distante 6 km daquele primeiro. A Figura 41, a seguir, apresenta os pontos de coleta.

Figura 41 - Localização das amostras de rocha coletadas na Ocorrência 2 – Nova Floresta.



As coordenadas UTM e os resultados obtidos na análise petrofísica são apresentados na Tabela 2. A porosidade das amostras varia de 3,9% a 13,4%, com valor médio de 8,15%. As amostras A0, A2, A3 e A4 indicaram os valores mais baixos de porosidade (<10%), enquanto os valores mais altos estão nas amostras A1 e A5 (>10%). Desta maneira, pode-se afirmar que as rochas sedimentares da Ocorrência 2 são menos porosas quando comparadas às da Ocorrência 1 ( $\phi = 20,3\%$ ), com possibilidade de conter uma menor reserva de água subterrânea.

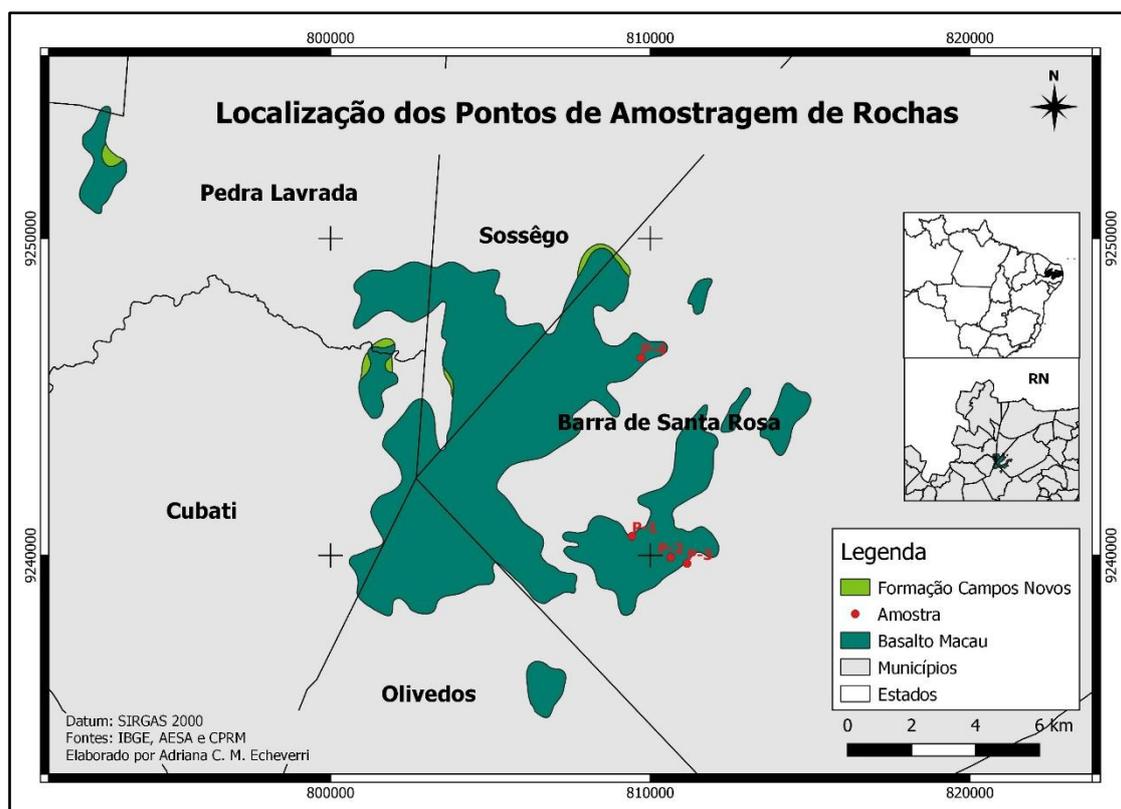
Tabela 2 - Resultado da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 2 - Nova Floresta.

<b>Amostra</b>	<b>Longitude UTM (24S)</b>	<b>Latitude UTM (24S)</b>	<b>Densidade da amostra (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Densidade de grãos (g/cm<sup>3</sup>)</b>	<b>Porosidade (%)</b>
A0	796964	9281879	2,248	2,449	8,2
A1	796964	9281879	2,251	2,555	11,9
A2	796983	9281906	2,207	2,337	5,6
A3	797038	9281935	2,448	2,547	3,9
A4	797092	9282006	2,300	2,444	5,9
A5	796535	9288294	2,232	2,579	13,4
Média			2,281	2,485	8,15

### 6.2.3. Ocorrência 3 - Sossêgo

Nesta Ocorrência 3, foram coletadas quatro amostras para a análise petrofísica: três foram coletadas no mesmo afloramento, as amostras P-1A, P-1B e P-1C. Estas amostras, juntamente com as amostras P-2 e P-3, foram coletadas a sudeste da ocorrência; enquanto a amostra P-4 foi coletada em uma antiga cava de garimpo, a nordeste. A Figura 42, a seguir, apresenta os pontos de coleta.

Figura 42 - Localização das amostras de rocha coletadas na Ocorrência 3 - Sossêgo. Fonte: Adaptado de Cavalcante *et al.* (2018).



As coordenadas UTM e os resultados obtidos na análise petrofísica são apresentados na Tabela 3. A porosidade das amostras varia de 4% a 16% nos gnaisses alterados; e 0,7% a 1,4% nos basaltos.

Tabela 3 - Resultados da análise petrofísica nas amostras de rocha coletadas na Ocorrência 3 - Sossêgo.

Amostra	Longitude UTM (24S)	Latitude UTM (24S)	Densidade da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Tipo de Rocha
P-1A	809425	9240608	2,469	2,635	6,326	Gnaiss branco alterado <sup>1</sup>
P-1B			2,479	2,635	5,974	Gnaiss branco alterado <sup>1</sup>
P-1C			2,225	2,641	15,791	Gnaiss branco alterado <sup>2</sup>
P-1D			2,334	2,592	10,024	Gnaiss branco alterado
P-2A	810638	9239940	2,849	2,869	0,755	Basalto fraturado
P-2B			2,702	2,737	1,363	
P-3A	811149	9239744	2,362	2,583	8,604	Gnaiss alterado branco a rosa
P-3B			2,452	2,555	4,078	

Amostra	Longitude UTM (24S)	Latitude UTM (24S)	Densidade da amostra (g/cm <sup>3</sup> )	Densidade de grãos (g/cm <sup>3</sup> )	Porosidade (%)	Tipo de Rocha
P-3C			2,500	2,609	4,078	
P-4	809709	9246231	-	-	-	Basalto misturado com gnaiss muito alterado (zona de contato)

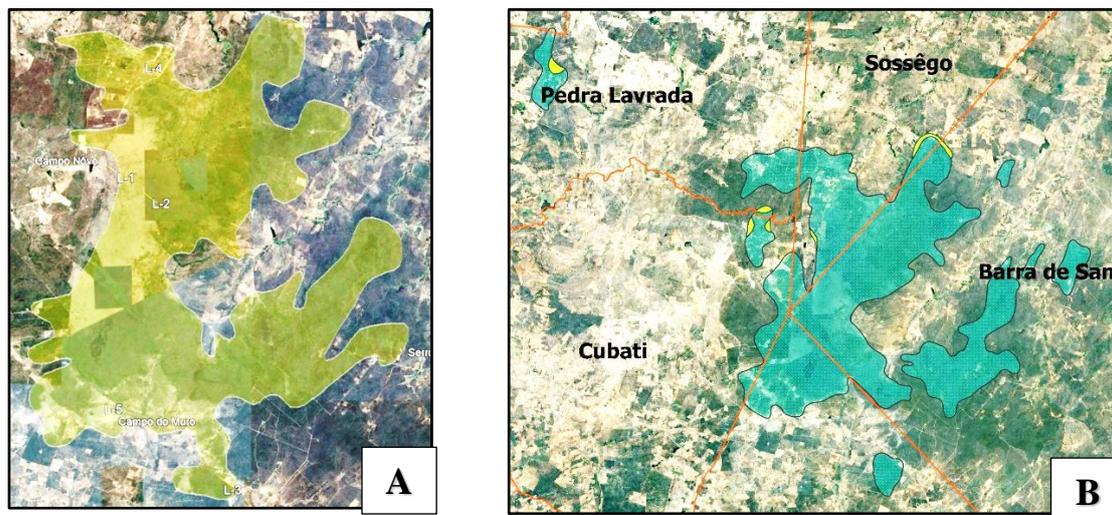
Nota: (1) A amostra foi cortada perpendicularmente à direção da foliação; (2) a amostra foi cortada na mesma direção da foliação.

Apesar de serem rochas cristalinas, os gnaisses encontram-se alterados superficialmente e se comportam como rocha granular, tal como um arenito grosso. As porosidades mais baixas desses gnaisses são encontradas nas amostras P-1A, P-1B, P-3A, P-3B e P3C (<10%), e os valores mais altos estão nas amostras P-1C e P-1D (>10%). Considerando que a porosidade média dos gnaisses é 7,84%, pode-se afirmar que a Ocorrência 3 é menos porosa que as Ocorrências 1 ( $\phi = 20,3\%$ ) e 2 ( $\phi = 8,15\%$ ), com possibilidade de conter a menor reserva de água subterrânea.

De acordo com Feitosa *et al.* (2008) e Manuel Filho (1996), a porosidade primária em rochas cristalinas do Nordeste do Brasil são sistematicamente muito baixas. Especificamente em rochas metamórficas do Estado da Paraíba, cujas médias situam-se entre 0,0007% e 0,0068%. No caso das amostras de basalto analisadas, as suas porosidades indicaram valores superiores (porosidade média de 1,059%), mas não o suficiente para que esta seja considerada uma rocha-reservatório de água subterrânea.

A princípio, a investigação geofísica teve como base as informações obtidas no mapa geológico 1:1.000.000 do Portal do Serviço Geológico GeoSBG (CPRM, 2024), que indicava a Ocorrência 3 constituída por rochas da Formação Campos Novos. No entanto, após visita de campo para a coleta de amostras de rocha, verificou-se que a Ocorrência 3 é constituída quase que totalmente pelo Basalto Macau sobre gnaisses do Complexo Serrinha-Pedro Velho, como indicado na Carta Geológico-Geofísica 1:100.000 do Serviço Geológico do Brasil. Portanto, as seções geofísicas obtidas em campo investigam o Basalto Macau e suas alterações, que resultaram nas argilas bentoníticas da Formação Campos Novos. A Figura 43 apresenta a configuração da Formação Campos Novos nas cartas 1:1.000.000 e 1:100.000.

Figure 43 – Configuração das Formação Campos Novos em diferentes escalas: (a) adaptado de *Earthstar Geographics, SGB-CPRM, Oliveira et al., 2014. Carta Litoestratigráfica 1:1.000.000*; (b) adaptado de *SBG-CPRM, Cavalcante et al, 2018. FOLHA PICUÍ SB.24-Z-B-VI. 1:100.000*.



Nota: Na figura 43A, a área em verde representa a Formação Campos Novos. Na figura 43B, em verde claro, está a Formação Campos Novos, enquanto o verde escuro representa o Basalto Macau.

Considerando que as argilas bentoníticas da Formação Campos Novos possuem boa porosidade e baixa permeabilidade, é possível que os poros destas argilas possam estar preenchidos por fluidos ou, mais especificamente, por água. Contudo, a ausência de conexão entre os poros (permeabilidade) não contribui para que haja fluxo da água nesta formação, inviabilizando a sua extração.

### 6.3. ANÁLISE PETROGRÁFICA

A partir das amostras de mão e plugues, coletadas na Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa, foram confeccionadas lâminas delgadas para análise em microscópio petrográfico e para ensaio de porosidade em laboratório. Pela análise petrográfica, identificou-se que o arcabouço da rocha é predominantemente constituído por grãos de quartzo envoltos por cimento aparentemente argiloso. Contudo, o exame mineralógico do cimento presente entre os grãos, e que afeta a porosidade, não foi conclusivo. Diante disso, realizou-se a análise através de um microscópio eletrônico de varredura (MEV) para determinar, de forma semi-quantitativa, a composição do cimento e grãos, além de visualizar a forma e conectividades dos poros.

A análise das lâminas delgadas indicou cimentação de parte dos poros, a princípio por argilominerais ou óxidos/hidróxidos de ferro por conta da tonalidade do cimento. No entanto, diante dessa indeterminação, foi realizada a análise das lâminas com o MEV/EDS que, além de identificar os elementos químicos presentes no cimento e grãos, conseguiu distinguir satisfatoriamente as características dos poros, tais como forma e conectividade, de maneira bidimensional. De acordo com o MEV/EDS, o cimento é constituído principalmente pelos elementos Si, O e Al, formando lamelas no entorno dos clastos e grãos dissolvidos (provavelmente feldspato), além de preencher poros pré-existentes, o que indica a presença de algum tipo de argila (caulinita). Por outro lado, os grãos são constituídos por Si e O, confirmando que a maioria deles é constituída por quartzo, como identificado na análise petrográfica. Já os poros possuem a presença dos elementos C e O, constituintes da resina utilizada para a confecção das lâminas, que preencheu os espaços vazios entre os minerais presentes. O tipo de porosidade dominante nas amostras é do tipo móldica, que preserva o formato dos grãos pré-existentes que foram dissolvidos no processo de diagênese. A Figura 44 apresenta a imagem obtida no MEV e a sua área correspondente na lâmina delgada. As Figuras 45 e 46 apresentam os resultados da análise do MEV.

Figura 44 – (A) Imagem do MEV sobre a lâmina da amostra A7 (ou lâmina P7); (B) Fotomicrografia correspondente da área analisada pelo MEV. Nota: Qz: quartzo, Kln: caulinita, Fsp: vestígio de feldspato.

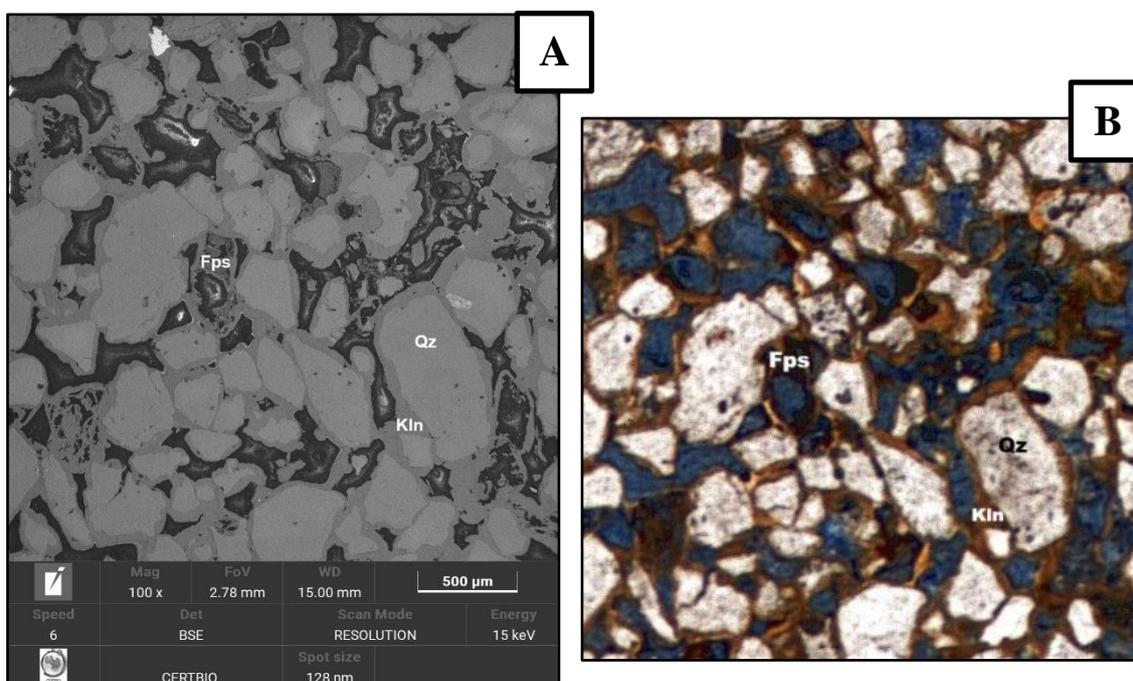


Figura 45 – (A) Análise do MEV no ponto 41, localizado sobre cristal de feldspato dissolvido; (B) espectro dos elementos químicos presentes; (C) gráfico da fração atômica, em %, dos elementos químicos; (D) gráfico da fração de peso, em %, no mesmo ponto. Nota: A fração de peso é a relação entre o peso de um componente de uma mistura e o peso total da mistura.

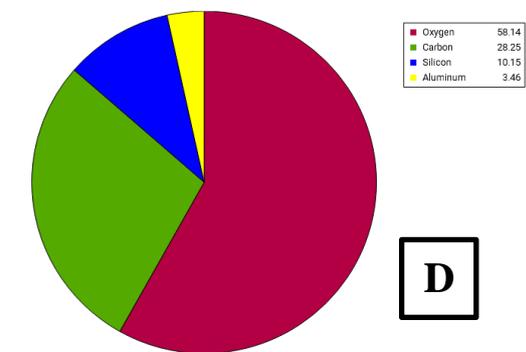
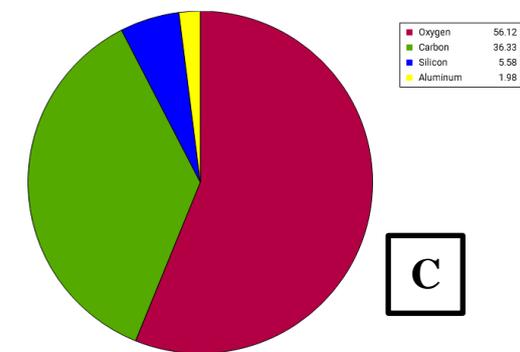
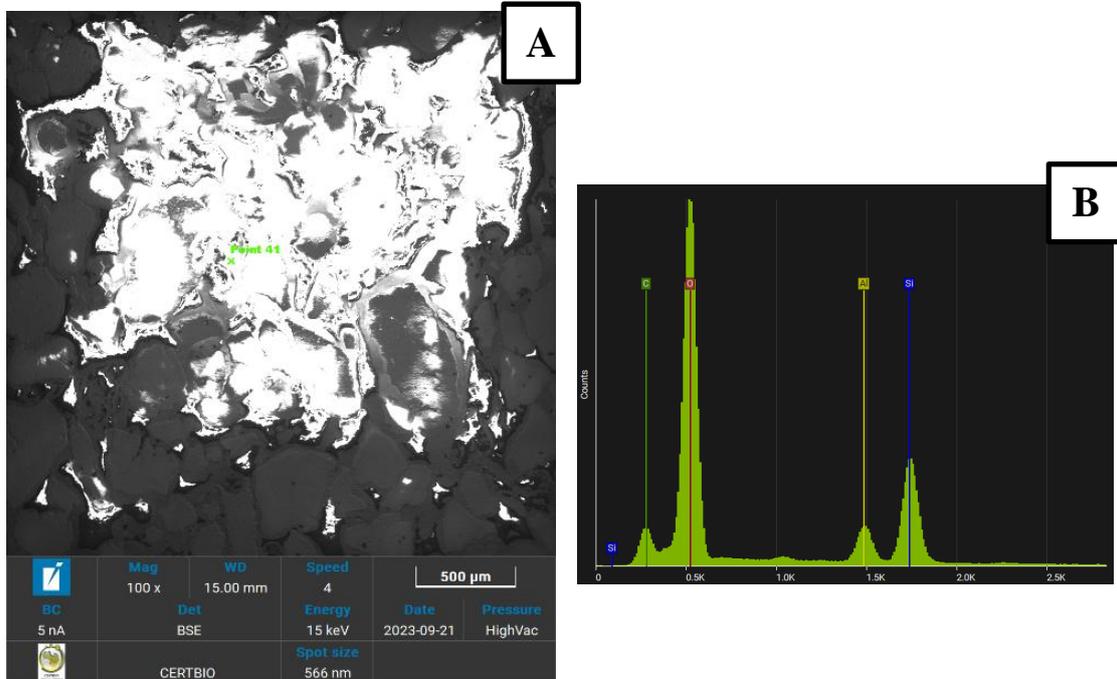
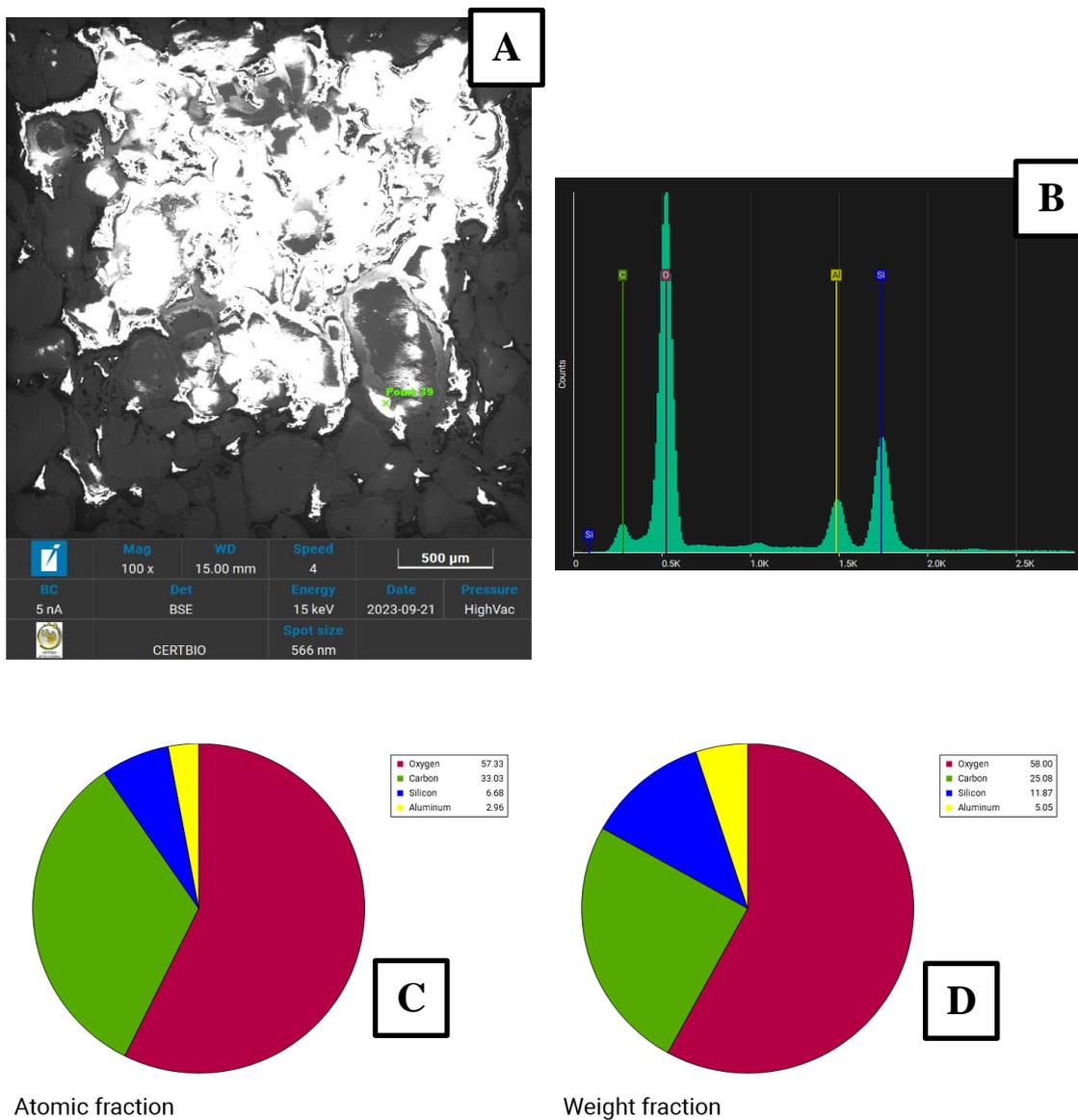


Figura 46 – (A) Análise do MEV no ponto 39, localizado sobre cristal de caulinita; (B) espectro dos elementos químicos presentes; (C) gráfico da fração atômica, em %, dos elementos químicos; e (D) gráfico da fração de peso, em %. Nota: A fração de peso é a relação entre o peso de um componente de uma mistura e o peso total da mistura.

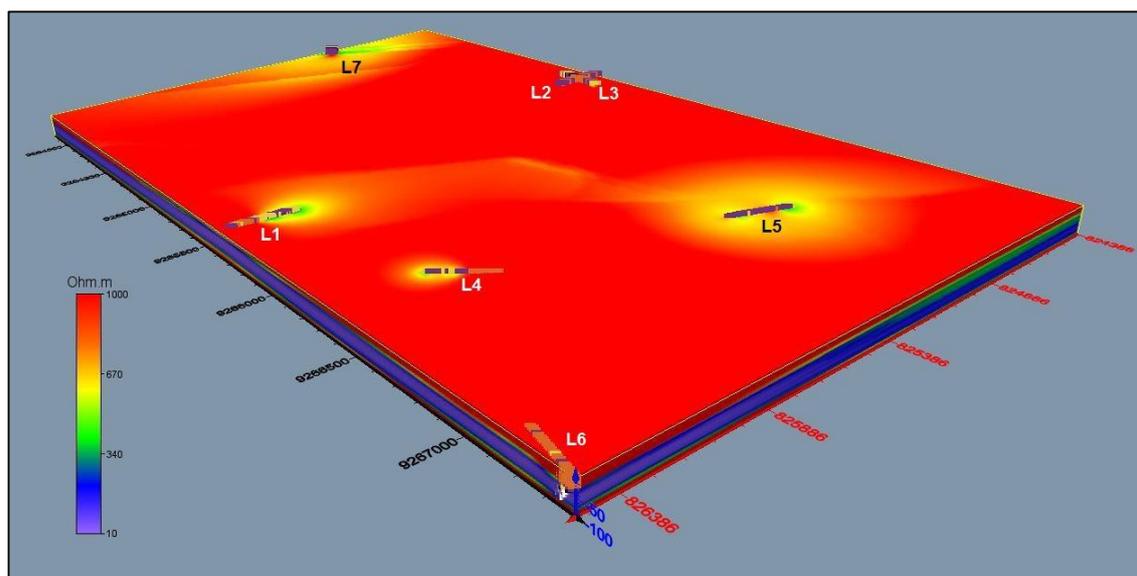


## 6.4. CÁLCULO DA RESERVA DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

### 6.4.1. Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa

Os dados resultantes da geração das imagens geoeletricas foram exportados para o *software* Voxler, cujo processamento resultou no modelo pseudo-3D apresentado na Figura 47.

Figura 47 - Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 1. A camada saturada em água é vista nas cores azul e roxo.

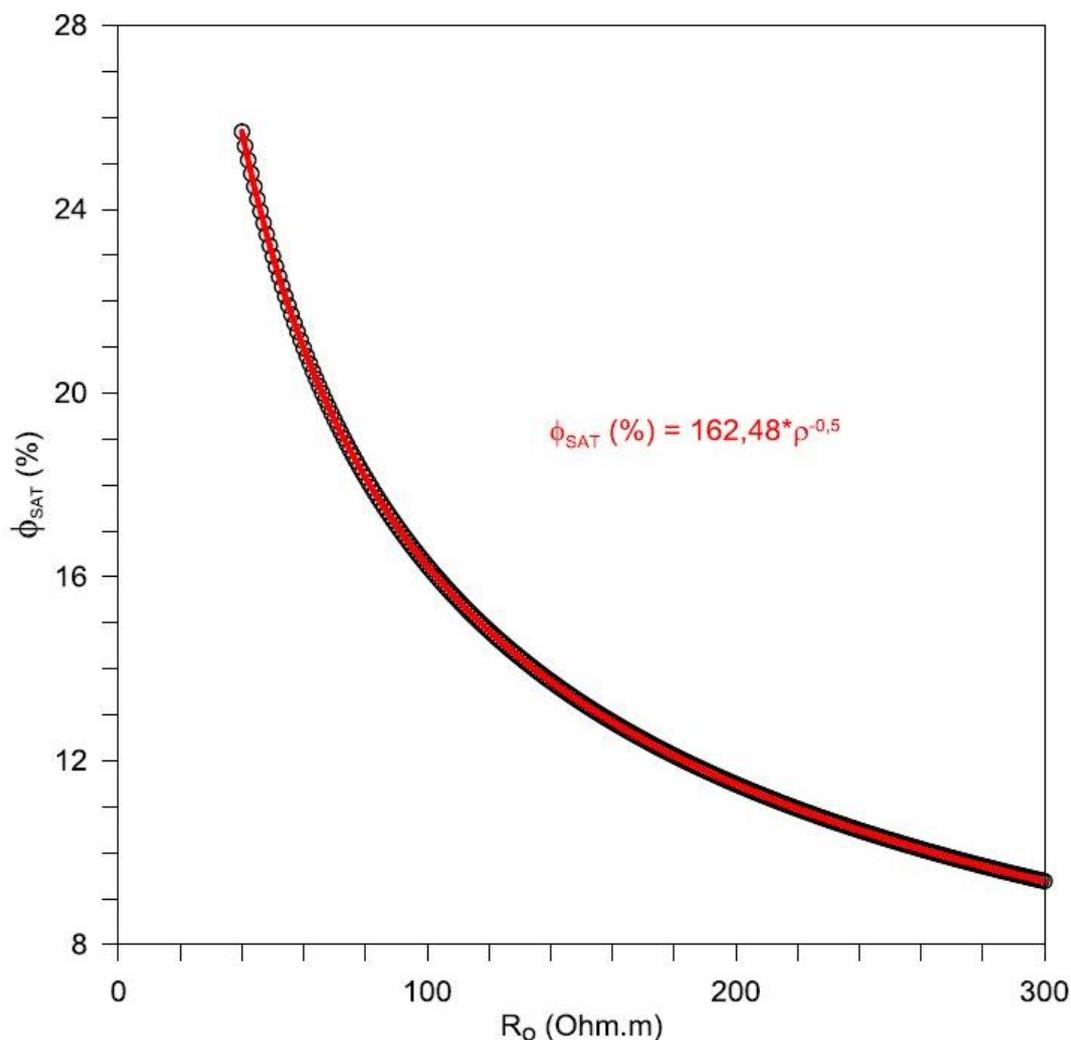


Quando rochas areno-argilosas e arenitos, como os encontrados na área investigada, estão saturados em água, apresentam resistividades elétricas entre 40 e 300  $\Omega\text{m}$ . O *software* Voxler calculou o volume da rocha contido na camada com valores de resistividade elétrica entre esses limites. O cálculo indica que a área investigada (760 ha) possui volume de rocha (saturável) com 410 milhões  $\text{m}^3$  de água. Com o intuito de calcular o volume de água contido neste volume de rocha, é necessário estimar a porosidade efetivamente saturada em água. Isto é realizado com a aplicação da equação de Archie e Winsauer (Eq. 16 e 17) na fase da análise petrofísica.

Os valores de resistividade elétrica da rocha saturável ( $R_o$ ) são extraídos do modelo pseudo-3D, enquanto a resistividade da água que satura a rocha ( $R_w$ ) é obtida através de medição da condutividade elétrica da água coletada nos poços de abastecimento encontrados na Ocorrência 1, cujo valor médio é de 3793  $\mu\text{S}/\text{cm}$ , que corresponde a uma resistividade elétrica de 2,64  $\Omega\text{m}$ .

A Figura 48 apresenta o gráfico de porosidade saturada da rocha em função da resistividade elétrica da rocha nos pontos onde a resistividade elétrica foi medida ao longo das seções de dados geofísicos. Essa relação foi obtida considerando que  $a = 1$  e  $m = 2$ , que fornecem valores de porosidade compatíveis com os medidos nos ensaios petrofísicos.

Figura 48 - Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 2$ ;  $R_w = 2,64 \Omega m$ ) para a Ocorrência 1. Fonte: Guedes Sobrinho, 2024.

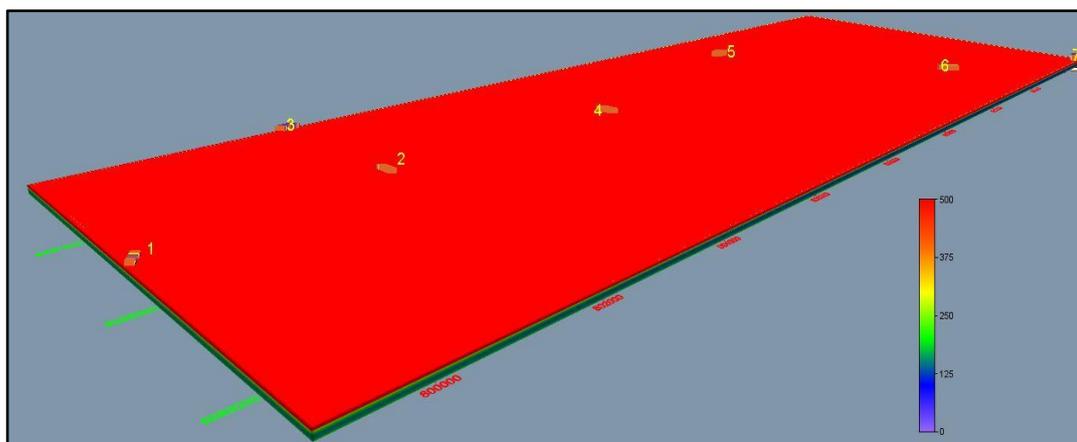


Usando a equação de regressão da Figura 48 e os dados do modelo pseudo-3D, estimou-se uma reserva de 65,3 milhões de  $m^3$  de água contida na área investigada (760 ha). Realizando o cálculo proporcional para toda a área da Ocorrência 1 (3145 ha), chega-se a um volume estimado de 270 milhões de  $m^3$  de água subterrânea. Ressalta-se que este valor representa uma estimativa para o volume de água *in situ* e o que consegue ser realmente produzido é uma fração desse valor.

#### 6.4.2. Ocorrência 2 – Nova Floresta

Os valores de resistividade da rocha saturada de água ( $R_o$ ) foram obtidos a partir do modelo pseudo-3D mostrado na Figura 49 e a resistividade da água ( $R_w$ ) que satura a rocha foi obtida através da Equação 10, utilizando os valores medidos durante a coleta de amostras de água subterrânea, quando se registrou os valores da condutividade elétrica.

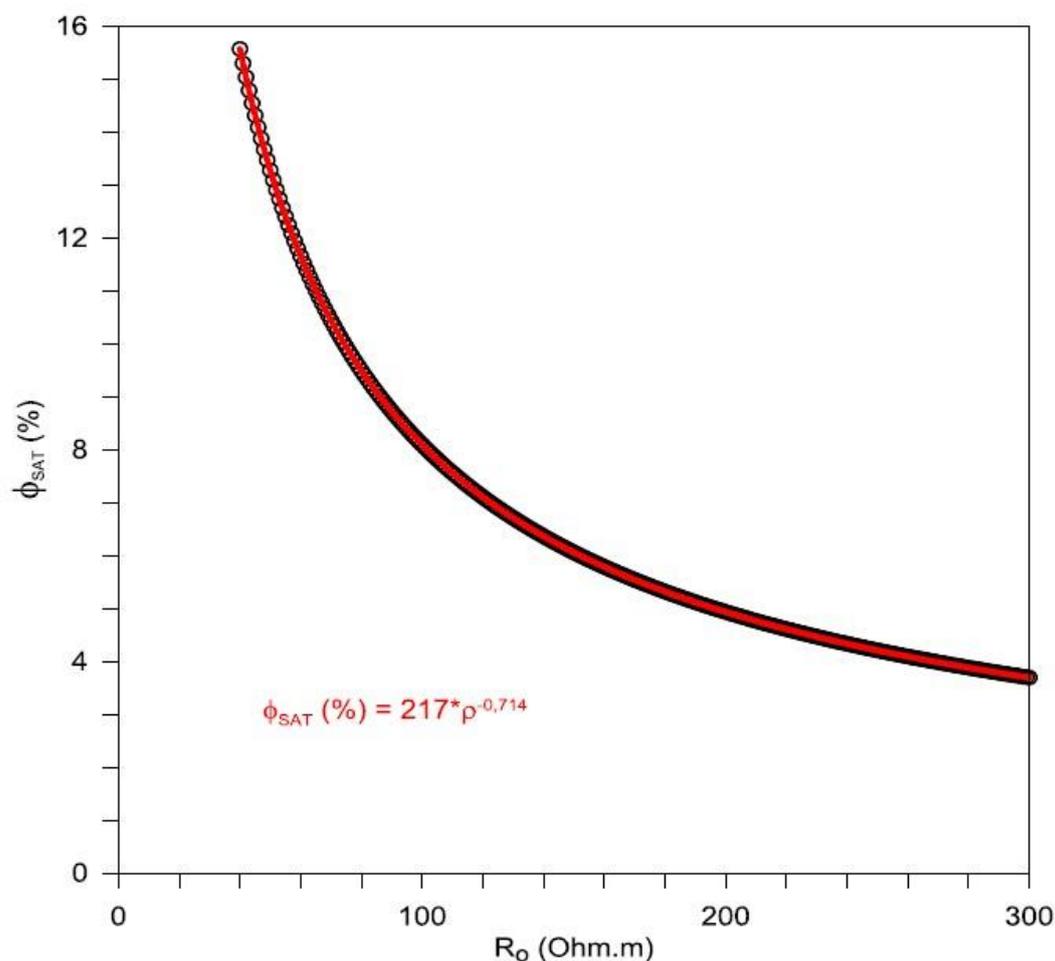
Figura 49 - Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 2. A camada saturada em água é vista nas cores azul e roxo.



A condutividade elétrica medida foi de  $3377 \mu\text{S}/\text{cm}$ , portanto a resistividade foi de  $2,96 \Omega\text{m}$ . O Voxler calculou um volume de rocha condutiva, cuja resistividade elétrica varia de  $40$  a  $300 \text{ m}\Omega$ , de  $9,45$  bilhões de  $\text{m}^3$  na área investigada.

A Figura 50 apresenta a porosidade saturada da rocha em função da resistividade elétrica da rocha nos pontos de profundidade onde a resistividade foi medida ao longo da seção geofísica. Obteve-se essa relação considerando  $a = 1$  e  $m = 1,4$ ; os quais oferecem valores compatíveis aos obtidos na análise petrofísica. Em seguida, utilizou-se a função regressiva para a estimativa do volume.

Figura 50 - Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 1,4$ ;  $R_w = 2,96 \Omega m$ ) para a Ocorrência 2.

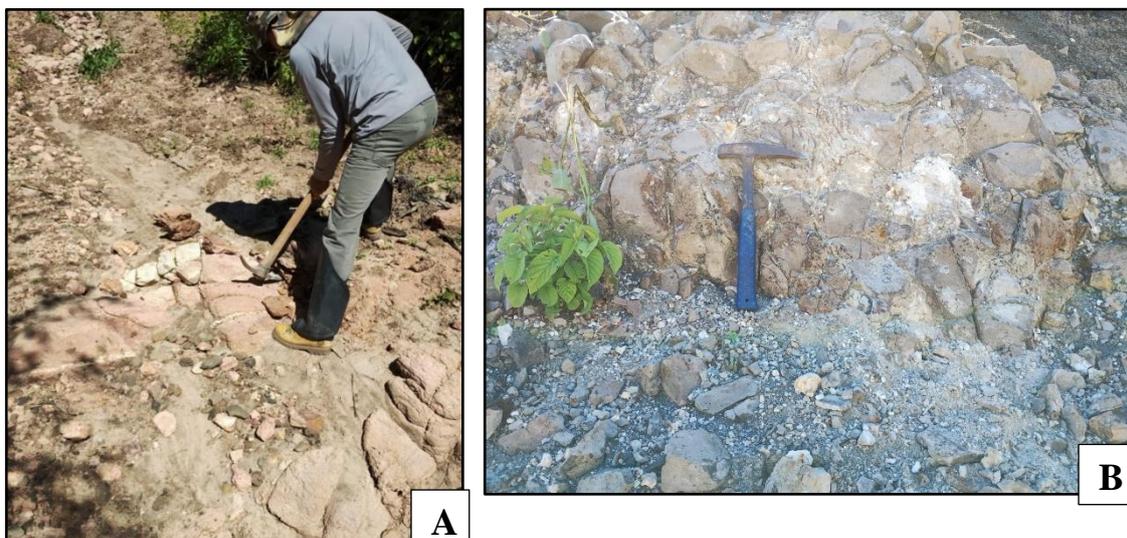


Considerando-se uma porosidade saturada média de 6,3%, estimou-se 597 milhões de  $m^3$  de água subterrânea reservada na área investigada, de 12.285 ha. O cálculo proporcional a área da Ocorrência 2, de 10.712 ha, indica um volume reservado de aproximadamente 521 milhões de  $m^3$  de água subterrânea. Esse valor é apenas uma estimativa, o que pode ser produzido de fato é um volume menor.

#### 6.4.3. Ocorrência 3 – Sossêgo

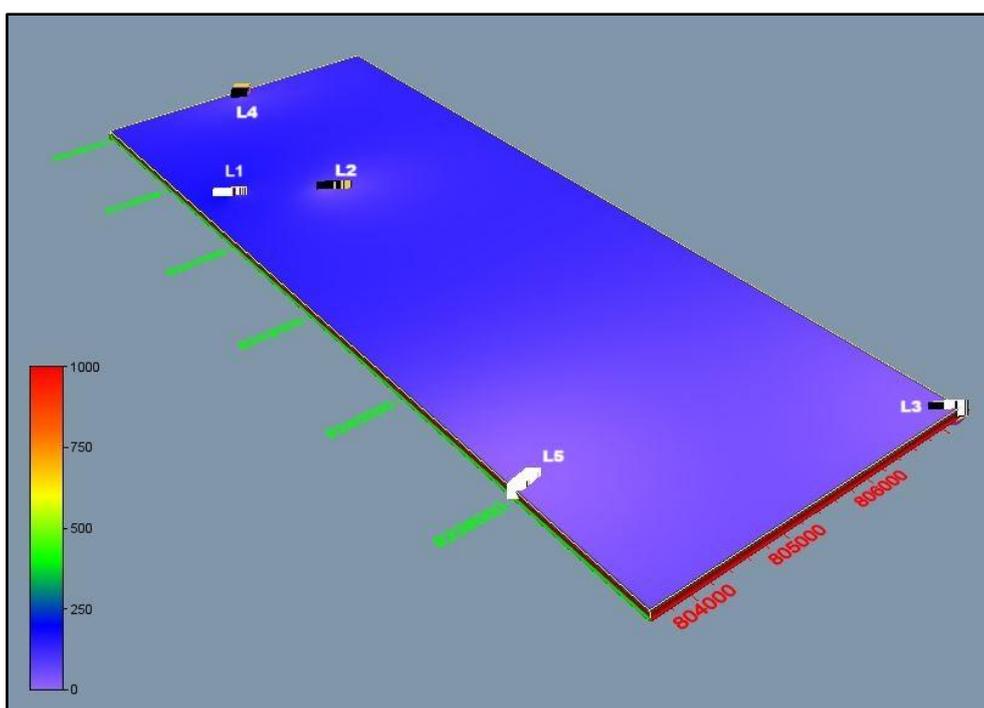
O cálculo da reserva foi realizado para as rochas gnáissicas alteradas do Complexo Serrinha-Pedro Velho, já que estas foram as que apresentaram possibilidade de armazenamento de água subterrânea. A maior evidência disso são as amostras de água que foram coletadas em poços instalados neste aquífero. Lembrando que o gnaíse alterado (Figura 51), que ocorre nas imediações da Formação Campos Novos, apresenta porosidade que o torna semelhante a um aquífero granular.

Figura 51 – (A) Amostra coletada no ponto 3: gnaiss alterado em leito de estrada de terra, erodido pela ação da chuva. (B) Amostra coletada no ponto 4: Gnaiss branco alterado, com aspecto arenoso, misturado a basalto.



Os dados resultantes da geração das imagens geoeletricas foram exportados para o *software* Voxler, resultando em um modelo tridimensional (modelo pseudo-3D) que representa o volume que contém todas as seções geoeletricas obtidas na Ocorrência 3 (Figura 52).

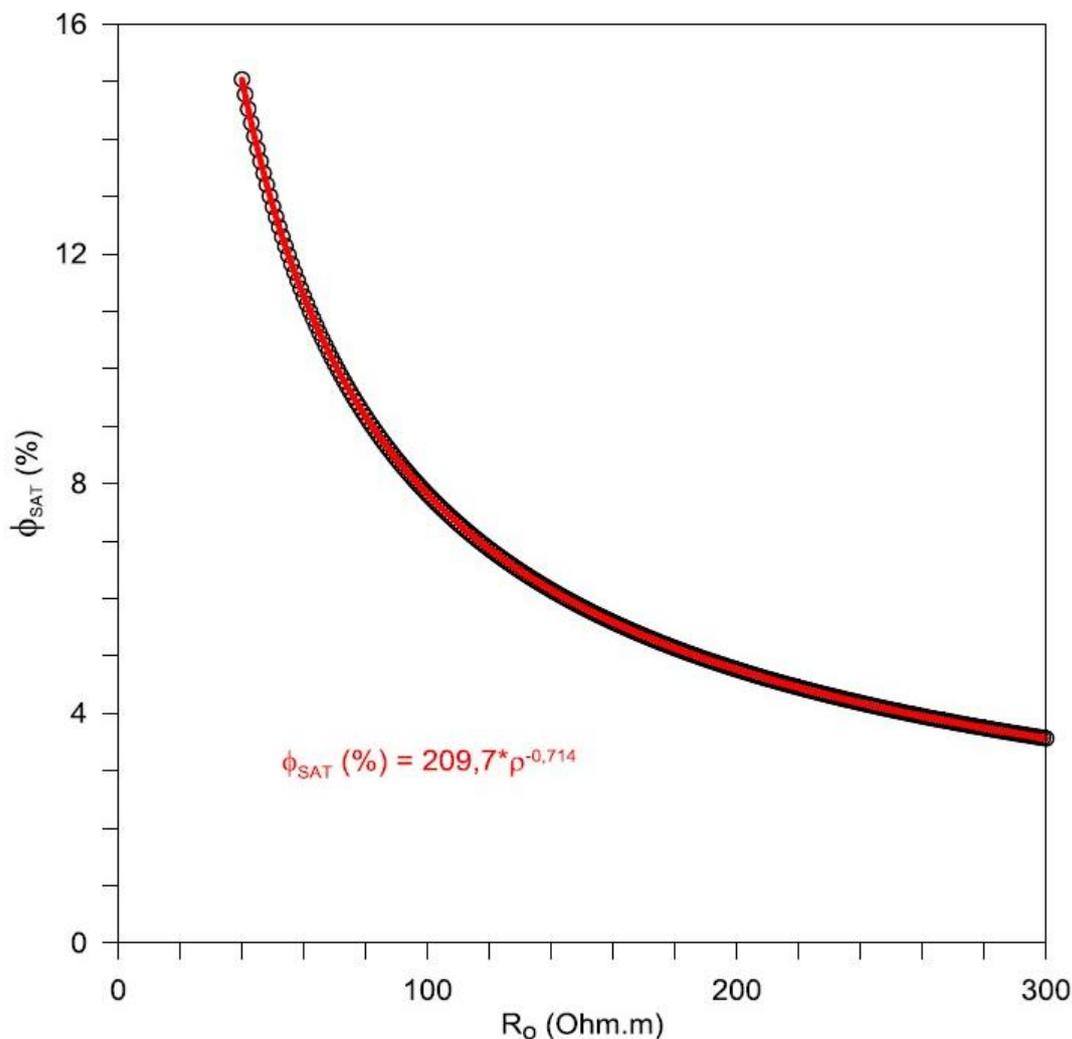
Figura 52 - Modelo pseudo-3D gerado pela aplicação do método do inverso do quadrado da distância para a área investigada da Ocorrência 3. Nota: A camada saturada em água é vista nas cores azul e roxo.



Os valores de resistividade elétrica da rocha saturável ( $R_o$ ) foram extraídos do modelo pseudo-3D, enquanto a resistividade da água que satura a rocha ( $R_w$ ) foi obtida na medição da condutividade elétrica da água coletada nos poços de abastecimento encontrados na Ocorrência 3, cujo valor médio é de  $35,43 \mu\Omega/m$  (de acordo com resultados do LABDES), que corresponde a uma resistividade elétrica de  $2,82 \Omega m$ .

A Figura 53 apresenta o gráfico de porosidade saturada da rocha em função da resistividade elétrica da rocha nos pontos onde a resistividade elétrica foi medida ao longo das seções de dados geofísicos. Essa relação foi obtida considerando que  $a = 1$  e  $m = 1,4$ ; que fornecem valores de porosidade compatíveis com os medidos nos ensaios petrofísicos.

Figura 53 - Relação entre resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ( $a = 1$ ;  $m = 1,4$ ;  $R_w = 2,82 \Omega m$ ) para a Ocorrência 3.



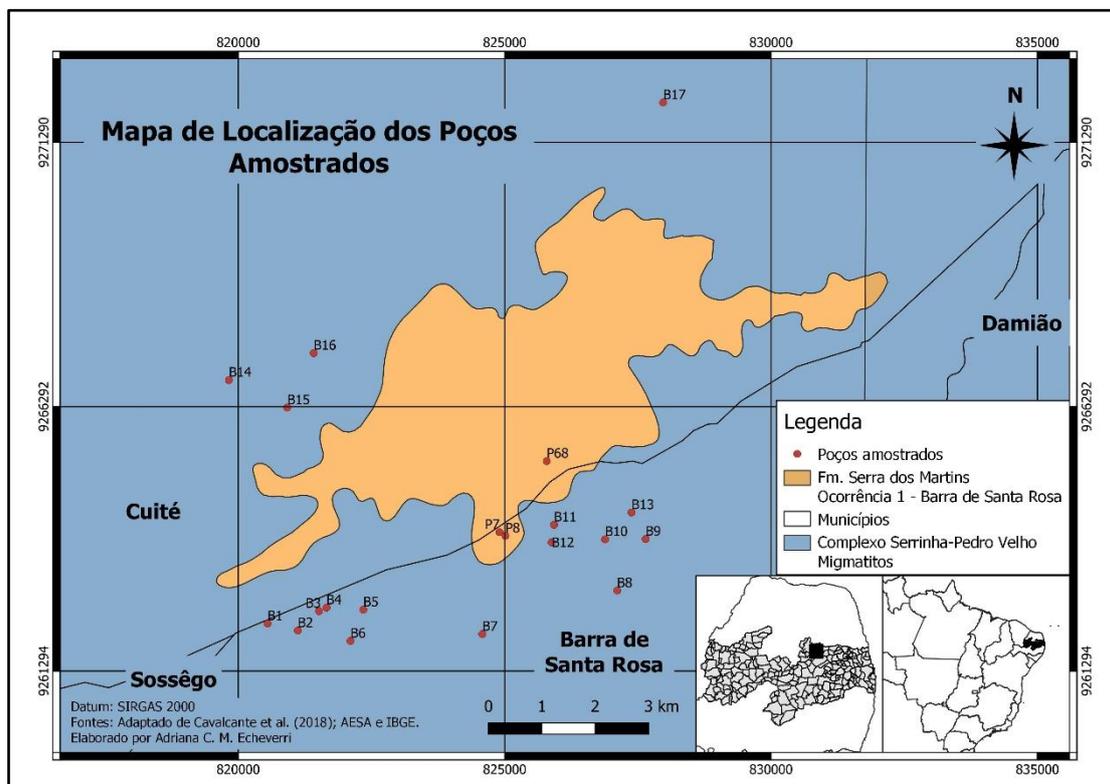
Usando a equação de regressão da Figura 53 e os dados do modelo pseudo-3D, estimou-se uma reserva de 59 milhões de m<sup>3</sup> de água contida na Ocorrência 3 (2738 ha). Realizando o cálculo proporcional para toda a área investigada (4425 ha), chegou-se a um volume estimado de 70 milhões m<sup>3</sup> de água subterrânea. Este valor representa uma estimativa, na qual utilizou-se os valores de porosidade média do gnaiss alterado.

## 6.5. ANÁLISE FÍSICO-QUÍMICA DA ÁGUA SUBTERRÂNEA

### 6.5.1. Ocorrência 1 – Barra de Santa Rosa

Inicialmente, foi consultado o banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, no Portal do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, para obter a localização dos poços de abastecimento da área. Desta forma, foram coletadas amostras de água subterrânea em 20 poços existentes na Ocorrência 1 e entorno, cuja localização encontra-se na Figura 54.

Figura 54 - Localização dos poços na Ocorrência 1 e entorno.



A coleta de amostras foi realizada nos dias 08 de fevereiro e 04 de agosto de 2023, e enviadas ao Laboratório de Referência em Salinização (LABDES), da UFCG, e ao

Instituto Federal da Paraíba (IFPB). Os resultados das análises físico-químicas da água subterrânea são apresentados na Tabela 4. Os valores em vermelho indicam as concentrações que excedem o limite máximo permitido para o consumo humano, de acordo com a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, e os limites de dessedentação e irrigação, de acordo com a Resolução 369/2008.

Cabe ressaltar que somente as amostras P-7, P-8 e P-68 referem-se ao aquífero sedimentar da Formação Serra dos Martins, enquanto as demais foram coletadas no aquífero cristalino sotoposto àquela e localizados a até 2 km de distância da borda da formação sedimentar. Amostras de água subterrânea do aquífero cristalino foram coletadas para complementar as poucas amostras coletadas no aquífero sedimentar, já que a Formação Serra dos Martins pode ser uma zona de recarga para a água subterrânea armazenada nas fraturas do aquífero cristalino.

Tabela 4 - Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 1 e entorno.

Parâmetros	Amostras										LD	MS 888/2021	CONAMA 396/2008	
	B1 <sup>(2,4)</sup>	B2 <sup>(2,4)</sup>	B3 <sup>(1,4)</sup>	B4 <sup>(2,4)</sup>	B5 <sup>(2,4)</sup>	B6 <sup>(1,4)</sup>	B7 <sup>(2,4)</sup>	B8 <sup>(2,4)</sup>	B9 <sup>(2,4)</sup>	B10 <sup>(2,4)</sup>			Dessedentação	Irrigação
CE (µS/cm)	5278	4975	6530	7437	6340	12690	4433	2918	10100	10980	0,1	NE	-	-
pH	7,26	7,62	7,4	7,7	7,68	7,4	7,59	7,62	7,75	7,03	0,1	6 a 9	-	-
Turbidez (µT)	0,04	0,04	0,4	0,05	0,09	0,5	0,04	0,29	0,09	<b>277</b>	0,1	5	-	-
Cor, UH (mg Pt-Co/L)	-	-	4	-	-	0	-	-	-	-	0,1	15	-	-
Dureza total (mg/L)	<b>1250</b>	<b>1120</b>	<b>1450</b>	<b>1430</b>	<b>1400</b>	<b>3668</b>	<b>950</b>	<b>640</b>	<b>2875</b>	<b>2625</b>	0,1	300	-	-
Sódio (mg/L)	-	-	<b>880,3</b>	-	-	<b>1355,6</b>	-	-	-	-	0,1	200	-	-
Potássio (mg/L)	22	18,5	6,7	6,5	12	8,6	4	5	15,5	27,5	0,1	NE	-	-
Alumínio (mg/L)	0,01	0,03	0	0,04	0,18	0	0,05	0,04	<b>0,32</b>	<b>0,38</b>	0,01	0,2	5	5
Ferro total (mg/L)	0,12	0,06	0,27	0,01	0,05	0,26	0,16	0,1	0,01	<b>4,11</b>	0,01	0,3	-	5
Alcalinidade total (mg/L)	50	104	560	80	79	580	92	108	55	107	0,1	NE	-	-
CO <sup>2</sup> livre (mg/L)	0	0	4,4	5	0	22,9	0	0	11,1	43,2	0,1	NE	-	-
Sulfato (mg/L)	230	<b>320</b>	<b>327,2</b>	<b>470</b>	220	<b>682,8</b>	220	140	<b>550</b>	<b>400</b>	0,1	250	1000	-
Fosfato (mg/L)	-	-	2,7	-	-	0	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
Cloreto (mg/L)	<b>1589,96</b>	<b>1479,96</b>	<b>2037,7</b>	<b>2379,93</b>	<b>2179,94</b>	<b>4277,8</b>	<b>1239,97</b>	<b>844,98</b>	<b>4099,89</b>	<b>3849,89</b>	0,1	250	-	100 - 700
Nitrato (mg/L)	0,43	2,56	0,03	6,55	5,25	0,05	1,29	2,36	5,71	0,6	0,01	10	90	-
Amônia (mg/L)	-	-	<b>5,86</b>	-	-	<b>33,01</b>	-	-	-	-	0,01	1,2	-	-
Sílica (mg/L)	54	66	43,6	39	57	70,3	43	61	34	23	0,1	NE	-	-
ILS	-	-	0,81	-	-	1,21	-	-	-	-	-	NE	-	-
SDT (mg/L)	<b>2639</b>	<b>2488</b>	<b>4412,2</b>	<b>3718</b>	<b>3170</b>	<b>8213,5</b>	<b>2216</b>	<b>1459</b>	<b>5054</b>	<b>5495</b>	0,1	500	-	-
Salinidade (PSU)	2,84	2,67	3,14	4,1	3,46	6,33	2,36	1,52	5,7	6,23	-	NE	-	-
Temperatura (°C)	24,13	24,09	23,98	23,93	23,98	23,99	24,02	24,05	24,16	24,43	-	NE	-	-

Notas: (1) amostras analisadas pelo Laboratório de Referência em Salinização (LABDES); (2) amostras analisadas pelo Instituto Federal da Paraíba (IFPB); (3) amostras tiveram os parâmetros medidos com sonda multiparâmetro HANNA; (4) amostras de aquífero cristalino; (5) amostras de aquífero sedimentar; CE – condutividade elétrica; UH – Unidade Hazen; ILS – Índice de Saturação de Langelier; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; LD – limite de detecção mínimo; MS 888/2021 – Valores Máximos Permitidos estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde; NE – valores Não Estabelecidos.

Tabela 4 (Continuação) - Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 1 e entorno.

Parâmetros	Amostras										LD	MS 888/2021	CONAMA 396/2008	
	B11 <sup>(2,4)</sup>	B12 <sup>(1,4)</sup>	B13 <sup>(1,4)</sup>	B14 <sup>(2,4)</sup>	B15 <sup>(2,4)</sup>	B16 <sup>(2,4)</sup>	B17 <sup>(2,4)</sup>	P-7 <sup>(3,5)</sup>	P-8 <sup>(3,5)</sup>	P-68 <sup>(3,5)</sup>			Desseden tação	Irrigação
CE (µS/cm)	3578	1160	7690	3783	5786	2888	5640	698	1391	9290	0,1	NE	-	-
pH	8,6	8,2	8,4	7,3	7,14	7,31	6,89	6,17	<b>5,7</b>	<b>2,88</b>	0,1	6 a 9	-	-
Turbidez (µT)	0,04	0,5	1,7	0,06	0,07	0,05	0,05	-	-	-	0,1	5	-	-
Cor, UH (mg Pt-Co/L)	-	3,0	10	-	-	-	-	-	-	-	0,1	15	-	-
Dureza total (mg/L)	<b>1120</b>	295,6	<b>1878</b>	<b>1040</b>	<b>1510</b>	<b>970</b>	<b>1260</b>	-	-	-	0,1	300	-	-
Sódio (mg/L)	-	144,8	<b>880,3</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,1	200	-	-
Potássio (mg/L)	17,5	47,7	15,3	11,5	27,5	9,5	18	-	-	-	0,1	NE	-	-
Alumínio (mg/L)	0,04	0,02	<b>0,2</b>	0	0,02	0	0,15	-	-	-	0,01	0,2	5	5
Ferro total (mg/L)	<0,01	0	<b>0,8</b>	0,15	0,01	0,09	0,08	-	-	-	0,01	0,3	-	5
Alcalinidade total (mg/L)	56	592	120	123	59	97	72	-	-	-	0,1	NE	-	-
CO <sup>2</sup> livre (mg/L)	0	6,2	0	0	0	0	18	-	-	-	0,1	NE	-	-
Sulfato (mg/L)	110	65,2	<b>341,4</b>	<b>270</b>	<b>430</b>	100	190	-	-	-	0,1	250	1000	-
Fosfato (mg/L)	-	0	13	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
Cloreto (mg/L)	<b>1134,97</b>	76,7	<b>2609,3</b>	<b>969,97</b>	<b>2129,94</b>	<b>699,98</b>	<b>1999,94</b>	-	-	-	0,1	250	-	100 - 700
Nitrato (mg/L)	2,4	0,01	0,32	9,7	6,23	4,5	0,47	-	-	-	0,01	10	90	-
Amônia (mg/L)	-	0,02	<b>9,59</b>	-	-	-	-	-	-	-	0,01	1,2	-	-
Sílica (mg/L)	31	50,6	89,9	60	50	56	28	-	-	-	0,1	NE	-	-
ILS	-	1,06	1,27	-	-	-	-	-	-	-	-	NE	-	-
SDT (mg/L)	<b>1789</b>	<b>1198,2</b>	<b>4602,1</b>	<b>1892</b>	<b>2893</b>	<b>1444</b>	<b>2820</b>	349	<b>695</b>	<b>4645</b>	0,1	500	-	-
Salinidade (PSU)	1,88	0,48	3,98	1,99	3,13	1,5	3,05	0,34	0,69	5,19	-	NE	-	-
Temperatura (°C)	24,22	24,15	24,13	24,49	24,59	24,64	24,6	28,56	31,04	27,64	-	NE	-	-

Notas: (1) amostras analisadas pelo Laboratório de Referência em Salinização (LABDES); (2) amostras analisadas pelo Instituto Federal da Paraíba (IFPB); (3) amostras tiveram os parâmetros medidos com sonda multiparâmetro HANNA; (4) amostras de aquífero cristalino; (5) amostras de aquífero sedimentar; CE – condutividade elétrica; UH – Unidade Hazen; ILS – Índice de Saturação de Langelier; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; LD – limite de detecção mínimo; MS 888/2021 – Valores Máximos Permitidos estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde; NE – valores Não Estabelecidos.

De acordo com os resultados, as amostras B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B13, B14, B15, B16 e B17 possuem concentrações de **Dureza total** e **Cloreto** superiores aos valores máximos permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde (MS), conforme apresentado nas Figuras 55 e 56. Em princípio, essas águas subterrâneas precisam de algum tratamento antes do consumo humano.

Figura 55 - Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L.

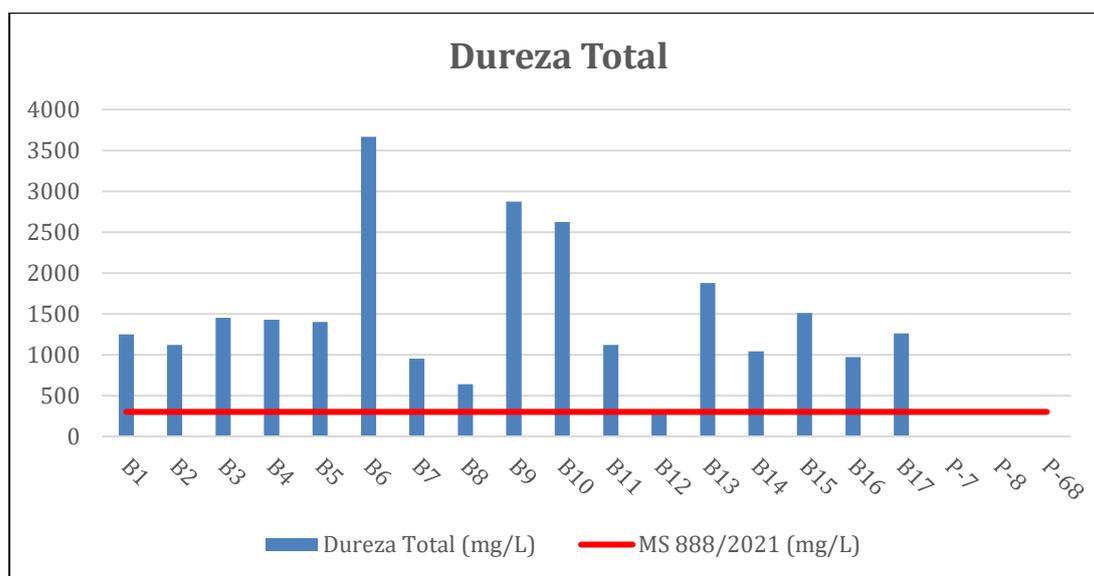
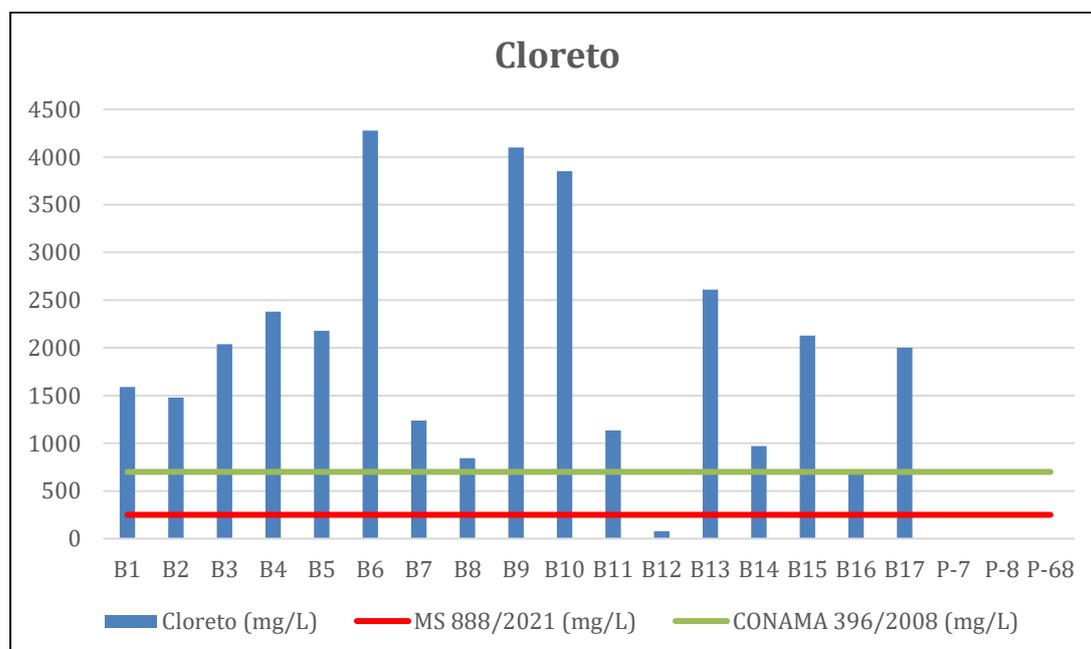


Figura 56 - Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L.



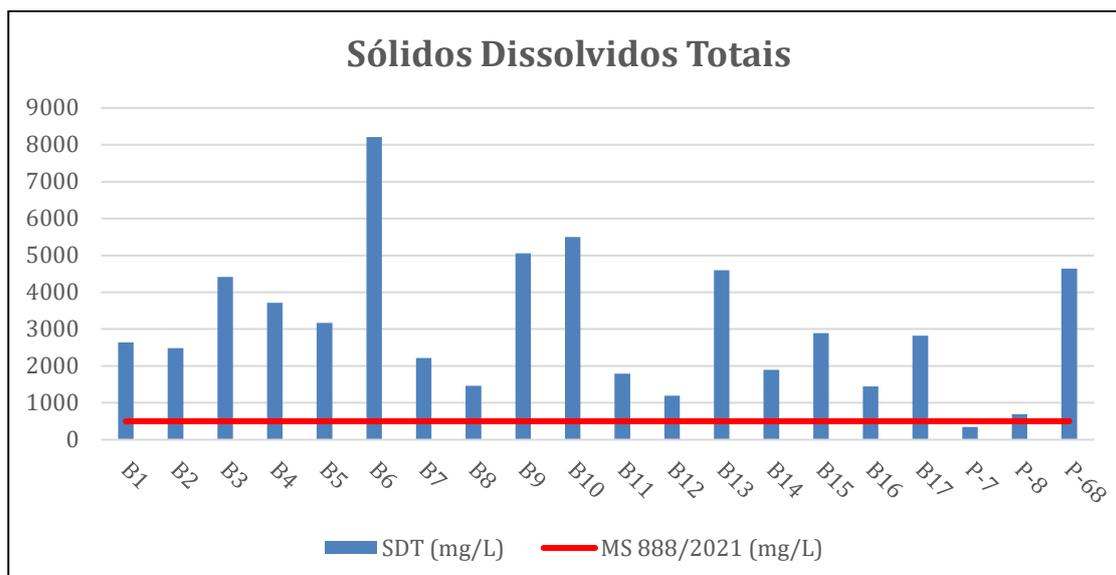
A **dureza** da água refere-se à quantidade de bicarbonatos, carbonatos, sulfatos ou cloretos de cálcio e magnésio dissolvidos nela. A água dura pode provocar alguns contratempos como danos em materiais e equipamentos que usamos rotineiramente. Entretanto, quanto à saúde humana, ela pode provocar o ressecamento da pele e dos cabelos (Portal Grupo Hídrica, 2023), e o seu consumo não é apropriado pelo sabor particular que a água salobra apresenta.

Quanto às concentrações de **cloreto**, apenas a amostra B12 não apresentou valor superior ao VMP estabelecido pela Portaria MS (250 mg/L). Nas demais amostras as concentrações **cloreto** variaram entre 699,98 e 2609,3 mg/L (Figura 64). As amostras P-7, P-8 e P-68, não foram analisadas para este elemento. Os **cloretos** são mais abundantes em águas subterrâneas de regiões semiáridas. Apenas apresenta risco ao ser humano em caso de deficiência no metabolismo do cloreto de sódio, que é o caso da insuficiência cardíaca congestiva. O íon de cloreto também é um indicador de poluição advinda de lixões e aterros sanitários; e altas concentrações de **cloreto** costumam ser desfavoráveis ao crescimento de vegetais na região onde ocorrem (CETESB, 2019).

As amostras B1, B2, B3, B4, B5, B6, B7, B8, B9, B10, B11, B13, B14, B15 e B17 também apresentam concentração de **Cloreto** superiores aos estabelecidos na Resolução CONAMA 396/2008, indicando que, em princípio, elas também não podem ser utilizadas para irrigação. Considerando que os poços não possibilitam o acesso direto à água na formação do aquífero, as amostras foram coletadas por meio de torneiras e reservatórios externos de água, o que podem explicar as elevadas concentrações de **Cloreto**.

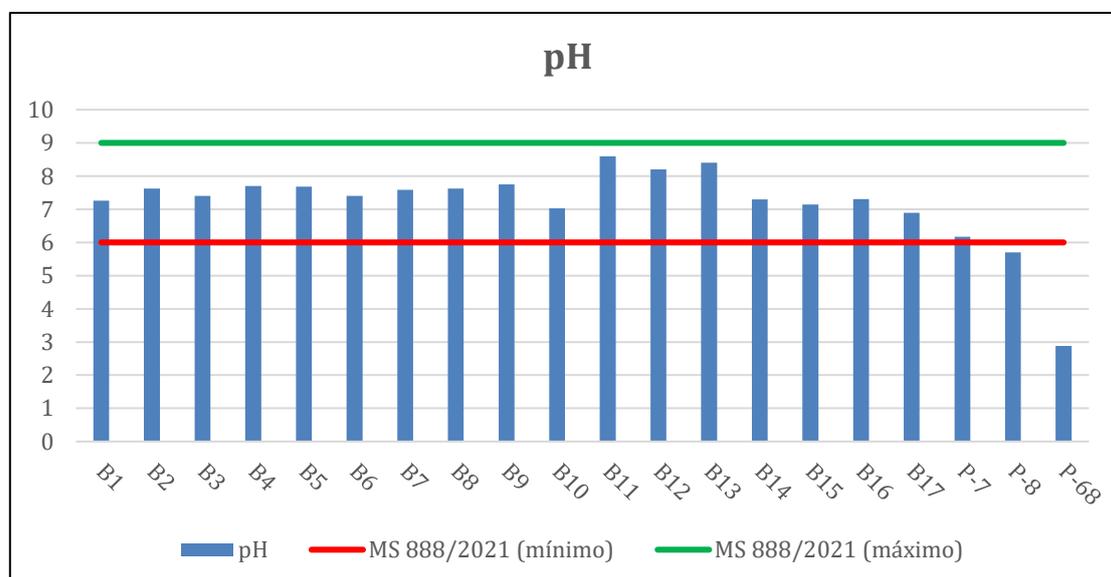
A concentração de **Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)** relaciona-se à **salinidade** da água, pois o seu excesso também afeta o seu sabor, deixando-a amarga ou salgada. Todas as amostras analisadas indicaram concentrações de SDT superiores ao VMP estabelecido na Portaria do MS (Figura 57). A única exceção entre as amostras analisadas é a P-7, mas não é possível afirmar sobre a sua potabilidade devido aos poucos parâmetros analisados. Segundo McNeely *et al.* (1979, apud Silva *et al.*, 2018), a água subterrânea pode ser classificada em doces (STD < 1000 ppm); salgadas (1000 a 10.000 ppm) e salmouras (STD >10.000 ppm). Portanto, considerando a referida classificação, as águas analisadas são doces (menor concentração igual a 349 mg/L) a salobras (maior concentração igual a 8213,5 mg/L).

Figura 57 - Concentrações de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L.



As amostras P-8 e P-68, que também tiveram poucos parâmetros analisados, apresentaram valores de **pH** inferiores aos valores recomendados pela Portaria do Ministério da Saúde, indicando sua acidez. As águas naturais apresentam valores de **pH** que variam de acordo com as características do subsolo e não apresentam risco à saúde humana (Figura 58).

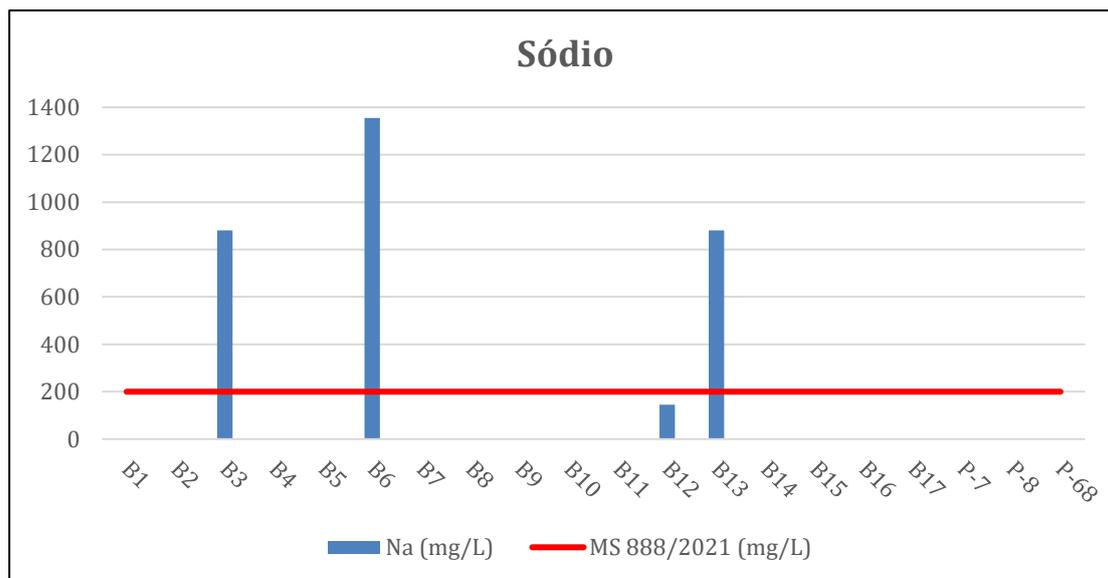
Figura 58 - Valores de pH em relação aos limites inferior e superior, iguais a 6 e 9, respectivamente.



As amostras B3, B6 e B13 apresentaram concentrações superiores ao valor máximo permitido pela Portaria MS para **sódio** (Figura 59). Este elemento, conforme explicado anteriormente, está relacionado à **salinidade**, influenciando no sabor da água. O consumo constante de água com altos teores de **sódio** é prejudicial à saúde, pois o

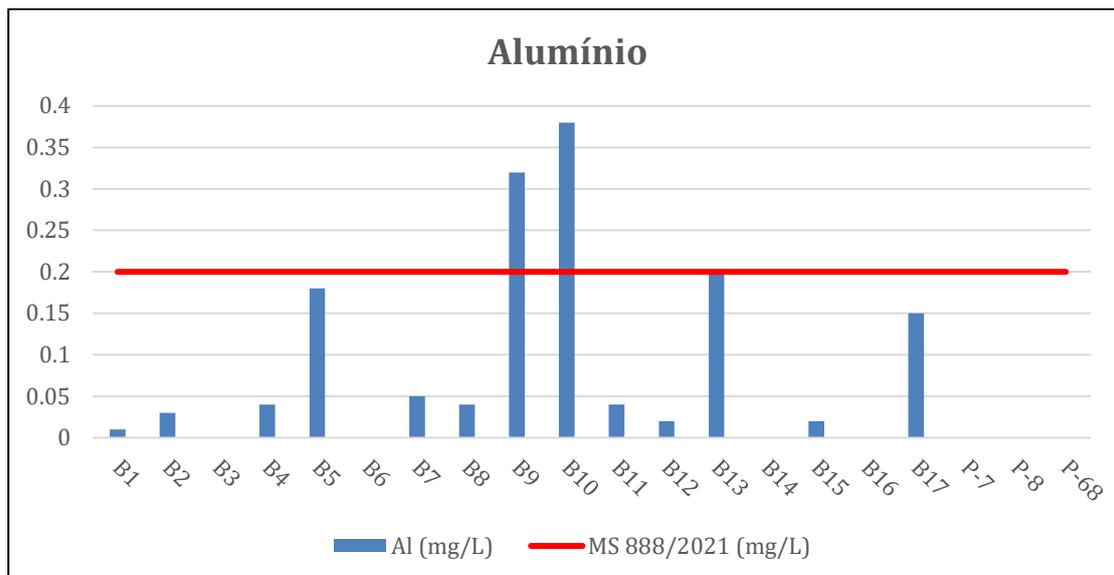
excesso no sangue acarreta a alteração da regulação do equilíbrio entre a quantidade de líquidos presentes nas células, podendo levar a hipertensão. Para a irrigação, quando em excesso, o **sódio** pode provocar no solo a dispersão de argila, que por sua vez provoca o aumento da resistência mecânica deles, impossibilitando a germinação de sementes e desenvolvimento de raízes devido a subcompactação superficial, acarretada pela eluviação da argila dispersa para as camadas inferiores (Carvalho *et al.*, 2020).

Figura 59 - Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L.



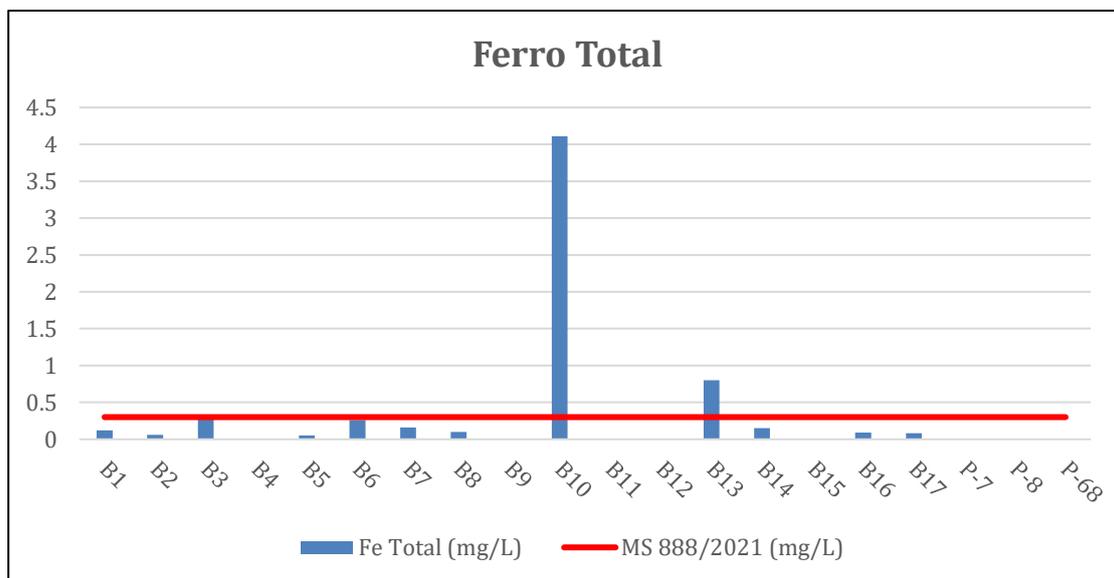
As amostras B9, B10 e B13 apresentaram concentrações de **alumínio** superiores ao valor máximo permitido pela Portaria MS (Figura 60). Este elemento está presente de forma natural na água e é um dos mais abundantes encontrados na crosta terrestre (Thomazelli *et al.*, 2021). Entretanto, em quantidades excessivas pode ser tornar um agente tóxico, podendo provocar problemas de saúde como, por exemplo, insuficiência renal (Muniz Ribeiro *et al.* 2016). Segundo Freitas (2021), o **alumínio** não se encontra sob a forma de metal livre no ambiente, pois possui alta reatividade. Os fatores físico-químicos e geológicos da rocha impactam na concentração desse metal nas águas subterrâneas. Outrossim, é um metal que está presente na chuva ácida, a qual contamina os rios, lagos e mares, afetando desde o solo até os animais. Sua presença em excesso causa turvação e estudos mostram que pessoas com excesso de **alumínio** no organismo podem ter alterações crônicas de problemas intestinais, como a síndrome do intestino irritável, inchaço abdominal e má digestão.

Figura 60 - Concentrações de Alumínio superiores aos VMP de 0,2 mg/L.



Concentrações elevadas de **ferro** foram observadas nas amostras B10 e B13 (Figura 61). Os íons ferrosos podem ser oxidados ao entrar em contato com o oxigênio do ar, deixando as águas de poços com coloração amarela. O **ferro** é um metal indesejado nas águas de consumo humano ou industrial porque o hidróxido ferroso pode formar depósitos e incrustações, além de coloração indesejável, sabor metálico e causar danos à saúde (Freitas, 2021).

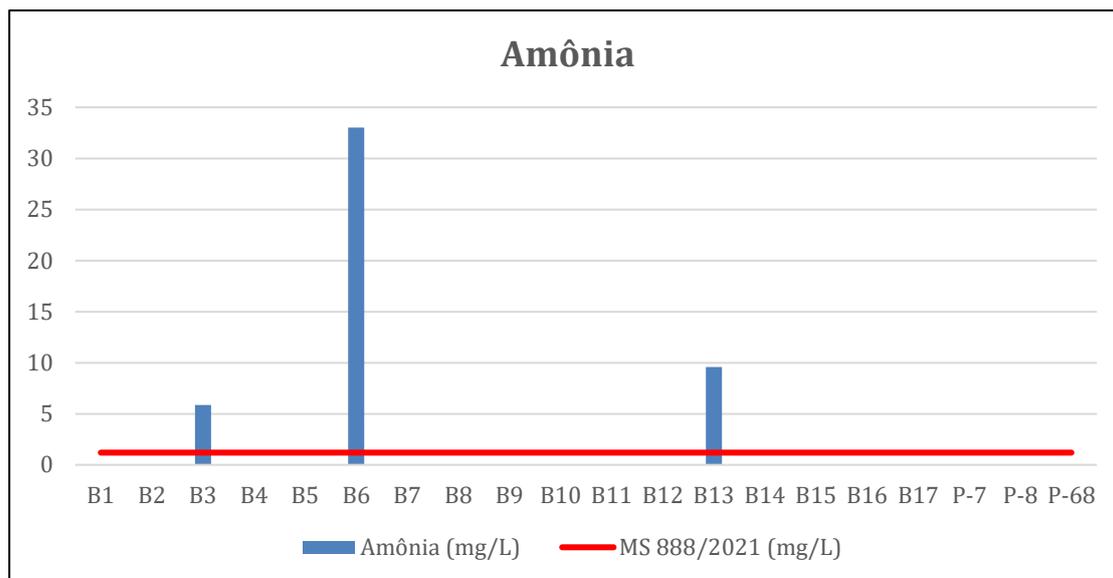
Figura 61 - Concentrações de Ferro Total superiores aos VMP de 0,3 mg/L.



Concentrações de **amônia** superiores ao VMP foram encontradas nas amostras B3, B6 e B13 (Figura 62). A **amônia** é facilmente biodegradável, um nutriente de imensa importância para as plantas, que a absorvem facilmente. Em altas concentrações, esta

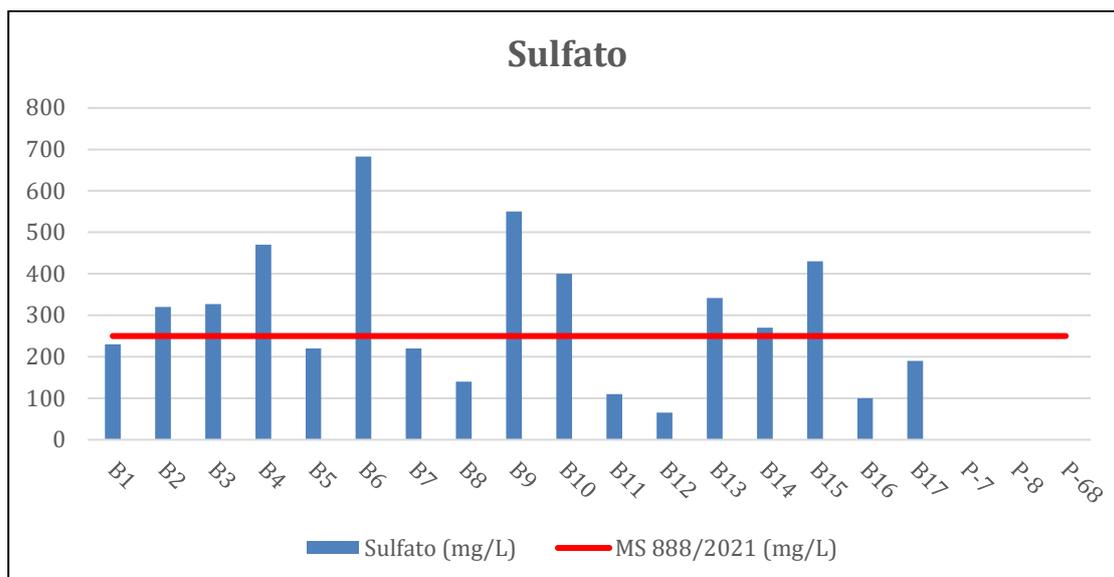
substância pode causar danos graves à saúde, já que interfere no transporte do oxigênio pela hemoglobina. Sua concentração em águas subterrâneas é baixa devido à sua fácil absorção por partículas do solo ou à oxidação a nitrito e nitrato. Entretanto, a ocorrência de concentrações elevadas pode ser um indicativo de fontes de poluição próximas (Freitas, 2021), tais como efluentes domésticos, efluentes industriais, fertilizantes ou resultante da decomposição natural da matéria orgânica (Cetesb, 2025; Incaper, 2025).

Figura 62 - Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L.



Valores elevados de **sulfato** foram encontrados nas amostras dos poços B2, B3, B4, B6, B9, B10, B13, B14 e B15 (Figura 63). As águas que contêm elevado teor de **sulfato** têm sabor desagradável, amargo e não saciam a sede, além de aumentar a salinidade no solo. As águas subterrâneas com excesso de **sulfato** podem causar efeitos laxativos e na presença de íons de magnésio e sódio podem provocar distúrbios gastrointestinais (Terrell, 2007).

Figura 63 - Concentrações de Sulfato superiores aos VMP de 250 mg/L.

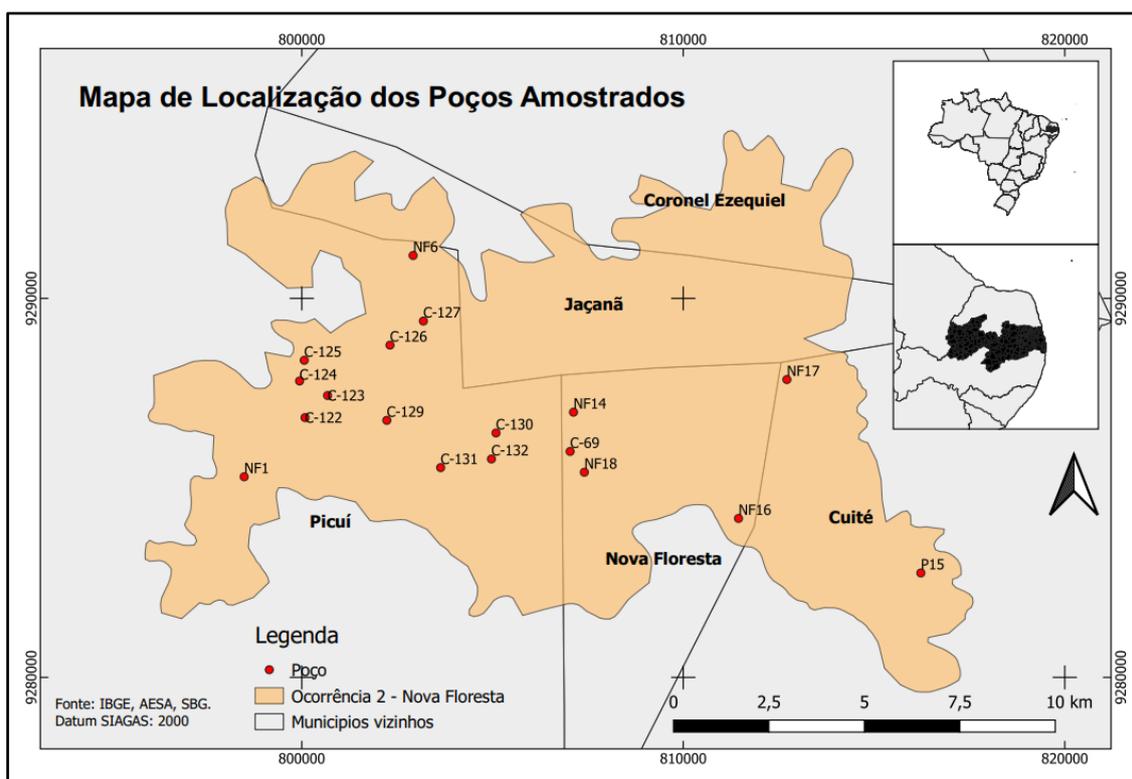


### 6.5.2. Ocorrência 2 – Nova Floresta

Assim como na ocorrência anterior, consultou-se o banco de dados SIAGAS/ SBG-CPRM, a fim de obter a localização e informações dos poços de produção existentes na Ocorrência 2. Desta forma, foram coletadas amostras de água subterrânea em 18 poços de abastecimento, cujas localizações encontram-se na Figura 64. Todas as amostras coletadas referem-se ao aquífero sedimentar da Formação Serra dos Martins.

As amostras foram submetidas a medições no campo para os parâmetros Condutividade Elétrica (CE), pH, Potencial de Oxirredução (ORP), Sólidos Dissolvidos Totais (SDT) e Salinidade. Dentre as 18 amostras obtidas, foram selecionadas 7 amostras para análise físico-química no Laboratório de Referência em Salinização (LABDES), da UFCG. A coleta de amostras foi realizada no dia 29 de novembro de 2023.

Figura 64 - Localização dos poços na Ocorrência 2 – Nova Floresta.



Os resultados da análise físico-química da água subterrânea são apresentados na Tabela 5. Os valores em vermelho indicam as concentrações que excedem o limite máximo permitido para o consumo humano, de acordo com a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, e os limites de dessedentação e irrigação, de acordo com a Resolução 369/2008.

Tabela 5 - Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 2.

Parâmetros	Amostras									LD	MS 888/2021	CONAMA 369/2008	
	NF1 <sup>(1)</sup>	NF6 <sup>(1)</sup>	NF14 <sup>(1)</sup>	NF16 <sup>(1)</sup>	NF17 <sup>(1)</sup>	NF18 <sup>(1)</sup>	P15 <sup>(1)</sup>	C-69 <sup>(2)</sup>	C-122 <sup>(2)</sup>			Dessedentação	Irrigação
CE (µS/cm)	881,5	409,2	6200,0	3480,0	3760,0	4570,0	1362,0	3290	4174	0,1	NE	-	-
pH	<b>5,7</b>	6,5	<b>5,6</b>	6,2	<b>4,7</b>	<b>4,1</b>	<b>3,8</b>	<b>3,52</b>	<b>4,42</b>	0,1	6,0 a 9,0	-	-
ORP	-	-	-	-	-	-	-	203,2	147,7	-	NE	-	-
Turbidez (µT)	1,6	0,4	0,8	0,5	0,2	0,9	0,3	-	-	0,1	5,0	-	-
Cor, UH (mg Pt-Co/L)	7,0	4,0	5,0	7,0	10,0	<b>20,0</b>	6,0	-	-	0,1	15,0	-	-
Dureza total (mg/L)	130,2	122,4	<b>994,0</b>	<b>904,0</b>	48,8	<b>640,0</b>	128,0	-	-	0,1	300,0	-	-
Sódio (mg/L)	106,0	28,4	<b>965,1</b>	<b>331,2</b>	<b>813,7</b>	<b>709,6</b>	198,7	-	-	0,1	200,0	-	-
Potássio (mg/L)	8,5	6,6	20,70	16,9	11,3	26,4	4,7	-	-	0,1	NE	-	-
Alumínio (mg/L)	0,02	0,18	0,14	0,10	0,52	<b>0,54</b>	<b>0,53</b>	-	-	0,01	0,2	5	5
Ferro total (mg/L)	0,10	0,00	0,01	0,03	0,04	0,02	0,28	-	-	0,01	0,3	-	5
Alcalinidade total (mg/L)	32,0	100,0	20,0	70,0	10,0	0,0	0,0	-	-	0,1	NE	-	-
CO <sup>2</sup> livre (mg/L)	10,6	7,0	8,8	10,6	68,6	40,5	38,7	-	-	0,1	NE	-	-
Sulfato (mg/L)	4,4	1,6	1,8	1,2	11,0	1,2	3,0	-	-	0,1	250,0	-	-
Fosfato (mg/L)	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	-	-	0,1	NE	-	-
Cloreto (mg/L)	<b>252,1</b>	81,7	<b>2314,6</b>	<b>1233,6</b>	<b>1278,9</b>	<b>1633,0</b>	<b>415,4</b>	-	-	0,1	250,0	-	100 - 700
Nitrato (mg/L)	0,05	0,03	0,03	0,02	0,00	0,00	0,10	-	-	0,01	10,0	90	
Nitrito (mg/L)	0,023	0,004	0,004	0,004	0,003	0,001	0,004	-	-	0,001	1,0	10	1
Amônia (mg/L)	0,04	0,00	<b>2,12</b>	<b>1,60</b>	0,22	0,52	0,04	-	-	0,01	1,2	-	-
Sílica (mg/L)	44,3	12,5	48,3	6,0	24,6	34,0	11,1	-	-	0,1	NE	-	-
ILS	-3,06	-1,49	-2,66	-1,46	-4,95	-7,27	-9,09	-	-	-	NE	-	-
SDT (mg/L)	<b>503,2</b>	302,0	<b>3667,8</b>	<b>1954,3</b>	<b>2236,3</b>	<b>2633,1</b>	<b>708,2</b>	<b>1645</b>	<b>2087</b>	0,1	500	-	-
Salinidade (PSU)	-	-	-	-	-	-	-	1,72	2,21	-	NE	-	-
Temperatura (°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NE	-	-

Notas: (1) amostras analisadas pelo Laboratório de Referência em Salinização (LABDES); (2) amostras tiveram os parâmetros medidos com sonda multiparâmetro HANNA; CE – condutividade elétrica; UH – Unidade Hazen; ILS – Índice de Saturação de Langelier; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; LD – limite de detecção mínimo; MS 888/2021 – Valores Máximos Permitidos estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde; NE – valores Não Estabelecidos. Todas as amostras foram coletadas no aquífero sedimentar.

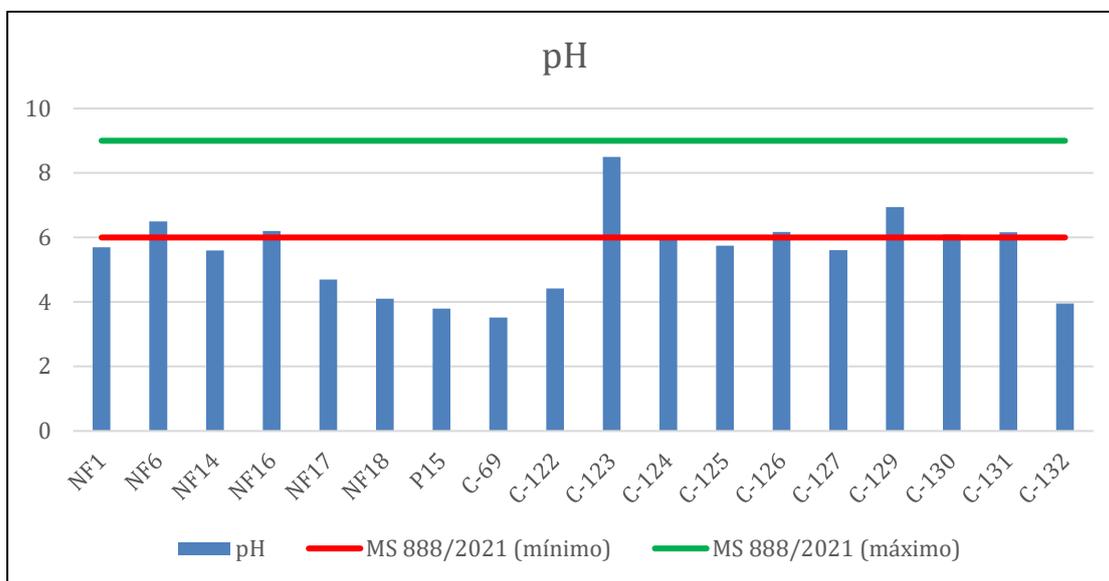
Tabela 5 (Continuação) - Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 2.

Parâmetros	Amostras									LD	MS 888/2021	CONAMA 369/2008	
	C-123 <sup>(2)</sup>	C-124 <sup>(2)</sup>	C-125 <sup>(2)</sup>	C-126 <sup>(2)</sup>	C-127 <sup>(2)</sup>	C-129 <sup>(2)</sup>	C-130 <sup>(2)</sup>	C-131 <sup>(2)</sup>	C-132 <sup>(2)</sup>			Dessedentação	Irrigação
CE (µS/cm)	1715	3224	2754	341	3046	3382	3040	2888	3014	0,1	NE	-	-
pH	8,5	6,01	5,75	6,17	5,61	6,94	6,09	6,16	3,95	0,1	6,0 a 9,0	-	-
ORP	38,5	80,3	88	68,8	88,5	89,3	95,8	90,7	150,8	-	NE	-	-
Turbidez (µT)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	5,0	-	-
Cor, UH (mg Pt-Co/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	15,0	-	-
Dureza total (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	300,0	-	-
Sódio (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	200,0	-	-
Potássio (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
Alumínio (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,2	5	5
Ferro total (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	0,3	-	5
Alcalinidade total (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
CO <sup>2</sup> livre (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
Sulfato (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	250,0	-	-
Fosfato (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
Cloreto (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	250,0	-	100 - 700
Nitrato (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	10,0	90	-
Nitrito (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,001	1,0	10	1
Amônia (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,01	1,2	-	-
Sílica (mg/L)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,1	NE	-	-
ILS	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NE	-	-
STD (mg/L)	858	1612	1377	171	1523	1691	1520	1444	1507	0,1	500	-	-
Salinidade (PSU)	0,86	1,68	-	0,16	1,58	1,77	1,58	1,5	1,57	-	NE	-	-
Temperatura (°C)	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	NE	-	-

Notas: (1) amostras analisadas pelo Laboratório de Referência em Salinização (LABDES); (2) amostras tiveram os parâmetros medidos com sonda multiparâmetro HANNA; CE – condutividade elétrica; UH – Unidade Hazen; ILS – Índice de Saturação de Langelier; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; LD – limite de detecção mínimo; MS 888/2021 – Valores Máximos Permitidos estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde; NE – valores Não Estabelecidos. Todas as amostras foram coletadas no aquífero sedimentar.

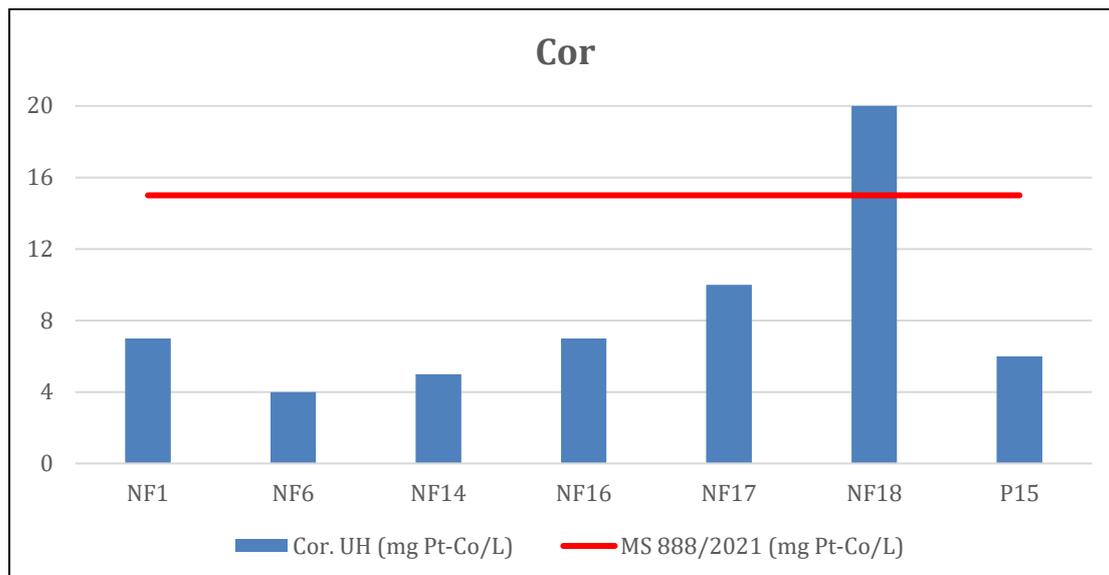
Os resultados analíticos nas amostras coletadas nos poços da Ocorrência 2 indicam valores de **pH** superiores ao valor máximo permitido (VMP) estabelecido pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde (MS) para 10 das 18 amostras analisadas, ou seja, NF1, NF14, NF17, NF18, P15, C-69, C-122, C-125, C-127 e C-132 (Figura 65).

Figura 65 - Valores de pH em relação aos limites inferior e superior, iguais a 6 e 9, respectivamente.



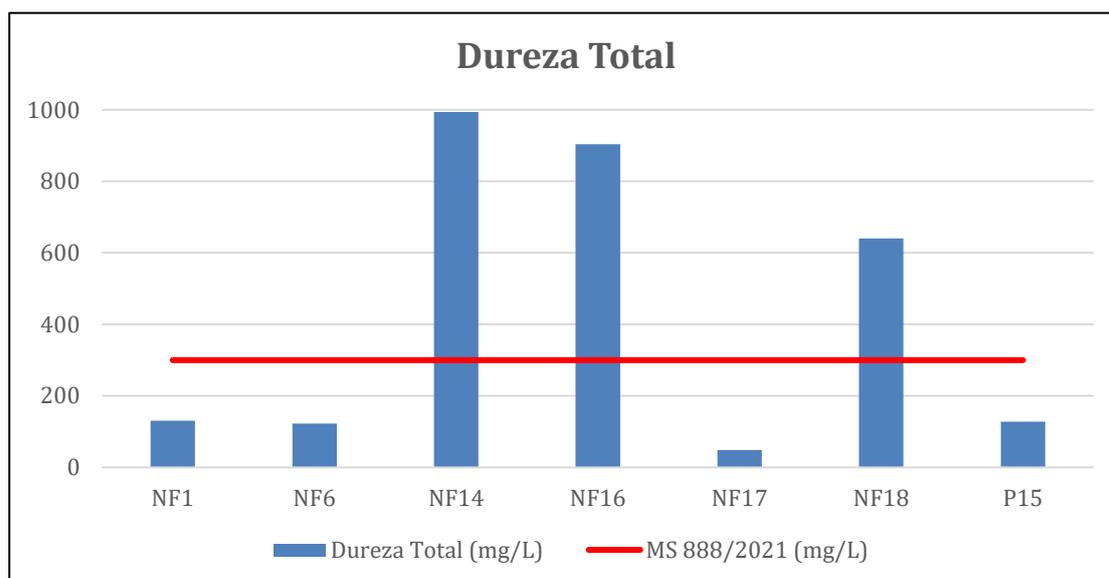
A **cor** foi encontrada em valor superior ao VMP na amostra do poço NF18 (Figura 66). Segundo a CETESB (2009), a **cor** de uma amostra de água está associada ao grau de redução de intensidade que a luz sofre ao atravessá-la, devido à presença de sólidos dissolvidos, principalmente material em estado coloidal orgânico e inorgânico. Ela é indesejável, já que causa um efeito repulsivo.

Figura 66 - Valores de Cor superiores aos VMP de 15 mg Pt-Co/L.



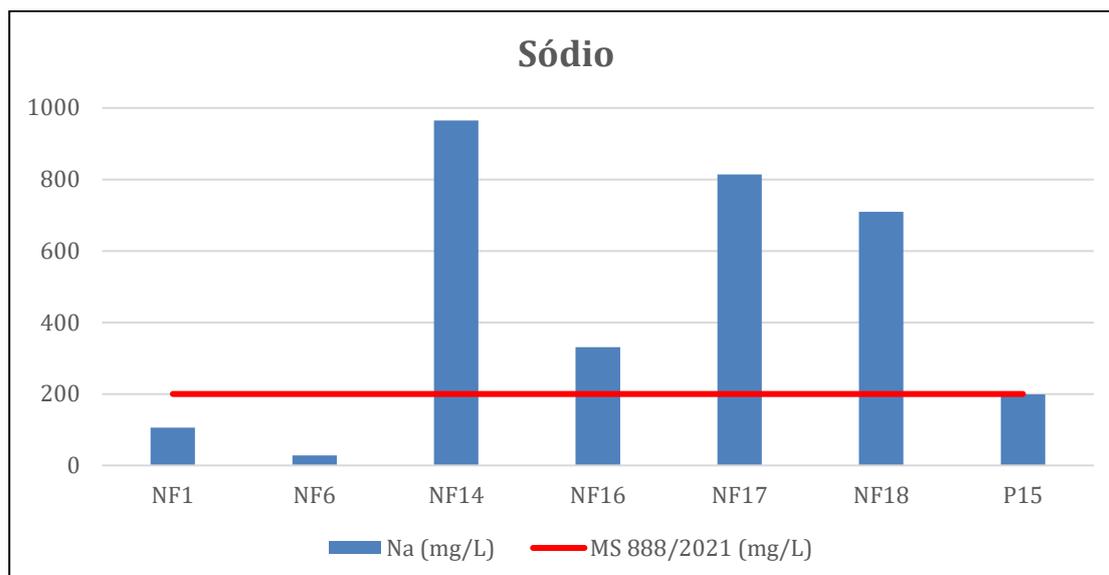
A **dureza** foi detectada acima do VMP estabelecido pela Portaria MS nas amostras NF14, NF16 e NF18 (Figura 67).

Figura 67- Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L.



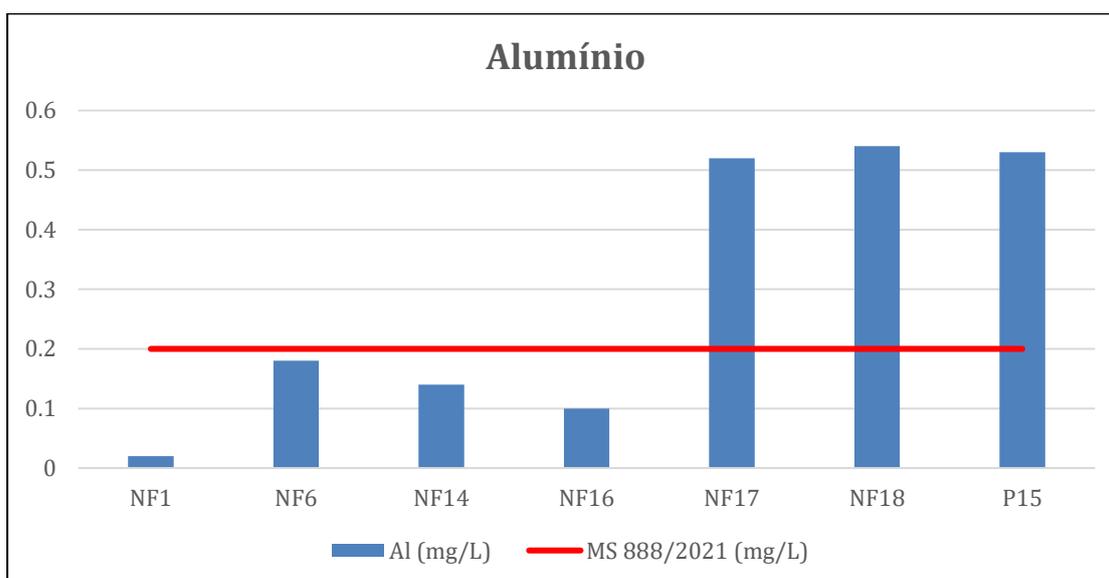
O **sódio** foi identificado em valores superiores ao VMP nas amostras dos poços NF14, NF16, NF17 e NF18 (Figura 68).

Figura 68 - Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L.



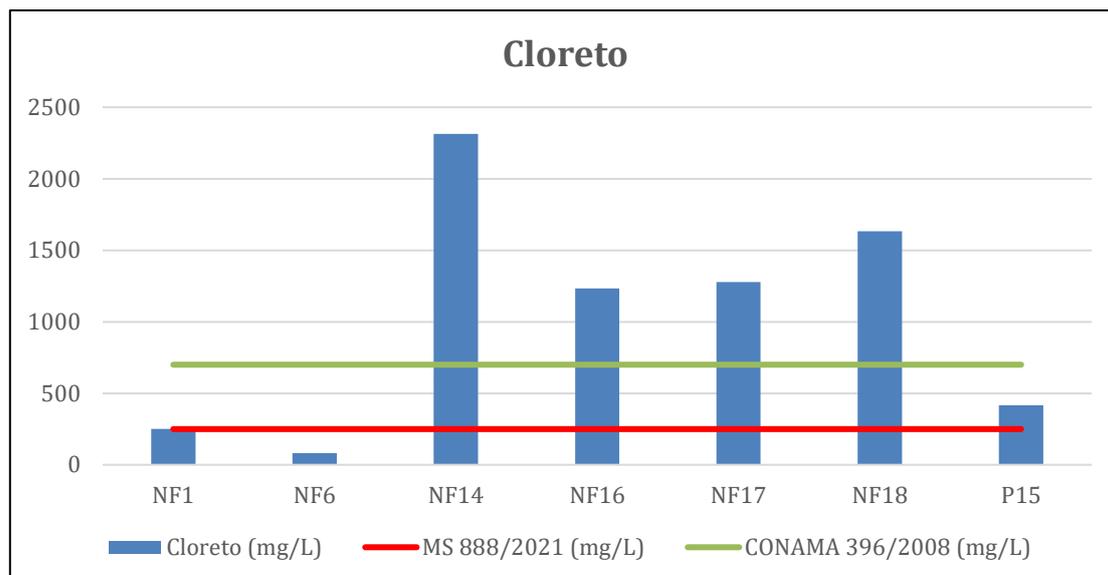
Concentrações de **alumínio** superiores ao VMP foram encontradas nas amostras NF18 e P15 (Figura 69).

Figura 69- Concentrações de Alumínio superiores aos VMP de 0,2 mg/L.



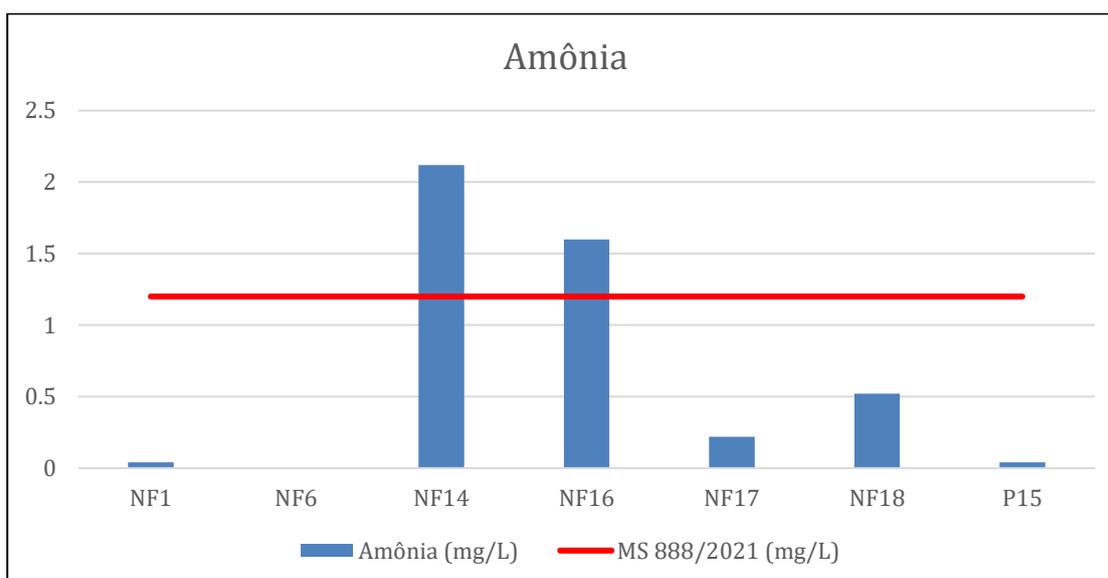
Em relação as concentrações de **cloreto**, foram encontrados valores superiores ao VMP estabelecidos pela Portaria MS 888/2008 nas amostras NF1, NF14, NF16, NF17, NF18 e P15 (Figura 70). As amostras NF-14, NF-16, NF-17 e NR-18 também apresentam concentração de **Cloreto** superiores aos limites estabelecidos na Resolução CONAMA 396/2008, para irrigação.

Figura 70 - Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L.



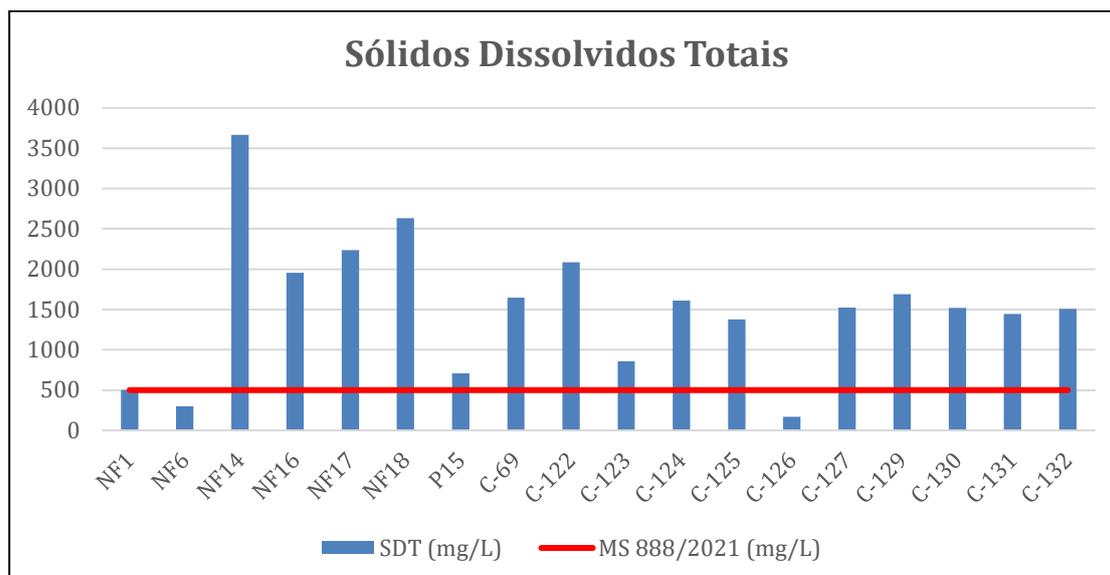
Já a **amônia** foi encontrada em concentrações superiores ao VMP para as amostras NF14 e NF16 (Figura 71).

Figura 71 - Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L.



Com exceção das amostras NF6 e C-126, **Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)** foram encontrados em concentrações superiores ao VMP nas demais amostras, isto é, das 18 amostras analisadas para este parâmetro, somente duas encontram-se abaixo do VMP (Figura 72). Considerando-se a classificação McNeely *et al.* (1979, apud Silva *et al.*, 2018), as águas analisadas são classificadas em doces (menor concentração igual a 171 mg/L) a salobras (maior concentração igual a 3667,8 mg/L).

Figura 72 - Concentrações de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L.

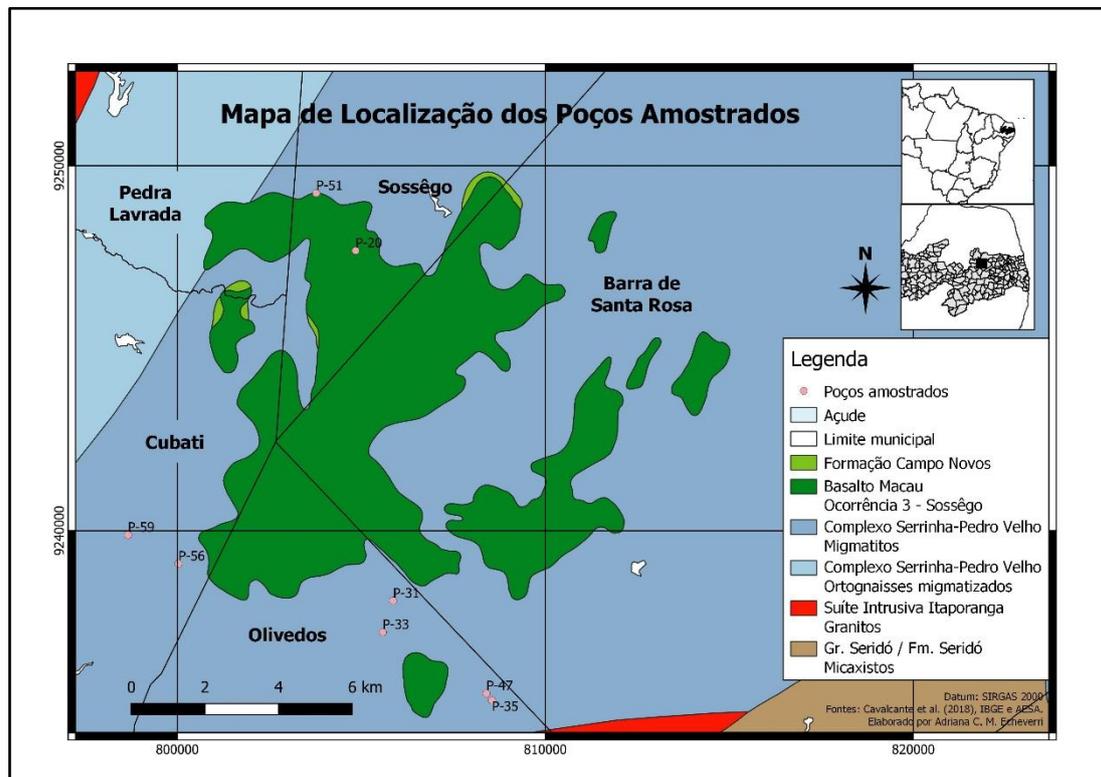


Os malefícios envolvendo valores excessivos de dureza, sódio, alumínio, cloreto, amônia e SDT na água subterrânea para consumo humano foram discutidos na interpretação dos resultados analíticos das amostras coletadas a partir dos poços localizados na Ocorrência 1.

### 6.5.3. Ocorrência 3 – Sossêgo

O banco de dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas – SIAGAS, no Portal do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, foi consultado para obter a localização e demais informações sobre os poços ativos existentes no local. Posteriormente, visitou-se os poços a fim de coletar água subterrânea para análises físico-químicas. Desta maneira, foram coletadas amostras de água subterrânea em 8 poços de abastecimento doméstico na Ocorrência 3, cuja localização encontra-se na Figura 73. Embora o poço P-20 esteja instalado sobre o Basalto Macau, que corresponde a uma camada superficial, as amostras coletadas deste e nos demais poços referem-se ao aquífero do Complexo Serrinha-Pedro Velho.

Figura 73 - Localização dos poços na Ocorrência 3 e entorno.



A coleta de amostras foi realizada no dia 24 de fevereiro de 2024. Dentre as 8 amostras coletadas, foram selecionadas 5 amostras para análise físico-química no Laboratório de Referência em Salinização (LABDES), da UFCG. Os resultados das análises físico-químicas da água subterrânea são apresentados na Tabelas 8. Os valores em vermelho indicam as concentrações que excedem o limite máximo permitido de potabilidade, de acordo com a Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde, e os limites de dessedentação e irrigação, de acordo com a Resolução 369/2008.

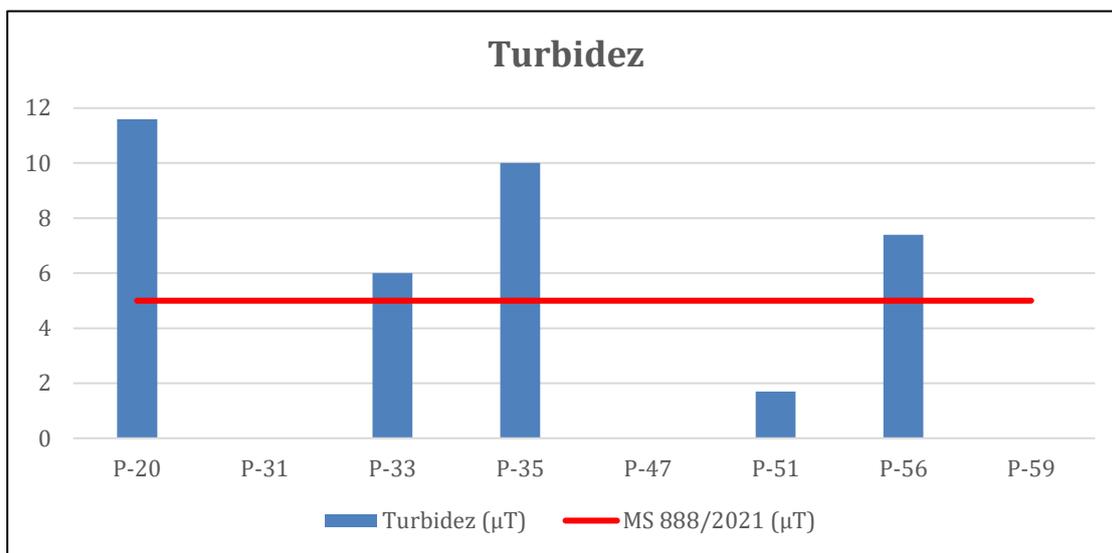
Tabela 6 - Resultado das análises físico-químicas das amostras de água subterrânea coletadas em poços localizados na Ocorrência 3 e entorno.

Parâmetros	Amostras								LD	MS 888/2021	CONAMA 369/2008	
	P-20 <sup>(1)</sup>	P-31 <sup>(2)</sup>	P-33 <sup>(1)</sup>	P-35 <sup>(1)</sup>	P-47 <sup>(2)</sup>	P-51 <sup>(1)</sup>	P-56 <sup>(1)</sup>	P-59 <sup>(2)</sup>			Dessedentação	Irrigação
CE (µS/cm)	5.460	1.063	1.315	4.810	4.035	2.980	3.150	9.746	0,1	NE	-	-
pH	8,2	7,50	7,6	7,4	6,69	7,9	8,7	7,07	0,1	6 a 9	-	-
Turbidez (µT)	<b>11,6</b>	-	<b>6</b>	<b>10</b>	-	1,7	<b>7,4</b>	-	0,1	5	-	-
Cor, UH (mg Pt-Co/L)	<b>41</b>	-	<b>32</b>	2	-	11	<b>152</b>	-	0,1	15	-	-
Dureza total (mg/L)	<b>2.048</b>	-	<b>330,4</b>	<b>1.040</b>	-	<b>885,2</b>	<b>775,2</b>	-	0,1	300	-	-
Sódio (mg/L)	<b>340,6</b>	-	174,1	<b>861</b>	-	<b>241,3</b>	<b>312,2</b>	-	0,1	200	-	-
Potássio (mg/L)	27,3	-	1,9	6,6	-	18,8	9,4	-	0,1	NE	-	-
Alumínio (mg/L)	0,01	-	0	0,01	-	0,01	0,03	-	0,01	0,2	5	5
Ferro total (mg/L)	<b>0,73</b>	-	0	0,03	-	0,01	0,17	-	0,01	0,3	-	5
Alcalinidade total (mg/L)	560	-	480	680	-	340	460	-	0,1	NE	-	-
CO <sup>2</sup> livre (mg/L)	17,6	-	17,6	44	-	21,1	0	-	0,1	NE	-	-
Sulfato (mg/L)	84,3	-	40,4	102,3	-	75,8	138,1	-	0,1	250	1000	-
Fosfato (mg/L)	0,5	-	0	0,3	-	0,1	9,8	-	0,1	NE	-	-
Cloreto (mg/L)	<b>1.881,5</b>	-	174,7	<b>1.775</b>	-	<b>843,1</b>	<b>722,4</b>	-	0,1	250	-	100 - 700
Nitrato (mg/L)	0,68	-	0,03	0,12	-	0,05	0,22	-	0,01	10	90	-
Nitrito (mg/L)	0,230	-	0,001	0,052	-	0,025	0,026	-	0,001	1	10	1
Amônia (mg/L)	<b>9,36</b>	-	1	<b>2,65</b>	-	<b>3,26</b>	<b>3,86</b>	-	0,01	1,2	-	-
Sílica (mg/L)	30,4	-	30,9	60,9	-	67,8	67,3	-	0,1	NE	-	-
ILS	1,87	-	0,47	0,98	-	0,86	1,86	-	-	NE	-	-
SDT (mg/L)	<b>3.727,3</b>	<b>535</b>	<b>1.126,7</b>	<b>4.025</b>	<b>2.002</b>	<b>1.946,1</b>	<b>1.936,2</b>	<b>4.888</b>	0,1	500	-	-
Salinidade (PSU)	2,55	0,54	0,55	2,22	2,14	1,43	1,66	5,68	-	NE	-	-
Temperatura (°C)	25,20	27,43	30,08	29,53	28,50	30,74	30	30,11	-	NE	-	-

Notas: (1) amostras analisadas pelo Laboratório de Referência em Salinização (LABDES); (2) amostras tiveram os parâmetros medidos em campo com sonda multiparâmetro HANNA; CE – condutividade elétrica (medida em campo); UH – Unidade Hazen; ILS – Índice de Saturação de Langelier; SDT – Sólidos Dissolvidos Totais; LD – limite de detecção mínimo; MS 888/2021 – Valores Máximos Permitidos estabelecidos pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde; NE – valores Não Estabelecidos. Todas as amostras foram coletadas no aquífero cristalino.

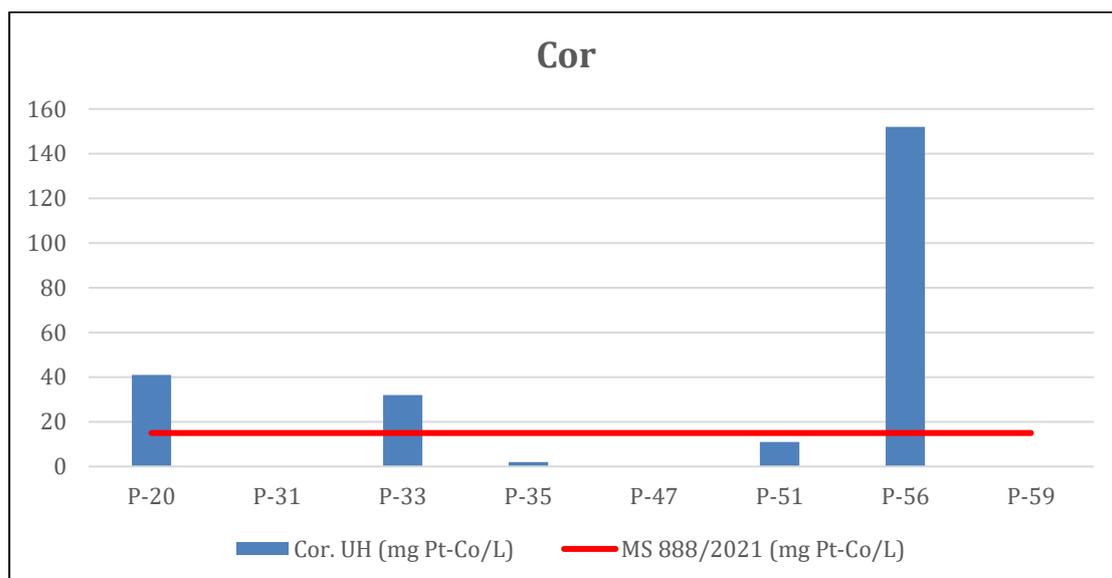
Os resultados analíticos nas amostras coletadas nos poços da Ocorrência 3 indicam valores de **turbidez** superiores ao valor máximo permitido (VMP) estabelecido pela Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde (MS) para 4 das 5 amostras analisadas para este parâmetro, ou seja, P-20, P-33, P-35 e P-56 (Figura 74).

Figura 74 - Valores de Turbidez superiores aos VMP de 5  $\mu$ T. As amostras P-31, P-47 e P-59 não foram analisadas para Turbidez. Fonte: Autoria própria.



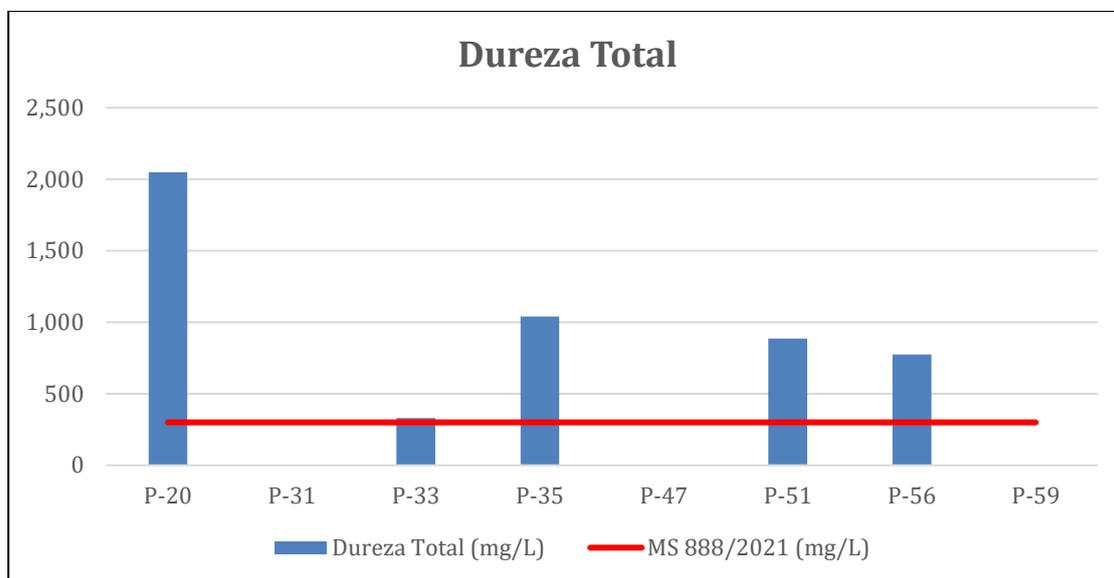
A **cor** foi encontrada em valor superior ao VMP em 3 amostras: nos poços P-20 e P-33, tendo concentrações significativamente mais elevadas para o poço P-56 (Figura 75).

Figura 75 - Valores de Cor superiores aos VMP de 15 mg Pt-Co/L. As amostras P-31, P-47 e P-59 não foram analisadas para Cor. Fonte: Autoria própria.



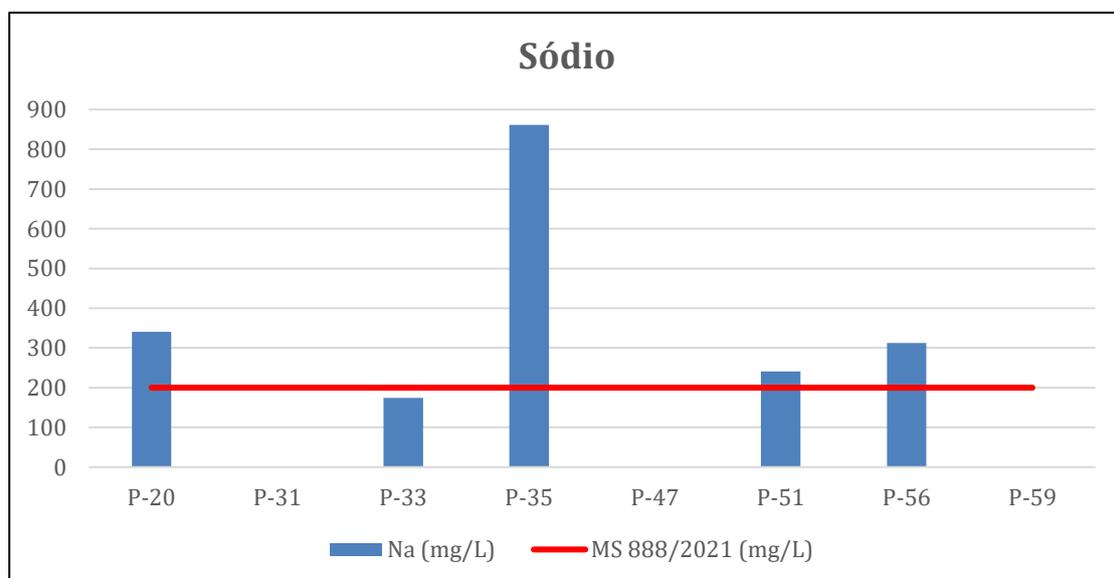
A **dureza** foi detectada acima do VMP estabelecido pela Portaria MS em todas as amostras analisadas para este parâmetro: P-33, P-51 e P-56; sendo as concentrações mais elevadas nos poços P-20 e P-35 (dureza >1.000 mg/L), conforme demonstra a Figura 76.

Figura 76 - Valores de Dureza Total superiores aos VMP de 300 mg/L. As amostras P-31, P-47 e P59 não foram analisadas para este parâmetro.



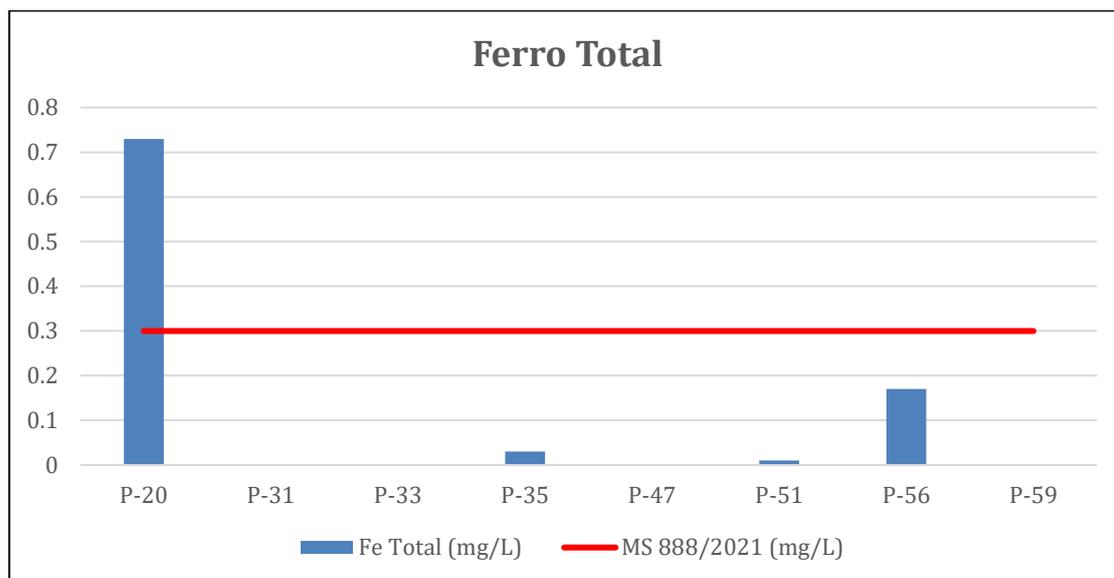
O **sódio** foi identificado em valores superiores ao VMP em 4 das 5 amostras analisadas, as quais referem-se aos poços P-20, P-35, P-51 e P-56 (Figura 77).

Figura 77 - Concentrações de Sódio superiores aos VMP de 200 mg/L. As amostras P-31, P-47 e P59 não foram analisadas para este parâmetro.



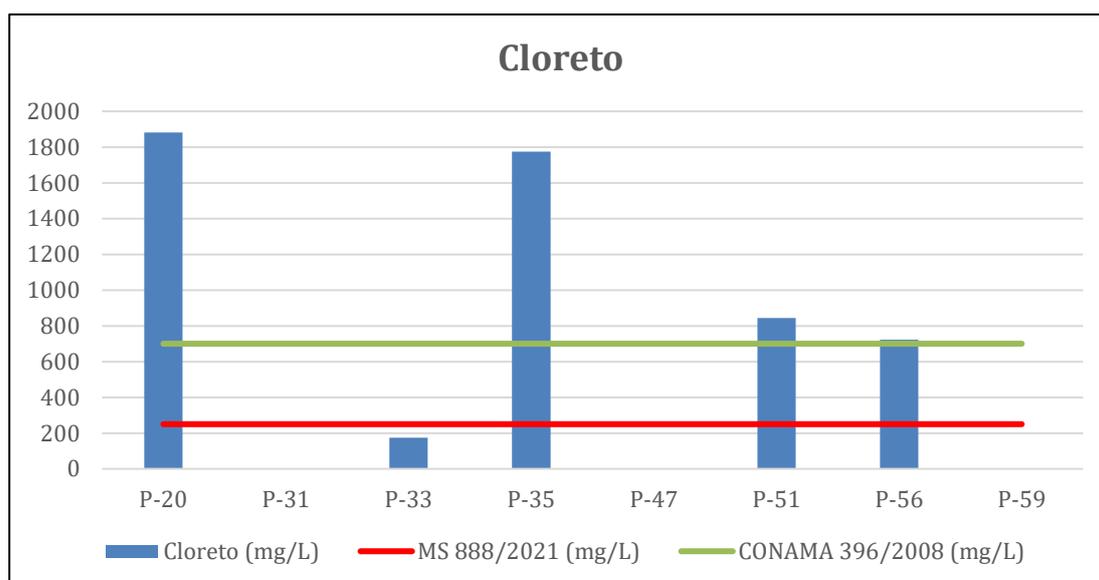
Concentração de **ferro total** superior ao VMP foi encontrada apenas na amostra P-20 (Figura 78).

Figura 78 - Concentrações de Ferro Total superiores aos VMP de 0,3 mg/L. As amostras P-31, P-47 e P-59 não foram analisadas para este parâmetro.



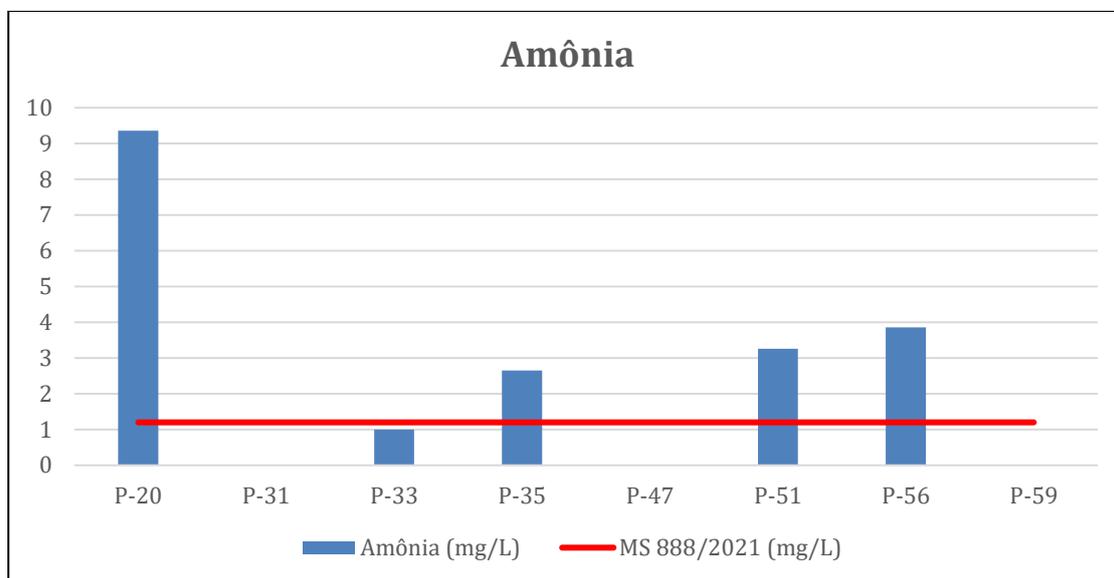
As concentrações de **cloreto** foram identificadas em valores superiores ao VMP para 4 das 5 amostras analisadas para este parâmetro, em P-51 e P-56, sendo significativamente mais elevadas as amostras coletadas nos poços P-20 e P-35 (cloreto >1.000 mg/L), conforme apresentado no gráfico da Figura 79. Essas quatro amostras também apresentaram concentrações superiores de **amônia** superiores ao VMP, com valor especialmente mais elevado para P-20 (Figura 80).

Figura 79 - Concentrações de Cloreto superiores aos VMP de 250 mg/L. As amostras P-31, P-47 e P-59 não foram analisadas para este parâmetro.



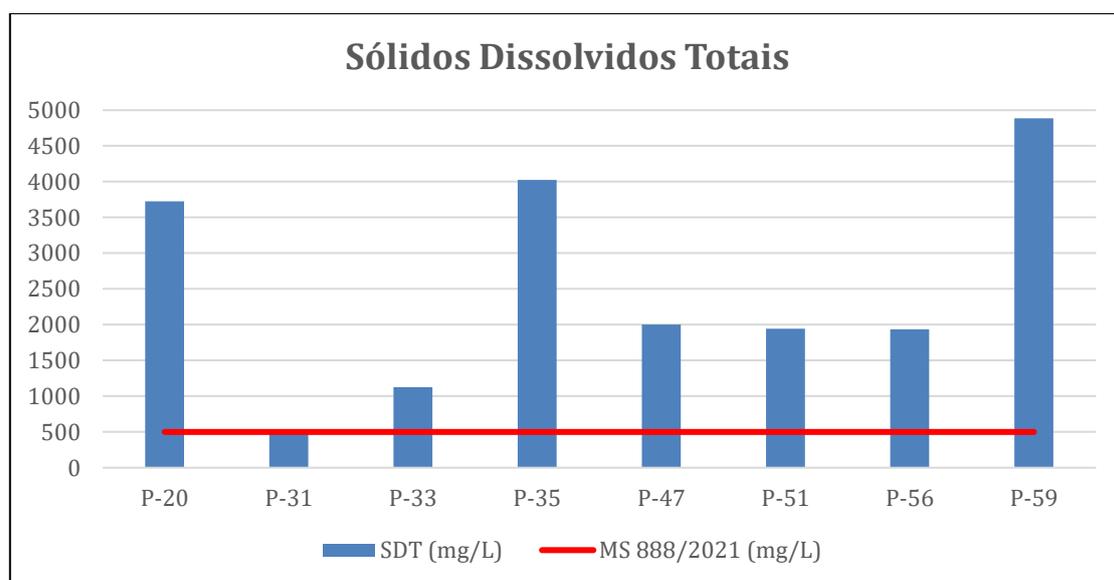
As concentrações de **cloreto** também ultrapassaram os limites estabelecidos para uso em irrigação, de acordo com a Resolução CONAMA 369/2008, para as amostras P-20, P-35, P-51 (Figura 79).

Figura 80 - Concentrações de Amônia superiores aos VMP de 1,2 mg/L. As amostras P-31, P-47 e P59 não foram analisadas para este parâmetro.



Todos os poços apresentaram concentrações de **Sólidos Dissolvidos Totais (SDT)** em concentrações superiores ao VMP (Figura 81). Considerando-se a classificação McNeely *et al.* (1979, *apud* Silva *et al.*, 2018), as amostras coletadas são classificadas em águas doces (SDT < 1.000 mg/L, em apenas um poço), ligeiramente salobras (1.000 mg/L < SDT < 3.000 mg/L) a moderadamente salobras (3.000 mg/L < SDT < 10.000 mg/L).

Figura 81 - Valores de Sólidos Dissolvidos Totais superiores aos VMP de 500 mg/L.



## 7. CONCLUSÃO

As seções geoeletricas indicaram comportamento similar nas Ocorrências 1 e 2, confirmando que se trata de uma mesma unidade litológica, a Formação Serra dos Martins. De modo geral, a camada superficial da formação apresenta-se resistiva, até aproximadamente 30 metros de profundidade, constituindo a zona não saturada. Entre 30 e 80 metros pode-se observar uma camada condutiva, associada a presença de água subterrânea. A partir dos 80 metros, aproximadamente, encontra-se outra camada resistiva que indica a presença do embasamento cristalino. Localmente pode haver variações nesse modelo.

Os resultados da análise petrofísica demonstraram que as rochas da Ocorrência 1 são mais porosas que as da Ocorrência 2 e, portanto, detém maior capacidade de armazenamento de água subterrânea. A porosidade média foi de 20,3% para a Ocorrência 1 e 8,1% para a Ocorrência 2. Devido a Ocorrência 2 possuir cerca de três vezes a extensão territorial da Ocorrência 1, ela possui volume de água bem maior. Enquanto para a Ocorrência 1 estimou-se um volume armazenado de 270 milhões de m<sup>3</sup> de água subterrânea, para a Ocorrência 2 foi estimado um volume de 521 milhões de m<sup>3</sup>.

A fim de verificar a qualidade da água subterrânea presente em ambas as ocorrências, foram coletadas amostras a partir de poços localizados nestas áreas. Entretanto, a Ocorrência 1 não apresentou um número suficiente de poços para realizar essa análise e, portanto, necessitou-se considerar amostras dos poços encontrados no entorno desta, os quais captam água subterrânea de aquíferos no sistema cristalino, considerando que estes possuem como área de recarga a Ocorrência 1.

As amostras de água subterrânea coletadas no entorno da Ocorrência 1 apresentam águas com pHs neutros a levemente básicos (6,89 a 8,6). As concentrações de sódio (144,8 a 1355,6 mg/L), cloreto (76,7 a 4277,8 mg/L) e sólidos dissolvidos totais - SDT (1789 a 8213,5 mg/L) indicam que as águas são doces (STD <1.000 mg/L) a salobras (1.000 < STD < 10.000 mg/L), podendo necessitar de tratamento prévio para o consumo humano, segundo a Portaria MS 888/2021, e utilização na irrigação, segundo a Resolução CONAMA 369/2008. Sódio, cloreto e sulfatos são elementos que influenciam na salinidade da água subterrânea, possivelmente associados a fatores físico-químicos e

geológicos das rochas que constituem o aquífero. Já as águas do aquífero sedimentar apresentam-se ácidas (pHs variando de 2,88 a 6,17) e levemente salobras.

Na Ocorrência 2 a água subterrânea captada pelos poços amostrados é de origem sedimentar, da Formação Serra dos Martins. São ligeiramente ácidas, doces (menor concentração de SDT igual a 171 mg/L) a salobras (maior concentração de SDT igual a 3.667,8 mg/L). Também necessitam de tratamento prévio para consumo humano (Portaria MS 888/2021), e não são adequadas para irrigação (Resolução CONAMA 369/2008).

A Ocorrência 3 é uma unidade litológica diferente das Ocorrências 1 e 2, constituída pela Formação Campos Novos e pelo Basalto Macau. No que diz respeito à Ocorrência 3, observou-se que a Formação Campos Novos não ocupa a extensão pensada no início da investigação, sendo que representa apenas pequenos depósitos de argila bentonítica proveniente de alteração das cinzas depositadas com o Basalto Macau. Portanto, localiza-se nas imediações deste derrame basáltico. Diante desta descoberta, avistou-se que o volume de água armazenada nesta formação deveria ser bem menor que os estimados nas Ocorrências 1 e 2.

Previamente a esta descoberta, realizou-se a investigação geofísica que indicou a existência de camadas condutivas superficiais em todas as seções geoeletricas, chegando a profundidades que variam de 30 metros a 90 metros. A base desta camada é irregular, provavelmente devido à conformação das rochas que deram origem a este depósito. Evidência da presença de rocha cristalina foi observada apenas ao sul da Ocorrência 3, a partir de 59 metros de profundidade. Uma camada de rocha alterada pode ser percebida entre as profundidades de 27 a 59 metros.

Os resultados da análise petrofísica indicaram que as rochas coletadas na Ocorrência 3 apresentam porosidades que variam de 4% a 16% nos gnaisses alterados e 0,7% a 1,4% nos basaltos. Visto que os basaltos possuem porosidade primária que impossibilita o acúmulo de água subterrânea, calculou-se o volume de água armazenada que pode estar contida nos gnaisses alterados, que apresentam porosidade secundária. Estimou-se uma reserva de 59 milhões m<sup>3</sup> de água subterrânea na Ocorrência 3.

A qualidade da água foi analisada em amostras coletadas em poços localizados nas imediações da Ocorrência 3. Apenas um poço está dentro da Ocorrência 3, isto é, a maioria dos poços extraem água a partir do aquífero constituído pelos gnaisses alterados do Complexo Serrinha-Pedro Velho. Os resultados das análises físico-químicas indicaram

concentrações de turbidez (6 a 11,6  $\mu$ T), cor (32 a 152 mg Pt-Co/L), dureza total (330,4 a 2048 mg/L), sódio (241,3 a 861 mg/L), ferro (0,73 mg/L), cloreto (772,4 a 1881,5 mg/L), amônia (2,65 a 9,36 mg/L) e sólidos dissolvidos totais – SDT (535 a 4888 mg/L) superiores aos valores de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da Saúde, necessitando de tratamento prévio para o consumo humano. As elevadas concentrações de cloreto indicam que essas águas também não são adequadas para irrigação, segundo a Resolução COANAMA 369/2008. O teor de salinidade indica que essas águas são classificadas como doces (STD <1.000 mg/L) a salobras (1.000<STD<10.000 mg/L), com pH variando em torno da neutralidade (de 6,69 a 8,7).

## 2. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGÊNCIA EXECUTIVA DE GESTÃO DE ÁGUAS – AESA. GeoAESA. Disponível em: <http://siegrh.aesa.pb.gov.br:8080/aesa-sig/> Acesso em: 27 fev. 2024.

AGUIAR, Sara Camelo. A relevância da água subterrânea para as famílias de Gado Bravo-PB diante da vulnerabilidade do município. 2015. Orientador: Prof. Dr. João Miguel de Moraes Neto. 2015. 110 p. Dissertação (Pós-Graduação em Recursos Naturais) - UFCG, Campina Grande, 2015. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/917#:~:text=para%20este%20item%3A-,http%3A//dspace.sti.ufcg.edu.br%3A8080/jspui/handle/riufcg/917,-T%C3%ADtulo%3A%C2%A0>. Acesso em: 22 jan 2025.

AIZEBEOKHAI, A. P.; OYEYEMI, K. D. The use of the multiple-gradient array for geoelectrical resistivity and induced polarization Imaging. *Journal of Applied Geophysics*, V. 111, 2014, p. 364-376, ISSN 0926-9851, <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2014.10.023>. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0926985114003176> Acesso em: 27 fev. 2024.

ALMEIDA, F. F.M. 1969. Diferenciação tectônica da plataforma brasileira. In: XXIII Congresso Brasileiro de Geologia, 1969, Salvador. Anais... Salvador: [s.n.], 1969. p. 29-46.

ALMEIDA, F. F. M., HASUI, Y., BRITO NEVES, B. B., FUCK, R. A. (1981). Brazilian structural provinces: an introduction. *Earth Science Reviews*, 17(1-2), 1-29. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0012-8252\(81\)90003-9](https://doi.org/10.1016/0012-8252(81)90003-9). Acesso em: 26 dez 2024.

ALMEIDA, Gabriel; NASCIMENTO, Bruno. Estudo de viabilidade técnico-econômica de protótipo de dessalinização termossolar para o semiárido nordestino. **Cadernos UniFOA**, Volta Redonda, v. 19, n. 54, 2024. DOI: 10.47385/cadunifoa.v19.n54.5046. Disponível em: <https://unifoa.emnuvens.com.br/cadernos/article/view/5046>. Acesso em: 23 dez. 2024.

ALVES, Joseline da Silva. Zoneamento socioambiental da bacia hidrográfica do rio Taperoá/PB: fragilidades, potencialidades e classificação das unidades de paisagem. 2020. Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Camila Cunico, Coorientador: Prof. Dr. Jonas Otaviano

Praça de Souza. 2020. 110 p. Dissertação (Pós-Graduação em Geografia) - UFPB, Campina Grande, 2020. Disponível em: [https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/20787/1/JoselineDaSilvaAlves\\_Dissert.pdf](https://repositorio.ufpb.br/jspui/bitstream/123456789/20787/1/JoselineDaSilvaAlves_Dissert.pdf). Acesso em: 24 dez 2024.

ANGELIM, L.A.A.; MEDEIROS, V.C.; NESI, J.R. Programa Geologia do Brasil - PGB. Projeto Mapa Geológico e de Recursos Minerais do Estado do Rio Grande do Norte. Mapa Geológico do Estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Recife: CPRM/FAPERN, 2006.

ARAÚJO NETO, José Ferreira de; SANTOS, Lauro César Montefalco de Lira; SANTOS, Glenda Lira. Geologia e aspectos genéticos de depósitos de esmeralda em zonas de cisalhamento: um olhar sobre os depósitos esmeraldíferos da Província Borborema, Nordeste do Brasil. **Geologia USP. Série Científica**, São Paulo, Brasil, v. 21, n. 2, p. 19–39, 2021. DOI: [10.11606/issn.2316-9095.v21-180467](https://doi.org/10.11606/issn.2316-9095.v21-180467). Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/guspssc/article/view/188484>. Acesso em: 26 dez. 2024.

ARCHANJO, C. J., HOLLANDA, M. H. B. M., RODRIGUES, S. W. O., BRITO NEVES, B. B., ARMSTRONG, R. (2008). Fabrics of pre- and syntectonic granite plutons and chronology of shear zones in the Eastern Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 30(3), 310-326. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2007.11.011>. Acesso em: 26 dez 2024.

ARCHIE, G.E. 1942. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoirs characteristics. *Petroleum Technology*, v. 5, p. 54-62.

AZEVEDO, Andrea Carla. **Autonomia x dependência: políticas de água no Semiárido e desenvolvimento regional**. 2017. Tese de Doutorado. Universidade de Coimbra (Portugal). Disponível em: <https://www.proquest.com/openview/9d7aca1e6aff870a4928c1b62935e6/1?cbl=2026366&diss=y&pq-origsite=gscholar>. Acesso em: 22 jan 2025.

BARROS, Paulo Sales da Costa *et al.* Plug Saco do Inferninho: evidência do Magmatismo Macau em Picuí-PB. **Revista Principia**, João Pessoa, n. 56, p. 212-225, dez. 2021. ISSN 2447-9187. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.18265/1517-0306a2021id4724>. Acesso em: 29 nov 2024.

BATISTA, J. T. Aplicação de imageamento elétrico para a locação de poços em aquíferos fissurais na região de Campina Grande, PB. Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares.

2019. 140 p. Dissertação (Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral) - UFCG, Campina Grande, 2019. Disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/xmlui/bitstream/handle/riufcg/10215/JULIANA%20ARGINO%20BATISTA%20-%20DISSERTA%C3%87%C3%83O%20%28PPGEPM%29%202019.pdf?sequence=3&isAllowed=y>. Acesso em: 24 dez 2024.

BELOAR. Cloro na água: afinal, faz bem ou mal à saúde? Disponível em: <https://beloar.com.br/cloro-na-agua-afinal-faz-bem-ou-mal-a-saude/> Acesso em 23 de fev de 2024.

BRAGA, A.C.O. 2006. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos da captação e contaminação de águas subterrâneas: Uma abordagem metodológica e prática. Tese (Livre Docência) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 121 p. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/server/api/core/bitstreams/51973960-209e-4b82-a95b-13c8dd53710f/content>. Acesso em: 24 dez 2024.

BRAGA, A. C. O. Métodos geoeletricos aplicados nos estudos de captação e contaminação das águas subterrâneas. São Paulo, UNESP, 79 p., 2007.

BRAGA, A.C.O., 2016. Geofísica aplicada: métodos geoeletricos em hidrogeologia. Oficina de textos. 157 p. Disponível em: [https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Tk4lDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Celso+Braga+2016&ots=wnaoZLVhJ6&sig=SnECqIGdVL\\_S8nQP08pJQf8IbFU#v=onepage&q=Celso%20Braga%202016&f=false](https://books.google.com.br/books?hl=pt-BR&lr=&id=Tk4lDAAAQBAJ&oi=fnd&pg=PA9&dq=Celso+Braga+2016&ots=wnaoZLVhJ6&sig=SnECqIGdVL_S8nQP08pJQf8IbFU#v=onepage&q=Celso%20Braga%202016&f=false). Acesso em: 24 dez 2024.

Brito Neves, B. B., Fuck, R. A., Pimentel, M. M. (2014). The Brasiliano collage in South America: a review. *Brazilian Journal of Geology*, 44(3), 493-518. Disponível em: <https://doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030010>. Acesso em: 26 dez 2024.

BRITO NEVES, Benjamim Bley de e SANTOS, Edilton José dos e VAN SCHMUS, William Randall. Tectonic history of the Borborema province, northeastern Brazil. Tectonic evolution of South America. Tradução. Rio de Janeiro: Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2000. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/82959a42-149a-48b4-8c64-b34fa2c6f949/1131015.pdf>. Acesso em: 26 dez. 2024.

CAXITO, F. A., SANTOS, L. C. M. L., GANADE, C. E., BENDAOU, A., FETTOUS, E.-H., BOUYO, M. H. (2020). Toward an integrated model of geological evolution for NE Brazil-NW Africa: The Borborema Province and its connections to the Trans-Saharan (Benino-Nigerian and Tuareg shields) and Central African orogens. *Brazilian Journal of Geology*, 50(2), e20190122. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/2317-4889202020190122>. Acesso em: 26 dez 2024.

CARVALHO, L. L. S. de; LACERDA, C. F. de; CARVALHO, C. M. de; LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M. de; GOMES FILHO, R. R. Variabilidade espaço-temporal da qualidade das águas subterrâneas em área irrigada no semiárido brasileiro. *Pesquisa, Sociedade e Desenvolvimento*, [S. l.], v. 8, pág. e644985786, 2020. DOI: 10.33448/rsd-v9i8.5786. Disponível em: <https://rsdjournal.org/index.php/rsd/article/view/5786> Acesso em: 27 fev. 2024.

CAVALCANTE, R.; CUNHA, A. L. C.; COSTA A. P.; DANTAS, A. R. Projeto ARIM Seridó - Folha Picuí - SB.24-Z-B-VI, Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. Carta Geológica-Geofísica. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2018.1 mapa colorido, 90,00 cm x 75,00 cm. Escala 1:100.000. Avaliação dos Recursos Minerais do Brasil. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/18552/3/carta\\_geologica\\_geofisica\\_picui.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/18552/3/carta_geologica_geofisica_picui.pdf). Acesso em: 28 dez 2024.

CETESB. Qualidade das águas subterrâneas do estado de São Paulo 2016-2018 (Série Relatórios). São Paulo. 291 p. 2019. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/> Acesso em: 27 fev 2024.

CETESB. Mortandade de peixes. 2025. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/contaminantes/amonia/>. Acesso em: 11 mar 2025.

COELHO, G. K. S. Inversão de relevo nos maciços de Portalegre e Martins - NO do Brasil: controle morfotécnico e erosão diferencial como proposta de evolução geomorfológica. Orientador: Prof. Dr. Rúbson Pinheiro Maia. 2020. 63 p. Dissertação (Pós-graduação em Geografia) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2022.

COSTA, Luis Ricardo Fernandes *et al.* Geomorfologia do nordeste setentrional brasileiro: uma proposta de classificação. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 1, 2020. Disponível em:

<https://pdfs.semanticscholar.org/d413/df19954898a78fb062d70390297e416873d7.pdf>.

Acesso em: 23 dez 2024.

COSTA, Maíra Sampaio da. Avaliação da vulnerabilidade e perigo à contaminação do Aquífero São Sebastião/Marizal, Recôncavo baiano. Orientador: Prof. Dr. Sérgio de Augusto Morais Nascimento, Co-orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria da Conceição Rabelo Gomes. 2023. 98 p. Tese de Doutorado (Pós-Graduação em em Geologia do Instituto de Geociências) - UFBA, Salvador, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/38908>. Acesso em: 22 jan 2025.

COSTA DA CRUZ, G.; MAGALHÃES RIBEIRO, E.; DE PAULA ASSIS, T. R.; MARZANO ARAÚJO, V.; SALES SANTOS, A. J. (2022). Agências, técnicas, custos e oferta de água em comunidades rurais de Januária, semiárido de Minas Gerais. *Revista Econômica Do Nordeste*, 53(2), 41–57. Disponível em: <https://doi.org/10.61673/ren.2022.1150>. Acesso em: 22 jan 2025.

DAHLIN, T.; ZHOU, B. A numerical comparison of 2D resistivity imaging with 10 electrode arrays. *Geophysical Prospecting*, v.52. 2004.

DANA, J. D. *Manual de Mineralogia (Dana-Hurlbut)*. São Paulo, Livros Técnicos e Científicos Editora SA, 1981.

FARIAS, Thiago da Silva; VIANNA, Pedro Costa Guedes. Levantamento da Implantação dos Sistemas de Dessalinização do Programa Água Doce no Seridó Paraibano. V Simpósio Brasileiro de Recursos Naturais do Semiárido – SBRNS, 2021. Disponível em: [https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Farias-5/publication/361321454\\_LEVANTAMENTO\\_DA\\_IMPLANTACAO\\_DOS\\_SISTEMAS\\_DE\\_DESSALINIZACAO\\_DO\\_PROGRAMA\\_AGUA\\_DOCE\\_NO\\_SERIDO\\_PA\\_RAIBANO/links/62aa8eab938bee3e3f37aa47/LEVANTAMENTO-DA-IMPLANTACAO-DOS-SISTEMAS-DE-DESSALINIZACAO-DO-PROGRAMA-AGUA-DOCE-NO-SERIDO-PARAIBANO.pdf](https://www.researchgate.net/profile/Thiago-Farias-5/publication/361321454_LEVANTAMENTO_DA_IMPLANTACAO_DOS_SISTEMAS_DE_DESSALINIZACAO_DO_PROGRAMA_AGUA_DOCE_NO_SERIDO_PA_RAIBANO/links/62aa8eab938bee3e3f37aa47/LEVANTAMENTO-DA-IMPLANTACAO-DOS-SISTEMAS-DE-DESSALINIZACAO-DO-PROGRAMA-AGUA-DOCE-NO-SERIDO-PARAIBANO.pdf). Acesso em: 24 dez 2024.

FARIAS, T.; VIANNA, P. C. G. Políticas de acesso à água subterrânea no seridó paraibano: um estudo espaço-temporal. *Revista GeoUECE*, [S. l.], v. 11, n. 20, p. e202201, 2022. Disponível em: <https://revistas.uece.br/index.php/GeoUECE/article/view/8460>. Acesso em: 23 dez. 2024.

FEITOSA, Fernando A. Carneiro *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 22 jan 2025.

FONTES JÚNIOR, Marcelo Mazili Aguiar. Os efeitos do uso de poços artesanais no processo de salinização costeira na cidade de São Luís: um levantamento bibliográfico. **Anais da I Jornada Norte-nordeste de Engenharias (online)**, p. 70, 2021.

FREITAS, C. L. K. Análises físico-químicas de amostras de águas de poços - determinação das concentrações de alumínio, manganês, ferro e amônia. Relatório de estágio supervisionado desenvolvido na JR Hidroquímica em Florianópolis/SC - UFSC, Florianópolis, p 17, 2021.

GANADE DE ARAÚJO, C., RUBATTO, D., HERMANN, J., CORDANI, U. G., CABY, R., BASEI, M. A. S. (2014). Ediacaran 2,500-km-long synchronous deep continental subduction in the West Gondwana Orogen. *Nature Communications*, 5, 5198. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/ncomms6198>. Acesso em: 26 dez 2024.

GANDOLFO, O. C. B.; GALLAS, J. D. F. 3D electroresistivity - A preliminary evaluation of the techniques. *Revista Brasileira de Geofísica*, v. 23, n. 2, p. 191–198, 2005.

GEOTOMO SOFTWARE. RES2DINV: Rapid 2-D resistivity & IP inversion using the least-square method. Malaysia, ver. 3.53, 125 p. (2003).

GITEL, M. e PERES, Y. No Nordeste, 72% da população ainda carece de coleta do esgoto. *Eco Nordeste*, 2020. Disponível em: <https://agenciaeconordeste.com.br/nordeste-72-da-populacao-ainda-carece-de-coleta-de-esgoto/>. Acesso em 18 de ago de 2022.

GROOT-HEDLIN, C. e CONSTABLE, S. 1990. Occam's inversion to generate smooth, two-dimensional models from magnetotelluric data. *Geophysics*, 55(12): 1613-1624.

GRUPO HÍDRICA. Dureza da água: o que é e como ela influencia na qualidade. Disponível em: <https://grupohidrica.com.br/dureza-da-agua/> Acesso em 23 de fev de 2024.

GUIMARÃES, I.P.; BITTAR, S.M.B.; SILVA, J.M.R.; SILVA, F.M.J.V. e ARAÚJO, D.B. 2008. Geologia da Folha Solânea (SB.25-Y-A-IV). CPRM-UFPE.

GUEDES SOBRINHO, A. B. Avaliação hidrogeológica da Formação Serra dos Martins nas microrregiões do Seridó Oriental e Curimataú Ocidental da Paraíba: contribuições da geofísica e hidroquímica. Orientador: Prof. Dr. José Agnelo Soares. 2024. 116 p. Dissertação (Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral) - UFCG, Campina Grande, 2024.

INSTITUTO CAPIXABA DE PESQUISA, ASSISTÊNCIA TÉCNICA E EXTENSÃO RURAL – INCAPER. Nitrato de amônio na agricultura: uso do fertilizante não oferece perigo. 2025. Disponível em: <https://incaper.es.gov.br/Not%C3%ADcia/nitrato-de-amonio-na-agricultura-uso-do-fertilizante-nao-oferece-perigo>. Acesso em: 11 mar 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA – IBGE. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/> Acesso em: 27 fev. 2024.

LAGES, Geysson de Almeida *et al.* Restrição dos sedimentos continentais da formação campos novos aos limites da bacia Boa Vista na folha Boqueirão (SB. 24-ZD-III), Paraíba. 2008. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/862/1/evento\\_0062.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/862/1/evento_0062.pdf). Acesso em: 24 dez 2024.

LAGES, G. A.; MARINHO, M.S. 2012. Programa Geologia do Brasil - PGB. Boqueirão. Folha SB.24-Z-D-III. Estado da Paraíba. Mapa Geológico. Recife: CPRM, 2012, 1 mapa, colorido, 94,03 x 70,32 cm. Escala 1:100.000. Disponível em: [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/17654/3/mapa\\_boqueirao.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/17654/3/mapa_boqueirao.pdf). Acesso em: 30 dez 2024.

LOKE, M.H.; BARKER, R.D. 1996. Rapid least-squares inversion of apparent resistivity pseudosections by a quasi-Newton method. *Geophysical Prospecting*, 44: 131-152.

MANOEL FILHO, João. **Modelo de dimensão fractal para avaliação de parâmetros hidráulicos em meio fissural**. 1996. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) - Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1996. doi:10.11606/T.44.1996.tde-04112015-155049. Acesso em: 2024-11-27.

MAGALHÃES, Á. L. P. L.; LUCENA, L. R. F. de. 2023. Análise da hierarquia dos parâmetros que compõem a resistência elétrica transversal e sua aplicabilidade ao estudo do Aquífero Barreiras – litoral sul do RN. *Geoambiente on-line*, Jataí, p. 15-35, 19 ago. 2023.

MAGALHÃES, José Wilson de Oliveira. Recursos hídricos subterrâneos em aluvião no semiárido nordestino: estudo de caso no Perímetro Irrigado Morada Nova, CE. 2021. Disponível em: [https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/58882/3/2021\\_tcc\\_jwomagalhaes.pdf](https://repositorio.ufc.br/bitstream/riufc/58882/3/2021_tcc_jwomagalhaes.pdf). Acesso em: 22 jan 2025.

MAIA, R. P.; BÉTARD, F.; BEZERRA, F. H. Geomorfologia dos Maciços de Portalegre e Martins – NE do Brasil: Inversão Do Relevo em Análise. Revista Brasileira de Geomorfologia, [S. l.], v. 17, n. 2, 2016. DOI: 10.20502/rbg.v17i2.801. Disponível em: <https://rbgeomorfologia.org.br/rbg/article/view/801>. Acesso em: 23 dez. 2024.

MARQUES, A. L. Aspectos Geomorfológicos da Formação Serra dos Martins nos Estados da Paraíba e do Rio Grande do Norte. XVIII Encontro Nacional de Geógrafos, São Luís, 2016. Disponível em: [https://www.eng2016.agb.org.br/resources/anais/7/1467677276\\_ARQUIVO\\_ASPECTOSGEOMORFOLOGICOSDAFORMACAOSERRADOSMARTINSNOESTADODAPARAIBAEDORIOGRANDEDONORTE.pdf](https://www.eng2016.agb.org.br/resources/anais/7/1467677276_ARQUIVO_ASPECTOSGEOMORFOLOGICOSDAFORMACAOSERRADOSMARTINSNOESTADODAPARAIBAEDORIOGRANDEDONORTE.pdf). Acesso em: 24 dez 2024.

MARTORANA, R.; CAPIZZI, P.; D’ALESSANDRO, A.; LUZIO, D. 2017. Comparison of different sets of array configurations for multichannel 2D ERT acquisition. Journal of Applied Geophysics, 137: 34–48.

MAYER, E. Estratigrafia preliminar da plataforma continental da Bacia Potiguar. Rio de Janeiro: Petrobras, 1974.

MÉLO, F. E. de L.; PEIXOTO, F. S.; FRANÇA, J. M. F. Reserva renovável de aquífero costeiro e demanda hídrica de abastecimento doméstico no nordeste semiárido. **Sociedade e Território**, [S. l.], v. 36, n. 1, 2024. DOI: 10.21680/2177-8396.2024v36n1ID32617. Disponível em: <https://periodicos.ufrn.br/sociedadeeterritorio/article/view/32617>. Acesso em: 22 jan. 2025.

MESSIAS, G. C. *et al.* Hydrogeophysics in fractured crystalline aquifers in English Guyana. Brazilian Journal of Geophysics, Fortaleza, v. 37, ed. 3, p. 299-308, 2019.

MONTEIRO, A. R. O.; LUCENA, L. R. F. de. Contribuição de Dados Hidrogeofísicos para Avaliação dos Níveis de Proteção de Aquíferos Livres - Um Exemplo do Nordeste do Brasil. Revista Brasileira de Geofísica, [SI], v. 3, pág. 393-411, set. 2021. ISSN2764-8044. Disponível em:

<https://sbgf.org.br/revista/index.php/rbgf/article/view/2107/1348> Acesso em: 27 fev. 2024. doi: <http://dx.doi.org/10.22564/rbgf.v39i3.2107>.

MUNIZ RIBEIRO, S.; GARUBA PAULO, V.; SANTOS CARVALHO, V. dos.; SANTANA LADEIRA GOMES, L.; CABRAL DA SILVA, M. Concentração de alumínio na água potável e na água da torneira. Congresso de Interdisciplinaridade do Noroeste Fluminense, [S. l.], v. 1, 2022. Disponível em: <https://anais.eventos.iff.edu.br/index.php/coninfitaperuna/article/view/1014> Acesso em: 27 fev. 2024.

NEVES, Sérgio Pacheco. Proterozoic history of the Borborema province (NE Brazil): Correlations with neighboring cratons and Pan-African belts and implications for the evolution of western Gondwana. **Tectonics**, v. 22, n. 4, 2003. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2001TC001352>. Acesso em: 26 dez 2024.

NEVES, Sérgio P. *et al.* Timing of crust formation, deposition of supracrustal sequences, and Transamazonian and Brasiliano metamorphism in the East Pernambuco belt (Borborema Province, NE Brazil): Implications for western Gondwana assembly. **Precambrian Research**, v. 149, n. 3-4, p. 197-216, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2006.06.005>. Acesso em: 26 dez 2024.

NGONGE, E. D.; HOLLANDA, M. H. B. M.; PIMENTEL, M. M.; OLIVEIRA, D. C. Petrology of the alkaline rocks of the Macau Volcanic Field, NE Brazil. *Lithos*, v. 266, p. 453-470, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.lithos.2016.10.008> Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0024493716303371> Acesso em: 29 nov. 2024.

NESSE, William D. **Introduction to Optical Mineralogy**. Oxford Univ. Press, 2004.

OLIVEIRA, S. F. *et al.* Saco do Inferninho: Plug Basáltico do Magmatismo Cenozoico na Região de Picuí/PB. In: SIMPOSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 25., 2013, Gravata. Anais [...]. São Paulo: Sociedade Brasileira de Geologia, 2013. p. 463.

OLIVEIRA, C. E. S. *et al.* Relatório de prospecção geofísica de água subterrânea. Porto Velho: Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2021. 35 p.

OLIVEIRA, L. E. B. Avaliação do potencial hidrogeológico no município de Areia-PB pela aplicação integrada de geotecnologias e eletrorresistividade 3D. Orientador: Prof.

Dr. José Agnelo Soares. 2020. 92 p. Dissertação (Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral) - UFCG, Campina Grande, 2020.

OLIVEIRA, L. E. B.; MEDEIROS, L. A.; STEIN, P. O aquífero fraturado em um setor do Agreste Paraibano. Estudos Geológicos, UFPE, vol. 31, n. 1, p 3-15, junho, 2021. Disponível em: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/index.php/estudosgeologicos/article/view/250838>. Acesso em: 28/12/2023.

OLIVEIRA, Roberto Gusmão de. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental (Nordeste do Brasil). 2008. 415 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica; Geofísica) - Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2008. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/18344>. Acesso em: 26 dez 2024.

OLIVEIRA, S.F. & CUNHA, A.L.C., 2014. Programa Geologia do Brasil-PGB. Santa Cruz. Folha SB.24-Z-B-III. Estados do Rio Grande do Norte e Paraíba. Carta Geológica. Recife: CPRM, 2014, 1 mapa colorido, 90,86 x 68,48 cm. Escala 1:100.000 Disponível em [https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/20239/4/folha\\_santa\\_cruz\\_geologia.pdf](https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/20239/4/folha_santa_cruz_geologia.pdf). Acesso em: 28 dez 2024.

RAMOS, Caroline Assunção. Avaliação dos critérios vigentes de outorga de recursos hídricos subterrâneos: caso do sistema aquífero Urucuia, oeste da Bahia. 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/33698>. Acesso em 22 jan 2025.

RIBEIRO, Eduardo Magalhães *et al.* Agricultura familiar e programas de abastecimento de água nos gerais do Alto-Médio rio São Francisco, Minas Gerais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v. 62, n. 4, p. e274867, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-9479.2023.274867>. Acesso em: 22 jan 2025.

RIOS, Israel Henrique Ribeiro. Estudo do risco de contaminação de aquíferos da região de Feira de Santana como ferramenta de apoio à gestão e gerenciamento das águas subterrâneas. 2021. Disponível em: <http://repositorio.ufba.br/ri/handle/ri/33768>. Acesso em: 22 jan 2025.

RIOS, Israel Henrique Ribeiro; RABELO, Jorge Luiz. Estudo do risco de contaminação de aquíferos de sub-bacias baianas. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 2, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.14295/ras.v35i2.30054>. Acesso em> 22 jan 2025.

RODRIGUES, Luma Lorena Loureiro da Silva. Qualidade das águas de poços subterrâneos do Município Limoeiro do Norte–CE, região semiárida brasileira. 2018. Disponível em: <https://repositorio.ufersa.edu.br/items/fc28ed70-0981-4a97-99b9-69514e064645>. Acesso em: 23 dez 2024.

RODRIGUES, Maria Florida Brochini. **Rochas basálticas do Rio Grande do Norte e Paraíba**. 1976. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. Disponível em: [https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-25082015-144716/publico/Rodrigues\\_Mestrado.pdf](https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44135/tde-25082015-144716/publico/Rodrigues_Mestrado.pdf). Acesso em: 29 nov 2024.

Santos, E. J., Van Schmus, W. R., Kozuch, M., Brito Neves, B. B. (2010). The Cariris Velhos tectonic event in northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29(1), 61-76. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2009.07.003>. Acesso em: 24 dez 2024.

Santos, L. C. M. L., Dantas, E. L., Vidotti, R. M., Cawood, P. A., Santos, E. J., Fuck, R. A., Lima, H. M. (2017). Two-stage terrane assembly in Western Gondwana: Insights from structural geology and geophysical data of central Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 103, 167-184. <https://doi.org/10.1016/j.jsg.2017.09.012>. Acesso em: 26 dez 2024.

SANTOS, L. C. M. L., DANTAS, E. L., CAWOOD, P. A., LAGES, G. A., LIMA, H. M., SANTOS, E. J. (2018). Accretion tectonics in western Gondwana deduced from Sm-Nd isotope mapping of terranes in the Borborema Province, NE Brazil. *Tectonics*, 37(8), 2727-2743. <https://doi.org/10.1029/2018TC005130>. Acesso em: 26 dez 2024.

SANTOS, F. G.; PINÉO, T. R. G.; MEDEIROS, V. C.; SANTANA, J. S.; MORAIS, D. M. F.; VALE, J. A. R.; WANDERLEY, A. A. Mapa Geológico da Província Borborema. Projeto Geologia e Potencial Mineral da Província Borborema. Escala 1:1.000.000. Recife: SGB-CPRM, 2021, 1 mapa. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/geosgb/downloads.html>. Acesso em: 26 dez 2024.

SARAIVA, F.A. 2010. Avaliação de Métodos Geofísicos no Comportamento Espacial de Plumas de Necrochorume. Tese de Doutorado. Programa de Pós-graduação em Recursos Minerais e Hidrogeologia. Instituto de Geociências. Universidade de São Paulo, 103 p.

SASAKI, Y. 1992. Resolution of resistivity tomography inferred from numerical simulation. *Geophysical Prospecting*, 40: 453-464.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL – CPRM. Dados, informações e produtos. Disponível em: <https://geosgb.sgb.gov.br/> Acesso em: 27 fev 2024.

SIAL, A. N. *The post-Paleozoic volcanism of northeast Brazil and its tectonic significance*. Anais da Academia Brasileira de Ciências, v. 48, n. 51, p. 299-311, 1976.

SILVA, J. A.; MEDEIROS, W. E.; SÁ, E. F. J.; SILVA, C. C. N.; OLIVEIRA JR, J. G. Uso dos métodos VLF e eletrorresistividade na caracterização do modelo fenda de acumulação de água subterrânea em terrenos cristalinos: exemplo da Fazenda Tararaca/RN. Seventeenth International Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, p. 1-3, 16 ago. 2021.

SILVA, S. L. L. *et al.* Análises Físico-Químicas de Águas de Poços Tubulares Localizados em Municípios da Microrregião do Curimataú Paraibano. *Águas Subterrâneas*, 2018.

SILVA, J. E.; MARTINS, M. de F. (2024). Os impactos da perfuração de poços artesianos no Cariri Oriental Paraibano: um estudo de caso no assentamento Serra do Monte Cabaceiras – PB. *Caderno Pedagógico*, 21(2), e2820. Disponível em: <https://doi.org/10.54033/cadpedv21n2-087>. Acesso em: 22 jan 2025.

SILVA, Julianna Ferreira dos Santos; SANTOS, Laercio Leal dos; RAMOS, Pablo Rafael Ferreira; MONTEIRO, Veruschka Escarião Dessoles; MELO, Márcio Camargo de. Análise da vulnerabilidade à contaminação de água subterrânea em um aterro sanitário no semiárido do Estado da Paraíba – Nordeste do Brasil. **Revista do Departamento de Geografia**, São Paulo, Brasil, v. 44, p. e229387, 2024. DOI: [10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2024.229387](https://doi.org/10.11606/eISSN.2236-2878.rdg.2024.229387). Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/229387>. Acesso em: 22 jan. 2025.

SILVA JÚNIOR, Antônio Pereira da. IMPACTOS NA QUALIDADE DA ÁGUA EM POÇOS ARTESIANOS CAUSADOS PELA EXPLORAÇÃO DE MINÉRIO DE FERRO EM SÃO JOSÉ DO BELMONTE, PERNAMBUCO. **Revista Multidisciplinar do Sertão**, v. 2, n. 3, p. 338-346, 2020. Disponível em: <https://revistamultisertao.com.br/index.php/revista/article/download/301/164>. Acesso em: 22 jan 2025.

SILVEIRA, F. V. Magmatismo Cenozoico da Porção Central do Rio Grande do Norte, NE do Brasil. 2006. Tese (Doutorado em Geologia) – Centro de Ciências Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2006.

SIQUEIRA NETO, A. C. *et al.* Método da eletrorresistividade aplicado à variação temporal do nível freático do Aquífero Alter do Chão, em Santarém, Pará. *Revista de Geociências do Nordeste*, Caicó, v. 9, ed. 1, p. 88-104, 15 jun. 2023.

SOARES, J.A; BATISTA, J.T. 2019. Detection of a fractured aquifer through multiple vertical electric soundings and by multilevel electric profiling. *Brazilian Journal of Geophysics*, 37(4): 369-380. DOI: 10.22564/rbgf.v37i4.2015

SOARES, J. A.; COSTA, D. B.; SILVA, L. T. M. S.; COSTA, W. W. M. L. Arranjo gradiente otimizado para a detecção de lixiviado em aterro sanitário. IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Curitiba, 04 a 06 out. 2022. Disponível em: [https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded\\_abstracts/IX\\_SimBGf/Arranjo%20gradiente%20otimizado%20para%20a%20detec%C3%A7%C3%A3o%20de%20lixiviado%20em%20aterro%20sanit%C3%A1rio.pdf](https://sbgf.org.br/mysbgf/eventos/expanded_abstracts/IX_SimBGf/Arranjo%20gradiente%20otimizado%20para%20a%20detec%C3%A7%C3%A3o%20de%20lixiviado%20em%20aterro%20sanit%C3%A1rio.pdf) Acesso em: 19 de mar de 2024.

SOLDERA, Bruna. Água na região nordeste. Instituto Água Sustentável, 2022. Disponível em: <https://www.aguasustentavel.org.br/conteudo/blog/160-agua-na-regiao-nordeste#:~:text=40%25%20da%20popula%C3%A7%C3%A3o%20rural%20da,a%20quantidade%20de%20sais%20dissolvidos> Acesso em 18 de ago de 2022.

SOARES, J. A. Proposta de Projeto. FAPESQPB Edital 09/2021. Demanda Universal, 2022.

SOARES, J. A. Relatório Técnico Parcial. FAPESQPB Edital 09/2021. Demanda Universal, 2023.

SOUZA, Z. S.; VASCONCELOS, P. M. P.; SILVEIRA, F. V. Vulcanismo no NE do Brasil: reavaliação da Formação Macau. *Simpósio de Geologia do Nordeste*, v. 22, p. 189, 2007.

SOUZA, Z. S.; MARTIN, H.; PEUGAT, J. J.; JARDIM DE SA, E. F.; MACEDO, M. H. F. Calc-alkaline magmatism at the archean–proterozoic transition: the Caico Complex basement (NE Brazil). *Journal of Petrology*, v. 48, n. 11, p. 2149-2185, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1093/petrology/egm055>. Disponível em: <https://academic.oup.com/petrology/article/48/11/2149/1566626?login=true> Acesso em: 29 nov. 2024.

TERRELL, D. Avaliação da qualidade da água subterrânea em área de mineração de caulim: impactos e perspectivas de remediação, município de Mogi das Cruzes, SP.

Dissertação de Mestrado – USP, 101 p. 2007. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-25042008-160351/publico/DT.pdf> Acesso em: 27 de fev de 2024.

THOMAZELLI, F. F.; ANSARI, N. N. R.; BATISTA, E. P. M. P.; OLIVEIRA, R. F.; SOUZA, M. D. C. Monitoramento da concentração de metais na água da região adjacente à Base de Submarinos da Ilha da Madeira, Baía de Sepitiba, Brasil. *Anais Hidrográficos*, v. 77, n. 1, p. 196-210, 2021. Disponível em: <https://www.portaldeperiodicos.marinha.mil.br/index.php/anaishidrograficos/article/view/5220> Acesso em: 12 mar 2024.

TÔRRES, Lucas Matheus Garcia *et al.* USO E CAPTAÇÃO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM ZONAS RURAIS NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO. **Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas**, n. 16, p. 95-110, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/58882>. Acesso em: 22 jan 2025.

TORRI, Júlia Betina. Dessalinização de água salobra e/ou salgada: métodos, custos e aplicações. 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/handle/10183/127799>. Acesso em: 23 dez 2024.

VALÕES, Débora Cristina Pereira *et al.* Análise do zoneamento explotável de água subterrânea como instrumento de gestão na Bacia Sedimentar de São José do Belmonte-PE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 15, n. 04, p. 1863-1880, 2022. Disponível em: <https://pdfs.semanticscholar.org/19a0/73f99406ead31691e52b1ee880403bb9e191.pdf>. Acesso em: 22 jan 2025.

VAN SCHMUS, W. R., OLIVEIRA, E. P., SILVA FILHO, A. F., TOTEU, F., PENAYE, J., GUIMARÃES, I. P. (2008). Proterozoic Links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. Geological Society, London, Special Publications, 294(1), 69-99. Disponível em: <https://doi.org/10.1144/SP294.5>. Acesso em: 24 dez 2024.

VAUCHEZ, A., NEVES, S. P., CABY, R., CORSINI, M., EGYDIO-SILVA, M., ARTHAUD, M. H., AMARO, V. (1995). The Borborema shear zone system, NE Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 8(3-4), 247-266. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0895-9811\(95\)00012-5](https://doi.org/10.1016/0895-9811(95)00012-5). Acesso em: 26 dez 2024.

WHITNEY, Donna L.; EVANS, Bernard W. Abbreviations for names of rock-forming minerals. **American mineralogist**, v. 95, n. 1, p. 185-187, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.2138/am.2010.3371>. Acesso em: 03 dez 2024.

WINSAUER, W.O; SHEARIN JR., H.M.; MASSON, P.H.; WILLIAMS, M. 1952. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. Bulletin of AAPG, vol. 36, n° 2, p. 253-277.