

Potencial hidrogeológico da Formação Serra dos Martins na Serra do Cuité, Paraíba, para a produção de água subterrânea

Anne Beatrice Guedes Sobrinho ^[1], José Agnelo Soares ^{[2]*}, Mariana Laiane Soares Dutra ^[3], Paula Stein ^[4]

^[1] annebeatriceguedes@hotmail.com; ^[2] jose.agnelo@professor.ufcg.edu.br ^[3]

marianalaianedutra@gmail.com, Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), Campina Grande, Paraíba, Brasil

^[4] paula.stein@ufrn.br, Universidade Federal do Rio Grande do Norte (UFRN), Natal, Rio Grande do Norte, Brasil

* Autor correspondente

Resumo

Estima-se que aproximadamente um terço da população mundial resida em regiões com déficit hídrico, seja devido à degradação ambiental, seja em função da escassez natural desse recurso. No Nordeste brasileiro, a disponibilidade de água é limitada, especialmente em razão das condições climáticas e da predominância de formações geológicas cristalinas, pouco favoráveis ao armazenamento de águas subterrâneas. Nesse contexto, a Formação Sedimentar Serra dos Martins (FSM), ainda pouco estudada, apresenta-se como uma potencial fonte de abastecimento hídrico para a região da Serra do Cuité, estado da Paraíba (PB), Brasil. Este estudo tem como objetivo quantificar o volume de água disponível na FSM e avaliar sua qualidade para consumo humano. Para isso, foram realizadas análises geofísicas, petrofísicas e hidroquímicas. A investigação geofísica empregou o método de tomografia elétrica para fornecer informações sobre a variação lateral e vertical da resistividade elétrica do terreno. As análises petrofísicas determinaram a porosidade das amostras de rocha coletadas em campo. Por fim, a caracterização físico-química da água possibilitou a obtenção dos principais parâmetros de qualidade, com base nos critérios estabelecidos pela Portaria de Potabilidade do Ministério da Saúde. Os resultados indicam um volume estimado de 521 milhões de metros cúbicos de água na FSM. No entanto, a maioria das amostras apresentou concentrações de determinados parâmetros acima dos limites permitidos, tornando necessário um tratamento prévio antes do consumo humano. Além disso, apesar do expressivo volume de água armazenada, nem toda essa reserva pode ser efetivamente explorada, o que ressalta a importância da gestão sustentável dos recursos hídricos na região.

Palavras-chave: Archie; hidrogeofísica; hidroquímica; petrofísica; tomografia elétrica.

Hydrogeological potential of the Serra dos Martins Formation in Serra do Cuité, Paraíba, for groundwater production

Abstract

Water scarcity affects approximately one-third of the global population due to environmental degradation or a natural shortage of this essential resource. In northeastern Brazil, water availability is limited, primarily due to climatic conditions and the dominance of crystalline geological formations that are not conducive to groundwater storage. In this context, the Serra dos Martins Sedimentary Formation (FSM), which has been insufficiently studied, emerges as a potential water source for the Serra do Cuité region in Paraíba (PB), Brazil. This study aims to quantify the volume of water available in the FSM and evaluate its suitability for human consumption. To accomplish this, geophysical, petrophysical, and hydrochemical analyses were conducted. The geophysical investigation utilized the electrical tomography method to reveal insights into the lateral and vertical variations in the terrain's electrical resistivity. Petrophysical analyses assessed the porosity of rock samples collected in the field. Lastly, the physicochemical characterization of the water allowed for the identification of key quality parameters based on the criteria established by the Ministry of Health's Drinking Water Regulation. The results indicate an estimated water volume of 521 million cubic meters in the FSM. Nevertheless, most samples exhibited parameter concentrations exceeding permissible limits, which necessitates prior treatment before human consumption. Furthermore,

despite the significant volume of stored water, not all of this reserve can be effectively utilized, highlighting the importance of sustainable water resource management in the region.

Keywords: Archie; electrical tomography; hydrochemistry; hydrogeophysics; petrophysics.

1 Introdução

No Brasil, a água subterrânea é amplamente utilizada para consumo humano, irrigação, pecuária e aplicações industriais e comerciais. No entanto, seu aproveitamento ainda é limitado devido à escassez de informações sobre sua ocorrência, aspectos quantitativos e qualitativos, bem como sobre as características do fluxo subterrâneo. Ademais, a falta de profissionais devidamente capacitados compromete a gestão eficiente desse recurso natural (Collischonn; Dornelles, 2013).

A disponibilidade de água está relacionada não apenas à sua quantidade, mas também à sua qualidade (Braga et al., 2005). O conceito de qualidade da água não se limita à determinação de um grau de pureza, abrangendo suas características físicas, químicas e biológicas, fundamentais para diferentes usos. Essas propriedades podem ser alteradas por poluentes de diversas origens, uma vez que o ambiente aquático contém diversos elementos químicos, como substâncias neutras, íons (metais, não metais, metalóides), compostos orgânicos (pesticidas, detergentes e outros produtos de origem industrial ou natural) e ânions (carbonato, bicarbonato, sulfato, nitrato, nitrito), comprometendo sua utilização pela população (Oliveira, 2016; Silva, 2015).

Nas áreas rurais, a água subterrânea é frequentemente utilizada para abastecimento devido à facilidade de obtenção. No entanto, a ausência de um programa de monitoramento adequado nessas comunidades compromete a conservação dos recursos hídricos subterrâneos e pode representar um risco para a saúde pública (Ferreira et al., 2021).

O estado da Paraíba está inserido na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental Brasileiro, sendo que aproximadamente 90% de seu território está localizado no semiárido, caracterizado por um regime pluviométrico irregular e escasso (Silva; Pedrosa Filho; Silva, 2001). Além disso, a litologia da região é predominantemente composta por rochas cristalinas, geralmente associadas a um baixo potencial hidrogeológico (Dimiz et al., 2014).

A Formação Sedimentar Serra dos Martins (FSM) corresponde a uma importante cobertura sedimentar cuja potencialidade hidrogeológica ainda é pouco discutida. Em geral, os poços perfurados em aquíferos sedimentares tendem a apresentar volumes de água superiores, com qualidade também mais favorável, em comparação aos aquíferos fraturados (ABAS, 202?).

O primeiro estudo sistemático dessa cobertura sedimentar foi conduzido por Moraes (1924), que, ao analisar os litotipos da região, os denominou "Série Serra dos Martins". Posteriormente, Mabesoone (1966) revisou os dados geológicos e redefiniu a classificação para "Formação Serra dos Martins".

Morais Neto e Alkmim (2001) utilizaram análise de traços de fissão em apatita e zircão, associada a evidências geológicas, para determinar a idade da FSM, sugerindo que sua deposição ocorreu entre 64 e 25 Ma (Paleoceno-Oligoceno). Angelim et al. (2006) descreveram a geologia da FSM como composta por arenitos médios a conglomeráticos, arenitos argilosos e crosta laterítica contendo seixos de quartzo.

De acordo com a Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba – AESA (2024), o sistema aquífero Serra dos Martins está inserido na formação litoestratigráfica homônima, caracterizando-se por camadas de arenitos finos, médios e grosseiros, intercaladas com argilitos de espessuras variáveis. Devido a fatores geomorfológicos, esse sistema é espacialmente descontínuo e ocorre nas serras de Areia, Solânea, Araruna, Bombocadinho e Cuité/Nova Floresta, distribuídas pelos municípios paraibanos correspondentes. A espessura total dos sedimentos apresenta grande variabilidade, atingindo, em Cuité/Nova Floresta, entre 19 e pouco mais de 50 metros. Os recursos hídricos subterrâneos desse sistema são drenados para as bacias hidrográficas dos rios Jacu e Curimataú.

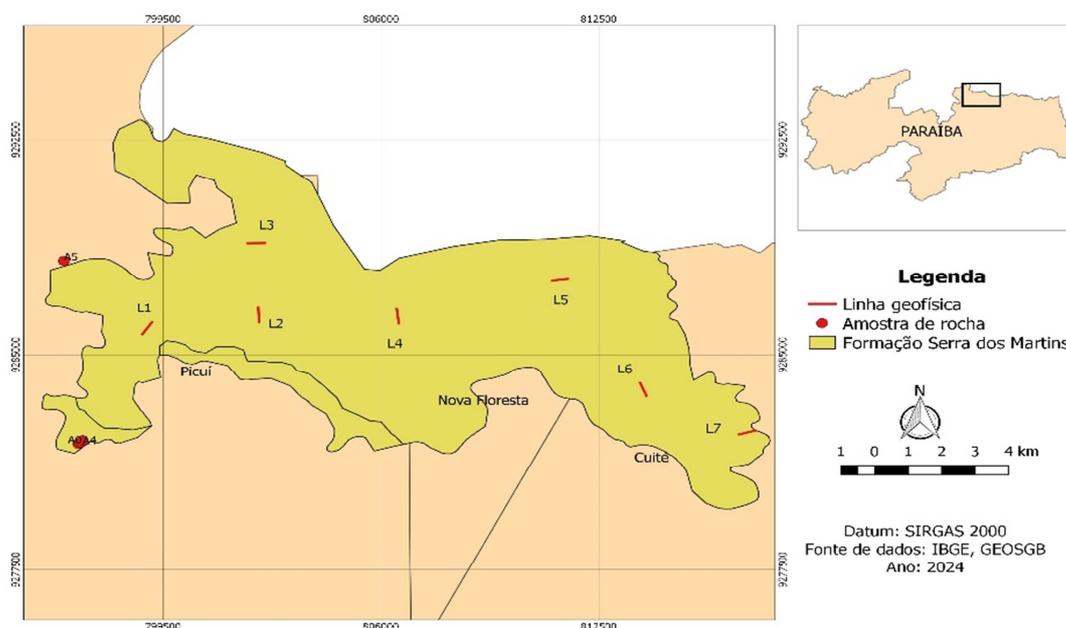
Diante desse contexto, este estudo tem como objetivo analisar a ocorrência da FSM na Serra do Cuité, considerando sua potencialidade hídrica e qualidade da água, uma vez que grande parte da população local depende desse recurso. Não há registros de estudos anteriores que tenham estimado o volume de reserva de água subterrânea na área de estudo, informação essencial para qualquer iniciativa de planejamento hídrico voltada ao abastecimento humano ou a atividades antrópicas.

Na Seção 2, são apresentados a localização da área de estudo e os procedimentos metodológicos empregados, abrangendo as análises geofísicas, petrofísicas e hidroquímicas. Em seguida, a Seção 3 detalha os principais resultados obtidos, incluindo perfis geoeletricos, dados petrofísicos e análises físico-químicas da água, possibilitando a quantificação da reserva subterrânea. Por fim, a Seção 4 apresenta as considerações finais do estudo.

2 Método da pesquisa

A área de estudo está situada nos municípios de Nova Floresta, Picuí e Cuité, no estado da Paraíba, na região conhecida como Serra do Cuité. Como parte da metodologia adotada, foram realizadas sete linhas geofísicas, selecionadas de forma a proporcionar uma maior cobertura areal. Além disso, amostras de rocha foram coletadas em afloramentos locais para a realização de ensaios petrofísicos (Figura 1).

Figura 1 – Localização da Formação Serra dos Martins na Serra do Cuité e das linhas geofísicas e amostras de rocha a serem submetidas a ensaios petrofísicos



Fonte: elaborada pelos autores.

Fonte de dados: IBGE, GEOSGB

A metodologia adotada baseou-se em levantamentos geofísicos, análises petrofísicas e investigações hidroquímicas. O método geofísico empregado foi o da eletrorresistividade, utilizando a técnica de tomografia elétrica (*Electrical Resistivity Tomography – ERT*) com arranjo gradiente. Essa técnica permitiu não apenas a investigação em profundidade, mas também a obtenção de informações sobre a variação da resistividade elétrica na direção horizontal.

As análises petrofísicas foram realizadas no Laboratório de Petrofísica (LabPetro) da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia (UAMG) da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG). Para esse procedimento, as amostras de rocha foram extraídas em campo na forma de cilindros, utilizando uma plugadeira de 38 mm de diâmetro. No laboratório, as amostras passaram por serragem e acabamento das faces em uma retificadora, sendo posteriormente submetidas à secagem em estufa a 90°C por um período de 24 horas.

O volume das amostras foi determinado por meio da medição do comprimento e do diâmetro utilizando um paquímetro, enquanto a massa foi aferida com uma balança analítica. Em seguida, as amostras cilíndricas foram analisadas em um permoporosímetro, que permitiu a determinação do volume de grãos. Dessa forma, foi possível calcular a porosidade, conforme a Equação 1:

$$V_{poros} = V_{amostra} - V_{grãos} \quad (1)$$

O volume de grãos foi fornecido pelo equipamento, e a porosidade (\emptyset) foi calculada pela relação entre o volume de poros (V_{poros}) e o volume total da amostra ($V_{amostra}$), conforme a Equação 2:

$$\emptyset(\%) = \frac{V_{poros}}{V_{amostra}} \times 100 \quad (2)$$

A densidade dos grãos ($D_{grãos}$) e a densidade total da amostra ($D_{amostra}$) foram determinadas pelas seguintes equações:

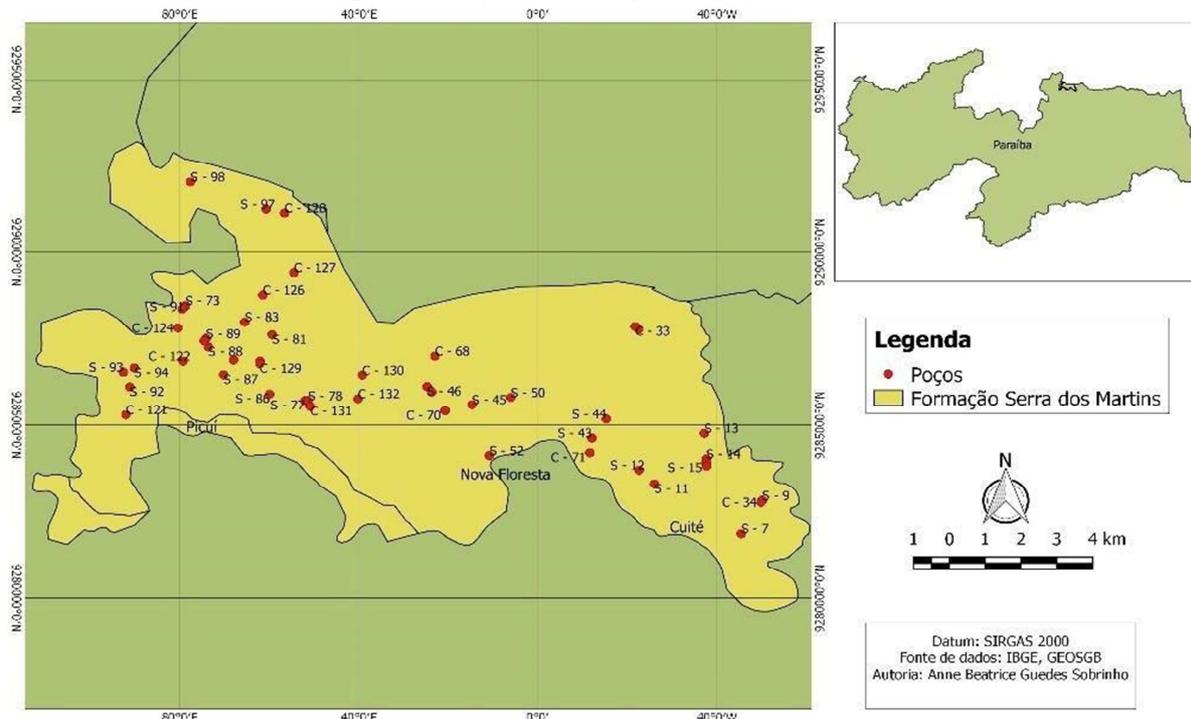
$$D_{grãos} = \frac{M_{grãos}}{V_{grãos}} \quad (3)$$

$$D_{amostra} = \frac{M_{amostra}}{V_{amostra}} \quad (4)$$

onde $M_{grãos}$ representa a massa dos grãos (g) e $V_{grãos}$ corresponde ao volume dos grãos (g/cm^3). Da mesma forma, $M_{amostra}$ é a massa da amostra seca (g) e $V_{amostra}$ refere-se ao volume da amostra (g/cm^3).

No que se refere à investigação hidrogeológica, foram realizadas visitas a poços na área de estudo, onde foram medidos in situ os parâmetros de pH, potencial de oxidação-redução (*Oxidation-Reduction Potential* – ORP), Sólidos Totais Dissolvidos (STD), salinidade e condutividade elétrica, utilizando uma sonda multiparâmetros. Além disso, mediante autorização dos proprietários, foram coletadas amostras de água para análise química em laboratório (Figura 2).

Figura 2 – Mapa de localização dos poços estudados



Fonte: elaborada pelos autores.

Fonte de dados: IBGE, GEOSGB

Para a estimativa do volume de água presente na formação, foram utilizadas as equações de Archie (1942) e Winsauer *et al.* (1952). Essas relações estabelecem uma conexão entre a resistividade elétrica da rocha saturada (obtida por meio da geofísica), a resistividade da água saturante (determinada pela análise físico-química), a porosidade da rocha (determinada a partir dos ensaios petrofísicos), a tortuosidade dos canais permeáveis e um expoente de cimentação, dependente da

tipologia da rocha (Figura 3).

Figura 3 – Fluxograma dos métodos integrados para estimativa de reserva de água subterrânea na FSM



Fonte: elaborado pelos autores

Conforme Archie (1942), o fator de formação (F) é definido pela razão entre a resistividade da rocha saturada com água (R_o) e a resistividade da água que satura a rocha (R_w):

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (5)$$

Winsauer *et al.* (1952) propuseram que o fator de formação está relacionado à porosidade (ϕ), ao coeficiente de tortuosidade (a) e ao expoente de cimentação (m):

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (6)$$

Ao igualar as Equações 4 e 5 e aplicar a função logarítmica, obtém-se:

$$\log(\phi) = \frac{\log(a) - \log(F)}{m} \quad (7)$$

Dessa forma, ao conhecer as resistividades da rocha saturada e do fluido saturante, bem como a faixa de variação da porosidade, é possível estimar os parâmetros a e m . Com essas informações, torna-se viável calcular a porosidade efetiva, a qual revela os poros verdadeiramente preenchidos por água.

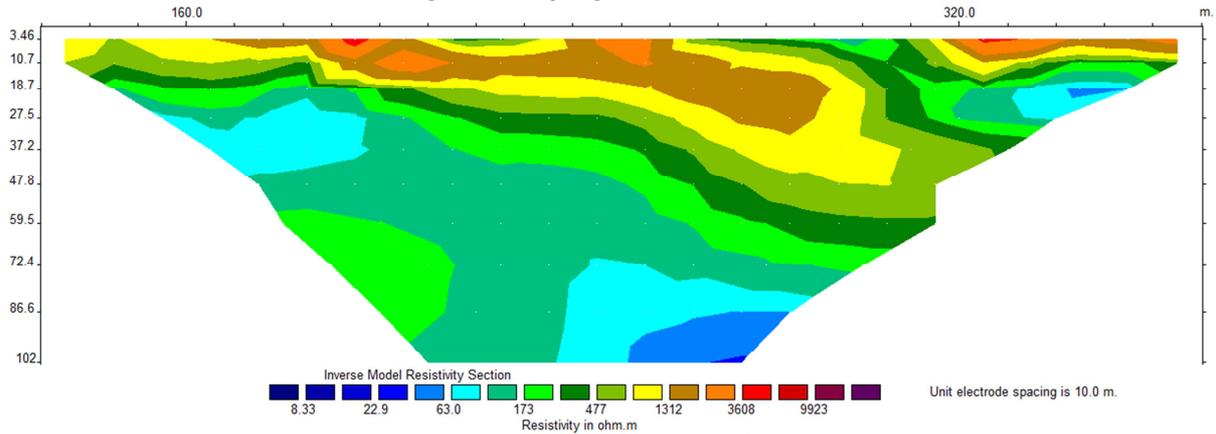
3 Resultados e discussões

Esta seção apresenta os resultados dos levantamentos geofísicos, das análises petrofísicas e da avaliação hidroquímica da área. No estudo das seções geoeletricas obtidas, foi analisada a variação da resistividade elétrica em função da profundidade, com o objetivo de determinar a provável localização do aquífero. A análise petrofísica teve como principal finalidade avaliar a porosidade das amostras de rocha coletadas, visando estimar o potencial de armazenamento de água. Já a análise hidroquímica consistiu na avaliação de parâmetros relevantes, seguida da verificação de sua conformidade com a norma de potabilidade vigente. Por fim, a estimativa da reserva hídrica foi realizada com base nos dados obtidos nas etapas anteriores.

3.1 Geofísica

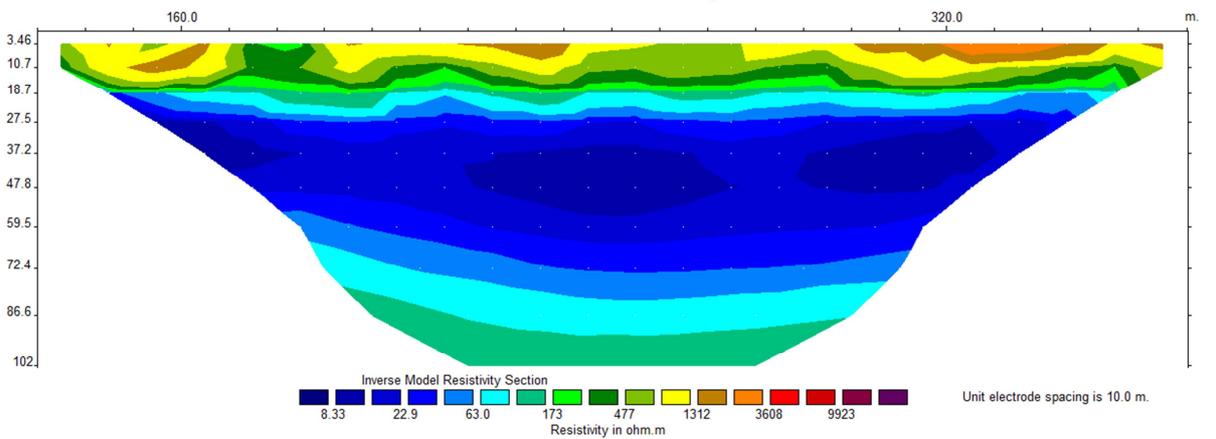
As sete seções geolétricas resultantes do levantamento geofísico, cujas linhas estão localizadas na Figura 1, apresentaram um padrão de comportamento caracterizado por: uma camada superficial mais resistiva, uma camada intermediária condutiva, identificada a aproximadamente 20 metros de profundidade e com cerca de 60 metros de espessura, possivelmente associada ao aquífero, e uma camada basal novamente resistiva, relacionada ao embasamento cristalino (Figuras 4 a 10).

Figura 4 – Seção geolétrica da linha 1



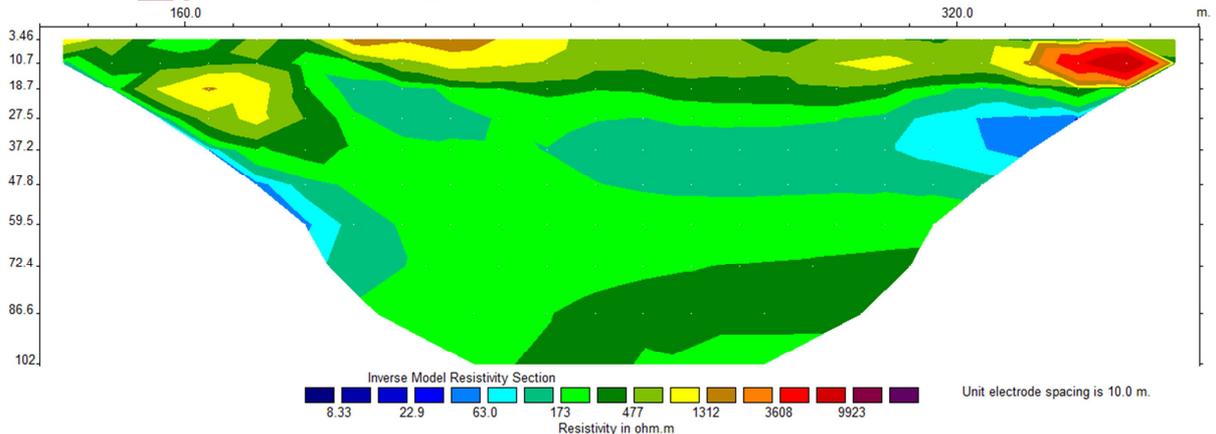
Fonte: dados da pesquisa

Figura 5 – Seção geolétrica da linha 2



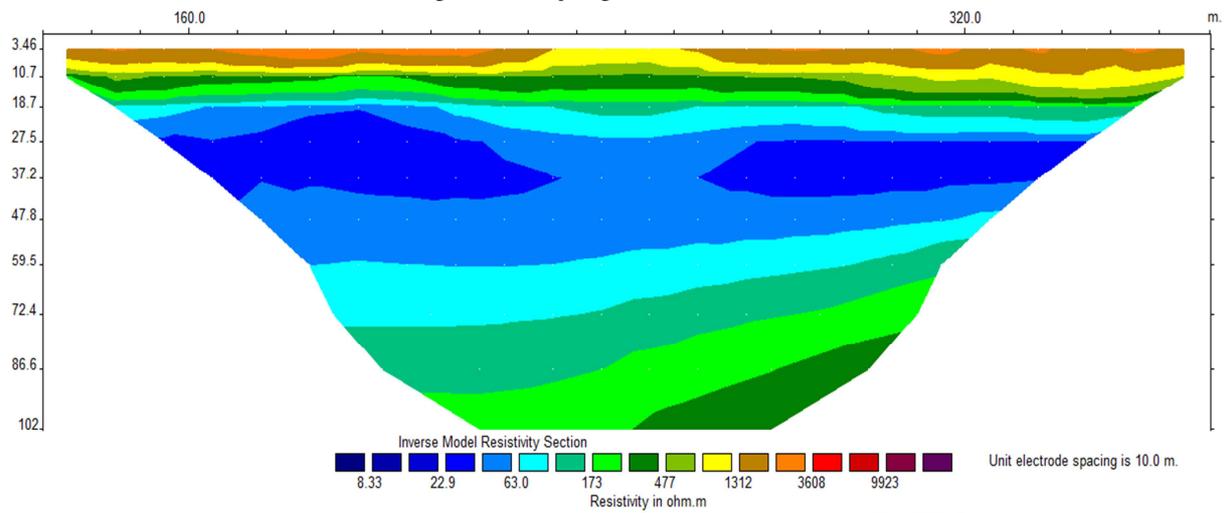
Fonte: dados da pesquisa

Figura 6 – Seção geolétrica da linha 3



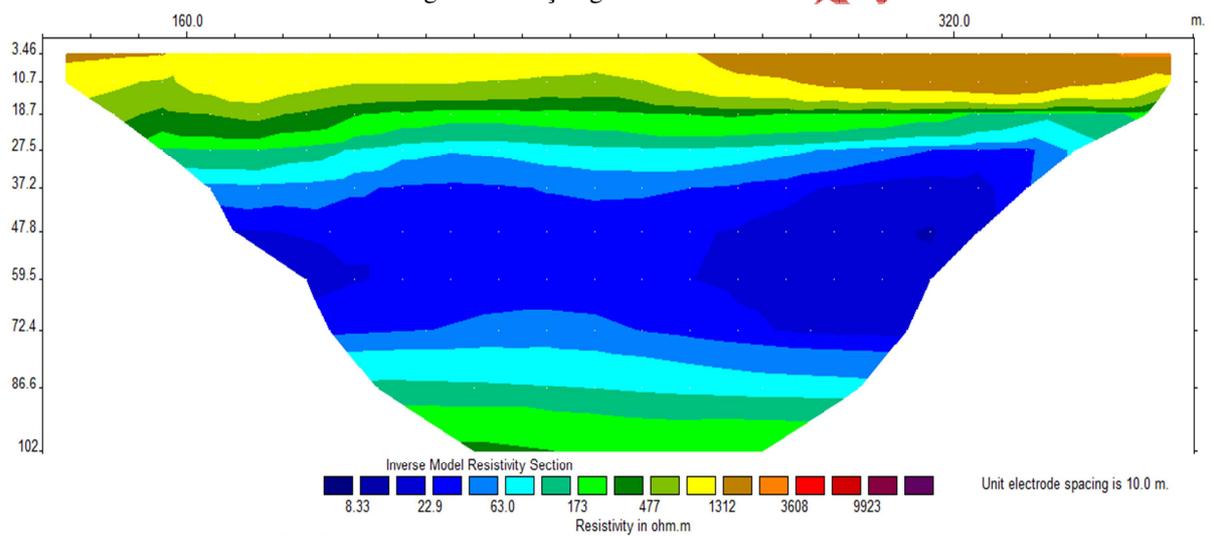
Fonte: dados da pesquisa

Figura 7 – Seção geolétrica da linha 4



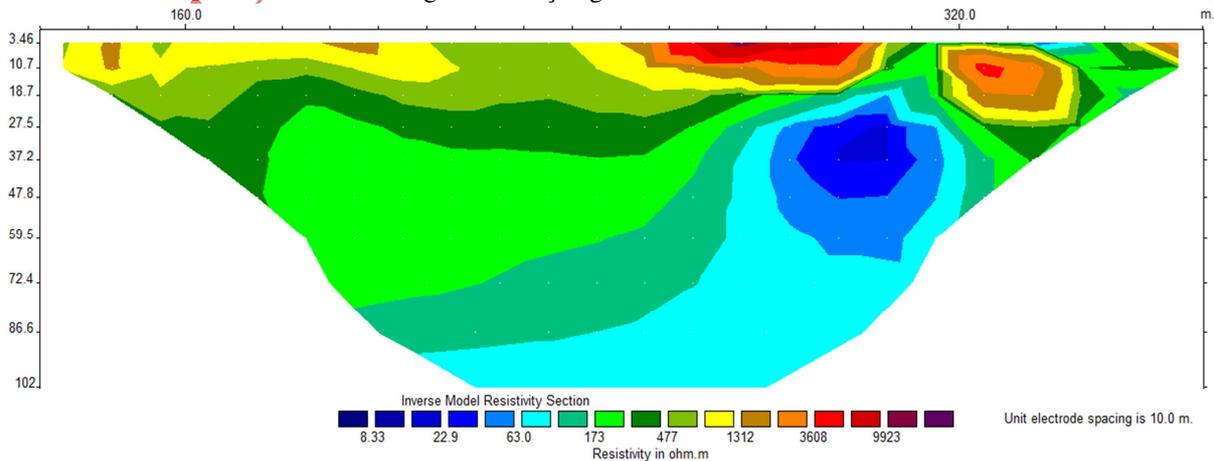
Fonte: dados da pesquisa

Figura 8 – Seção geolétrica da linha 5



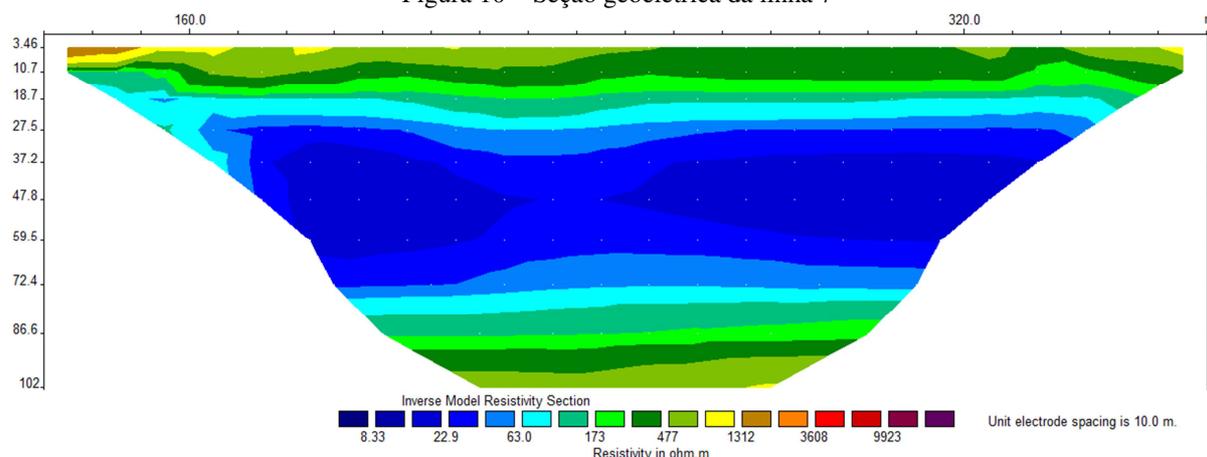
Fonte: dados da pesquisa

Figura 9 – Seção geolétrica da linha 6



Fonte: dados da pesquisa

Figura 10 – Seção geoeletrica da linha 7



Fonte: dados da pesquisa

Os resultados obtidos, que indicam a ocorrência de três camadas distintas, estão em consonância com a descrição geológica proposta por Guimarães *et al.* (2008). Esses autores identificaram a Formação Serra dos Martins como composta, em sua superfície, por uma crosta laterítica de tonalidade avermelhada a roxa, contendo seixos de quartzo angulares mal selecionados; uma camada intermediária constituída por bancos de arenitos argilosos homogêneos, de coloração vermelho-amarelada, com grãos de quartzo subangulares a arredondados, e, na base, arenitos homogêneos e friáveis, esbranquiçados, mal selecionados, localmente conglomeráticos e cauliniticos, com camadas silicificadas.

3.2 Petrofísica

Os ensaios petrofísicos indicaram que a porosidade das amostras variou entre 3,9% e 13,4%, com uma média de 8,1% (Tabela 1). De acordo com a classificação proposta por Maciel Filho e Nummer (2014), na qual valores inferiores a 5% são considerados baixos, valores em torno de 10% são classificados como médios e valores superiores a 15% como altos, as amostras analisadas apresentaram predominantemente valores de porosidade baixos a intermediários.

Tabela 1 – Propriedades petrofísicas das amostras de rocha coletadas na Serra do Cuité, estado da Paraíba

Amostra	Latitude UTM (24S)	Longitude UTM (24S)	Densidade da amostra (g/cm ³)	Densidade de grãos (g/cm ³)	Porosidade (%)
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

Fonte: dados da pesquisa

Ao comparar com o Sistema Aquífero Guarani (SAG), um dos maiores reservatórios de água subterrânea do planeta em ambiente sedimentar, que possui uma porosidade média de 16,5%, segundo Araújo, França e Potter (1995), verifica-se que, nesta porção da Formação Serra dos Martins (FSM), a porosidade é classificada como baixa a intermediária. Esse fator, em tese, reduz a capacidade de armazenamento e a transmissividade da FSM em comparação ao SAG.

3.3 Hidroquímica

Para a análise dos principais parâmetros hidroquímicos, foi aplicada a estatística descritiva (Tabela 2).

Tabela 2 – Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité

Variável	Mín	Máx	Média	Mediana	Intervalo	DP	CV	Nº de amostras
pH	4,42	8,5	6,03	6,05	4,08	0,93	15%	14
ORP	38,5	255,6	144,84	149,25	217,1	64,27	44%	18
Condutividade (µS/cm)	341	13.900	3.377,2	2951	13.559	2.457,2	73%	52
STD (mg/L)	171	8.896	2.054,9	1.583,6	8.725	1.583,5	77%	52
Salinidade (PSU)	0,15	3,16	1,49	1,58	3,01	0,77	52%	18
Dureza em cálcio (mg/L)	8,6	126,9	55,6	31,7	118,3	45,95	83%	7
Dureza em magnésio (mg/L)	6,5	173,8	68,39	23,3	167,3	64,4	94%	7
Dureza total (mg/L)	48,8	994	423,91	130,2	945,2	379,4	90%	7
Sódio (mg/L)	28,4	965	450,37	331,2	936,6	346,05	77%	7
Potássio (mg/L)	4,7	26,4	13,59	11,3	21,7	7,41	55%	7
Alcalinidade total (mg/L CaCO ₃)	10	100	33,14	20	100	35,32	107%	7
Sulfato (mg/L)	1,2	11	3,46	1,8	9,8	3,26	94%	7
Cloreto (mg/L)	81,7	2.314	1.029,9	1.233,6	2.232,9	755,87	73%	7
Bicarbonato (mg/L CaCO ₃)	10	100	33,14	20	100	35,32	107%	7

Nota: Mín = Mínimo, Máx = Máximo, DP = Desvio padrão, CV = Coeficiente de variação, STD = Sólidos totais dissolvidos, ORP = Potencial de oxidação-redução, pH = Potencial de Hidrogênio
 Fonte: dados da pesquisa

3.3.1 pH

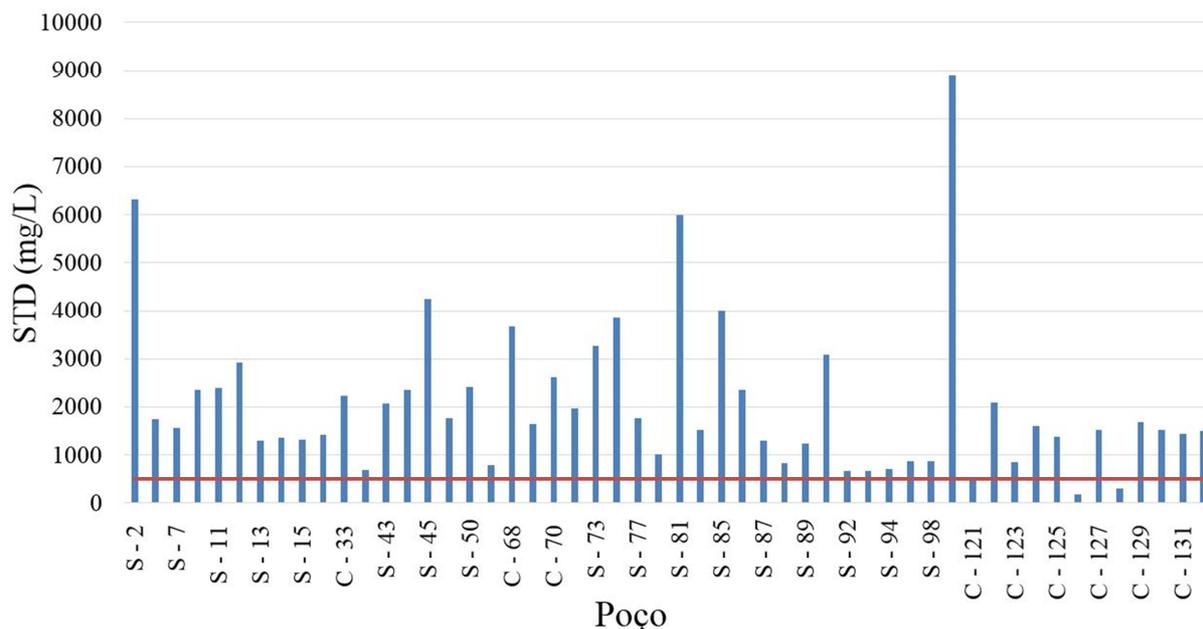
O valor médio de pH observado foi de 6,03, classificando as amostras como predominantemente ácidas. Apenas uma das 14 amostras apresentou pH superior a 7. Dessa forma, a maioria das amostras não atendeu ao intervalo permitido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (Brasil, 2021), que estabelece valores entre 6 e 9 para potabilidade.

Considerando que a Formação Serra dos Martins (FSM) é composta essencialmente por arenitos ricos em quartzo e feldspato, sem evidência de rocha ou cimento carbonático, é esperado que as águas subterrâneas apresentem pH com tendência ácida. Estudos anteriores, como o de Leite, Wendland e Gastmans (2021), indicam que a caracterização hidrogeoquímica do Aquífero Guarani, também de origem sedimentar, revelou uma faixa de variação do potencial hidrogeniônico entre 4,1 e 8,1, similar aos valores observados na FSM.

3.3.2 Sólidos totais dissolvidos (STD)

A concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) variou entre 171 mg/L e 8.896 mg/L, com média de 2.054,90 mg/L. Apenas duas amostras apresentaram valores inferiores a 500 mg/L, limite estabelecido pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021) (Figura 11). As menores concentrações foram registradas na porção oeste da formação, sem que houvesse evidência de influência antrópica sobre essa distribuição.

Figura 11 – Resultados dos STD (mg/L) para a Formação Serra dos Martins, Serra do Cuité

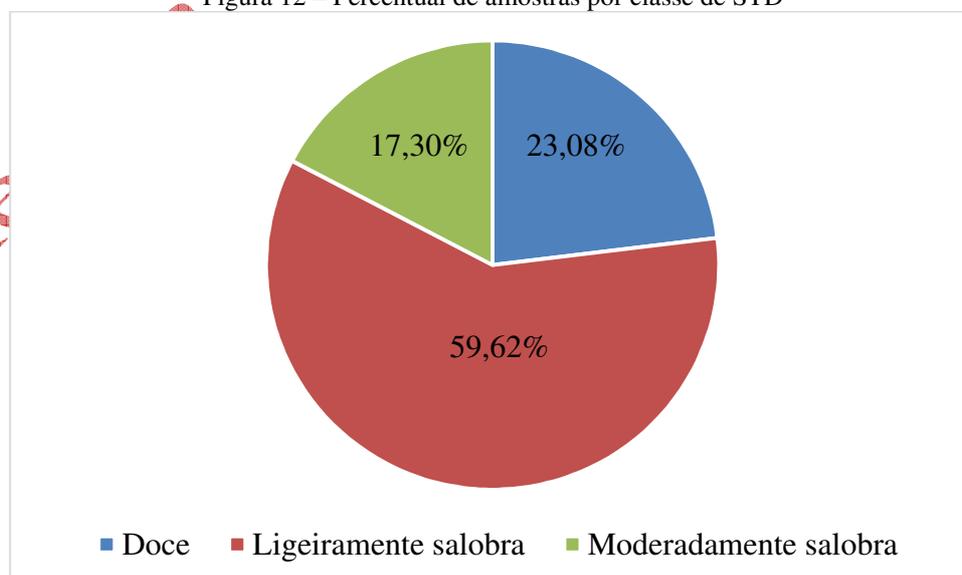


Nota: Os poços nomeados com a letra “S” pertencem à base de dados do SIAGAS, enquanto os identificados com a letra “C” foram cadastrados neste estudo.
 A linha vermelha representa o valor máximo permitido (VMP) pela Portaria de Potabilidade 888/2021 (Brasil, 2021): 500 mg/L para STD, 200 mg/L para sódio, 250 mg/L para cloreto e sulfato
 Fonte: dados da pesquisa

Estudos conduzidos pela AESA (2022) na mesma formação sedimentar identificaram problemas localizados de elevada concentração de STD. Oliveira, Medeiros e Stein (2021), ao analisar 180 poços do aquífero cristalino na Paraíba, observaram uma variação entre 100 mg/L e 22.912 mg/L. Segundo esses autores, a qualidade da água está diretamente relacionada à topografia da região, que influencia os índices pluviométricos e, conseqüentemente, a diluição de elementos químicos na água.

McNeely, Neimanis e Dwyer (1979) classificam a qualidade das águas subterrâneas com base na concentração de STD, categorizando-as como doces (<1000 mg/L), ligeiramente salobras (1000–3000 mg/L), moderadamente salobras (3000–10.000 mg/L), salgadas (10.000–100.000 mg/L) e salmouras (>100.000 mg/L). Os resultados apontam para a predominância de águas ligeiramente salobras (59,62%) e doces (23,08%) (Figura 12).

Figura 12 – Percentual de amostras por classe de STD



Fonte: dados da pesquisa

Em regiões semiáridas, a intensa evaporação e evapotranspiração e os baixos índices de precipitação favorecem a acumulação de sais na zona não saturada. Durante os eventos de recarga, esses sais são transportados para o aquífero, promovendo a salinização progressiva das águas subterrâneas, além daquelas originadas pelos processos normais de interação água-rocha (Stein, 2013).

3.3.3 Dureza total

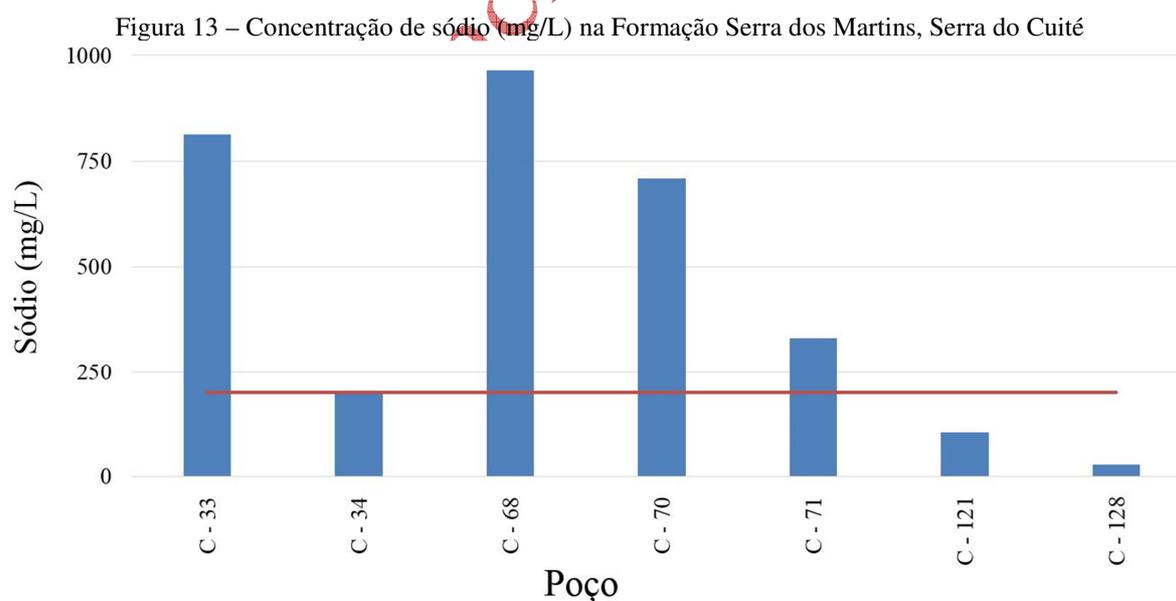
A dureza total variou entre 48,80 mg/L e 994 mg/L, com média de 423,91 mg/L. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021 (Brasil, 2021), o valor máximo permitido (VMP) para esse parâmetro é de 300 mg/L, indicando que, em média, as amostras analisadas não atendem ao critério de potabilidade.

Segundo a classificação de dureza proposta por Custódio e Llamas (2001), 12,28% das amostras foram classificadas como pouco duras, 42,86% como duras e 42,86% como muito duras. No contexto agrícola, as águas duras podem provocar reações químicas que alteram os produtos, dificultando a absorção pelos vegetais e reduzindo a eficácia de defensivos e fertilizantes. No uso doméstico, essas águas podem reduzir a vida útil de eletrodomésticos e provocar entupimentos em tubulações. Além disso, reagem com sabões e detergentes, comprometendo sua eficácia (Figueiredo, 2002).

3.3.4 Principais cátions

A dureza total da água é majoritariamente influenciada pela presença de compostos de cálcio e magnésio. As concentrações de cálcio variaram entre 8,60 mg/L e 126,90 mg/L, enquanto o magnésio apresentou valores entre 6,50 mg/L e 173,80 mg/L. A legislação vigente não estabelece um valor máximo permitido (VMP) para esses elementos.

O sódio, um cátion relevante para a qualidade da água subterrânea devido à sua relação com a salinidade, apresentou concentrações entre 28,40 mg/L e 965 mg/L. De acordo com a portaria de potabilidade GM/MS nº 888 de 2021 (Brasil, 2021), o VMP para esse parâmetro é de 200 mg/L. Observou-se que quatro amostras ultrapassaram esse limite (Figura 13). Esses resultados indicam uma possível influência de processos hidrogeológicos específicos na composição da água da Formação Serra dos Martins.



A linha vermelha representa o valor máximo permitido (VMP) pela Portaria de Potabilidade 888/2021 (Brasil, 2021): 500 mg/L para STD, 200 mg/L para sódio, 250 mg/L para cloreto e sulfato

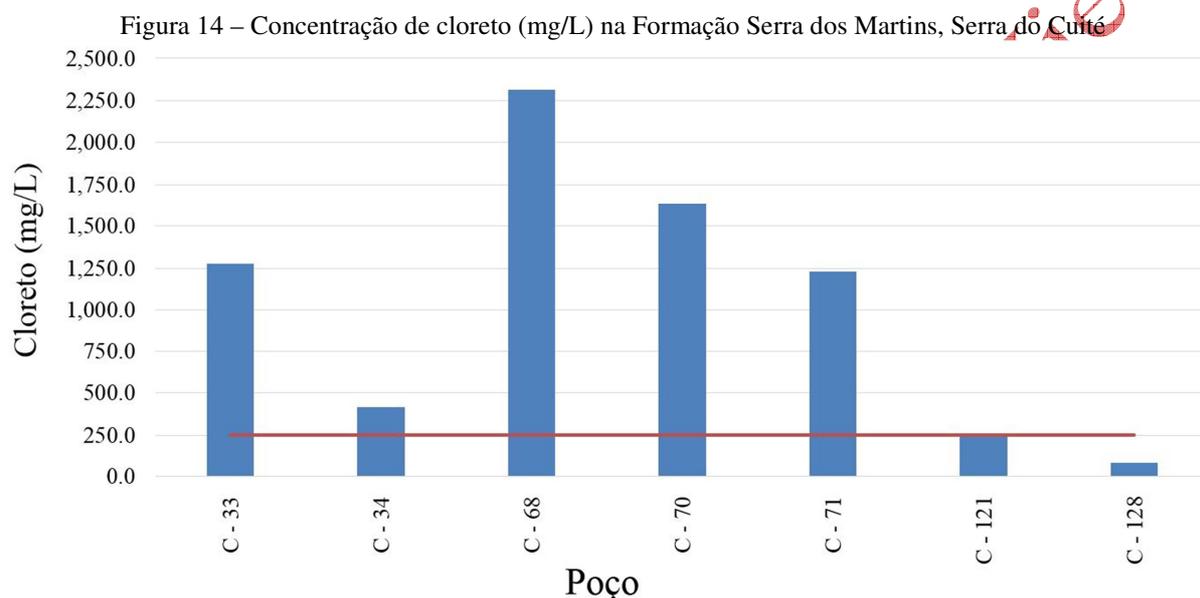
Fonte: dados da pesquisa

O potássio, embora abundante na crosta terrestre, raramente é encontrado em águas subterrâneas devido à sua intensa participação em processos de troca iônica e à sua adsorção pelos minerais de argila. Esse elemento, proveniente de minerais como feldspatos e micas (Feitosa et al., 2008),

apresentou concentração entre 4,70 mg/L e 26,40 mg/L, com média de 13,59 mg/L nas amostras analisadas. Embora esses minerais estejam presentes na área investigada, não há evidência que comprove essa relação. A portaria de potabilidade vigente não estabelece um valor máximo permitido (VMP) para esse parâmetro.

3.3.5 Principais ânions

As concentrações de cloreto nas amostras analisadas variaram entre 81,70 mg/L e 2.314,60 mg/L, com uma média de 1.029,90 mg/L. O VMP estabelecido pela portaria de potabilidade para esse parâmetro é de 250 mg/L. Assim, a maioria das amostras excedeu esse limite (Figura 14). A Agência Executiva de Gestão das Águas da Paraíba (AES/A, 2022) caracterizou as águas subterrâneas da região como predominantemente cloretadas sódicas, o que justifica as elevadas concentrações médias de cloreto e sódio na Formação Serra dos Martins.

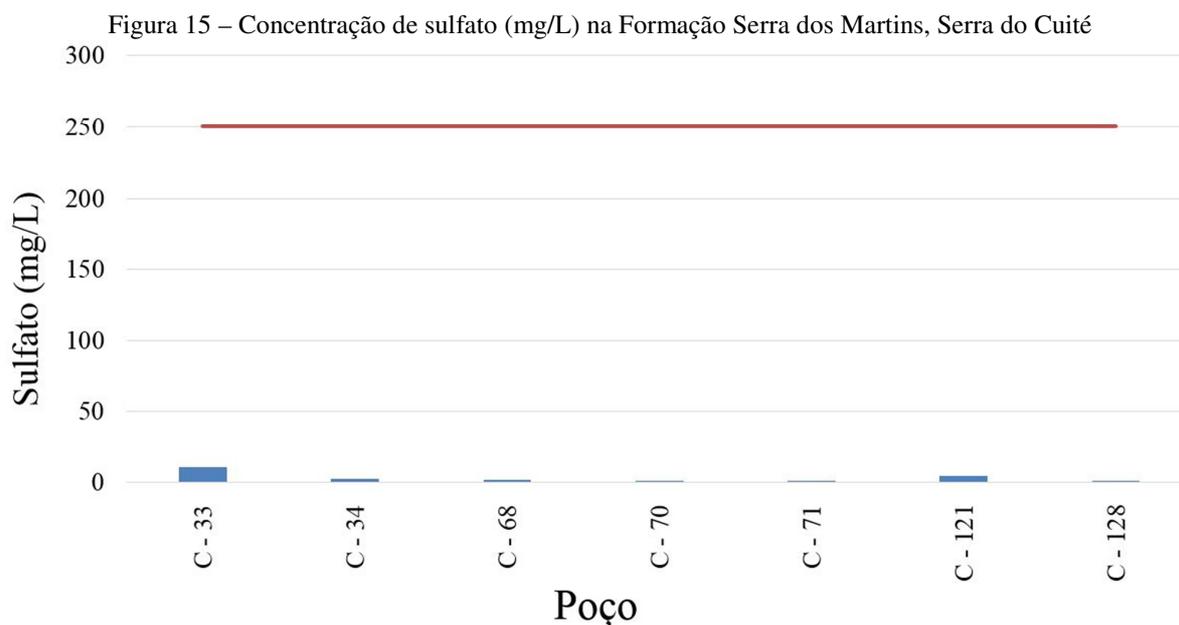


A linha vermelha representa o valor máximo permitido (VMP) pela Portaria de Potabilidade 888/2021 (Brasil, 2021): 500 mg/L para STD, 200 mg/L para sódio, 250 mg/L para cloreto e sulfato
Fonte: dados da pesquisa

Segundo Alley (1993), a presença de cloro em rochas está associada a minerais como halita, silvita, carnalita, micas e feldspatos, além de poder ser influenciada por atividades antrópicas. No contexto deste estudo, atribui-se a elevada concentração de cloreto à dissolução de minerais da rocha e ao mecanismo de concentração cíclica por evaporação, visto que a interferência antrópica não parece justificar os valores observados.

O bicarbonato apresentou concentrações entre 10 mg/L e 33,14 mg/L. Quando presente em níveis inferiores a 91,5 mg/L, esse ânion pode ter efeitos benéficos para a vegetação, especialmente na forma de bicarbonato de cálcio $[Ca(HCO_3)_2]$ (Zoby, 2008). A composição geológica predominante, formada por arenitos compostos por quartzo (SiO_2) e, localmente, lateritas ricas em ferro e alumínio, não favorece concentrações elevadas desse ânion.

A concentração de sulfato variou entre 1,20 mg/L e 11 mg/L, com média de 3,46 mg/L, apresentando valores significativamente inferiores ao VMP estabelecido pela portaria de potabilidade, que é de 250 mg/L (Figura 15). Embora os sulfatos possam influenciar o sabor da água, tornando-o salgado quando associado ao sódio (Na_2SO_4) e amargo quando combinado com cálcio ($CaSO_4$) ou magnésio ($MgSO_4$), as concentrações detectadas indicam uma presença reduzida desse ânion. Concentrações elevadas de sulfato podem causar efeitos laxativos, especialmente em crianças (Feitosa et al., 2008). Esse ânion pode ocorrer naturalmente em grandes quantidades na água subterrânea devido à oxidação de minerais contendo enxofre, o que, no entanto, não foi observado na área de estudo.



A linha vermelha representa o valor máximo permitido (VMP) pela Portaria de Potabilidade 888/2021 (Brasil, 2021): 500 mg/L para STD, 200 mg/L para sódio, 250 mg/L para cloreto e sulfato
 Fonte: dados da pesquisa

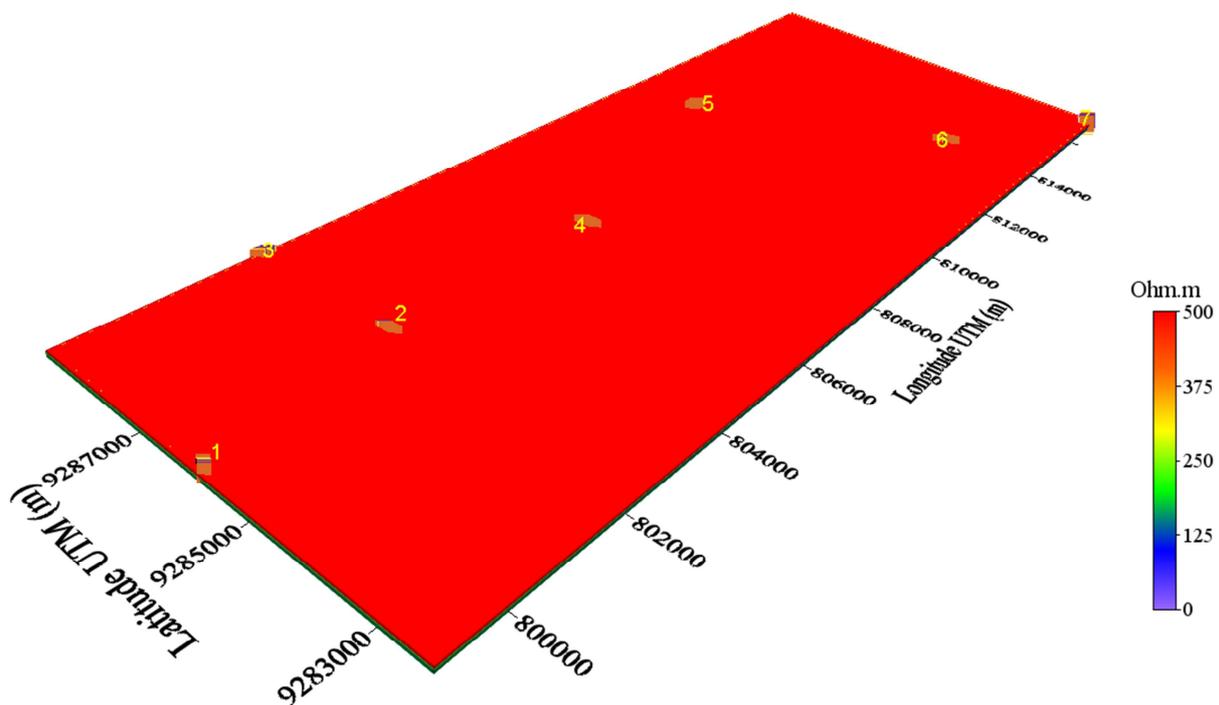
3.4 Estimativa de reserva

Mendonça *et al.* (2001), em um estudo realizado na Chapada do Araripe sobre os Sistemas Aquíferos Superior e Médio, empregaram o modelo computacional MODFLOW para a quantificação da reserva hídrica subterrânea. Esse modelo também permitiu a obtenção da reserva reguladora, da vazão média das fontes e da infiltração profunda por meio de fraturas. Mais recentemente, Castro e Gonçalves (2022), ao avaliarem a interação entre as águas subterrâneas e superficiais em um aquífero poroso e fissural no estado de Minas Gerais, observaram que o armazenamento subterrâneo pode ser estimado com base no deflúvio do período de esgotamento. Essa abordagem considera a redução do volume de água armazenada nos diferentes sistemas aquíferos da bacia durante períodos de déficit pluviométrico, sendo aplicada por meio da construção de hidrogramas e do uso de equações matemáticas.

Neste estudo, a quantificação da água armazenada na ocorrência sedimentar foi realizada a partir da integração de dados geofísicos, hidroquímicos e petrofísicos, conforme descrito anteriormente, seguida da aplicação das equações propostas por Archie (1942) e Winsauer *et al.* (1952).

Os valores de resistividade da rocha saturada de água (R_o) foram extraídos do modelo pseudo-3D (Figura 16), enquanto a resistividade da água (R_w) foi determinada pela medição de sua condutividade elétrica. A condutividade média da água dos poços investigados foi de 3.377 $\mu\text{S}/\text{cm}$, resultando em um valor de R_w igual a 2,96 ohm.m. Considerando que a resistividade elétrica da rocha saturada com água varia entre 40 ohm.m e 300 ohm.m, conforme indicado por Braga (2016), a equação foi aplicada aos dados de resistividade elétrica para estimar a porosidade saturada em cada voxel do modelo pseudo-3D. O volume total de água contida na unidade condutora do modelo foi obtido pela soma dos volumes de todos os voxels. Segundo aquele autor, valores de resistividade elétrica abaixo de 40 ohm.m estão associados à presença de argila, enquanto rochas com valores acima de 300 ohm.m não apresentam saturação relevante em água.

Figura 16 – Pseudo modelo 3D de resistividade elétrica para a Formação Serra dos Martins na Serra do Cuité. Os números indicam as linhas geofísicas registradas

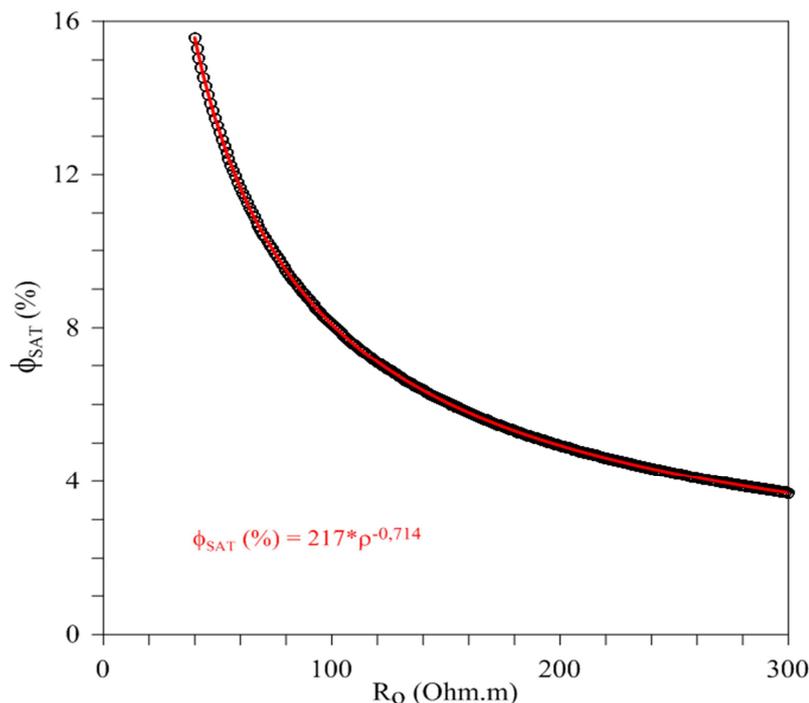


Fonte: dados da pesquisa

A porosidade saturada da rocha foi representada graficamente em função da resistividade elétrica nos pontos de profundidade onde essa propriedade foi medida ao longo das linhas geofísicas (Figura 17). Ensaios petrofísicos foram conduzidos no LabPetro da UFCG para a determinação da porosidade total das amostras de rocha coletadas na formação sedimentar analisada. A relação entre resistividade e porosidade foi estabelecida considerando os parâmetros $a = 1$ e $m = 1,4$, resultando em valores compatíveis com aqueles obtidos nos testes petrofísicos. Em seguida, aplicou-se uma função de regressão para correlacionar os valores de resistividade e porosidade saturada, possibilitando a estimativa do volume saturado.

Figura 17 – Relação entre a resistividade da rocha saturada e a porosidade saturada em água ($a = 1$; $m = 1,4$; $R_w = 2,96$ ohm.m)

Revista Principia



Fonte: dados da pesquisa

O volume de água subterrânea contida *in situ* na área da ocorrência sedimentar (10.721 hectares) foi estimado em aproximadamente 521 milhões de metros cúbicos. É importante ressaltar que esse valor representa apenas uma estimativa, pois a quantidade efetivamente explorável é menor, dado que parte da água encontra-se retida por capilaridade em poros de reduzidas dimensões.

Ao comparar esse resultado com os valores estimados para o Aquífero Açu, localizado nos estados do Rio Grande do Norte e Ceará, verifica-se que, embora sua área seja aproximadamente 10,26 vezes maior (1.100 km²), sua reserva subterrânea é de 612 milhões de metros cúbicos, apenas 1,175 vez superior à estimativa obtida para o aquífero da Formação Serra dos Martins (Diniz *et al.*, 2012). Em termos proporcionais, os resultados sugerem que a reserva do aquífero da Formação Serra dos Martins é significativa.

Diante dessa análise, reforça-se a necessidade de continuidade dos estudos sobre o aquífero da Formação Serra dos Martins, uma vez que os resultados indicam um elevado potencial de reserva de água subterrânea. Investigações mais detalhadas são fundamentais para aprimorar a compreensão da capacidade de abastecimento desse aquífero e para desenvolver estratégias de manejo sustentável dessa importante fonte hídrica.

O conhecimento do volume da reserva do aquífero e dos parâmetros determinantes para a qualidade da água é essencial para a gestão hídrica, fornecendo subsídios para definir a quantidade explorável sem comprometer a sustentabilidade do aquífero, além de permitir a avaliação da qualidade da água consumida pela população.

4 Considerações finais

A Formação Sedimentar Serra dos Martins desempenha um papel essencial no suprimento de água subterrânea para a comunidade, especialmente para os residentes da zona rural, que utilizam esse recurso por meio da perfuração de poços para diversas finalidades, como irrigação, dessedentação animal, atividades domésticas e, em alguns casos, consumo humano.

As seções geoeletricas indicaram a presença de uma camada aquífera localizada entre aproximadamente 20 e 80 metros de profundidade. No que se refere à análise petrofísica, as amostras apresentaram valores de porosidade variando de baixos a intermediários. No entanto, estima-se um volume significativo de reserva hídrica na formação, correspondendo a aproximadamente 521 milhões de metros cúbicos de água subterrânea. Embora esse valor seja expressivo, torna-se fundamental a adoção de estratégias adequadas de gestão do recurso tanto por parte dos órgãos competentes quanto

pela própria sociedade, com o objetivo de garantir sua sustentabilidade a longo prazo.

A análise hidroquímica indicou que as águas são levemente ácidas (pH médio de 6,03) e tendem a ser ligeiramente salobras (STD médio de 2.054 mg/L). A maioria dos parâmetros avaliados não atendeu aos valores de referência para potabilidade estabelecidos pela legislação vigente, indicando a necessidade de tratamento preliminar, como o uso de dessalinizadores, para adequação ao consumo humano.

Entre os instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997), destaca-se o enquadramento dos corpos hídricos em classes, que visa garantir a manutenção dos aspectos qualitativos dos recursos hídricos, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA n° 396 (CONAMA, 2008). Dentre os parâmetros avaliados neste estudo, previstos na referida Resolução, incluem-se STD, sódio, sulfato e cloreto. Para fins de consumo humano, o único parâmetro que atendeu ao valor máximo permitido (VMP) foi o sulfato, cuja concentração média nas amostras analisadas foi de 3,46 mg/L, enquanto o VMP estabelecido na Resolução 396 é de 250 mg/L. Para uso recreativo, o sulfato também se manteve dentro do limite permitido, cujo VMP é de 400 mg/L. No entanto, no que se refere ao cloreto, único parâmetro avaliado para essa finalidade, a concentração média foi de 1.029,9 mg/L, excedendo o VMP estabelecido de 700 mg/L.

O excesso de cloreto na água favorece a corrosão de materiais metálicos, o que pode resultar no aumento da concentração de metais. No uso humano, a exposição a essa água pode causar irritações cutâneas e, quando ingerida, apresentar efeito laxativo.

De forma geral, as águas subterrâneas da Formação Serra dos Martins, na área investigada, atendem aos requisitos para dessedentação animal quando utilizadas in natura. No entanto, para consumo humano, irrigação ou recreação, recomenda-se a adoção de tratamento prévio. Além disso, considerando a possibilidade de variações hidroquímicas decorrentes de atividades antrópicas, como urbanização, agricultura e pecuária, essas águas podem ser classificadas como pertencentes à Classe 3.

Para trabalhos futuros sugerimos o adensamento do número de linhas geofísicas para melhor resolução do modelo 3D resultante, além disso, é válida a aplicação da mesma metodologia para novas áreas, inclusive de geologias distintas.

Para pesquisas futuras, sugere-se o aumento da densidade das linhas geofísicas a fim de aprimorar a resolução do modelo 3D resultante. Além disso, recomenda-se a aplicação da mesma metodologia em outras áreas, incluindo formações geológicas distintas, a fim de ampliar o conhecimento sobre a viabilidade da abordagem adotada.

Financiamento

Este estudo foi financiado pelo projeto da Fundação de Apoio à Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) “Avaliação do Potencial de Formações Sedimentares para a Produção de Água Subterrânea nas Microrregiões Curimataú, Seridó e Brejo do Estado da Paraíba” (Edital 09/2021 DEMANDA UNIVERSAL).

Conflito de interesses

Os autores declaram não haver conflito de interesses.

Nota

Este artigo deriva da dissertação do Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral da Universidade Federal de Campina Grande (UFCG), da autora Anne Beatrice Guedes Sobrinho, disponível em: <http://dspace.sti.ufcg.edu.br:8080/jspui/handle/riufcg/36835>.

Contribuições ao artigo

GUEDES SOBRINHO, A. B.; DUTRA, M. L. S.: análise e/ou interpretação dos dados; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. **SOARES, J. A.; STEIN, P.** concepção ou desenho do estudo/pesquisa; revisão final com participação crítica e intelectual no manuscrito. Todos os autores participaram da escrita, discussão, leitura e aprovação da versão final do artigo.

Referências

ABAS – Associação Brasileira de Águas Subterrâneas. **O que são águas subterrâneas?** [202?]. Disponível em: <https://www.abas.org/educacao/o-que-sao-aguas-subterraneas>. Acesso em: 18 fev. 2025.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Resumo estendido**, 2024. Disponível em: <http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/documentos/plano-estadual/resumo-estendido>. Acesso em: 22 nov. 2024.

AESA – Agência Executiva de Gestão das Águas do Estado da Paraíba. **Plano Estadual de Recursos Hídricos da Paraíba**: relatório final RF-01, 2022. Disponível em: http://www.aesa.pb.gov.br/aesa-website/wp-content/uploads/2022/06/perh_final/RF-01/RF-01_PERH-PB.pdf. Acesso em: 02 dez. 2024.

ALLEY, W. M. **Regional ground-water quality**. New York: Wiley, 1993.

ANGELIM, L. A. A.; MEDEIROS, V. C.; NESI, J. R. **Programa Geologia do Brasil – PGB**. Projeto geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte. Mapa geológico do estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500:000. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2006. Disponível em: https://rigeo.sgb.gov.br/bitstream/doc/10234/2/Mapa_Rio_grande_norte.pdf. Acesso em: 06 fev. 2025.

ARAÚJO, L. M.; FRANÇA, A. B.; POTTER, P. E. **Aqüífero gigante do Mercosul no Brasil, Argentina, Paraguai, e Uruguai: mapas hidrogeológicos das formações Botucatu, Pirambóia, Rosário do Sul, Buena Vista, Misiones e Tacuarembó**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1995. 16 p. + 8 mapas dobrados.

ARCHIE, G. E. The electrical resistivity log as an aid in determining some reservoirs characteristics. **Petroleum Technology**, v. 146, n. 1, p. 54-62, 1942. DOI: <https://doi.org/10.2118/942054-G>.

BRAGA, B.; HESPANHOL, I.; CONEJO, J. G. L.; MIERZWA, J. C.; BARROS, M. T. L.; SPENCER, M.; PORTO, M.; NUCCI, N.; JULIANO, N.; EIGER, S. **Introdução à Engenharia Ambiental**. 2. ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 2005.

BRAGA, A. C. O. **Geofísica aplicada: métodos geoelétricos em hidrogeologia**. São Paulo: Oficina de textos, 2016.

BRASIL. Presidência da República. Casa Civil. Subchefia para Assuntos Jurídicos. **Lei nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. Brasília. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/19433.htm. Acesso em: 06 fev. 2025.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888/2021**. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 10 set. 2024.

CASTRO, K. Q.; GONÇALVES, J. A. C. Quantificação do potencial hídrico subterrâneo do baixo curso do Rio Piracicaba (MG): interação das águas subterrâneas e superficiais. **Revista Brasileira de Geografia Física** v. 15 n. 4, p. 1881-1901, 2022. DOI: <https://doi.org/10.26848/rbgf.v15.4.p1881-1901>.

COLLISCHONN, W.; DORNELLES, F. **Hidrologia para Engenharia e Ciências Ambientais**. 2. ed. Porto Alegre: ABRH, 2013.

CONAMA. **Resolução CONAMA Nº 396**, de 3 de abril de 2008. Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Disponível em: <https://www.mpf.mp.br/atuacao-tematica/ccr4/dados-da-atuacao/projetos/qualidade-da-agua/legislacao/resolucoes/resolucao-conama-no-396-de-3-de-abril-de-2008>. Acesso em: 21 jan. 2025.

CUSTÓDIO, E; LLAMAS, R. **Hidrologia subterrânea**. 2. ed. Barcelona: Ômega, 1983.

DINIZ, J. A. O.; MORAIS, F.; BORBA, A. L. S.; TROIAN, G. C. **Projeto Rede Integrada de Monitoramento das Águas Subterrâneas: relatório diagnóstico aquífero Açú bacia sedimentar Potiguar**. Coleção Diagnóstico dos Aquíferos Sedimentais do Brasil, volume 2. Belo Horizonte: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2012. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/22232>. Acesso em: 6 fev. 2025.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; PAULA, T. L. F. **Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo**. Programa de Cartografia Hidrogeológica. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/15556>. Acesso em: 6 fev. 2025.

FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. CPRM, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14818>. Acesso em: 6 fev. 2025.

FERREIRA, L. A.; PIMENTEL, E. T.; SILVA, R. B. P.; SANTOS, A. A. Avaliação da qualidade de potabilidade da água subterrânea em áreas rurais no município de Humaitá/AM. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**. v. 12, n. 1, p. 721-729, 2021. Disponível em: <https://sustenere.inf.br/index.php/rica/article/view/CBPC2179-6858.2021.001.0058/2495>. Acesso em: 1 dez. 2024.

FIGUEIREDO, R. M. **Programa de redução de patógenos**: padrões e procedimentos operacionais de sanitização. Coleção Higiene dos Alimentos, v. 01. São Paulo: Manole, 2002.

GUIMARÃES, I. P.; BITTAR, S. M. B.; SILVA, J. M. R.; SILVA, F. M. J. V.; ARAÚJO, D. B. ARRUDA, S. D. D.; ALCANTARA, V. C. **Geologia da folha Solânea (SB.25-Y-A-IV)**. CPRM – Serviço Geológico do Brasil, UFPE, 2008. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/10458>. Acesso em: 07 fev. 2025.

LEITE, C. M. C.; WENDLAND, E.; GASTMANS, D. Caracterização hidrogeoquímica de águas subterrâneas utilizadas para abastecimento público na porção nordeste do Sistema Aquífero Guarani. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 26, n. 1, p. 29-43, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1590/s1413-415220190087>.

MABESOONE, J. M. Relief of northeastern Brazil and its correlated sediments. **Zeitschrift für Geomorphologie**, v. 10, n. 4, p. 419-453, 1966.

MACIEL FILHO, C. L.; NUMMER, A. V. **Introdução à geologia de engenharia**. 5. ed. rev. e ampl. Santa Maria: Editora UFSM, 2014.

MCNEELY, R. N.; NEIMANIS, V. P.; DWYER, L. **Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters**. Ottawa: Inland Waters Directorate, 1979.

MENDONÇA, L. A. R.; FRISCHKORN, H.; SANTIAGO, M. F.; MENDES FILHO, J. Quantificação dos recursos hídricos subterrâneos da Chapada do Araripe. **Associação Brasileira de Recursos Hídricos – ABRHidro**. 2001. Disponível em:

<https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/155/287.pdf>. Acesso em: 28 nov. 2024.

MORAES L. J. **Serras e montanhas do Nordeste**. 1 ed. Rio de Janeiro: Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 1924.

MORAIS NETO, J. M.; ALKMIM, F. F. A. Deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, n. 1, p. 95-106, 2001. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/3921>. Acesso em: 07 fev. 2025.

OLIVEIRA, C. M. **Avaliação dos impactos ambientais e qualidade de águas superficiais na região hidrográfica VI do estado do Rio de Janeiro – RJ**. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2016. Disponível em: <http://www.repositorio.poli.ufrj.br/dissertacoes/dissertpoli1961.pdf>. Acesso em: 01 mar. 2024.

OLIVEIRA, L. E. B.; MEDEIROS, L. A.; STEIN, P. O aquífero fraturado cristalino em um setor do agreste paraibano. **Estudos Geológicos**, v.31, n. 1, p. 3-15, 2021. DOI: <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v31n1p3-15>.

SILVA, L. P. **Hidrologia, Engenharia e Meio Ambiente**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2015.

SILVA, T. C.; PEDROSA FILHO, L. A.; SILVA, A. C. S. Avaliação e espacialização das características dos poços do município de João Pessoa – Paraíba. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 14., 2001, Aracaju. **Anais [...]**. João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001. Disponível em: <https://files.abrhidro.org.br/Eventos/Trabalhos/155/359.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2024.

STEIN, P. **Hidrogeoquímica das águas subterrâneas da Bacia Sedimentar Potiguar/RN e caracterização da salinização do Aquífero Cárstico Jandaíra**. 2013. Tese (Doutorado em Geociências) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10532>. Acesso em: 15 abr. 2024.

WINSAUER, W. O.; SHEARIN JUNIOR., H. M.; MASSON, P. H.; WILLIAMS, M. Resistivity of brine-saturated sands in relation to pore geometry. **AAPG Bulletin**, v. 36, n. 2, p. 253-277, 1952. DOI: <https://doi.org/10.1306/3D9343F4-16B1-11D7-8645000102C1865D>.

ZOBY, J. L. G. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 15., 2008, Brasília. **Anais [...]** Brasília: Revista Águas Subterrâneas. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23802>. Acesso em: 07 mar. 2024.