



UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE - UFCG

PRÓ-REITORIA DE PÓS-GRADUAÇÃO

CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS – CTRN

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM EXPLORAÇÃO PETROLÍFERA E MINERAL –
PPGEPM

ANNE BEATRICE GUEDES SOBRINHO

**AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA FORMAÇÃO SERRA DOS MARTINS NAS
MICRORREGIÕES DO SERIDÓ ORIENTAL E CURIMATAÚ OCIDENTAL DA
PARAÍBA: CONTRIBUIÇÕES DA GEOFÍSICA E HIDROQUÍMICA.**

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro – 2024

ANNE BEATRICE GUEDES SOBRINHO

**AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA FORMAÇÃO SERRA DOS MARTINS NAS
MICRORREGIÕES DO SERIDÓ ORIENTAL E CURIMATAÚ OCIDENTAL DA
PARAÍBA: CONTRIBUIÇÕES DA GEOFÍSICA E HIDROQUÍMICA.**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral - PPGEPM da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Orientadora: Prof. DSc. Paula Stein

Coorientador: Prof. DSc. José Agnelo Soares

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro – 2024

- G924a Guedes Sobrinho, Anne Beatrice.
Avaliação hidrogeológica da formação Serra dos Martins nas Microrregiões do Seridó Oriental e Curimataú Ocidental da Paraíba: Contribuições da Geofísica e Hidroquímica / Anne Beatrice Guedes Sobrinho – Campina Grande, 2024.
120 f. : il. color.
- Dissertação (Mestrado em Exploração Petrolífera e Mineral) - Universidade Federal de Campina Grande, Centro de Tecnologia e Recursos Naturais, 2024.
"Orientação: Profa. Dra. Paula Stein, Prof. Dr. José Agnelo Soares."
Referências.
1. Hidrogeologia. 2. Hidroquímica. 3. Formação Serra dos Martins. 4. Geofísica. I. Stein, Paula. II. Soares, José Agnelo. III. Título.

CDU 556.3(043)

ANNE BEATRICE GUEDES SOBRINHO

**AVALIAÇÃO HIDROGEOLÓGICA DA FORMAÇÃO SERRA DOS MARTINS NAS
MICRORREGIÕES DO SERIDÓ ORIENTAL E CURIMATAÚ OCIDENTAL DA
PARAÍBA: CONTRIBUIÇÕES DA GEOFÍSICA E HIDROQUÍMICA.**

Dissertação de Mestrado apresentado ao Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral - PPGEPM da Universidade Federal de Campina Grande como requisito parcial para obtenção do título de Mestre.

Aprovada em: 27/02/2024

BANCA EXAMINADORA:

Documento assinado digitalmente
gov.br PAULA STEIN
Data: 01/03/2024 19:23:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dra. Paula Stein
(PPGEPM/UFCG – Orientadora)

Documento assinado digitalmente
gov.br JOSE AGNELO SOARES
Data: 01/03/2024 17:06:28-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. José Agnelo Soares
(PPGEPM/UFCG – Coorientador)

Documento assinado digitalmente
gov.br CARLOS MARIO ECHEVERRI MISAS
Data: 02/03/2024 21:27:00-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Carlos Mario Echeverri Misas
(PPGEPM/UFCG – Avaliador Interno)



Prof. Dr. Francisco de Assis da Silveira Gonzaga
(IFPB – Avaliador Externo)

CAMPINA GRANDE – PB

Fevereiro – 2024

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por ter me dado a sabedoria e força necessária para que eu pudesse chegar até aqui;

Meus orientadores, Paula Stein e José Agnelo Soares, peças chaves para o desenvolvimento deste trabalho;

Minha família, pelo apoio e incentivo;

Todos os professores do Programa de Pós Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral pelas contribuições deixadas;

De modo especial aos professores presentes na banca de qualificação Guilherme Teles e Elissandra Moura e de defesa do mestrado Carlos Echeverri e Francisco Gonzaga por terem aceito o convite e colaborarem com o aprimoramento do trabalho;

Ao IFPB, por ter aberto as portas do laboratório de águas para realização de algumas análises químicas;

Enfim, a todos aqueles que estiveram ligados direta ou indiretamente, meu muito obrigada!

RESUMO

As águas subterrâneas são importantes reservas de água doce do planeta. O Nordeste Brasileiro, de modo especial o Estado da Paraíba, é marcado por baixos índices pluviométricos e geologia majoritariamente composta por rochas ígneas e metamórficas que não favorecem o armazenamento de água. Nas microrregiões do Seridó Oriental e Curimataú Ocidental ocorre a Formação Sedimentar Serra dos Martins, que merece destaque no contexto local, haja vista a possibilidade de suprir as demandas hídricas da população. A referida formação localmente é pouco conhecida em termos de potencial hidrogeológico. Dessa forma, o presente estudo objetivou a caracterização dessa formação sob o aspecto geológico/geofísico, hidrogeológico e de qualidade das águas. Foram pesquisadas duas áreas, assim denominadas: (i) Formação Sedimentar Serra dos Martins em Barra de Santa Rosa/Cuité (com aproximadamente 3.145 hectares) e (ii) Formação Sedimentar Serra dos Martins em Nova Floresta/Picuí/Cuité (com aproximadamente 10.721 hectares). O levantamento geofísico realizado foi pelo método da eletrorresistividade, totalizando 14 linhas geofísicas interpretadas. Para a análise petrofísica foram coletadas 14 amostras de rocha, que permitiram estimar a porosidade média da formação nos setores estudados. Os dados hidrogeológicos foram obtidos no SIAGAS (Sistema de Informações de Águas Subterrâneas) do Serviço Geológico do Brasil, e também mediante cadastro de campo. A caracterização hidroquímica foi realizada mediante coleta de amostras de águas em 38 poços com posterior análise em laboratório. A Formação Serra dos Martins na área de estudo tem aproximadamente 80 metros de espessura, e a porção aquífera propriamente dita está a uma profundidade de 30 metros, com espessura da ordem de 50 metros. Os ensaios petrofísicos mostram uma porosidade média de 20,3% na área de Barra de Santa Rosa/Cuité e 8,15 % em Nova Floresta/Picuí/Cuité. Em ambas as ocorrências sedimentares as águas apresentam pH levemente ácido e no aspecto da salinidade são classificadas como Ligeiramente Salobras, o que em muitas situações inviabilizam o consumo humano direto.

Palavras-chave: Formação Serra dos Martins, Hidrogeologia, Hidroquímica, Geofísica.

ABSTRACT

Groundwater is an important freshwater reserve on the planet. The Brazilian Northeast, especially the State of Paraíba, is marked by low rainfall and geology mostly composed of igneous and metamorphic rocks that do not favor water storage. In the micro-regions of Seridó Oriental and Curimataú Occidental, the Serra dos Martins Sedimentary Formation occurs, which deserves to be highlighted in the local context, given the possibility of meeting the population's water demands. This formation is locally little known in terms of its hydrogeological potential. Therefore, the present study aimed to characterize this formation from a geological/geophysical, hydrogeological and water quality perspective. Two areas were researched, named as follows: (i) Serra dos Martins Sedimentary Formation in Barra de Santa Rosa/Cuité (with approximately 3,145 hectares) and (ii) Serra dos Martins Sedimentary Formation in Nova Floresta/Picuí/Cuité (with approximately 10,721 hectares). The geophysical survey carried out was through the method of electroresistivity, totaling 14 interpreted geophysical lines. For the petrophysical analysis, 14 rock samples were collected, which allowed estimating the average porosity of the formation in the studied sectors. The hydrogeological data were obtained from SIAGAS (Groundwater Information System) of the Geological Survey of Brazil, and also through field registration. The hydrochemical characterization was carried out by collecting water samples from 38 wells with subsequent analysis in the laboratory. The Serra dos Martins Formation in the study area is approximately 80 meters thick, and the aquifer itself is at a depth of 30 meters, with a thickness of around 50 meters. Petrophysical tests show an average porosity of 20.3% in the Barra de Santa Rosa/Cuité area and 8.15% in Nova Floresta/Picuí/Cuité. In both sedimentary occurrences, the waters have a slightly acidic pH and in terms of salinity they are classified as Slightly Brackish, which in many situations makes direct human consumption unfeasible.

Keywords: Serra dos Martins Formation, Hydrogeology, Hydrochemistry, Geophysics.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo	17
Figura 2: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2013	21
Figura 3: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2014	21
Figura 4: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2015	22
Figura 5: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2016	22
Figura 6: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2017	23
Figura 7: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2018	23
Figura 8: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2019	24
Figura 9: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2020	24
Figura 10: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2021	25
Figura 11: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2022	25
Figura 12: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2013	26
Figura 13: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2014	26
Figura 14: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2015	27
Figura 15: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2016	27
Figura 16: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2017	28
Figura 17: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2018	28
Figura 18: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2019	29

Figura 19: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2020	29
Figura 20: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2021	30
Figura 21: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2022	30
Figura 22: Número de municípios por estado situados no semiárido	31
Figura 23: Reservatórios monitorados pela AESA	32
Figura 24: Classificação dos aquíferos quanto a sua porosidade	37
Figura 25: Cálculo da porosidade de um material.	38
Figura 26: Disposição convencional dos eletrodos em campo	40
Figura 27: Arranjo Gradiente Multinível.	42
Figura 28: Plugadeira portátil de campo do laboratório de Petrofísica da UAMG.	48
Figura 29: Equipamentos utilizados em campo para o registro dos dados de eletrorresistividade	49
Figura 30: Plugues preparados para análise petrofísica.....	50
Figura 31: Serra utilizada na preparação dos Plugues.....	51
Figura 32: Retificadora de Plugues.	51
Figura 33: Balança utilizada para determinação da massa das amostras de rocha.	52
Figura 34: Permoporosímetro do laboratório de petrofísica da UAMG.	53
Figura 35: Localização das linhas geofísicas na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa / Cuité.....	55
Figura 36: Seção Geométrica da linha 1	56
Figura 37: Seção Geométrica da linha 2	56
Figura 38: Seção Geométrica da linha 3	57
Figura 39: Seção Geométrica da linha 4	57
Figura 40: Seção Geométrica da linha 5	58
Figura 41: Seção Geométrica da linha 6	58
Figura 42: Seção Geométrica da linha 7	59
Figura 43: Localização das amostras na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.....	59
Figura 44: Localização dos poços no cristalino	61
Figura 45: Mapa potenciométrico da região 1 indicada na figura 44	62

Figura 46: Mapa potenciométrico da região 2 indicada na figura 44	62
Figura 47: Mapa do parâmetro vazão da região 1 indicada na figura 44.....	63
Figura 48: Mapa do parâmetro vazão da região 2 indicada na figura 44.....	64
Figura 49: Distribuição dos sólidos totais dissolvidos na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno	67
Figura 50: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em cálcio....	69
Figura 51: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em magnésio.....	69
Figura 52: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e potássio.	70
Figura 53: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sódio	70
Figura 54: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e cloreto	71
Figura 55: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sulfato	71
Figura 56: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e bicarbonato	72
Figura 57: Distribuição da salinidade na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno.....	73
Figura 58: Distribuição da dureza em cálcio na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno	74
Figura 59: Distribuição da dureza em magnésio na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno	75
Figura 60: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em cálcio.....	76
Figura 61: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em magnésio.	76
Figura 62: Gráfico de dispersão entre sódio e sulfato	77
Figura 63: Gráfico de dispersão entre sódio e bicarbonato	78
Figura 64: Gráfico de dispersão entre sódio e nitrato.....	78
Figura 65: Gráfico de dispersão entre sódio e cloreto	79
Figura 66: Disposição da concentração de alcalinidade.....	81
Figura 67: Pseudo-modelo 3D de resistividade elétrica	82
Figura 68: Relação entre resistividade da rocha saturada e porosidade saturada em água ($a = 1$; $m = 2$; $R_w = 2,64 \text{ ohm.m}$).....	82
Figura 69: Localização das linhas geofísicas na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta - Picuí - Cuité	83
Figura 70: Seção geoeletrica da linha 1	84
Figura 71: Seção geoeletrica da linha 02	84

Figura 72: Seção geoeétrica da linha 3	85
Figura 73: Seção geoeétrica da linha 4	85
Figura 74: Seção geoeétrica da linha 05	86
Figura 75: Seção geoeétrica da linha 6	86
Figura 76: Seção geoeétrica da linha 7	86
Figura 77: Localização das amostras da Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	87
Figura 78: Distribuição do pH na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité	89
Figura 79: Distribuição dos sólidos totais dissolvidos na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	90
Figura 80: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em cálcio....	91
Figura 81: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em magnésio.....	92
Figura 82: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e potássio.....	92
Figura 83: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sódio	93
Figura 84: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e cloreto	93
Figura 85: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sulfato	94
Figura 86: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e bicarbonato	94
Figura 87: Distribuição da salinidade na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	95
Figura 88: Distribuição da dureza em cálcio na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	96
Figura 89: Distribuição da dureza em magnésio na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	97
Figura 90: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em cálcio.....	98
Figura 91: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em magnésio.	98
Figura 92: Gráfico de dispersão entre sódio e sulfato	99
Figura 93: Gráfico de dispersão entre sódio e bicarbonato	99
Figura 94: Gráfico de dispersão entre nitrato e sódio.....	100
Figura 95: Gráfico de dispersão entre sódio e cloreto.....	100
Figura 96: Disposição da concentração de alcalinidade.....	102

Figura 97: Pseudo modelo 3D de resistividade elétrica para a Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité 102

Figura 98: Relação entre resistividade da rocha saturada e porosidade saturada em água ($a = 1$; $m = 1,4$; $R_w = 2,96 \text{ ohm.m}$)..... 103

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de resistividade para materiais diversos.....	40
Tabela 2: Propriedades petrofísicas das amostras de rocha coletadas nos municípios de Cuité e Barra de Santa Rosa.....	60
Tabela 3: Valores de porosidade de solos e rochas.....	60
Tabela 4: Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas no cristalino próximo a Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.....	65
Tabela 5: Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.....	65
Tabela 6: Classificação da água quanto ao STD.....	67
Tabela 7: Intervalos de “r” para o coeficiente de correlação.....	68
Tabela 8: Classificação da água quanto a dureza total.....	75
Tabela 9: Propriedades petrofísicas das amostras de rocha coletadas nos municípios de Cuité , Picuí e Nova Floresta.....	88
Tabela 10: Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picu – Cuité.....	88
Tabela A1 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços do SIAGAS na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	114
Tabela A2 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços cadastrados na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.....	116
Tabela A3 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços do SIAGAS na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.....	118
Tabela A4 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços cadastrados na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.....	118

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	15
2 OBJETIVOS	16
2.1 Objetivo Geral	16
2.2 Objetivos específicos	16
3 REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1 Caracterização da Área (Localização, Geologia, Clima, Relevo)	17
3.1.1 Localização	17
3.1.2 Geologia	18
3.1.3 Relevo	19
3.1.4 Clima	20
3.2 Panorama dos recursos hídricos do Estado da Paraíba	31
3.3 Água subterrânea – Definições Iniciais	34
3.3.1 Aquíferos	35
3.3.2 Porosidade	37
3.4 A Geofísica na prospecção de água subterrânea	39
3.4.1 Método da eletroresistividade.....	39
3.5 Hidroquímica	42
3.5.1 Parâmetros Hidroquímicos	43
4 MATERIAIS E MÉTODOS	47
4.1 Etapa Inicial – Planejamento	47
4.2 Atividades de Campo	47

	xiv
4.2.1 Coleta de Amostras	47
4.2.2 Geofísica	48
4.2.3 Investigação Hidrogeológica	49
4.3 Atividades Laboratoriais	50
4.3.1 Estimativa de volume de água na formação.....	54
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	55
5.1 Ocorrência Sedimentar em Barra de Santa Rosa/Cuité.....	55
5.1.1 Geofísica	55
5.1.2 Análise petrofísica	59
5.1.3 Mapa potenciométrico	61
5.1.4 Hidroquímica	65
5.1.5 Cálculo de reserva	81
5.2 Ocorrência Sedimentar em Nova Floresta/ Picuí/ Cuité.....	83
5.2.1 Geofísica	83
5.2.2 Análise petrofísica	87
5.2.3 Hidroquímica	88
5.2.4 Cálculo de reserva	102
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	104
7 REFERÊNCIAS.....	106
8 ANEXOS	114

1 INTRODUÇÃO

A água doce é um bem naturalmente escasso, uma vez que 97,6% do total de água presente no planeta é salgada (ANA, 2005). A escassez de água potável, sua distribuição, acesso e gestão foram, são e serão, motivos de grandes disputas internas e internacionais. A água potável, componente básico da biosfera, se encontra em um movimento de diminuição tão acelerado, que a previsão para 2050 é de que 2,5 bilhões de pessoas não terão acesso ao precioso líquido vital. Hoje, este número é de cerca de 1 bilhão de pessoas (BERTOLDI, 2001).

Segundo a Agência Nacional de Águas (ANA, 2005), no Brasil, a água encanada está disponível para 90% da população urbana e para 9% nas áreas rurais. Portanto, 10% da população urbana e 91% da população rural precisam recorrer a métodos alternativos de captação de água para garantir sua subsistência.

A água subterrânea corresponde a cerca de 30% das reservas de água doce do mundo. Se considerarmos apenas a água na forma líquida, os mananciais subterrâneos contêm 99% das reservas de água. Tal importância tem impulsionado as pesquisas hidrogeológicas nos últimos anos. No Brasil, a água subterrânea é utilizada para consumo humano, para irrigação e pecuária e para aplicações industriais e comerciais. Porém seu uso é limitado devido à falta de conhecimento sobre sua ocorrência, seus aspectos quantitativos e qualitativos e sobre as características do fluxo subterrâneo, além da escassez de pessoal devidamente treinado para o aproveitamento mais efetivo desse recurso natural (COLLISCHONN & DORNELLES, 2015).

O Estado da Paraíba (área de 56.439,84 km²) está localizado na Região Hidrográfica Atlântico Nordeste Oriental Brasileiro, tendo aproximadamente 90% do seu território inserido no semiárido brasileiro, região propensa à ocorrência de secas periódicas. Desta forma, caracteriza-se por: (i) baixos índices pluviométricos, (ii) alta variabilidade espacial de pluviosidade e (iii) altas taxas de evaporação (Galvão, *et al.* 2001). Diante desse cenário, a exploração de recursos subterrâneos com a implantação de novos poços tem aumentado consideravelmente (SILVA, *et al.* 2001).

Além disso, podemos destacar que os tipos litológicos presentes na Paraíba não contribuem para a efetiva acumulação de águas subterrâneas, na medida em que

quase a totalidade do território paraibano se encontra sob o domínio de rochas ígneas e metamórficas, reconhecidamente de baixo potencial hidrogeológico, e comumente com qualidade das águas impróprias ao consumo humano e demais usos em função da sua salinidade normalmente elevada (DINIZ *et al.*, 2014).

As microrregiões do Curimataú e Seridó paraibano possuem coberturas sedimentares, de modo especial a Formação Serra dos Martins, cujas potencialidades são pouco conhecidas. Em um contexto de escassez hídrica, estudos a respeito dessa problemática podem trazer informações relevantes para a sociedade, que por muitas vezes tem na perfuração de poços a única alternativa para o abastecimento de água.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo Geral:

Caracterizar a Formação sedimentar Serra dos Martins, localizada nas microrregiões do Curimataú e Seridó Paraibano em termos de sua potencialidade hídrica subterrânea, de forma quantitativa e qualitativa.

2.2 Objetivos Específicos:

- Quantificação da reserva de água subterrânea presente na Formação Sedimentar Serra dos Martins nas ocorrências estudadas;
- Avaliação dos aspectos hidroquímicos da água e análise de sua qualidade;
- Verificação da influência da cobertura sedimentar para a recarga do aquífero fraturado da região na ocorrência Barra de Santa Rosa - Cuité.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 Caracterização da área de estudo

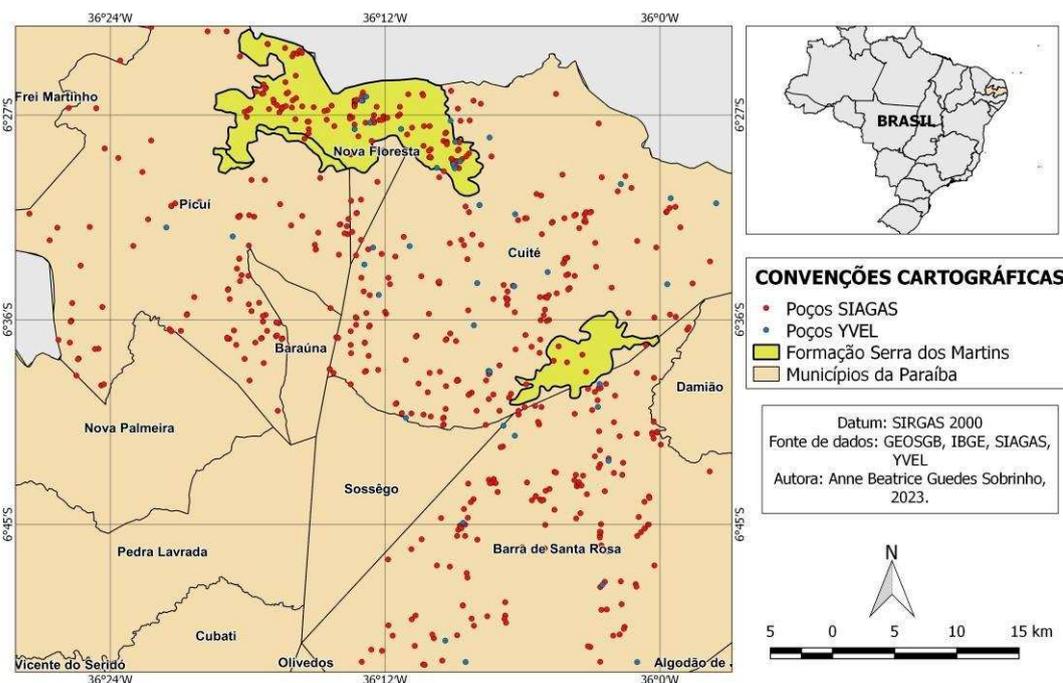
3.1.1 Localização

A área de estudo encontra-se situada no estado da Paraíba e abrange um total de quatro municípios, sendo eles: Cuité, Barra de Santa Rosa, Picuí e Nova Floresta situados nas microrregiões do Curimataú e Seridó (Figura 1).

Essas microrregiões possuem uma cobertura sedimentar ainda pouco estudada, a chamada Formação Serra dos Martins, que pode servir como importante fonte de água subterrânea para um contexto geológico regional majoritariamente cristalino.

Moraes (1924) foi o responsável pelo primeiro estudo sistemático dessa cobertura sedimentar, onde ao avaliar os litotipos presentes no local, os denominou de “Série Serra dos Martins”. Foi apenas com Mabesoone (1966) que ao reavaliar os depósitos substituiu-os pela categoria de “Formação Serra dos Martins”.

Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Própria (2023).

3.1.2 Geologia

A geologia exerce um papel fundamental para o contexto de águas subterrâneas, no que diz respeito tanto ao seu armazenamento quanto a aspectos referentes à sua qualidade. As rochas cristalinas que compõem boa parte da Paraíba são caracterizadas pelo seu baixo acúmulo de água e qualidade comprometida.

Nesse sentido, as formações sedimentares presentes no estado podem servir como importantes reservatórios de água subterrânea. A Formação Serra dos Martins - FSM constitui uma das coberturas sedimentares que perfazem a antéclise do Planalto da Borborema. Essa formação é constituída de depósitos terrígenos que recobrem, de forma discordante, platôs residuais nos estados da Paraíba e no Rio Grande do Norte (LIMA, 2008). Em geral ela ocorre em cotas superiores a 450 m e tem sido apontada como evidência de soerguimento experimentado por aquela porção do escudo brasileiro durante o cenozóico (MARQUES *et al* 2016).

Morais Neto *et al.* (2008), a partir da análise de traços de fissão em apatita (AFTA), estabeleceram idades de deposição que variam de 64 a 25 Ma (intervalo Paleoceno - Oligoceno). Lima (2008), utilizando o método (U-Th)/He em óxidos e hidróxidos de ferro extraídos de perfis de intemperismo laterítico formados sobre as rochas da FSM, estabeleceu uma idade mínima de 20 Ma (Mioceno Inferior).

De acordo com Angelim *et al.* (2006), a Formação Serra dos Martins se caracteriza pela presença de arenitos médios a conglomeráticos, arenitos argilosos e crosta laterítica com seixos de quartzo.

Posteriormente em seu estudo Guimarães *et al.* (2008), descreveram a formação como sendo composta em sua superfície por uma crosta laterítica de cor avermelhada a roxa, com seixos de quartzo angulares mal selecionados, uma porção intermediária composta por bancos de arenitos argilosos homogêneos de cor vermelho-amarelada com grãos de quartzo subangulares a arredondados e em sua base arenitos homogêneos e friáveis, de coloração esbranquiçada, mal selecionados, localmente conglomeráticos e caulíníficos, com camadas silicificadas.

3.1.3 Relevô

A Formação Serra dos Martins - FSM caracteriza-se pelo que alguns autores chamam de inversão de relevô. Pesquisadores como Bigarella & Andrade (1964) e Mabesoone *et al.* (1972) presumem uma idade oligo-miocênica para a mesma, todavia, o posicionamento cronoestratigráfico dessa unidade ainda gera dúvidas entre a comunidade científica, uma vez que seu caráter afossilífero, bem como a falta de marcadores, dificultam a datação de modo mais precisa (MENEZES, 1999).

A inversão de relevô pode ser entendida como um processo de elevação regional acompanhado de um rebaixamento. Na maioria das vezes a área soerguida que outrora formava um vale com má drenagem, passa a ser topo (bem drenado), resultando numa superfície coroada por um cinturão de ferro mais resistentes à erosão que a litologia das áreas circunjacentes (PAIN & OLLIER, 1995).

Para Morais Neto & Alkmim (2001), algumas das porções mais elevadas do Planalto da Borborema, no interior dos estados da Paraíba e Rio Grande do Norte, constituem tabuleiros capeados pelos sedimentos da Formação Serra dos Martins. Historicamente, estas feições do relevô têm sido vistas como testemunhos das etapas mais recentes da gênese da chamada antéclise da Borborema, feição positiva de grande comprimento de onda que abarca todo o escudo nordestino. Caracterizada por Barbosa (1966), a antéclise da Borborema seria resultante de arqueamentos epirogenéticos lentos, atuantes desde o Paleozóico.

Sendo assim, os processos erosivos que caracterizam a FSM são do Oligoceno, especificamente nas etapas da sedimentação mais recentes da chamada "Antéclise da Borborema". Tais movimentos de arqueamento epirogenéticos lentos se manifestaram mais intensamente ao longo do Fanerozóico, que foram submetidos a fases de intemperismo, responsáveis pela formação de regolito e sedimentos correlativos de ciclos de aplainamento (MARQUES *et al.*, 2019).

Portanto, os processos que levam à inversão do relevô podem ocorrer quando há um alçamento de uma determinada superfície pela tectônica ou pela erosão diferencial. Nesse processo, antigas áreas agradacionais podem ser alçadas a cotas elevadas, transformando baixos em altos topográficos. Níveis sedimentares preservados sobre superfícies elevadas podem constituir importantes indicadores de

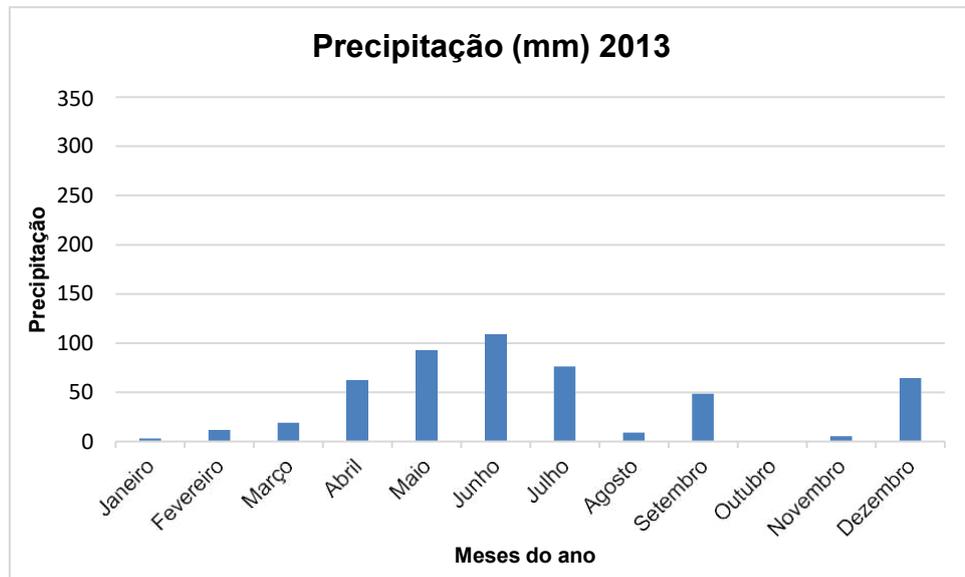
processos de inversão do relevo, uma vez que constituem um antigo nível de base deposicional (MAIA *et al.*, 2016). No nordeste brasileiro, alguns maciços cristalinos apresentam-se parcialmente recobertos pela Formação Serra dos Martins (FSM), como ocorre na área de estudo.

3.1.4 Clima

A água da chuva consiste na principal fonte de recarga dos aquíferos. Devido à sua importância, foi realizado um levantamento da precipitação pluviométrica nos municípios de estudo. Para avaliar a contribuição que cada município tem sobre a Formação Serra dos Martins em ambas localidades de estudo, as suas respectivas precipitações foram ponderadas pela área. Na área de Barra de Santa Rosa – Cuité, o município de Cuité possui uma extensão territorial muito mais expressiva do que Barra de Santa Rosa, sendo assim é o maior responsável pela precipitação. Já com relação a área de Nova Floresta – Picuí – Cuité, o município de maior contribuição é Picuí devido ao mesmo motivo.

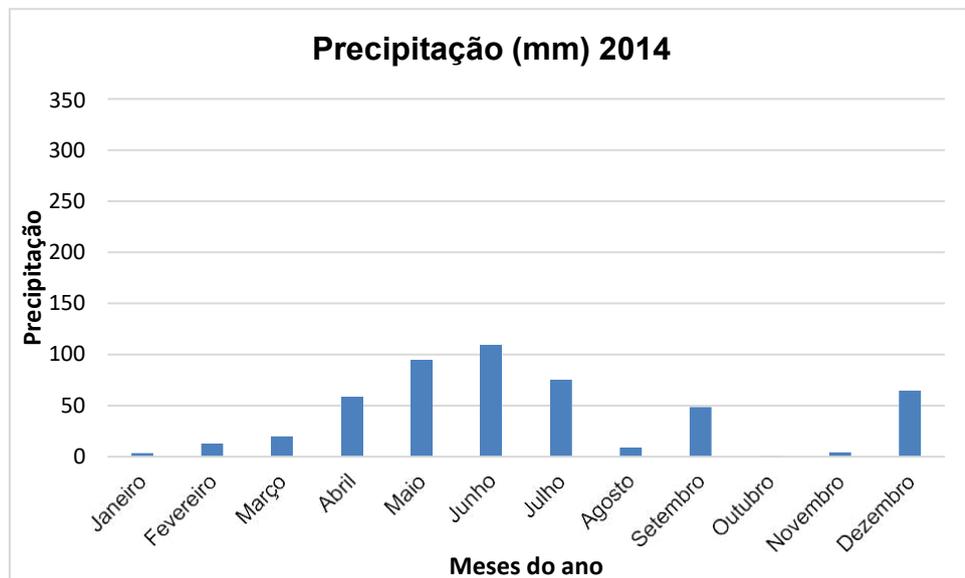
O levantamento foi realizado no *site* da Agência Executiva de Gestão das Águas – AESA entre os anos de 2013 a 2022 e os resultados encontram-se expressos na forma de gráficos. Na área de Barra de Santa Rosa – Cuité (Figuras 2 a 11) é possível visualizar que, de modo geral, as chuvas se concentram entre os meses de Março a Julho. Pontualmente, existem outros meses com valores altos de precipitação. Além disso, nos últimos três anos nota-se um aumento das chuvas na região. No que se refere a área de Nova Floresta – Picuí – Cuité (Figuras 12 a 21) em linhas gerais observa-se precipitações acentuadas já a partir do mês de fevereiro estendendo igualmente até julho.

Figura 2: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2013.



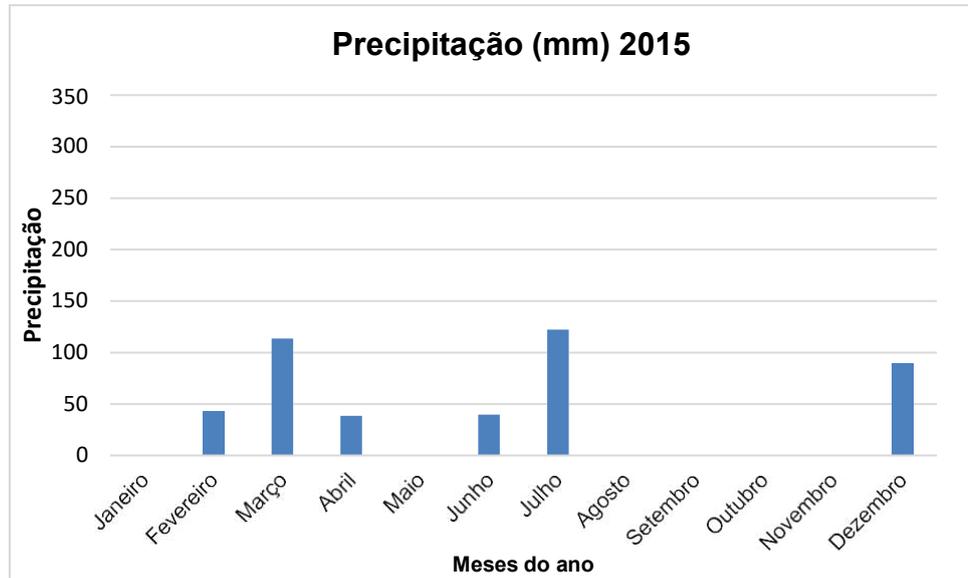
Fonte: AESA (2023).

Figura 3: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2014.



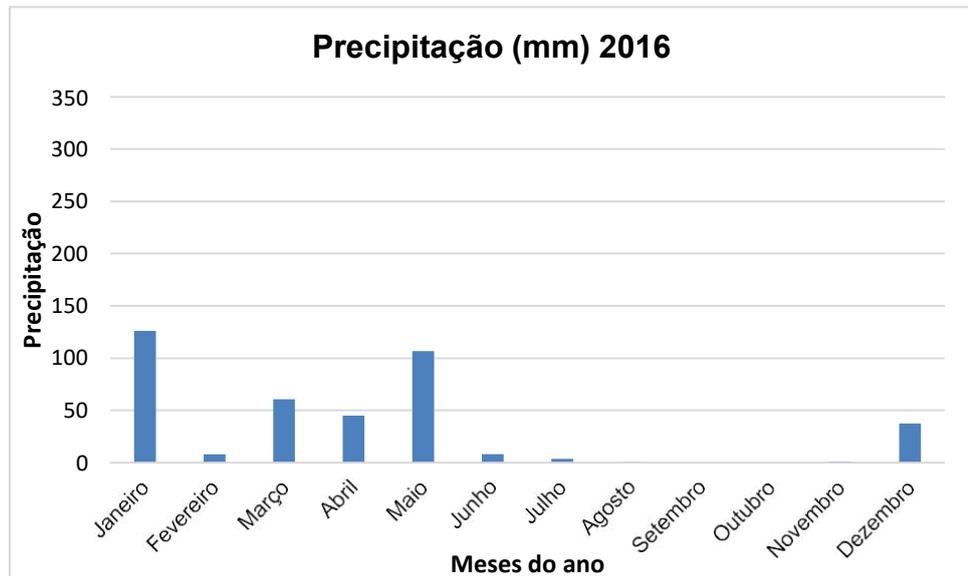
Fonte: AESA (2023).

Figura 4: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2015.



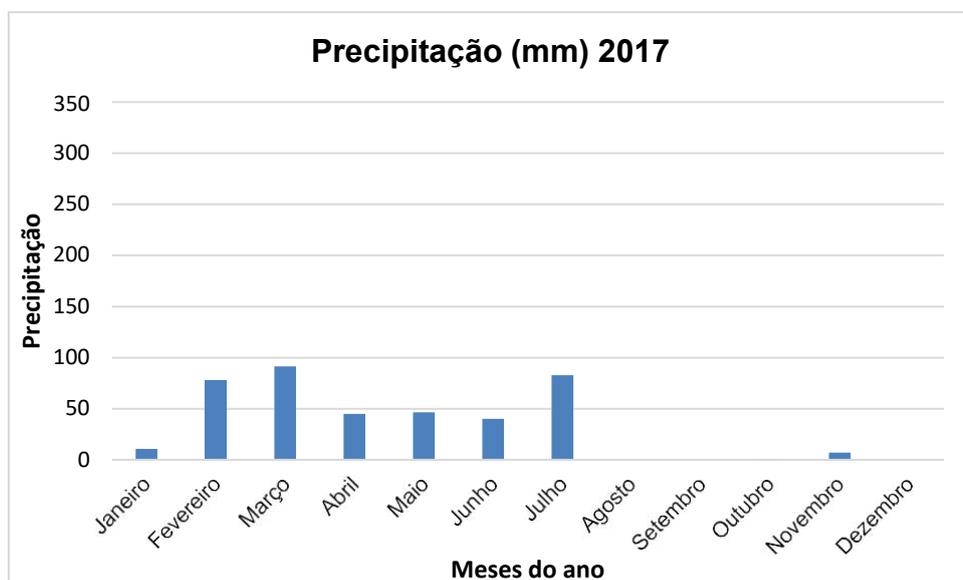
Fonte: AESA (2023).

Figura 5: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2016.



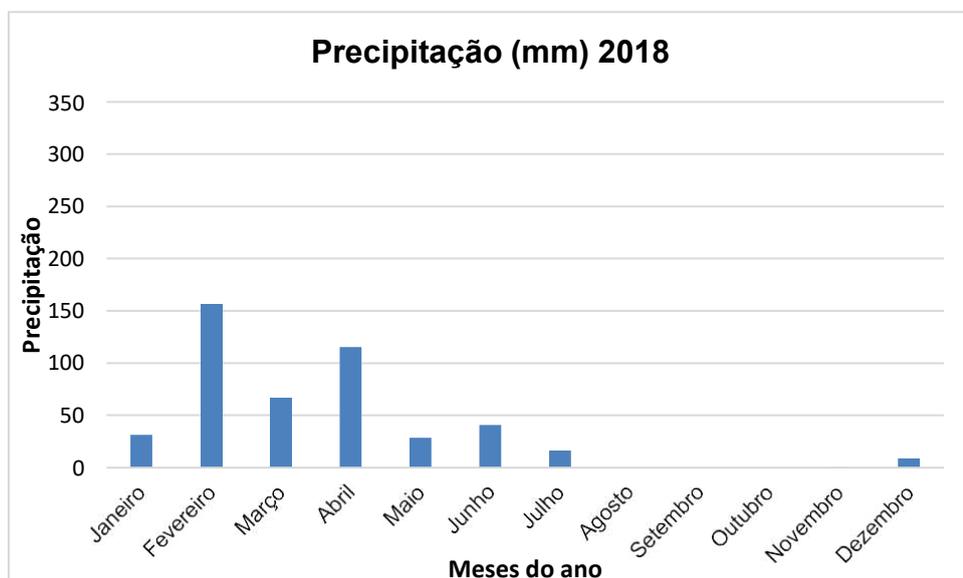
Fonte: AESA (2023).

Figura 6: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2017.



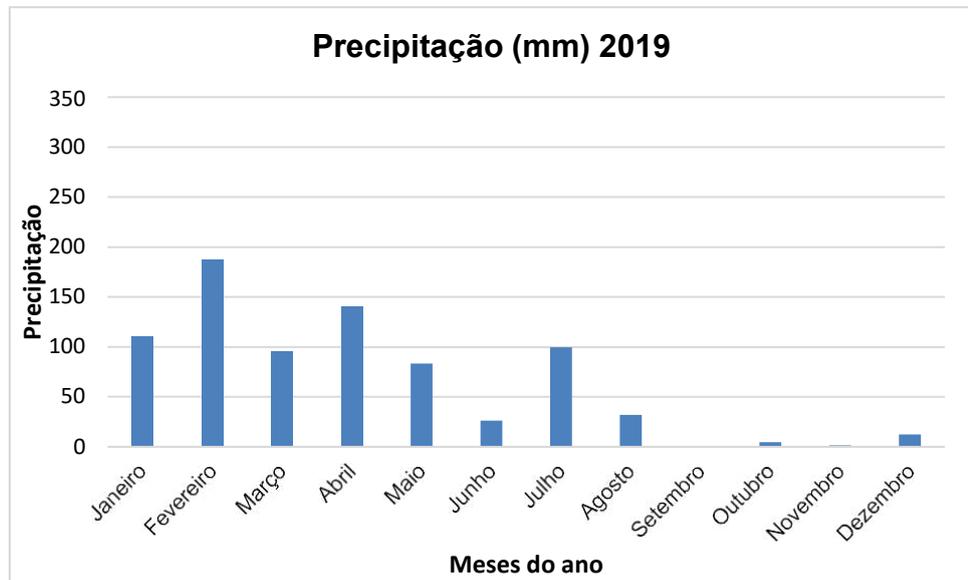
Fonte: AESA (2023).

Figura 7: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2018.



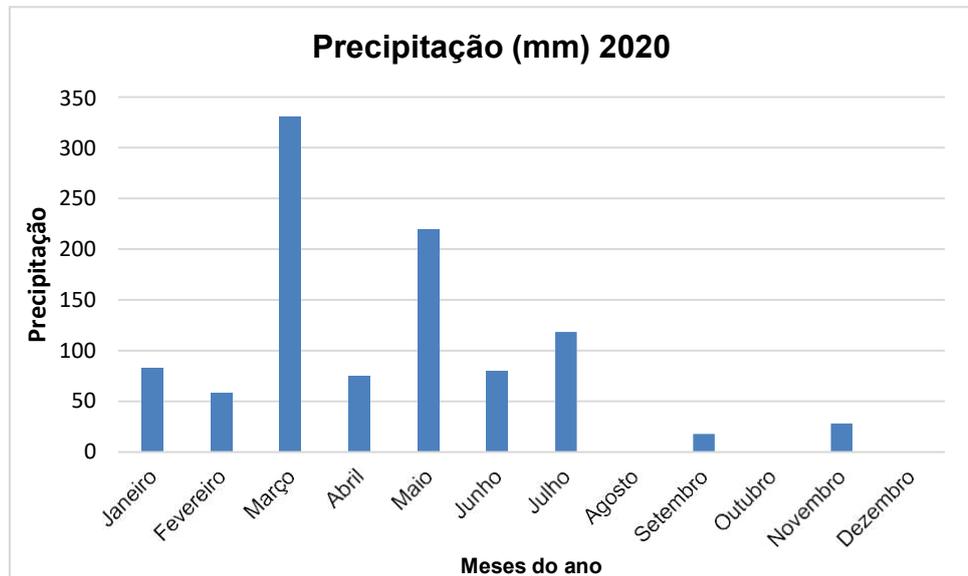
Fonte: AESA (2023).

Figura 8: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2019.



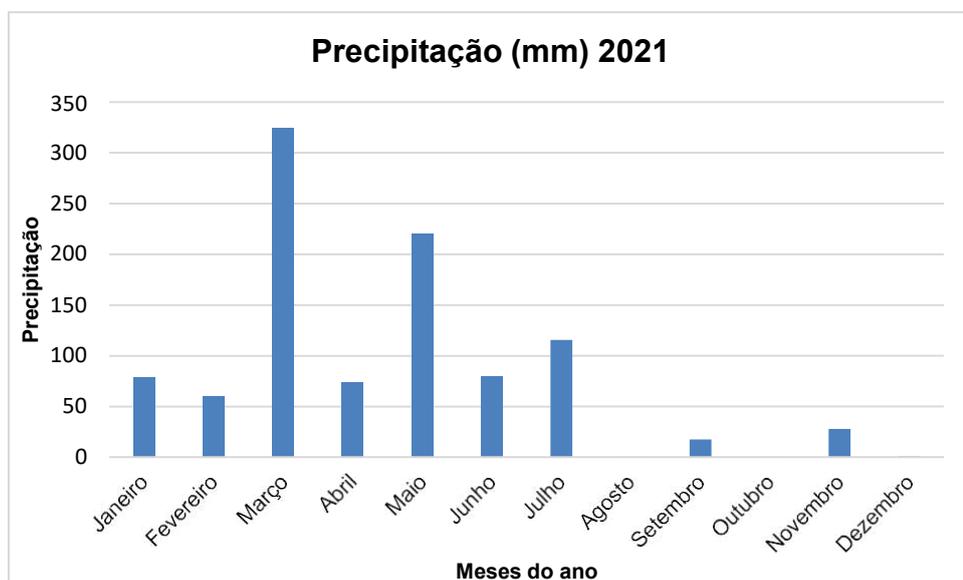
Fonte: AESA (2023).

Figura 9: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2020.



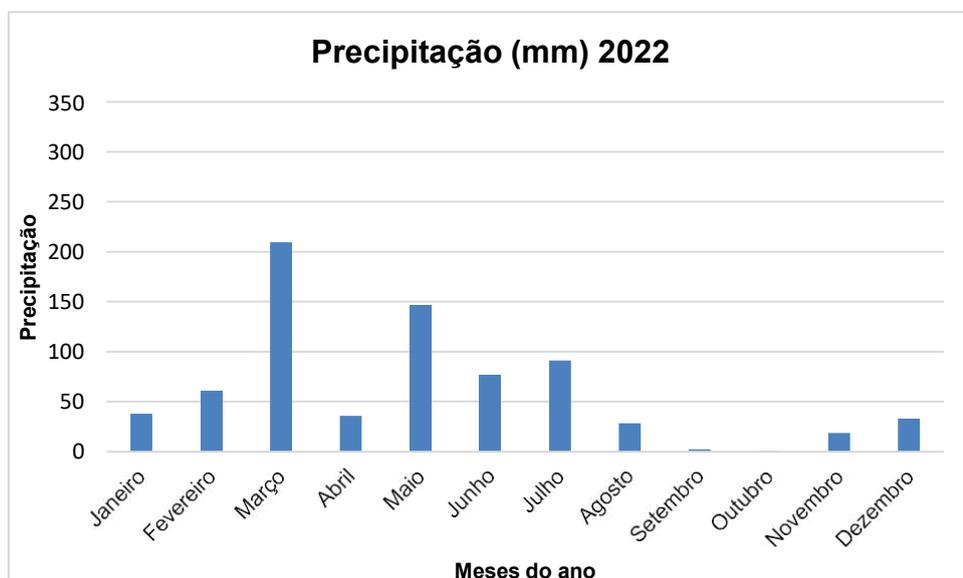
Fonte: AESA (2023).

Figura 10: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2021.



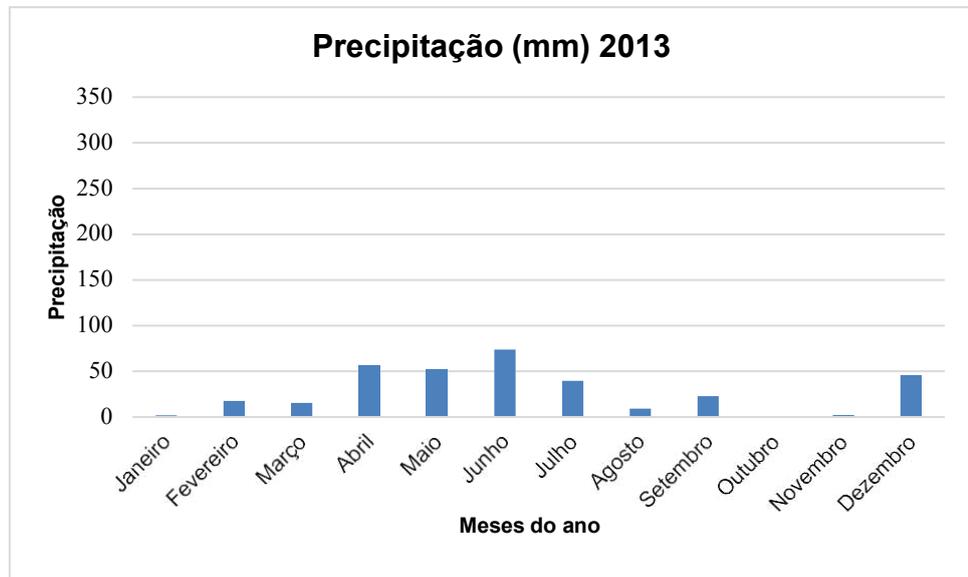
Fonte: AESA (2023).

Figura 11: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité em 2022.



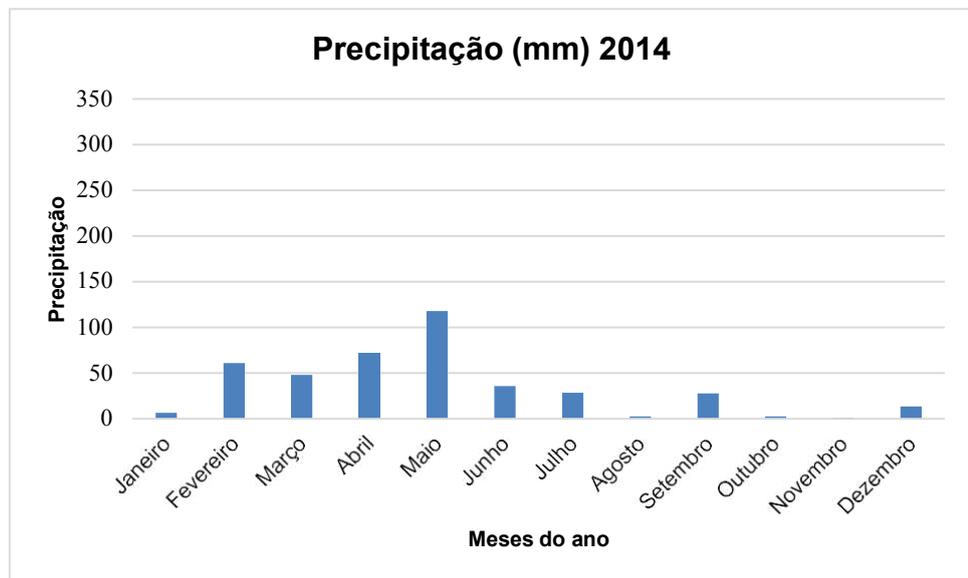
Fonte: AESA (2023).

Figura 12: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2013.



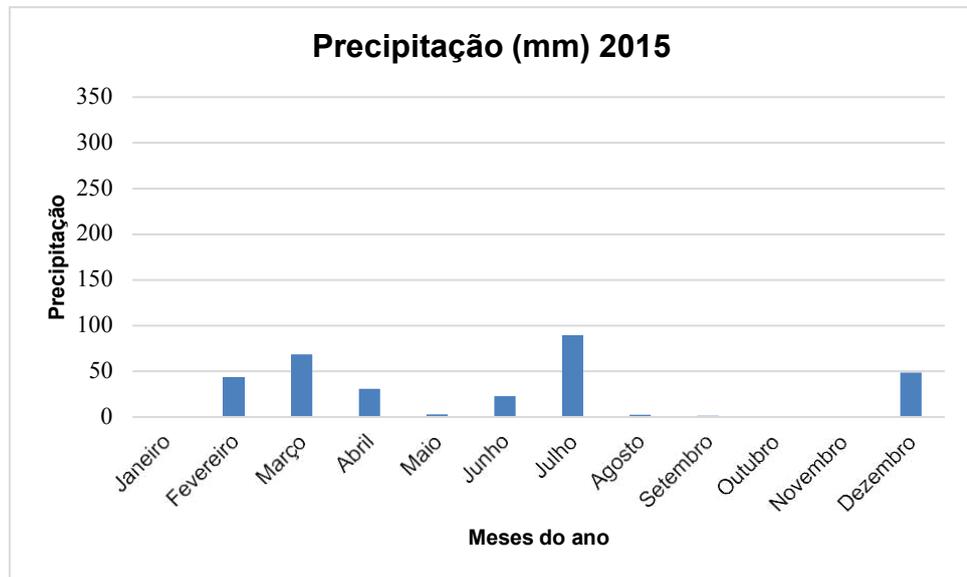
Fonte: Própria (2023).

Figura 13: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2014.



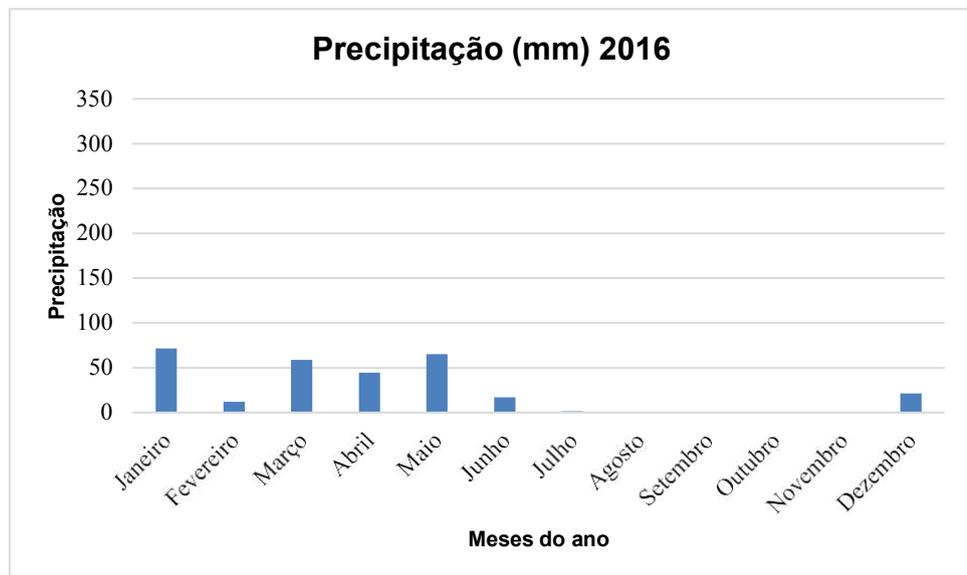
Fonte: Própria (2023).

Figura 14: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2015.



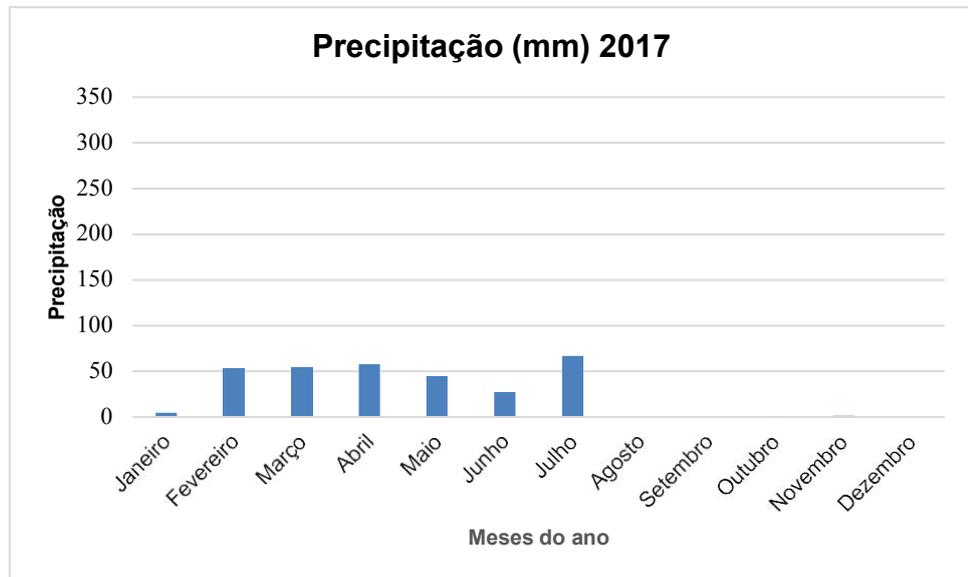
Fonte: Própria (2023).

Figura 15: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2016.



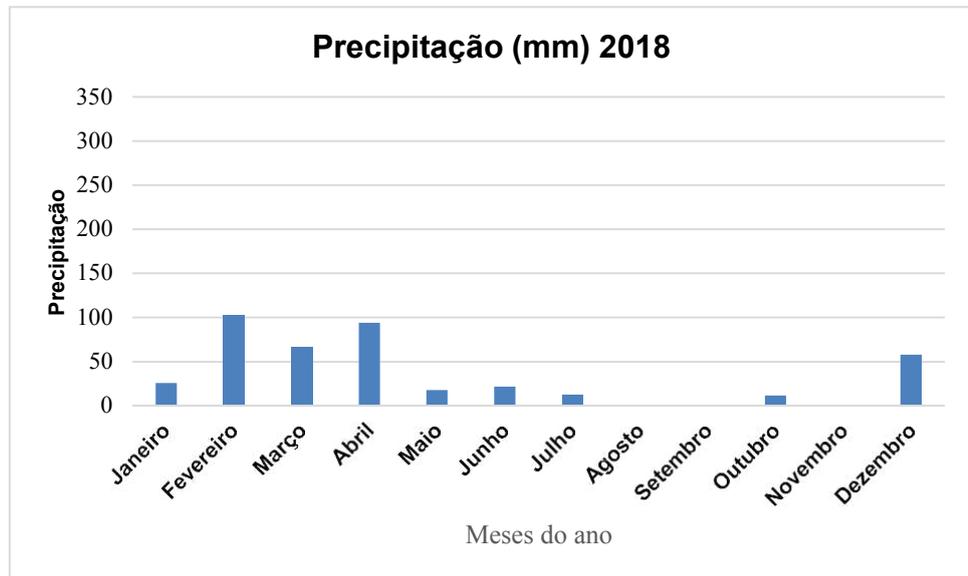
Fonte: Própria (2023).

Figura 16: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2017.



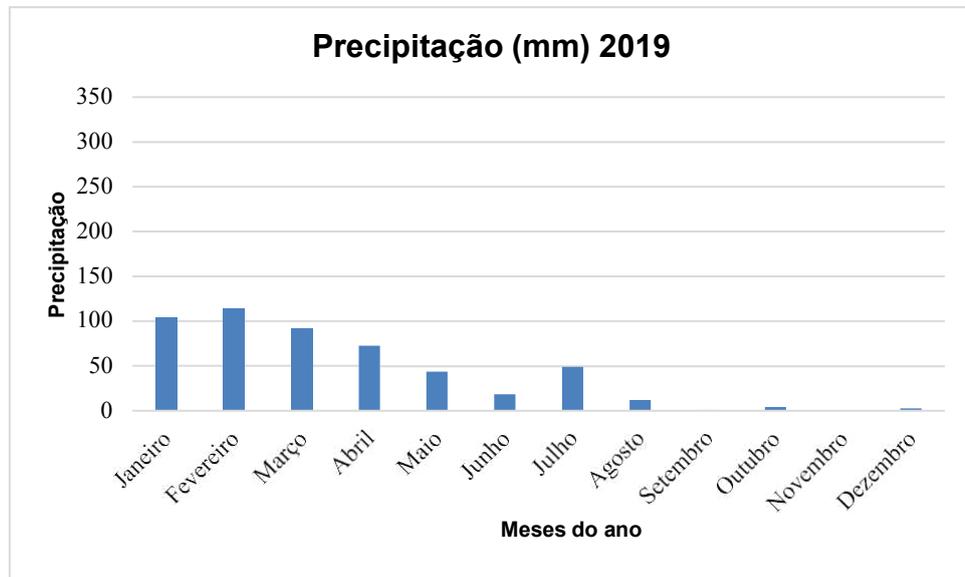
Fonte: Própria (2023).

Figura 17: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2018.



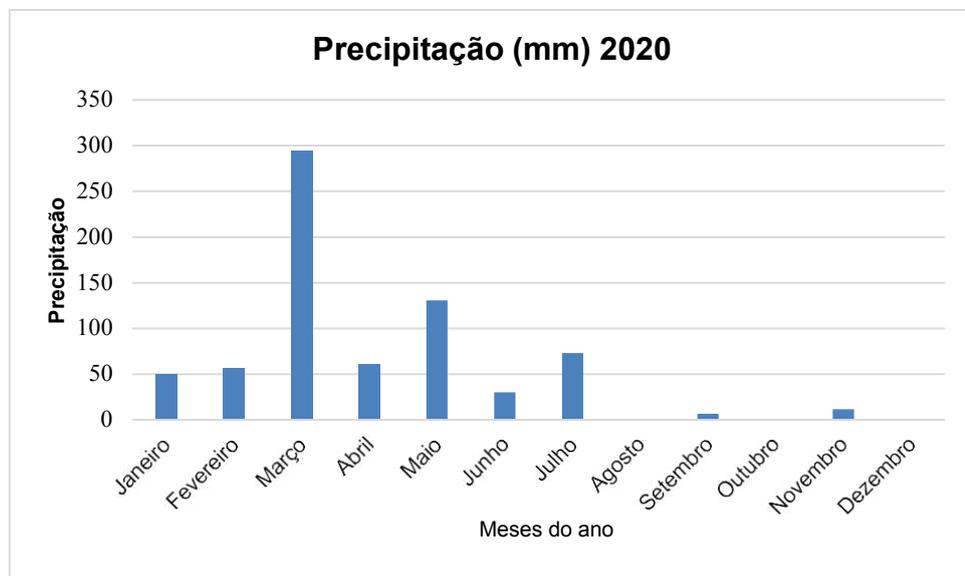
Fonte: Própria (2023).

Figura 18: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2019.



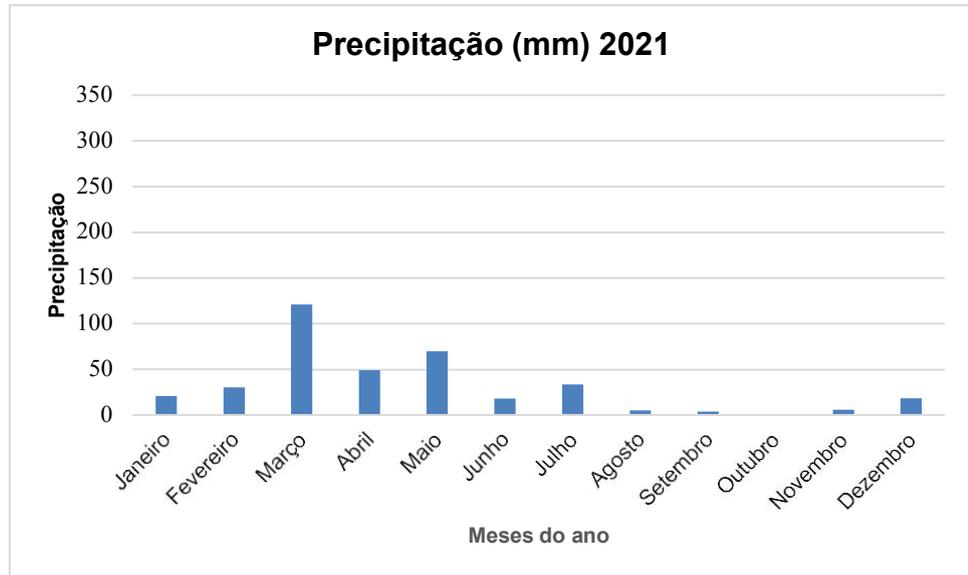
Fonte: Própria (2023).

Figura 19: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2020.



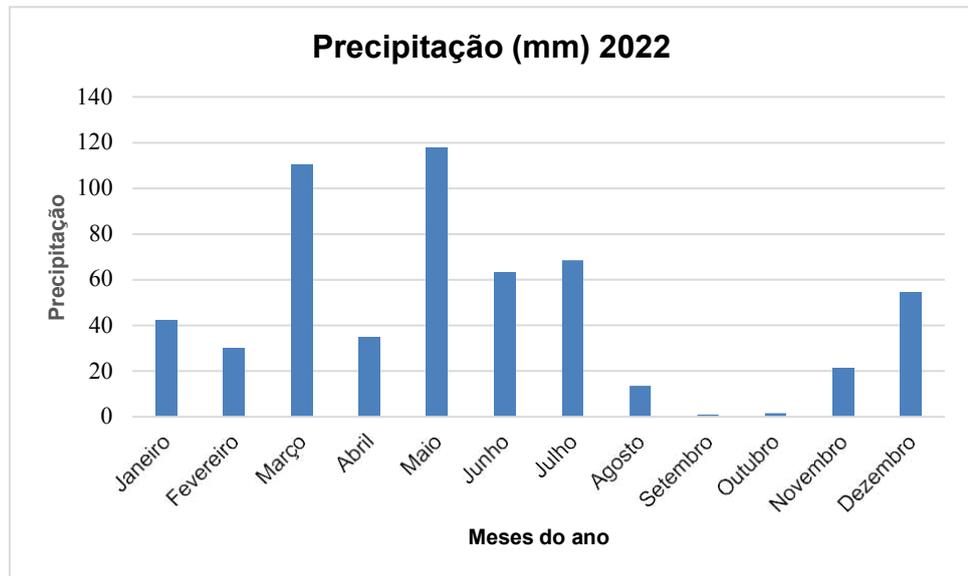
Fonte: Própria (2023).

Figura 20: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2021.



Fonte: Própria (2023).

Figura 21: Precipitação (mm) na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité em 2022.



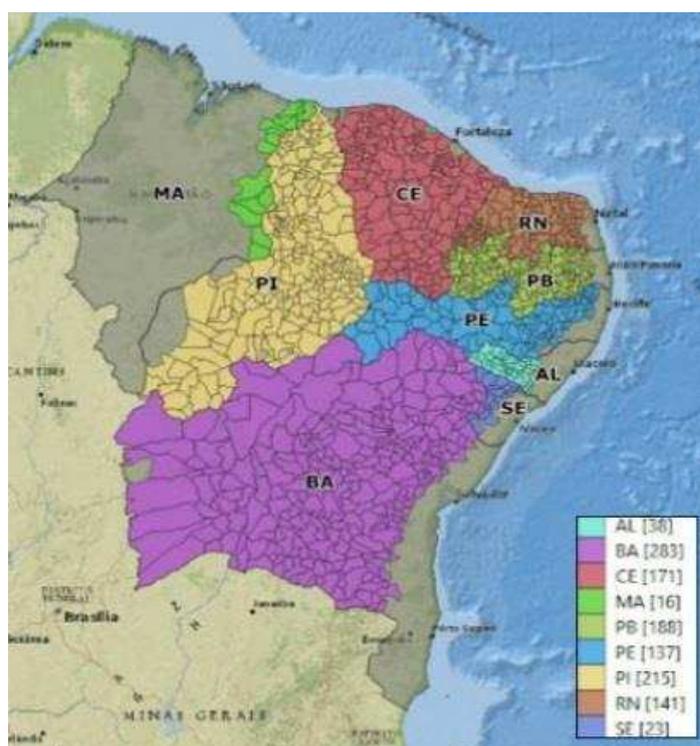
Fonte: Própria (2023).

3.2 Panorama dos recursos hídricos do Estado da Paraíba

A avaliação dos recursos hídricos disponíveis, tanto nos mananciais de superfície quanto nos mananciais de subsuperfície, constitui-se numa preciosa informação para os diversos setores da sociedade, visto que a água representa um recurso fundamental, principalmente para a Região Nordeste, face à sua carência e aos graves problemas sociais e econômicos decorrentes da estiagem.

A Paraíba tem uma população estimada de 4.069.768 (IBGE, 2022). Sua área de superfície é de 56.372 Km², a qual corresponde a 0,6% do território nacional e a 3,6% do Nordeste, sendo que em torno de 90% desse território está localizado na região semiárida nordestina. Isso implica que 188 municípios dos 223 municípios paraibanos estão em áreas muito sensíveis à influência do clima e dos regimes pluviométricos (Figura 22) (CATÃO *et al.*, 2022).

Figura 22: Número de municípios por estado situados no semiárido.



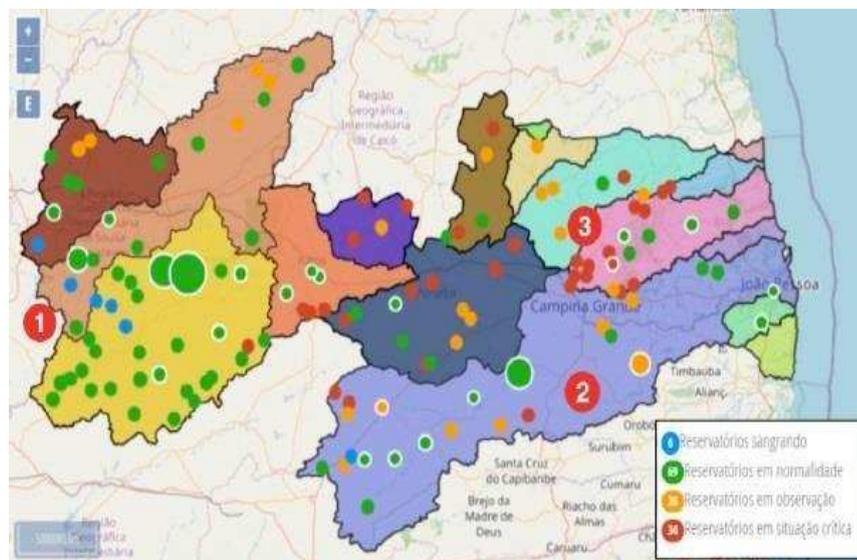
Fonte: CATÃO *et al.* (2022).

Podemos definir a segurança hídrica como a capacidade da população ter acesso sustentável à água em quantidade e qualidade adequadas para a manutenção da vida e do bem-estar humano, garantindo o desenvolvimento das atividades

econômicas, a proteção contra doenças de veiculação hídrica e desastres associados à água, bem como a preservação dos ecossistemas (*INSTITUTE FOR WATER, ENVIRONMENT & HEALTH*, 2013).

Tendo em vista que a maioria dos rios da Paraíba não é perene, os governos historicamente, em maior ou menor intensidade, investiram na construção de barragens com a finalidade de acumular a água durante os períodos de maior precipitação. O Estado da Paraíba conta com 135 reservatórios públicos artificiais, destinados ao abastecimento d'água coletivo, cujo monitoramento é realizado pela AESA.

Figura 23: Reservatórios monitorados pela AESA.



Fonte: CATÃO, ALBUQUERQUE & NETO (2022).

De acordo com a AESA, no estado da Paraíba, ocorrem os seguintes sistemas: Cristalino, Rio do Peixe, Paraíba-Pernambuco, Serra dos Martins, Aluvial e Elúvio-coluvial.

Sistema cristalino: Ocupa uma área de cerca de 49.000 km² (87% da área estadual), inserindo-se, todo ele, na região semiárida do Estado. É constituído de três associações lito-estratigráficas: (1) rochas constituintes do embasamento representadas por migmatitos, ortognaisses e granitóides diversos; (2) rochas constituintes de coberturas supracrustais representadas por metassedimentos diversos, com predominância de xistos e, subordinadamente, por outros metassedimentos, como quartzitos, meta-arcósios, filitos, mármore e outras rochas

calci-silicáticas e (3) os granitóides diversos, que penetram as referidas rochas supracrustais ou estão, geneticamente, associados à origem das mesmas, através do processo de migmatização.

As possibilidades de se encontrar água nesses sistemas residem principalmente na interceptação de fraturas e foliações impressas nas rochas. Os fatores climáticos impõem restrições principalmente pela natureza das chuvas que são principal fonte de recarga e na região apresentam-se escassas e irregulares.

Sistema Rio do Peixe: Engloba os municípios de São João do Rio do Peixe (antigo Antenor Navarro), Uiraúna, Santa Helena, Triunfo, Sousa e Pombal. É classificado como multi-aquífero, sendo constituído de quatro níveis, hidráulicamente interconectados: Antenor Navarro, Souza Superior, Rio Piranhas e o aquífero Aluvial.

Sistema Serra dos Martins: Encontra-se na formação sedimentar Serra dos Martins, sendo constituído de arenitos finos, médios e grosseiros, pela ordem de predominância, com intercalações de argilitos em camadas de espessuras e profundidades de ocorrência variáveis. Consiste em um sistema por condicionamento geomorfológico, espacialmente descontínuo não ultrapassando mais que 200 km².

Sistema Paraíba-Pernambuco: Encontra-se dividido em dois subsistemas distintos que são o subsistema livre e o confinado. O subsistema livre contido predominantemente no Grupo Barreiras e, eventualmente, nos sedimentos não consolidados do Quaternário (sedimentos de praia, dunas e aluviões) que se lhe sobrepõem e, mais restritamente, nos calcários sotopostos da Formação Gramame, podendo englobar, ainda, embora que localmente, os arenitos calcíferos da Formação Beberibe superior, também chamada formação Itamaracá.

Já o subsistema confinado está contido nos arenitos quartzosos e/ou calcíferos da Formação Beberibe/Itamaracá, cujo nível confinante superior é variável, ora representado pelas margas da Formação Gramame, ora pelos níveis argilosos inferiores da Formação Guararapes do Grupo Barreiras, ora por lentes argilosas ou de folhelhos que ocorrem no topo da Formação Beberibe superior (Formação Itamaracá), e cujo nível impermeável inferior é, invariavelmente, o substrato cristalino Pré-Cambriano.

Sistema aquífero aluvial: Conta com uma área de cerca de 4.100 km², descontinuamente distribuída sobre o embasamento cristalino formando um aquífero do tipo livre. Está contido nos depósitos de natureza fluvial, atuais e sub-atuais, que atapetam leitos e, às vezes, margens dos rios e riachos das bacias hidrográficas que drenam o território paraibano, inclusive a sua parte semiárida.

Sistema eluvial-coluvial: Ocorre nas encostas de elevações principalmente na bacia do Rio Piranhas. Nas bacias dos rios Paraíba e Mamanguape ele se instala onde o relevo é mais acidentado. O arcabouço geológico do mesmo é constituído por um material rochoso de natureza cristalina, disposto em blocos de granulometria grosseira e variada, resultantes da intemperização mecânica das rochas ígneas e metamórficas formadoras das elevações, alguns dos quais rolam encostas abaixo sob a ação da gravidade, acumulando-se nos sopés destas serras.

3.3 Água subterrânea – Conceitos Iniciais

O homem já teve a ideia, que os recursos naturais são inesgotáveis por apresentarem-se de forma abundante no meio, passando então a utilizá-los irracionalmente. Essa falsa sensação de inesgotabilidade da água cai por terra quando se toma consciência que nem toda água do planeta pode ser aproveitada para consumo humano. Nesse cenário a preservação das águas subterrâneas assume grande importância tendo em vista que representa uma das maiores porcentagens de água doce de fácil acesso. Além disso, é válido ressaltar que sua disponibilidade tende a diminuir na medida em que a degradação da sua qualidade aumenta em função de explorações excessivas e atividades antrópicas diversas (BARBOSA, 2007).

Segundo dados da ANA (2005), boa parte da população, principalmente as inseridas em áreas rurais, necessita recorrer a métodos alternativos de captação de água para garantir sua subsistência.

Para Soldera & Oliveira (2017), os recursos hídricos subterrâneos necessitam especial atenção dos órgãos ambientais e dos gestores públicos, pois são os grandes reservatórios naturais de água do planeta. A água subterrânea tem sido considerada importante fonte alternativa de abastecimento à disposição do homem, principalmente em regiões com escassez de água superficial ou em locais que não dispõem de sistema de tratamento de água. Em função da facilidade de instalação e da

manutenção com custos mais baratos, as águas subterrâneas tornaram-se recurso utilizado para diversas finalidades.

Essas finalidades contemplam desde o abastecimento nas cidades assim como no setor privado, com os mais diferenciados usos da água, tanto nos centros urbanos como nas comunidades rurais e, também, como em sistemas autônomos residenciais privados, indústrias, serviços, irrigação agrícola e lazer. Outro uso, bem menos falado, mas de igual importância das águas subterrâneas é a função ecológica para manter o equilíbrio da fauna e flora e ainda para fins estéticos e paisagísticos, além de tornar rios e lagos perenes através das descargas de aquíferos (BICUDO, 2010).

Uma característica importante a ser ressaltada é que a água subterrânea move-se muito lentamente em comparação com a água superficial. Uma alta velocidade de água subterrânea estaria na faixa de 1 m/d (metro/dia), enquanto um rio rápido pode mover-se a uma velocidade de 1 m/s (metro/segundo). Ao passo que o fluxo de água subterrânea é evidentemente um processo laminar, o fluxo de água superficial é turbulento. O tempo médio de residência da água subterrânea no subsolo é estimado em 280 anos, enquanto os rios usualmente possuem tempos de residência de menos de algumas semanas. Esses altos tempos de residência para a água subterrânea indicam que as taxas de recarga podem ser pequenas (LVOVITCH, 1970).

3.3.1 Aquíferos

A água subterrânea faz parte do ciclo hidrológico, ocorrendo nos poros e interstícios das formações geológicas de caráter sedimentar, ou nos planos de fraqueza estrutural das formações geológicas de caráter ígneo ou metamórfico, representados por falhas, fendas, fraturas e fissuras. As camadas subterrâneas que podem conter e produzir água são chamadas de aquíferos (SOUZA, 2006).

Esses reservatórios de água subterrânea possuem tamanhos variados podendo alcançar alguns quilômetros de extensão até milhares de quilômetros. Como exemplo de uma grande aquífero tem-se o aquífero Guarani, que se estende por 1200000 km², ocupando uma área de aproximadamente 18% do território nacional (BARBOSA, 2007).

Um aquífero é uma formação geológica com suficiente permeabilidade e porosidade interconectada para armazenar e transmitir quantidades significativas de

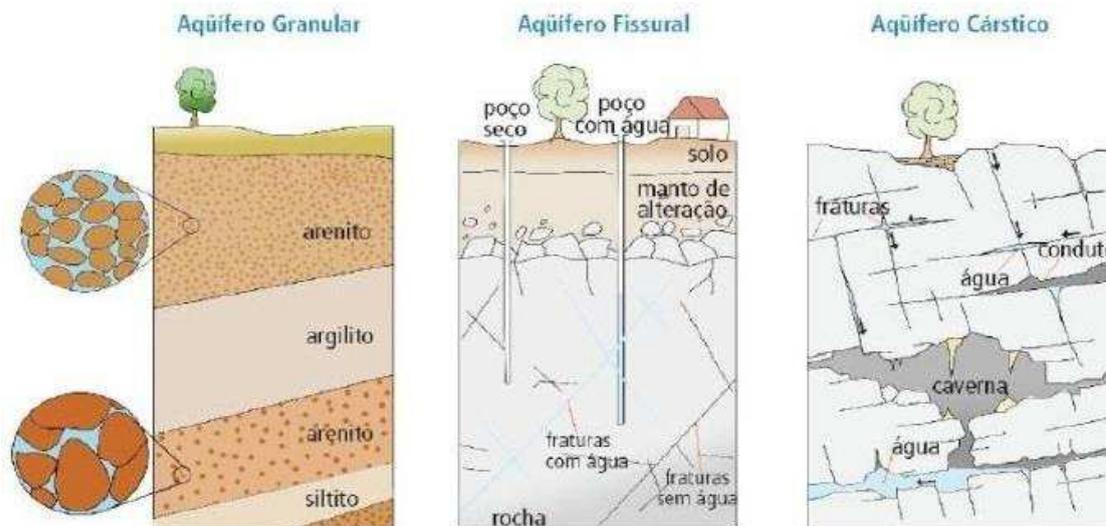
água sob gradientes hidráulicos naturais. O termo "quantidades significativas" é obviamente relativo e depende do uso final do poço. No campo da perfuração de poços significa que são economicamente viáveis. Para um poço municipal típico isso pode significar vazões de 1000 - 4000 m³/dia. Por outro lado, uma quantidade suficiente de água para um único poço residencial pode ser menor do que 20 m³/dia. Numa área de deserto, uma camada geológica que fornece tão pouco quanto 0,5 m³/dia pode ser considerada um aquífero, produzindo quantidades suficientes de água (CLEARY, 1989).

Conforme Cleary (1989), os aquíferos podem ser classificados como livres ou confinados. Aquíferos livres são também chamados como aquíferos freáticos. O termo não confinado significa que a superfície freática não está confinada ou impedida de movimentar-se para cima ou para baixo, através de materiais menos permeáveis tais como camadas de argila. Aquíferos livres são usualmente os primeiros materiais saturados encontrados em um programa de perfuração. Se esta água tem extensão horizontal limitada, trata-se de um tipo especial de aquífero livre, conhecido como aquífero suspenso. Este pode ser adequado para poços residenciais individuais, mas inadequados para poços municipais bombeando por longos períodos.

Aquíferos confinados ou artesianos são formações geológicas permeáveis, que são contornadas abaixo e acima por materiais relativamente impermeáveis e que estão em pressões maiores que a pressão atmosférica. Esses estratos de baixa permeabilidade separam os materiais que formam o aquífero de permeabilidade mais alta do contato direto com a pressão atmosférica e impedem o movimento ascendente e descendente da água (FOSTER, *et al.*, 2002). A maioria desses aquíferos recebe recarga através da drenança vertical de formações geológicas sobrepostas.

Outra classificação para esses reservatórios é em função da porosidade presente nas rochas armazenadoras, onde temos: aquífero poroso ou granular, aquífero fissural ou fraturado e aquífero cárstico (Figura 24).

Figura 24: Classificação dos aquíferos quanto a sua porosidade.



Fonte: Instituto Geológico de São Paulo (2008).

Segundo, ANA (2016), o aquífero poroso ou granular (porosidade primária) possui água armazenada nos espaços entre os grãos da rocha ou solo. O aquífero fissural ou fraturado (porosidade secundária) contém água armazenada nas fraturas interconectadas da rocha. O aquífero cárstico (porosidade secundária) apresenta água armazenada nos condutos e canais de dissolução das rochas carbonáticas.

Por último, pode-se dizer que os aquíferos são considerados a grande promessa para o abastecimento de água, entretanto, pouco se conhece sobre as suas reais proporções, potencialidades e fragilidades, situação agravada pelo uso desenfreado e inadequado desses recursos. Uma vez alcançado o lençol freático, os danos causados às águas subterrâneas podem ser de grande impacto. Por isso se faz necessário um maior conhecimento das características dos recursos subterrâneos e dos pontos de exploração existentes (RIFFEL & SILVA, 2011).

3.3.2 Porosidade

A porosidade total de um material geológico é definida como sendo seu volume de vazios dividido por seu volume total. Uma vez que o volume total de vazios é incluído nessa definição, a porosidade total representa a quantidade máxima de água que um dado volume de material geológico pode conter (CLEARY, 1989). Portanto, a fórmula para cálculo da porosidade é:

$$n = \frac{V_v}{V_t} \quad (1)$$

Onde:

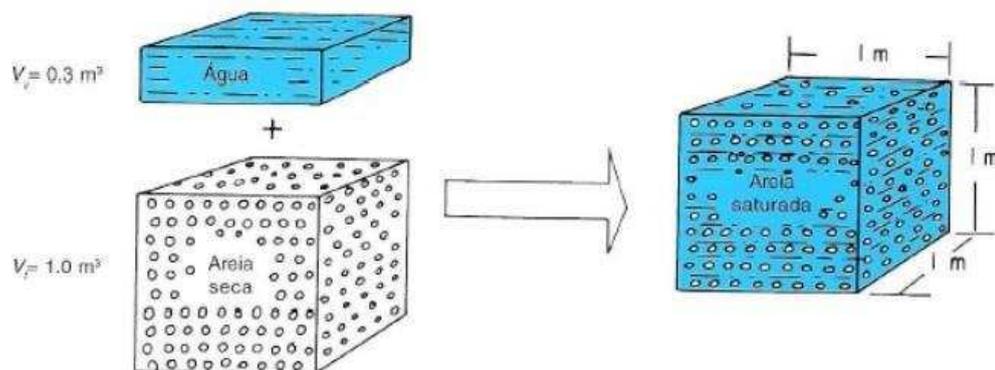
n = Porosidade

V_v = Volume de Vazios

V_t = Volume Total da amostra

Ao multiplicarmos por 100, obtemos o resultado em porcentagem. A figura 25 mostra um exemplo:

Figura 25: Cálculo da porosidade de um material.



$$\begin{aligned} \text{Porosidade } (n) &= \frac{\text{Volume de vazios } (V_v)}{\text{Volume total } (V_t)} = \\ &= \frac{0,3 \text{ m}^3}{1,0 \text{ m}^3} = 0,30 \end{aligned}$$

Fonte: Heath (1983).

Ainda de acordo com Cleary (1989), a porosidade é por vezes dividida em primária e secundária. A porosidade primária refere-se aos vazios que formaram-se ao mesmo tempo que a rocha, ao passo que a porosidade secundária se refere as aberturas que formaram-se após a formação da rocha. Os poros nas areias e cascalhos são exemplos de porosidade primária, enquanto as fraturas nos gnaisses e canais de dissolução nos calcários são exemplos de porosidade secundária. Litologias como arenito fraturado apresentam esses dois tipos de porosidade

3.4 A Geofísica na prospecção de água subterrânea

Geofísica pode ser definida como “a ciência que se ocupa do estudo das estruturas do interior da Terra e da localização nesta, de corpos delimitados pelos contrastes de alguma de suas propriedades físicas com as do meio circundante, usando medidas tomadas na sua superfície, interior de furos de sondagens e levantamentos aéreos” (ORELLANA,1972).

A origem da Geofísica aplicada data de muitos anos atrás, sendo baseada em um conjunto de técnicas físicas e matemáticas, cujo início e desenvolvimento foi relacionado à exploração do subsolo, procurando localizar e estudar estruturas favoráveis à acumulação de substâncias úteis para a sociedade humana, tais como, petróleo, águas subterrâneas e minerais (BRAGA, 2006).

Os principais fenômenos físicos que ocorrem no interior da Terra nos quais a Geofísica se baseia, estão ligados ao campo magnético terrestre, fluxo geotérmico, propagação de ondas sísmicas, gravidade, campos elétricos e eletromagnéticos, correntes telúricas e radioatividade. Em função do parâmetro físico estudado, a Geofísica pode ser dividida em quatro grupos de destaque, que podem ser denominados de métodos principais: gravimétrico, magnetométrico, geoeletricos e sísmicos (BRAGA, 2006). Nesse trabalho nos deteremos ao método geoeletrico da eletrorresistividade que foi o usado durante a pesquisa.

3.4.1 Método da Eletrorresistividade

Pertencente ao grupo dos métodos geoeletricos, a eletrorresistividade – ER, é um método geofísico cujo princípio está baseado na determinação da resistividade elétrica dos materiais que, juntamente com a constante dielétrica e a permeabilidade magnética, expressam fundamentalmente as propriedades eletromagnéticas dos solos e rochas.

Telford *et al.* (1990) destacam que o método baseia-se na medida da intensidade de uma grandeza física presente no material, a resistividade elétrica (ρ), que varia de acordo com a composição mineralógica ou química, granulometria, saturação, compactação, cimentação e porosidade, entre outros. A tabela 1 apresenta valores esperados para alguns tipos de rochas e minerais.

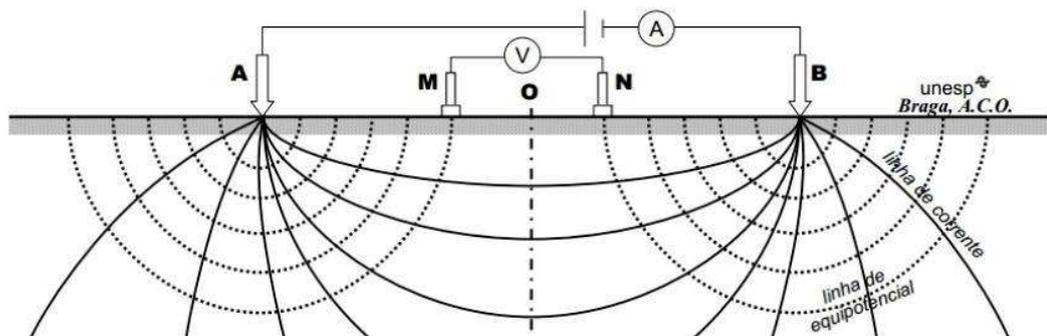
Tabela 1: Valores de resistividade para materiais diversos.

Materiais	Resistividade (ohm.m)
Rochas ígneas e Metamórficas	
Granito	$5,0 \times 10^2$ a $1,0 \times 10^8$
Basalto	$1,0 \times 10^3$ a $1,0 \times 10^8$
Ardósia	$6,0 \times 10^2$ a $4,0 \times 10^7$
Mármore	$1,0 \times 10^2$ a $2,5 \times 10^8$
Quartzito	$1,0 \times 10^2$ a $2,0 \times 10^8$
Rochas Sedimentares	
Arenito	$8,0 \times 10^1$ a $1,0 \times 10^3$
Folhelho	$2,0 \times 10^1$ a $2,0 \times 10^3$
Calcário	$5,0 \times 10^1$ a $4,0 \times 10^2$
Solos e Águas	
Argila	$1,0 \times 10^0$ a $1,0 \times 10^2$
Aluvião	$1,0 \times 10^1$ a $8,0 \times 10^2$
Água fresca	$1,0 \times 10^1$ a $1,0 \times 10^2$
Água do mar	$2,0 \times 10^{-1}$

Fonte: Schon (2004).

A resistividade elétrica pode ser definida como a dificuldade à passagem de corrente elétrica em um determinado meio. Todos os materiais geológicos no seu estado natural, devido as suas propriedades pertinentes, oferecem resistência à passagem da corrente elétrica. Quanto maior a porosidade de solos e rochas e a salinidade da água que preenche seus poros, menor será a resistividade dos materiais (OLIVEIRA & BARBOSA, 2016).

Do ponto de vista prático este método geofísico utiliza uma corrente elétrica artificial introduzida no terreno por meio de dois eletrodos (denominados de A e B), com o objetivo de medir a diferença de potencial ΔV gerado em outros dois eletrodos (denominados de M e N) nas proximidades do fluxo de corrente elétrica (Figura 26), permitindo-se, assim, calcular a resistividade ρ em subsuperfície (ORELLANA, 1972).

Figura 26: Disposição convencional dos eletrodos em campo.

Fonte: Braga (2006).

Na eletrorresistividade três técnicas operacionais são empregadas a depender da finalidade: Sondagem Elétrica Vertical – SEV, Caminhamento Elétrico – CE e, mais recentemente, a Tomografia Elétrica – ERT. A primeira é utilizada para investigações verticais, a segunda em varreduras horizontais, e a terceira é uma combinação das duas primeiras.

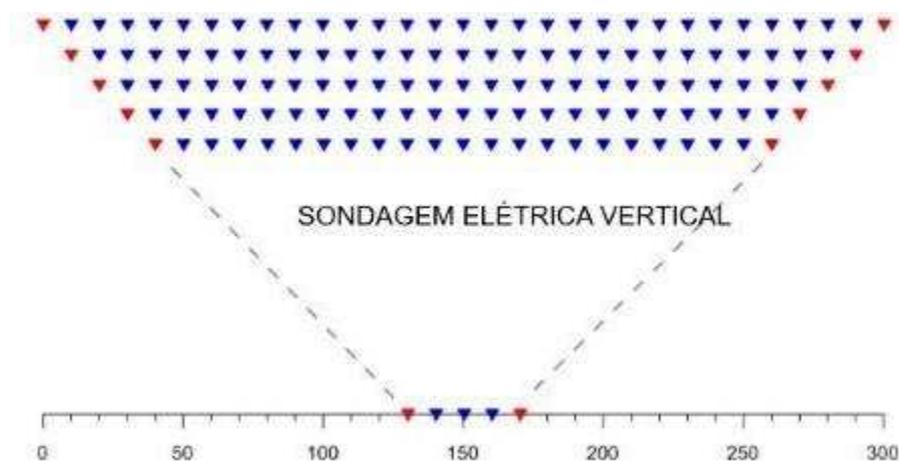
A Sondagem Elétrica Vertical tem como objetivo o estudo da distribuição vertical (com a profundidade) do parâmetro resistividade elétrica. O melhor resultado da aplicação dessa técnica sempre ocorrerá em terrenos lateralmente homogêneos compostos de camadas estratificadas plano-paralelas. Quanto ao caminhamento elétrico, analogamente a SEV mede a resistividade elétrica a partir de uma corrente que é injetada entre os eletrodos AB, gerando uma diferença de potencial que é lido entre os eletrodos MN. A diferença entre as três técnicas consiste no arranjo dos eletrodos e na forma como se deslocam ao longo do perfil (SOUZA, 2006).

A Tomografia de Resistividade Elétrica - *Electrical Resistivity Tomography* é uma técnica avançada da geofísica que permite a investigação de variações verticais e laterais de resistividade. Em geral, os levantamentos são feitos em duas dimensões, dando origem a seções que relacionam resistividade e profundidade. Contudo, investigações tridimensionais também podem ser realizadas com essa técnica (GANDOLFO & GALLAS, 2005).

Para a execução das técnicas de campo existem alguns tipos de arranjos (envolvendo a posição relativa dos pontos A, B, M e N) utilizados na aquisição de dados de um levantamento elétrico que definem as combinações numéricas e geométricas dos eletrodos, onde podemos destacar os arranjos de configurações Wenner, Schlumberger, Pólo-Pólo, Pólo-Dipolo, Dipolo-Dipolo e Gradiente. Alguns fatores devem ser levados em consideração na escolha do arranjo, como: a logística de campo em relação a rapidez na aquisição dos dados, as características a serem delineadas das estruturas geológicas, o grau de heterogeneidade da subsuperfície, a sensibilidade do arranjo às variações verticais e laterais na distribuição de resistividade subsuperficial e a profundidade efetiva de investigação do arranjo (GANDOLFO, 2007).

A configuração do arranjo gradiente, utilizado no presente trabalho, é caracterizada por manter uma linha de transmissão de corrente AB com centro fixo, com medidas efetuadas entre os eletrodos MN (Figura 27), que são deslocados ao longo de uma seção interna da linha AB, sendo possível a realização de vários gradientes simultaneamente, superpostos, com diferentes extensões de linha AB (Dahlin & Zhou, 2004).

Figura 27: Arranjo Gradiente Multinível.



Fonte: Própria (2023).

A profundidade de investigação é determinada pela distância entre A e B. Nesse sentido esse levantamento permite realizar vários gradientes simultaneamente (GALLAS *et al.* 2001). A vantagem desse arranjo é a rapidez na aquisição de dados, pois o centro do arranjo permanece fixo, e apenas os eletrodos MN são deslocados ao longo das linhas a serem investigadas (BRAGA, 2007).

3.5 Hidroquímica

A hidroquímica é o ramo da hidrogeologia que trata da caracterização e migração das substâncias químicas presentes nas águas subterrâneas. O estudo hidroquímico tem por finalidade identificar e qualificar as principais propriedades e constituintes das águas subterrâneas e superficiais, procurando estabelecer uma relação com o meio físico (SENA, 2011).

Para captação de água subterrânea através de poços se faz importante não apenas a quantidade, mas também a qualidade da água a ser distribuída, pois a

qualidade das águas subterrâneas é influenciada pela decomposição dos minerais presentes nas rochas que constituem os aquíferos (ZOBY & MATOS, 2002).

Segundo Freitas *et al.* (2013), a qualidade da água é definida por sua composição e pelo conhecimento dos efeitos que seus constituintes podem causar. O conjunto destes constituintes permite que se estabeleçam padrões de qualidade, classificando-os, de acordo com seus usos (consumo humano, dessedentação animal, irrigação, industrial, piscicultura, aquicultura, recreação e urbano). A disponibilidade dos recursos subterrâneos para determinado tipo de uso depende, fundamentalmente, da qualidade físico-química e bacteriológica da água.

De modo especial para servir ao consumo humano a água deve atender a critérios rigorosos de qualidade, como não conter elementos nocivos à saúde e nem possuir sabor, odor ou aparência desagradável (características organolépticas) (TSUTIYA, 2006). Portanto, a avaliação das características hidroquímicas da água, constitui uma informação de grande relevância para que a gestão da mesma seja feita da forma mais acertada possível.

3.5.1 Parâmetros Hidroquímicos

Potencial de Hidrogênio - pH

O pH de uma solução é a medida da concentração do íon hidrogênio, ou, mais corretamente, é o logaritmo negativo da atividade iônica em moles por litro (HEM, 1993). A escala de pH varia entre 0 a 14. Sendo 7 o pH considerado neutro. Os valores abaixo de 7 apontam para soluções ácidas, sendo a acidez crescente quanto menor for o número, ou seja, mais distante de 7. Por outro lado, soluções com pH acima de 7 indicam soluções básicas sendo a basicidade crescente, quanto maior for o número.

É válido salientar que o pH pode influenciar a precipitação de elementos químicos tóxicos como metais pesados (PIVELI & KATO, 2005). De acordo com a portaria GM/MS nº 888 do Ministério da Saúde para uma água ser considerada potável seu pH deve estar entre 6 e 9.

Condutividade elétrica

Segundo Matta (2002), cátions e ânions são provenientes de sais dissolvidos na água subterrânea, originados da dissolução de minerais da rocha. Nesse sentido, a condutividade elétrica é a facilidade relativa à condução de corrente elétrica. A água pura apresenta valores de condutividade muito baixos. A presença de substâncias iônicas em solução aumenta a condutividade. Portanto é aceita a existência de uma relação linear entre íons presentes em solução e a condutividade elétrica (GURGEL, 1982).

Mediante a observação de que as águas subterrâneas refletem o ambiente percolado, a condutividade expressaria adequadamente o meio, bem como a interação com outras águas. Assim, áreas de intensa precipitação pluviométrica proporcionariam lençóis freáticos de baixa concentração iônica e, por conseguinte, baixa condutividade (CUSTÓDIO & LLAMAS, 1976).

Sólidos Totais Dissolvidos

Os sólidos totais referem-se a toda matéria que permanece como resíduo após a evaporação, secagem ou decomposição térmica de um determinado volume de amostra (CETESB, 2009). Dessa forma, é a soma dos teores de todos os constituintes minerais presentes na água (SANTOS, 1997).

Os sais dissolvidos e ionizados presentes na água transformam-na num eletrólito capaz de conduzir corrente elétrica. Como há uma relação de proporcionalidade entre o teor de sais dissolvidos e a condutividade elétrica, pode-se estimar o teor de sais pela medida de condutividade de uma água em uma dada temperatura (CPRM, 2011).

Paludo (2010) afirma que as variáveis cor, turbidez e os sólidos totais podem estar relacionadas, uma vez que os três parâmetros indicam a presença de partículas sólidas em suspensão ou indício da presença de matéria orgânica que serve de nutrientes para o desenvolvimento de microrganismos.

Salinidade

De acordo com Medeiros *et al.*(1993) em ordem crescente os principais fatores que contribuem para a salinização das águas subterrâneas no nordeste são: a) clima;

b) modo de ocorrência das águas (aquíferos livres ou confinados); c) condições de circulação (zoneamentos verticais) e d) natureza geológica (influência litológica). Adicionalmente podemos considerar também o tempo de residência da água no aquífero como um fator que contribui para o aumento da salinidade da água.

A salinização, seja ela proveniente da evaporação ou interação rocha-água, pode fazer com que as águas se tornem impróprias até mesmo para o uso agrícola, ou ainda promover a elevação das concentrações de espécies químicas nocivas à saúde humana. Dentre as espécies químicas mais nocivas associadas à salinização, destaca-se o F⁻ e o Cl⁻, particularmente em climas áridos (PAUWELS *et al.*, 2015, NAGARAJU *et al.*, 2016, LI *et al.*, 2016).

Potencial de Oxidação - Redução - ORP

O potencial redox é uma medição potenciométrica em que se mede o potencial que o meio tem de transferir elétrons, também é conhecido como ORP (*Oxidation Reduction Potential*) e traduzido para POR (Potencial de Oxidação Redução). Em uma reação de oxirredução tanto a oxidação quanto a redução devem ocorrer, ou seja, se uma substância for oxidada a outra deverá ser reduzida. No processo de oxidação ocorre a perda de elétrons já na redução um ganho. Dessa forma quando uma substância oxida ela permite que a outra reduza, recebendo o nome de agente redutor. Igualmente uma substância reduz porque a outra oxida, sendo assim é o agente oxidante (BROWN *et al.*, 2005).

De maneira geral o potencial de Oxirredução da água (ORP) é a tendência de uma substância a receber elétrons, permitindo avaliar o processo de oxirredução da matéria orgânica, determinando quais microrganismos podem se desenvolver em um determinado meio (JARDIM, 2014). Estudos realizados por Ávila *et al.* (2013) demonstraram que o potencial redox mais elevado leva à eliminação de poluentes convencionais.

Dureza

A dureza total é um parâmetro importante para avaliação da qualidade da água subterrânea e deve-se principalmente a presença de cálcio e magnésio (MOREIRA, 2005). Soares (2018) contribuiu afirmando que a dureza é proveniente da dissociação de íons derivados das rochas, infiltrações e escoamento dos solos.

Sódio

O sódio é um dos metais alcalinos mais importantes e abundantes nas águas subterrâneas. É ele o responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais do ponto de vista catiônico (FEITOSA & FILHO, 2000).

Potássio

Conforme Feitosa & Filho (2000), devido à sua intensa participação em processos de troca iônica, a facilidade de ser adsorvido pelos minerais de argila e de seus sais serem bastante utilizados pelos vegetais, possui normalmente concentrações mais baixas nas águas se comparadas com as de cálcio e de magnésio.

Cloreto

A presença de cloro em rochas ígneas se deve principalmente a minerais como escapolita, micas e anfibólios, já em depósitos sedimentares minerais como halita, silvita e carnalita. Fontes de cloro relacionadas ao homem são aterros sanitários, efluentes domésticos, fumaças industriais, fertilizantes e processos de tratamento de sais, é válido salientar que o cloreto pode provocar a corrosão de estruturas hidráulicas (ALLEY, 1993).

Sulfato

O sulfato é um importante íon encontrado na água subterrânea. A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfetos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados como gipsita e anidrita (PIVELI & KATO).

Bicarbonato

De acordo com Santos (1997), a concentração desse íon varia de 50 a 350 mg/L em águas doces, podendo chegar a 800 mg/L. Concentrações inferiores a 91,5 mg/L são benéficas aos vegetais, principalmente na forma de bicarbonato de cálcio (Zoby e Oliveira, 2005).

4 MATERIAIS E MÉTODOS

O método da pesquisa contempla as seguintes atividades: Planejamento, atividades de campo e de laboratório.

4.1 Etapa inicial – Planejamento

Nesta fase da pesquisa foi realizado um levantamento bibliográfico através dos principais livros, *sites*, artigos e materiais disponíveis onde foram coletadas informações importantes a respeito da geologia, clima e entre outras questões com a finalidade de obter-se um conhecimento preliminar.

Ainda em escritório, foram confeccionados mapas em ambiente QGIS (Sistema de Informação Geográfica QGIS. Projeto *Open Source Geospatial Foundation*. <http://qgis.osgeo.org>).

4.2 Atividades de Campo

4.2.1 Coleta de Amostras

A fim de realizar a caracterização petrofísica e petrográfica das rochas, foram coletadas amostras de mão nos afloramentos visitados, levando-as para preparação de plugues (amostras cilíndricas com 38 mm de diâmetro e cerca de 5 cm de comprimento) em laboratório. Essa estratégia não se mostrou adequada porque a extração dos plugues em laboratório se tornou inviável diante da excessiva dureza das rochas. Apenas um plugue foi extraído dessa maneira.

Alternativamente, foi adotada a estratégia de extração de plugues no próprio afloramento pelo uso de uma plugadeira portátil com motor movido a gasolina (Figura 28). Embora tenha se mostrado uma atividade bastante trabalhosa, essa nova estratégia permitiu a confecção de um número bem maior de plugues (sete).

Figura 28: Plugadeira portátil de campo do laboratório de Petrofísica da UAMG.



Fonte: Própria (2023).

4.2.2 Geofísica

O método geofísico empregado foi o da eletrorresistividade (Figura 29) na técnica ERT (tomografia elétrica) e arranjo gradiente. Nesse método quatro eletrodos são fixados, no qual dois deles são utilizados para enviar a corrente (eletrodos A e B) e outros dois empregados para medir a diferença de potencial entre eles (eletrodos M e N).

Figura 29: Equipamentos utilizados em campo para o registro dos dados de eletrorresistividade.



Fonte: Própria (2023).

Por meio da técnica escolhida foi possível, além de realizar a investigação em profundidade, também obter-se informações sobre a variação da resistividade elétrica na direção horizontal, embora o centro do arranjo permaneça fixo. A tomografia elétrica fornece, assim, uma imagem bidimensional da subsuperfície.

4.2.3 Investigação Hidrogeológica

Nesta fase, já tendo sido realizado o levantamento em escritório no *site* do SIAGAS (<http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>) dos poços perfurados nos municípios de estudo e por meio dos mapas confeccionados, foi possível a detecção de quais deles encontram-se inseridos na formação sedimentar e informações importantes foram coletadas.

Foram também realizadas visitas de campo, onde ocorreu o cadastramento de poços localizados nas ocorrências da Formação Sedimentar Serra dos Martins e coletas de amostras de água para análise química, além de efetuar alguns questionamentos aos proprietários dos poços.

No próprio local foi utilizada a sonda multiparâmetros Hanna (modelo HI98194), equipamento do laboratório da UAMG, onde foram medidos parâmetros como: pH, condutividade elétrica, temperatura, salinidade, sólidos totais dissolvidos e potencial redox.

As tabelas que reúnem os dados da hidrogeologia encontram-se em anexo. Com objetivo do aumento do banco de dados, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos foram utilizados do SIAGAS, já os outros parâmetros hidroquímicos são resultados da presente pesquisa.

4.3 Atividades laboratoriais:

As análises foram realizadas no laboratório de Petrofísica da Unidade Acadêmica de Mineração e Geologia - UAMG da UFCG. Com as amostras de rocha coletadas é necessário que as mesmas sejam preparadas para dessa forma serem submetidas aos ensaios de porosidade e de densidade de grãos.

As amostras de rocha foram extraídas em campo na forma de cilindro em uma plugadeira de 38 mm de diâmetro (Figura 30).

Figura 30: Plugues preparados para análise petrofísica.



Fonte: Própria (2023).

Posteriormente, no laboratório são realizados a serragem e o acabamento das faces em uma retificadora de amostras (Figura 31 e 32). Por último é feita a secagem em estufa. Essa secagem acontece com as amostras submetidas a 90°C durante 24 horas.

Figura 31: Serra utilizada na preparação dos plugues.



Fonte: Própria (2023).

Figura 32: Retificadora de plugues.



Fonte: Própria (2023).

Após isso, com ajuda de um paquímetro são feitas três medidas de comprimento e de diâmetro dos plugues para desse modo calcular-se uma média aritmética. Com isso torna-se possível o cálculo do volume, através de uma fórmula simples

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

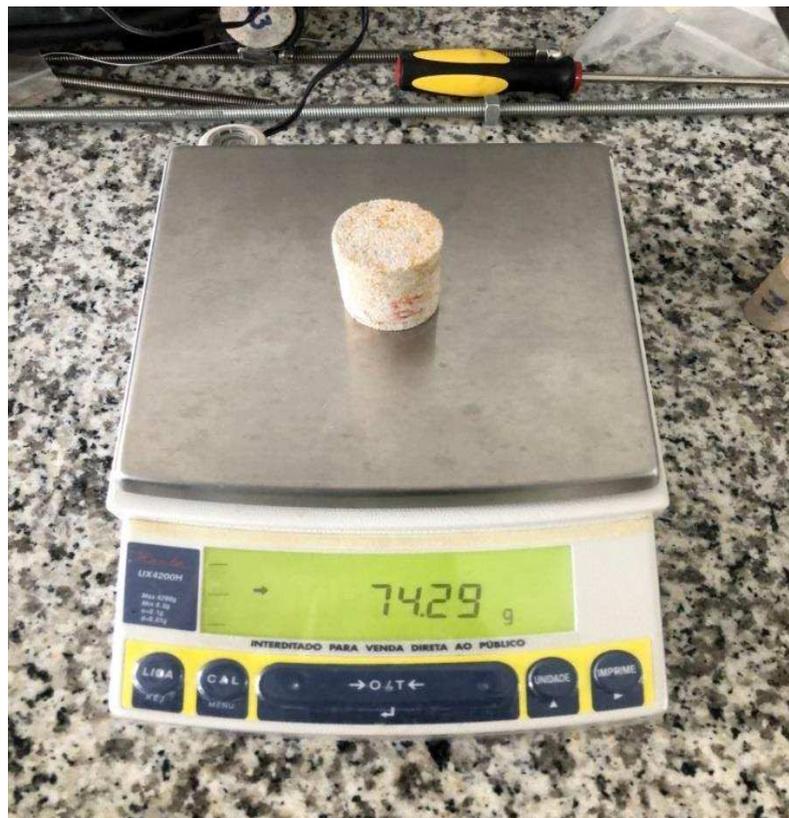
Onde:

r = raio

h = altura

A massa também é medida (Figura 33).

Figura 33: Balança utilizada para determinação da massa das amostras de rocha.



Fonte: Própria (2023).

Finalmente os cilindros são levados ao permoporosímetro (Figura 34) onde é obtido o volume de grãos. Com isso torna-se possível atingir a finalidade do ensaio que consiste na determinação da porosidade e densidade total de grãos.

Figura 34: Permoporosímetro do laboratório de petrofísica da UAMG.



Fonte: Própria (2023).

O volume de poros compreende a diferença entre volume da amostra e volume de grãos:

$$V_{\text{poros}} = V_{\text{amostra}} - V_{\text{grãos}} \quad (3)$$

O volume da amostra é obtido por meio da fórmula (2) e o volume de grãos é fornecido pelo equipamento. A porosidade é a relação entre o volume de poros e o volume da amostra multiplicado por 100:

$$\phi = \frac{V_{\text{poros}}}{V_{\text{amostra}}} \times 100 \quad (4)$$

Finalmente a densidade de grãos é dada por:

$$D_{\text{grãos}} = \frac{M_{\text{grãos}}}{V_{\text{grãos}}} \quad (5)$$

$$D_{\text{amostra}} = \frac{M_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}}$$

Enquanto a densidade total da amostra é:

$$D_{\text{amostra}} = \frac{M_{\text{amostra}}}{V_{\text{amostra}}} \quad (6)$$

4.3.1 Estimativa de volume de água na formação

Para o cálculo de reserva de água subterrânea presente na formação foram utilizadas as expressões de Archie (1942) e Winsauer *et al.* (1952). Elas relacionam a resistividade elétrica da rocha saturada com a resistividade elétrica da água que satura a rocha, a porosidade da rocha, a tortuosidade de seus canais permeáveis e um expoente de cimentação, que depende do tipo de rocha.

De acordo com Archie (1942) o chamado fator de formação (F), que corresponde à razão entre a resistividade da rocha saturada com água (R_o) e a resistividade da água que satura a rocha (R_w):

$$F = \frac{R_o}{R_w} \quad (7)$$

Winsauer. (1952) propôs que a formação seria uma função da porosidade (ϕ), da tortuosidade coeficiente (a) e o expoente de cimentação (m):

$$F = \frac{a}{\phi^m} \quad (8)$$

Igualando as duas equações e aplicando a função logarítmica temos:

$$\log(\phi) = \frac{[\log(a) - \log(F)]}{m} \quad (9)$$

Sendo assim, conhecendo as resistividades da rocha saturada e o fluido saturante, além da faixa de variação de porosidade, é possível estimar os valores dos parâmetros **a** e **m**. Com isso é possível calcular o valor da porosidade efetiva conhecendo o valor da resistividade elétrica da rocha.

A resistividade elétrica da rocha saturada pode ser obtida das seções geoeletricas, a resistividade da água que satura a rocha, é o inverso da condutividade elétrica, parâmetro esse medido em campo.

Assim, com modelos tridimensionais gerados para o subsolo da área investigada (das seções geoeletricas) é possível estimar o volume de água contido no subsolo.

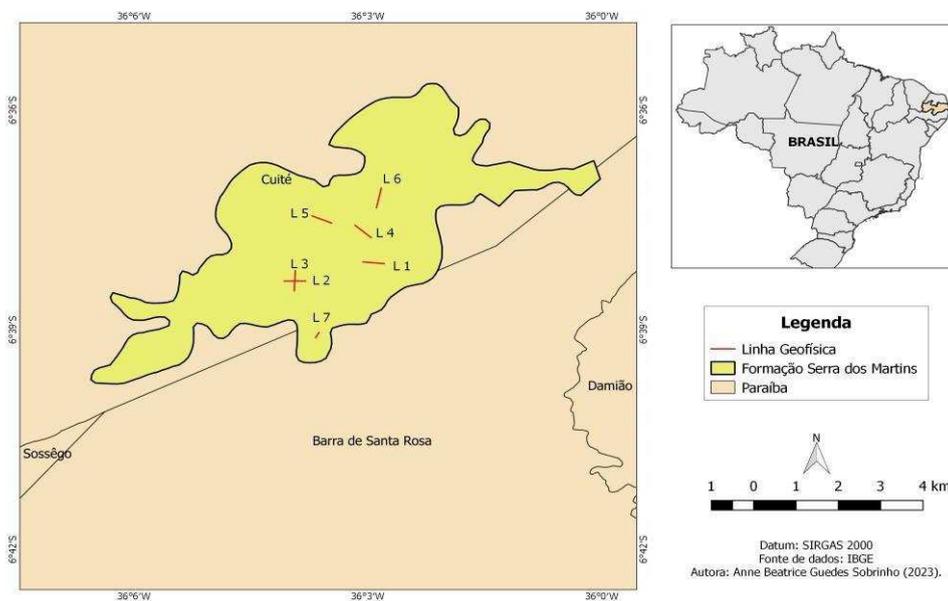
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 Ocorrência Sedimentar em Barra de Santa Rosa / Cuité

5.1.1 Geofísica

As sete linhas geofísicas foram realizadas em diferentes locais da ocorrência conforme ilustra o mapa a seguir (Figura 35). Os resultados são apresentados na forma de seções geolétricas.

Figura 35: Localização das linhas geofísicas na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa / Cuité.

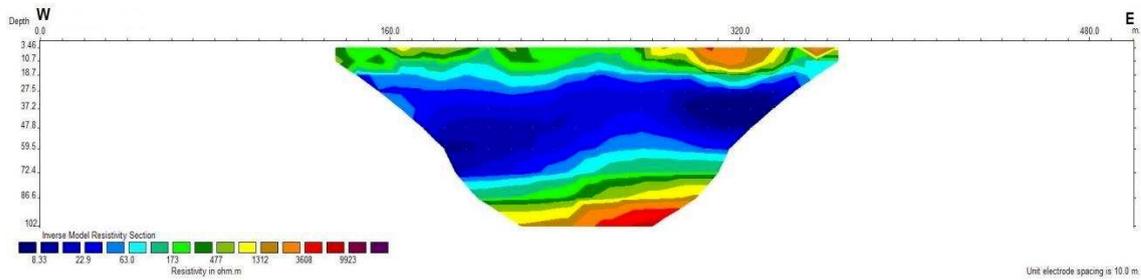


Fonte: Própria (2023).

- **Linha 1:**

Através da seção geolétrica da linha 1 (figura 36), observa-se uma porção superficial resistiva de pequena espessura (camada 1). A partir de aproximadamente 20 m de profundidade encontra-se uma camada condutiva com cerca de 50 m de espessura (camada 2). Na base novamente uma faixa resistiva é apontada (camada 3).

Figura 40: Seção Geométrica da linha 5.



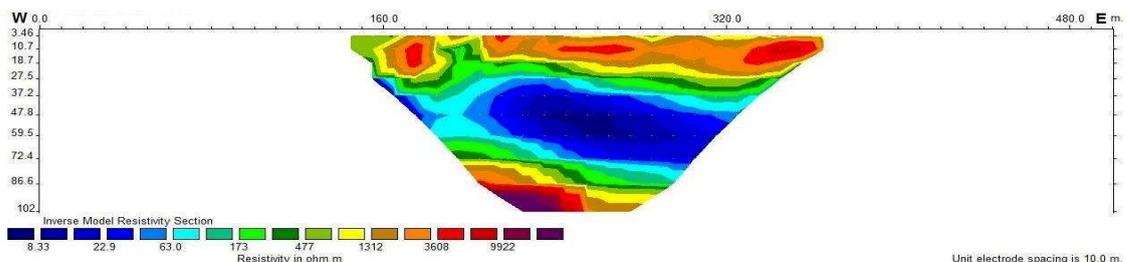
Fonte: Própria (2023).

Sabemos que de maneira geral rochas cristalinas apresentam maiores valores de resistividade, tendo em vista que são mais compactas; por outro lado, rochas sedimentares por possuírem uma maior porosidade tem maior tendência de armazenarem fluídos e por isso são mais condutivas. Desse modo regiões mais condutivas podem ser um indicativo de um possível aquífero. É válido ressaltar que nem sempre esse fato é uma verdade, podendo ser, por exemplo, uma ocorrência de argila. Assim, para reduzir essa ambiguidade de interpretação, é necessário o cruzamento com outros dados obtidos de forma independente. A camada 3, de alta resistividade elétrica, que se encontra abaixo da 2, nos sugere que são as rochas do embasamento cristalino. Essa interpretação será estendida para as demais linhas que serão discutidas.

- Linha 2:

Igualmente ao que foi observado na linha anterior, a linha 2 (figura 37) exibe uma camada superficial resistiva com cerca de 25 m, espessura maior que a linha 1, seguida de uma faixa condutiva expressiva e por fim uma porção resistiva.

Figura 37: Seção Geométrica da linha 2.

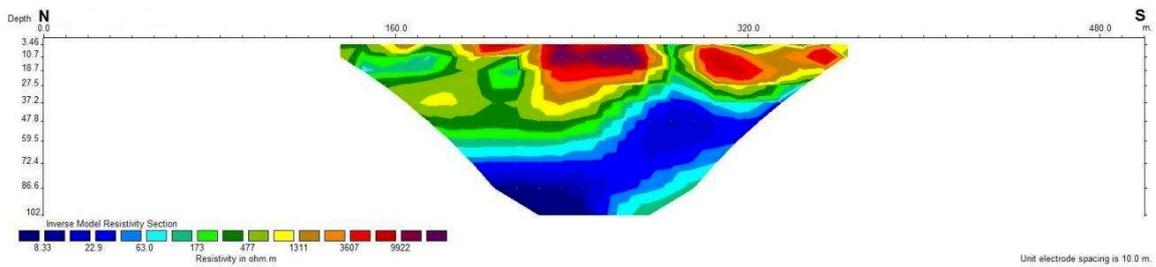


Fonte: Própria (2023).

- Linha 3:

A seção geoeletrica da linha 3 (figura 38) mostra no intervalo de profundidade compreendido entre aproximadamente 4 m e 30 m uma camada predominantemente resistiva. A partir de 30 m até a profundidade final da seção em 102 m destaca-se uma porção fortemente condutiva.

Figura 38: Seção Geoeletrica da linha 3.

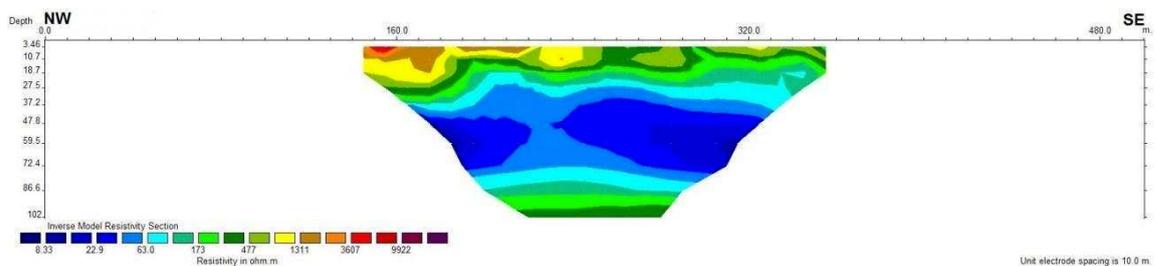


Fonte: Própria (2023).

- Linha 4:

A linha 4 (figura 39) mostrou um comportamento similar ao que já vem sendo apresentado. Camada superficial resistiva, intermediária condutiva, evidenciando um possível aquífero, e na base, entre profundidade de 75 m e 102 m novamente uma faixa mais resistiva.

Figura 39: Seção Geoeletrica da linha 4.

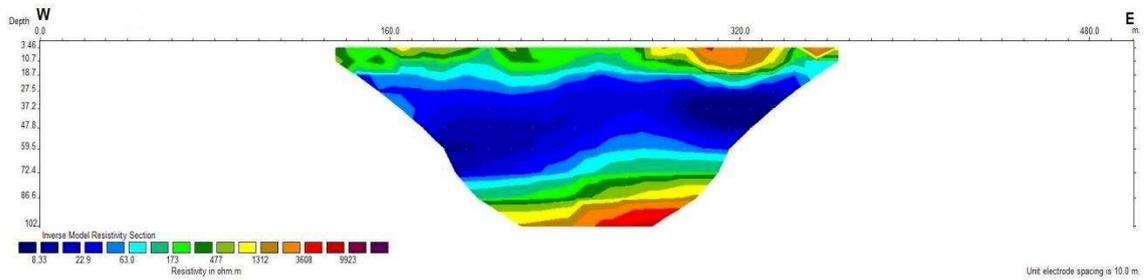


Fonte: Própria (2023).

- Linha 5:

A linha 5 (figura 40) diverge do padrão geral observado para a área investigada. Nota-se quase toda sua profundidade de investigação formada por material resistivo, indicando a ação de possíveis processos locais diferenciados de sedimentação e/ou evolução estrutural.

Figura 40: Seção Geométrica da linha 5.

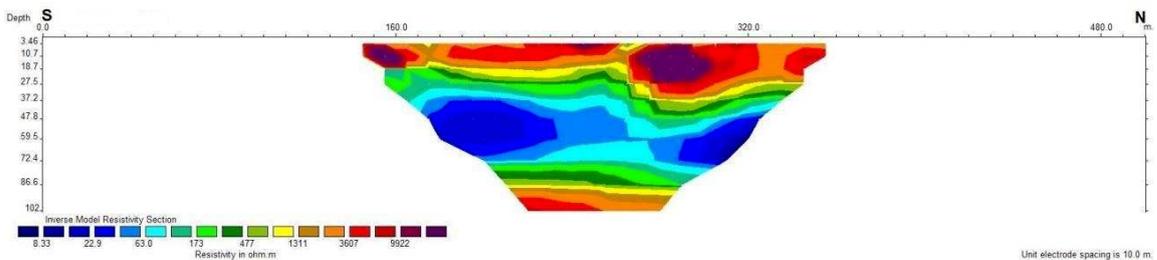


Fonte: Própria (2023).

- **Linha 6:**

A linha 6 (figura 41) também apresentou o modelo predominante. Camada do topo resistiva, camada intermediária condutiva e por fim uma base resistiva.

Figura 41: Seção Geométrica da linha 6.

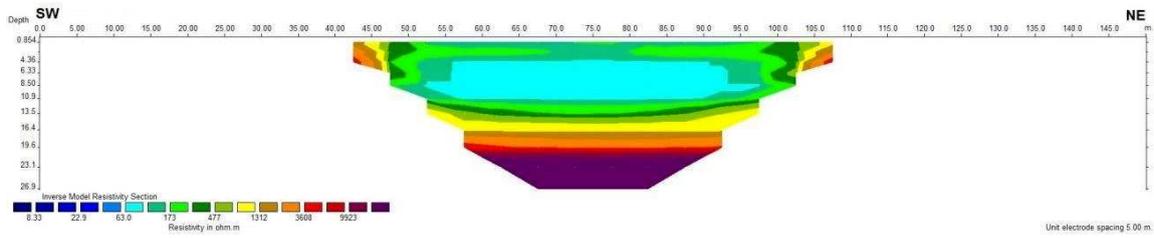


Fonte: Própria (2023).

- **Linha 7:**

A linha 7 (figura 42) foi realizada em um local onde se forma uma lagoa em período chuvoso. Desse modo, a camada superficial condutiva refere-se aos sedimentos saturados em água, seguida por uma faixa de transição, possivelmente sendo rocha cristalina alterada, até chegar em uma camada de alta resistividade, sendo provavelmente a rocha sã do embasamento.

Figura 42: Seção Geométrica da linha 7.

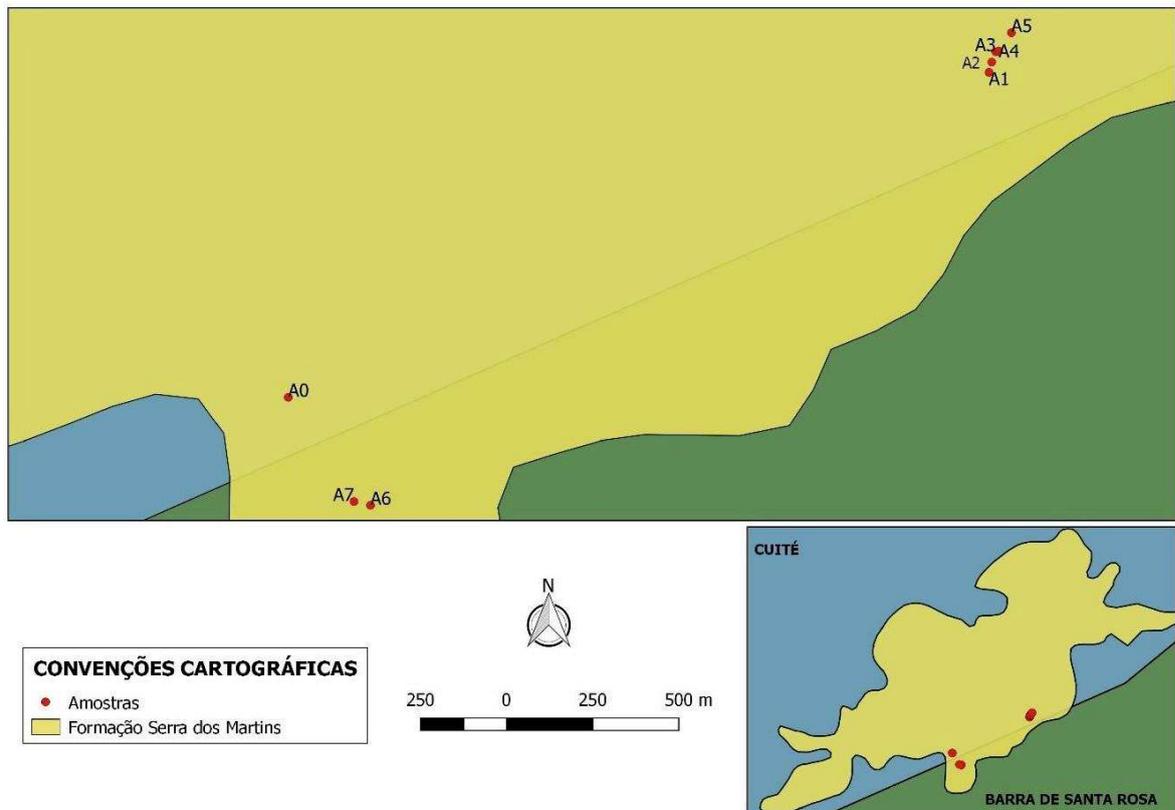


Fonte: Própria (2023).

5.1.2 Análise Petrofísica

Para o ensaio de petrofísica oito amostras de rocha foram analisadas. Em virtude da escassez de afloramentos algumas amostras foram coletadas próximas umas das outras conforme é possível visualizar na figura 43.

Figura 43: Localização das amostras na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

De acordo com a tabela 2 a porosidade das amostras varia de 4,7% a 36,1% com média de 20,3%.

Tabela 2: Propriedades petrofísicas das amostras de rocha coletadas nos municípios de Barra de Santa Rosa e Cuité.

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

Fonte: Própria (2023).

Considera-se para as rochas 10% de porosidade como um valor médio, 5% um valor baixo e 15% um valor alto. Nos solos, onde os grãos minerais podem ser separados mais facilmente (pelo menos por agitação na água), a porosidade assume valores substancialmente maiores, como podemos visualizar na tabela 3 (FILHO & NUMMER, 2014). Dentre os diversos tipos de rochas as sedimentares são as que normalmente apresentam os valores mais altos de porosidade.

Tabela 3: Valores de porosidade de solos e rochas.

Tipo de rocha ou solo	Porosidade máxima (%)
Solo	> 50
Areia e seixo	20-47
Argila	>49
Areia cimentada	5-25
Arenito	10-15
Calcário e mármore	5
Calcário oolítico	10
Rochas ígneas	< 1,5
Rochas metamórficas	Geralmente muito baixas

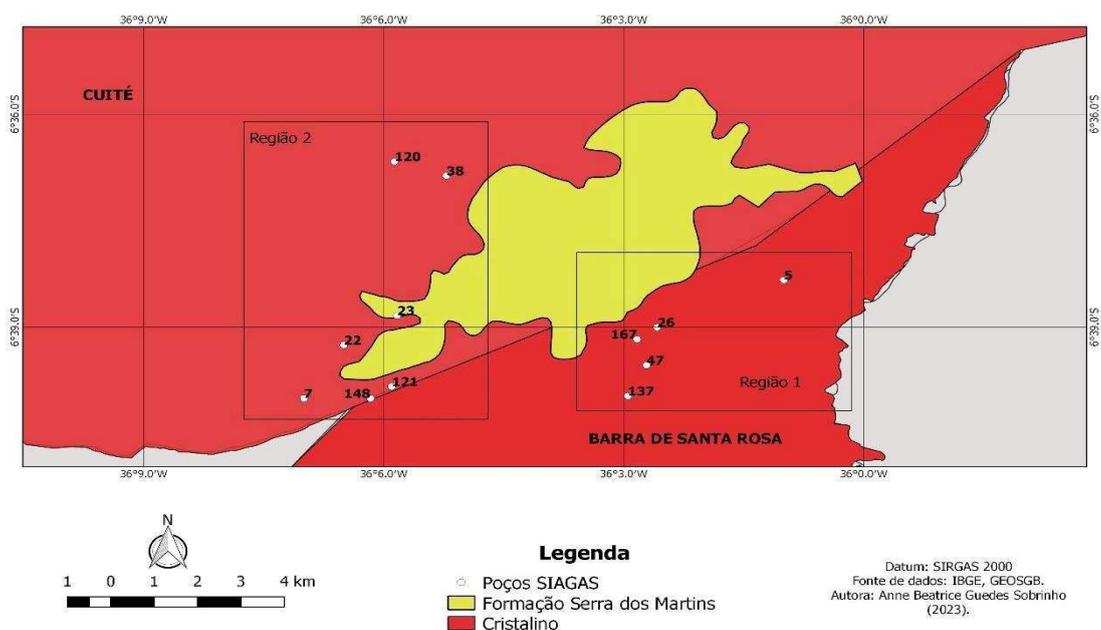
Fonte: FILHO & NUMMER (2014).

Dessa forma, apenas duas das amostras (A3 e A4) tiveram valores baixos de porosidade, enquanto as cinco demais, perfazendo 71,43% do total, apresentaram de média a alta porosidade. Esse número sugere um resultado otimista, tendo em vista que os poros ou os chamados vazios na rocha podem estar preenchidos por fluídos, ou mais especificamente água. No entanto, nem todo o espaço poroso da rocha necessariamente se encontra totalmente saturado em água. Desse modo, possivelmente apenas uma fração desse espaço poroso efetivamente contribui para o armazenamento de água. Adicionalmente, para que a água armazenada no sistema de poros possa ser produzida é preciso que tal sistema apresente uma elevada permeabilidade, o que depende da conectividade de poros. Tal análise topológica será realizada através da investigação de imagens digitais de lâminas petrográficas.

5.1.3 Mapa potenciométrico

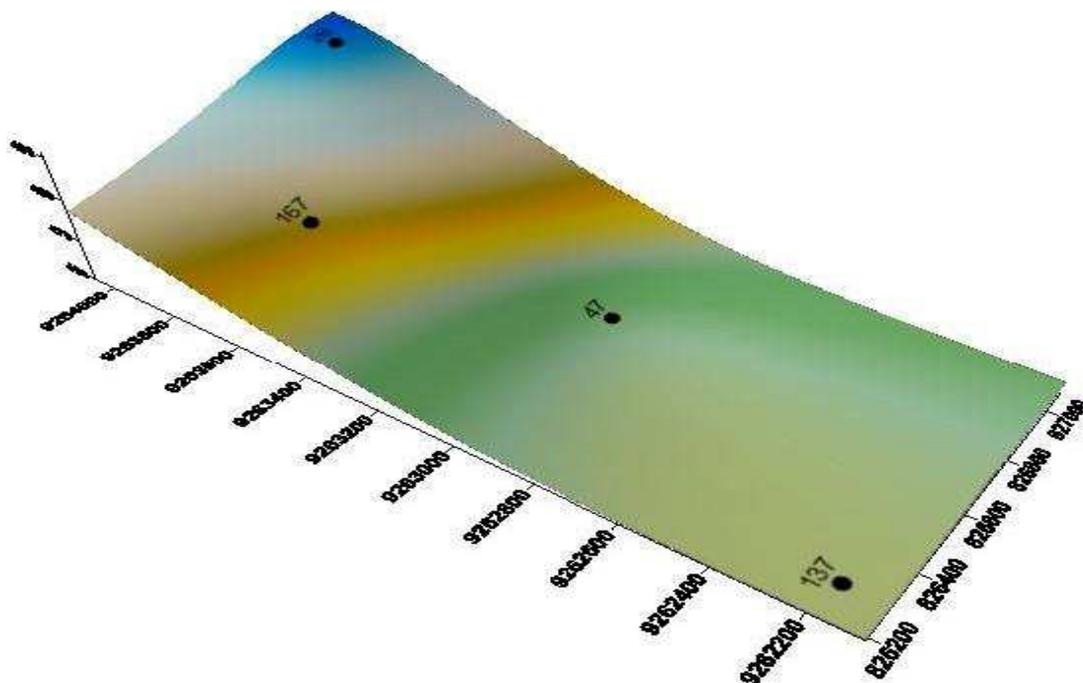
A fim de avaliar a contribuição da região sedimentar para a recarga do aquífero cristalino (Figura 44), foram confeccionados mapas potenciométricos com dados dos poços dos municípios de Barra de Santa Rosa – Região 1 (Figura 45) e Cuité – Região 2 (Figura 46), independente da localização dos poços, se dentro ou fora do corpo sedimentar. Os poços do cristalino utilizados distam até 2 Km da Formação Serra dos Martins.

Figura 44: Localização dos poços no cristalino.



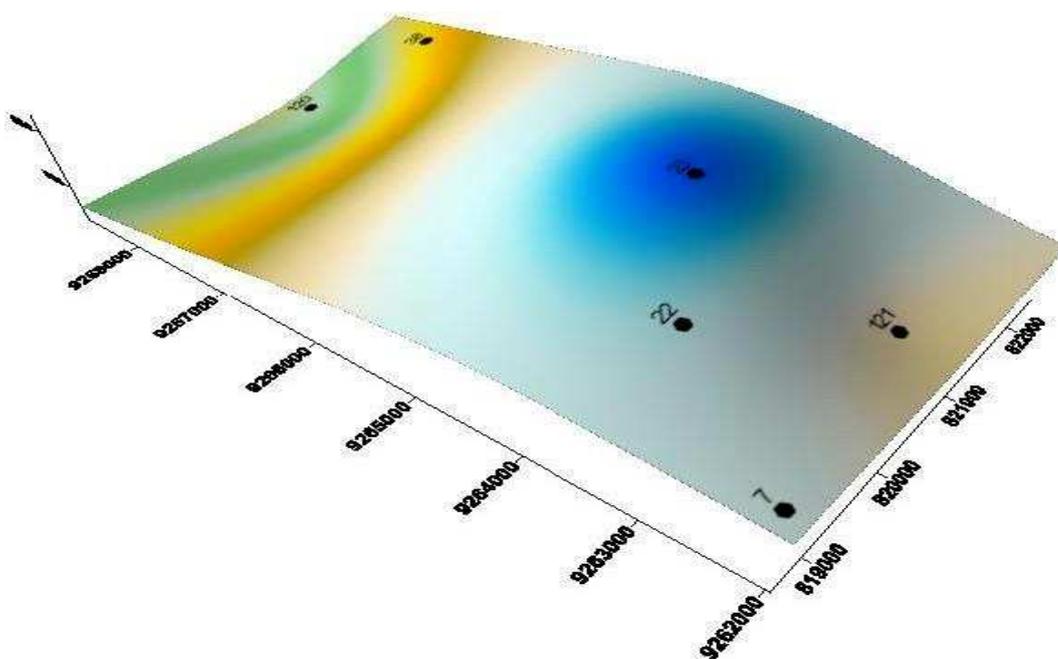
Fonte: Própria (2023).

Figura 45: Mapa potenciométrico da região 1 indicada na figura 44.



Fonte: Própria (2023).

Figura 46: Mapa potenciométrico da região 2 indicada na figura 44.

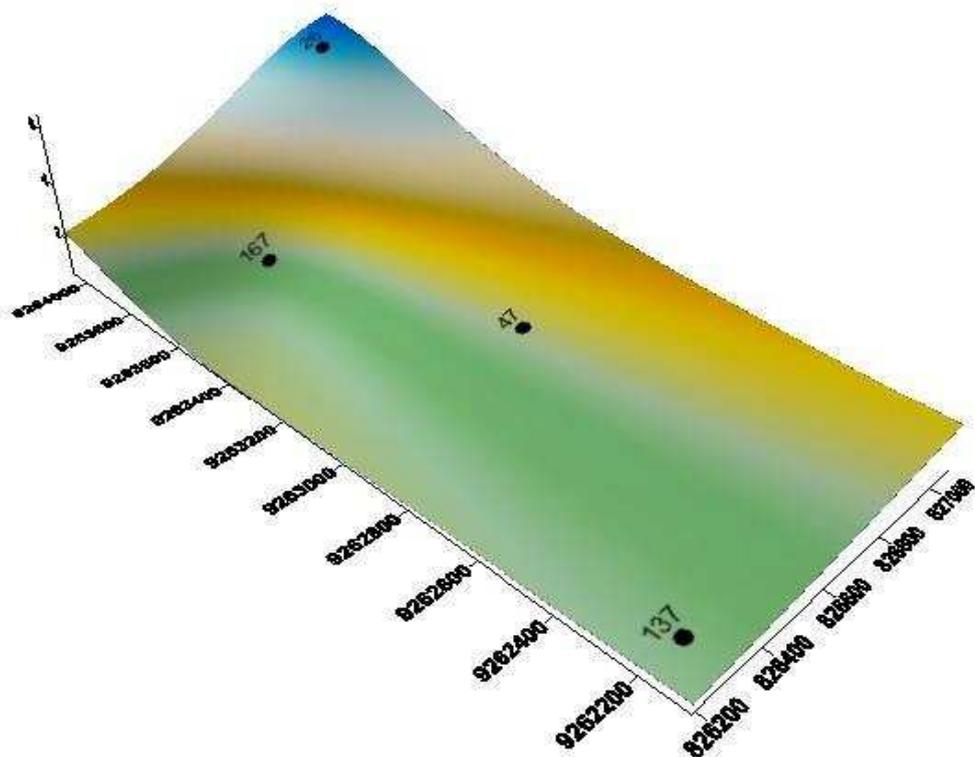


Fonte: Própria (2023).

Através dos mapas foi possível atestar que o fluxo de água subterrânea segue da ocorrência sedimentar para o cristalino, demonstrando a importância da formação sedimentar para o volume de água armazenado no aquífero cristalino. Apesar do pequeno número de poços perfurados na área sedimentar fica evidente sua contribuição para aqueles perfurados no cristalino, que são a maioria no estado da Paraíba.

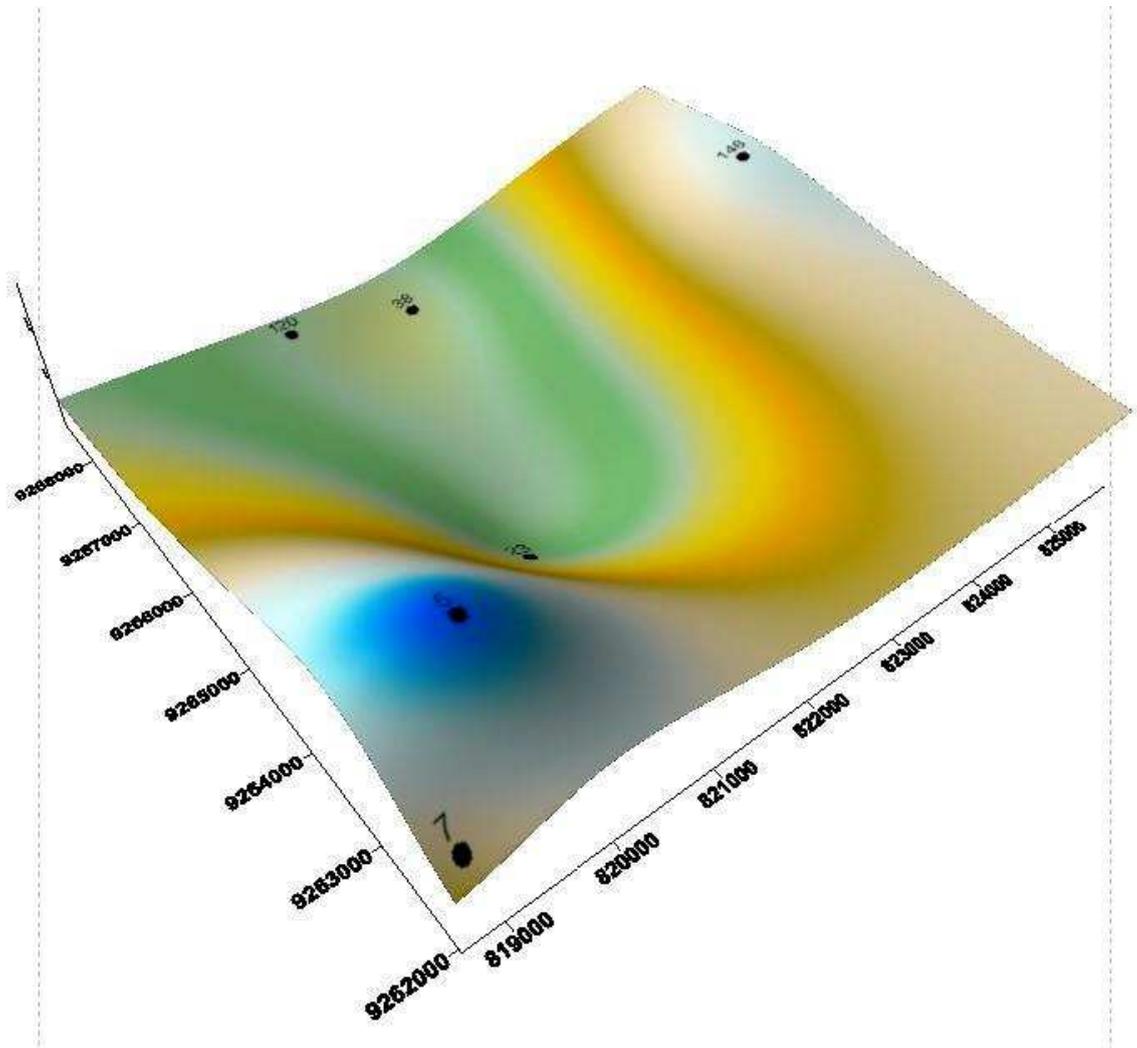
Com relação aos mapas de vazão das porções dos municípios de Barra de Santa Rosa (Figura 47) e Cuité (Figura 48) não foi possível estabelecer uma relação quanto a esse aspecto entre as regiões sedimentar e cristalina.

Figura 47: Mapa do parâmetro vazão da região 1 indicada na figura 44.



Fonte: Própria (2023).

Figura 48: Mapa do parâmetro vazão da região 2 indicada na figura 44.



Fonte: Própria (2023).

Apesar de poços em aquíferos sedimentares geralmente possuírem melhores vazões, também podem ser obtidas vazões satisfatórias no cristalino, caso seja interceptada alguma fratura. A heterogeneidade presente nos aquíferos cristalinos acarreta justamente essa variação entre vazões dos poços a depender do local de perfuração. Esse fenômeno foi observado no local de pesquisa, no qual alguns poços apresentaram vazões maiores no cristalino. Atribuímos isso possivelmente a questão mencionada.

5.1.4 HIDROQUÍMICA

Para análise dos dados hidroquímicos foi realizada uma estatística descritiva separadamente para as amostras de água da região sedimentar e para as docrystalino. No mais foram elaborados gráficos e analisadas as correlações entre parâmetros. As tabelas 4 e 5 mostram o sumário estatístico de ambas as áreas.

Tabela 4: Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas no cristalino próximo a Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.

Variável	Mín	Máx	Média	Mediana	Intervalo	DP	CV	Contagem
pH	6,89	8,6	7,55	7,59	1,71	0,47	6%	17
ORP	61,6	106,7	79,85	78,1	45,1	11,89	15%	17
Condutividade	966,00	17860,00	6850,85	5813,00	16894,00	3741,91	55%	27
STD	483,00	11430,40	3870,06	3084,80	10947,40	2405,35	62%	27
Salinidade	0,48	6,33	3,20	3,05	5,85	1,61	50%	17
Turbidez	0,04	2,77	0,40	0,07	2,73	0,71	179%	17
Cor	0	10	4,25	3,5	10	3,63	85%	4
Dureza em cálcio	50,1	1125	565,94	492,8	1074,9	335,46	59%	17
Dureza em magnésio	40,9	1750	630,77	584,6	1709,1	419,23	66%	17
Dureza total	295,6	3668	1498,92	1260	3372,4	819,29	55%	17
sódio	144,8	1355,6	815,25	880,3	1210,8	432,99	53%	4
Potássio	4	47,7	16,08	15,3	43,7	10,55	66%	17
Alcalinidade total	50	592	172,59	97	542	188,71	109%	17
Sulfato	65,2	682,8	298,04	270	617,6	163,63	55%	17
Cloreto	76,7	4277,8	1976,52	1999,94	4201,1	1166,33	59%	17
Bicarbonato	40	592	443	570	552	232,95	53%	4

Nota: Mín=Mínimo, Máx=Máximo, DP=Desvio padrão, CV= Coeficiente de variação, STD=Sólidos totais dissolvidos, ORP= Potencial de oxi-redução, pH=Potencial de Hidrogênio.

Tabela 5: Sumário estatístico dos parâmetros hidroquímicos das amostras de água coletadas na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.

Váriável	Mín	Máx	Média	Mediana	Intervalo	DP	CV	Contagem
pH	5,70	6,17	5,94	5,94	0,47	0,24	4%	2
ORP	190	486,6	304,33	236,4	296,6	130,27	43%	3
Condutividade	698	9290	3793,00	1391	8592	3897,25	103%	3
STD	349	4645	1896,33	695	4296	1948,73	103%	3
Salinidade	0,34	5,19	2,07	0,69	4,85	2,21	107%	3

Nota: Mín=Mínimo, Máx=Máximo, DP=Desvio padrão e CV= Coeficiente de variação, STD=Sólidos totais dissolvidos, ORP= Potencial de oxi-redução. pH=Potencial de Hidrogênio.

Potencial de Hidrogênio - pH:

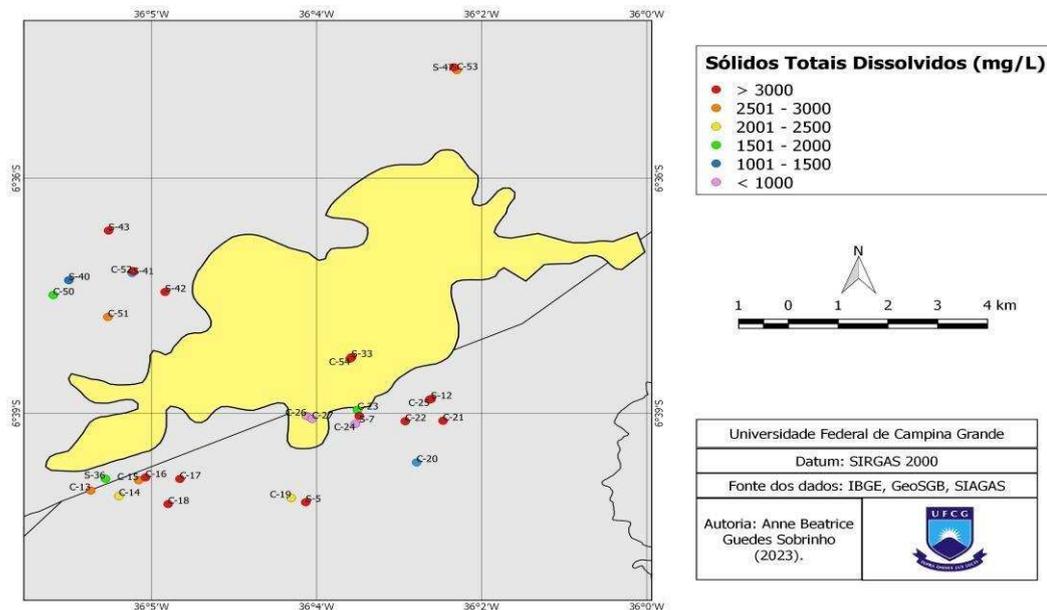
Os valores médios de pH da região sedimentar e do seu respectivo entorno - cristalino, apresentaram diferença considerável. Enquanto que na primeira o pH médio é 5,94, classificando-se as águas subterrâneas como ácidas, na área do cristalino, podem ser classificadas como ligeiramente neutras, uma vez que seu pH médio é 7,55. Para ambas as áreas consistem no parâmetro de menor variabilidade (CV = 4% e 6%).

Sólidos Totais Dissolvidos - STD:

A maior concentração média de STD encontra-se no cristalino com 3870,06 mg/L. A média de sólidos totais dissolvidos da formação sedimentar perfaz 1896,33 mg/L. De maneira geral, aquíferos porosos tendem a apresentar menor teor de sólidos dissolvidos se comparado aos aquíferos fraturados constituídos de rochas cristalinas, onde esse parâmetro é afetado por questões da própria litologia, estruturas geológicas e tempo de residência. A diferença nos resultados de STD nos poços da região sedimentar merece ser destacada (CV = 103%).

A variabilidade espacial desse parâmetro não nos permite definir precisamente regiões de maior ou menor teor de STD (Figura 49). Entretanto, fica clara a predominância de concentrações superiores a 2500 mg/L, valor bastante superior ao máximo permitido pela portaria de potabilidade GM/MS n° 888, cujo VMP (valor máximo permitido) é 500 mg/L.

Figura 49: Distribuição dos sólidos totais dissolvidos na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno.



Fonte: Própria (2023).

Sendo assim, maior parte das amostras de água estão variando entre ligeiramente salobras a moderadamente salobras (1000 a 10000 mg/L) (tabela 6).

Tabela 6: Classificação da água quanto ao STD.

Tipo	STD (mg/L)
Doces	< 1000
Ligeiramente Salobras	1000 – 3000
Moderadamente Salobras	3000 – 10000
Salgadas	10000 – 100000
Salmouras	> 100000

Fonte: McNeely *et al.*, (1979).

Condutividade elétrica:

A condutividade média na região sedimentar foi 3793 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e no cristalino 6850, 85 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Como os sólidos totais dissolvidos possuem relação direta com a condutividade, isto é, quando maior a quantidade de sólidos presentes na água, maior a probabilidade de se conduzir corrente elétrica, relações semelhantes observadas no parâmetro anterior – STD, podem ser estendidas para condutividade. Igualmente,

observa-se diferença nos valores de condutividade na formação sedimentar onde temos um valor mínimo de 698 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e um máximo de 9290 $\mu\text{S}/\text{cm}$, heterogeneidade não comum em ambientes sedimentares.

As figuras 50 a 56 consistem de gráficos de dispersão, “r” é o chamado coeficiente de correlação de Pearson, um índice utilizado para avaliar a relação entre variáveis quantitativas onde os intervalos de classificação encontram-se elencados na tabela 7. Essas associações guiarão as interpretações para todos os parâmetros que utilizarem esse tipo de análise. Ainda vale salientar que os gráficos são de dados apenas da região do cristalino, onde temos análises químicas (cálcio, magnésio, potássio...).

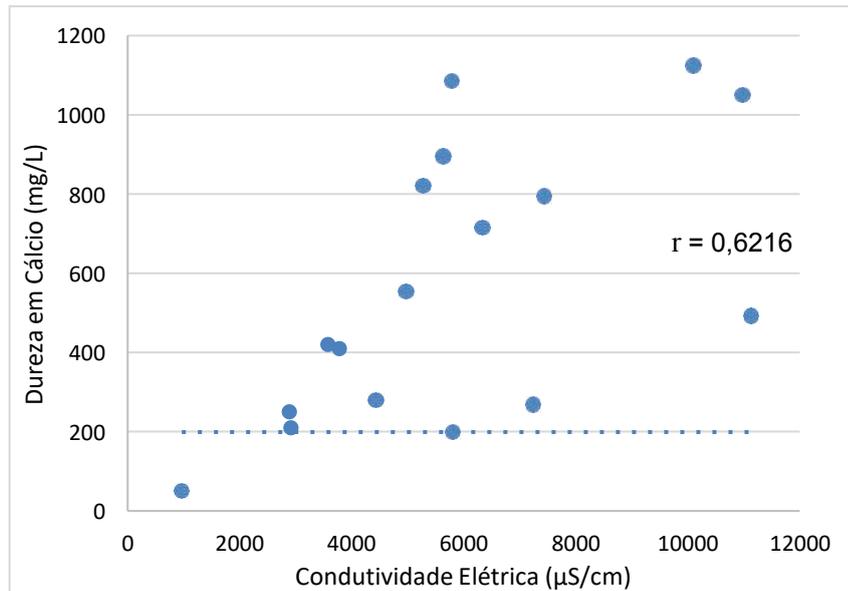
Tabela 7: Intervalos de “r” para o coeficiente de correlação.

Coeficiente de correlação	Correlação
$r = 1$	Perfeita positiva
$0,8 \leq r < 1$	Forte positiva
$0,5 \leq r < 0,8$	Moderada positiva
$0,1 \leq r < 0,5$	Fraca positiva
$0 < r < 0,1$	Ínfima positiva
0	Nula
$-0,1 < r < 0$	Ínfima negativa
$-0,5 < r \leq -0,1$	Fraca negativa
$-0,8 < r \leq -0,5$	Moderada negativa
$-1 < r \leq -0,8$	Forte negativa
$r = -1$	Perfeita negativa

Fonte: Santos (2007).

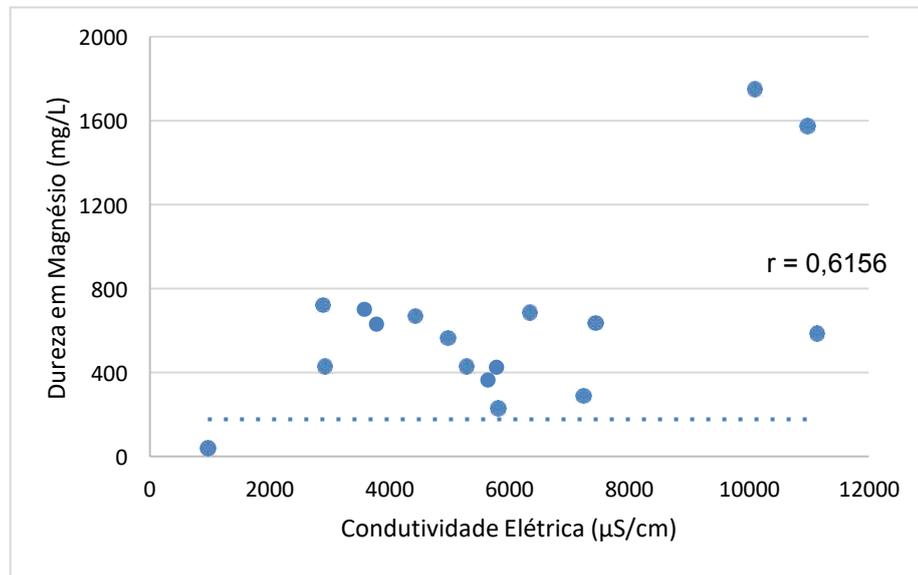
Conforme visualizamos nos gráficos 50 a 56 o cálcio e magnésio possuem uma correlação moderada positiva, enquanto que sódio, cloreto e sulfato uma correlação forte positiva. Dessa forma, já que esses parâmetros possuem correlação positiva com a condutividade são os responsáveis pela salinidade da água. Já o potássio e bicarbonato mostram uma correlação fraca negativa com a condutividade para essa região, assim não são parâmetros atuantes no processo de salinização.

Figura 50: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em cálcio.



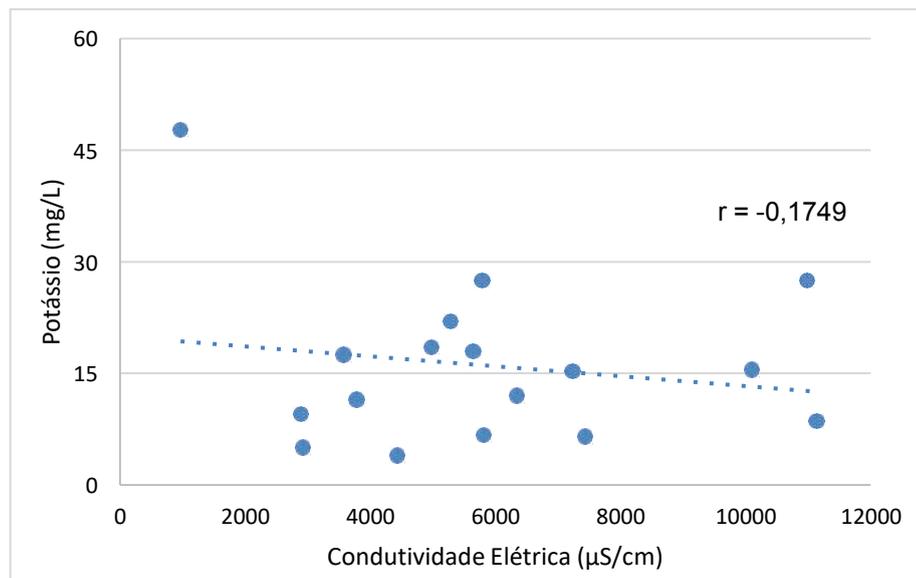
Fonte: Própria (2023).

Figura 51: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em magnésio.



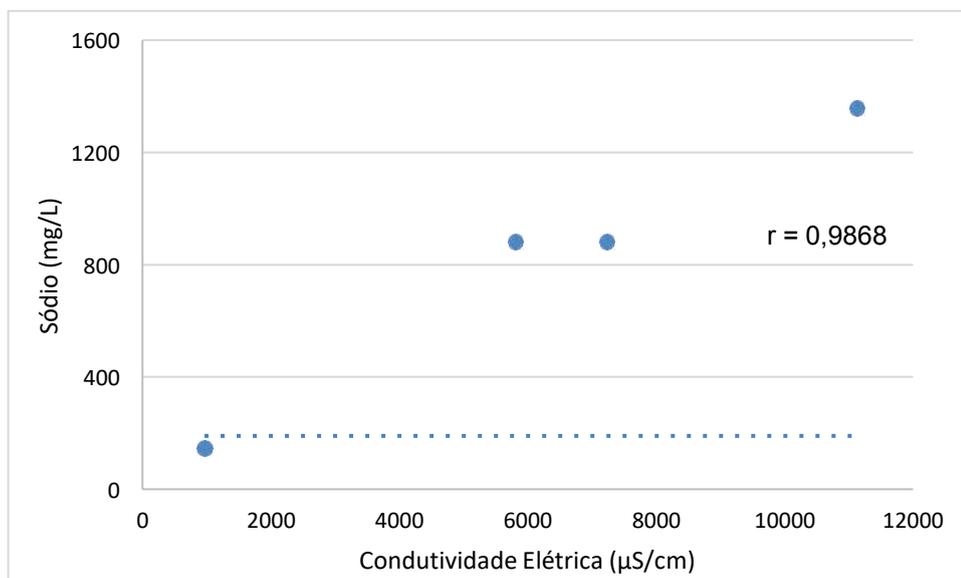
Fonte: Própria (2023).

Figura 52: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e potássio.



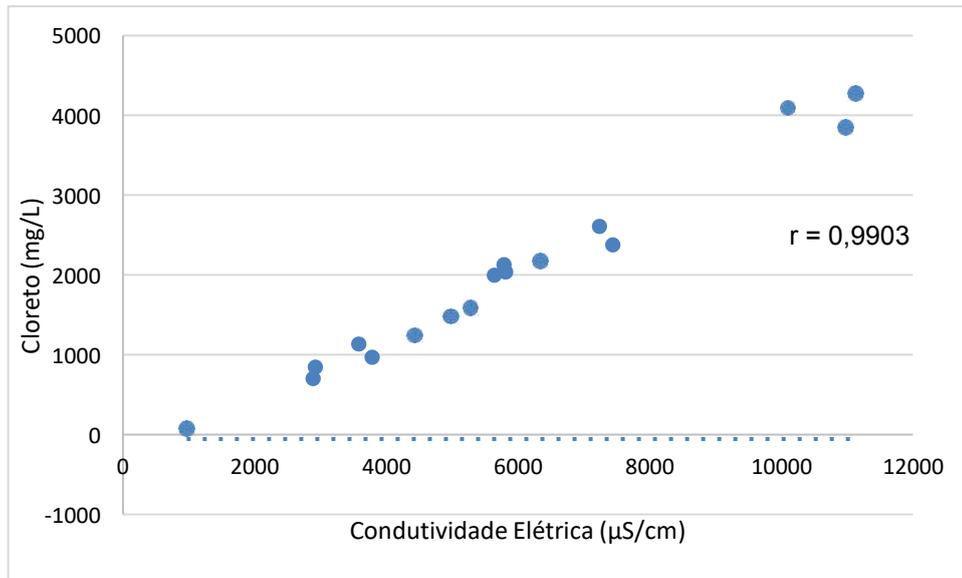
Fonte: Própria (2023).

Figura 53: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sódio.



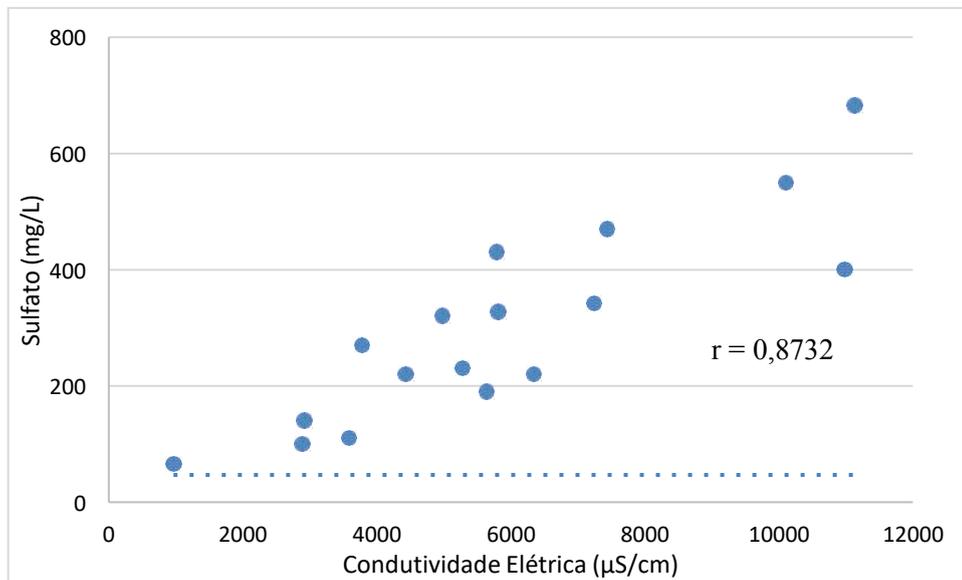
Fonte: Própria (2023).

Figura 54: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e cloreto.



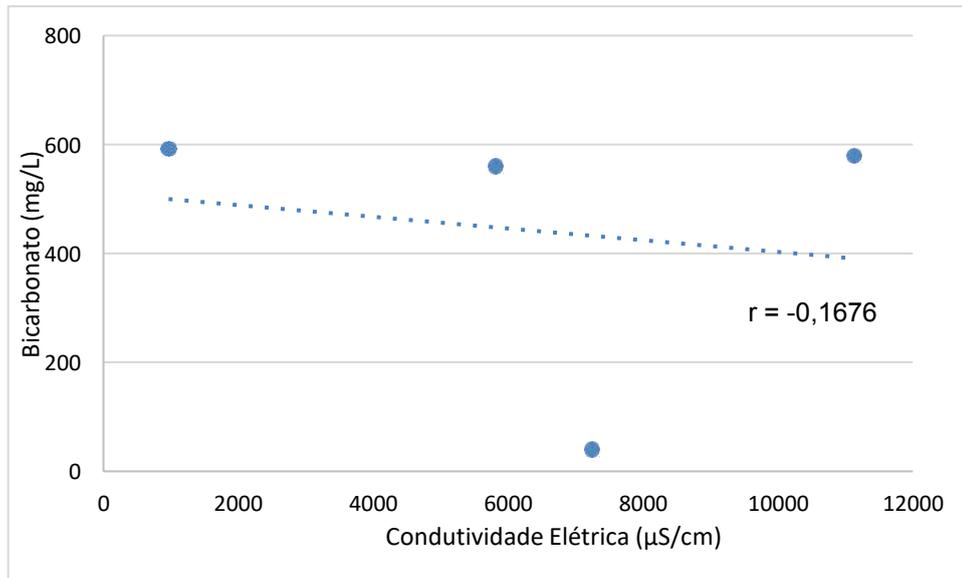
Fonte: Própria (2023).

Figura 55: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sulfato.



Fonte: Própria (2023).

Figura 56: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e bicarbonato.



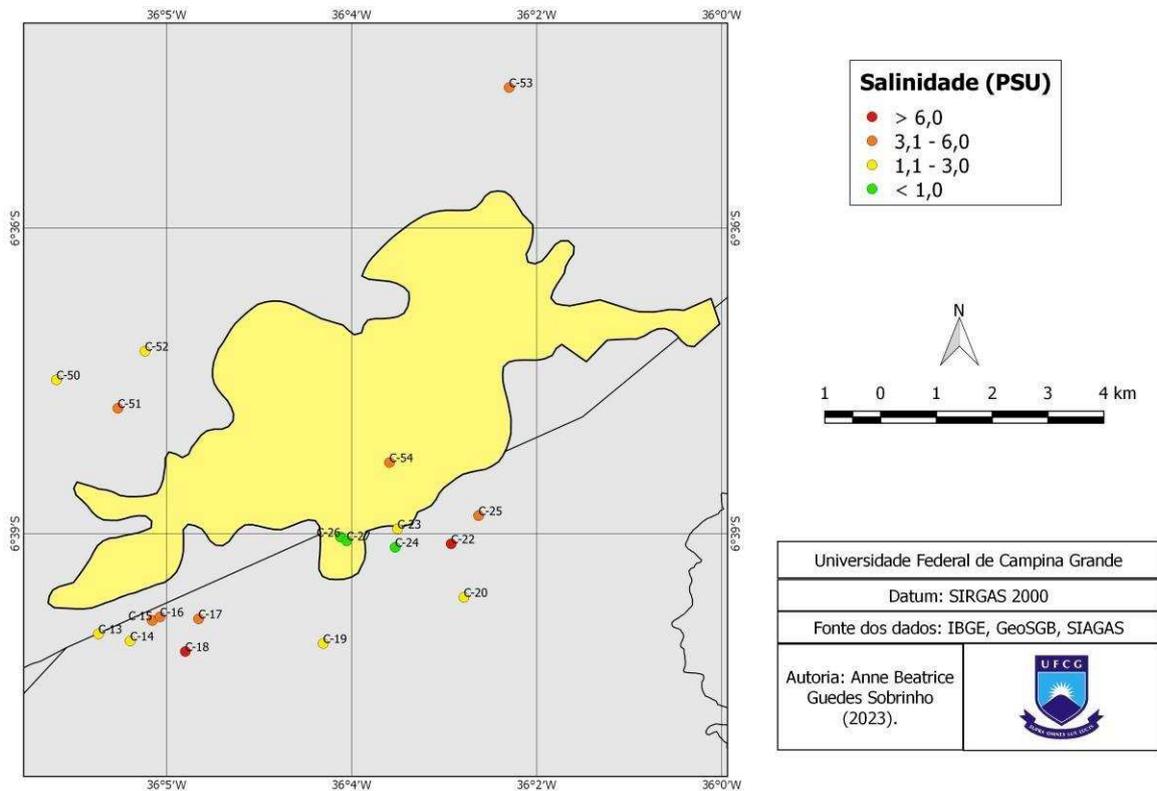
Fonte: Própria (2023).

Salinidade:

Os valores de salinidade para a formação sedimentar mostraram-se variando entre um valor mínimo de 0,34 PSU a um valor máximo de 5,19 PSU, perfazendo uma média de 2,07 PSU. Enquanto no cristalino a variação ficou de 0,48 PSU a 6,33 PSU com média de 3,20 PSU.

A salinidade também mostra oscilação na região de estudo, não sendo possível definir com precisão áreas mais ou menos salinas (Figura 57).

Figura 57: Distribuição da salinidade na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno.



Fonte: Própria (2023).

Potencial de Oxidação – Redução – ORP

O potencial de oxidação-redução na região sedimentar apresentou uma média de 304,33, enquanto que no cristalino foi 79,85. Todos os resultados para esse parâmetro foram positivos, apontando para o ambiente oxidante onde as águas se encontram.

Jardim (2014) afirma que esse parâmetro tende a afetar a mobilidade de elementos químicos como ferro, manganês, carbono, nitrogênio e enxofre. Este último elemento químico citado, pode estar presente como o íon sulfato de mobilidade reduzida num ambiente oxidante, e alterar sua mobilidade e toxicidade quando este mesmo ambiente passar para uma condição anóxida, na qual o sulfato poderá ser reduzido a sulfeto e eventualmente ao gás sulfídrico.

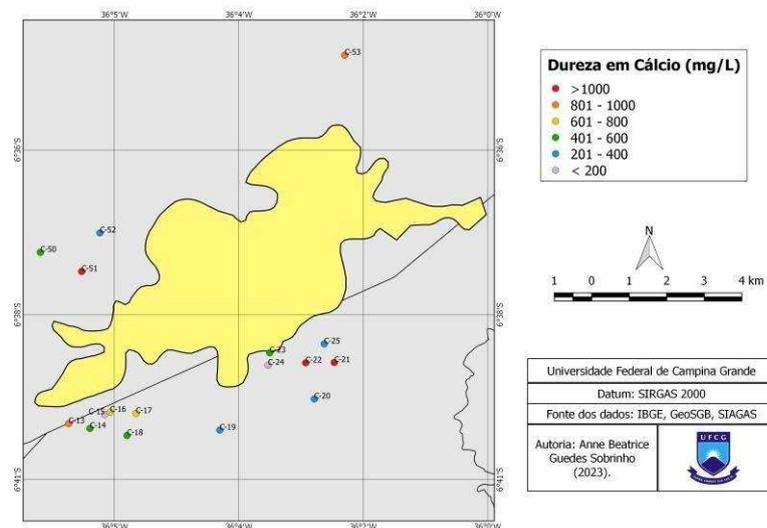
Dureza em cálcio e magnésio

O cálcio e o magnésio são os principais cátions responsáveis pela dureza total da água. Esses parâmetros foram avaliados apenas no entorno da formação sedimentar, ou seja, na região do cristalino. A dureza em cálcio mostrou-se variando de 50,1 mg/L a 1125 mg/L cuja média foi 565,94 mg/L. A dureza em magnésio, por sua vez, apresentou um valor mínimo de 40,9 mg/L e um máximo de 1750 mg/L com média 630,77 mg/L.

A presença significativa de cálcio e magnésio na água pode ser atribuída possivelmente à litologia da área formada por ortognaisses granodioríticos, migmatitos e micaxistos que em sua composição mineralógica possuem tais elementos químicos.

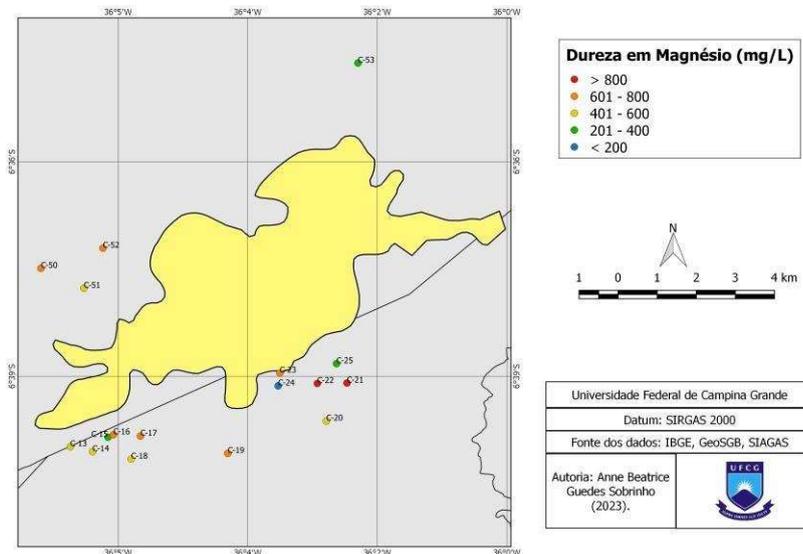
A dureza em cálcio e em magnésio também se mostra variando na região de estudo (Figuras 58 e 59).

Figura 58: Distribuição da dureza em cálcio na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno.



Fonte: Própria (2023).

Figura 59: Distribuição da dureza em magnésio na Formação Sedimentar Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa - Cuité e seu entorno.



Fonte: Própria (2023).

Dureza total:

Segundo a classificação de dureza proposta por Custódio e Llamas (2001) podendo ser vista na tabela 8, 100% das amostras de água podem ser classificadas como muito duras, tendo em vista que suas concentrações foram superiores a 200 mg/L. A dureza total média foi 1498,92 mg/L. Considerando que o VMP para esse parâmetro segundo a portaria de potabilidade é de 300 mg/L a água subterrânea na localidade não atende esse requisito.

Tabela 8: Classificação da água quanto a dureza total.

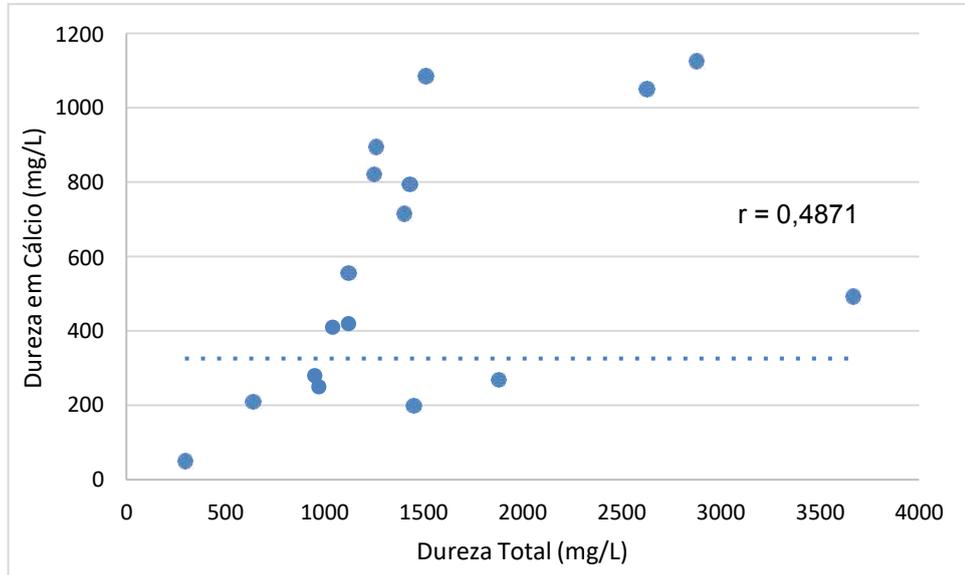
Tipo	Teor como CaCO ₃ (mg/L)
Branda	< 50
Pouco dura	50 – 100
Dura	100 – 200
Muito dura	> 200

Fonte: Custódio & Llamas, 2001.

De acordo com os gráficos mostrados nas figuras 60 e 61 o cálcio possui uma correlação fraca positiva e o magnésio moderada positiva com os valores de dureza

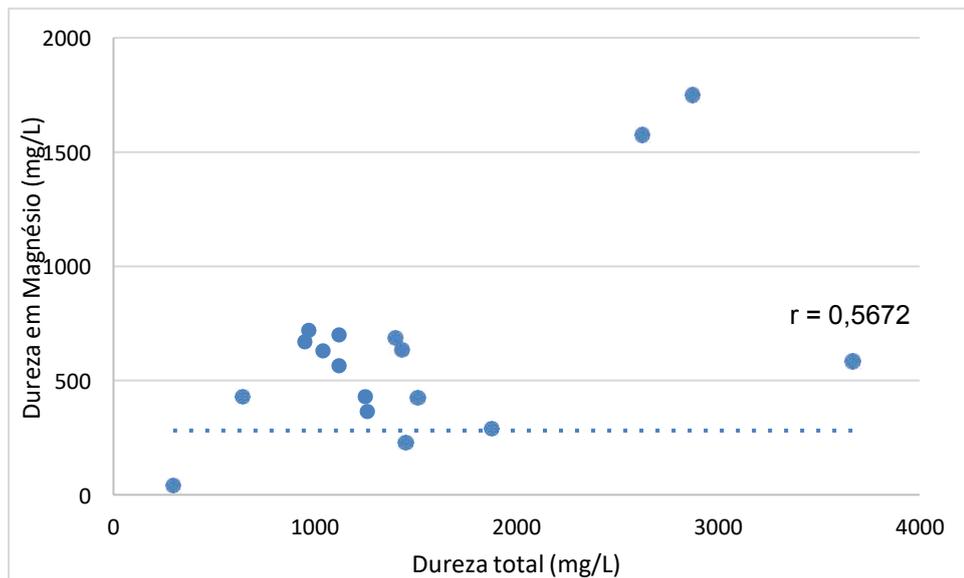
total obtidos, sendo o magnésio o elemento mais responsável pelos valores desse parâmetro ($r = 0,5672$).

Figura 60: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em cálcio.



Fonte: Própria (2023).

Figura 61: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em magnésio.



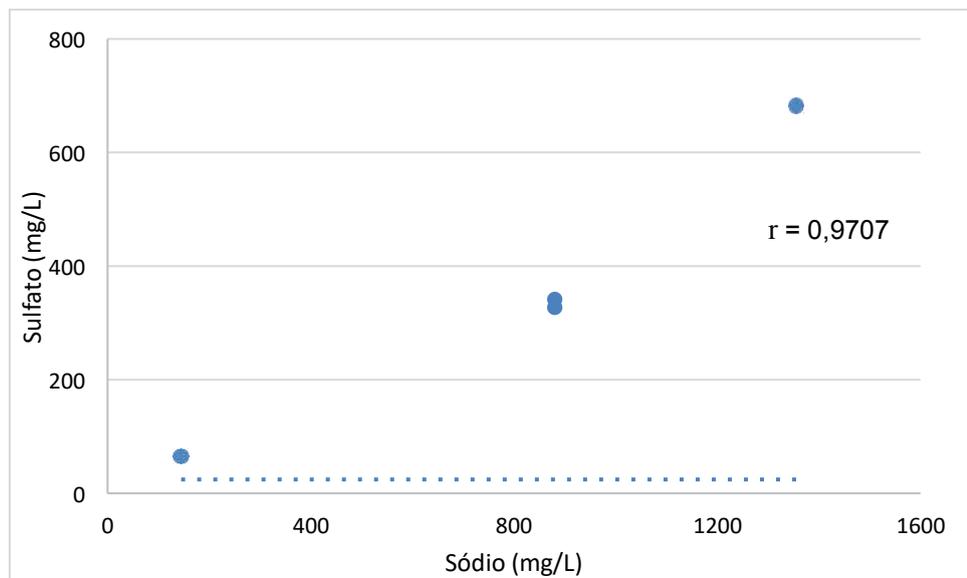
Fonte: Própria (2023).

Sódio

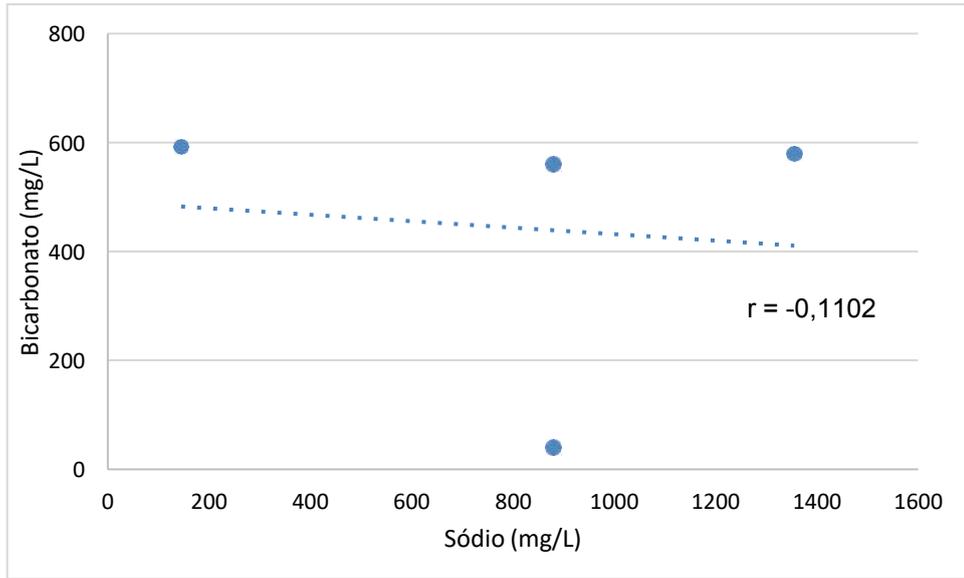
O sódio é um elemento abundante nas águas subterrâneas. A concentração média obtida no cristalino foi 815,25 mg/L. A variação desse parâmetro ficou entre 144,8 mg/L e 1355,6 mg/L. O VMP segundo a portaria de potabilidade é 200 mg/L, sendo assim, em média essas águas não são próprias para consumo humano quanto ao teor de sódio.

De acordo com Falcão (1978) no resíduo, o sódio pode estar na forma de sulfato, bicarbonato, nitrato ou cloreto. Os gráficos atestam que o sulfato e o cloreto possuem uma correlação forte positiva com o sódio (aproximadamente 1), enquanto que o nitrato fraca positiva e o bicarbonato fraca negativa.

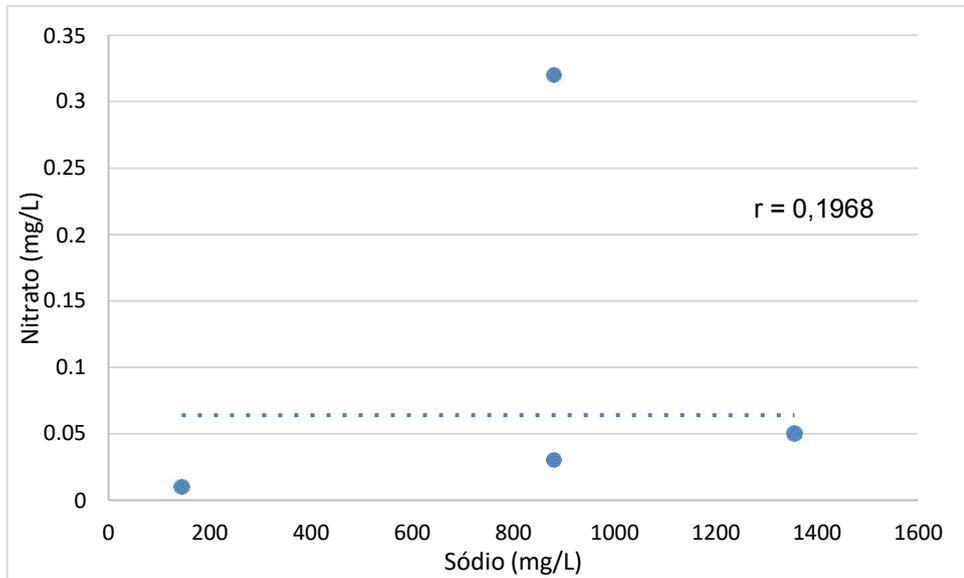
Figura 62: Gráfico de dispersão entre sódio e sulfato.



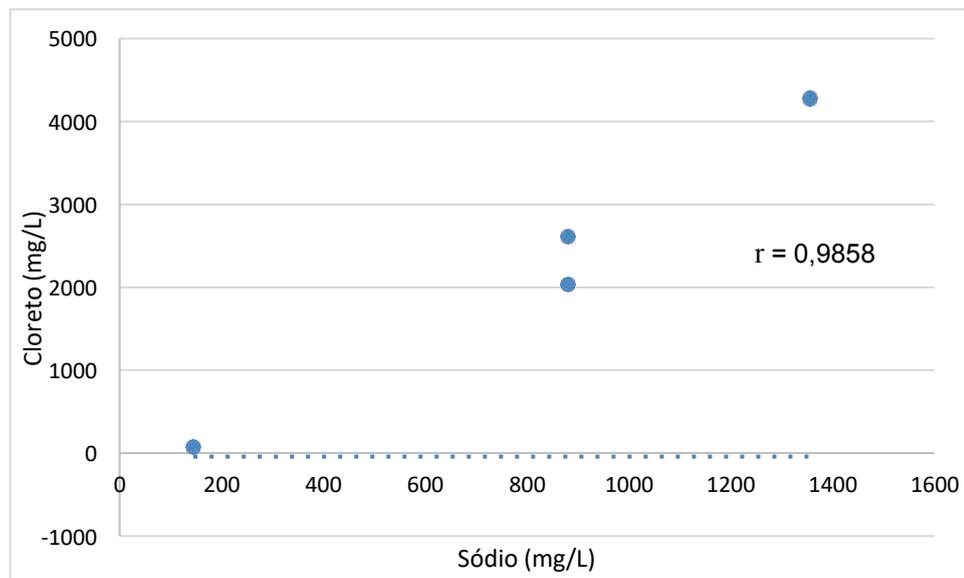
Fonte: Própria (2023).

Figura 63: Gráfico de dispersão entre sódio e bicarbonato.

Fonte: Própria (2023).

Figura 64: Gráfico de dispersão entre sódio e nitrato.

Fonte: Própria (2023).

Figura 65: Gráfico de dispersão entre sódio e cloreto.

Fonte: Própria (2023).

Potássio

O potássio também é um importante íon presente nas águas subterrâneas, porém é geralmente encontrado em concentrações menores que outros cátions principais como cálcio e magnésio. Dessa forma, sua concentração média no cristalino foi 16,08 mg/L. A portaria de potabilidade não estabelece um valor máximo para esse parâmetro.

Cloreto, sulfato e bicarbonato

Consistem os principais ânions presentes nas águas subterrâneas e serão abordados de maneira conjunta. Todos foram analisados apenas no cristalino.

O íon bicarbonato não se oxida nem se reduz em águas naturais, porém pode precipitar com muita facilidade como carbonato de cálcio (CaCO_3) e chegar a concentrações de 800 mg/L. É benéfico aos vegetais, principalmente na forma de bicarbonato de cálcio (FEITOSA, 2000). Nas amostras apresentou valor mínimo de 40 mg/L e máximo de 592 mg/L com média de 443 mg/L.

A predominância do bicarbonato sobre os outros ânions indicaria que a água não seria de circulação regional com longos tempos de residência (CUSTODIO; LLAMAS, 1983). Considerando que foi observado o padrão contrário para os valores

obtidos de bicarbonato em comparação com cloreto e sulfato, podemos inferir que provavelmente as águas analisadas possuem tempo de residência elevado, fator esse também responsável pela alta salinidade da água.

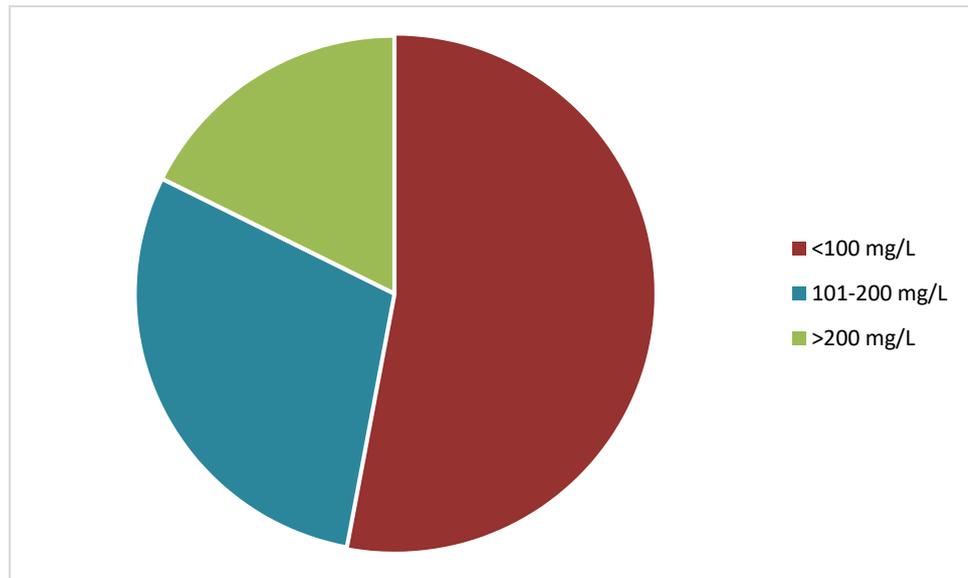
O cloreto mostrou-se variando entre 76,7 mg/L a 4277,8 mg/L e média 1976,52 mg/L. A portaria de potabilidade GM/MS n° 888 estabelece 250 mg/L como VMP para esse parâmetro. No total das dezessete amostras analisadas, apenas uma apresentou concentração inferior a 250 mg/L. De acordo com Kresic (2006), valores elevados podem indicar mistura da água salina em aquíferos costeiros ou poluição antropogênica, hipóteses pouco prováveis neste caso, pois não se trata de um aquífero costeiro, além disso, não há instalações industriais nem grandes concentrações urbanas na região.

O sulfato, por sua vez, variou entre 65,2 mg/L a 682,8 mg/L cuja média foi 298,04 mg/L. A presença de sulfato nas águas está relacionada à oxidação de sulfetos nas rochas e à lixiviação de compostos sulfatados como gipsita e anidrita (HEM, 1991).

Alcalinidade:

A alcalinidade é definida como a capacidade de uma água neutralizar ácidos, sendo uma consequência direta da presença e/ou ausência de carbonatos, bicarbonatos e hidróxidos (FILGUEIRAS, 2016). Os valores de alcalinidade na região cristalina variaram entre 50 mg/L e 592 mg/L. Mais da metade das amostras tiveram valores de alcalinidade inferior a 100 mg/L (figura 66).

Figura 66: Disposição da concentração de alcalinidade.



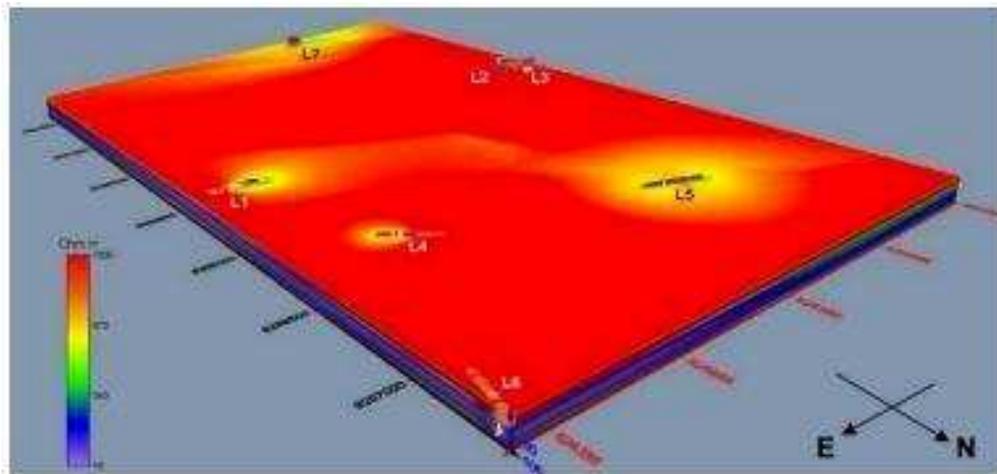
Fonte: Própria (2023).

De acordo com Colombo (2013) uma água que possui alta alcalinidade apresenta valores acima de 2000 mg/L de CaCO_3 enquanto que a baixa alcalinidade aponta para valores inferiores a 20mg/L de CaCO_3 . Sendo assim, uma vez que a alcalinidade mínima obtida nas amostras foi 50 mg/L pode-se dizer que tem-se predominantemente uma alcalinidade intermediária.

5.1.5 Cálculo de reserva

Os valores de resistividade da rocha saturada de água (R_o) são extraído do modelo pseudo3D (Figura 67), enquanto o a resistividade da água (R_w) que satura a rocha é obtida através da medição de sua condutividade elétrica. A condutividade média da água produzida nos poços investigados é 3793 $\mu\text{S}/\text{cm}$, tendo em vista que a resistividade é o inverso da condutividade, temos o resultado de 2,64 ohm.m. Considerando que o rocha saturada com água apresenta resistividade elétrica entre 40 ohm.m e 300 ohm.m, a equação pode ser aplicada aos dados de resistividade elétrica para estimar o porosidade saturada em cada *voxel* do modelo pseudo3D. Assim, o volume de água contido na unidade condutora do modelo de rocha é calculado.

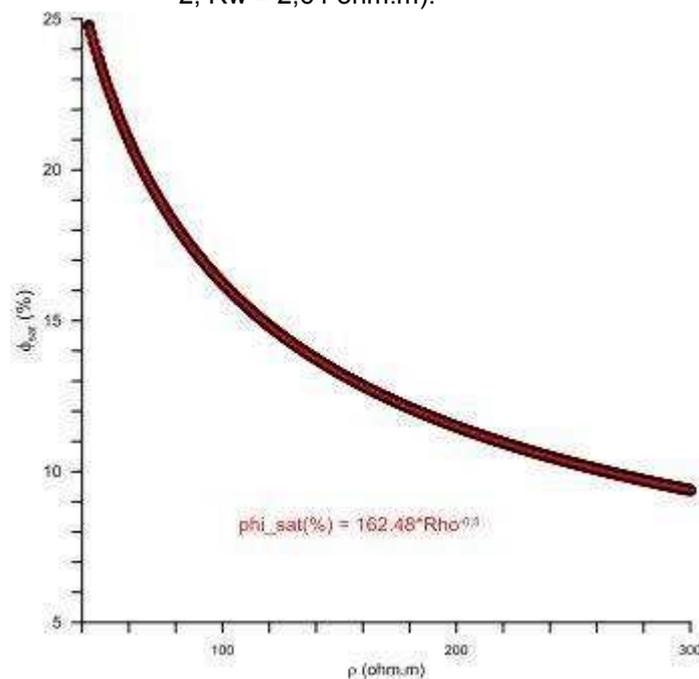
Figura 67: Pseudo-modelo 3D de resistividade elétrica.



Fonte: Própria (2023).

A Figura 68 apresenta a porosidade saturada da rocha como função da resistividade elétrica da rocha nos pontos de profundidade onde esta última propriedade foi medida ao longo das linhas geofísicas. Essa relação foi obtida considerando que $a = 1$ e $m = 2$, que proporcionam valores de porosidade compatíveis com aqueles medidos nos testes petrofísicos. Após isso se aplicou uma função de regressão e com isso o volume pôde ser estimado.

Figura 68: Relação entre resistividade da rocha saturada e porosidade saturada em água ($a = 1$; $m = 2$; $R_w = 2,64 \text{ ohm.m}$).



Fonte: Própria (2023).

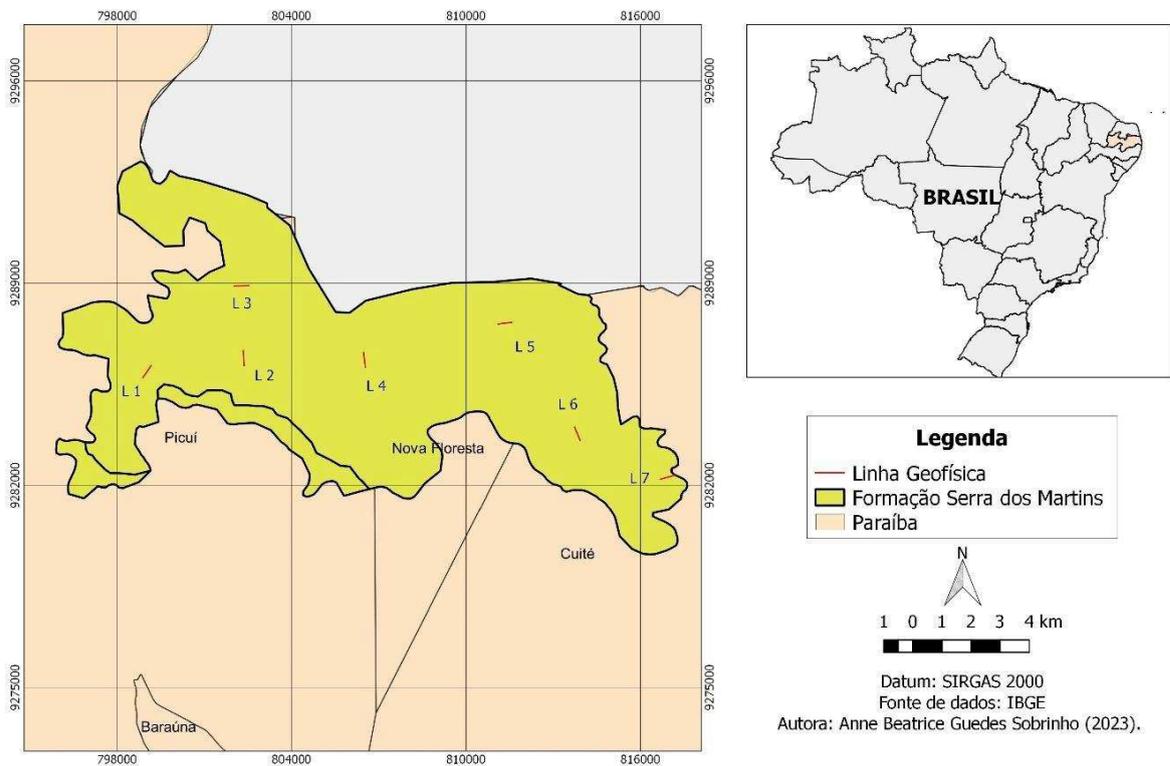
Foram estimados 65,3 milhões de cúbicos metros de reservas *in situ* de água obtidos dentro da área investigada (760 hectares). O cálculo proporcional para toda a área de ocorrência sedimentar (3.145 hectares) rende um volume aproximado de 270 milhões de metros cúbicos de água subterrânea. Vale salientar que esse valor representa uma estimativa e o que se consegue ser produzido de fato é um valor menor.

5.2 Ocorrência sedimentar em Nova Floresta / Picuí / Cuité

5.2.1 Geofísica

A figura 69 mostra localização das sete linhas geofísicas realizadas nessa ocorrência sedimentar da Formação Serra dos Martins.

Figura 69: Localização das linhas geofísicas na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta - Picuí - Cuité.

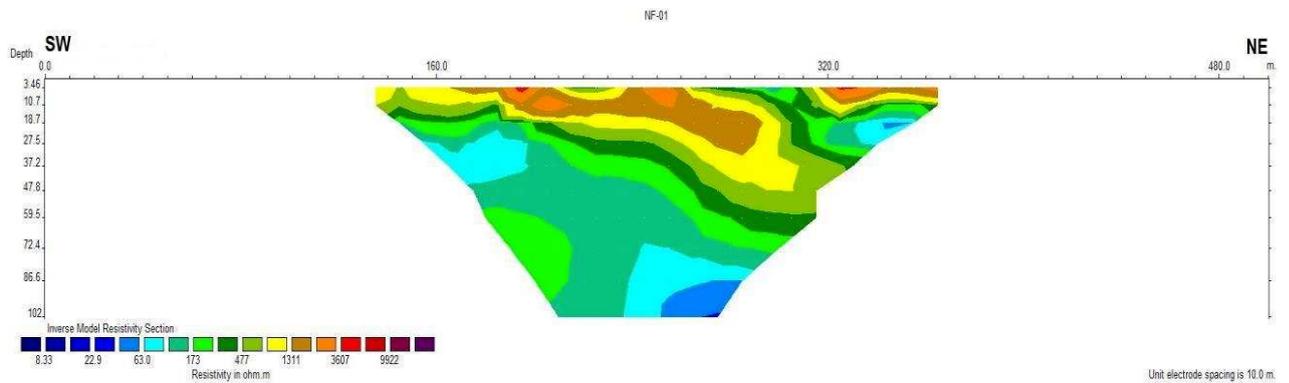


Fonte: Própria (2023).

Linha 01:

Através da seção geoeétrica da linha 1 (figura 70) observa-se de modo geral a predominância de camadas medianamente condutivas com ocorrência de zonas localizadas de alta e de baixas resistividades. Segundo Braga (2016) rochas sedimentares areno-argilosas saturadas em água apresentam resistividade elétrica entre 20 e 300 ohm.m. Diferentemente do que foi observado na ocorrência em Barra / Cuité, não observamos o padrão de duas camadas resistivas intercalada por uma camada condutiva, sugerindo uma geologia localmente mais complexa.

Figura 70: Seção geoeétrica da linha 1.



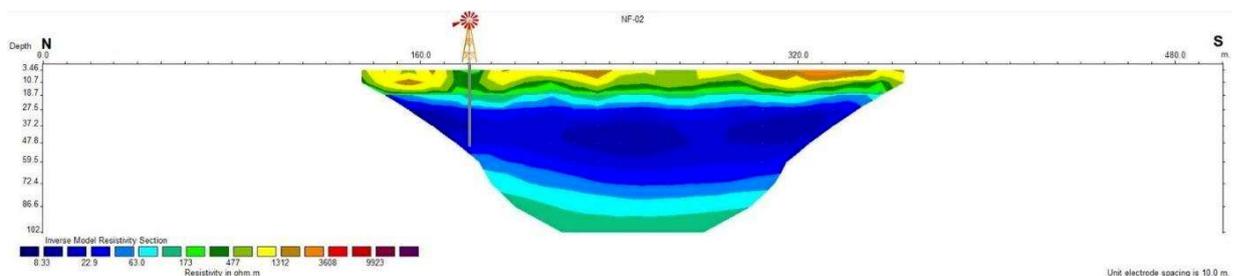
Fonte: Própria (2023).

Linha 02:

A seção geoeétrica da linha 2 (figura 71) mostra uma camada superficial mais resistiva, seguida de uma camada bastante condutiva atingida a partir de 20 m com aproximadamente 60 m de espessura e por fim, novamente uma pequena faixa medianamente resistiva.

Há um poço produtor deslocado em cerca de 100 m da posição indicada na seção. Segundo o proprietário a produção é 3000 litros/hora e o nível de água foi atingido a 23 m de profundidade, o que atesta o resultado da geofísica.

Figura 71: Seção geoeétrica da linha 02.

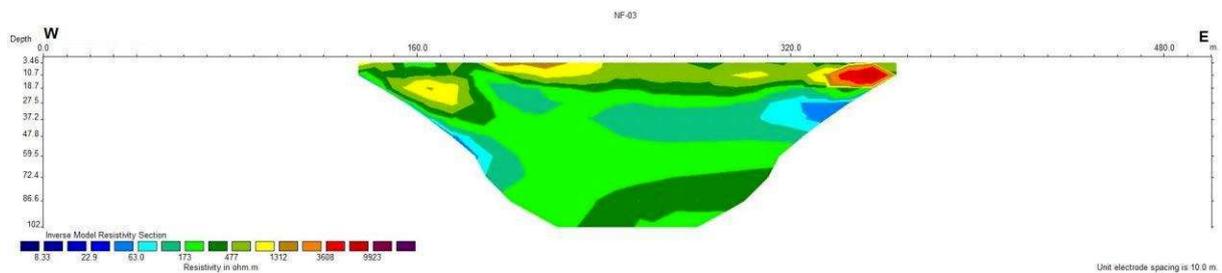


Fonte: Própria (2023).

Linha 03:

O comportamento da seção geoeétrica da linha 3 (figura 72) apresenta um padrão composto por uma camada superficial resistiva seguida por uma camada com valores medianos de resistividade se estendendo até o final da imagem, o que sugere nessa localidade uma pequena saturação em água.

Figura 72: Seção geoeétrica da linha 3.

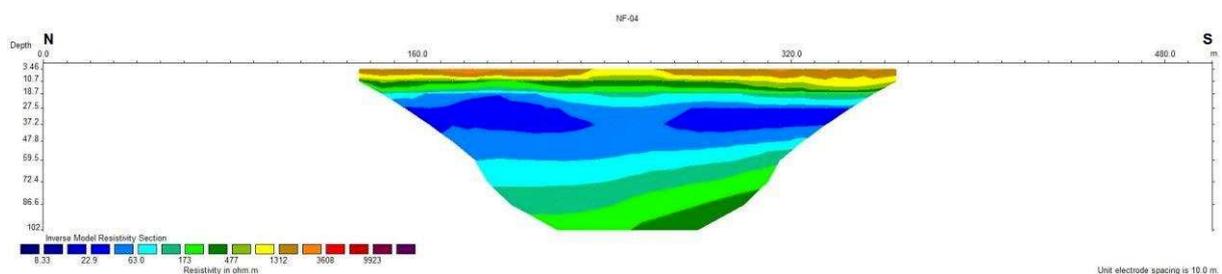


Fonte: Própria (2023).

Linha 04:

A seção geoeétrica da linha 4 (figura 73) mostra mais uma vez uma camada resistiva no topo até cerca de 20 m de profundidade, camada intermediária condutiva com aproximadamente 60 m de espessura e por último novamente uma camada medianamente resistiva.

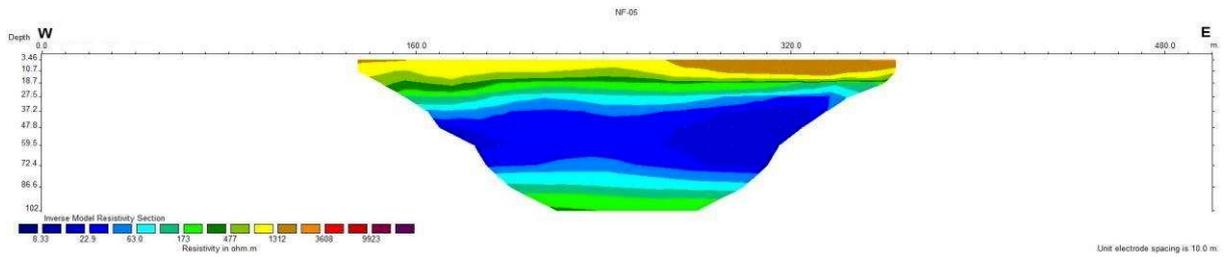
Figura 73: Seção geoeétrica da linha 4.



Fonte: Própria (2023).

Linha 05:

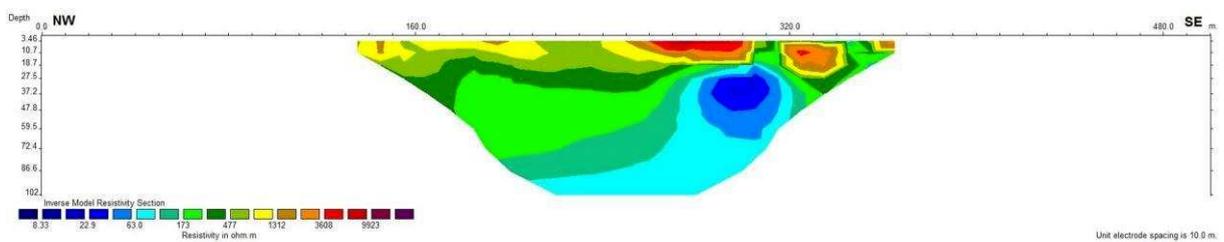
A seção geoeétrica da linha 5 (figura 74) exhibe padrão de comportamento similar ao que já vem sendo observado: camada superficial resistiva, camada intermediária condutiva entre aproximadamente 20 a 90 m de profundidade e base novamente medianamente resistiva.

Figura 74: Seção geolétrica da linha 05.

Fonte: Própria (2023).

Linha 06:

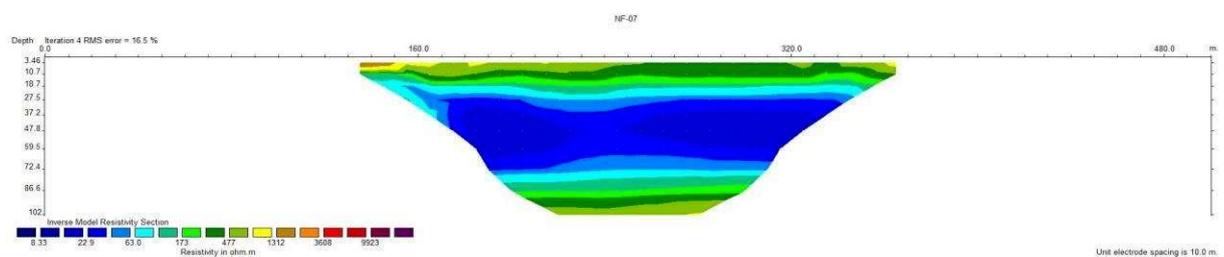
A seção geolétrica da linha 6 (figura 75) mostra um comportamento distinto, onde observa-se a camada resistiva do topo seguida da camada condutiva que ultrapassa os 100 m de profundidade, não havendo a camada resistiva da base.

Figura 75: Seção geolétrica da linha 6.

Fonte: Própria (2023).

Linha 07:

Observa-se o mesmo padrão (figura 76): camada resistiva no topo, condutiva na porção intermediária e resistiva novamente na base. Essa camada condutiva se inicia em cerca de 20 m de profundidade e possui aproximadamente 60 m de espessura, apontando para uma boa possibilidade de água nesse intervalo.

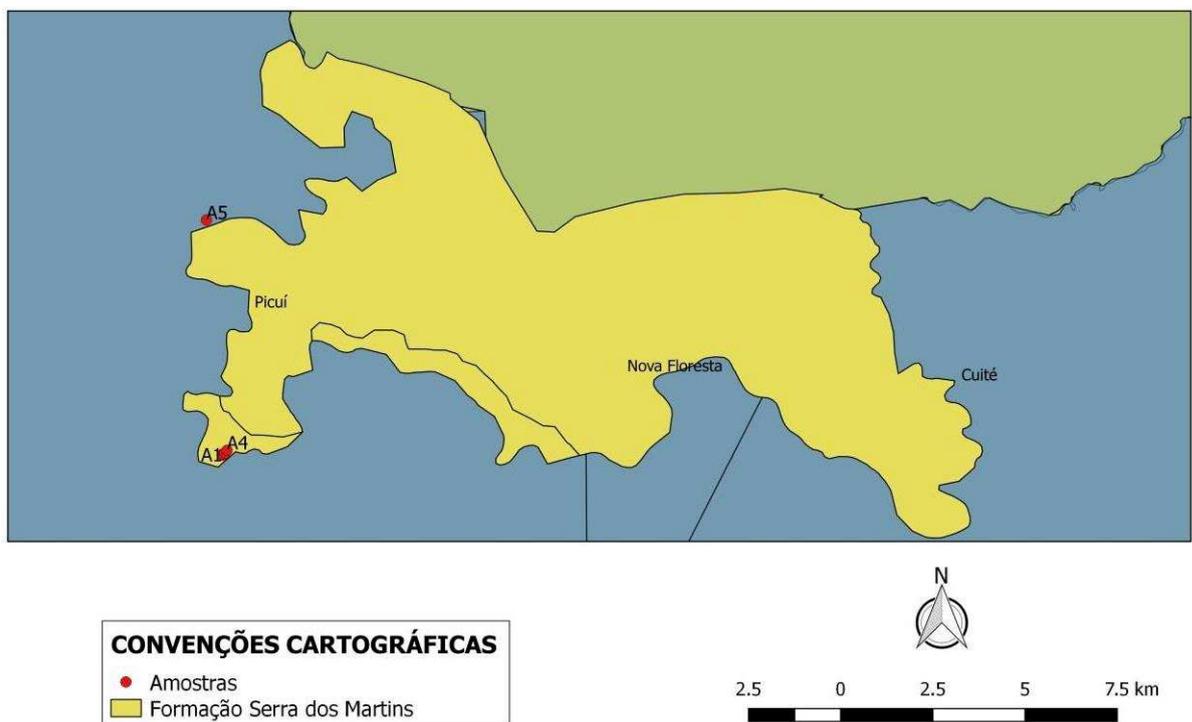
Figura 76: Seção geolétrica da linha 7.

Fonte: Própria (2023).

5.2.2 Análise petrofísica

Para o ensaio petrofísico dessa ocorrência da Formação Serra dos Martins seis amostras foram analisadas, cinco delas foram coletadas em um afloramento (A0 a A4) e a amostra A5 coletada em outro afloramento acerca de 6 km de distância. A figura 77 mostra a distribuição espacial das amostras.

Figura 77: Localização das amostras da Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

De acordo com a tabela 9 é possível visualizar que a porosidade destas amostras varia de 3,9% a 13,4%, resultando em uma porosidade média de 8,1%.

Tabela 9: Propriedades petrofísicas das amostras de rocha coletadas nos municípios de Cuité , Picuí e Nova Floresta.

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: Própria (2023).

Considerando os mesmos valores de referência para porosidade utilizados nas discussões da ocorrência anterior proposta por Filho & Nummer (2014), onde considera-se 5% um baixo, 10% um valor médio e 15% um valor alto de porosidade, observa-se que as amostras variaram em termos de porosidade entre valores baixos (66,67%) e valores intermediários (33,33%). Em linhas gerais podemos afirmar que a ocorrência localizada em Barra de Santa Rosa / Cuité apresenta valores mais elevados de porosidade quando comparada com a situada em Nova Floresta / Picuí / Cuité.

5.2.3 Hidroquímica

A tabela 10 mostra a estatística descritiva para os principais parâmetros hidroquímicos que foram discutidos para a ocorrência da formação sedimentar localizada em Cuité-Nova Floresta-Picuí.

Tabela 10: 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	Contagem
pH	4,42	8,50	6,03	6,05	4,08	0,93	15%	14
ORP	38,50	255,60	144,84	149,25	217,10	64,27	44%	18
Condutividade	341,00	13900,00	3377,24	2951,00	13559,00	2457,22	73%	52
STD	171,00	8896,00	2054,90	1583,60	8725,00	1583,50	77%	52
Salinidade	0,15	3,16	1,49	1,58	3,01	0,77	52%	18
Dureza em cálcio	8,60	126,90	55,60	31,70	118,30	45,95	83%	7

Continuação da Tabela 10:

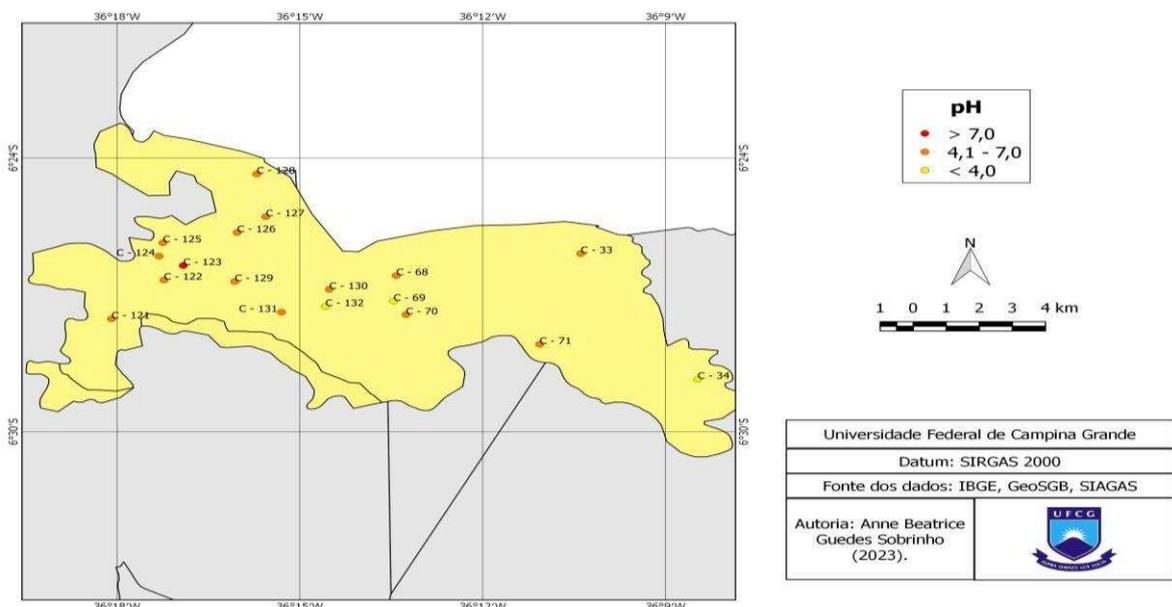
Variável	Mín	Máx	Média	Mediana	Intervalo	DP	CV	Contagem
Dureza em magnésio	6,50	173,80	68,39	23,30	167,30	64,40	94%	7
Dureza total	48,80	994,00	423,91	130,20	945,20	379,40	90%	7
sódio	28,40	965,00	450,37	331,20	936,60	346,05	77%	7
Potássio	4,70	26,40	13,59	11,30	21,70	7,41	55%	7
Alcalinidade total	0,00	100,00	33,14	20,00	100,00	35,32	107%	7
Sulfato	1,20	11,00	3,46	1,80	9,80	3,26	94%	7
Cloreto	81,70	2314,60	1029,90	1233,60	2232,90	755,87	73%	7
Bicarbonato	0,00	100,00	33,14	20,00	100,00	35,32	107%	7

Nota: Mín=Mínimo, Máx=Máximo, DP=Desvio padrão, CV= Coeficiente de variação, STD=Sólidos totais dissolvidos, ORP= Potencial de oxi-redução, pH = Potencial de Hidrogênio.

Potencial de Hidrogênio - pH

O pH médio da Formação Serra dos Martins nessa ocorrência foi de 6,03, classificando as amostras de água como ácidas. Apenas uma das catorze amostras apresentou um pH acima de 7. Dessa forma, a maior parte das amostras não atende o intervalo permitido estabelecido pela portaria de potabilidade do Ministério da Saúde GM/MS n° 888 que varia entre 6 e 9. Através do mapa (figura 78) observamos que as águas mais ácidas encontram-se na porção central e nordeste da formação.

Figura 78: Distribuição do pH na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



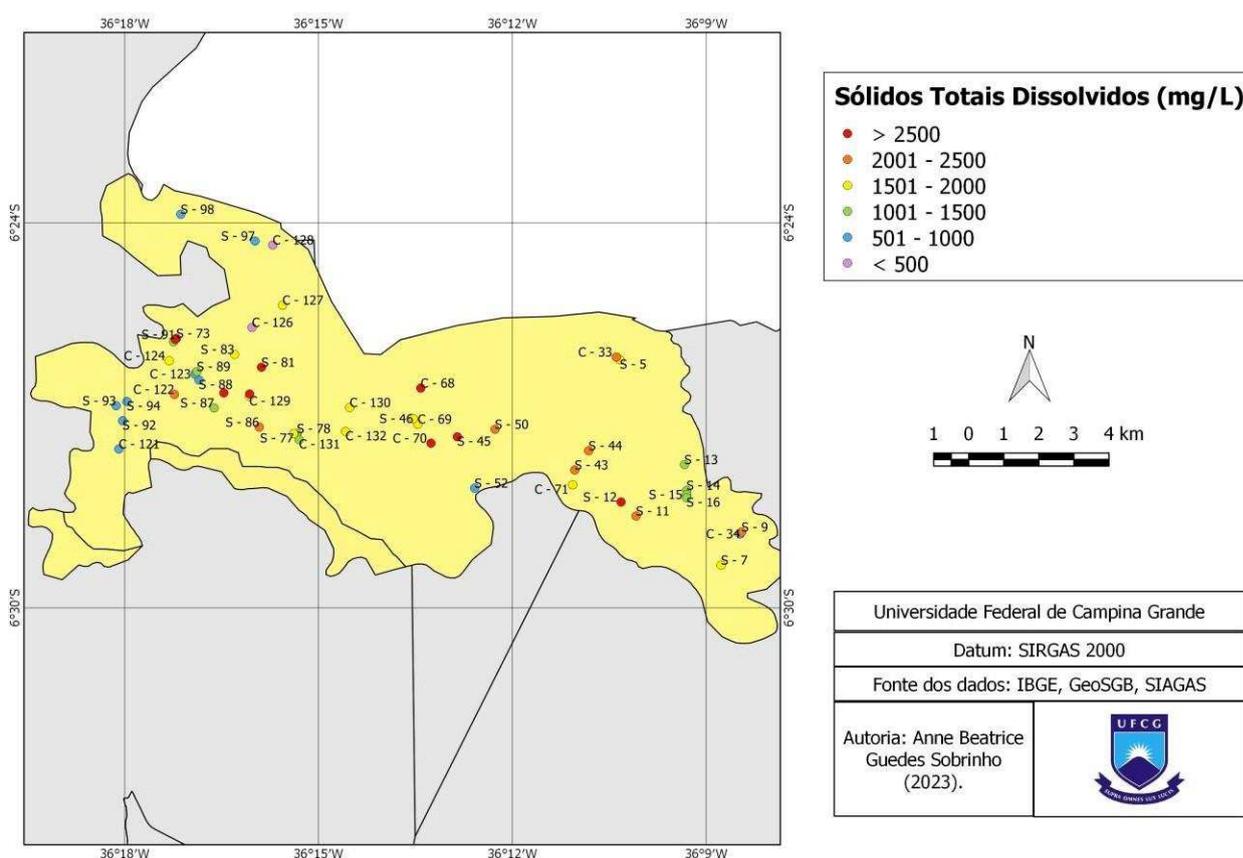
Fonte: Própria (2023)

Sólidos Totais Dissolvidos

O STD nessa ocorrência variou entre uma concentração mínima de 171 mg/L a uma máxima e 8896 mg/L cuja média foi 2054,90 mg/L. De todo o conjunto amostral apenas duas das amostras ficaram abaixo de 500 mg/L, sendo esse o valor máximo permitido de acordo com a portaria de potabilidade do Ministério da Saúde GM/MS nº 888.

O mapa (Figura 79) mostra uma distribuição bem variada de valores de sólidos totais dissolvidos na formação, entretanto, observa-se que boa parte dos poços com as menores concentrações desse parâmetro encontra-se na porção oeste da formação.

Figura 79: Distribuição dos sólidos totais dissolvidos na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

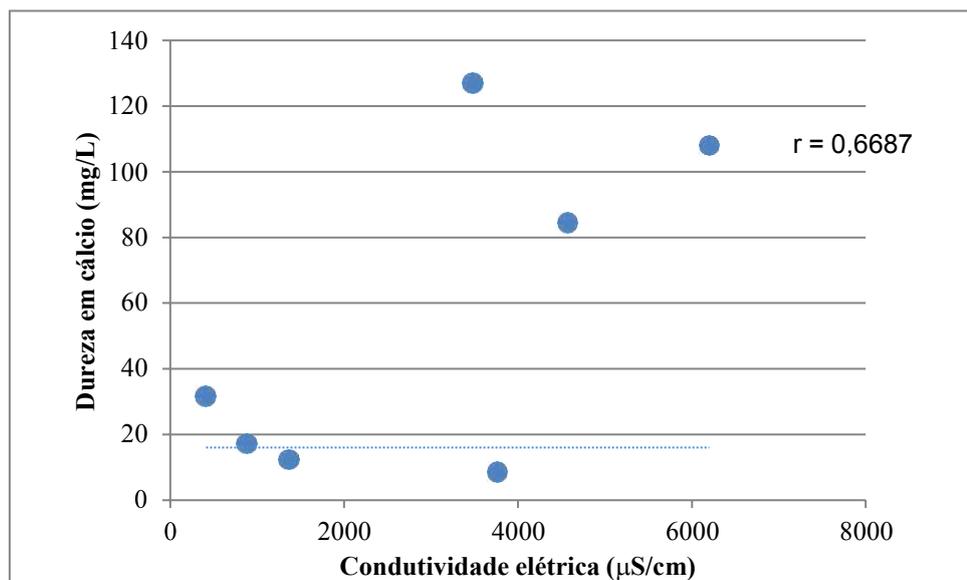
De acordo com os valores propostos por McNeely *et al.* (1979) apresentados na tabela 6 a maior parte das amostras podem ser classificadas como ligeiramente a moderadamente salobra.

Condutividade elétrica

A condutividade elétrica média obtida foi de 3377 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com um valor mínimo de 341 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e um máximo de 13900 $\mu\text{S}/\text{cm}$. De forma análoga ao que foi discutido anteriormente, a condutividade possui relação direta com os sólidos totais dissolvidos, portanto também podemos afirmar que as águas mais condutivas encontram-se na porção oeste da formação. Nessa ocorrência da Formação Sedimentar Serra dos Martins há uma elevada variação da condutividade elétrica.

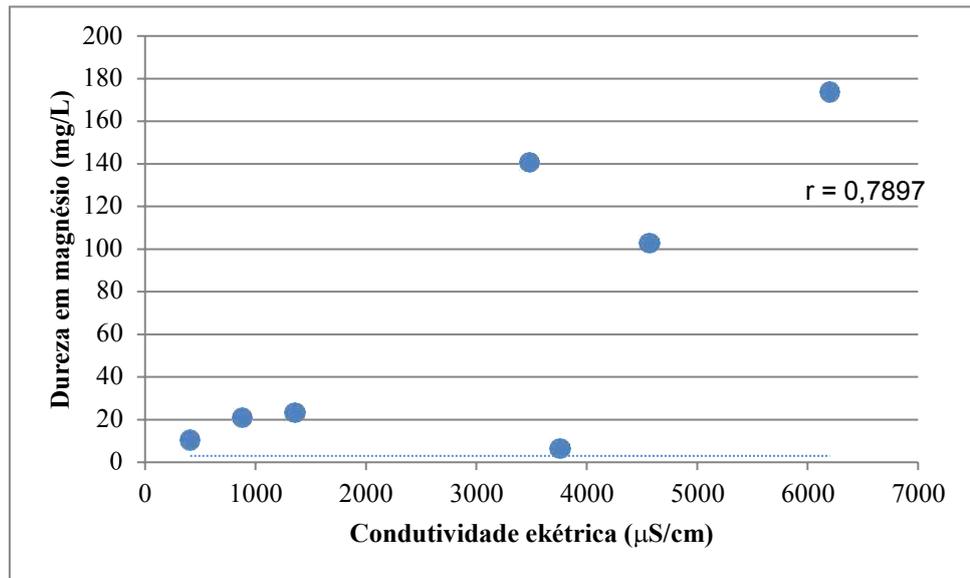
Os gráficos de dispersão (figuras 80 a 86) mostram que cálcio e magnésio possuem uma correlação moderada positiva e o potássio, sódio e cloreto, forte positiva com a condutividade, sendo então determinantes para a salinidade da água. O sulfato e bicarbonato mostram uma correlação ínfima e fraca negativa respectivamente, dessa forma, esses íons não estão associados ao processo de salinização da água.

Figura 80: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em cálcio.



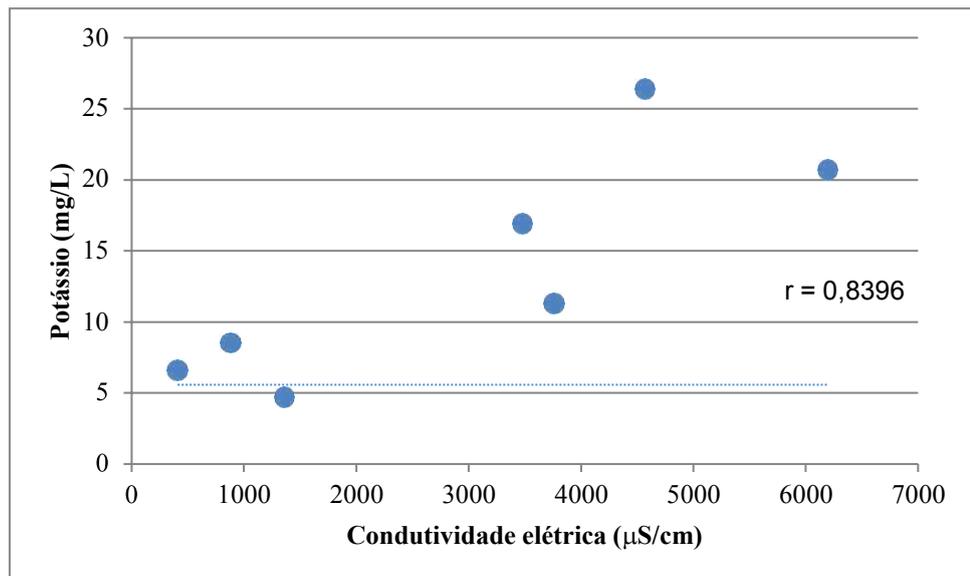
Fonte: Própria (2023).

Figura 81: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e dureza em magnésio.

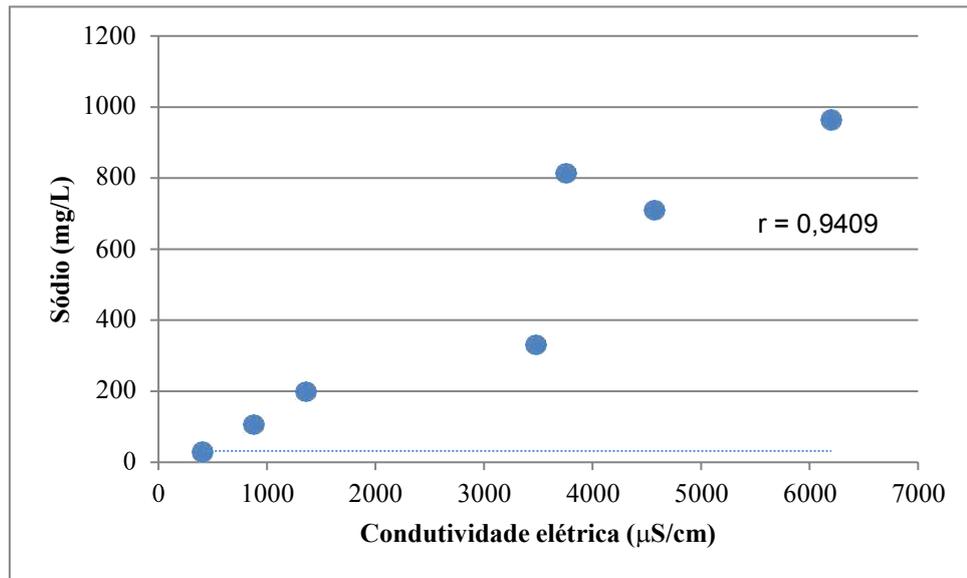


Fonte: Própria (2023).

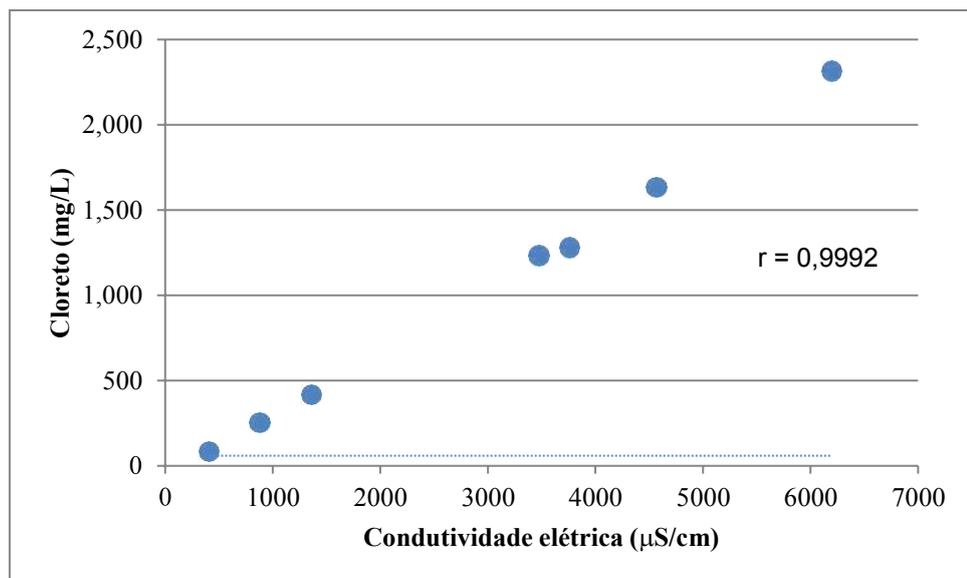
Figura 82: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e potássio.



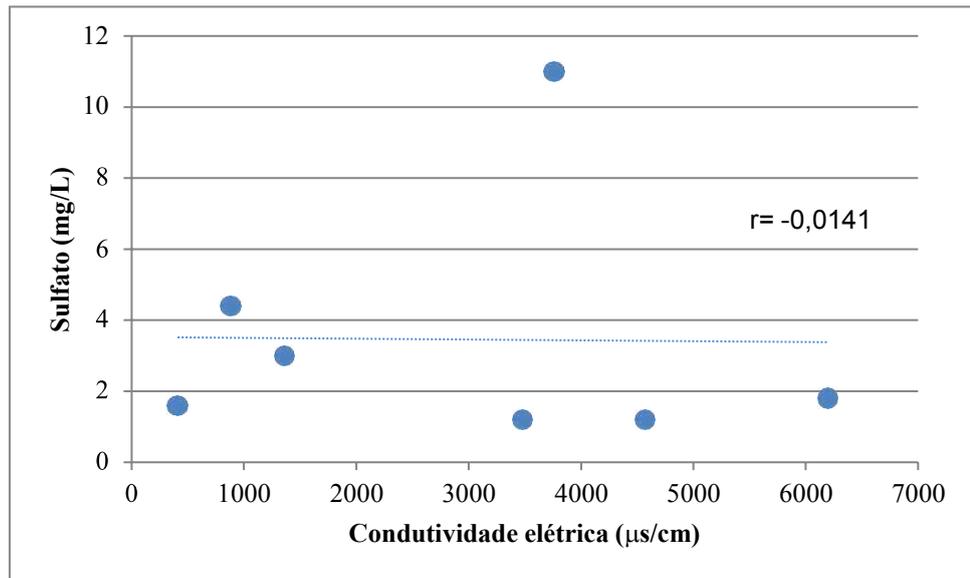
Fonte: Própria (2023).

Figura 83: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sódio.

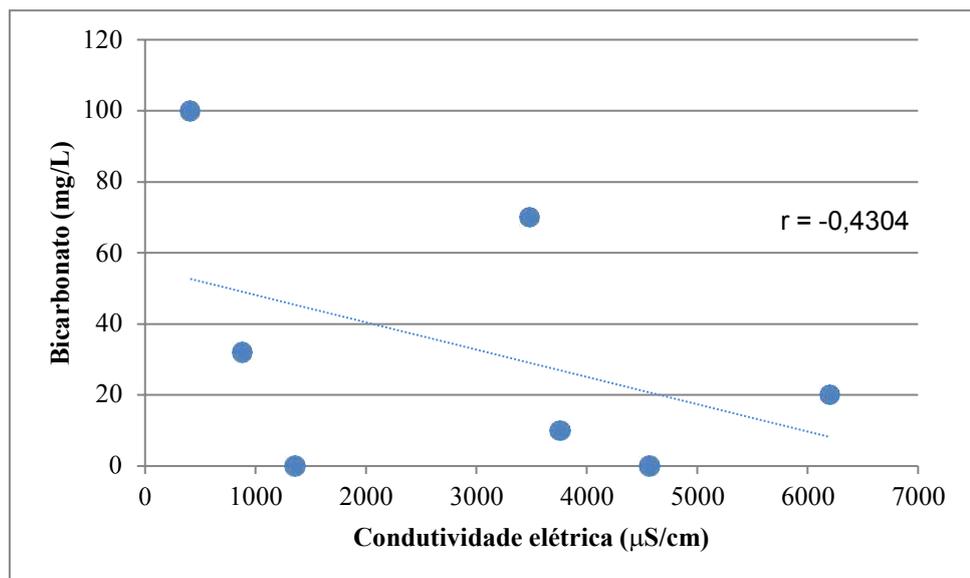
Fonte: Própria (2023).

Figura 84: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e cloreto.

Fonte: Própria (2023).

Figura 85: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e sulfato.

Fonte: Própria (2023).

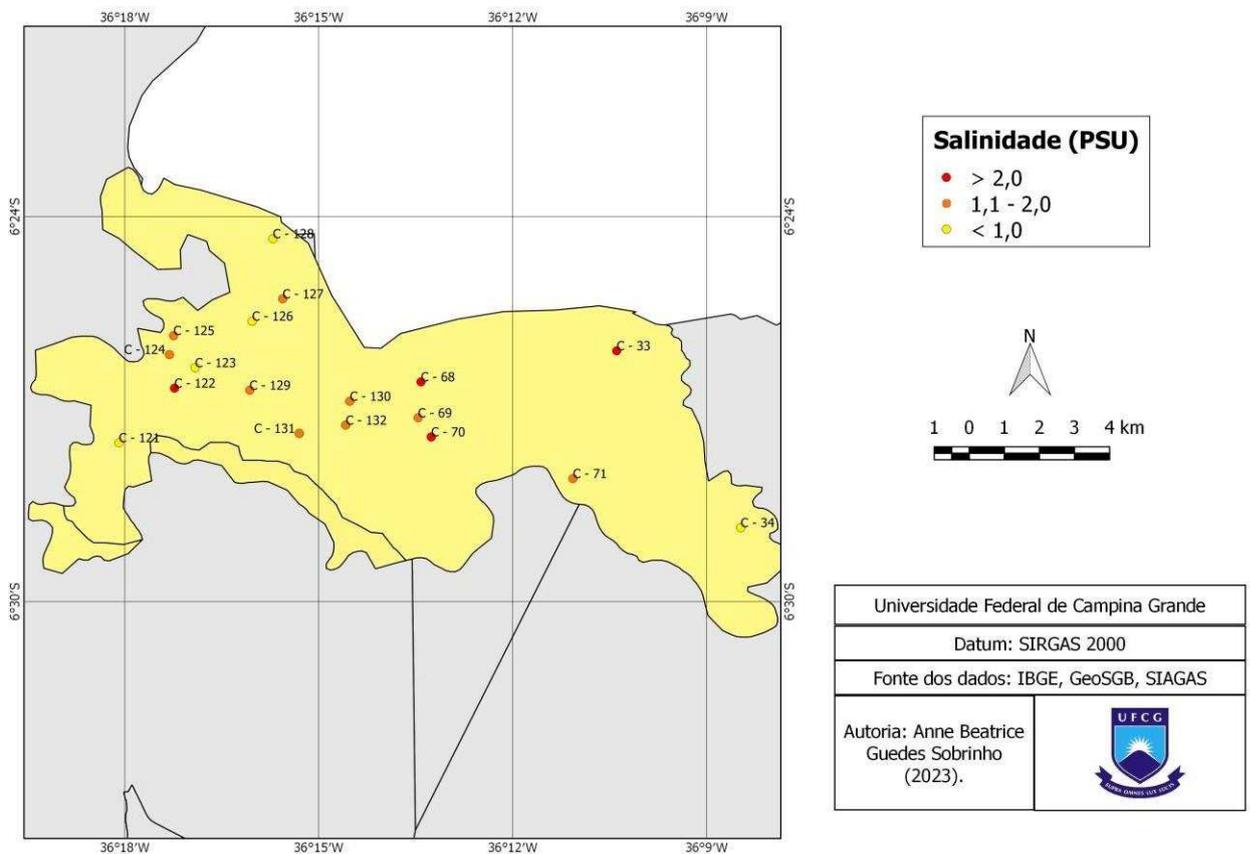
Figura 86: Gráfico de dispersão entre condutividade elétrica e bicarbonato.

Fonte: Própria (2023).

Salinidade

A salinidade mostrou-se variando entre um mínimo de 0,15 PSU a 3,16 PSU cuja média foi 1,49 PSU. A figura 87 mostra que a salinidade apresenta comportamento similar aos sólidos totais dissolvidos. Apesar da variabilidade espacial dos valores de salinidade, fica claro que a maioria das águas menos salinas encontra-se a oeste da formação.

Figura 87: Distribuição da salinidade na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

Potencial de oxidação-redução - ORP

O valor médio de potencial de oxidação-redução foi 144,84, sendo o parâmetro de menor coeficiente de variação (44%) dessa área de ocorrência da formação. Todos os resultados de ORP obtidos foram positivos, sendo assim, as águas encontram-se em um ambiente oxidante.

Dureza em cálcio e magnésio

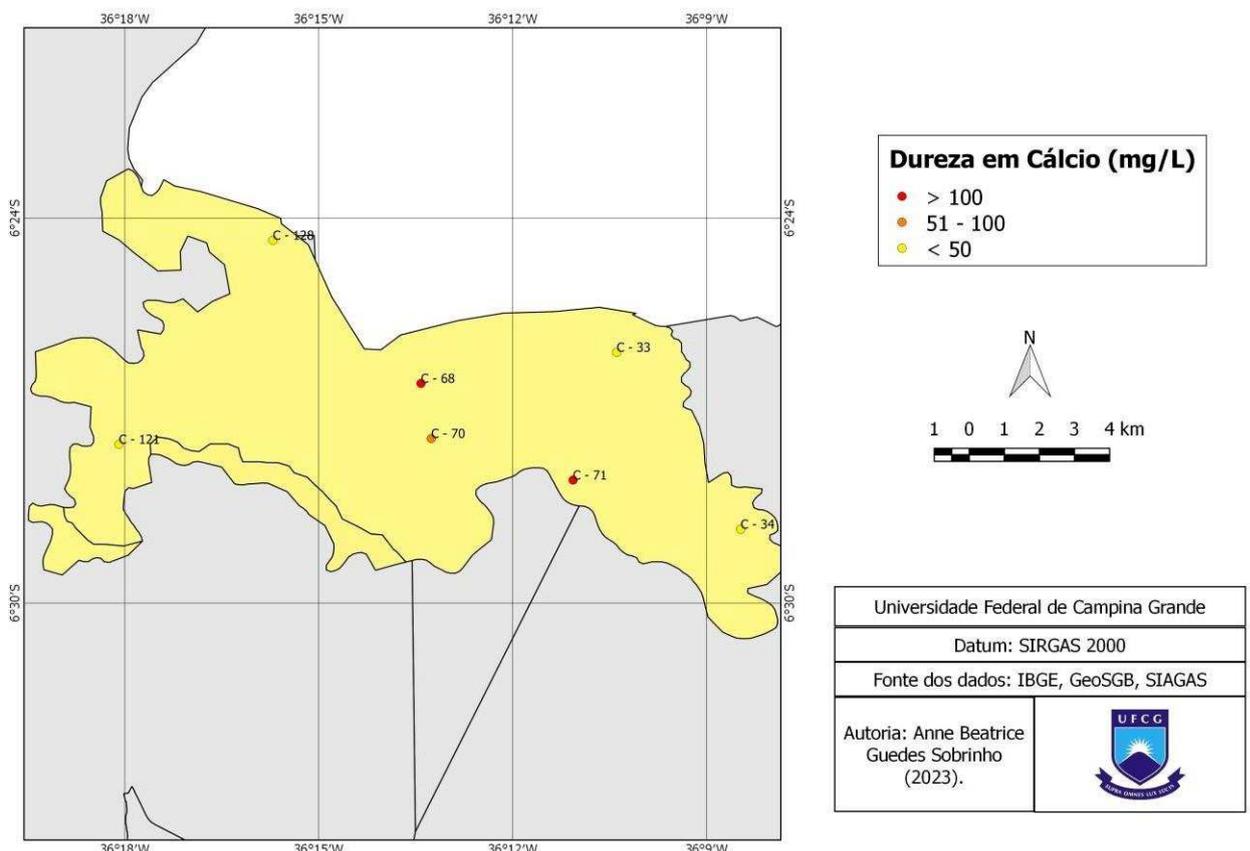
Conforme já discutido para a ocorrência da formação sedimentar em Barra de Santa Rosa – Cuité, o cálcio e magnésio são os principais responsáveis pela dureza total na água. O cálcio apresentou um valor mínimo de 8,60 mg/L, um máximo de 126,90 mg/L e média de 55,60 mg/L, enquanto que o magnésio, valor mínimo de 6,50

mg/L, máximo de 173,80 mg/L e média de 68,39 mg/L.

Diferentemente do que foi discutido para esses parâmetros quando tratava-se do cristalino, neste caso os valores de dureza em cálcio e magnésio são significativamente menores, considerando que trata-se de uma geologia distinta, onde temos a predominância de rochas sedimentares, especialmente arenitos, rochas compostas em sua maior parte por quartzo (SiO_2).

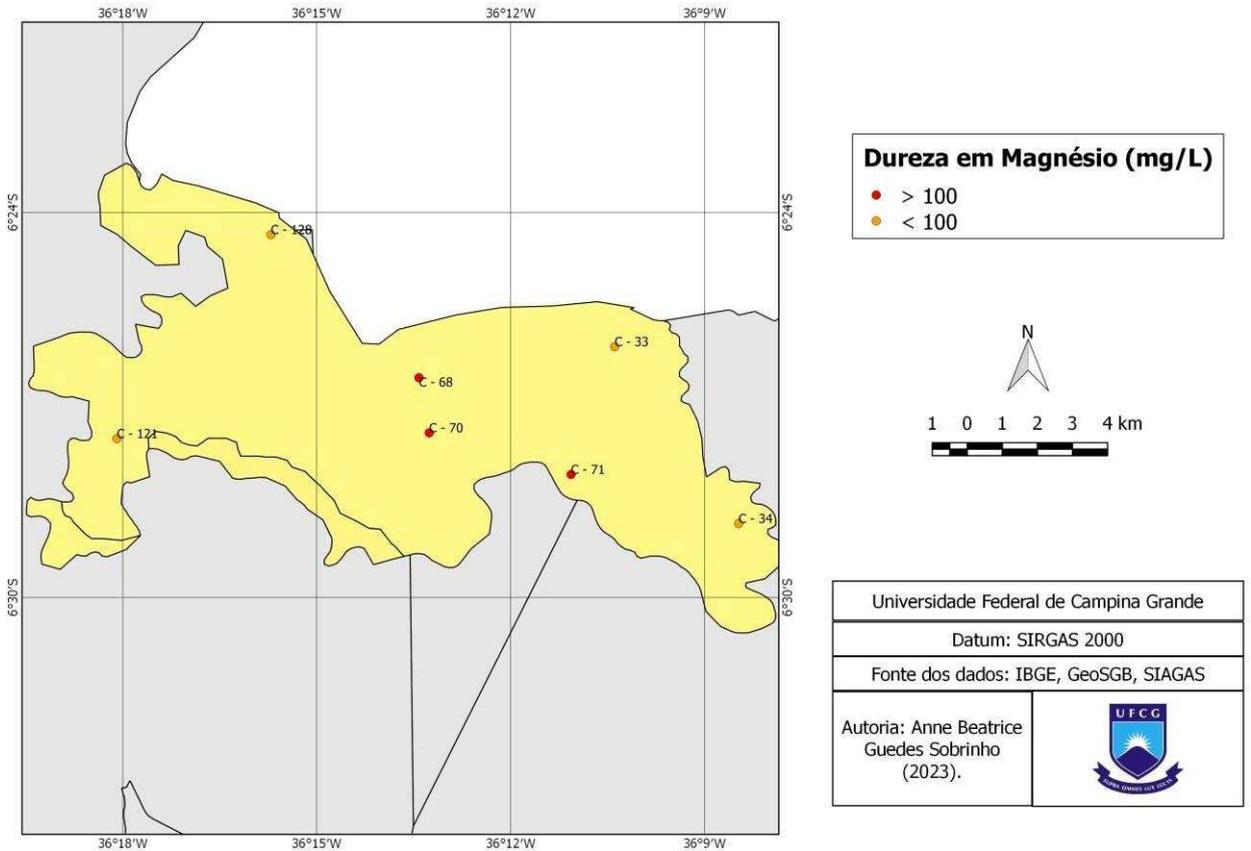
Os mapas (figuras 88 e 89) mostram a distribuição dos valores de dureza em cálcio em magnésio. Os poços localizados nas extremidades oeste e leste merecem ser destacados pelas suas menores concentrações desses elementos.

Figura 88: Distribuição da dureza em cálcio na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

Figura 89: Distribuição da dureza em magnésio na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

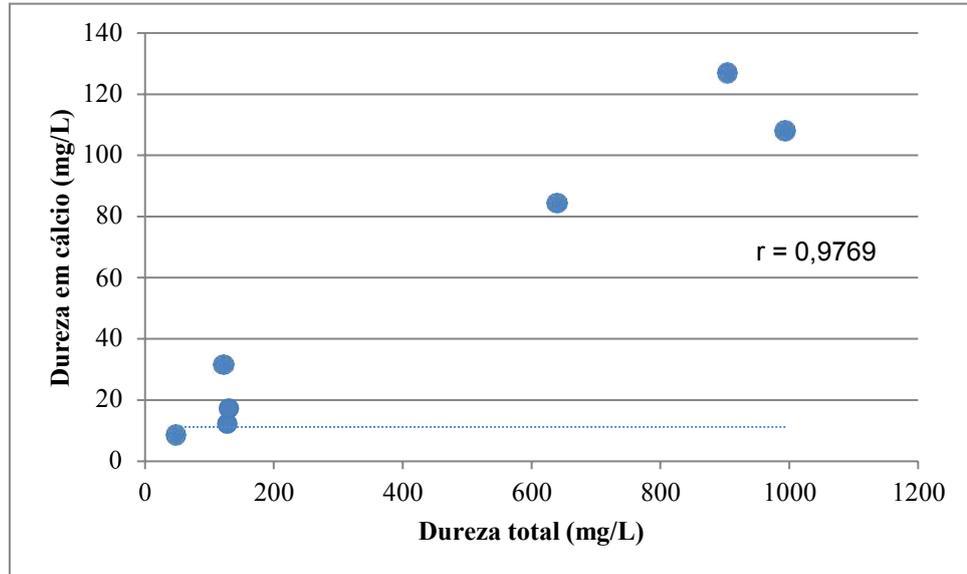
Dureza total:

A dureza apresentou um valor mínimo de 48,80 mg/L, máximo de 994 mg/L e média de 423,91 mg/L. De acordo com a portaria de potabilidade o VMP desse parâmetro é 300 mg/L, sendo assim em média as amostras de água não atendem esse requisito.

Segundo a classificação de dureza proposta por Custódio & Llamas (2001), 12,28% das amostras são pouco duras, 42,86% duras e 42,86% muito duras.

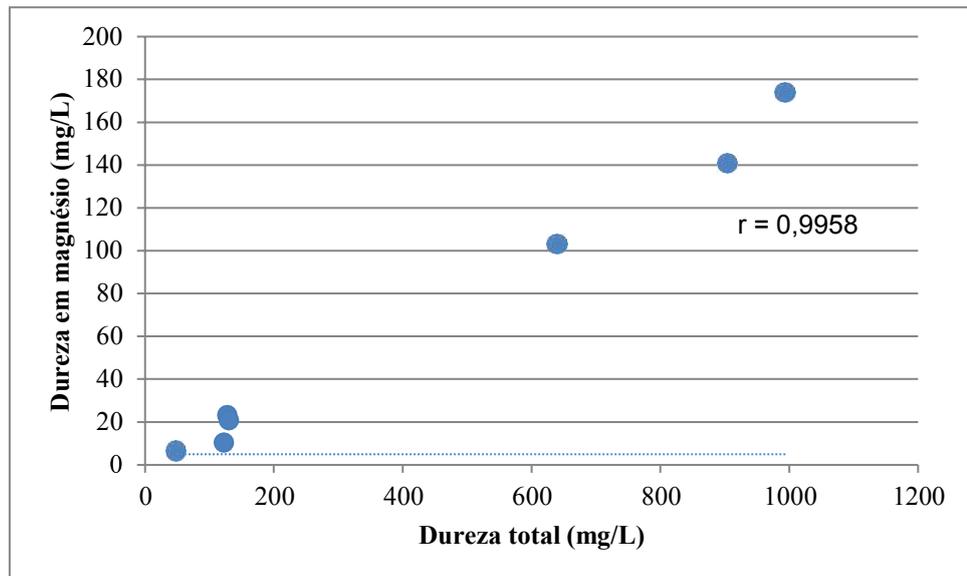
Os mapas (figuras 90 e 91) mostram a correlação forte positiva existente entre a dureza total e o cálcio e magnésio, sendo esse último o elemento mais responsável pela dureza da água ($r \sim 1$).

Figura 90: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em cálcio.



Fonte: Própria (2023).

Figura 91: Gráfico de dispersão entre dureza total e dureza em magnésio.



Fonte: Própria (2023).

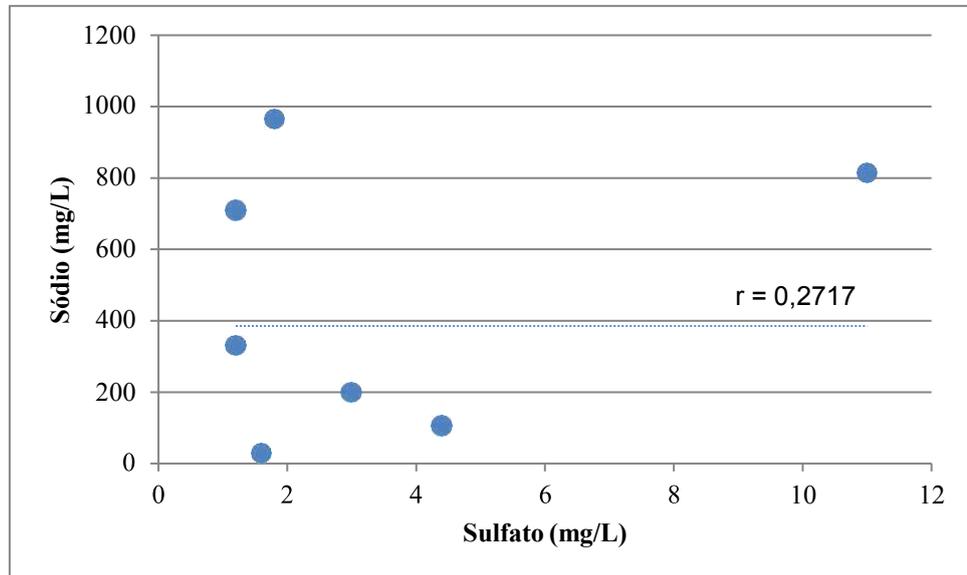
Sódio:

O sódio é um elemento bastante comum nas águas subterrâneas. Em média a concentração desse parâmetro foi 450 mg/L ficando acima do valor máximo permitido segundo a portaria de potabilidade que é 200 mg/L.

No resíduo, o sódio pode estar na forma de sulfato, bicarbonato, nitrato ou cloreto (FALCÃO, 1978). Nas amostras de água analisadas nessa pesquisa o sódio

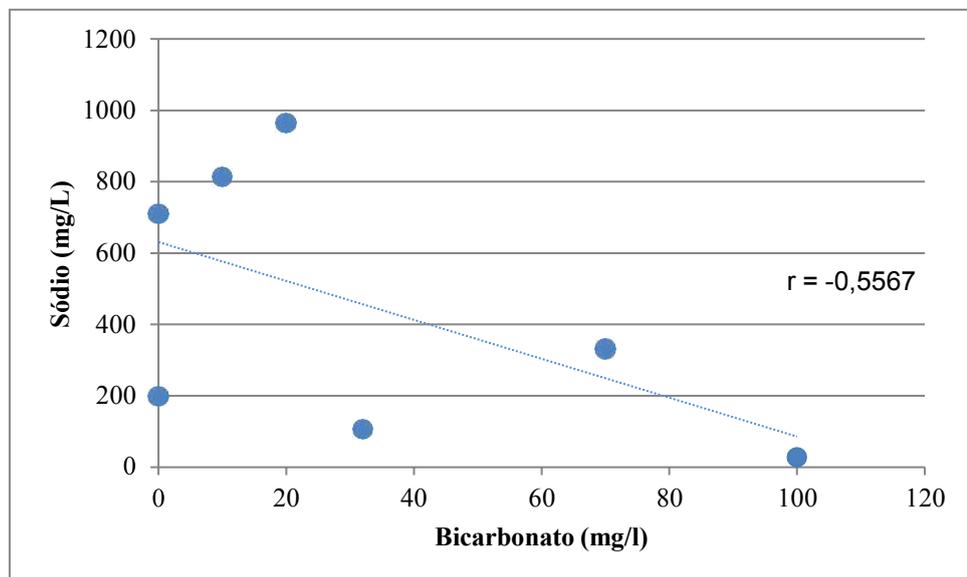
possui relação fraca positiva com o sulfato, moderada negativa com o bicarbonato e nitrato e forte positiva com o cloreto (gráficos 92 a 95).

Figura 92: Gráfico de dispersão entre sódio e sulfato.

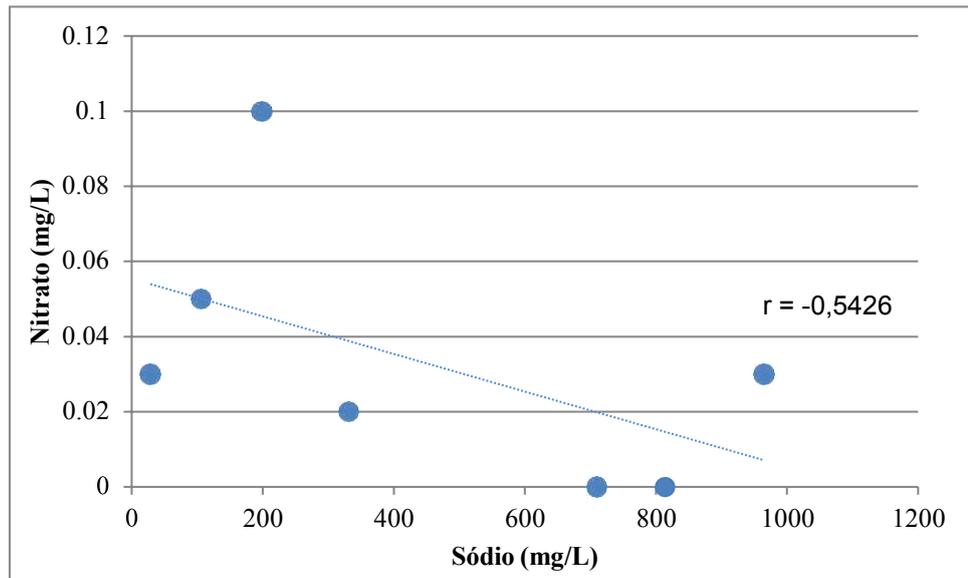


Fonte: Própria (2023).

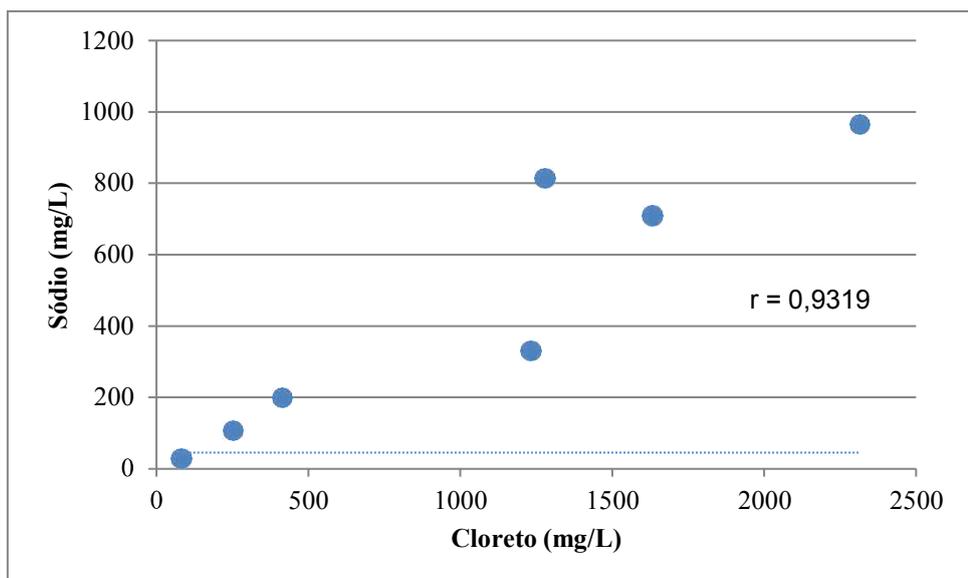
Figura 93: Gráfico de dispersão entre sódio e bicarbonato.



Fonte: Própria (2023).

Figura 94: Gráfico de dispersão entre nitrato e sódio.

Fonte: Própria (2023).

Figura 95: Gráfico de dispersão entre sódio e cloreto.

Fonte: Própria (2023).

Potássio:

O potássio é geralmente encontrado em concentrações inferiores se comparado com outros cátions. Nas análises hidroquímicas realizadas a concentração desse elemento variou entre 4,70 mg/L a 26,40 mg/L com média de 13,59 mg/L. A portaria de potabilidade não estabelece um valor de referência para o potássio.

A concentração desse elemento foi em média menor, nessa ocorrência da formação sedimentar, quando comparado aos valores obtidos para o cristalino, próximo a ocorrência sedimentar anteriormente discutida.

Cloreto, sulfato e bicarbonato:

Os principais ânions serão novamente abordados juntos. O bicarbonato apresentou um valor médio de 33,14 mg/L, concentração bastante inferior a anteriormente discutida na ocorrência Barra de Santa Rosa – Cuité, e segundo Santos (1997) a concentração desse íon varia de 50 a 350 mg/L em águas doces, portanto a elevada salinidade média das águas não é devida a presença de bicarbonato.

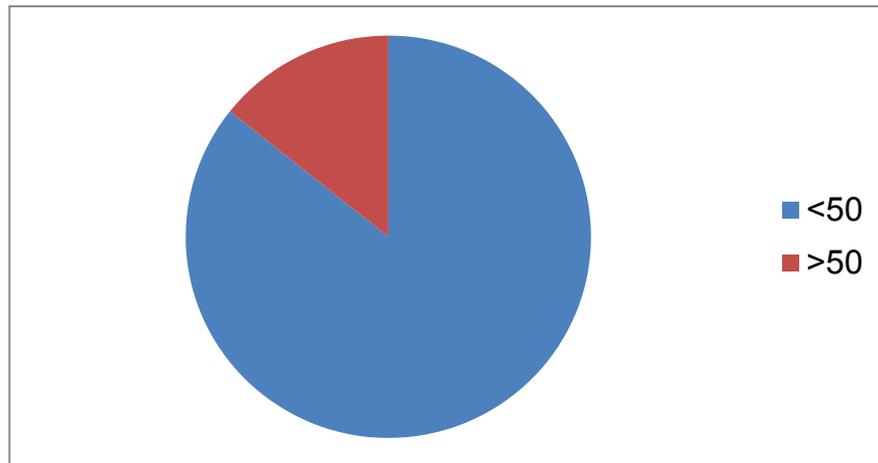
De acordo com Custodio & Llamas, (1983) a predominância do bicarbonato sobre os outros ânions indicaria que a água não seria de circulação regional com longos tempos de residência. No caso dessa ocorrência da formação sedimentar o bicarbonato não predomina sobre o cloreto, mas predomina sobre o sulfato, entretanto, de fato esperam-se concentrações inferiores para os elementos químicos discutidos já que eles foram analisados para a formação sedimentar propriamente dita onde em linhas gerais temos melhores condições de circulação.

Com relação ao cloreto, apresentou um mínimo de 81,70 mg/L, máximo de 2314,60 mg/L e média de 1029,90 mg/L. Segundo a portaria de potabilidade o VMP é 250 mg/L, sendo assim em média não foi atendido esse parâmetro, ficando apenas uma amostra dentro do valor de referência.

O sulfato variou entre 1,20 mg/L a 11 mg/L e apresentou média de 3,40 mg/L. O VMP dessa parâmetro é 250 mg/L, sendo assim, as amostras atenderam esse critério de potabilidade. Desse modo, os cátions de sódio, magnésio e potássio não parecem estar ligados em sua maioria ao sulfato.

Alcalinidade

O valor mínimo obtido foi 0 mg/L e o máximo 100 mg/L. Colombo (2013) afirma que uma água com alta alcalinidade apresenta valores acima de 2000 mg/L de CaCO_3 enquanto que a baixa alcalinidade aponta para valores inferiores a 20mg/L de CaCO_3 , logo, temos valores intermediários para a formação. A figura 96 mostra a distribuição dos valores de alcalinidade.

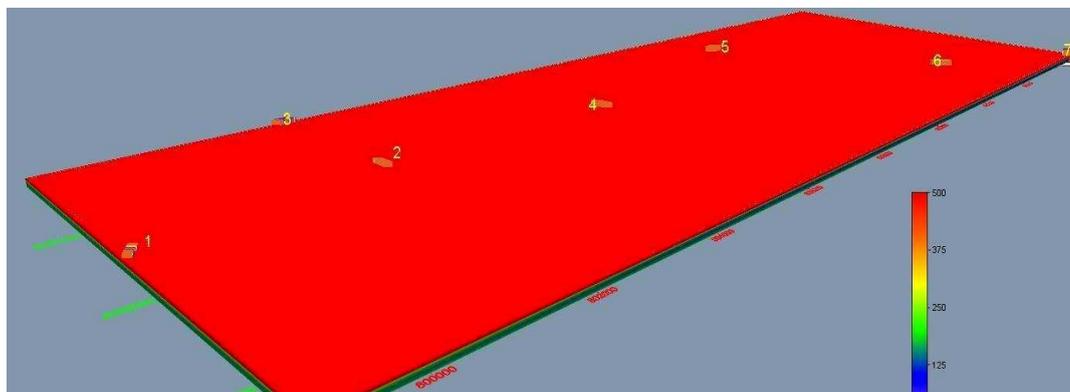
Figura 96: Disposição da concentração de alcalinidade.

Fonte: Própria (2023).

5.2.4 Cálculo de reserva

Os valores de resistividade da rocha saturada de água (R_0) são extraído do modelo pseudo3D (Figura 97), enquanto o a resistividade da água (R_w) que satura a rocha é obtida através da medição de sua condutividade elétrica. A condutividade média da água produzida nos poços investigados é $3377 \mu\text{S/cm}$, tendo em vista que a resistividade é o inverso da condutividade, temos o resultado de $2,96 \text{ ohm.m}$. Considerando que o rocha saturada com água apresenta resistividade elétrica entre 40 ohm.m e 300 ohm.m , a equação pode ser aplicada aos dados de resistividade elétrica para estimar o porosidade saturada em cada *voxel* do modelo pseudo3D. Assim, o volume de água contido na unidade condutora do modelo de rocha é calculado.

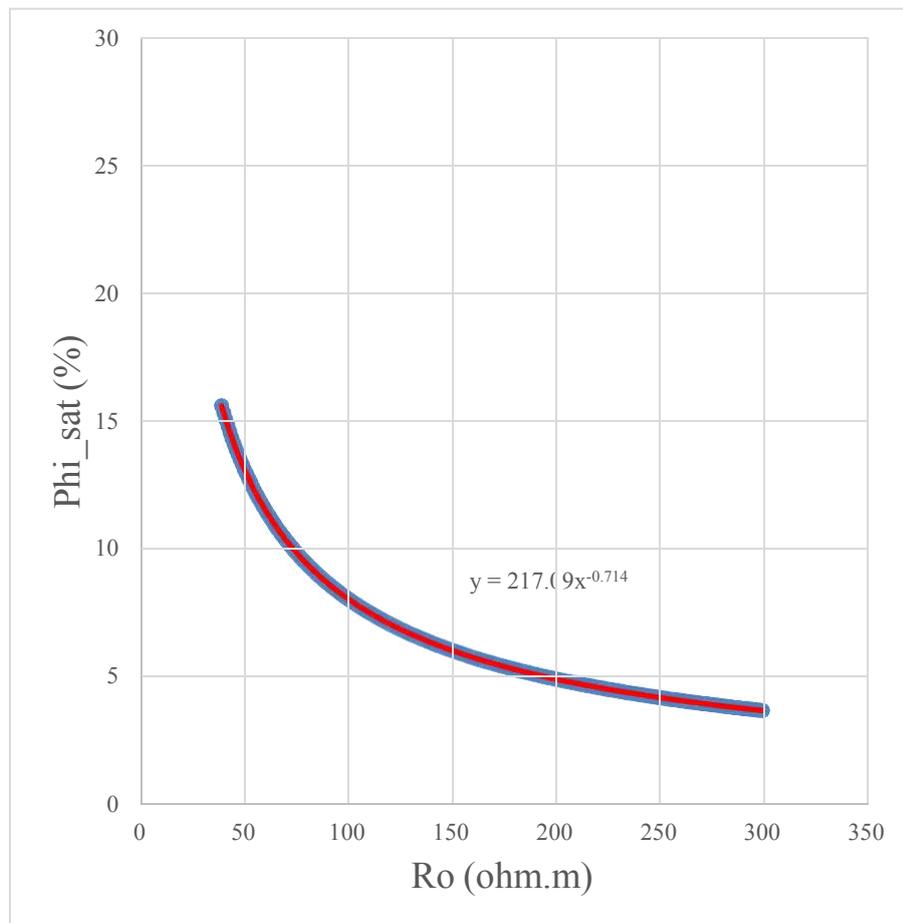
Figura 97: Pseudo modelo 3D de resistividade elétrica para a Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.



Fonte: Própria (2023).

A Figura 98 apresenta a porosidade saturada da rocha como função da resistividade elétrica da rocha nos pontos de profundidade onde esta última propriedade foi medida ao longo do linhas geofísicas. Essa relação foi obtida considerando que $a = 1$ e $m = 1,4$, que proporcionam valores de porosidade compatíveis com aqueles medidos nos testes petrofísicos. Após isso se aplicou uma função de regressão e com isso o volume pôde ser estimado.

Figura 98: Relação entre resistividade da rocha saturada e porosidade saturada em água ($a = 1$; $m = 1,4$; $R_w = 2,96$ ohm.m).



Fonte: Própria (2023).

Foram estimados 597 milhões de metros cúbicos de reserva *in situ* de água obtidos dentro da área investigada (12285 hectares). O cálculo proporcional para a área de ocorrência sedimentar (10.721 hectares) rende um volume aproximado de 521 milhões de metros cúbicos de água subterrânea. Vale salientar que esse valor representa uma estimativa e o que se consegue ser produzido de fato é um valor menor.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Formação Sedimentar Serra dos Martins é de fundamental importância para o suprimento de água subterrânea na localidade de estudo. A presente pesquisa foi realizada em duas ocorrências dessa formação, sendo a primeira situada nos municípios de Barra de Santa Rosa/Cuité de menor extensão e a segunda em Nova Floresta/Picui/Cuité de maior extensão.

As seções geolétricas mostraram comportamento similar em ambas as ocorrências. A porção superior do pacote sedimentar é caracterizada por uma camada resistiva, com aproximadamente 30 metros de espessura, e que constitui a zona não saturada. A partir dessa profundidade verifica-se uma camada condutiva correlacionada a porção aquífera propriamente dita, com espessura da ordem de 50 metros. A uma profundidade estimada em 80 metros, em média, novamente encontra-se uma camada resistiva, que marca o topo do embasamento cristalino.

Através dos ensaios petrofísicos foi possível verificar que a formação sedimentar em Barra de Santa Rosa/Cuité apresentara porosidade superior, quando comparada a ocorrência de Nova Floresta/Picui/Cuité. A porosidade média observada na primeira é da ordem de 20,3% e na segunda área é de 8,15%.

Apenas duas amostras da Formação Sedimentar Serra dos Martins em Barra de Santa Rosa/Cuité apresentaram valor considerado baixo de porosidade (da ordem de 5%), uma amostra apresentou valor médio (da ordem de 10%) e as demais cinco amostras apresentaram valor superior a 15% (variando de 20,4 a 36,1%) sendo consideradas, portanto, como de porosidade alta. Esse resultado leva a um cenário otimista. Das 6 amostras obtidas na Formação Sedimentar Serra dos Martins em Nova Floresta/Picui/Cuité, metade pode ser considerada de valor baixo, da ordem de 5% (variando de 3,9 a 5,9%) e as demais de valor intermediário, variando de (8,2 a 13,4%).

Com relação a quantificação do volume de água subterrânea contido nas ocorrências da Formação Serra dos Martins, conclui-se que, embora a ocorrência de Nova Floresta – Picuí – Cuité possua uma extensão territorial cerca de três vezes maior que a ocorrência de Barra de Santa Rosa – Cuité, a primeira apresenta volume de água de aproximadamente o dobro da segunda. Isto ocorre devido a menor porosidade média da primeira ocorrência.

Para contornar o limitado número de poços encontrados na formação sedimentar em Barra de Santa Rosa/Cuité, foram integrados alguns poços do aquífero cristalino à avaliação. Sob o aspecto hidrogeológico, a potenciometria evidenciou um fluxo de águas partindo da formação sedimentar (topografia elevada) em direção às rochas cristalinas (setor de topografia inferior). Dessa forma, fica caracterizada e contribuição das águas armazenadas no aquífero sedimentar, de forma a manter a recarga do aquífero fraturado cristalino na região.

O aquífero cristalino na região de Barra de Santa Rosa/Cuité apresenta águas em geral, neutras a levemente básicas (pH médio de 7,59). A salinidade dessas águas, avaliadas a partir do parâmetro STD, evidenciou a predominância de águas Moderadamente Salobras (STD médio de 3870,06 mg/L). A dureza das águas, o sódio, o cloreto e o sulfato são os parâmetros químicos que mais influenciam a salinidade dessas águas, possivelmente devido ao componente geológico e climático da região. Nesse setor, conforme já relatado, poucos poços puderam ser avaliados no contexto sedimentar. A hidroquímica do aquífero sedimentar Serra dos Martins em Barra de Santa Rosa/Cuité revelou águas tendendo a ácidas em sua maioria (pH médio de 5,94) e predominância de águas Ligeiramente Salobras no que se refere a salinidade (variando de 349 a 4645 mg/L de STD, com média de 1896 mg/L). Portanto, conforme esperado, tem-se a possibilidade de encontrar águas de qualidade superior no aquífero sedimentar quando comparado ao cristalino.

A qualidade das águas do aquífero sedimentar na região de Nova Floresta/Picui/Cuité é semelhante à encontrada na outra área estudada. São águas levemente ácidas (pH médio de 6,03) e tendendo a Ligeiramente Salobras (STD médio da ordem de 2054 mg/L).

Para trabalhos futuros sugerimos as seguintes pesquisas: (i) Determinação dos coeficientes m e n da equação de Archie, através de ensaios laboratoriais ou simulação numérica em modelos digitais de rocha, a fim de minimizar a incerteza da quantificação de reservas. (ii) Realizar levantamento com método eletromagnético aerotransportado por drone obtendo uma maior cobertura areal e maior densidade de dados geofísicos para obter modelos 3D mais precisos. (iii) Realizar medições de nível de água nos poços para obter dados para construção das superfícies potenciométricas. (iv) Perfurar poços nos locais indicados como promissores pelo levantamento geofísico. Nesses locais deverão ser realizados testes de aquífero e amostragem de águas.

7 REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (ANA). Disponibilidade e demandas de recursos hídricos no Brasil. Brasília, ANA.123 p. 2005.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA. Hidrogeologia Conceitos Básicos. Oficina de Capacitação de Progestão – águas subterrâneas. Brasília, 2016.

AGÊNCIA EXECUTIVA DA GESTÃO DAS ÁGUAS - AESA. Caracterização dos sistemas aquíferos. Disponível em: Microsoft Word - 2.2 - CaracSistemasAquiferos.doc (aesa.pb.gov.br) . Acesso em: 06 de fevereiro de 2023.

ALLEY, W.M. Regional Ground-Water Quality. New York. Van Nostrand Reinhold. 625p. 1993.

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.

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

ÁVILA, C.; REYES, C.; BAYONA, J. M.; GARCÍA, J. Emerging organic contaminant removal depending on primary treatment and operational strategy in horizontal subsurface flow constructed wetlands: Influence of redox. Water Research, v. 47, p. 18. 2013.

BARBOSA, A.L.M. Síntese da evolução geotectônica da América do Sul. Boletim do Instituto de Geologia/Escola de Minas, 1:91-111, 1966.

BARBOSA, L. K. L. Zoneamento de aquíferos através da delimitação de perímetros de proteção de poços de abastecimento público de água: o caso da Cidade de João Pessoa – PB. Programa de pós-graduação em engenharia urbana. Universidade Federal da Paraíba Centro de Tecnologia. Dissertação de Mestrado. João Pessoa, 2007.

BERTOLDI, M. R. Hidroguerras: o líquido cobiçado deixa de ser o petróleo. Jus Navigandi, Teresina, v. 49, n. 5, p.1-1. 2001.Disponível em:

<<http://jus.com.br/artigos/1701/hidroguerras-o-liquido-cobicado-deixa-de-ser-opetroleo>>. Acesso em: 06 fev. 23.

BICUDO, C.E.de M.; Tundisi, J.G.; Scheuenstuhl, M.C.B. , orgs.B583a Águas do Brasil: análises estratégicas / Carlos E. de M. Bicudo; José G.Tundisi; Marcos C. Barnsley Scheuenstuhl – São Paulo, Instituto de Botânica. 224 p. 2010.

BIGARELLA, J.J e ANDRADE, G.O. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozóicos em Pernambuco (Grupo Barreira). Universidade do Recife, Arquivos Inst. Ciênc.Terra. 1964.

BRAGA, A. C. O. Métodos da eletrorresistividade e polarização induzida aplicados nos estudos de 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. 2006.

BRAGA, A. C. O. Métodos Geolétricos em Hidrogeologia. Editora oficina de textos, 159 p . 2016.

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

BROWN, T. L.; LEMAY, H. E.; BERSTEN, B.E. Química, a ciência central. 9ª ed. São Paulo: Pearson Prentice Hall, 992 p. 2005.

CATÃO, F. R.; ALBUQUERQUE, E.F.; NETO, J. U.C. Panorama Hídrico do Estado da Paraíba: Principais mananciais e sistemas de distribuição do estado. Tribunal de Contas do Estado da Paraíba. Auditoria Temática n° 01/2022.

COLLISCHONN, W & DORNELLES, F. Hidrologia para Engenharia e Ciências ambientais. Porto Alegre 2º Edição Revisada e Ampliada. Associação Brasileira de Recursos Hídricos (ABRH), 2015.

CLEARY, R. W. Águas Subterrâneas. Clean Environment Brasil, Princeton Ground-water Inc, ABRH, 112 p., 2007.

CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental do Estado de São Paulo. Índice de qualidade da água, 2007. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas->

interiores/wpcontent/uploads/sites/12/2013/11/Ap%C3%AAndice-C-%C3%8Dndices-de-Qualidade-das-%C3%81guas-2.pdf. Acesso 09/02/2023.

CPRM. Serviço Geológico do Brasil. Projeto Cadastro de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea, estado do Maranhão: relatório diagnóstico do município de Pindaré. Teresina: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2011.

COLOMBO, P. Determinação de alcalinidade em águas. 2013. Disponível em: . Acesso em: 02 set 2013.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, R. Hidrologia subterrânea. 2. ed. Barcelona: Ediciones ômega. v. 1, 845 p. 1983.

DINIZ, J. A. O.; MONTEIRO, A. B.; SILVA, R. C.; DE PAULA, T. L. F. Mapa Hidrogeológico do Brasil ao Milionésimo. Recife, PE. Programa de Cartografia Hidrogeológica. Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM) - Serviço Geológico do Brasil. 2014.

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

FALCÃO, H. Perfil Analítico de águas minerais. Rio de Janeiro, DNPM, B.49 v.2. (Brasil – Departamento Nacional de Produção Mineral). 1978.

FEITOSA, F. A. C. e FILHO, J. M. (Coord.). Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 2. ed. Fortaleza: CPRM/REFO, LABHID-UFPE, 2000. 391 p.

FREITAS, H. B.; SILVA, C. T. S. da, SILVA, F. J. F. da, SILVA, K. de F. N. L.; FERREIRA, L. C. C.; NOGUEIRA, J. L. S.; SANTOS, F. S. S. dos. Avaliação do Monitoramento das Águas Subterrâneas Usadas para Abastecimento Humano na Comunidade de Morrinhos, Aracati–Ceará. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Rio Grande do Sul, 2013.

FILGUEIRAS, CONCEIÇÃO MARIA. Caracterização hidroquímica das águas subterrâneas na Ilha de Boipeba litoral da Bahia – Brasil. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal Fluminense. 2016.

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

FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. Protección de la calidad del agua subterránea: Guia para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales. Washington, D.C.: Banco Mundial. 115 p. 2002.

GALVÃO, C. O.; RÊGO, J. C.; RIBEIRO, M. M. R.; ALBUQUERQUE, J. P. T. "Sustainability characterization and modeling of water supply management practices" in Proc. Regional Management of Water Resources – Sixth IAHS Scientific Assembly, Maastricht. IAHS Publi. 268, Wallingford – UK. 2001.

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.

GANDOLFO, O. C. B. Um estudo de imageamento geoeletrico na investigação rasa. Tese de Doutorado. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 215p. 2007.

GALLAS, J.D.F.B; TAIOLI, F.;FILHO, W.M; PRADO, R.L; DOURADO, J. C. Métodos e técnicas geoeletricas rasas na delimitação da área afetada por ruptura em teto de túnel urbano. Brazilian Journal of Geophysics, vol 19(1), 2001.

GURGEL, E. A. Determinação dos Sólidos e Cátions Totais Dissolvidos a Partir da Condutividade Elétrica em Agua Subterránea. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGUAS SUBTERRANEAS, 2., 1982, Salvador. Anais... Salvador: ABAS. p. 305-315. 1982.

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

HEATH, R. C. Hidrologia básica de água subterránea. Geological Survey water-supply paper 2220. United States Government Printing Office, 1983.

HEM, J.D. Study and Interpretation of the Chemical Characteristics of Natural Water. Book 2254, 3rd Edition, Scientific Pub, Jodhpur. 1991.

HEM, J. D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. Geological Survey, Water Supply Paper. Washington-EUA: [s. n.], 1993.

INSTITUTE FOR WATER, ENVIRONMENT & HEALTH. 2013.

JARDIM, W. F. Medição e interpretação de valores do potencial redox (EH) em matrizes ambientais, *Química Nova*, vol. 37, n. 7, p. 1233-1235, 2014.

LIMA, M.G. A história do intemperismo na Província Borborema Oriental, Nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Tese de Doutorado (Geodinâmica e Geofísica). 250p. 2008.

LVOVITCH, M. I. World water balance: general report. "Proc. Symposium World Water Balance". International Assoc. Sci. Hydrol. 2. p 401-415. 1970.

MABESOONE, J.M. Relief of Northeastern Brazil and correlated sediments, *Zeitschrift fur geomorphologic*, 10 (4): 419-453. 1982.

MABESOONE, J.M.; CAMPOS e SILVA, A. & BEULEN, K. Estratigrafia e origem do Grupo Barreiras em Pernambuco, Paraíba e Rio Grande do Norte. *Revista Brasileira de Geociências*. 1972.

MABESOONE, J.M. 1966. Relief of Northeastern Brazil and its correlated sediments. *Zeitschrift-fur Geomorphologie*, 10(4): 419- 553.

MAIA, R. P.; BÉTARD, F.; BEZERRA, F. H. R. Geomorfologia dos maciços de Portalegre e Martins – NE do Brasil: Inversão do relevo em análise. *Rev. Bras. Geomorfol. (Online)*, São Paulo, v.17, n.2, (Abr-Jun) p.273-285, 2016.

MARQUES, A.L; OLIVEIRA, J.D; ARAÚJO, D.C; NERI, U.D.B. Formação Serra dos Martins nos brejos do nordeste: Um comparativo em Areia (PB) e Portalegre (RN). 2016.

MARQUES, A.L; SILVA, J.B; MOURA, D.C; SILVA, D.G. Delineamento Geomorfológico da Formação Serra dos Martins no Estado da Paraíba (Brasil): Aplainamentos iniciais. *ACTA Geográfica*. Boa Vista, 2019.

MATTA M.A. da S. Fundamentos Hidrogeológicos para a Gestão Integrada dos Recursos Hídricos da Região de Belém, Pará. PhD Tese, Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Brasil. 292p. 2002.

MCNEELY, R. N.; NEIMANIS, V. P.; DWYER, L. Water quality sourcebook: a guide to water quality parameters. Ottawa, Canadá. 1979. 89 p.

MEDEIROS, J.F. de; GHEYI, H.R.; PIERRE, A. Relações empíricas entre várias características da água utilizada para irrigação na zona semiárida do Nordeste. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 22. 1993. Ilhéus. Anais... Ilhéus: SBEA, CEPLAC, p.2864-68. 1993.

MENEZES, M.R.F. Estudos sedimentológicos e contexto estrutural da Formação Serra dos Martins. Dissertação de Mestrado PPGG-UFRN, 1999.

MORAIS NETO, J.M. GREEN, P.F. GARNER, G.D. ALKMIM, F.F. Age of the Serra do Martins Formation, Borborema Plateau, northeastern Brazil: constraints from apatite and zircon fission track analysis. Boletim de Geociências da Petrobrás, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 23-52. 2008.

MORAIS NETO, J.M. E ALKMIM, F.F. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. Revista brasileira de Geociências 31, 1, 95-106. 2001.

MORAES L.J. Serras e montanhas do Nordeste. Ministério da Viação e Obras Públicas, Inspetoria de Obras contra as Secas. Geologia. Rio de Janeiro, Série I. D., 58. (2ª ed. Coleção Mossoroense, Fundação Guimarães Duque, Escola Superior de Agricultura de Mossoró, 35, 1997). 1924.

MOREIRA, C. M. D. Aspectos qualitativos da água subterrânea no campus da UFSM. 2005. 138f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de tecnologia, PPGEC, Santa Maria, 2005.

NAGARAJU, A.; THEJASWI, A.; SUN, L. Statistical analysis of high fluoride groundwater hydrochemistry in Southern India: Quality assessment and implications for source of fluoride. Environmental Engineering Science, 33(7): 471-477. <https://doi.org/10.1089/ees.2015.0511>. 2016.

OLIVEIRA, M. A. C. BARBOSA, A. C. L. Aplicação da eletrorresistividade na prospecção de água subterrânea em rochas cristalinas. Universidade Federal Rural do Semiárido. I Congresso Internacional da diversidade do semiárido. 2016.

ORELLANA, E. Prospeccion geoelectrica en corriente continua. Madrid, Ed. Paraninfo, Biblioteca Tecnica Philips, 523 p. 1972.

PALUDO, D. Qualidade da Água nos Poços Artesianos do Município de Santa Clara do Sul. CENTRO UNIVERSITÁRIO UNIVATES CURSO DE QUÍMICA INDUSTRIAL. Lajeado, 2010, 75p. Trabalho de Conclusão de Curso, Bacharel em Química Industrial. Centro Universitário Univates, Lajeado, 2010.

PAIN, C.F., OLLIER, C.D. Inversion of relief - a component of landscape evolution. *Geomorphology*. 12. 151-165, 1995.

PAUWELS, H.; NÉGREL, P.; DEWANDEL, B.; PERRIN, J.; MASCRÉ, C.; ROY, S.; AHMED, S. Hydrochemical borehole logs characterizing fluoride contamination in a crystalline aquifer (Maheshwaram, India). *Journal of Hydrology*, 525: 302-312. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2015.03.017>. 2015.

PIVELI, R. P.; KATO, M. T. Qualidade das águas e poluição: aspecto físico químico. São Paulo: Abes, 2005.

RIFFEL, E. S.; SILVA, J. L. S. Caracterização dos recursos hídricos subterrâneos no município de Santa Rosa - RS. *Revista do Departamento de Geografia – USP*, v. 22, p. 3-28, 2011.

SANTOS, A. C. Noções de Hidroquímica. In: *Hidrologia: Conceitos e aplicações*. Fortaleza: CPRM/LABHID-UFPE, 1997.

SANTOS, C. Estatística descritiva. Manual de auto-aprendizagem. Lisboa. Edições Sílabo, 2007.

SCHON, J. H. Physical Properties of Rocks, Fundamental and Principles of Petrophysics, Handbook of Geophysical Exploration, Seismic Exploration. Volume 18. Ed. Elsevier, 2004.

SENA, S. F. M. Estudos hidroquímicos da água produzida de um determinado campo de petróleo da Bacia Potiguar. 2011. 127 p. Dissertação de Mestrado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal. 2011.

SILVA, T. C. da; PEDROSA FILHO, L. de A.; SILVA, A. C. S. Avaliação e Especialização das Características dos Poços do Município de João Pessoa / PB. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. Anais... Sergipe, CD ROM, nov 2001.

SOLDERA, B. C.; OLIVEIRA, E. Água Sustentável: Um novo método para a governança da água. Associação Brasileira de águas subterrâneas – ABAS. 2017.

SOUZA, L. A. P. Revisão crítica da aplicabilidade dos métodos geofísicos na investigação de águas submersas rasas. Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

SOUZA, J. C. S.; Captação de Água Subterrânea. In: TSUTIYA, M. T. Abastecimento de Água. 3ª Ed. São Paulo: Departamento de engenharia hidráulica e sanitária da escola politécnica da Universidade de São Paulo, 643 p. 2006.

SOARES, A. O. Dureza das águas subterrâneas na zona rural do município de Santa Cruz – RN. 2018. 38f. Monografia (Bacharel em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2018.

TELFORD, W.M.; GELDART, L.P.; SHERIFF, R.E. Applied geophysics. Cambridge University Press, Second Edition, 770 p. 1990.

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, nº 2, p. 253-277.

ZOBY, J.L.G. & MATOS, B. Águas subterrâneas no Brasil e sua inserção na Política Nacional de Recursos Hídricos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS, 12., Florianópolis, 2002. [Anais...]. Florianópolis: ABAS, 2002. CD-ROM.

ZOBY, J. L. G.; OLIVEIRA, F. R. Panorama da qualidade das águas subterrâneas no Brasil. Brasília: ANA, 2005. 74 p. Disponível em: Acesso em: 01 nov 2023.

8 ANEXOS

Dados hidroquímicos e hidrogeológicos de poços

Tabela A1 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços do SIAGAS na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.

Poço	Município	Longitude	Latitude	Prof	NE	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)
S - 1	Cuité	813408	9283411	31	6		
S - 2	Cuité	818842	9265855			9890	6329.6
S - 3	Cuité	814426	9284081	42			
S - 4	Cuité	812756	9287903	53			
S - 5	Cuité	812817	9287780	50		2730	1747.2
S - 6	Cuité	815187	9282509	36			
S - 7	Cuité	815675	9281861	50	20	2430	1555.2
S - 8	Cuité	816481	9283055	55			
S - 9	Cuité	816265	9282810	58		3700	2368
S - 10	Cuité	813281	9282766	42			
S - 11	Cuité	813253	9283288	45		3750	2400
S - 12	Cuité	812826	9283691	51		4560	2918.4
S - 13	Cuité	814645	9284756			2030	1299.2
S - 14	Cuité	814703	9284018	15	5	2130	1363.2
S - 15	Cuité	814702	9283895	16		2060	1318.4
S - 16	Cuité	814702	9283803	17	3.6	2230	1427.2
S - 17	Cuité	813326	9285286	20	6		
S - 18	Cuité	815399	9282016	42			
S - 19	Cuité	815186	9282325	42			
S - 20	Cuité	815652	9283367	22			
S - 21	Cuité	812864	9285289	31	6		
S - 22	Cuité	813404	9282734	38	15		
S - 23	Cuité	815307	9281986	50	18		
S - 24	Cuité	815493	9282446	38	22		
S - 25	Cuité	815656	9284013	22			
S - 26	Cuité	814584	9284695				
S - 27	Cuité	815125	9282571				
S - 28	Cuité	815064	9282633				
S - 29	Cuité	815590	9283306				
S - 30	Cuité	815718	9283951				
S - 31	Cuité	813343	9282796				
S - 32	Cuité	815430	9282046	31	6		
S - 35	Nova Floresta	807278	9287134	51	10		
S - 36	Nova Floresta	807959	9288052	27	12		
S - 37	Nova Floresta	807433	9287440	29	10		
S - 38	Nova Floresta	807279	9287410	30	13		
S - 39	Nova Floresta	807279	9287349	31	10		
S - 40	Nova Floresta	807278	9287072	60	0.7		
S - 41	Nova Floresta	807277	9287011	20.5	7		
S - 42	Nova Floresta	807277	9286918	21			
S - 43	Nova Floresta	811508	9284620	40	19	3230	2067.2
S - 44	Nova Floresta	811910	9285171	47		3710	2374.4
S - 45	Nova Floresta	808161	9285592	50		6650	4256
S - 46	Nova Floresta	806903	9286121	40	12	2760	1766.4
S - 47	Nova Floresta	807087	9286028	45			
S - 48	Nova Floresta	807925	9287376	40			
S - 49	Nova Floresta	807865	9287715	38			

Continuação da Tabela A1:

Poço	Município	Longitude	Latitude	Prof	NE	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)
S - 50	Nova Floresta	809239	9285801	50		3790	2425.6
S - 51	Nova Floresta	809608	9285860	50			
S - 52	Nova Floresta	808645	9284113	50		1249	799.36
S - 53	Nova Floresta	807269	9285443	40	14		
S - 54	Nova Floresta	809423	9285800	29	10		
S - 55	Nova Floresta	809610	9286106	22	9		
S - 56	Nova Floresta	808837	9285588	25	5		
S - 57	Nova Floresta	809917	9285982	25	9		
S - 58	Nova Floresta	806902	9285937	27	8		
S - 59	Nova Floresta	808841	9286203				
S - 60	Nova Floresta	810778	9286131				
S - 61	Nova Floresta	808747	9285834				
S - 62	Nova Floresta	811618	9287878				
S - 63	Nova Floresta	807571	9284488				
S - 64	Nova Floresta	806948	9283016				
S - 65	Nova Floresta	810932	9286253	60	16		
S - 66	Nova Floresta	810936	9286868	45	24		
S - 67	Nova Floresta	809060	9286878	50	19		
S - 72	Picuí	805432	9286990	27	8		
S - 73	Picuí	800150	9288463	35	13	5120	3276.8
S - 74	Picuí	799810	9288004				
S - 75	Picuí	802233	9286853	36		6020	3852.8
S - 76	Picuí	805092	9286623	40			
S - 77	Picuí	803488	9285709	32		2750	1760
S - 78	Picuí	803581	9285709	30		1602	1025.28
S - 79	Picuí	805026	9285855	50			
S - 80	Picuí	803064	9286941	32			
S - 81	Picuí	802576	9287620	35		9380	6003.2
S - 82	Picuí	802298	9287437	40			
S - 83	Picuí	801808	9287993	30		2370	1516.8
S - 84	Picuí	801932	9288085	28			
S - 85	Picuí	801496	9286888	30		6280	4019.2
S - 86	Picuí	802504	9285899	28		3700	2368
S - 87	Picuí	801217	9286459	35		2020	1292.8
S - 88	Picuí	800790	9287261	35		1309	837.76
S - 89	Picuí	800730	9287507	30		1934	1237.76
S - 90	Picuí	799933	9288003	30			
S - 91	Picuí	800119	9288433	30		4810	3078.4
S - 92	Picuí	798600	9286104	30		1057	676.48
S - 93	Picuí	798419	9286536	50		1060	678.4
S - 94	Picuí	798726	9286657	35		1122	718.08
S - 95	Picuí	798881	9286779	42			
S - 96	Picuí	802286	9291003	36			
S - 97	Picuí	802410	9291249	30		1385	886.4
S - 98	Picuí	800292	9292028	42	17	1368	875.52
S - 99	Picuí	800323	9291997	30			
S - 100	Picuí	801705	9291683	35			
S - 101	Picuí	799703	9268176	50		13900	8896
S - 102	Picuí	802873	9291461				
S - 103	Picuí	796937	9268130	45	6		
S - 104	Picuí	799968	9288741	36	2		
S - 105	Picuí	804845	9286563	29			
S - 106	Picuí	803577	9285094	48	13		
S - 107	Picuí	803575	9284756	11			
S - 108	Picuí	802718	9291233				
S - 109	Picuí	802545	9289448				
S - 110	Picuí	801709	9288911				

Continuação da Tabela A1:

Poço	Município	Longitude	Latitude	Prof	NE	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)
S - 111	Picuí	801438	9286832				
S - 112	Picuí	801745	9286977				
S - 113	Picuí	803995	9286882				
S - 114	Picuí	801044	9287050				
S - 115	Picuí	800095	9288412				
S - 116	Picuí	799358	9288172				
S - 117	Picuí	802719	9291230				
S - 118	Picuí	802845	9291419				
S - 119	Picuí	805638	9285329				
S - 120	Picuí	803056	9291276	50	5		

Tabela A2 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços cadastrados na Formação Serra dos Martins na área de Nova Floresta – Picuí – Cuité.

Poço	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP (mV)	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 33 (p17)	Cuité	812715.89	9287858.09	3,760.0	2,236.3	4.7	255.6	2.15	8.6
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	6.5	48.8	813.7	11.3	10	10	11	1,278.9	0
C-34 (p15)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Cuité	816227.57	9282755.28	1,362.0	708.2	3.8	200.2	0.66	12.3
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	23.3	128	198.7	4.7	0	0	3	415.4	0.1
C - 68 (p14)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Nova Floresta	807122.46	9286996.69	6,200.0	3,667.8	5.6	245.8	3.16	108
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	173.8	994	965	20.7	20	20	1.8	2,314.6	0.03
C - 69 (p13)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Nova Floresta	807033.93	9285961.06	3290	1645	3.52	203.2	1.72	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 70 (p18)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Nova Floresta	807406.89	9285412.43	4,570.0	2,633.1	4.1	205.9	2.39	84.4
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	103	640	709.6	26.4	0	0	1.2	1,633.0	0
C - 71 (p16)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Nova Floresta	811448.32	9284193.4	3,480.0	1,954.3	6.2	169.2	1.8	126.9
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	140.8	904	331.2	16.9	70	70	1.2	1,233.6	0.02
C - 121 (p01)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Picuí	798489.7	9285292.89	881.5	503.2	5.7	199.4	0.4	17.3
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	20.9	130.2	106	8.5	32	32	4.4	252.1	0.05

Continuação da Tabela A2:

Poço	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 122 (p09)	Picuí	800084.76	9286853.66	4174	2087	4.42	147.7	2.21	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 123 (p03)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Picuí	800675.93	9287437.23	1715	858	8.5	38.5	0.86	
C - 124 (p02)	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 125 (p08)	Picuí	799941.82	9287820.74	3224	1612	6.01	80.3	1.68	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 126 (p07)	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Picuí	800064.81	9288365.49	2754	1377	5.75	88		
C - 127 (p05)	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 128 (p06)	Picuí	802312.55	9288766.43	341	171	6.17	68.8	0.16	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 129 (p04)									
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 130 (p12)	Picuí	802918.19	9291131.63	409.2	302	6.5	189.5	0.15	31.7
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 131 (p11)									
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 132 (p10)	Picuí	805091.27	9286449.07	3040	1520	6.09	95.8	1.58	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 133 (p10)									
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 134 (p10)	Picuí	803640.46	9285534.48	2888	1444	6.16	90.7	1.5	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
C - 135 (p10)									
	Município	Longitude	Latitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C - 136 (p10)	Picuí	804970.82	9285762.03	3014	1507	3.95	150.8	1.57	
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)

Tabela A3 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços do SIAGAS na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.

Poço	Município	Geologia	Latitude	Longitude	Prof	NE (m)	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)
S-1	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.666666	-36.102777	39			
S-2	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.669444	-36.102777	26			
S-3	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.663055	-36.090833	24			
S-4	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.663888	-36.086111	70			
S-5	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.668888	-36.061944	46		4820.00	3084.80
S-6	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.666111	-36.049166	70			
S-7	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.650555	-36.052222	50		6530.00	4179.20
S-8	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.658888	-36.045277	50	4.50		
S-9	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.65	-36.044444	70	37.00		
S-10	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.652778	-36.047222	70	16.00		
S-11	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.65	-36.043056	30	1.60		
S-12	Barra de Santa Rosa	Cristalino	-6.646944	-36.039166	50		8880.00	5683.20
S-28	Cuité	Sedimentar	-6.647222	-36.097222	70	6		
S-29	Cuité	Sedimentar	-6.63	-36.077222				
S-30	Cuité	Sedimentar	-6.619444	-36.073611	57			
S-31	Cuité	Sedimentar	-6.631111	-36.0675				
S-32	Cuité	Sedimentar	-6.625555	-36.056388				
S-33	Cuité	Sedimentar	-6.638055	-36.053611			8650	5536
S-34	Cuité	Cristalino	-6.618611	-36.01				
S-35	Cuité	Cristalino	-6.666666	-36.116666	25.5	17		
S-36	Cuité	Cristalino	-6.663888	-36.098333		3.8	2740	1753.6
S-37	Cuité	Cristalino	-6.656944	-36.109722	39			
S-38	Cuité	Cristalino	-6.654166	-36.108333	45			
S-39	Cuité	Cristalino	-6.633333	-36.116666			9890	6329.6
S-40	Cuité	Cristalino	-6.621666	-36.105			2270	1452.8
S-41	Cuité	Cristalino	-6.619722	-36.093333			11720	7500.8
S-42	Cuité	Cristalino	-6.624166	-36.0875			17860	11430.4
S-43	Cuité	Cristalino	-6.611111	-36.097777		6.63	11730	7507.2
S-44	Cuité	Cristalino	-6.614444	-36.086944		3.07		
S-45	Cuité	Cristalino	-6.600277	-36.086666				
S-46	Cuité	Cristalino	-6.6	-36.080555	56			
S-47	Cuité	Cristalino	-6.576388	-36.035			9250	5920
S-48	Cuité	Cristalino	-6.595	-36.022777	50			
S-49	Cuité	Cristalino	-6.598333	-36.003888	70	6		

Tabela A4 - Dados hidroquímicos e hidrogeológicos dos poços cadastrados na Formação Serra dos Martins na área de Barra de Santa Rosa – Cuité.

Poço	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP (mV)	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C-13	Barra de Santa Rosa	9262188.35	820550.5	5278	2639	7.26	71.5	2.84	820.8
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	429.2	1250		22		50	230	1589.96	0.43
C-14	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9262055.84	821119.08	4975	2488	7.62	74.3	2.67	555
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	565	1120		18.5		104	320	1479.96	2.56

Continuação da Tabela A4:

Poço	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
C-15	Barra de Santa Rosa	9262424.78	821516.53	5813	2903	7.24	88.6	3.14	198.4
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
	229	1,450.0	880.3	6.7	560	560	327.2	2,037.7	0.03
C-16	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9262489.29	821656.37	7437	3718	7.7	82.3	4.1	795
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
635	1430		6.5		80	470	2379.93	6.55	
C-17	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9262449.93	822347.19	6340	3170	7.68	78.1	3.46	715
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
685	1400		12		79	220	2179.94	5.25	
C-18	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9261858.98	822106.46	11130	5568	7.14	106.7	6.33	492.8
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
584.6	3,668	1,355.6	8.6	580	580	682.8	4,277.8	0.05	
C-19	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9261989.9	824581.75	4433	2216	7.59	89.4	2.36	280
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
670	950		4		92	220	1239.97	1.29	
C - 20	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9262811.09	827112.14	2918	1459	7.62	84.3	1.52	210
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
430	640		5		108	140	844.98	2.36	
C-21	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9263787.4	827647.54	10100	5054	7.75	88.6	5.7	1125
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
1750	2875		15.5		55	550	4099.89	5.71	
C-22	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9263781.3	826887.5	10980	5495	7.03	99	6.23	1050
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
1575	2625		27.5		107	400	3849.89	0.6	
C-23	Município	Latitude	Longitude	Condutividade (mS/cm)	STD (mg/L)	pH	ORP	Salinidade (PSU)	Ca (mg/L)
	Barra de Santa Rosa	9264055.79	825927.41	3578	1789	8.6	64.9	1.88	420
	Mg (mg/L)	Dureza total (mg/L)	Sódio (mg/L)	Potássio (mg/L)	Alcalinidade em bicarbonato (mg/L)	Alcalinidade total (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Cloreto (mg/L)	Nitrato (mg/L)
700	1120		17.5		56	110	1134.97	2.4	

