



UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ
CENTRO DE CIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOLOGIA

JOYCE SHANTALA FERNANDES DE OLIVEIRA SOUSA

IMPACTOS AMBIENTAIS E NA SAÚDE PÚBLICA DAS ÁGUAS DE
ABASTECIMENTO NO MUNICÍPIO DE ARACATI-CE

FORTALEZA

2023

JOYCE SHANTALA FERNANDES DE OLIVEIRA SOUSA

IMPACTOS AMBIENTAIS E NA SAÚDE PÚBLICA DAS ÁGUAS DE
ABASTECIMENTO NO MUNICÍPIO DE ARACATI-CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia. Linha de Pesquisa: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.

Coorientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.

FORTALEZA

2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal do Ceará
Sistema de Bibliotecas

Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

- S697i Sousa, Joyce Shantala Fernandes de Oliveira.
Impactos ambientais e na saúde pública das águas de abastecimento no município de Aracati-CE/ Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa. – 2023.
149 f. : il. color.
- Dissertação (mestrado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em Geologia, Fortaleza, 2023.
Orientação: Profa. Dra. Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro.
Coorientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante

1. Recursos hídricos. 2. Fontes poluentes. 3. Saúde. I. Título.

CDD 551

JOYCE SHANTALA FERNANDES DE OLIVEIRA SOUSA

IMPACTOS AMBIENTAIS E NA SAÚDE PÚBLICA DAS ÁGUAS DE
ABASTECIMENTO NO MUNICÍPIO DE ARACATI-CE

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Geologia. Área de concentração: Geologia. Linha de Pesquisa: Geologia Ambiental e Recursos Hídricos.

Aprovada em: 24/02/2023.

BANCA EXAMINADORA

Prof.^a Dr.^a Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro (Orientadora)
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr.^a Diolande Ferreira Gomes Freire
Universidade Federal do Ceará (UFC)

Dr. Cassio Roberto da Silva
Serviço Geológico do Brasil (CPRM)

AGRADECIMENTOS

A Deus por ter nos dado saúde e força para superar as dificuldades.

A minha orientadora Prof.^a Dr.^a Ana Rita Salgueiro e ao meu coorientador Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante pela excelente orientação, paciência e companheirismo com que me guiou nesta jornada.

Ao Departamento de Geologia/CC/UFC, ao Laboratório de Geoprocessamento do Ceará (GEOCE), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela estrutura fornecida para a realização deste trabalho, além da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo apoio financeiro com a manutenção da bolsa de auxílio ao mestrado - Código de Financiamento 001.

Aos professores participantes da banca examinadora Dr. Cassio Roberto da Silva e Dr.^a Diolande Ferreira Gomes pelo tempo, pelas valiosas colaborações e sugestões.

A minha amiga Luzia Suerlange e ao meu amigo Tomaz Alexandre por todo apoio emocional, pelos ensinamentos e companheirismo e principalmente, pela amizade construída e fortalecida ao longo destes três anos de trabalho.

Agradeço ao meu namorado, Cláudio Ângelo, pelo constante incentivo, pela paciência, compreensão e amparo durante a elaboração da pesquisa.

Aos colegas do GEOCE, pelas reflexões, críticas e sugestões recebidas.

Aos meus pais e familiares, por todo o incentivo e confiança depositado. Sem o alicerce deles seria mais difícil vencer esse desafio.

RESUMO

Os impactos na qualidade das águas superficiais e subterrâneas refletem na qualidade de vida da população, pois a ingestão de água contaminada, seja de forma direta ou indireta prolongada e em excesso pode comprometer a saúde humana. Nesse contexto, o trabalho foi realizado no município de Aracati, localizado no litoral leste do Estado do Ceará, Região Nordeste do Brasil, com objetivo de investigar a vulnerabilidade e risco que inclua todas as informações relevantes aos estudos de Geologia Médica realizada no município para identificar áreas potenciais de contaminação das águas subterrâneas e seus efeitos à saúde. Em outubro de 2020, foram coletadas 25 amostras de águas que incluem mananciais superficiais e subterrâneas, bem como registro das principais fontes poluidoras identificadas. Os dados foram tratados com classificação iônica, análise estatística, técnicas de interpolação em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), razão iônica e o enquadramento das águas na Portaria Nº 888/2021 do Ministério da Saúde para avaliar a correlação entre as diversas variáveis existentes e fontes poluentes detectadas na área. A interpretação dos dados revela que 82% da área de estudo apresenta vulnerabilidade natural de média a alto; o rio Jaguaribe é classificado como água salina; as águas apresentam caráter levemente ácido entre 4,26 a 7,68; existe o predomínio de águas Cloretadas Sódicas (95%) na área; as águas apresentam padrão hidroquímico similar a água com intrusão salina que é reafirmado pelas correlações observadas entre os parâmetros na análise estatística; 60% das amostras são águas salobras (média de 1587,67 mg/L para STD); 50% das águas apresentam nitrato fora do permitido pela legislação (média de 13,21 mg/L). Constatou-se que todas as 20 amostras de águas subterrâneas contêm pelo menos um parâmetro fora do padrão de potabilidade, e pode ser proveniente de material geogênico ou por ação antrópica; a alteração na qualidade da água também pode estar associada à recepção de carga contaminante pelos aquíferos, pois a área de estudo está em cota mais baixa. O valor de condutividade do efluente de carcinicultura apresenta 20 vezes maior que o permitido pela Resolução COEMA nº 9/2021. Com os dados acima, pode-se afirmar que há impactos ambientais e riscos à saúde da população de Aracati e que os órgãos responsáveis devem se preocupar com a situação atual.

Palavras-chave: recursos hídricos; fontes poluentes; saúde.

ABSTRACT

The effects on surface and groundwater quality have an impact on the population's quality of life since prolonged and excessive consumption of contaminated water can harm people's health. The work was done in the municipality of Aracati, which is situated on the east coast of the State of Ceará, in the Northeast Region of Brazil, with the goal of examining the vulnerability and risk that includes all pertinent data to the Medical Geology research conducted in the municipality to identify potential areas of groundwater contamination and its effects on health. 25 water samples, including those from surface and groundwater springs, were taken in October 2020, and the primary sources of pollution were catalogued. To determine the relationship between the various existing variables and the pollutant sources found in the area, the data were processed using ionic classification, statistical analysis, interpolation techniques in the Geographic Information System (GIS) environment, ionic ratio, and the framing of waters in Ordinance N° 888/2021 of the Ministry of Health. The data interpretation shows that 82% of the study area exhibits medium to high natural vulnerability; the Jaguaribe River is categorized as saline water; the waters have a slightly acidic character between 4.26 and 7.68; sodium chloride waters predominate (95%); and the waters have a hydrochemical pattern resembling water with saline intrusion, which is confirmed by correlations observed among the parameters in the statistical analysis. 60% of the samples are brackish waters (average STD concentration: 1587.67 mg/L); 50% of the samples have nitrate concentrations that are higher than those permitted by law (average: 13.21 mg/L). It was discovered that all 20 groundwater samples had at least one parameter that was below the standard for potability. These parameters may have been caused by geological or human activity, and the research area's lower elevation may have contributed to the change in water quality. The carciniculture effluent present has a conductivity value that is 20 times higher than what is permitted by COEMA Resolution N° 9/2021. With the information provided above, it is clear that the people of Aracati are subject to environmental effects and health concerns, and the accountable parties need to be worried about the current situation.

Keywords: water resources; polluting sources; health.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1	–	Distribuição espacial das médias de taxas de mortalidade municipal por cânceres no Estado do Ceará em uma série histórica de 2000 a 2020	19
Figura 2	–	Método GOD para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos	26
Figura 3	–	Mapa de localização e acesso da área de estudo	32
Figura 4	–	Precipitação pluviométrica (mm) dos 46 anos em Aracati	48
Figura 5	–	Distribuição espacial das profundidades dos poços cadastrados no SIAGAS	51
Figura 6	–	Distribuição espacial da condutividade elétrica na região	55
Figura 7	–	Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 das ocupações antrópicas nas margens do rio Jaguaribe	58
Figura 8	–	Distribuição espacial das amostras do rio Jaguaribe e a distância de cada ponto em relação a foz	60
Figura 9	–	Mosaico fotográfico de poços visitados na área de estudo	63
Figura 10	–	Diagrama de Piper para as águas subterrâneas de Aracati-CE	69
Figura 11	–	Diagrama de Schoeller & Berkloff para potabilidade das águas subterrâneas de Aracati – CE	71
Figura 12	–	Correlação de Pearson entre os parâmetros físico-químicos das amostras	73
Figura 13	–	Screeplot das Componentes Principais para as amostras de água com sua variância e autovalores	76
Figura 14	–	Representação do padrão dos parâmetros nas amostras de águas subterrâneas em relação as componentes CP1 e CP2	77
Figura 15	–	Representação do padrão dos parâmetros nas amostras de águas subterrâneas em relação as componentes CP1 e CP3	78

Figura 16	–	Comportamento dos indivíduos e a classificação de acordo com a salinidade em relação as componentes CP1 e CP2	79
Figura 17	–	Comportamento dos indivíduos e a classificação de acordo com a salinidade em relação as componentes CP1 e CP3	79
Figura 18	–	Distribuição espacial de STD nas águas subterrâneas	84
Figura 19	–	Distribuição espacial de dureza total nas águas subterrâneas	86
Figura 20	–	Distribuição espacial de sódio nas águas subterrâneas	88
Figura 21	–	Distribuição espacial de cloreto nas águas subterrâneas	89
Figura 22	–	Distribuição espacial de ferro total nas águas subterrâneas	90
Figura 23	–	Distribuição espacial de nitrato nas águas subterrâneas	92
Figura 24	–	Distribuição espacial de sulfato nas águas subterrâneas	94
Figura 25	–	Fotografia aérea obtida por drone em 28 e 29 de outubro de 2020 sobre as áreas com potenciais fontes poluentes identificadas em campo	105
Figura 26	–	Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 da disposição dos resíduos sólidos do município de Aracati – CE a céu aberto ...	106
Figura 27	–	Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 do desmatamento de manguezais no município de Aracati – CE	107
Figura 28	–	Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 da disposição de efluentes de uma fazenda de carcinicultura no município de Aracati – CE	108
Figura 29	–	Solo com camadas de sal e vegetação desmatada na comunidade de Cabreiro	111
Figura 30	–	Mapa potenciométrico e as principais fontes poluentes	112

LISTA DE GRÁFICOS

Gráfico 1	–	Finalidade dos poços ativos existentes na área de estudo	62
Gráfico 2	–	Valores de pH para as amostras de águas subterrâneas	65
Gráfico 3	–	Valores de CE para as amostras de águas subterrâneas	65
Gráfico 4	–	Valores de STD para as amostras de águas subterrâneas	65
Gráfico 5	–	Valores de turbidez e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE	81
Gráfico 6	–	Valores de CE e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE	83
Gráfico 7	–	Valores de pH e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE	85
Gráfico 8	–	Concentração de Alumínio e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE	95
Gráfico 9	–	Número de óbitos por ano por Infarto agudo do miocárdio	98
Gráfico 10	–	Número de óbitos por ano por Diabetes de tipo não especificado	98
Gráfico 11	–	Número de óbitos por ano por AVC	99
Gráfico 12	–	Número de óbitos por ano por Hipertensão essencial	99
Gráfico 13	–	Número de óbitos por ano por Insuficiência cardíaca	99
Gráfico 14	–	Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna brônquios e dos pulmões	100
Gráfico 15	–	Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna estômago	100
Gráfico 16	–	Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna próstata	100
Gráfico 17	–	Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna mama	101
Gráfico 18	–	Distribuição dos valores de Na/Cl das amostras de água subterrânea	113

LISTA DE TABELAS

Tabela 1	–	Tipos mais comuns de contaminantes de águas subterrâneas e as fontes de contaminação associadas	27
Tabela 2	–	Classificação dos principais fatores que influenciam na qualidade de água subterrânea	28
Tabela 3	–	Concentração de elementos químicos presentes no corpo humano	30
Tabela 4	–	Principais fontes de pesquisa utilizadas no trabalho	38
Tabela 5	–	Interpretação dos dados para aplicação do método a partir de dados secundários disponíveis	39
Tabela 6	–	Métodos analíticos aplicados de acordo com APHA, AWWA e WEF (2012)	42
Tabela 7	–	Contaminantes analisados que podem ocorrer nas águas subterrâneas	43
Tabela 8	–	Histograma de frequências das ocorrências de precipitação no período de 1981-2020	48
Tabela 9	–	Classificação das áreas superficiais dos corpos d'água em função da área em hectare	50
Tabela 10	–	Vazão de estabilização dos poços ativos da CAGECE destinados ao abastecimento urbano	52
Tabela 11	–	Vazão de estabilização dos cinco poços ativos destinados ao abastecimento doméstico	53
Tabela 12	–	Vazão de estabilização para poços de abastecimento urbano e doméstico desativados (não instalado e equipado) para os três cenários	54
Tabela 13	–	Resultado das análises das amostras do rio Jaguaribe e os padrões estabelecidos pelo Resolução CONAMA nº 357/2005	59
Tabela 14	–	Situação da maré nos horários de coleta das amostras do rio Jaguaribe	61

Tabela 15	–	Profundidade dos poços na área de estudo obtidos pelo arquivo de dados do SIAGAS e em campo	64
Tabela 16	–	Dados de nível estático e cota do nível estático dos poços	66
Tabela 17	–	Classificação da potabilidade das águas dos poços tubulares e cacimbões em Aracati segundo o Diagrama de Schoeller & Berkaloff	72
Tabela 18	–	Classificação da dureza das águas subterrâneas da área	87
Tabela 19	–	A soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs nas águas subterrâneas	93
Tabela 20	–	Resultado das análises da amostra do efluente e os padrões estabelecidos pela Resolução COEMA nº 9/2017	109

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAGECE	Companhia de Água e Esgoto do Ceará
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
CNRH	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COEMA	Conselho Estadual de Meio Ambiente
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DATASUS	Departamento de Informática do Sistema Único de Saúde do Brasil
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GEOSGB	Sistema de Geociências do Serviço Geológico do Brasil
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
MS	Ministério da Saúde
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos (do inglês <i>United States Geological Survey</i>)

LISTA DE SÍMBOLOS

- % Porcentagem
- ® Marca Registrada

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	18
1.1	Objetivos	21
1.1.1	<i>Objetivos específicos</i>	21
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	22
2.1	Recursos hídricos	22
2.2	Vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação	24
2.3	Fontes contaminantes	26
2.4	Qualidade da água	29
2.5	Geologia Médica	30
3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	32
3.1	Localização e acesso	32
3.2	Indicadores socioeconômicos e situação de saúde em Aracati	33
3.3	Caracterização hidroambiental de Aracati	33
3.4	Impactos socioambientais em Aracati	34
4	METODOLOGIA	38
4.1	Aquisição de dados e elaboração do mapa base	38
4.2	Reconhecimento de campo e amostragem de águas	40
4.3	Tratamento e interpretação dos dados	44
4.3.1	<i>Hidroquímica</i>	45
4.3.2	<i>Análise estatística dos dados</i>	46
5	RECURSOS HÍDRICOS NO MUNICÍPIO DE ARACATI	47
5.1	Oferta hídrica para o consumo humano em Aracati	47
5.1.1	<i>Análise dos dados Pluviométricos</i>	47
5.1.2	<i>Hidrografia e Mapeamento dos Espelhos D'água</i>	49
5.1.3	<i>Características físicas dos poços</i>	50
5.1.4	<i>Produtividade dos poços no município de Aracati</i>	51
5.1.5	<i>Características químicas das águas subterrâneas captadas no município</i>	55
5.2	Características do rio Jaguaribe	57
5.3	Características dos poços existentes na área de estudo	62
5.4	Vulnerabilidade natural dos aquíferos sedimentares	67

6	PADRÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI	68
6.1	Hidroquímica das águas	68
6.2	Correlação e análise de componentes principais	72
7	QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS PARA O CONSUMO HUMANO	81
7.1	Turbidez	81
7.2	Condutividade elétrica (CE)	82
7.3	Sólidos Totais Dissolvidos (STD)	83
7.4	Potencial Hidrogeniônico (pH)	85
7.5	Dureza Total	86
7.6	Sódio	87
7.7	Cloreto	88
7.8	Ferro Total	90
7.9	Nitrato	91
7.10	Sulfato	94
7.11	Alumínio	95
7.12	Fluoreto, Nitrito e Amônia	96
7.13	Parâmetros químicos sem VMP	97
7.14	Implicações na saúde humana	98
8	FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO	104
8.1	Fontes poluidoras identificadas na área de estudo	104
8.2	Os impactos das fontes contaminantes nas águas subterrâneas ...	110
9	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	114
9.1	Conclusões	114
9.2	Recomendações	116
	REFERÊNCIAS	118
	APÊNDICE A – MAPA DE PONTOS VISITADOS NA ÁREA DE ESTUDO	133
	APÊNDICE B – SCENARIO AND WATER SUPPLY DIAGNOSIS FOR CONSUMPTION IN THE MUNICIPALITY OF ARACATI, CEARÁ	134
	APÊNDICE C – TABELA DE IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS E DAS AMOSTRAS DE ÁGUA COLETADAS	144

APÊNDICE D – COMPORTAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI, CE	147
APÊNDICE E – MAPA PRÉ-CAMPO.....	148
APÊNDICE F – MATRIZ DO GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE OS PARÂMETROS ANALISADOS	149
APÊNDICE G – TABELA DE RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA	150
ANEXO A – QUINZE PRINCIPAIS CAUSAS DE MORTALIDADE POR RESIDÊNCIA NA CATEGORIA CID-10 QUE OCORRERAM NO MUNICÍPIO DE ARACATI NOS ANOS DE 1996 A 2020	151

1 INTRODUÇÃO

A preocupação com a degradação de sistemas naturais da Terra por meio de materiais, processos geológicos e antropogênico e as consequências para a saúde humana e dos ecossistemas é foco de estudo da Geologia Médica (BUNNELL, 2004; HASAN, 2021). Sabe-se que a água é um componente essencial do meio ambiente, mas a qualidade das águas superficiais e subterrâneas vem se degradando há muito tempo devido à fatores naturais e aos causados pelo homem (MAGESH *et al.*, 2012, UDDIN *et al.*, 2018). É de suma importância avaliar a qualidade da água potável para a distribuição e abastecimento à população, pois a legislação para potabilidade está sempre em processo de alterações e constante revisão, e proporciona proteção da saúde pública.

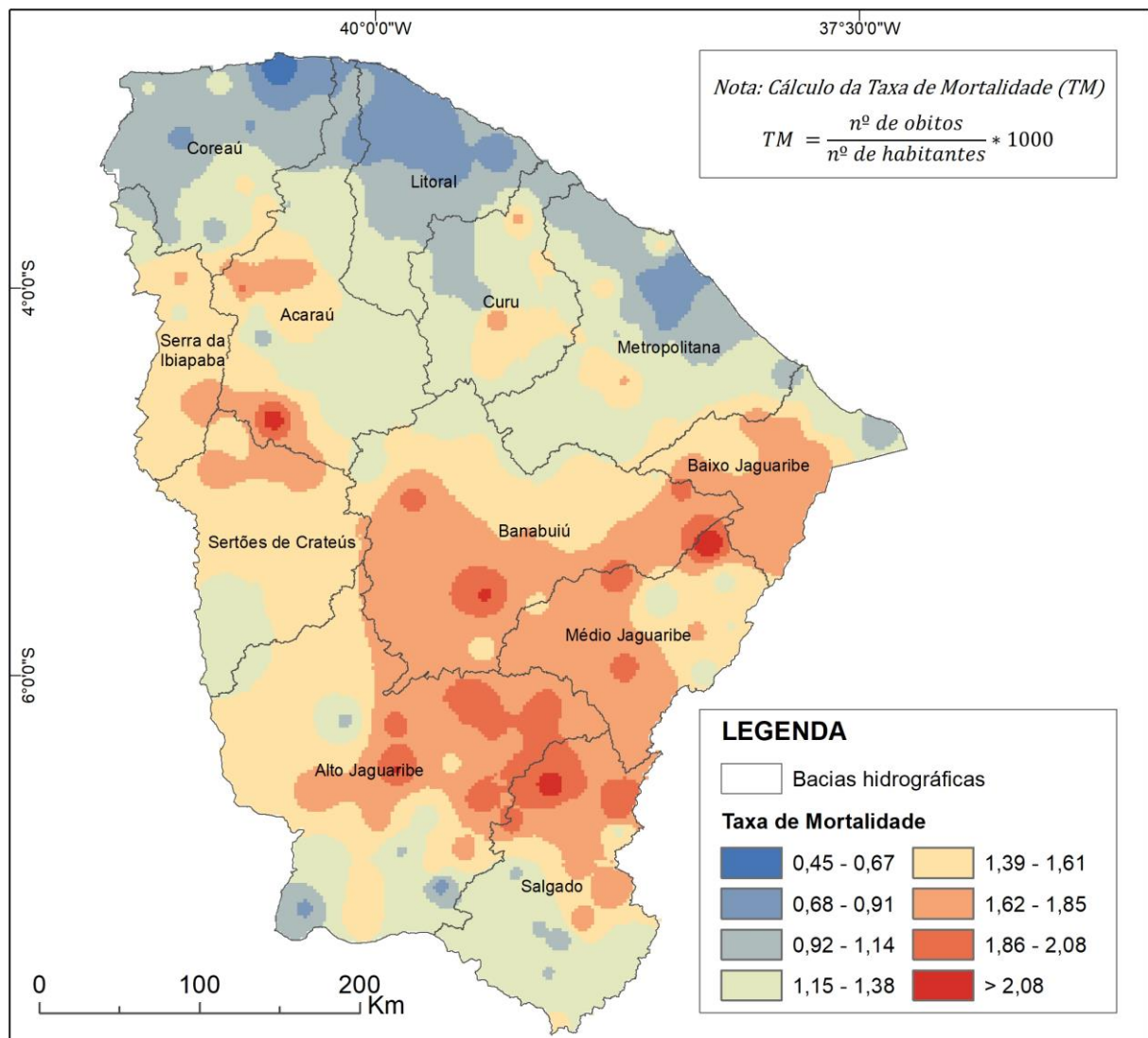
Na maioria dos sistemas hídricos a qualidade de água atinge suas condições críticas durante as estiagens. Em regiões urbanas, o início das inundações também gera condições críticas de qualidade de água (TUCCI, 2002). O Semiárido brasileiro, que inclui o centro da região Nordeste e norte da região Sudeste, é marcado por forte insolação, temperaturas relativamente altas, irregularidade e escassez de chuvas, concentradas em períodos de três a quatro meses por ano, considerados insuficientes para suprir os mananciais superficiais locais (SILVA *et al.*, 2010). Outras causas, como o aumento da demanda solicitada pelas expansões urbana, industrial e agrícola, tornaram a água escassa, impondo a necessidade da criação de métodos de planejamento e monitoramento do uso da água.

A água subterrânea é um dos recursos hídricos importantes no Semiárido, pois compensa a escassez de águas superficiais e pluviais e tem grande importância na manutenção das culturas. Naturalmente, as águas subterrâneas recebem menores taxas de contaminantes em relação às águas superficiais, mas intensas atividades antrópicas sobre esses mananciais contribuem na poluição de sistemas aquíferos (MACHIWAL; JHA, 2015). O Estado do Ceará, por exemplo, possui 91,98% (136.142,17 km²) da sua área inserida na região do semiárido brasileiro (PEREIRA JÚNIOR, 2007).

No Ceará, o número de óbitos por cânceres mais frequentes para um período de 20 anos, entre 2000 e 2020 incluem: estômago; fígado; brônquios e dos pulmões; mama e próstata (MINISTÉRIO DA SAÚDE - BRASIL, 2021). A distribuição

espacial das médias taxas de mortalidade, ajustados em função da população municipal no censo de 2022, para os cinco cânceres revela que os municípios pertencentes a Sub-Bacia do Baixo Jaguaribe apresentam quadros altos de mortalidade (Figura 1).

Figura 1 – Distribuição espacial das médias de taxas de mortalidade municipal por cânceres no Estado do Ceará em uma série histórica de 2000 a 2020.



Fonte: Ministério da Saúde – Brasil (2021, com adaptações).

Diversos estudos abordam a qualidade de água dos mananciais subterrâneos e o comportamento hidroquímico das águas no Baixo Jaguaribe em vários aquíferos, como as pesquisas desenvolvidas por Caracas (2013), em Aracati e Fortim, sobre a mobilidade geoquímica de metais-traço (entre eles Zn, Cr, Ni, Cu, Hg)

e de ferro e manganês; Silva (2021), em Itaiçaba, e Sousa *et al.* (2021), em Russas, que avaliaram a potabilidade das águas subterrâneas destinadas ao consumo humano nos municípios supracitados; Maia *et al.* (2018), em Icapuí, sobre contaminação das águas por nitrato e seus efeitos na saúde; e Granjeiro (2012), em Jaguaruana, Limoeiro do Norte e Quixeré, sobre a hidroquímica das águas subterrâneas.

A região ainda carece de discussões aprofundadas voltadas à Geologia Médica, pois a maioria dos municípios do Baixo Jaguaribe apresentam quadros altos de mortalidade por doenças conforme apresentado na Figura 1. O foco de mortalidades no Baixo Jaguaribe junto a importância de se pesquisar na área da Geologia Médica nos municípios que compõe a Sub-Bacia conforme proposto por Sousa, Gadelha e Salgueiro (2019) possibilitou o desenvolvimento do presente trabalho no município de Aracati para investigação da qualidade da água destinadas ao consumo humano da população.

As áreas planas, como é o caso da Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, tendem a apresentar melhores condições de infiltração de água, e, paralelamente, maior risco de contaminação do aquífero (FRANCO *et al.*, 2015). No intervalo de 32 anos, se percebeu transformações significativas nos municípios costeiros da Região do Baixo Jaguaribe com crescimento urbano e as atividades antrópicas potencializadas junto a deficiência nos investimentos em saneamento básico por parte do poder público local ou estadual (BORGES, 2017; OLIVEIRA, 2018).

A cidade de Aracati cresceu margeando o rio Jaguaribe, pois o recurso hídrico teve importância econômica da cidade desde o período colonial, e é usufruído principalmente para recreação e pesca (VERAS, 2010), contudo a urbanização acelerada ocasionou a contaminação do solo e do rio por efluentes da carcinicultura, além de resíduos agrícolas e esgotos domésticos (COSTA *et al.*, 2013; SANTANA; COSTA; ABESSA, 2015). Outros impactos gerados pelo crescimento desordenado da cidade são a produção de lixo e tratamento ineficiente dos resíduos sólidos no lixão inserido no bairro Pedregal, redução das espécies aquáticas marítimas e estuarinas e da fauna silvestre, prejuízos econômicos e redução da renda dos pescadores por meio da diminuição da pesca estuarina e desmonte de dunas fixas e móveis que compromete a recarga aquífera que abastece a cidade (VERAS, 2010).

1.1 Objetivos

O objetivo principal desta Dissertação é desenvolver um estudo de vulnerabilidade e risco para caracterizar impactos ambientais e obter informações pertinentes aos estudos de Geologia Médica aplicados no município de Aracati, a fim de identificar áreas potenciais e/ou à contaminação das águas subterrâneas e os efeitos à saúde humana.

1.1.1 Objetivos específicos

Os objetivos específicos seguem abaixo:

- a) Coletar dados secundários correspondentes à área proposta, a destacar: perfis litológicos e construtivos de poços, potenciais fontes poluidoras, pluviométrico e geologia;
- b) Avaliar a disponibilidade hídrica do município para abastecimento público e enfatizar a importância da gestão hídrica municipal;
- c) Identificar as potenciais fontes poluidoras e os impactos existentes próximos as áreas de captação de águas subterrâneas;
- d) Amostrar águas superficiais e subterrâneas para análises qualitativas e caracterização hidroquímica;
- e) Empregar técnicas de interpolação em ambiente Sistema de Informações Geográficas (SIG) para confeccionar mapas temáticos a fim de avaliar a correlação entre as diversas variáveis existentes e fontes poluentes detectadas na área;
- f) Discutir os impactos na qualidade das águas subterrâneas decorrentes de atividades praticadas em escala espacial;
- g) Discutir as possibilidades de risco à saúde devido ao consumo de água contaminada;
- h) Enfatizar a importância de estudos de Geologia Médica como ferramenta para gestão socioambiental.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Os assuntos pertinentes ao entendimento do trabalho serão retratados nos subitens a seguir abordando as seguintes temáticas: recursos hídricos; vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação; fontes contaminantes; qualidade da água e geologia médica.

2.1 Recursos hídricos

O ciclo hidrológico representa o movimento contínuo da água da atmosfera na superfície terrestre e sob a mesma. Esse conceito é essencial no entendimento da ocorrência da água e ao desenvolvimento e administração de suprimentos em água. A evaporação da água a partir de vegetais, superfícies líquidas expostas, incluindo a superfície terrestre, e oceanos geram a umidade que forma nuvens e que retornam à água à superfície da terra ou oceanos em forma de precipitação, seja por chuva, neve ou granizo (HEATH, 2004, p. 81; WINTER *et al.*, 1998).

A primeira chuva molha a vegetação e outras superfícies e então começa a se infiltrar na terra; dependendo do uso da terra, do caráter e do conteúdo de umidade do solo e da intensidade e duração da precipitação as velocidades de infiltração variam. Quando a velocidade de precipitação excede a velocidade de infiltração ocorre o escoamento superficial. A primeira infiltração repõe a umidade do solo e, após o excesso, a água percola lentamente através da zona intermediária à zona de saturação. A água na zona de saturação move-se descendentemente e lateralmente para os locais de descarga de água subterrânea, tais como fontes naturais ou como surgência em leitos de rios, lagos e oceanos. A água ao atingir as correntes, tanto por escoamento superficial como descarga hídrica subterrânea, move-se ao mar, onde é de novo evaporada, perpetuando o ciclo. O movimento da água no ciclo hidrológico também está ligado à erosão e transporte de sedimentos e produtos químicos. Os efeitos erosivos e deposicionais de correntes, ondas e gelos produziram uma diversidade de paisagens da Terra que tornam a superfície diferente de qualquer outro planeta (HEATH, 2004, p. 81; KUCHMENT, 2004).

As águas superficiais ocorrem na forma de rios, lagos e pântanos, bem como baías e oceanos. Além disso, elas também incluem as formas sólidas de água

– neve e gelo. Em subsuperfície, a água está contida nas zonas subsaturadas e saturadas (WINTER *et al.*, 1998). A água superficial é um dos recursos mais importante para o consumo humano, atividades agrícolas, recreação e atividades industriais, no entanto sempre foi o destino de águas residuais das áreas circundantes (RAZMKHAH; ABRISHAMCHI; TORKIAN, 2010). A qualidade das águas superficiais é influenciada pela litologia das bacias hidrográficas, efluentes antropogênicos, condições climáticas e atmosféricas.

O Brasil é um país privilegiado quanto à disponibilidade hídrica superficial, com a maior reserva de água doce do mundo (12%) mas, no entanto, a sua distribuição é desproporcional entre as regiões brasileiras, principalmente em relação à densidade populacional. A região norte possui menor densidade demográfica do Brasil (4,5 hab./km²) e detém 68% da água doce do País, enquanto a região sudeste, que possui a maior densidade demográfica do Brasil (94,86 hab./km²), possui 6% do potencial hídrico, e a região nordeste conta apenas com 3% dele e, ressalte-se, 36,39 hab./km² (ANA, 2009; IBGE, 2018).

O Semiárido brasileiro, que inclui o centro da região Nordeste e norte da região Sudeste, é marcado por forte insolação, temperaturas relativamente altas, irregularidade e escassez de chuvas, concentradas em períodos de três a quatro meses por ano, considerados insuficientes para suprir os mananciais superficiais locais (SILVA *et al.*, 2010). Outras causas, como o aumento da demanda solicitada pelas expansões urbana, industrial e agrícola, tornaram a água escassa, impondo a necessidade da criação de métodos de planejamento e monitoramento do uso da água.

Globalmente, as águas subterrâneas tem importância para o desenvolvimento socioeconômico, e na solução de problemas de suprimento hídrico e de controle de poluição, intrínsecos às atividades humanas principalmente se explorado de maneira adequada (FEITOSA *et al.*, 2008, p. 812). A crescente demanda por mananciais subterrâneos já foi observado por Leal (1999 *apud* PEDROSA *et al.*, 2011) devido ao crescimento na oferta de energia elétrica e também está relacionado à poluição dos recursos hídricos superficiais. A água subterrânea é um dos recursos hídricos importantes no Semiárido, pois compensa a escassez de águas superficiais e pluviais e tem grande importância na manutenção das culturas.

Embora as águas subterrâneas apresentem dinâmica natural para receber menores taxas de contaminantes que os mananciais superficiais, as intensas ações antrópicas geram poluição de sistemas aquíferos, portanto, faz-se necessária a caracterização química e o controle da qualidade dessas águas. Os recursos hídricos subterrâneos podem ser contaminados por uma variedade de materiais, incluindo fertilizantes, pesticidas, resíduos industriais líquidos e sólidos, e sua alta salinidade, o que prejudica a saúde dos seres humanos e de todos os organismos vivos (MACHIWAL; JHA, 2015; USGS ,2018).

2.2 Vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação

A vulnerabilidade de um aquífero é determinada pelas propriedades naturais das camadas que o separa da superfície do solo. Essa vulnerabilidade natural, combinada com a presença de cargas contaminantes (antrópicos ou naturais), pode comprometer a qualidade das águas subterrâneas. Essa contaminação é uma grande preocupação em aquíferos não confinados, especialmente onde as zonas não saturadas são finas e o aquífero é raso, mas a contaminação também pode existir em aquíferos semiconfinados se as camadas de aquitardes forem finas e permeáveis (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128).

O comprometimento dos recursos hídricos é consequência de urbanização, crescimento populacional, expansão industrial, a atividade agrícola e a extração mineral (CHOWDHURY; MUKHOPADHYAY; BERA, 2022; FOSTER *et al.*, 2003, p. 128; KUMARI *et al.*, 2019). Devido às variações de comportamento do solo e do subsolo, em termos de capacidade natural de atenuação de contaminantes, é necessário não só determinar medidas universais de gerenciamento de contaminação, como definir zonas de proteção. Como resultado, estudos de vulnerabilidade, potencial e risco de contaminação são críticos, principalmente em áreas de recarga de aquíferos (PEREIRA JÚNIOR; SOARES; CASTRO, 2015).

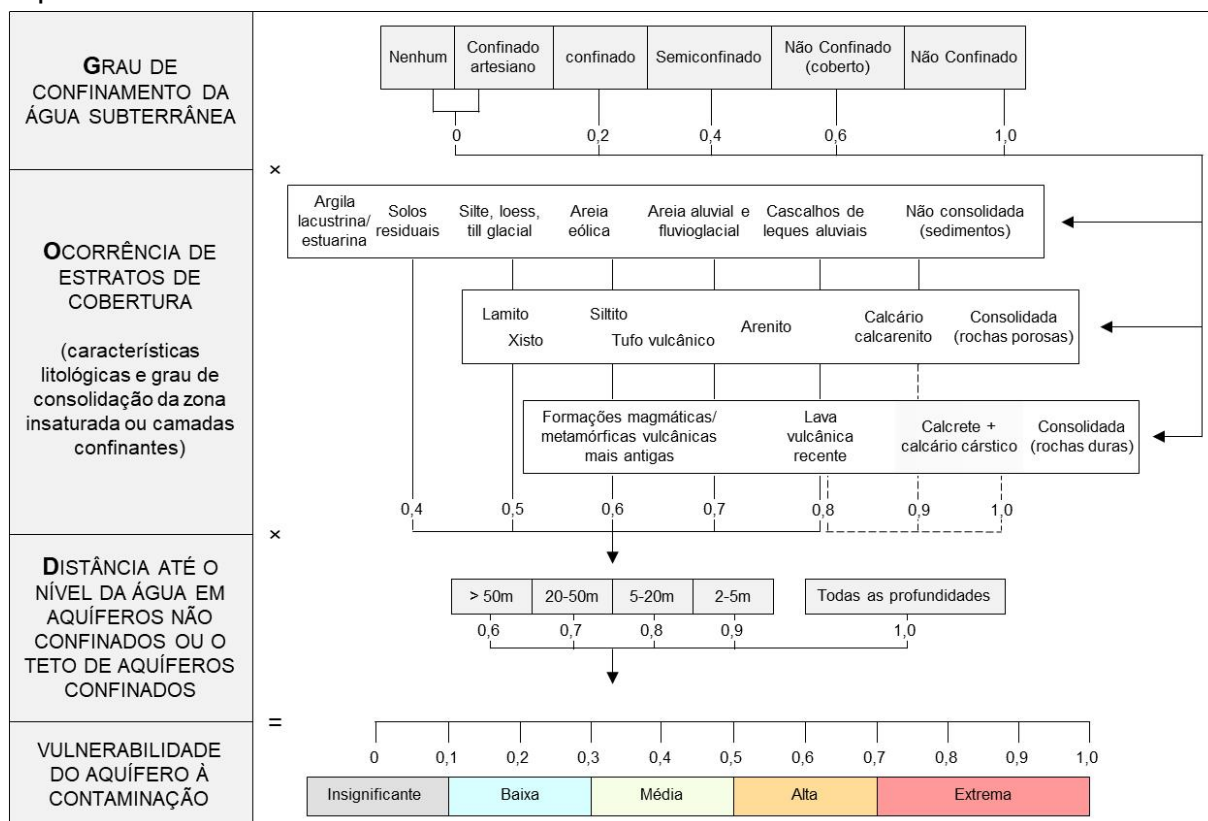
Zonas de recarga de aquíferos confinados e perímetros de interferência dos poços em aquíferos freáticos são áreas que necessitam de estudos que favoreçam a interpretação do ambiente natural frente à sua capacidade de atenuação da contaminação. Para isso, utiliza-se índices de vulnerabilidade, interpretações conjuntas com os diferentes tipos de ocupação antrópica e o potencial contaminante

dessas atividades aos aquíferos levando-se em consideração os componentes frente aos ambientes. O mapa de vulnerabilidade à contaminação do aquífero é geralmente o primeiro passo para avaliar o risco de contaminação das águas subterrâneas e proteger a qualidade da água em nível municipal ou estadual (ARRUDA, 2020; FOSTER *et al.*, 2003, p. 128).

A necessidade de mapear locais propensos à contaminação aumentou com a exploração de mananciais subterrâneos. Analisando os parâmetros do aquífero e categorizando cada característica de acordo com faixas de valores distribuídas espacialmente, é possível avaliar a vulnerabilidade do aquífero a partir de métodos de índice (NASCIMENTO, 2010; SANTOS; CRUZ). A sobreposição dos parâmetros classificados separadamente resulta no mapa geral de vulnerabilidade (TAVARES *et al.*, 2009). Podem-se citar os seguintes métodos de índices: DRASTIC (ALLER *et al.*, 1987); GOD (FOSTER, 1987); SINTACS (CIVITIA, 1994) e EPIK (DOERFLIGER; ZWAHLEN, 1997).

Avaliar a vulnerabilidade a contaminação para cada poluente, tipo de poluente ou grupo de atividades poluentes separadamente é mais consistente, porém isso exigiria a criação de um mapa para cada área específica, o que seria demorado de usar. Além disso, na maioria dos casos, os dados técnicos e/ou recursos humanos são insuficientes ou não estão disponíveis para atingir esse objetivo. Assim, para mapear a vulnerabilidade dos aquíferos, considerando as premissas supracitadas, é necessário um sistema mais generalizado e menos refinado; e neste contexto, o método GOD atende a esses requisitos devido à sua clareza conceitual e facilidade de implementação. Três parâmetros hidrogeológicos são exigidos para definir os índices de vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação: Grau de confinamento da água subterrânea (G do inglês *Groundwater hydraulic confinement*) com escala de 0 a 1; Ocorrência de estratos de cobertura (O do inglês *Overlaying Strata*) com escala de 0,4 a 1; Distância até o nível estático ou teto do aquífero confinado (D do inglês *Depth to groundwater table*) com escala de 0,6 a 1. O produto desses parâmetros resulta no índice de vulnerabilidade do aquífero, que pode variar de insignificante, baixo, médio, alto e extremo (Figura 2) (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128).

Figura 2 – Método GOD para avaliação da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos.



Fonte: Foster *et al.* (2003, p. 128) com adaptações.

2.3 Fontes contaminantes

Atividades antrópicas intensificam o processo natural de erosão do solo, pois o impacto da água da chuva no solo exposto desprende as partículas e estas são transportadas pelo escoamento superficial até um ambiente de deposição. Essa situação gera impactos negativos, como a contaminação e assoreamento dos corpos hídricos superficiais, diminuição do volume de água acumulada e do tempo de vida útil dos reservatórios, abrasão dos equipamentos de operação de barragens e o aumento na dosagem de produtos químicos no tratamento de água (PURCINO, 2017). O uso do solo pode alterar processos hidrológicos terrestres, a saber: redução ou aumento da vazão média, máxima e mínima de uma bacia hidrográfica, e; alteração da qualidade da água. Na maioria dos sistemas hídricos a qualidade de água atinge suas condições críticas durante as estiagens. Em regiões urbanas, o início das inundações também gera condições críticas de qualidade de água (TUCCI, 2002).

Substâncias químicas naturais e induzidas pelo homem podem ser encontradas em águas subterrâneas. Naturalmente, estas podem apresentar altas concentrações de metais como ferro através da dissolução dos materiais geológicos. Descargas industriais, atividades urbanas, agricultura, exploração de águas subterrâneas e descarte de resíduos podem afetar a qualidade das águas subterrâneas. Os tipos de contaminantes induzidos pelo homem são vazamentos em tanques de combustível ou derramamentos de produtos químicos tóxicos, bem como pesticidas e fertilizantes aplicados em gramados e plantações que podem se acumular e migrar para subsuperfície. Em áreas urbanas, os vazamentos de fossas sépticas e/ou locais de disposição de resíduos também podem introduzir bactérias na água. Existem situações em que o poço pode ter sido colocado em um terreno que já foi usado para algo, como um depósito de lixo ou de produtos químicos (USGS, 2018). Neste sentido, segundo Foster *et al.* (2003, p. 128), os tipos mais comuns de fontes contaminantes de águas subterrâneas e os tipos de componentes contaminantes encontrados com maior frequência estão resumidos na tabela 1.

Tabela 1 – Tipos mais comuns de contaminantes nas águas subterrâneas e as fontes de contaminação associadas.

Fonte de contaminação	Tipo de contaminante
Atividade agrícola	Nitratos; amônio; pesticidas; coliformes fecais.
Saneamento <i>in situ</i>	Nitratos; hidrocarbonetos halogenados; microrganismos.
Postos de gasolinas e garagens	Hidrocarbonetos aromáticos; benzeno; fenóis; hidrocarbonetos halogenados.
Descarte de resíduos sólidos	Amônio; salinidade; hidrocarbonetos halogenados; metais pesados.
Indústrias metalúrgicas	Tricloroetileno; tetracloroetileno; hidrocarbonetos halogenados; fenóis; metais pesados; cianeto.
Tintas e esmaltes	Alcaloide benzeno; hidrocarbonetos halogenados; metais; hidrocarbonetos aromáticos tetracloroetileno.
Indústria de madeira	Pentaclorofenol; hidrocarbonetos aromáticos; hidrocarbonetos halogenados.

Lavanderia à seco	Tricloroetileno; tetracloroetileno.
Fabricação de pesticidas	hidrocarbonetos halogenados; fenóis e arsênio.
Descarte de efluente doméstico	Nitrato; hidrocarboneto halogenados; chumbo; zinco.
Curtume	Cromo; hidrocarbonetos halogenados; fenóis.
Exploração e extração de petróleo e gás	Salinidade (cloreto de sódio); hidrocarbonetos aromáticos.
Minas de carvão e metal	Acidez; diversos metais pesados; ferro; sulfato.

Fonte: Foster *et al.* (2003, p. 128), com adaptações.

Ressalta-se que os contaminantes apresentados na Tabela 1 diferem daqueles que geralmente contaminam águas superficiais devido aos diferentes controles que governam a movimentação e persistência dos contaminantes nos respectivos sistemas hídricos. Além disso, existe diversos fatores potenciais que comprometem a qualidade da água subterrânea e são classificados segundo sua gênese (Tabela 2) (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128).

Tabela 2 – Classificação dos principais fatores que influenciam na qualidade de água subterrânea.

Tipos de contaminantes	Problemáticas
Patógenos, nitrato, amônio, cloreto, sulfato, boro, arsênio, metais pesados, carbono orgânico dissolvido, hidrocarbonetos aromáticos e halogenados, e alguns pesticidas.	Contaminação de aquíferos devido à proteção inadequada de aquíferos vulneráveis contra efluentes e lixiviados provenientes de atividades urbanas, industriais e agrícolas.
Principalmente patógeno	Contaminação da boca do poço associado à sua construção/projeto inadequada permitindo a entrada direta de águas superficiais ou águas subterrâneas rasas contaminadas.
Principalmente cloreto de sódio, mas pode incluir demais contaminantes	Intrusão salina em função da superexploração de águas doces pode

persistentes provenientes de ação antrópica.

Principalmente ferro e flúor solúveis, por vezes sulfato de magnésio, arsênio, manganês, selênio e outros elementos inorgânicos.

induzir entrada de água salgada (até mesmo contaminadas).

Contaminação de ocorrência natural relacionada a mudança na composição química das águas subterrâneas pela solução de minerais (pode agravar com contaminação antrópica e exploração excessiva).

Fonte: Foster *et al.* (2003, p. 128), com adaptações.

2.4 Qualidade da água

A contaminação de água refere-se as substâncias cujos teores ultrapassam os Valores Máximos Permitidos (VMP) pela legislação vigente no país, e, por consequência, a água apresenta-se fora dos padrões de potabilidade por apresentarem risco à saúde humana (ARRUDA, 2020). No Brasil, os padrões de qualidade de água para os mais diversos usos são estabelecidos pelas seguintes portarias:

- a) Portaria MS nº. 888/2021 que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade e padrão de potabilidade (MS/GM, 2021);
- b) Resolução CONAMA nº. 357/2005 e nº. 397/2008 e nº. 430/2011 que dispões sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dão outras providências;
- c) Resolução CONAMA nº. 396/2008 que dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências;
- d) Resolução CNRH nº. 91/2008 que dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos (CNRH, 2008).
- e) Decisão de Diretoria n.º 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021 que dispõe da atualização dos Valores Orientadores para Solos e Águas Subterrâneas no Estado de São Paulo (CETESB, 2021).

2.5 Geologia Médica

Os seres vivos necessitam, para sua sobrevivência, de determinados elementos químicos que são facilmente absorvidos pelas células, os quais são ingeridos, principalmente, pela água e pelos alimentos (HASAN, 2021; SILVA; FIGUEIREDO; CAPITANI, 2006). Para os humanos, os elementos químicos são classificados conforme a Tabela 3.

Tabela 3 – Concentração de elementos químicos presentes no corpo humano.

Classificação	Elementos	Concentração
Elementos essenciais	H, O, C, Ca, Mg, N, Na, K, P, S, Cl	Compreende 99,9% do corpo humano
Elementos maiores	C, H, N, O	> 1%, compreende de 3 a 65% do corpo humano
Elementos menores	Ca, Cl, K, Mg, Na, P, S	0,1–1% (1000–10000 mg/L)
Elementos traços	As, Br, Co, Cr, Cu, F, Fe, I, Li, Mn, Mo, Ni, Se, V, W, Zn	< 0,1%

Fonte: Hasan (2021), com adaptações.

Apesar de ocorrerem em pequenas quantidades no corpo humano e em outros organismos, os elementos traços desempenham um papel vital na manutenção da saúde e do bem-estar (HASAN, 2021). Existem elementos químicos que propiciam benefício ou toxicidade, dependendo dos teores presentes na água ingerida: o cromo (III) é um nutriente essencial para o metabolismo do organismo, no entanto, ingerir água com concentrações de cromo (IV) provoca efeitos gastrointestinais adversos, incluindo dor abdominal, vômitos, ulceração gastrointestinal, hemorragia e necrose, e diarreia (ATSDR, 2012a). A ingestão de manganês em baixos teores é essencial para saúde humana, porém em teores mais elevados pode causar problemas neurológicos (ATSDR, 2012b). Os elementos Al, Cd, Hg, Tl, Pb, Sn, As, Sb e radioativos são considerados tóxicos. Os demais carecem de estudos mais aprofundados (FRIZZO, 2016).

A intoxicação pela água potável ocorre geralmente por ingestão prolongada (exposição crônica), ou indiretamente, pela ingestão de organismos que absorveram

e concentraram tais constituintes da água. Inúmeras são as ocorrências de intoxicações e doenças em humanos e animais, algumas delas endêmicas em grandes áreas, relacionadas ao consumo d'água com contaminantes. Casos de intoxicação por arsênio presente na água consumida, por exemplo, ocorreu na China, Índia, México, Chile e Argentina, atingindo milhares de pessoas (SCARPELLI, 2003).

Elementos químicos e compostos que influenciam a qualidade da água também são derivados de materiais e processos geológicos, os quais têm impacto na saúde humana, bem como na saúde de plantas e animais e, em um sentido mais amplo, todos os elementos não vivos do meio ambiente (HASAN, 2021). O estudo das variações regionais na distribuição dos elementos químicos, especialmente metais e metaloides, seu comportamento geológico-geoquímico, contaminação natural e antropogênica e o impacto do excesso ou deficiência na saúde humana, animal e/ou vegetal, é conhecido como Geologia Médica (SILVA; FIGUEIREDO; CAPITANI, 2006).

A geologia médica fez grandes avanços nos últimos 40 anos, desde estudos geoquímicos no início dos anos 1960 tentando decifrar possíveis ligações entre o ambiente geoquímico natural e a saúde das pessoas em uma determinada área, até o estabelecimento em 2006 da *International Medical Geology Association* (IMGA), a geologia médica amadureceu a tal ponto que já é devidamente reconhecido como um campo de estudo viável (HASAN, 2021). No Brasil, esse tema se tornou de importância crescente nos últimos 20 anos (OLIVEIRA, 2006). Embora os estudos aumentem, existem contratempos no que diz respeito à obtenção de informações que contemplem esse ramo, tais como a falta de dados disponíveis em anos anteriores ou mesmo a veracidade das informações (SILVA; FIGUEIREDO; CAPITANI, 2006).

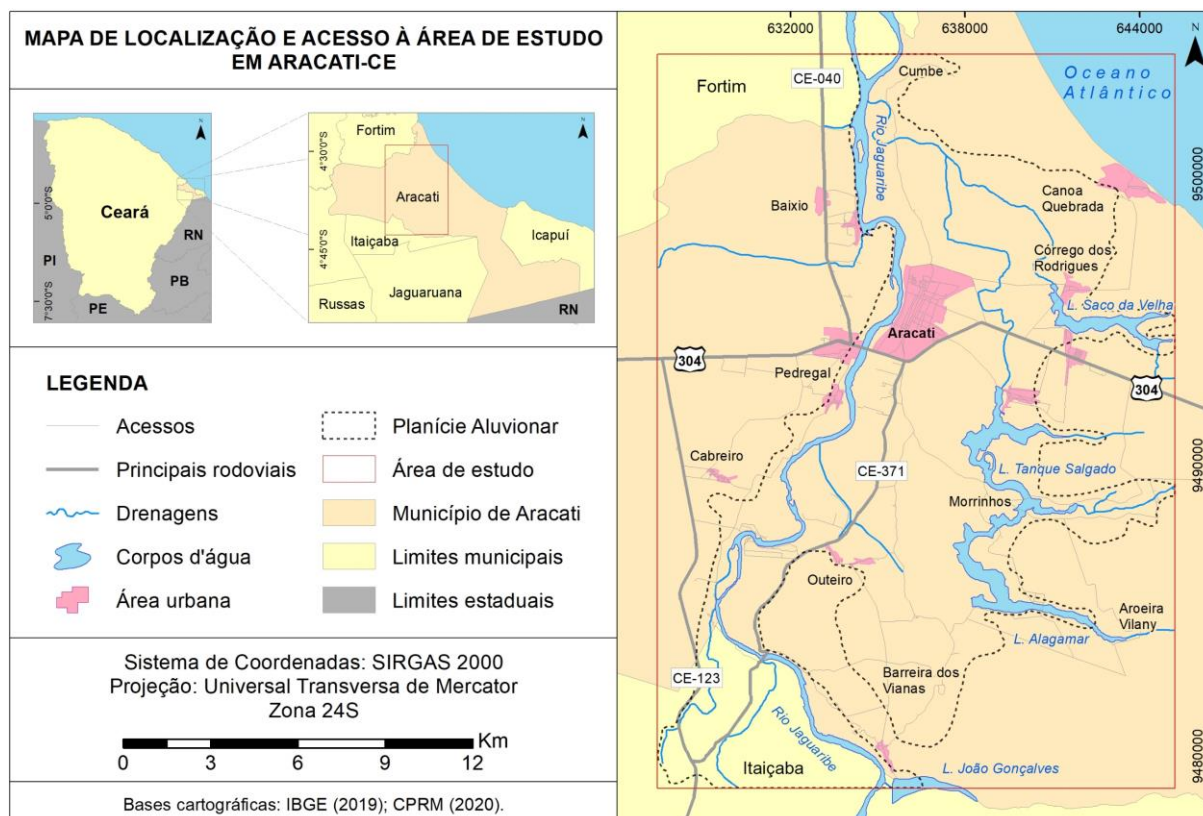
3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

3.1 Localização e acesso

O município de Aracati está localizado no litoral leste do estado do Ceará e limita-se ao norte com o Oceano Atlântico e o município de Fortim; ao sul, com os municípios de Jaguaruana e estado do Rio Grande do Norte; ao leste com o município de Icapuí e Oceano Atlântico e, a oeste, com os municípios de Beberibe, Palhano e Itaiçaba (IPECE, 2017).

O município de Aracati possui 1.227,2 km² e conta com sete distritos: Aracati (sede); Barreira dos Vianas; Cabreiro; Córrego dos Fernandes; Jirau; Mata Fresca e Santa Tereza. O município dista de 122 km em linha reta até a capital Fortaleza e as principais vias de acesso são: a BR-116, BR-304 e a CE-040 (IPECE, 2017; IBGE, 2022). A pesquisa concentra-se na área de planície aluvionar de Aracati com extensão de aproximadamente 450 km² inserida na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe (Figura 3).

Figura 3 – Mapa de localização e acesso da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

3.2 Indicadores socioeconômicos e situação de saúde em Aracati

O município de Aracati possui uma população estimada de 75.392 habitantes, com densidade demográfica de 56,32 hab./km² e taxa de urbanização de 63,67%. O Índice de Desenvolvimento Municipal (IDM) é de 38,24 e ocupa o 15º lugar em relação aos demais municípios cearenses no ano de 2018 (IPECE, 2018). O IDM representa a consolidação de um conjunto de 30 indicadores subdivididos em quatro grupos: Fisiográficos, fundiários e agrícolas; Demográficos e econômicos; Infraestrutura de apoio, e; Sociais (SESA, 2016). A economia da cidade está vinculada ao setor de comércio e serviços, seguido de indústria de transformação e agropecuária (IPECE, 2017). A ocupação deste município é bastante antiga e está diretamente relacionada ao rio Jaguaribe, responsável pelo crescimento econômico da cidade durante o período colonial (VERAS, 2010).

Sousa, Gadelha e Salgueiro (2019) realizaram um estudo de investigação em Geologia Médica nos municípios que integram a Sub-Bacia do Baixo Jaguaribe com objetivo de indicar e discutir possíveis fontes poluentes, antrópicas ou geogênicas, que influenciam no ambiente e na saúde dos habitantes. Os autores constataram que os municípios de Aracati, Russas e Limoeiro do Norte apresentaram boas correlações entre os dados de saúde e fontes poluidoras. Além disso, o trabalho enfatiza a importância da pesquisa em geologia médica com as potenciais fontes causadoras de problemas na saúde da população, bem como entendimento da situação de saúde em determinada região para iniciar uma investigação nesse ramo.

De acordo com os dados de estatística vitais na plataforma do DATASUS, para o período de 1996 a 2020, dentre as quinze principais causas de mortalidades por residência na categoria CID-10 que ocorreram no município de Aracati, destacam-se infarto, diabetes, AVC, hipertensão, insuficiência cardíaca e neoplasia maligna (brônquios e dos pulmões, estômago, próstata e mama) (MINISTÉRIO DA SAÚDE BRASIL, 2021), que tiveram crescimento significativo ao longo dos anos (Anexo A).

3.3 Caracterização hidroambiental de Aracati

O município de Aracati é caracterizado por clima tropical semiárido com temperatura média de 26º a 28 °C e regime pluviométrico irregular com período

chuvoso curto (janeiro a abril), em que a pluviosidade média anual é de 935,9 mm (IPECE, 2017). É constituído por sedimentos de diversas granulometrias da Chapada do Apodi (Mesozoico) situados na porção sudeste do município, a exemplo de sedimentos detríticos conglomeráticos a areno-argilosos atribuídos ao Terciário/Quaternário; sedimentos arenosos aluviais ou marinhos ao longo do rio e da praia, do Quaternário (VIEIRA; FEITOSA; BENVENUTI, 1998).

Aracati está totalmente inserida na Sub-Bacia Hidrográfica do Baixo Jaguaribe, tendo como principal drenagem o rio Jaguaribe e os córregos Fernandes, Retiro e Aroeiras (VIEIRA; FEITOSA; BENVENUTI, 1998). Os recursos hídricos sempre estiveram ligados ao crescimento econômico e urbano de várias cidades ao longo da história. No caso do rio Jaguaribe, ele serviu como principal via de acesso à colonização cearense, iniciada em 1603 com a conquista do porto natural de Aracati (VERAS, 2010). O rio Jaguaribe é fundamental para o Ceará em termos de abastecimento de água, consumo doméstico e industrial, irrigação e transporte e manutenção do ecossistema (BRAGA; MATUSHIMA, 2021). O rio Jaguaribe nasce no município de Tauá, no extremo sudoeste do estado, e desagua no Oceano Atlântico entre os municípios de Aracati e Fortim, no litoral leste do Ceará (GATTO, 1999, p. 77).

Quanto aos domínios hidrogeológicos, o município apresenta dois tipos: 1) Coberturas Sedimentares, representadas pelos sedimentos da Formação Barreiras e Dunas, e; 2) Depósitos Aluvionares. O termo Formação Barreiras será utilizado no trabalho em virtude de os estudos mais recentes sobre os sedimentos Barreiras e por ser a terminologia mais adequada no âmbito nacional (MOURA-FÉ, 2015).

A Formação Barreiras apresenta expressiva variação faciológica, com intercalações de níveis mais e menos permeáveis, o que resulta em parâmetros hidrogeológicos variáveis dependendo do contexto local. Devido a essas diferenças, o potencial de produtividade das águas subterrâneas varia. Essa situação local confere à Formação Barreiras características de aquitarde, ou seja, uma formação geológica com baixa permeabilidade que transmite água lentamente e não tem expressividade como aquífero. Apesar disso, em determinadas áreas, sua exploração é bastante desenvolvida. As dunas, ainda dentro do domínio sedimentar hidrogeológico, destacam-se como uma unidade geológica com alto potencial aquífero, capaz de produzir vazões que variam de 5 a 10 m³/h. Os depósitos aluvionares são sedimentos areno-argilosos recentes que ocorrem ao longo dos canais dos principais

rios e córregos da região e são, em geral, uma boa alternativa como manancial, com alta importância relativa do ponto de vista hidrogeológico, principalmente em regiões semiáridas dominadas por rochas cristalinas. Normalmente, a alta permeabilidade dos termos arenosos compensa suas espessuras finas, resultando em fluxos significativos (VIEIRA; FEITOSA; BENVENUTI, 1998).

3.4 Impactos socioambientais em Aracati

A Bacia Hidrográfica do rio Jaguaribe apresenta diversos impactos ambientais devido à pecuária, agricultura irrigada, desenvolvimento industrial e, mais importante, falta de saneamento básico na maioria dos 80 municípios que a compõem. O rio Jaguaribe é um importante recurso natural para o município de Aracati, pois proporciona lazer aos moradores, fonte de renda para as comunidades indígenas e um magnífico atrativo turístico. No entanto, o ecossistema manguezal vem sofrendo consequências socioambientais desde o final da década de 1980 em decorrência da urbanização acelerada, que tem sido alimentada por incentivos governamentais para atividades turísticas e industriais, bem como, mais recentemente, pela expansão da carcinicultura. Essas mudanças comprometem a qualidade de vida da população local, bem como a capacidade do ecossistema fluviomarinho de sustentar o meio ambiente na área urbana (VERAS, 2010).

De modo geral, as secas têm afligido os moradores de Aracati ao longo da história, com as ocorrências mais notáveis em 1777-1778, 1790-1793, 1915, 1958, 1991 e 1997. Estes períodos de estiagem inviabilizaram o crescimento econômico da região e comprometem as atividades agropecuárias do município. Devido à sua baixa topografia, com 5,7m de altitude, Aracati esteve sujeita às enchentes ao longo de sua história, na qual a maior inundação foi registrada em 1984. As inundações contínuas, resultando em uma variedade de perdas econômicas e sociais, incluem a propagação de doenças, inundação de residências, perdas econômicas no comércio devido a mercadorias danificadas, saques, afogamento e destruição de plantações (FUNCEME, 2020; IPECE, 2017; VERAS, 2010).

Na margem ocidental do rio Jaguaribe encontra-se o Conjunto Pedregal, que se originou após a cheia de 1974 a fim de abrigar a população, principalmente de baixa renda. Essa ocupação foi intensificada partir da cheia de 1984. A área é

caracterizada por Tabuleiros Pré-Litorâneos, e isso ameniza os riscos à inundação. Esse bairro apresenta uma infraestrutura precária e é onde se encontra o lixão municipal, área onde vivem cerca de 70 famílias de baixa renda que sobrevivem com a coleta de produtos recicláveis, além de pescadores, marisqueiras e agricultores oriundos de várias cidades do baixo Jaguaribe (IPECE, 2017; PEREIRA FILHO, 2016; SILVA, 2006; VERAS, 2010).

Com a seca no início da década de 1990, ocorreram problemas com o abastecimento urbano da cidade de Fortaleza e, dessa forma, foi construído o Canal do Trabalhador em 1993 e um último barramento no rio Jaguaribe, no município de Itaiçaba que reduziu a vazão fluvial para o estuário do rio Jaguaribe, controlando também as enchentes no Vale do Jaguaribe e na cidade de Aracati (VERAS, 2010). Com o barramento em Itaiçaba, a dinâmica estuarina é regida pela ação combinada das ondas e marés, ou hidrodinâmica marinha, durante a estação seca. Somente em eventos extremos, como chuvas acima da média, o sistema estuarino do Jaguaribe se torna bimodal, com a ação conjunta de forças fluviais e marinhas regendo a dinâmica (PAULA; MORAIS; PINHEIRO, 2009).

Apesar das barragens e reservatórios se destinarem a aumentar a disponibilidade hídrica, dadas às condições climáticas da região e a consequente escassez de água, estas resultam na diminuição do fluxo de água doce e, conseqüentemente, a ocorrência de uma forte intrusão salina na região estuarina do rio Jaguaribe (CARVALHO *et al.*, 2017; CAVALCANTE, 2019). Como resultado, vários efeitos ocorrem, incluindo mudanças no regime hidrológico abaixo das barragens, redução da qualidade físico-química da água, retenção de nutrientes pelas barragens (BRAGA; MATUSHIMA, 2021; RIOS, 2018), migração de manguezais rio acima após intrusão salina e erosão das margens do rio devido à falta de sedimentos retidos a montante do estuário (BORGES, 2017; GODOY; LACERDA, 2013, 2014). A barragem de Itaiçaba, segundo Veras (2010), reduz o aporte fluvial ao estuário, permitindo que os manguezais se espalhem pela deriva litorânea para áreas onde antes predominavam os terraços fluviais, resultando em salinização das águas subterrâneas e prejuízo da agricultura de vazante, como observado na área do dique de Aracati.

As águas subterrâneas em zonas costeiras são susceptíveis à salinização por intrusão de água do mar que podem torná-las impróprias para consumo humano ou irrigação. Existem outros fatores naturais e artificiais que podem contribuir para a

salinidade da água subterrânea, como a extração excessiva das águas subterrâneas, migração de água salina via dissolução de sal e mistura com água doce, penetração de água suja induzida por atividade antropogênica e uma alta taxa de evaporação (GOPINATH *et al.*, 2018; JONES *et al.*, 1999; WILLIAMS; TUDOR, 2001).

As principais características para avaliar os cenários atuais e futuros de aquíferos afetados pela salinidade são: (a) Fontes de salinidade; (b) processos que afetam a geoquímica dos aquíferos afetados; (c) movimento da água salgada, e; (d) dimensão de interação com sistemas de água subterrânea (KEESARI; DAUJI, 2020). Em águas subterrâneas, a salinidade pode ser originada de forma natural, como intrusão salina, transpiração pela vegetação e dissolução de minerais secundários (CRUZ-FUENTES *et al.*, 2014; CURRELL; DAHLHAUS; II, 2014; HE *et al.*, 2018; NOGUEIRA *et al.*, 2019), bem como por processos e fatores antrópicos, como águas residuais industriais e agrícolas, fluxo de retorno da água de irrigação e as atividades de carcinicultura (CRUZ-FUENTES *et al.*, 2014; FERREIRA, 2011; LI *et al.*, 2020) ou, mais comumente, a combinação desses processos (KEESARI; DAUJI, 2020).

A carcinicultura tem causado sérios conflitos socioambientais em Aracati, pois interesses econômicos legitimados pelo poder político local colidem e se sobrepõem as iniciativas de preservação ambiental, ameaçando a viabilidade do ecossistema no longo prazo. Essa atividade teve início em 1997/1998, com aumento significativo na produção entre 2003 e 2004. A cidade de Aracati desencadeou toda uma cadeia produtiva, que aumentou os índices de emprego, contribuiu para o crescimento populacional e resultou em melhorias significativas na infraestrutura urbana (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2006; SANTOS, 2005; VERAS, 2010). As comunidades tradicionais e os pescadores, que representam os mais pobres, sofrem as consequências dessas decisões, pois perdem sua fonte de subsistência e ficam mais vulneráveis aos efeitos do desequilíbrio ambiental. Os produtos químicos usados nas fazendas de camarão já contaminaram e salinizaram as águas captadas de alguns poços em Cumbe, segundo a CAGECE e moradores locais, e há uma preocupação generalizada da comunidade com a escassez da água se a atividade continuar (VERAS, 2010).

4 METODOLOGIA

Esse capítulo aborda as informações detalhadas da área de estudo a partir de embasamentos teóricos presentes na literatura, bem como observações de campo, equipamentos, parâmetros e metodologias que possibilitaram a execução do trabalho.

4.1 Aquisição de dados e elaboração do mapa base

O levantamento das bases de dados disponíveis utilizadas nesse trabalho foi adquirido por meio de plataformas governamentais e órgãos públicos, conforme Tabela 4.

Tabela 4 – Principais fontes de pesquisa utilizadas no trabalho.

Fonte	Informação obtida
CAGECE	Dados de análises físico-químicas de águas dos poços tubulares.
COGERH	Arquivos vetoriais de poços da SOHIDRA (2015-2021) e hidrografia do Ceará;
DATASUS	Indicadores de mortalidade no município entre os anos de 1996 e 2020;
FUNCEME	Aquisição de dados pluviométricos no município nos últimos 40 anos;
IPECE	Dados de atividades econômicas, demografia e obtenção de informações no perfil municipal de Aracati;
SIAGAS	Localização e coordenadas; situação e finalidade do poço; geologia; nível estático; profundidade dos poços em Aracati; vazão de estabilização; data de análise de água; condutividade elétrica (CE);
USGS	Imagem radar S05W038 gerada pela <i>Shuttle Radar Topography Mission</i> (SRTM) com resolução de 30 metros.

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Os dados secundários obtidos foram integrados em ambiente SIG - Sistemas de Informações Geográficas para a confecção do mapa pré-campo, cuja finalidade foi selecionar as áreas prioritárias para coleta de água dos poços locados

em aquíferos sedimentares. O mapa base incluem dados de poços do SIAGAS, com informações de localização, coordenadas, perfil litológico e nível estático; potenciais fontes poluidoras identificáveis em imagens satélites do Google Earth Pro®, como cemitérios, lixão, carcinicultura etc.

A vulnerabilidade natural do aquífero também foi incluída ao mapa base para facilitar a tomada de decisões das amostragens de água na área de estudo. A vulnerabilidade foi gerada a partir do método GOD (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128) utilizando os dados disponíveis dos 45 poços cadastrados no SIAGAS com informações suficientes para aplicação do método.

Os dados foram analisados individualmente e compuseram um arquivo de dados para obter os parâmetros G, O e D e o Índice de Vulnerabilidade Aquífera. O parâmetro “G” foi analisado com base nos perfis litológicos de cada poço; o parâmetro “O” foi interpretado a partir da litologia das camadas superiores ao nível estático de cada poço, pois acima do nível estático situa-se a camada não saturada. Em situações de ocorrência de mais de uma litologia acima do nível estático, considerou-se a de maior espessura.

Os dois primeiros parâmetros “G” e “O” foram atribuídos conforme a Tabela 5, enquanto para o parâmetro “D” atribui-se os valores de acordo com a profundidade do nível estático dos poços.

Tabela 5 - Interpretação dos dados para aplicação do método a partir de dados secundários disponíveis.

Parâmetro	Interpretação	Índice
G	camadas espessas de argila entre as zonas que sobrepõe o aquífero ou abaixo da camada vadosa, configuradas como camada confinante.	0,2
	camadas menos espessas de argila abaixo da zona vadosa ou acima do topo do aquífero.	0,4
	camadas espessas de solos, e até mesmo associadas a pequenas camadas de argilas (em torno de 1 a 2 metros).	0,6
	Camadas menos espessas de solos (cerca de 2 m), sem características de confinamento nas camadas abaixo.	1,0

O	Argila, solos argilosos, solos residuais, camadas espessas de solos amarelo a avermelhados.	0,4
	Silte arenoso, silte preto, xisto.	0,5
	Areia fina, quartzito, granito, siltito, filito, micaxisto, gnaisses, ardósia, rochas cristalinas compostas por biotita, quartzo e feldspato.	0,6
	Areia conglomerática, depósitos aluvias, arenito fino, arenito médio, seixos rolados.	0,7

Fonte: Foster *et al.* (2003, p. 128), com adaptações.

O índice gerado também foi integrado em ambiente SIG com aplicação da interpolação dos índices através da ferramenta IDW (*Inverse Distance Weighting*), que é o método do Inverso Ponderado da Distância muito utilizado para espacialização de informações, conforme descrevem Tavares *et al.* (2008).

Os dados secundários também serviram de base para realizar o diagnóstico da disponibilidade hídrica no município junto ao levantamento bibliográfico sobre a oferta hídrica superficial e subterrânea. Além disso, realizou-se a demarcação de polígonos para mapear e caracterizar os espelhos d'água do município a partir do software Google Earth Pro®. A imagem utilizada data do segundo semestre do ano 2021 com altitude do ponto de visão em aproximadamente 1,4 km. As informações determinadas pelos polígonos são: tipos de reservatório, latitude, longitude, perímetro (km) e área (km²).

4.2 Reconhecimento de campo e amostragem de águas

Nessa etapa, o reconhecimento e levantamento de informações possibilitou a visita de 60 pontos, que incluem poços, águas superficiais e potenciais fontes de contaminação dos aquíferos, os quais estão representados no mapa de pontos conforme Apêndice A.

A execução do campo ocorreu no ano de 2020 (outubro), correspondendo ao período de estiagem na região. Inicialmente, foram realizadas visitas aos poços com auxílio do mapa pré-campo e GPS. Os poços não cadastrados foram identificados através de informações dos moradores na região. Após o levantamento

das informações de campo foi realizado o planejamento da coleta das amostras e das medições do nível estático (NE).

O critério de seleção das 20 amostras de água dos poços sucedeu com base na situação (se encontram-se em uso ou não) e finalidade dos poços, a proximidade destes com as possíveis fontes contaminantes e a posição espacial na área de estudo a fim de obter uma distribuição mais homogênea. Dessa forma, o estudo avaliou a qualidade de 25 fontes, que incluem 04 amostras do Rio Jaguaribe, 01 do efluente de carcinicultura e 20 de águas subterrâneas.

As medições de NE foram planejadas junto aos responsáveis dos poços em função do desligamento das bombas com intervalos de 1 a 2 horas antes da chegada ao local para coleta. Em locais onde os poços apresentaram dificuldades para medição do NE, foram substituídos por poços mais próximos e de fácil acesso para ter melhor distribuição espacial dos valores na área, totalizando 24 medições.

As amostras foram coletadas na saída direta dos poços, nos registros acoplados às caixas d'água e de torneiras residenciais, quando os acessos eram limitados. O procedimento de coleta seguiu após deixar a água dos registros escorrer por 2 a 3 minutos para evitar possíveis impurezas contidas nas tubulações. Os parâmetros medidos *in situ* foram pH, condutividade elétrica ($\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e temperatura ($^{\circ}\text{C}$) com auxílio do medidor de pH/condutividade (WD-35630 Medidor pH/CON 10 OAKTON®) modelo *waterproof*. O acondicionamento se deu por meio de garrafas plásticas de 500 ml lavadas com a água do próprio poço e devidamente rotuladas, em seguida, foram armazenadas em caixa térmica e conduzidas ao Laboratório de Geoquímica Ambiental (LGA), setor do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará (UFC).

A Tabela 6 apresenta os métodos empregados pelo laboratório, que segue os procedimentos analíticos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA; AWWA; WEF, 2012). Na determinação da concentração de nitrogênio amoniacal total (N-NH_{3,4}), pelo método Fenato, um composto de cor azul é formado pela reação da amônia com hipoclorito e fenol. O hipoclorito foi substituído por dicloroisocianurato sódico dihidratado (DCI), conforme Aminot e Chaussepied (1983) e Aminot e Kérouvel (2007), que permite maior estabilidade da solução. A determinação de N-NH_{3,4} iniciou-se *in situ* com a adição das soluções de fenol-nitroprussiato (R1) e alcalina complexante ao cloro (R2),

imediatamente após a coleta. Os valores N-NH_{3,4} foram convertidos em mg/L de amônia (NH₃), multiplicando a concentração de N-NH_{3,4} por 1,21.

O alumínio foi determinado utilizando-se Eriocromo Cianina R e uma curva de correção para estimativa do alumínio na presença de fluoreto, conforme APHA, AWWA e WEF (2012). Os parâmetros pH, sólidos totais dissolvidos e a condutividade elétrica, foram determinados usando uma sonda multiparâmetros, de marca *Thermo Scientific Orion* e modelo *Star A329 Portable* e nas medidas espectrofotométricas foi utilizado um espectrofotômetro *Thermo Scientific* modelo *Evolution 300 UV-VIS*.

Tabela 6 – Métodos analíticos aplicados de acordo com APHA, AWWA e WEF (2012).

Parâmetros físico-químicos	Método aplicado	Código
Alcalinidade Total	Titulométrico	2320 B
Alumínio	Eriocromo Cianina R	3500-Al B
Amônia	Fenato	4500-NH ₃ F
Bicarbonato	Titulométrico	2320 B
Cálcio	Titulométrico com EDTA	3500-Ca B
Cloreto	Argentométrico	4500-Cl ⁻ B
Condutividade	Eletrométrico	2510 A
Dureza Total	Titulométrico com EDTA	2340 C
Ferro Total	Fenantrolina	3500-Fe B
Fluoreto	Eletrodo de Íon Seletivo	4500-F ⁻ C
Ortofosfato	Ácido Ascórbico	4500-P E
Magnésio	Titulométrico com EDTA	Medida indireta
Nitrato	Coluna redutora de cádmio	4500-NO ₃ ⁻ E
Nitrito	Espectrofotométrico	4500-NO ₂ ⁻ B
pH	Eletrométrico	4500-H ⁺ A
Potássio	Fotométrico	3500-K B
Sódio	Fotométrico	3500-Na B
Sólidos Totais Dissolvidos	Eletroquímico	2510 A
Sulfato	Turbidimétrico	4500-SO ₄ ²⁻ E
Turbidez	Nefelométrico	2130 B

Fonte: LGMA (2020), com adaptações.

Selvakumar *et al.* (2017) aponta a importância dos parâmetros físico-químicos como princípios primordiais na identificação do tipo, qualidade e natureza da água. Na Tabela 7 estão listados os contaminantes analisados e uma breve descrição de seus efeitos no ambiente e seres vivos (USGS, 2018; WALLER, 1988).

Tabela 7 - Contaminantes analisados que podem ocorrer nas águas subterrâneas.

Contaminantes	Descrição
pH	Águas mais ácidas corroem ou dissolvem metais e outras substâncias. O pH altamente alcalino causa incrustações nos canos de água e diminui a eficácia da desinfecção do cloro, causando a necessidade de cloro adicional. Além disso, o pH alto oferece sabor amargo à água.
Turbidez	Indicativo de argila ou outras partículas inertes suspensas na água potável. Pode não afetar negativamente a saúde, mas pode causar necessidade de tratamento adicional. Após as chuvas, as variações na turbidez das águas subterrâneas podem ser um indicador de contaminação da superfície.
Alumínio	Ocorre naturalmente em rochas e minerais. Pode precipitar após o tratamento, causando aumento de turbidez ou descoloração da água.
Cloreto	Ocorre naturalmente em aquíferos influenciados pela intrusão salina ou por dissolução de minerais. Também é proveniente de resíduos industriais e domésticos. Quando em excesso, a água apresenta sabor.
Sólidos Totais Dissolvidos	Medida de “sais” ou minerais dissolvidos na água de forma natural ou por meio de fontes artificiais (lixiviação de aterro, esgoto). Pode incluir compostos orgânicos dissolvidos.
Fluoreto	Está presente naturalmente no ambiente. É amplamente usado na indústria ou como aditivo para abastecimento de água municipal. Embora seja uma substância essencial para saúde dentária, em excesso pode causar calcificação dos ossos e articulações.

Dureza	Resulta da dissolução de íons metálicos (cálcio e magnésio) na água e apresenta-se como concentração de carbonato de cálcio. O carbonato de cálcio é derivado da dissolução de calcários ou de resíduos de minas ativas ou abandonadas. Pode causar incrustações em tubulações.
Ferro	Provem de sedimentos e rochas, mineração, resíduos industriais e metais corrosivos. Dá um gosto amargo à água. Podem ser originados a partir da aplicação de fertilizantes, pastos, esgoto e dejetos de humanos ou animais. No organismo humano, o nitrato se decompõe em nitrito que dificulta o transporte do oxigênio no sangue. Em crianças causa a “Síndrome do Bebê Azul” ou <i>metahemoglobinemia</i> .
Nitrato e nitrito	Derivado da lixiviação de depósitos salinos e decomposição de minerais. Traz riscos à saúde de indivíduos com dieta pobre em sódio.
Sódio	Concentrações elevadas podem resultar da intrusão salina, dissolução de minerais, resíduos domésticos ou industriais.
Sulfato	

Fonte: USGS (2018), com adaptações.

4.3 Tratamento e interpretação dos dados

O tratamento dos dados secundários adquiridos realizado permitiu avaliar as condições de precipitação na região, a quantidade de corpos hídricos superficiais existentes, o potencial de abastecimento por parte dos mananciais superficiais e a qualidade das águas subterrâneas.

As análises químicas foram tratadas no software Qualigraf[®] versão 1.1 desenvolvido por MOBUS (2003) para elaboração de diagramas a partir das concentrações dos elementos maiores das águas superficiais e subterrâneas. Por outro lado, o tratamento dos dados secundários consistiu na integração destes em arquivo de dados georreferenciados para elaboração de mapas temáticos com auxílio do software de ArcGIS[®] 10.8.1 com a aplicação do método de interpolação IDW. Os parâmetros físico-químicos também foram espacializados com objetivo de incrementar a interpretação do estudo.

Os dados de níveis estáticos obtidos em campo foram tratados no programa Surfer® 18.1 para elaboração do mapa potenciométrico para fins de investigação do fluxo das águas subterrâneas na área de estudo. Como a área de estudo está localizada em uma planície aluvial com baixa cota, utilizou-se valores de altitude ortométrica que foram calculados subtraindo as altitudes geométricas, identificadas pela imagem do SRTM, da ondulação geoidal calculada no software MAPGEO2015 v1.0 (BLITZKOW *et al.*, 2016).

O tratamento dos dados permitiu identificar os potenciais contaminantes inorgânicos e as características físicas que ocorrem em águas superficiais e, principalmente subterrâneas, que podem ser originados tanto de produtos químicos naturais como induzidos pela atividade antrópica.

4.3.1 Hidroquímica

As impurezas nas águas subterrâneas provocam alterações em suas composições que variam de acordo com os componentes das rochas em diversas regiões. As amostras caracterizadas nesta pesquisa foram representadas por gráficos e diagramas segundo a composição química das águas a fim de auxiliar na interpretação das amostras no período estudado. Para interpretação das análises, utilizou-se os diagramas de Piper, Stiff e de Schoeller & Berkaloff, além de gráficos para determinação da salinidade e dureza das águas.

O diagrama de Piper tem por finalidade classificar e comparar os distintos grupos de águas quanto aos íons dominantes (cátions ou ânions). A classificação ocorre quando as concentrações de cátions ou ânions ultrapassam 50% de suas respectivas somas, dadas em porcentagem a partir dos resultados em miliequivalente (meq/L) (SANTOS, 2008).

Outra representação dos elementos maiores é pelo diagrama de Stiff, que permite analisar espacialmente os dados e detectar águas da mesma família. Todas as concentrações iônicas em meq/L ou % meq/L são representadas sobre linhas paralelas horizontais. A junção dos pontos respectivos gera uma figura geométrica característica para a água analisada (CARACAS, 2013; SANTOS, 2008). Cada amostra foi representada no diagrama de Stiff e plotados no mapa através do software ArcGIS.

O diagrama de Schoeller & Berkloff conecta pontos por linhas que representam as concentrações de cátions e ânions nas amostras (em meq/L). Os valores de concentrações são plotados em uma representação gráfica semilogarítmica e no eixo das abcissas estão representados os diferentes íons. O diagrama é usado para avaliar a potabilidade das águas subterrâneas com base nas características físico-químicas simplificadas pelos parâmetros de Schoeller (cálcio, sódio, magnésio, cloreto, sulfatos e resíduo seco), que definem seis classes de potabilidade: boa, passável, medíocre, ruim, momentânea e não potável (SZIKSZAY, 1993; TAOUIL *et al.*, 2018).

4.3.2 Análise estatística dos dados

No programa Microsoft Excel 2016, foram realizadas as estatísticas descritivas e gráfico boxplot para maior confiabilidade dos dados, bem como tratar os dados secundários através do método estatístico de Sturges (1926), onde foi possível definir a quantidade de classes, amplitudes e tamanhos de intervalos para realizar uma análise consistente das informações.

No software R Studio®, foi possível obter os gráficos de dispersão e a correlação linear de Pearson dos parâmetros presentes nas águas subterrâneas de Aracati. Os gráficos de dispersão foram elaborados para avaliar graficamente se a correlação entre as variáveis é linear. A matriz de correlação de Pearson quantificar a magnitude da associação entre duas variáveis em um intervalo de -1 e 1, em que proximidade aos extremos do intervalo indica forte correlação entre as variáveis analisadas. Por outro lado, quanto mais próximo à zero, a correlação tende a ser mais fraca (TRIOLA, 1999).

Além disso, ainda no software R Studio®, a análise de componente principal (ACP) a fim de avaliar o padrão das amostras de águas subterrâneas em relação as águas superficiais. A análise multivariada de dados permitiu compreender o comportamento dos parâmetros químicos analisados nas amostras de água superficiais e subterrâneas. É uma técnica útil para reduzir a dimensionalidade e extrair informações para monitoramento e gerenciamento da qualidade da água por meio da modelagem e compreensão de conjuntos de dados (RAKOTONDRABE *et al.*, 2018).

5 RECURSOS HÍDRICOS NO MUNICÍPIO DE ARACATI

Esse capítulo retrata a caracterização dos mananciais superficiais e subterrâneos no município, em que foi realizado o mapeamento dos espelhos d'água, e o levantamento de poços cadastrados no SIAGAS, bem como apresentar as observações de campo da área do rio Jaguaribe e dos poços visitados e as leituras dos parâmetros *in situ* das águas subterrâneas da área estudada.

5.1 Oferta hídrica para o consumo humano em Aracati

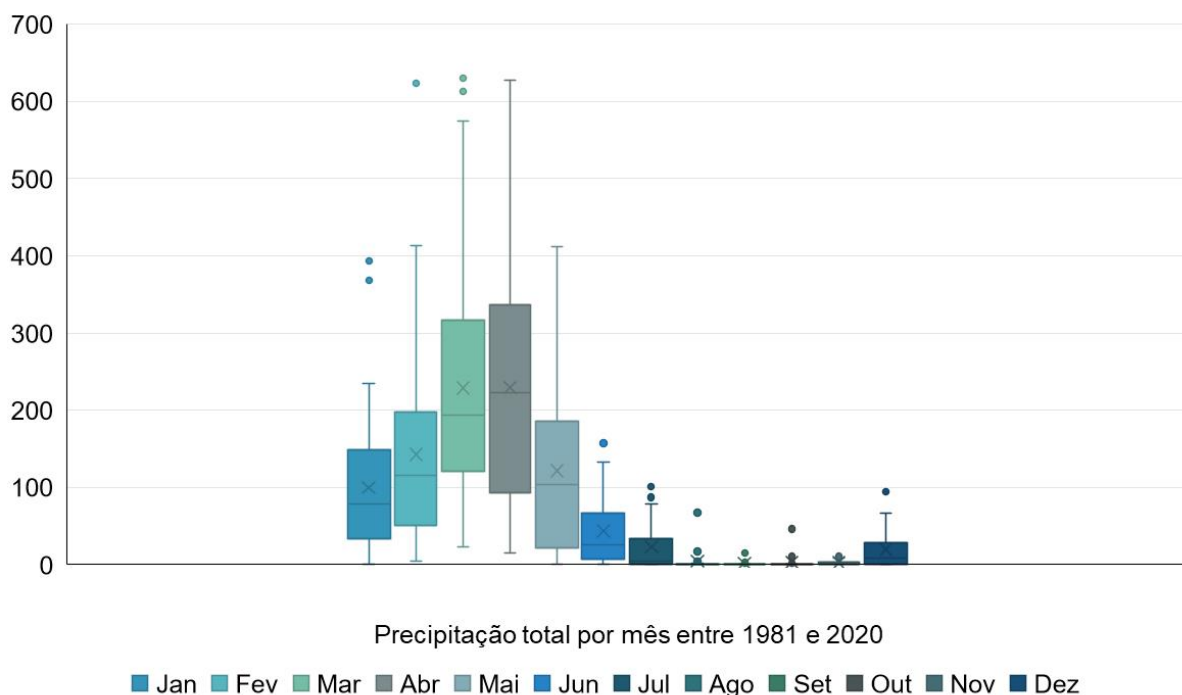
O diagnóstico da oferta hídrica do município de Aracati e as principais discussões pertinentes a essa temática estão representados no artigo publicado no Apêndice B.

5.1.1 Análise dos dados Pluviométricos

O município de Aracati apresenta apenas um posto pluviométrico (posto Aracati), no qual apresenta um arquivo de dados com registro de precipitação dos últimos 46 anos (1974-2020), mas para esse trabalho foram utilizados os dados dos últimos 40 anos (1981-2020). A série histórica apresentou uma precipitação média anual geral de 918,65 mm, bem como uma máxima precipitação registrada no ano de 1985 com valor de 2654,10 mm, e a menor anual registrada ocorreu em 1993 com valor de 220 mm.

O estado do Ceará apresenta valor médio anual precipitado em torno de 800 mm (FUNCEME, 2020). Percebe-se que o município está acima da média estadual. Na série histórica avaliada, a estação chuvosa no município esteve concentrada entre os meses de janeiro a julho, concentrando acima de 97% da chuva anual nestes meses (Figura 4).

Figura 4 – Precipitação pluviométrica (mm) dos 46 anos em Aracati.



Fonte: FUNCEME (2020), com adaptações.

O mês de julho marca o início do período seco que vai até o mês de dezembro, e essa situação reflete na precipitação anual da região. Dessa forma, a partir do método de Sturges para determinação de classes, os índices pluviométricos foram classificados em 6 intervalos (Tabela 8).

Tabela 8 – Histograma de frequências das ocorrências de precipitação no período de 1981-2020.

Precipitação (mm)			Classificação	%
220	┆	460,7	Seca severa	20
460,7	┆	701,4	Seca moderada	22,5
701,4	┆	942,1	Seca normal	12,5
942,1	┆	1182,8	Normal chuvoso	20
1182,8	┆	1423,5	Chuva moderada	12,5
1423,5	┆	1664,2	Chuva severa	7,5
1664,2	┆	2654,1	Chuvoso	5

Fonte: FUNCEME (2020), com adaptações.

Em Aracati, foi observado que a região teve 5 ocorrências de precipitações que se enquadram nas classes chuva severa (nos anos de 1984, 1986, 1988) e chuvoso (no ano de 1985 e 2009). Existe uma prevalência de classe seca (55%), com destaque para a classe moderada (22,5%). Nos últimos 11 anos, o município enfrentou períodos de seca, e, que os anos mais graves foram em 2012 e 2016, classificados com seca severa.

O município caracteriza-se pelo período variando de seca severa a normal seco e precipitação baixa variando de 220 a 942,1 mm. Períodos prolongados de seca promove a crise hídrica na região. Dependendo da dimensão dos corpos hídricos, as águas superficiais em determinadas regiões tendem a secar se ou a atingir níveis críticos devido à seca (MENDES *et al.*, 2021).

5.1.2 Hidrografia e Mapeamento dos Espelhos D'água

No município, os espelhos d'água mapeados no Google Earth Pro® totalizam em 858 distribuídos na região e incluem águas superficiais, açudes, reservatórios antrópicos (tanques de carcinicultura) e lagoas. Além disso, dentre os espelhos d'água mapeados, 93,7% concentram na planície aluvionar.

Aproximadamente 40% dos reservatórios do município são naturais, sendo o restante intervenções antrópicas voltadas para a economia (carcinicultura e piscicultura) e recreação. Essa observação deixa evidente que o município de Aracati tende a passar por crise hídrica em períodos de estiagem que compromete a potabilidade dos recursos hídricos do município e conseqüentemente a qualidade de vida da população local.

Com base na abrangência das áreas, quatro classes foram definidas também pelo método de Sturges (Tabela 9). Nota-se que pouco mais de 90% dos espelhos d'água mapeados são corpos muito pequenos e pequenos, constituídos principalmente de reservatórios artificiais como os tanques de carcinicultura.

Os fatores até o momento estudados (baixas precipitações, escassez, crise hídrica e salinização das águas) enfatizam a importância do gerenciamento dos recursos hídricos e, também uma exploração racional dos mananciais subterrâneos para atender às necessidades da população e promover o desenvolvimento sustentável no município.

Tabela 9 – Classificação das áreas superficiais dos corpos d’água em função da área em hectare.

Área (ha)	Classificação	Número de espelhos d’água
< 1	Muito pequeno	466
1,01 – 20	Pequeno	360
20,01 – 200	Médio	27
> 200	Grande	5

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

5.1.3 Características físicas dos poços

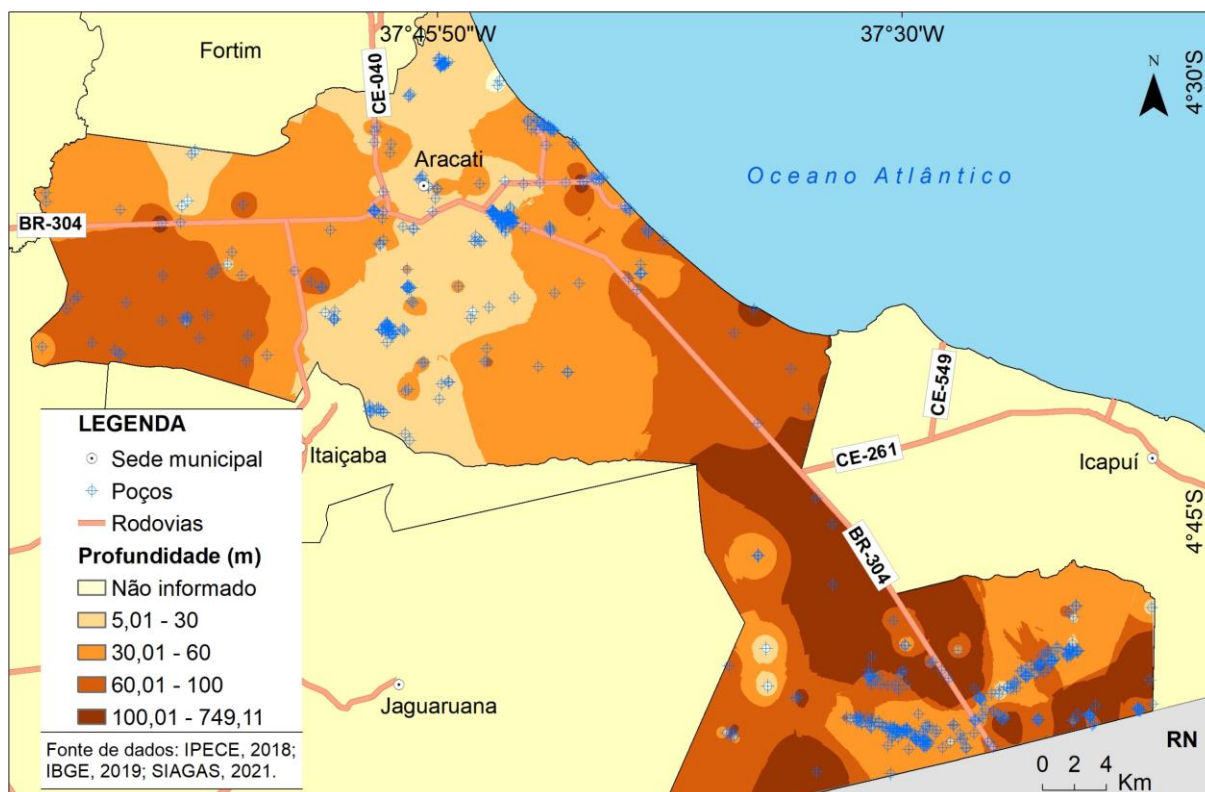
O levantamento realizado no município registrou a presença de 594 poços no SIAGAS até outubro de 2021, cuja densidade de poços na área municipal aproxima-se de 0,5 poços por km². Pode-se dizer que para a população estimada de Aracati em 2021, existem 127 habitantes por poço.

No município, 583 dos poços tem natureza tubular, 10 do tipo amazonas e 1 do tipo ponteira. Além disso, foi constatado que 312 poços estão bombeando, cujos usos comuns são irrigação (49%), seguido de indústrias (17%), pecuária (14%), recreação (8%), abastecimento urbano (5%) e abastecimento doméstico (2%).

A distribuição hidrogeológica desses poços revela que 5 estão em domínio fissural, 36 em domínio cárstico, 79 em domínio sedimentar e 9 captam águas em mais de um domínio. Ainda em relação a esse total, 22% desses poços cadastrados apresentam perfis litológicos.

No banco de dados 547 poços apresentam informações de profundidade final: 42% dos poços variam de 30 a 60 metros; 24% são poços rasos, variando de 5 a 30 metros; 23% variam de 60 a 100 metros; 4 são poços mais profundos com mais de 100 metros; 8% não apresentam dados (Figura 5).

Figura 5 – Distribuição espacial das profundidades dos poços cadastrados no SIAGAS.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

5.1.4 Produtividade dos poços no município de Aracati

Em 2018, o consumo médio diário de água no Nordeste era de 115,4 litros por pessoa (SNS, 2019). Para atender os 75.392 habitantes do município de Aracati com base nesse consumo (115,4 litros para o Nordeste), é necessária uma produção total diária de 8.700,2 m³/dia para abastecer a população, esse valor foi obtido através do produto do número de habitantes pelo consumo médio diário em metros cúbicos, conforme a equação 1.

$$N^{\circ}hab \times C_m = P_t \quad (1)$$

Onde:

Nº hab.: número de habitantes

C_m: consumo médio diário de água no Nordeste

P_t: produção total diária

A avaliação da produção diária total dos poços de Aracati e a estimativa o número de pessoas que podem ser atendidas no município foi realizada a partir de informações disponíveis nos perfis construtivos dos poços que incluem: a) situação

dos poços, que foram filtrados por poços em uso (bombeando); b) finalidades da água captada, em que são destinados ao consumo humano e encontram-se registrados como abastecimento urbano e abastecimento doméstico; c) vazões de estabilização dos poços.

Dos 312 poços em atividade, apenas 19 são destinadas ao consumo humano e que apresentam valores de vazão cadastrados. Quatorze (14) desses poços são fornecidos pela Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) que operam em 24 horas e produzem uma vazão total de 4.963,4 m³/dia, a qual é suficiente para abastecer até 43.011 habitantes (57% da população) seguindo o cálculo da equação 1 (Tabela 10).

Tabela 10 – Vazão de estabilização dos poços ativos da CAGECE destinados ao abastecimento urbano.

Ponto	Número de registro do poço	Vazão (m³/h)	Vazão (m³/dia)
01	2300005158	10,28	246,72
02	2300005159	12	288
03	2300005194	8,52	204,48
04	2300005195	8,8	211,2
05	2300005196	8,34	200,16
06	2300005197	8,42	202,08
07	2300005198	7,2	172,8
08	2300005199	8,25	198
09	2300019950	15	360
10	2300019951	12	288
11	2300022125	18	432
12	2300022126	30	720
13	2300022127	30	720
14	2300022128	30	720

Fonte: SGB (2021), com adaptações.

Para os cinco poços restantes, não foi possível obter informação sobre o tempo de bombeamento. Logo, foi realizada uma análise arbitrária a partir de

possíveis cenários de operação, cujos valores de produção e o número de habitantes atendidos são apresentados na Tabela 11.

Tabela 11 – Vazão de estabilização dos cinco poços ativos destinados ao abastecimento doméstico.

Ponto	Número de registro do poço	Vazão (m ³ /h)	4h/dia	6h/dia	8h/dia
15	2300031345	16,5	66	99	132
16	2300031347	16,6	66,4	99,6	132,8
17	2300031353	16,5	66	99	132
18	2300031355	16,5	66	99	132
19	2300036664	16,5	66	99	132
Soma			330,4	495,6	660,8
Abastecimento de habitantes por dia (hab./dia)			2,863	4,295	5,726
Porcentagem de pessoas atendidas (%)			3,8%	5,7%	7,6%

Fonte: SGB (2021), com adaptações.

Considerando o cenário para uma operação de poços de 8 h/dia, representa um acréscimo de quase 8% no fornecimento hídrico para a população. Portanto, os 19 poços atualmente ativos podem abastecer até 65% da população considerando o consumo médio diário de 115,4 litros/hab./dia.

Uma segunda avaliação foi realizada para poços desativados (equipados e não instalados) cuja finalidade também é para consumo humano que totalizam 23 poços. Considerando que eles entrem em operação, foi realizado uma estimativa dentro dos mesmos três cenários de exploração de água subterrânea (Tabela 12).

No melhor cenário, estima-se que o município contaria com acréscimo máximo aproximado de 1.770,8 m³/dia, o que representa 20% do suprimento hídrico mínimo para a população do município. Dessa forma, os poços em ativos e os que podem entrar em atividade conseguem abastecer até 85% da população de Aracati.

Tabela 12 – Vazão de estabilização para poços de abastecimento urbano e doméstico desativados (não instalado e equipado) para os três cenários.

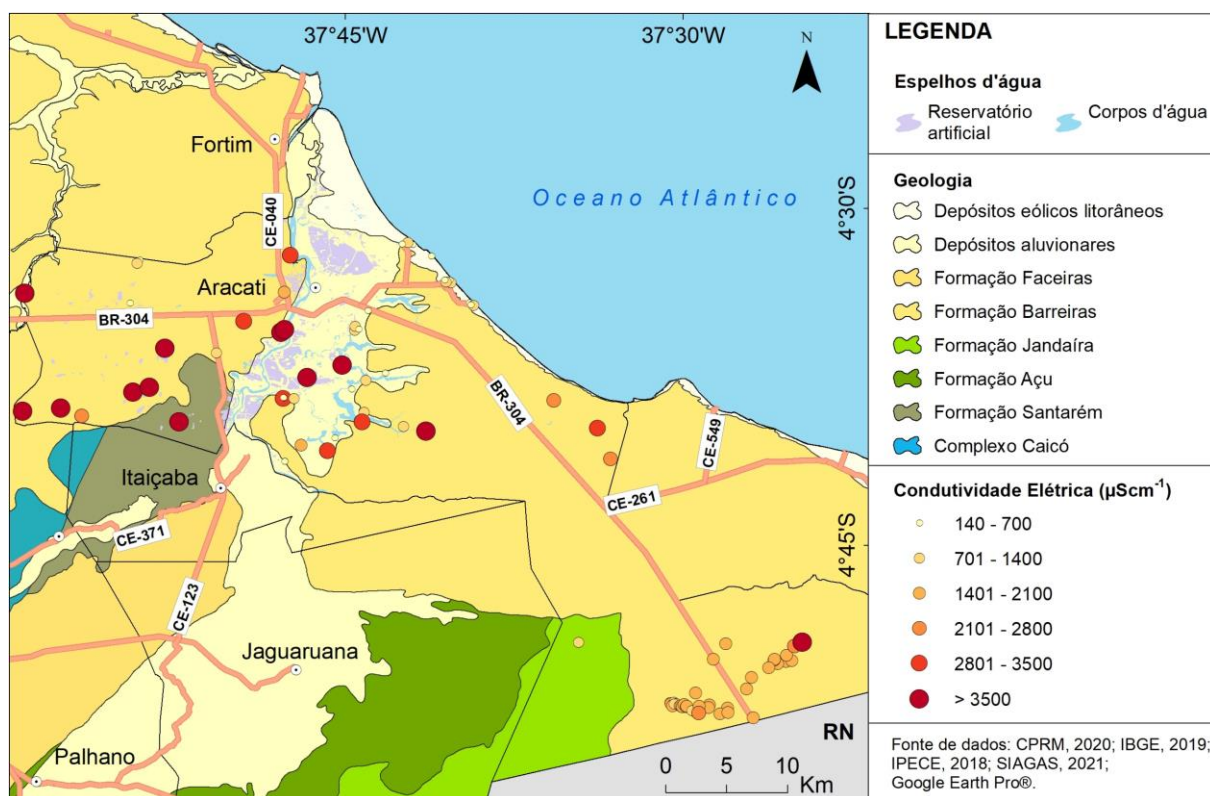
Ponto	Número de registro do poço	Vazão (m³/h)	4h/dia	6h/dia	8h/dia
20	2300001912	10	40	60	80
21	2300001914	10	40	60	80
22	2300005139	1,2	4,8	7,2	9,6
23	2300005143	6,5	26	39	52
24	2300005145	1,5	6	9	12
25	2300005146	1	4	6	8
26	2300005150	3	12	18	24
27	2300005164	12	48	72	96
28	2300005167	5	20	30	40
29	2300005185	3	12	18	24
30	2300005187	1,2	4,8	7,2	9,6
31	2300005189	3,5	14	21	28
32	2300005190	3	12	18	24
33	2300005193	35	140	210	280
34	2300005274	7,54	30,16	45,24	60,32
35	2300005301	30	120	180	240
36	2300005302	30	120	180	240
37	2300005308	5	20	30	40
38	2300005313	2,6	10,4	15,6	20,8
39	2300010651	2,4	9,6	14,4	19,2
40	2300010652	7,92	31,68	47,52	63,36
41	2300021747	20	80	120	160
42	2300021748	20	80	120	160
Soma			885,44	1328,16	1770,88
Abastecimento de habitantes por dia (hab./dia)			7,673	11,509	15,346
Porcentagem de pessoas atendidas (%)			10,2	15,3	20,4

Fonte: SGB (2021), com adaptações.

5.1.5 Características químicas das águas subterrâneas captadas no município

No arquivo de dados obtido no SIAGAS, os valores registrados dos parâmetros físico-químicos estão em diferentes datas de análise para cada poço, não sendo possível obter informações satisfatórias para uma interpretação, considerando um mesmo período de coleta de dados em campo. Porém, para o ano de 1998, existem 94 registros de análise de água no segundo semestre com valores de condutividade elétrica (CE). A figura 6 mostra a distribuição espacial dos valores de CE no município e a geologia regional.

Figura 6 – Distribuição espacial da condutividade elétrica na região.



Fonte: SGB (2021) e PINÉO *et al.* (2020), com adaptações.

Os valores CE variam de 140 a 55000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, a mediana da CE é de 1397 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ e o valor máximo 3870 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, sendo 14 valores outliers (4000, 4250, 4890, 5880, 6190, 6760, 6850, 6900, 8470, 16450, 27780, 30000, 36500, 55000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$). O maior valor encontra-se em um poço situado no depósito aluvionar (55000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$), no entanto esse valor é significativamente elevado, dessa forma vale levantar a hipótese de possível equívoco no registro do dado no banco de dados do SIAGAS.

A concentração de íons na água depende do tipo de aquífero, bem como da presença de contaminantes por fontes antrópicas. Embora o banco de dados adquirido careça de informações do tipo de aquífero captado, os dados de profundidade (figura 5) e as informações da geologia (figura 6) possibilitam fazer essas implicações e associar à presença de íons nas águas.

Os valores mais baixos de CE situam-se na zona leste dos depósitos aluvionares e em zonas de dunas. Percebe-se que os valores nessas áreas não ultrapassam de $1400 \mu\text{Scm}^{-1}$. Esses poços podem estar captando águas desses aquíferos poroso, pois apresentam profundidades que variam de 5 a 30 m em depósitos aluvionares e 30 a 60 m em área de dunas.

Na porção mais leste do município, próximo à divisa entre estados, a concentração de CE varia de 1400 a 2800, com uma amostra acima de 3500. Os poços apresentam profundidades variadas chegando a mais de 100 m. Esses poços podem estar captando água do aquífero Barreiras ou Jandaíra, ou ambos por exemplo, e dissolve sais que aumentam o valor da condutividade.

A concentração de CE apresenta-se mais elevada na porção oeste do município. Esse aumento pode estar relacionado a captação em aquífero cristalino, por serem poços mais profundos, com mais de 60 m. No entanto, existe poços mais rasos situados no aluvião que possuem apresentam CE elevada. Essa situação exige estudos como: I) análise físico-química das águas subterrâneas, devido as altas concentrações de CE; II) estudo de isótopos estáveis para análise da interação de águas superficiais naturais com as águas subterrâneas; III) monitoramento da qualidade da água.

Como observado, em Aracati as águas dos poços na zona de dunas que são mais susceptíveis à intrusão marinha possuem valores de até $1400 \mu\text{Scm}^{-1}$, por outro lado, poços situados na área mais interna do município apresentam condutividades muito mais elevadas. Levando em consideração a alta vulnerabilidade natural de aquíferos porosos, esse contexto permite abrir debates e investigações sobre a infiltração de águas alteradas por atividade antropogênica, como é o caso dos tanques de canicultura presentes na área.

A Portaria nº 888/21 do MS/GM (2021) não apresenta teor de referência para CE, no entanto o parâmetro sólidos totais dissolvidos (STD) apresenta valor máximo permitido (VMP) pela legislação e foi obtido a partir do produto da CE em

águas naturais e um fator aceitável para uma região de clima quente, cujo valor é 0,65 (FUNCEME, 2020; HEM, 1985).

O resultado dos teores de STD estimado mostra que são águas ricas ionicamente. Das amostras de água dos poços analisados e destinadas ao abastecimento doméstico e ao abastecimento urbano, 26 amostras de água dos poços possuem concentrações de STD fora dos limites permitidos pela Portaria MS nº 888, cujo VMP é de 500 mg/L.

Conforme estabelecido pela Resolução CONAMA nº 357/2005, águas doces apresentam teores de STD entre 0 e 500 mg/L; águas salobras variam de 500 a 1.500 mg/L; águas salgadas, se apresentar mais de 1.500 mg/L; dessa forma, a classificação das águas do município de Aracati para o ano de 1998, revela que, dos 94 poços com valores registrados, 52% dos poços apresentam água salobra, 25%, água salgada e 23% água doce.

Por ter predomínio de áreas sedimentares, o município de Aracati apresenta alto potencial hidrogeológico. Ao mesmo tempo, a alta vulnerabilidade natural dos aquíferos sedimentares junto à deficiência nos investimentos em saneamento básico municipal, modifica as propriedades físico-químicas dos recursos hídricos e trazem problemas na qualidade e de quantidade de água.

O monitoramento dos fatores físico-químicos e biológicos contribuem para a proteção da qualidade das águas subterrâneas tornando-se essencial para avaliar seu uso e evitar quaisquer riscos à saúde. Processos naturais, como formações geológicas, têm uma influência considerável na flutuação da qualidade da água subterrânea em um determinado local, mas as atividades antrópicas também podem ter um impacto significativo (SELVAKUMAR; CHANDRASEKAR; KUMAR, 2017).

5.2 Características do rio Jaguaribe

O rio Jaguaribe atravessa a cidade de Aracati no sentido Norte-Sul e a separa do bairro Pedregal. Observou-se que o mesmo é usufruído não só para atividades econômicas, carcinicultura e pesca, como também para recreação, porém não é usado para abastecimento doméstico, pois os moradores relatam que a água é salgada. Nas margens do rio é possível se verificar os impactos causados aos manguezais no entorno das carciniculturas.

A Figura 7 é um registro das ocupações em Aracati com vista de jusante para montante do rio, onde na margem ocidental está a localidade de Vila da Volta com alguns locais que realizam atividades de pesca e, mais ao sul, a localidade de Pedregal. Na margem oriental do rio encontra-se a sede municipal de Aracati e, entre a cidade e Pedregal, existem tanques de carcinicultura.

Figura 7 – Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 das ocupações antrópicas nas margens do rio Jaguaribe.



Fonte: Elaborada pela autora (2020).

De acordo com o uso preponderante do recurso hídrico, a água deve estar enquadrada no padrão da classe à qual se destina. O estudo no rio Jaguaribe seguiu com classificação e análise da qualidade da água para fins de recreação com base na Resolução CONAMA nº 357/05, baseado no padrão qualitativo para águas salinas da Classe 1, pois o Jaguaribe é destinado à recreação de contato primário, aquicultura e atividade de pesca (Tabela 13).

As 04 amostras (ARA_04, ARA_06, ARA_13 e ARA_15) de água fluvial coletadas correspondem aos pontos 58, 09, 59, 60, conforme mostra os Apêndices A

e C. O trajeto estudado teve todas as amostras classificadas como água do tipo salina com salinidade acima de 30‰ ou concentração de STD acima de 36.000 mg/L.

Tabela 13 – Resultado das análises das amostras do rio Jaguaribe e os padrões estabelecidos pelo Resolução CONAMA nº 357/2005.

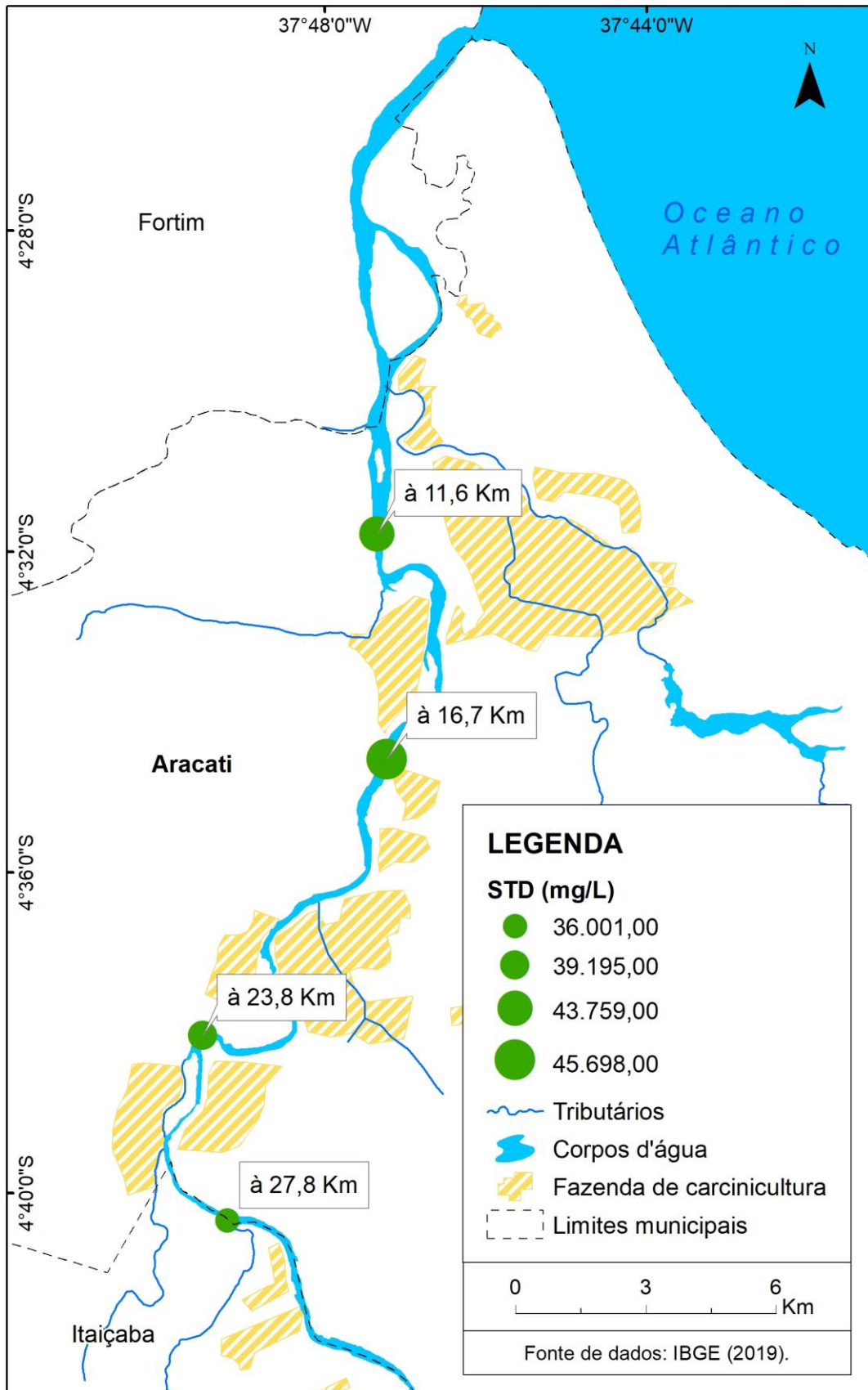
Parâmetros	Unidades	4	6	13	15	Águas salinas Classe 1
pH a 25 °C		7,86	7,94	7,67	7,96	6,5 a 8,5
Condutividade Elétrica	µS/cm	62.460	62.660	57.600	54.130	
Nitrato (mg N-NO ₃ ⁻ /L)	mg/L	0,3	0,2	0,2	0,2	0,40 mg/L N
Nitrito (mg N-NO ₂ ⁻ /L)	mg/L	0,03	0,02	0,02	<0,01	0,07 mg/L N
Nitrogênio Amoniacal Total (N-NH _{3,4})	mg/L	0,14	<0,01	0,1	<0,01	0,40 mg/L N
Fluoreto	mg/L	0,5	0,6	0,4	0,3	1,4 mg/L F
Alumínio	mg/L	0,05	0,05	0,06	0,05	1,5 mg/L Al
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	45.698	43.759	39.195	36.001	

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

A distribuição espacial das amostras mostra que a concentração de salinidade tende a diminuir à medida que se afasta da foz (Figura 8). Percebe-se que todas as amostras de água do rio apresentam valores de salinidade acima de 36‰, sendo superior à salinidade média do mar, que é de 35‰ conforme (NWS, 2005).

De modo geral, a extensão do estuário do Rio Jaguaribe é 36 km e a área tem aproximadamente 641.216 km², sendo limitada a montante pela barragem de Itaiçaba (PAULA; MORAIS; PINHEIRO, 2006). As influências marinhas no rio Jaguaribe chegam a atingir a distância de aproximadamente 25 km à montante do rio em preamar, podendo alcançar a barragem da cidade de Itaiçaba (GOMES NETO, 2007). Levando em consideração que o período de coleta dessas amostras estava dentro do intervalo de maré alta (Tabela 14), essa observação explica a concentração elevada de salinidade em pontos mais afastados da foz do rio Jaguaribe, à mais de 27 km de distância da foz, conforme mostrado na figura 8.

Figura 8 – Distribuição espacial das amostras do rio Jaguaribe e a distância de cada ponto em relação a foz.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Tabela 14 – Situação da maré nos horários de coleta das amostras do rio Jaguaribe.

Ponto	Amostras no rio	Data da coleta	Tabua de maré
9	6	29/10/20 12:25	Maré alta
58	4	28/10/20 12:55	Maré alta
59	13	28/10/20 11:50	Maré alta
60	15	29/10/20 13:40	Maré alta

Fonte: Elaborado pela autora (2023).

Outros fatores que provoca o aumento da concentração de sais no rio Jaguaribe são: I) as irregularidades de chuvas na bacia hidrográfica durante o ano; II) o represamento do rio Jaguaribe impede a troca da água estuarina com a água continental, formando zonas de estagnação estuarina; III) provável descarte de efluente de carcinicultura.

Borges (2017) constatou que a salinidade estava elevada no estuário do rio Jaguaribe, o que o torna hipersalino. O tempo de residência das águas do estuário do Jaguaribe é fortemente influenciado pela variabilidade climática da região, com período máximo de 12 horas na estação chuvosa e 3 horas na estação seca. Portanto, mesmo nos períodos chuvosos, quando há maior oferta de água doce, as correntes fluviais muitas vezes não conseguem superar as correntes marinhas da região (DIAS, 2007). Quando comparada com a água doce ($1500 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) e a água da chuva ($0,0 - 180,0 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$), a água salina tem maior condutividade elétrica (CE) ($50.000,0 \mu\text{S}/\text{cm}^{-1}$) (SUDARYANTO; NAILY, 2018).

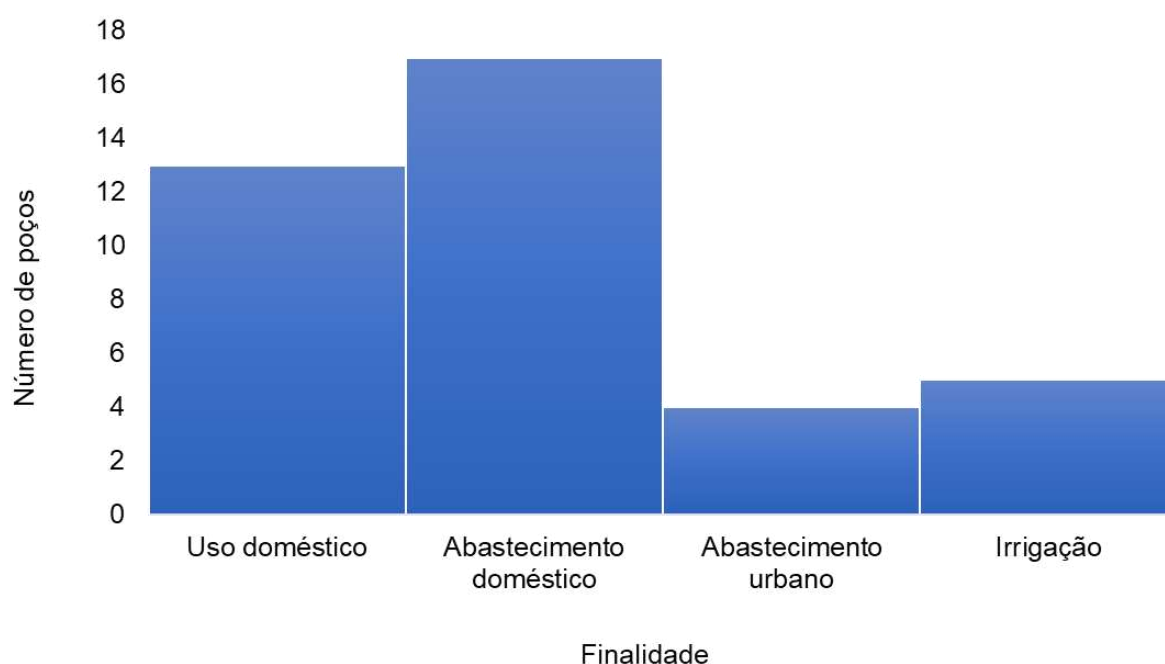
Em regiões semiáridas, onde longos períodos de secas e curtos períodos de chuva resultam em taxas de evaporação mais altas do que precipitação, estuários invertidos e hipersalinos são comuns. Assim, as águas estuarinas tornam-se mais densas que as marinhas, fazendo com que uma corrente de fundo flua para o mar e uma corrente de superfície flua para o estuário (LARGIER, 2010; POTTER *et al.*, 2010). Além disso, práticas de represamento de água doce são comuns em regiões semiáridas, contribuindo para o baixo aporte fluvial nos estuários e, conseqüentemente, aumentando as condições hipersalinas desses estuários, principalmente durante as estações secas (BORGES, 2017).

5.3 Características dos poços existentes na área de estudo

Dentro da área delimitada à pesquisa existem 257 poços cadastrados na plataforma do SIAGAS e mais 02 no arquivo de dados da COGERH, totalizando em 259 poços. Embora o levantamento em campo tenha possibilitado a visita em 53 poços, 40% não estão registrados nos sistemas. Contudo, mais da metade dos poços tiveram proveito de informações anteriores para complementar as interpretações.

Dos 53 poços visitados, 10 são amazonas e 41 tubulares, outros dois poços não foram localizados em campo. Foram coletadas informações por meio de conversas com a população local sobre a finalidade da água e a quantidade de pessoas abastecidas. A água captada dos poços em atividade é destinada para diversos fins, sendo 21 destas destinadas ao consumo humano, ingeridas de forma direta e indireta (Gráfico 1).

Gráfico 1 – Finalidade dos poços ativos existentes na área de estudo.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Do total de poços visitados, 68% estão em uso, 21% encontram-se desativados, 6% abandonados, 2% obstruídos e os demais não foi possível localizar (Figura 9).

Figura 9 – Mosaico fotográfico de poços visitados na área de estudo.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Dos 53 poços visitados, 36 (68%) possuem informação de profundidade que varia de 4 a 90 m (Tabela 15). O restante (32%) não apresentam informações de profundidade e/ou não foram possíveis obter em campo.

Tabela 15 – Profundidade dos poços na área de estudo obtidos pelo arquivo de dados do SIAGAS e em campo.

LI	LS	Classificação	Frequência
4,0	18,0	Muito rasos	11,0
18,0	32,0	Rasos	11,0
32,0	46,0	Profundos	10,0
>	46,0	Muito profundos	4,0
Total de poços			36

Nota: Limite inferior (LI); Limite superior (LS)

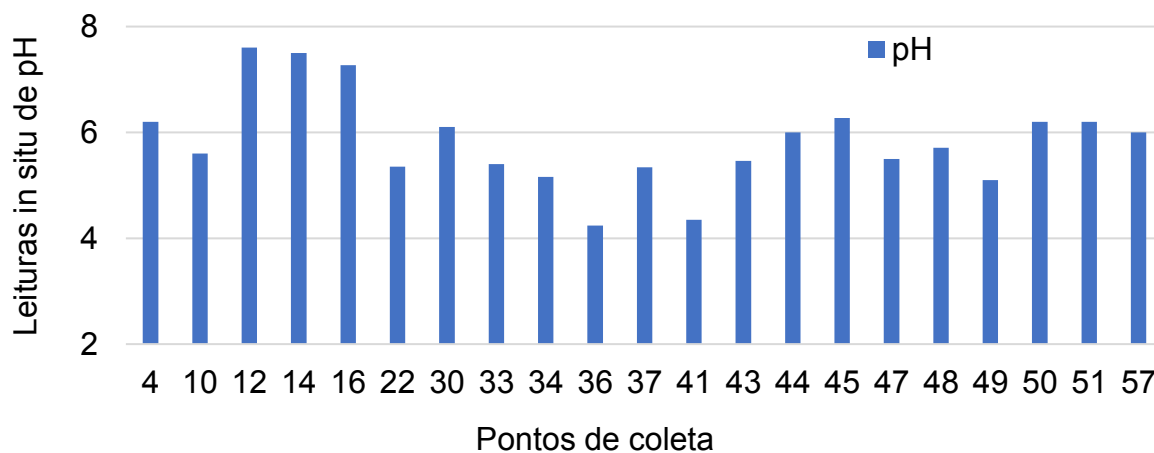
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Os mais rasos (< 32 m) estão situados no Domínio Aluvionar e os mais profundos no Barreiras (Apêndice D). Dos 32 poços ativos visitados, apenas 11 (34%) possuem perfis litológicos e refletem domínio sedimentar. Menos da metade dos poços tem informações suficientes para correlacionar parâmetros físico-químicos encontrados na água com as formações aquíferas.

Realizou-se uma avaliação inicial da qualidade da água *in situ* a partir dos parâmetros de pH, condutividade elétrica (CE) e temperatura, totalizando em 21 leituras. As amostras apresentaram pH variando de 4,24 e 7,26 refletindo caráter ácido a levemente alcalino (Gráfico 2). A CE variou de 190 a 5760 $\mu\text{S}/\text{cm}$ com 60% das amostras registrando valores acima de 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$ (aproximadamente 620 mg/L de STD) e uma temperatura média de 30 °C. Embora para CE não exista teor de referência, a conversão de CE para STD mostra que 14 leituras estão fora do permitido para STD, cujo o VMP é 500 mg/L conforme a Portaria nº 888/2021 MS vigente para água de consumo humano (Gráfico 3 e 4).

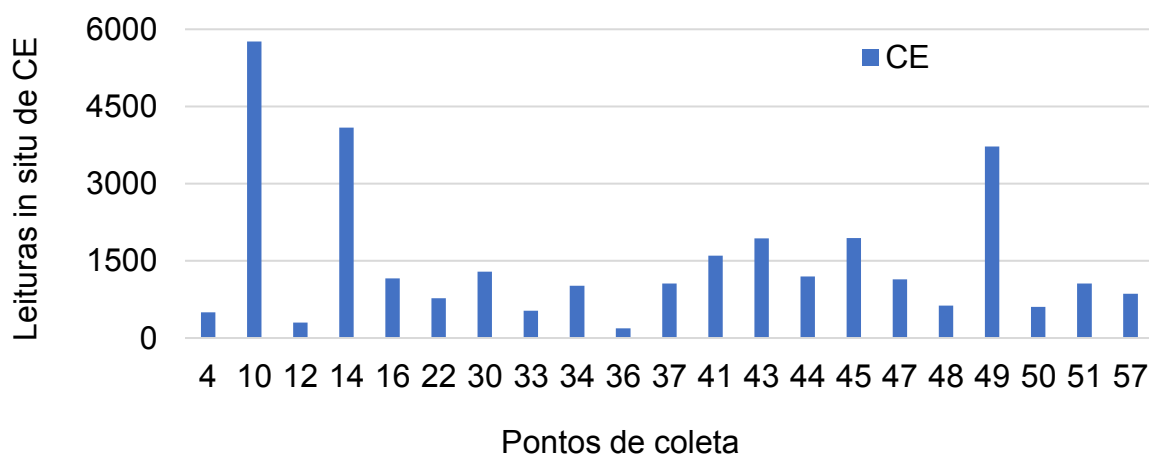
Os dados de nível estático medidos nas águas dos poços estudados estão representados na Tabela 16. O mapa potenciométrico está integrado nos mapas hidroquímicos para cada parâmetro apresentado nos itens do Capítulo 7 e no mapa das potenciais fontes contaminantes no capítulo 8 desse trabalho.

Gráfico 2 – Valores de pH para as amostras de águas subterrâneas.



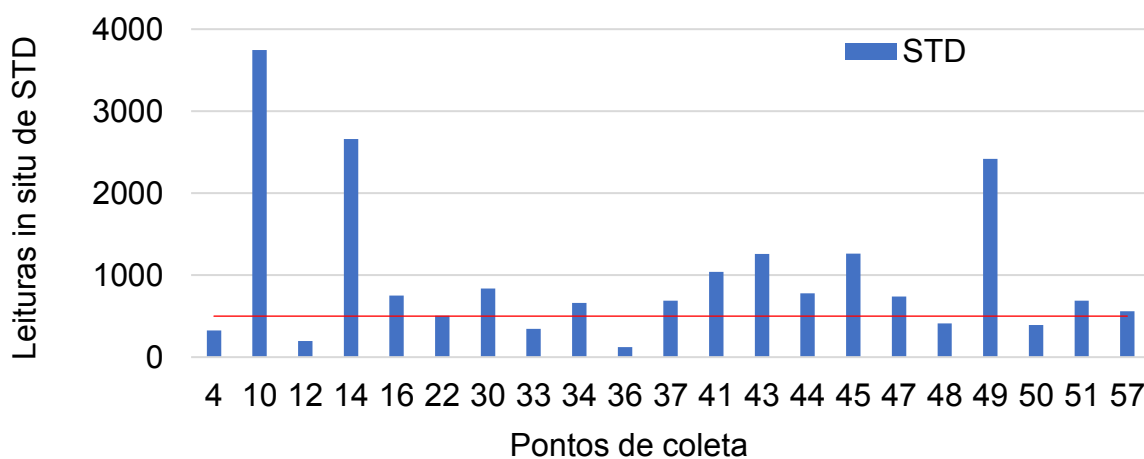
Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Gráfico 3 – Valores de CE para as amostras de águas subterrâneas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Gráfico 4 – Valores de STD para as amostras de águas subterrâneas.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Tabela 16 – Dados de nível estático e cota do nível estático dos poços.

Identificação	Altitude ortométrica	*NE (m)	**h (m)
Ponto 04	21,84	3,7	18,14
Ponto 07	9,82	2,7	7,12
Ponto 12	3,85	2,4	1,45
Ponto 14	6,79	1,43	5,36
Ponto 16	8,77	2,6	6,17
Ponto 17	10,72	3	7,72
Ponto 21	13,74	9,1	4,64
Ponto 29	28,75	21,5	7,25
Ponto 30	24,74	20,1	4,64
Ponto 31	17,76	11	6,76
Ponto 33	9,76	3	6,76
Ponto 36	9,77	3,3	6,47
Ponto 37	26,78	20	6,78
Ponto 38	9,77	0,65	9,12
Ponto 39	10,77	1,75	9,02
Ponto 43	18,8	6,9	11,9
Ponto 44	9,8	4,1	5,7
Ponto 45	6,81	2,75	4,06
Ponto 46	11,87	5,5	6,37
Ponto 47	15,82	12,1	3,72
Ponto 48	15,83	8	7,83
Ponto 49	45,85	17,8	28,05
Ponto 51	18,8	2	16,8
Ponto 57	9,86	2,5	7,36

Nota: * Nível estático (NE); ** Cota potenciométrica (h)

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

5.4 Vulnerabilidade natural dos aquíferos sedimentares

A escolha dos locais para coleta de água dos poços dos aquíferos sedimentares foi facilitada com o mapa de vulnerabilidade natural do aquífero à contaminação integrado ao mapa base (Apêndice E). A partir do levantamento de dados dos poços no SIAGAS, observou-se que dentro da área de estudo delimitada, existe 257 poços cadastrados, contudo apenas 45 poços (17%) possuem informações suficientes para aplicação do método GOD. Para fins investigativos e primeiras análises da área de estudo, optou-se por elaborar o mapa de vulnerabilidade para auxiliar na seleção de amostras de água dos poços.

De acordo com os resultados obtidos para o grau de confinamento, 38 poços (84%) captam água de aquíferos não confinados, 4 (9%) de confinados e 3 (7%) de semiconfinado. Quanto as condições de cobertura, 23 poços apresentam uma litologia com índice variando de 0,6 a 0,69 (51%); 15 poços com índice entre 0,7 e 0,8 (33%); 4 poços com índice de 0,4 a 0,49 (9%) e 3 poços com índice variando de 0,5 a 0,59 (7%).

A vulnerabilidade obtida com uso do sistema GOD revela que 44% da área municipal está enquadrada em classe de vulnerabilidade alta; em classe média 40%; em baixa 9% e em insignificante 7%. O predomínio das classes de vulnerabilidade alta e média na área (82%) está associada a presença significativa de coberturas aluvionares e dunas.

6 PADRÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI

O seguinte capítulo traz a abordagem do comportamento das águas subterrâneas no município através da avaliação hidroquímica das águas e de análise estatística dos parâmetros analisados.

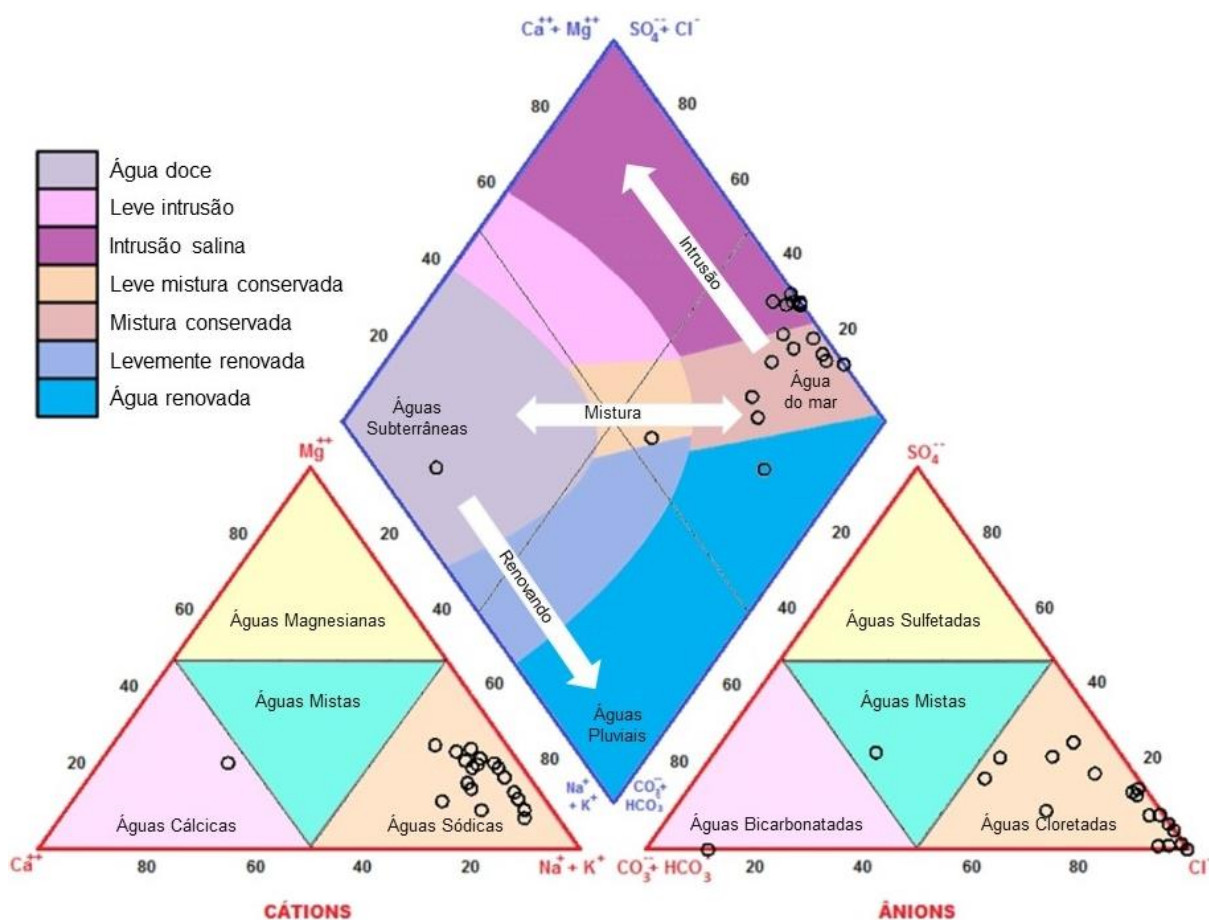
6.1 Hidroquímica das águas

Para avaliar a qualidade analítica dos dados, foi calculado o erro de análise baseado no balanço iônico, no qual a concentração total de cátions deve ser aproximadamente igual à concentração total de ânions para a mesma amostra expressa em miliequivalentes por litro (meq/L), resultando num coeficiente de erro dentro dos 10% (LOGAN,1965). Segundo Fenzl e Ramos (1988, p. 189), os valores acima do erro permitido podem indicar à acumulação de erros na determinação de cada variável e presença de íons menores. Para a realização do balanço iônico e consecutivo cálculo de erro, utilizou-se a técnica definida por Logan (1965).

Das 20 amostras de águas subterrâneas, apenas uma apresentou erro acima de 10%, as demais representam análises ionicamente balanceadas e, logo, foi possível realizar a classificação das águas que permitiu a interpretação hidroquímica. A classificação química das amostras de águas analisadas foi interpretada por meio de diagramas de Piper, de Stiff e Schoeller-Berkaloff.

O diagrama de Piper (1944) é usado determinar a classificação iônica da água a partir dos cátions e ânions dominantes (KHANORANGA; KHALID, 2019). Foi identificado 2 classes e tipos predominantes de águas existentes nos aquíferos da região, com a predominância da classe Cloretadas Sódicas (95%) (Figura 10).

Figura 10 – Diagrama de Piper para as águas subterrâneas de Aracati-CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A amostra ARA_01 foi classificada em Bicarbonatada Cálcica. Embora a amostra ARA_02 seja classificada como Cloretada Sódica, para Naseem *et al.* (2017), a amostra tem padrão de águas renovadas por águas pluviais. Já a amostra ARA_03 é caracterizado por uma mistura das águas.

A predominância de íons cloreto (Cl^-) sobre o íon bicarbonato (HCO_3^-) e sobre o íon sulfato (SO_4^{2-}) é uma característica comum em regiões costeiras devido à influência marinha (CARACAS, 2013). No entanto, para o contexto de Aracati, a presença de tanques de carcinicultura também influenciam na salinização das águas subterrâneas, conforme evidenciado por Veras (2010) em poços na localidade de Cumbe.

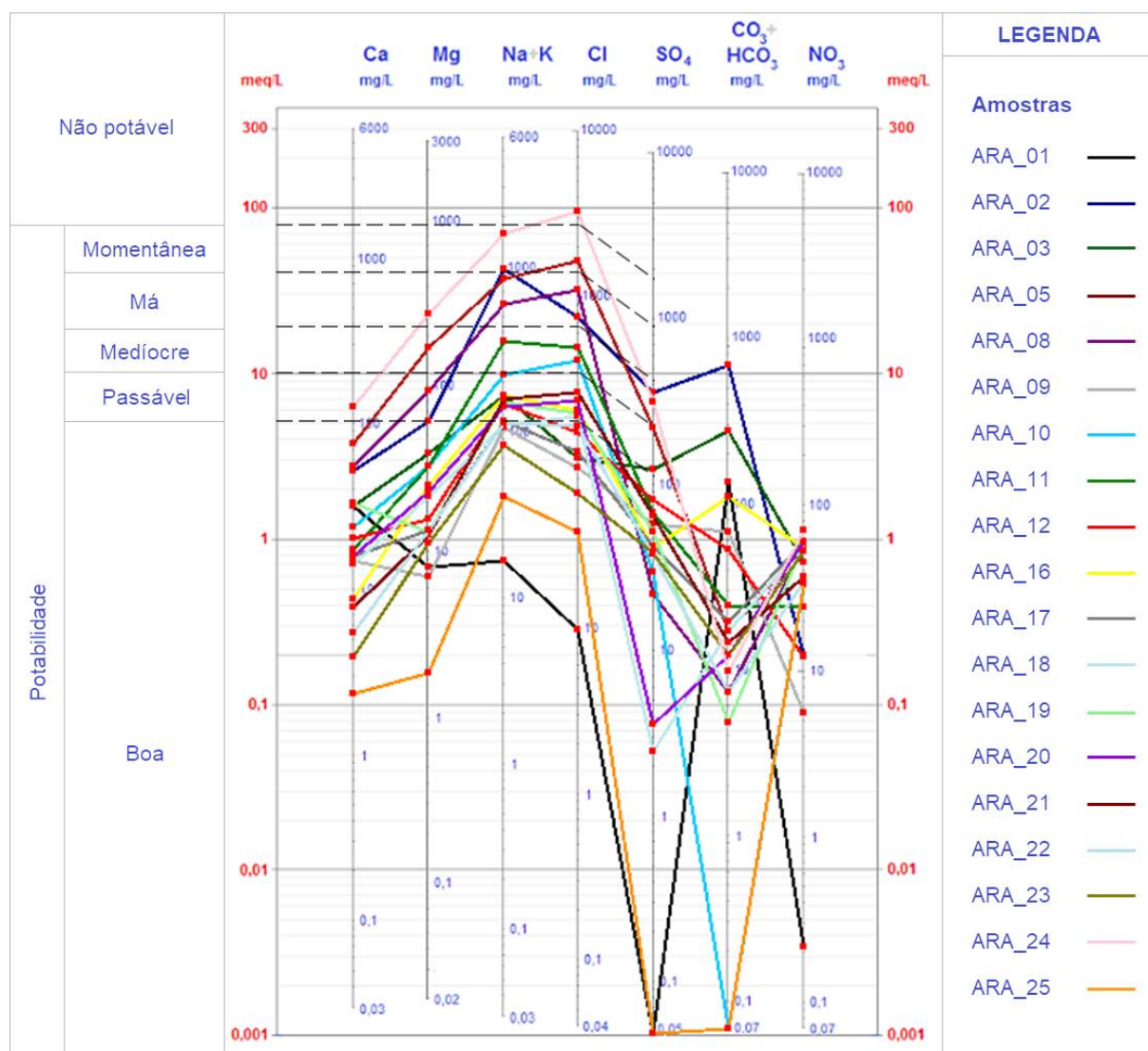
Os diagramas de Stiff (Apêndice D) permitem identificar a tendência das amostras e o agrupamento conforme sua semelhança ou distinção. Assim como mostrado pelo diagrama de Piper, a amostra ARA_01 tem concentração maior de íons Ca^{2+} e HCO_3^- , com padrão similar a águas subterrâneas diluídas conforme apontado

por Culhane (1993). Essa amostra revela comportamento hidroquímico único, possivelmente por captar água de aquífero dunas. As amostras ARA_02, ARA_03 são de poços rasos que captam água do aluvião, ambas estão situadas ao leste do rio Jaguaribe e trata-se de águas alcalinas com maior concentração de íons Na^+ , K^+ e Mg^{2+} com padrão semelhante a águas subterrâneas duras.

Por outro lado, as 16 amostras (ARA_05, ARA_08, ARA_09, ARA_10, ARA_11, ARA_12, ARA_16, ARA_17, ARA_18, ARA_19, ARA_20, ARA_21, ARA_22, ARA_23, ARA_24, e ARA_25) é perceptível a maior concentração de íons Na^+ , K^+ e Cl^- . O diagrama de Stiff indica similaridade hidroquímica de águas subterrâneas influenciadas por intrusão salina conforme apontado por Culhane (1993). Essas 16 amostras têm profundidades diversas: 9 possuem Sistema Hidrogeológico Barreiras; 2 em Aluvião; os outros 5 não se tem informação. Percebe-se que, independentemente da profundidade dos poços, todos apresentam forte influência salina, e isso pode estar ocorrendo devido à infiltração das águas em tanques de carnicultura no solo.

Foi avaliado a potabilidade das águas subterrâneas a partir da utilização dos parâmetros estabelecidos por Schoeller-Berkaloff (cálcio, magnésio, sódio e potássio, cloreto, sulfatos, carbonato e bicarbonato e nitrato expressos em mg/L), os quais definem seis classes de potabilidade: boa, passável, medíocre, má, momentânea e não-potável (SZIKSZAY, 1993). As amostras plotadas no diagrama de Schoeller-Berkaloff também evidenciam a tendência cloretada das águas subterrâneas (Figura 11).

Figura 11 – Diagrama de Schoeller & Berkloff para potabilidade das águas subterrâneas de Aracati – CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Do ponto de vista físico-químico, as amostras estudadas predominam águas com índices de potabilidade variando de passável a momentânea e não potáveis, principalmente quanto aos parâmetros de sódio e potássio (acima de 200 mg/L), cloreto (acima de 250 mg/L) e nitrato (acima de 45 mg/L).

Observou-se que 02 amostras são classificadas como passáveis, outras 02 como médiocres, 01 má, 02 momentâneas e 01 não potável. Além disso, existem 07 amostras (37%) com concentração de íon nitrato acima dos limites permissíveis pela Portaria nº 888/2021 sendo, portanto, classificadas como não potáveis (Tabela 17). As

outras 04 amostras estão inseridas dentro do padrão de potabilidade (ARA_01, ARA_09, ARA_22 e ARA_25), sendo classificadas com boas.

Tabela 17 - Classificação da potabilidade das águas dos poços tubulares e cacimbões em Aracati segundo o Diagrama de Schoeller & Berkaloff.

Identificação da amostra	Potabilidade	Parâmetros restritores
ARA_1	Boa	
ARA_2	Momentânea	Na+K
ARA_3	Não potável	Na+K e NO ₃
ARA_5	Momentânea	Cl
ARA_7	Boa	
ARA_8	Má	Na+K e Cl
ARA_9	Boa	
ARA_10	Medíocre	Cl
ARA_11	Medíocre	Na+K e Cl
ARA_12	Passável	Na+K
ARA_16	Não potável	Na+K e Cl e NO ₃
ARA_17	Não potável	Na+K e NO ₃
ARA_18	Não potável	Cl e NO ₃
ARA_19	Não potável	Cl e NO ₃
ARA_20	Não potável	Na+K e Cl e NO ₃
ARA_21	Passável	Na+K e Cl
ARA_22	Boa	
ARA_23	Não potável	NO ₃
ARA_24	Não potável	Cl
ARA_25	Boa	

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

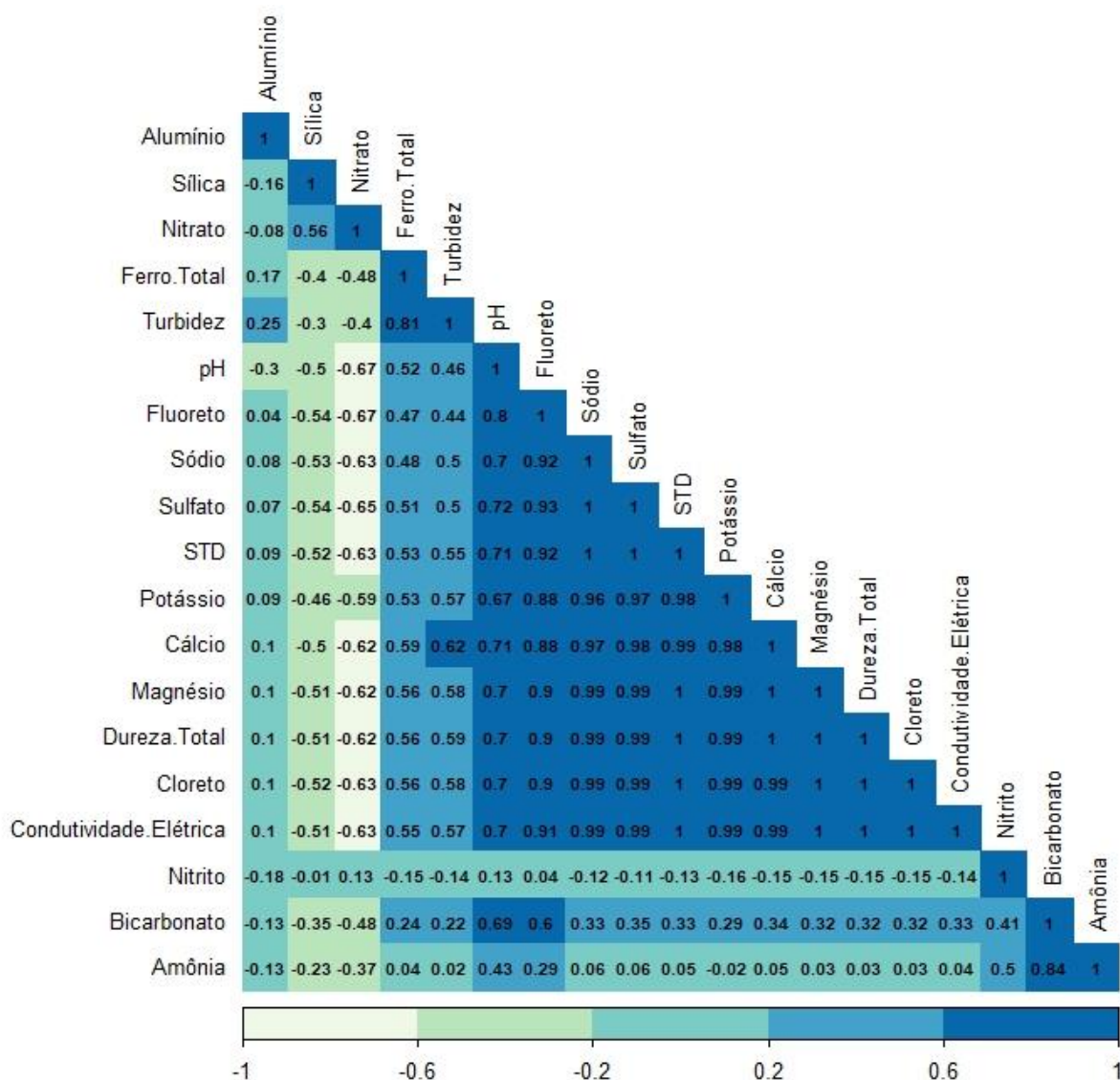
6.2 Correlação e análise de componentes principais

A matriz do gráfico de dispersão está representada no Apêndice F, a qual dispõe de vários gráficos de dispersão entre os parâmetros analisados e que permite a visualização única das relações entre os vários pares de variáveis estudados. Nota-

se pela matriz que existe uma correlação linear entre as variáveis podendo ser positiva ou negativa.

Os coeficientes de correlação linear de Pearson (r) para os parâmetros de qualidade da água da área de estudo estão representados na Figura 12.

Figura 12 - Correlação de Pearson entre os parâmetros físico-químicos das amostras.



Fonte: Elaborado pela autora (2023).

As correlações positivas vão indicar que, entre as duas variáveis analisadas, a concentração dos parâmetros aumenta paralelamente. Por outro lado, em correlações negativas, quanto menor a concentração de um determinado parâmetro, maior a de outro analisado e vice-versa.

A magnitude dos coeficientes de correlação foi classificada, em módulo, pelo método Sturges (1926) da seguinte maneira: valores entre 0 e 0,2 (muito fraco); entre 0,21 e 0,4 (fraco); entre 0,41 e 0,6 (moderado); entre 0,61 e 0,8 (forte); entre 0,81 e 1 (muito forte);

No geral as correlações entre os parâmetros podem ser sustentadas pelos comportamentos físico-químicos das substâncias a partir de interferências geogênicas ou antrópicas:

a) Correlação positiva extremamente forte ($r \geq 0,96$) entre os parâmetros condutividade elétrica, STD, dureza total, os cátions (sódio, potássio, cálcio e magnésio) e os ânions (sulfato e cloreto). Figueiredo *et al.*, (2006) apontam que o solo dos viveiros apresenta elevados teores de Ca, Mg, P, S, CE, Mn, Fe e Zn e que a partir da lixiviação dessas substâncias para a subsuperfície, existe um fator potencial para contaminação das águas subterrâneas. A condutividade tende a aumentar com a dissolução de sais na água, e conseqüente aumento da salinidade e pode ser indicativo de poluentes em água (CETESB, 2020).

b) O Nitrato possui correlação negativa forte ($| r | \geq | -0,62 |$) entre os parâmetros condutividade elétrica, STD, dureza total e pH, os cátions (sódio, cálcio e magnésio) e os ânions (fluoreto, sulfato e cloreto). Apresenta também correlação positiva moderada com a sílica ($r = 0,56$).

c) Apesar da correlação negativa fraca entre alumínio e pH ($r = -0,30$), nota-se o destaque em relação aos demais coeficientes. Essa relação está associada ao comportamento levemente ácido das águas da região. O alumínio ainda apresenta uma correlação positiva fraca com a turbidez ($r = 0,25$) que se destaca.

d) Correlação fortemente positiva entre turbidez e ferro ($r = 0,81$), pois a presença de ferro altera a cor e a turbidez das águas subterrâneas. Além disso, a construção de tanques de carciniculturas na região promove a remobilização do ferro presente do solo e torna a substância mais disponível nas águas subterrâneas.

e) Correlação entre turbidez e cálcio positiva forte ($r = 0,62$).

f) O pH possui correlação positiva forte com fluoreto, sódio, sulfato, STD, cálcio, magnésio, dureza total, cloreto e condutividade ($r \geq 0,7$). As águas

subterrâneas analisadas apresentaram comportamento levemente ácido, o que implica na dissolução de metais e conseqüentemente aumento das concentrações de íons (CARACAS, 2013).

g) O fluoreto também apresentou correlação muito forte entre os parâmetros condutividade elétrica, STD, dureza total, pH, sódio, potássio, cálcio, magnésio, sulfato e cloreto ($r \geq 0,88$).

h) Embora o nitrito apresenta correlação positiva moderada com bicarbonato ($r = 0,41$) e amônia ($r = 0,5$), são valores que se destacam entre os dados.

i) O bicarbonato já apresenta fortíssima correlação com amônia ($r = 0,84$).

j) A amônia também apresenta correlação positiva, mesmo que fraca, com fluoreto ($r = 0,29$) e moderada com pH ($r = 0,43$).

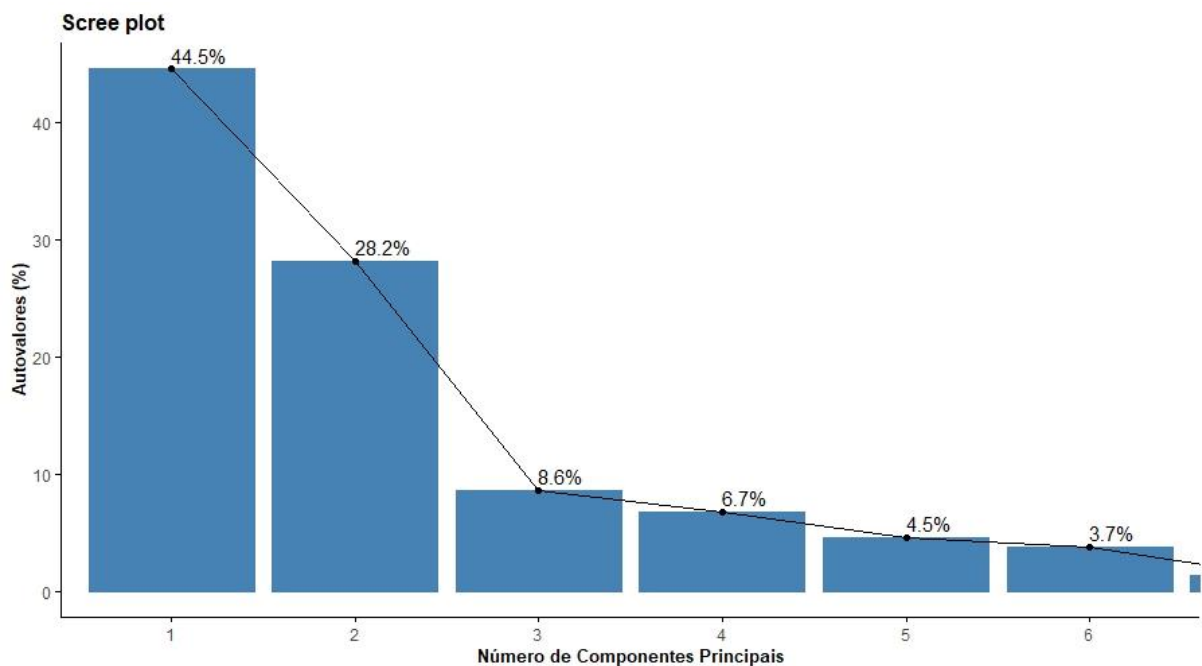
A avaliação por meio da análise de componentes principais (ACP) também serviu como ferramenta complementar para interpretação de todo o conjunto de dados de forma que fosse possível visualizar o comportamento hidroquímico das amostras quantitativas de água superficiais e subterrâneas.

A ACP foi aplicada em 25 indivíduos, 19 variáveis quantitativas e usadas para a análise do componente principal e uma variável qualitativa em todo o conjunto de dados de qualidade da água da área de estudo.

O banco de dados está organizado da seguinte forma: I) amostras em águas subterrâneas (indivíduos ativos); II) amostras de águas superficiais (indivíduos suplementares), com finalidade de comparação do comportamento químico das águas; III) parâmetros químicos analisados (variáveis ativas); IV) parâmetros físicos e o nitrito (variáveis contínuas suplementares); V) classificação de salinidade das águas subterrâneas proposta pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA (variável qualitativa suplementar).

Os componentes gerados revelam que 81,31% da variação total dos dados é explicada pelos três primeiros autovalores juntos, cuja porcentagem é aceitavelmente grande. Os autovalores medem a quantidade de variação retida por cada componente principal (CP). Dessa forma, os autovalores são grandes para os primeiros CPs e pequenos para os CPs subsequentes. O primeiro componente da APC foi responsável por 44,53% das variâncias, enquanto o segundo componente foi responsável por cerca de 28,17% da variância (Figura 13).

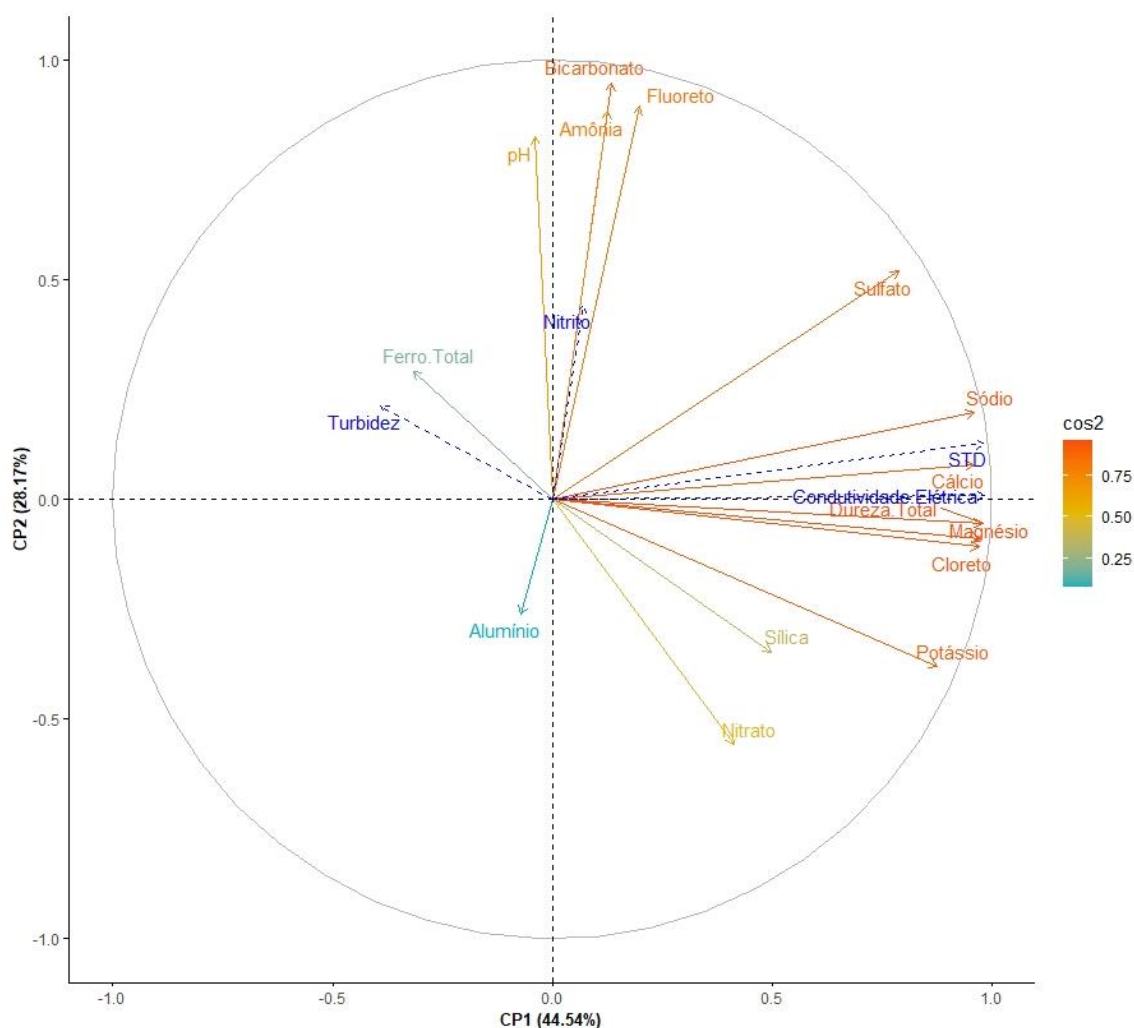
Figura 13 – Screeplot das Componentes Principais para as amostras de água com sua variância e autovalores.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As variáveis que se distam da origem estão bem representadas no mapa de fatores. A correlação entre uma variável e um CP é usada como as coordenadas da variável. As observações são representadas por suas projeções, mas as variáveis são representadas por suas correlações (ABDI E WILLIAMS, 2010). Os parâmetros analisados podem ser vistos usando um gráfico de dispersão das variáveis de coordenadas. Aplicando o quadrado do cosseno ou quadrado das coordenadas (\cos^2) foi possível visualizar a qualidade de representação das variáveis no mapa de fatores (Figura 14).

Figura 14 – Representação do padrão dos parâmetros nas amostras de águas subterrâneas em relação as componentes CP1 e CP2.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

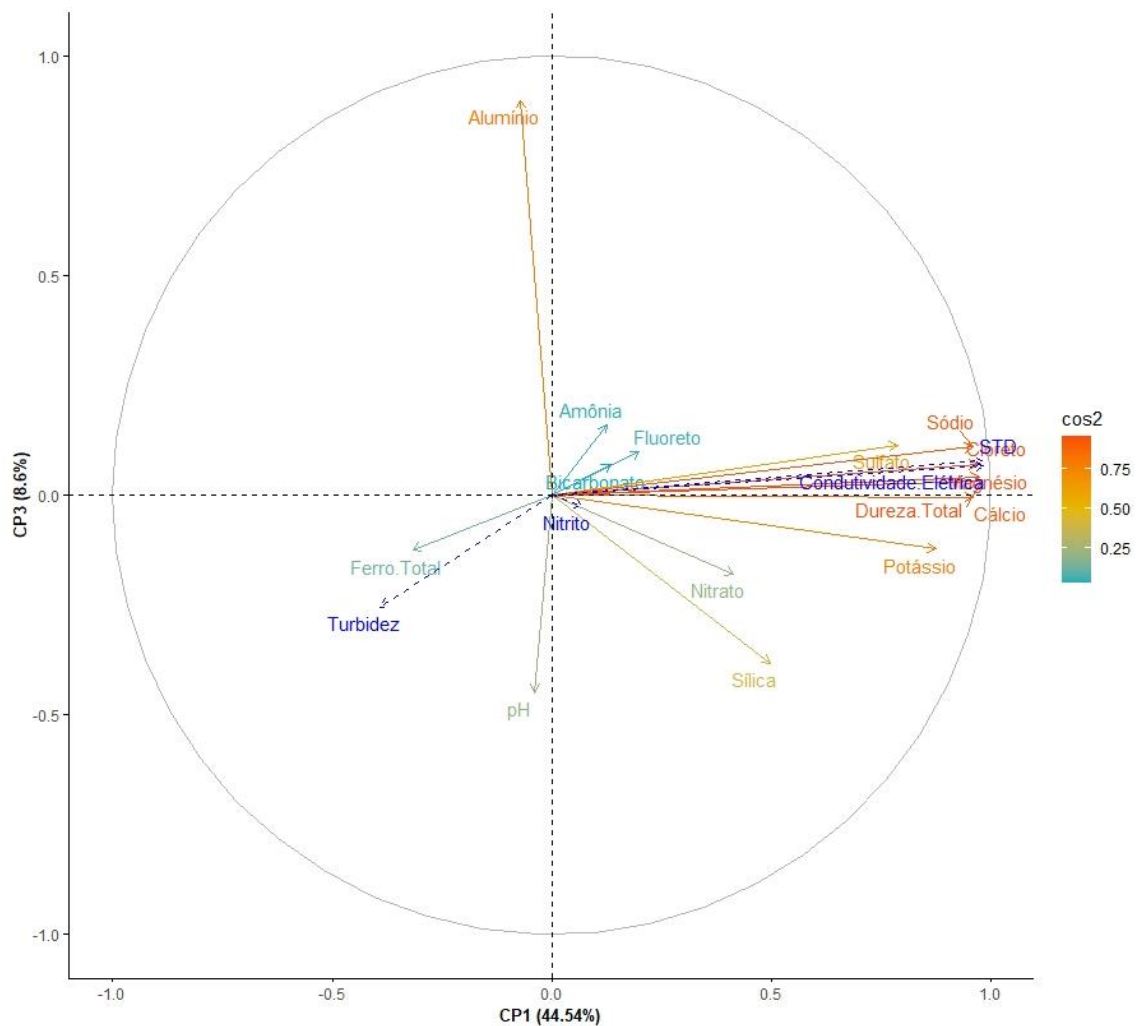
Existem pelo menos 2 grupos bem definidos: I) cálcio, cloreto, dureza total, magnésio e sódio apresenta forte relação entre os parâmetros no primeiro componente do ACP, bem como condutividade elétrica e STD. Embora sulfato e potássio estejam um pouco mais afastados deste grupo, ambos possuem forte correlação com o primeiro componente; II) Amônia, bicarbonato, fluoreto e pH, além de nitrito em suplementar.

A sílica e nitrato aparentam ser um grupo pela proximidade de suas coordenadas, porém a sílica tem relação boa com o primeiro componente, já o nitrato, com o segundo componente.

O ferro total e a turbidez possuem proximidade de suas coordenadas, mas a relação deles é melhor representada no eixo 3. A mesma situação ocorre para o

alumínio que apresenta boa correlação apenas na terceira componente, isso se deve aos resultados analíticos serem muito baixos em relação aos demais parâmetros (Figura 15).

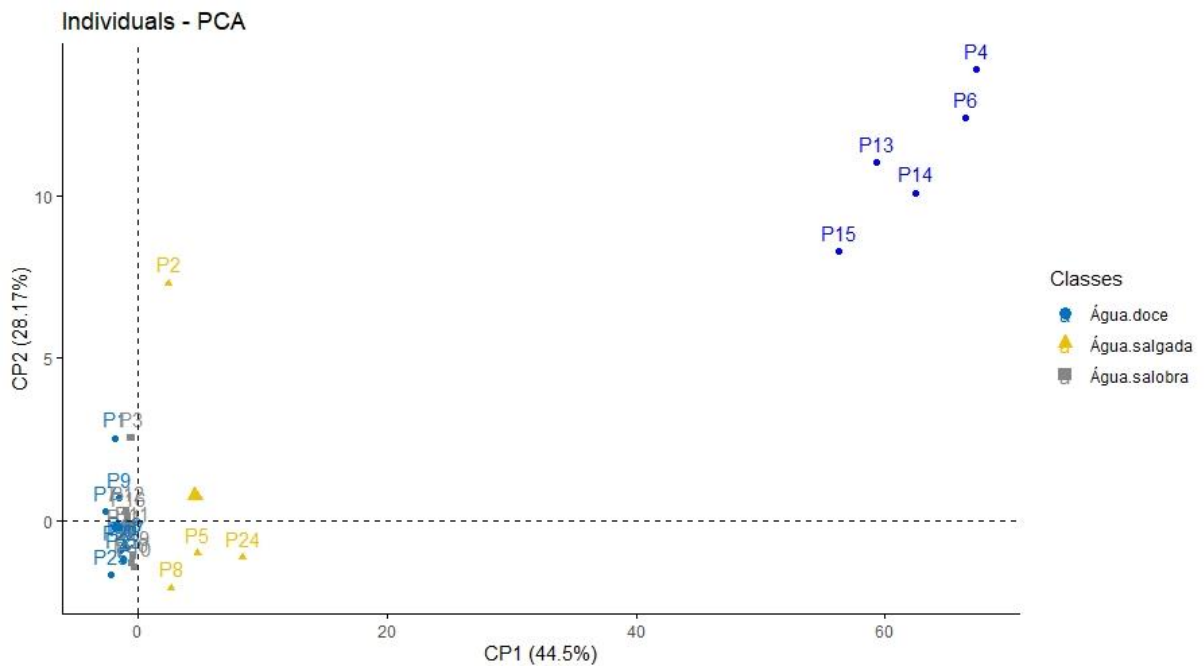
Figura 15 - Representação do padrão dos parâmetros nas amostras de águas subterrâneas em relação as componentes CP1 e CP3.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

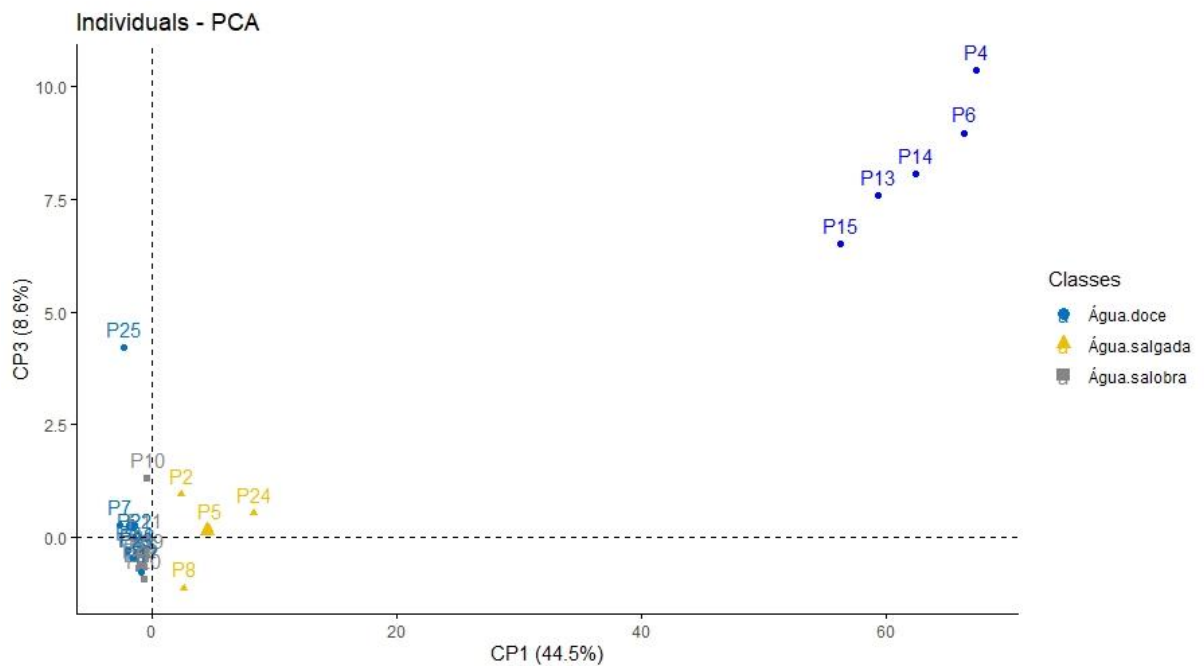
Os indivíduos semelhantes também foram agrupados nas figuras 16 e 17, os quais revelam as relações entre amostras de águas subterrâneas e águas superficiais. Os indivíduos, correspondentes as amostras de água subterrâneas, foram coloridos de acordo com a variável qualitativa do banco de dados. Dessa forma, é possível visualizar a espacialização dos indivíduos classificados por água doce, salobra e salgada.

Figura 16 – Comportamento dos indivíduos e a classificação de acordo com a salinidade em relação as componentes CP1 e CP2.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Figura 17 – Comportamento dos indivíduos e a classificação de acordo com a salinidade em relação as componentes CP1 e CP3.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Nas duas figuras 16 e 17, as águas classificadas com doces e salobras estão situadas ao lado esquerdo do segundo eixo, enquanto todas as amostras classificadas como salgadas, estão do lado oposto do eixo. Esse comportamento mostra certa similaridade com as amostras de águas superficiais.

De modo geral, analisando as figuras em conjunto (Figuras 14, 15, 16 e 17), é possível identificar que:

- a) As águas amostradas no município apresentam comportamentos hidroquímicos agrupados: bicarbonatadas e fluoretadas; cálcicas, magnesianas duras, sódicas e cloretadas.
- b) As amostras de águas salgadas conduzem os parâmetros fortemente associados ao primeiro eixo;
- c) As amostras de água superficiais são aquelas que carregam o sulfato nos Figuras 16 e 17, por isso a variável apresenta destaque em relação aos demais parâmetros;
- d) A amostra P2 traz os parâmetros que tem boa relação com o segundo eixo.
- e) Na figura 16 os grupos de amostras que apresentam um padrão similaridade também coincidem com a classificação apresentada na variável qualitativa dos indivíduos. Contudo, a amostra P2 dista-se do grupo de amostras de águas salgadas.
- f) A amostra P2 conduz fortemente os parâmetros bicarbonato, amônia e fluoreto, por outro lado as amostras P5, P8 e P24 conduzem os parâmetros nitrato e sílica. As três amostras 5, 8 e 24 são poços tubulares comunitários e situam-se mais afastados da cidade sede de Aracati. O P2 é um poço amazonas particular localizado dentro da cidade sede.
- g) A variável alumínio é conduzida pelo indivíduo P25 e encontra-se oposto ao parâmetro pH. Essa relação pode estar associada aos teores de acidez nas águas e o aumento da concentração de alumínio.

7 QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI

O resultado do laboratório para os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas é apresentado no Apêndice G. Os valores de cada parâmetro foram relacionados com padrão contido na Portaria nº 888/2021 MS, legislação vigente de água potável para consumo humano, que estabelece os Valores Máximos Permitidos (VMP) para cada parâmetro e aqueles que se encaixam nas comparações VMP da referida Portaria foram usados para gerar mapas de distribuição espacial.

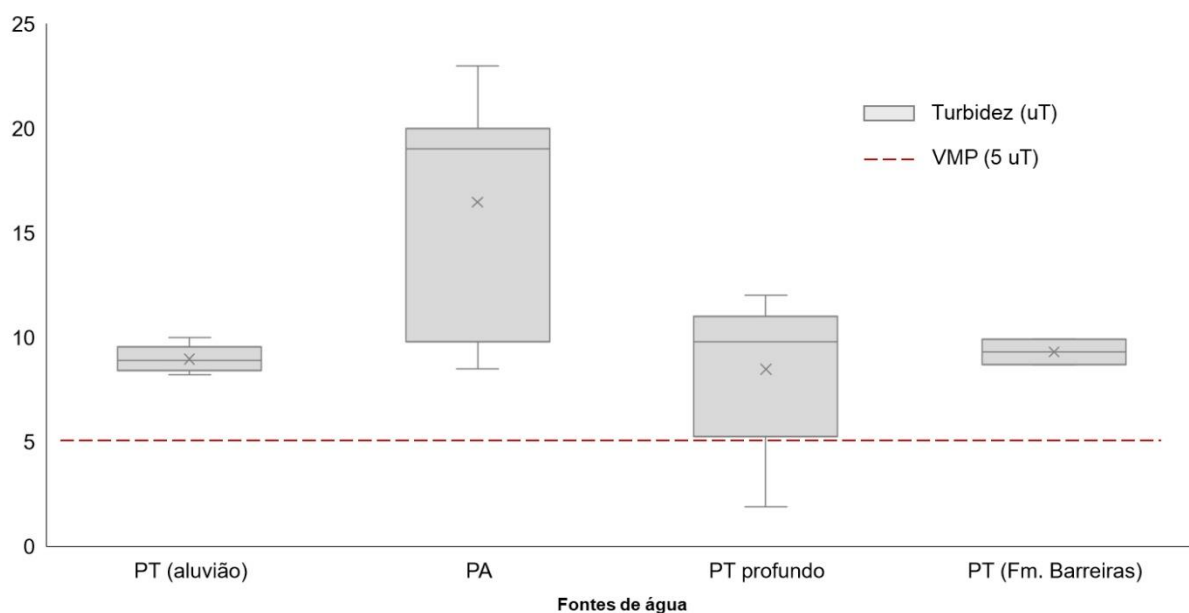
7.1 Turbidez

A importância da turbidez em águas subterrâneas é observada na Resolução CONAMA nº 396/2008, Art. 12 e 13, a qual estabelece que os órgãos competentes deverão considerar, no monitoramento da qualidade da água, no mínimo, os parâmetros STD, nitrato, coliformes termotolerantes, turbidez, CE e medição de nível de água.

O parâmetro turbidez variou de 1,90 a 23 uT e, embora 90% das amostras apresentem valores acima do estabelecido pela legislação (5 uT), isso não causa impacto negativo na saúde, porém torna a água indesejável. O valor de turbidez é indicativo de argila ou outras partículas inertes suspensas na água potável, que podem ser resultantes de erosão ou descarte de efluentes (CETESB, 2020; USGS, 2018). As amostras com maiores teores de turbidez se encontram em poços amazonas, cujas águas captadas estão armazenadas em níveis argilosos. O Gráfico 5 mostra os valores de turbidez em relação a proveniência das águas captadas.

Foi possível identificar as fontes de captação dos poços cadastrados no SIAGAS a partir dos perfis litológicos (Aquíferos Aluvionar e Barreiras), por outras fontes identificadas em campo, como poços amazonas, e aqueles cujas informações não constam no SIAGAS foram classificados pelas profundidades, observando-se que neste estudo existem apenas poços profundos (> 32 m).

Gráfico 5 – Valores de turbidez e as fontes de coleta das amostras em Aracati – CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

7.2 Condutividade Elétrica (CE)

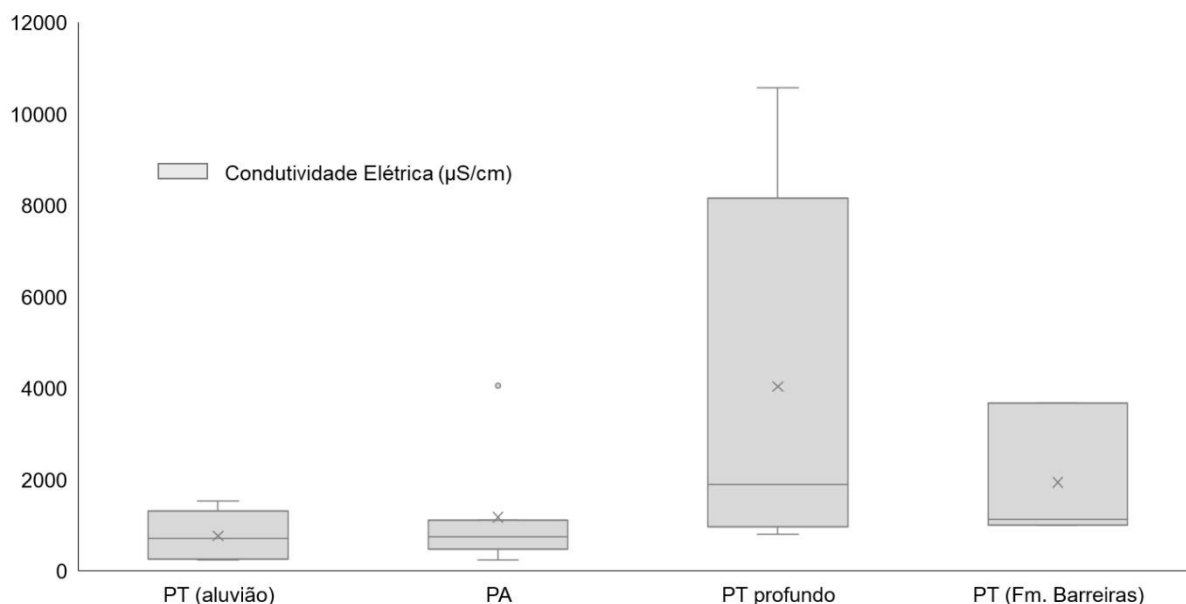
Os valores de condutividade elétrica (CE) das águas subterrâneas variaram de 244 a 10.570 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, cuja maior concentração foi na amostra ARA_24 e 4 amostras têm valores acima de 2.000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A distribuição de CE, por tipo de poço, indica maiores valores nos poços profundos e em poços que captam o Aquífero Barreiras na área de estudo (Gráfico 6).

A Portaria MS nº 888/2021 não apresenta valor de referência para CE, no entanto Caracas (2013) e Custodio e Llamas (2001) apontam que a CE em água subterrânea varia de 100 a 2.000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ a 18 °C, enquanto na água do mar pode chegar a 45.000 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$. A mudança na concentração dos íons presentes nas águas subterrâneas ocorre em função da sazonalidade da região, nota-se pelo padrão de distribuição pluviométrica do município que a data de coleta (outubro) das amostras ocorreu em condições de seca extrema.

Dessa forma, no período de estiagem, a recarga dos aquíferos diminui devido à baixa precipitação e os teores de sais aumentam, elevando, a concentração de íons e CE (CARACAS, 2013). Ademais, este parâmetro é indicador de intrusão salina utilizado em aquíferos costeiros, reflete a quantidade de sais na água, sendo, portanto, uma estimativa indireta da concentração do poluente. Também serve como

indicador de mudanças na composição da água, particularmente nas concentrações de minerais (CETESB, 2020).

Gráfico 6 - Valores de CE e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE.



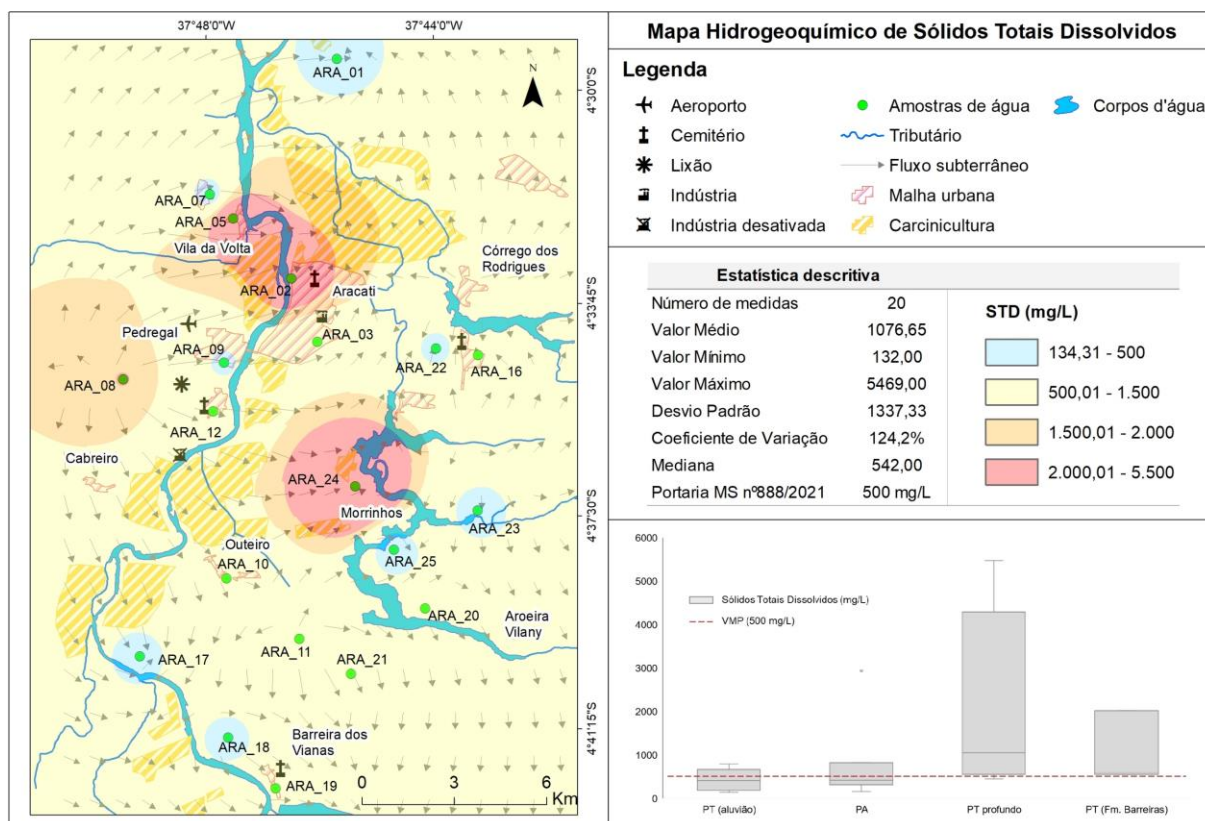
Fonte: Elaborado pela autora (2022).

7.3 Sólidos Totais Dissolvidos (STD)

As concentrações de STD em 12 amostras (60%) estão acima do VMP da legislação (500 mg/L), e a amostra ARA_24 apresentou o maior valor, 5.469 mg/L. A distribuição espacial dos valores dentro do padrão de potabilidade estabelecido pela legislação ocorre de forma pontual e os maiores valores estão distribuídos em quase toda extensão da área. As amostras com valores altos de STD encontram-se concentradas em poços profundos e poços que captam o Barreiras (Figura 18).

Existem valores muito altos e muito baixos das amostras analisadas de STD, assim, essa heterogeneidade interfere no valor médio do conjunto de amostras, e, conseqüentemente, invalida a qualidade da água para o consumo humano da região de modo geral. Visto isso, foi apresentado também a mediana na estatística descritiva, isto é, o valor do meio do conjunto de dados, não só para o parâmetro de STD, como os demais parâmetros que serão apresentados nos itens seguintes. O valor da mediana mostra que existem amostras com valores dentro do permitido estabelecido pela legislação.

Figura 18 – Distribuição espacial de STD nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Das definições estabelecidas pela Resolução nº 357/2005 do CONAMA, Art. 2º, especifica que: I) águas doces apresentam salinidade igual ou inferior a 0,5‰; II) águas salobras, salinidade superior a 0,5‰ e inferior a 30‰; III) águas salgadas, salinidade igual ou superior a 30‰. Com base nos valores de STD para classificação da salinidade na área de estudo, existem 2 classes de águas: doces e salobras.

Observou que 08 amostras (40%) são de águas doces: 7 são destinadas ao consumo humano contínuo e uma é usada para consumo em caso de urgência, por falta d'água ou extrema seca. Outras 12 amostras (60%) apresentam águas salobras, cujo teores de STD variando de 540 a 5469 mg/L, em que 5 (42%) são destinadas ao consumo humano e 7 (58%) são destinados a uso doméstico (lavar louça). Os poços que captam as águas salobras não fazem uso de dessalinizadores, por outro lado, os moradores relatam que o consumo dessas águas é feito apenas em casos de falta d'água ou seca.

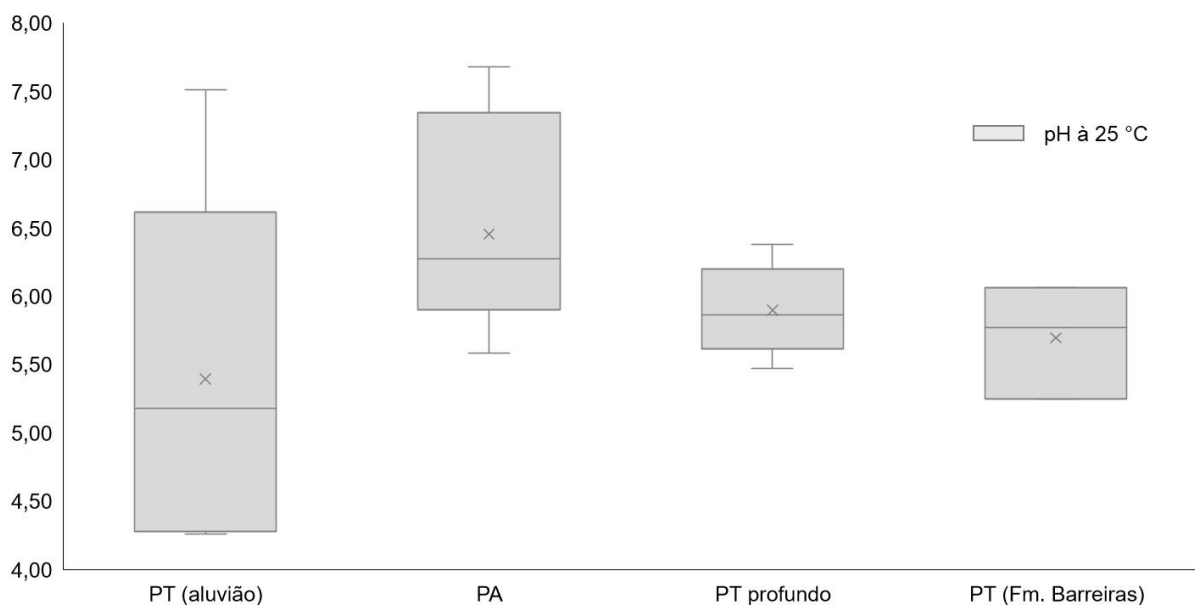
Valores elevados de STD podem estar associados aos processos de lixiviação de sais na camada superficial do solo, que são mais prevalentes em solos semiáridos, bem como ao tempo de residência das águas subterrâneas, o qual se

prolonga a interação água-rocha (TROUDI *et al.*, 2020). A salinização tem impacto direto nos principais parâmetros químicos que qualificam as águas subterrâneas da região do Baixo Jaguaribe (CARACAS, 2013). Existem trabalhos no município de Aracati, que abordam a hidroquímica das águas, os quais revelam o aumento da concentração de sais nas águas subterrâneas como em Santiago *et al.* (2008), Ferreira (2009), Barroso *et al.* (2010), Caracas (2013).

7.4 Potencial Hidrogeniônico (pH)

O pH das amostras de águas subterrâneas variou de 4,26 a 7,68 indicando um meio ácido a neutro, com destaque nas amostras ARA_10 (4,30) e ARA_25 (4,26). Entre os valores de pH obtidos *in situ* e os obtidos em laboratório apenas uma pequena diferença, demonstrando que as condições de armazenamento e transporte das amostras não apresentou problemas. As amostras mais ácidas estão concentradas em zonas de captação no aluvião (Gráfico 7).

Gráfico 7 – Valores de pH e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

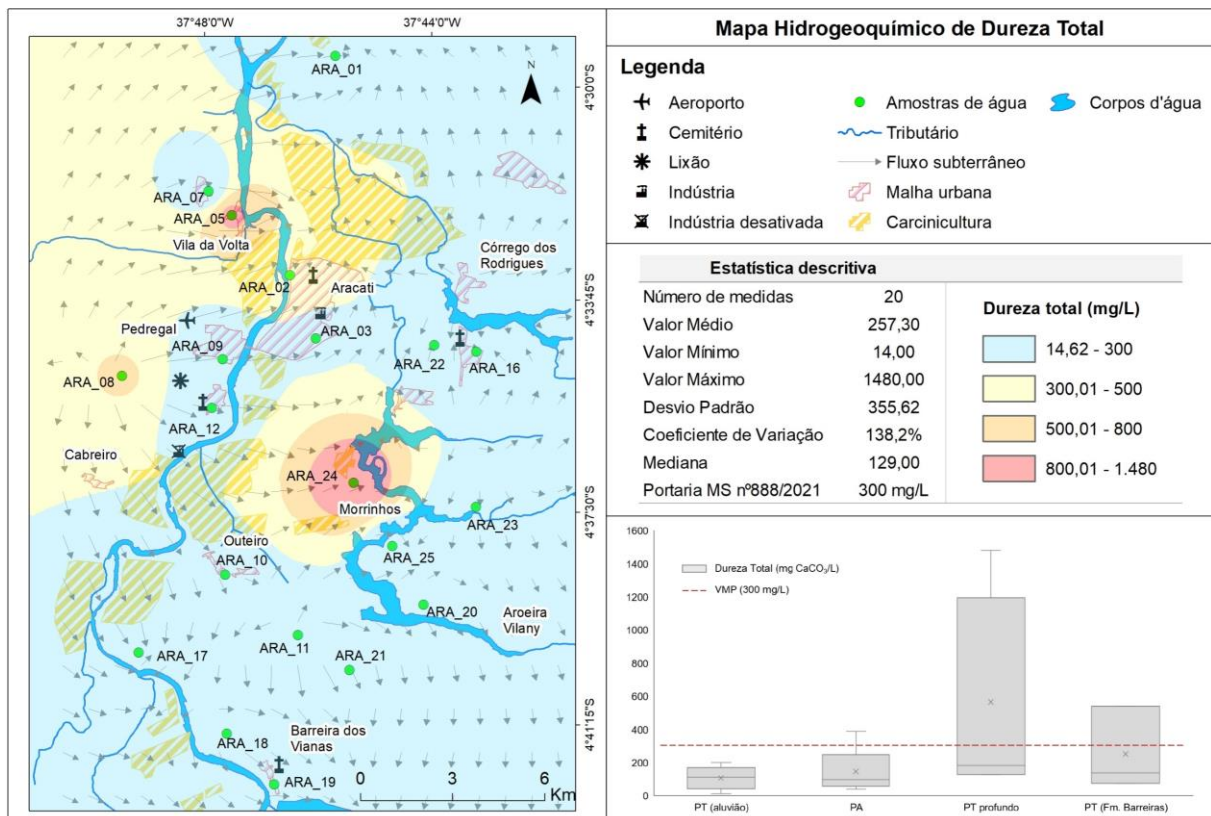
As águas subterrâneas da região já apresentavam caráter levemente ácido conforme abordado por Caracas (2013), Ferreira (2009), Freitas *et al.* (2013), Santiago *et al.* (2008). A Portaria nº 888/2021 MS vigente para água de consumo humano

removeu a faixa de recomendação para o valor de pH, que era de 6,0 a 9,5, contudo, ressalta-se que as águas mais ácidas tendem a corroer ou dissolver metais e outras substâncias, como o ferro e o alumínio, e quando ingeridas continuamente podem causar problemas na saúde, como gastrite e câncer gástrico. Por outro lado, o pH altamente alcalino causa incrustações nas tubulações de água e reduz a eficácia da desinfecção do cloro, exigindo o uso de mais cloro. Por causa do pH alto, a água tem um sabor amargo (GOMES, 2013; USGS, 2018).

7.5 Dureza Total

As concentrações de dureza total têm valores entre 14 e 1.480 mg/L, com mediana de 129,0 mg/L, e 4 estão acima do VMP (300 mg/L) permitido pela Portaria MS nº 888/2021, cujo maior valor está presente na amostra ARA_24 (1.480 mg/L). O mapa de distribuição dos valores de dureza nas amostras revela um comportamento pontual em três áreas representadas pelas amostras ARA_05, ARA_08 e ARA_24. No mais, os poços tubulares profundos da área captam águas mais duras (Figura 19).

Figura 19 – Distribuição espacial de dureza total nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Segundo Custodio e Llamas (2001) é possível classificar a água com base nos valores de dureza. As águas subterrâneas analisadas variaram de brandas a muito duras, sendo mais da metade dura e muito dura (Tabela 18).

Tabela 18 - Classificação da dureza das águas subterrâneas da área.

Tipo	Intervalo	Número de amostras	Frequência relativa (%)
Branda	< 50	2	10
Pouco dura	50 – 100	5	25
Dura	100 – 200	8	40
Muito dura	> 200	5	25
Total		20	100

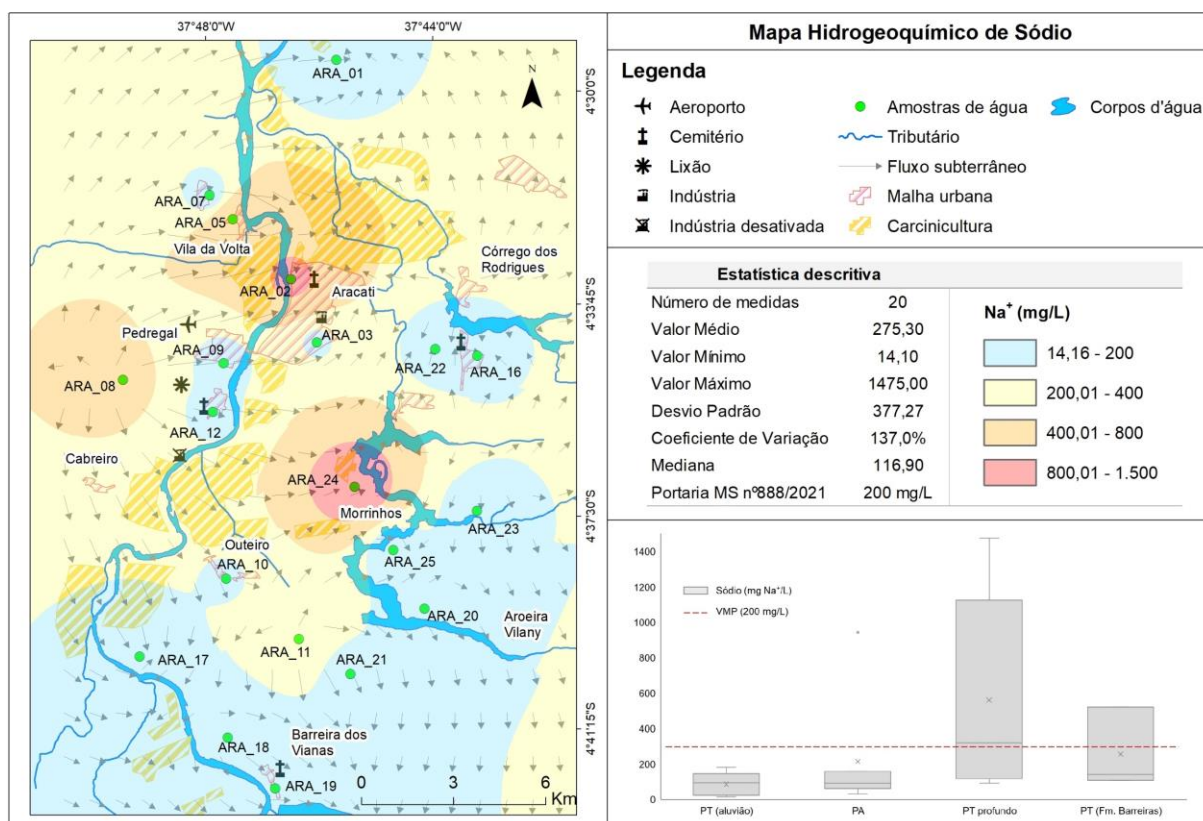
Fonte: Custodio & Llamas (2001), com adaptações.

A dureza é a propriedade que indica a concentração de íons alcalino-terrosos em água causada principalmente por compostos de carbonato e bicarbonato de cálcio e magnésio (SENGUPTA, 2013). Embora as amostras apresentem valores acima do VMP (300 mg/L) estabelecido pela Portaria MS nº 888/2021, a objeção ao uso humano é devido ao sabor, que pode eventualmente ser considerado uma característica desagradável de águas extremamente duras, além de ser responsável por incrustações em tubulações (GOMES *et al.*, 2010).

7.6 Sódio

Os valores de sódio variam de 14,10 a 1.475 mg/L, e mediana de 116,90 mg/L, em que 5 (25%) amostras (ARA_02, ARA_05, ARA_08, ARA_11, ARA_24) estão acima do VMP (200 mg/L) estabelecido pela Portaria MS nº 888/2021. A distribuição espacial dos maiores valores de sódio está concentrada no centro da área de estudo. As concentrações de sódio mais elevadas foram observadas em amostras coletadas de poços profundos (Figura 20).

Figura 20 – Distribuição espacial de sódio nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O sódio é proveniente da lixiviação de depósitos salinos e decomposição de minerais. Além disso, é tipicamente associado ao cloreto, sendo o principal responsável pelo aumento constante da salinidade das águas naturais das áreas costeiras do ponto de vista catiônico (ALMEIDA; SILVA JUNIOR, 2007; USGS, 2018). Ele é um componente essencial para a saúde humana, e quando consumido em níveis elevados e por longos períodos pode causar problemas de saúde. Além disso, concentrações superiores a 200 mg/L prejudicam o paladar, tornando-o desagradável ao consumir (WHO, 2017, p. 541).

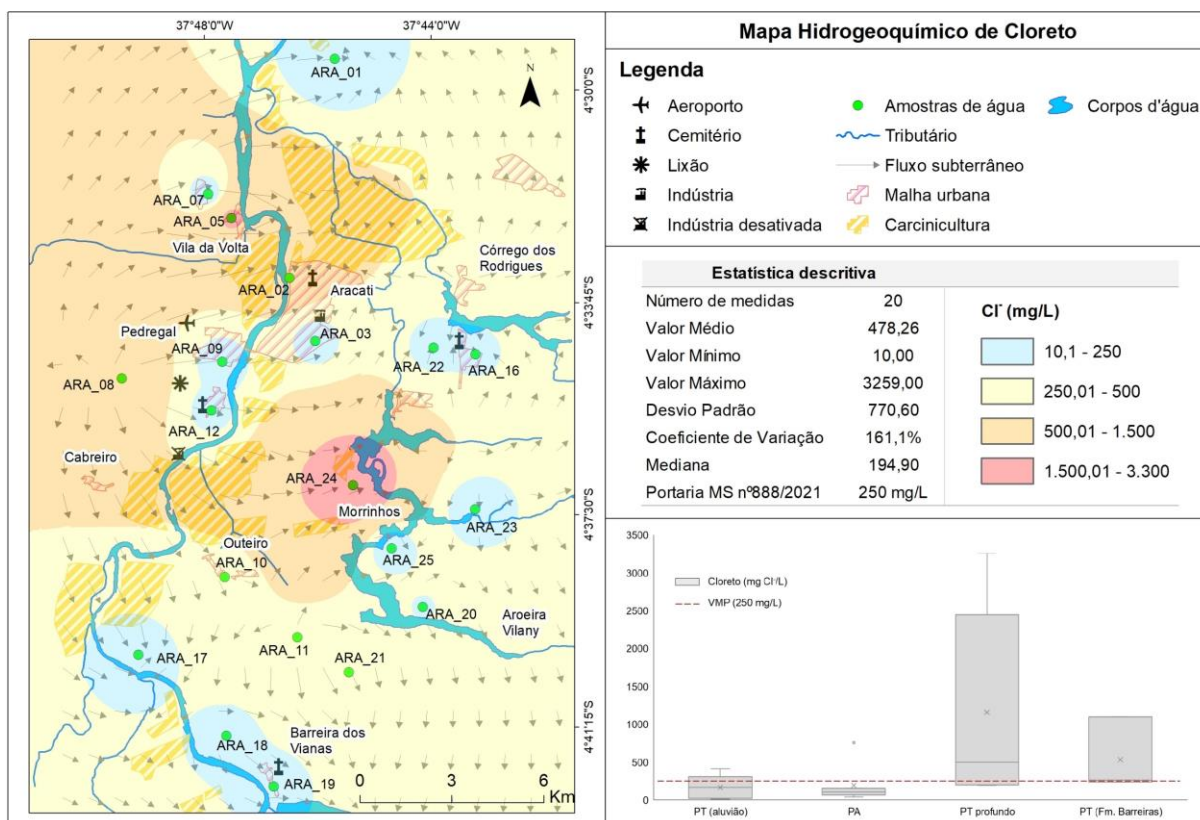
7.7 Cloreto

Com relação ao cloreto, os valores variam entre 10 e 3.259 mg/L, e mediana de 194,90 mg/L, em que 7 (35%) amostras (ARA_02, ARA_05, ARA_08, ARA_10, ARA_11, ARA_21 e ARA_24) estão fora do VMP da Portaria MS nº 888/2021. A distribuição de valores de cloreto que se enquadram no padrão estabelecido pela

legislação ocorre de forma pontual e os maiores valores estão distribuídos em quase toda extensão da área, e predominam em poços profundos (Figura 21), com o maior valor na amostra ARA_24.

Nota-se pelo fluxo das águas subterrâneas que as amostras ARA_02, ARA_10, ARA_11, ARA_21 e ARA_24, cuja concentração de cloreto está muito acima do VPM, recebem águas já com interferência de águas salinizadas, principalmente do rio Jaguaribe, pois, como visto, os valores de STD ultrapassam os 36.000 mg/L. Além disso, foi visto que a salinização do rio teve início pela construção da barragem em Itaíba e está sendo intensificada com os efluentes dos reservatórios de carcinicultura.

Figura 21 – Distribuição espacial de cloreto nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

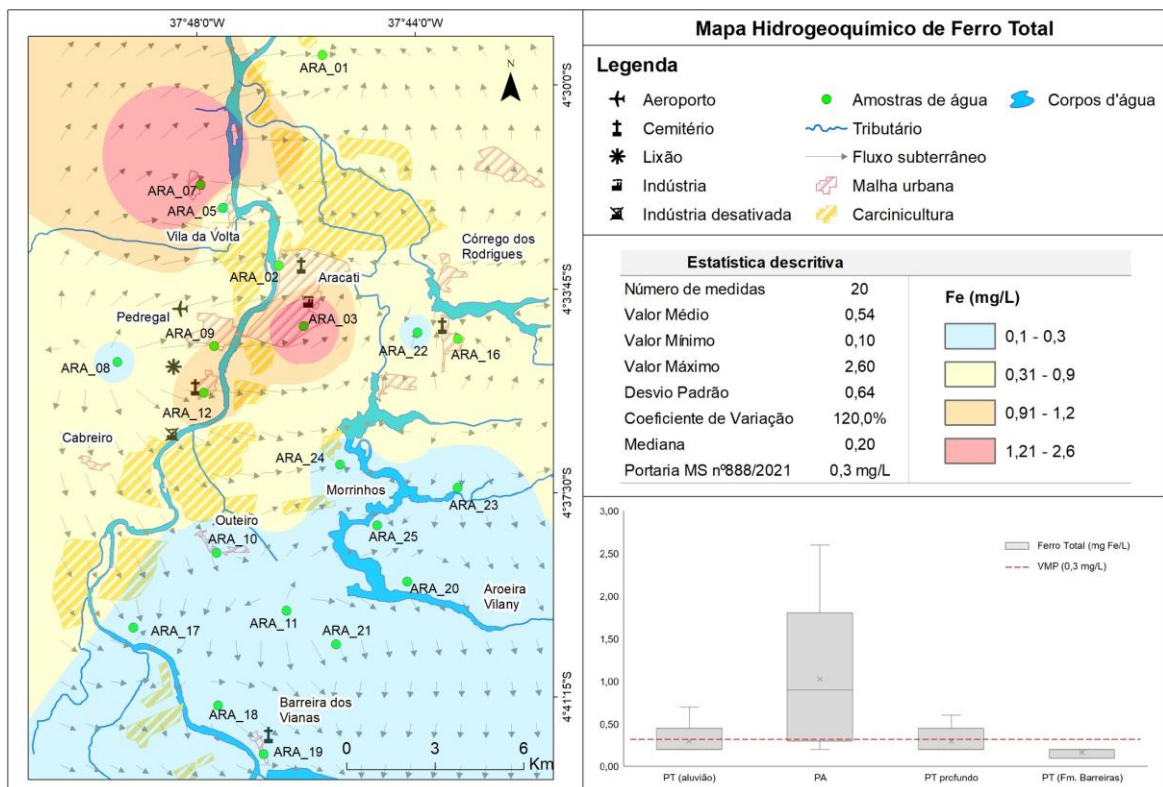
O cloreto é muito persistente na água e, assim, suas concentrações tendem a aumentar em baixos cursos de bacias hidrográficas, sobretudo, quando associados a ambientes costeiros (HEM, 1959). As principais fontes de cloreto em aquíferos costeiros incluem a intrusão de água do mar ou por dissolução de halita (NaCl), depósitos evaporíticos, água antiga do mar presa em sedimentos e fontes

antropogênicas, como uso de haletos, esgoto industrial e fertilizantes químicos. Quando em excesso, a água apresenta sabor e pode ter efeito laxativo (FUNASA, 2013, p. 150; HEM, 1990; USGS, 2018). Pode-se dizer que existe uma forte atuação da intrusão salina devido a infiltração de águas dos tanques de carcinicultura nas águas subterrâneas de Aracati, principalmente por estar presente em poços profundos.

7.8 Ferro Total

Para os resultados de ferro total, a concentração varia de 0,10 a 2,60 mg/L, e mediana de 0,20 mg/L, em que o maior valor se encontra na amostra ARA_7. Foi observado que 09 amostras (45%) (ARA_01, ARA_02, ARA_03, ARA_07, ARA_09, ARA_12, ARA_16, ARA_17 e ARA_18) estão acima do permitido pela Portaria MS nº 888/2021. A partir do mapa de distribuição espacial do ferro é possível observar que os teores mais elevados estão situados no centro-norte da área, com maior valor identificado na amostra ARA_07. É possível observar que os teores mais elevados estão em amostras coletadas de poços amazonas (Figura 22).

Figura 22 – Distribuição espacial de ferro total nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

As águas subterrâneas podem conter naturalmente elevados teores de metais como ferro através da dissolução dos materiais geológicos que incluem sedimentos e rochas, ou da mineração, resíduos industriais e metais corrosivos. A presença de ferro na água dá um gosto amargo (USGS, 2018).

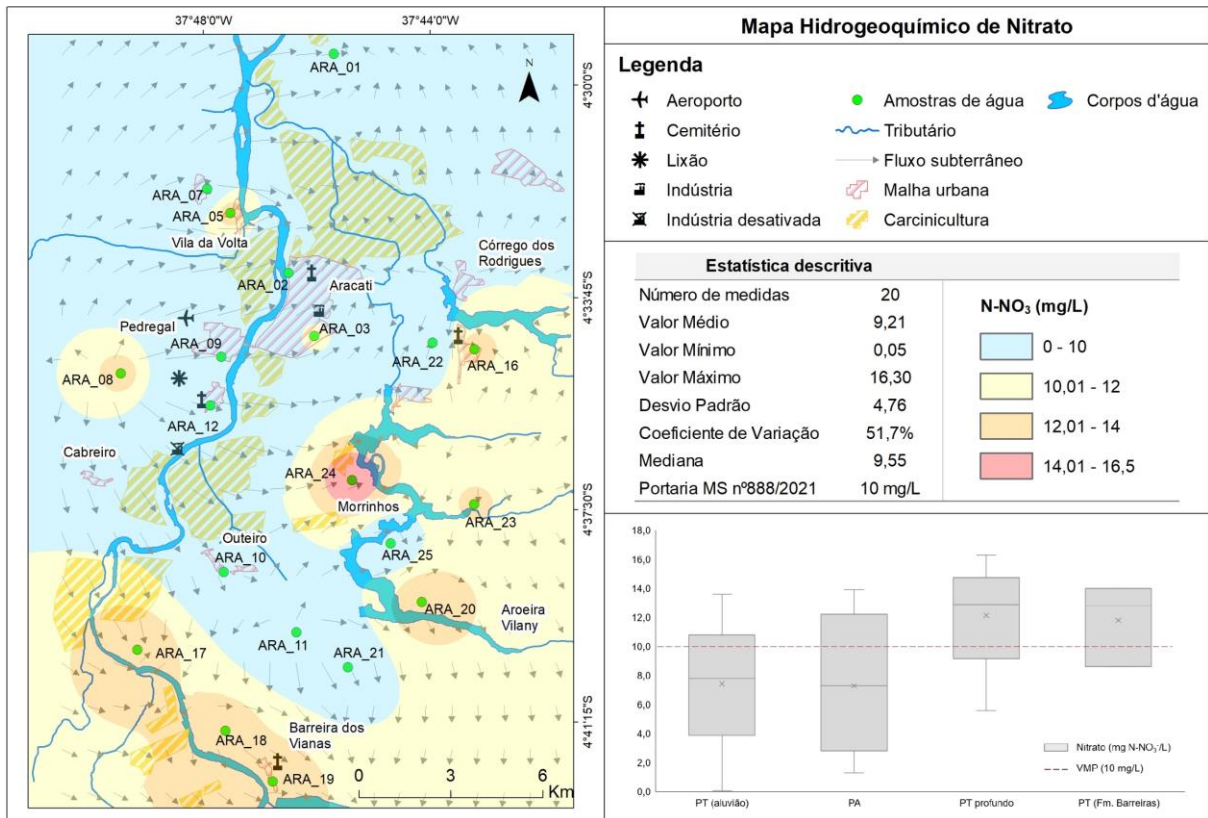
Caracas (2013) constatou que as águas de 02 poços de Aracati apresentavam ferro e as associa a proximidade às fazendas de carcinicultura, onde ocorreu grande mobilização de solos para formação de tanques e que pode estar promovendo a remobilização do ferro e o tornando mais disponível nas águas subterrâneas. Bezerra (2009), ao estudar os sedimentos dos Tabuleiros Pré-Litorâneos do Estado do Ceará, identificou que os solos em Aracati apresentam principalmente alumínio e ferro.

A amostra ARA_09 é de um poço amazonas e embora seja próximo a potenciais fontes contaminantes, como o aeroporto e o lixão, também se encontra em uma região que apresentou baixo índice de vulnerabilidade (Apêndice E). Dentro dos resultados obtidos, a amostra ARA_09 teve concentrações dos elementos abaixo do VMP, com exceção do ferro. A ocorrência de lateritos na Formação Barreiras pode explicar a presença de ferro nas águas subterrâneas, uma vez que os lateritos possuem Fe na sua composição, conforme aponta Schellmann (1981, p. 2 apud SIQUEIRA *et al.*, 2014).

7.9 Nitrato

O teor de nitrogênio nitrato nas amostras está entre 0,05 e 16,30 mg/L, e mediana de 9,55 mg/L, a qual mostra que metade das amostras apresentam valores acima de 10 mg/L sendo considerado impróprio para o consumo humano segundo a Portaria MS nº 888/2021. Os valores espacializados de nitrato revelam a predominância na área mais próxima as lagoas e ao sul da área de estudo, com presença pontual na porção ocidental do Rio Jaguaribe. Observou-se que 4 amostras das 5 de poços profundos apresentam nitrato acima do permitido (Figura 23).

Figura 23 – Distribuição espacial de nitrato nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

Percebe-se que a concentração de nitrato está alta em localidades mais afastadas da sede municipal, onde existe grande carência em saneamento básico. Em visita a essas localidades, constatou-se que existem poços com condições precárias que incluem boca do poço aberta, canos quebrados, bomba e caixa d'água sem manutenção, entre outros. Os moradores reclamam sobre a manutenção dos poços, que se reflete na qualidade da água.

A Portaria MS nº 888/2021, no Art. 39, estabelece que a soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs (1 mg/L e 10 mg/L), não deve exceder 1, conforme a equação 2.

$$\frac{[N-NO_3]}{(VMP\ N-NO_3)} + \frac{[N-NO_2]}{(VMP\ N-NO_2)} \leq 1 \quad (2)$$

Essa condição torna imprópria as águas, cujas concentrações individuais em nitrato e nitrito estiverem abaixo de seus VMPs, mas a soma exceder 1. Efetuando-

se o referido cálculo, observa-se que a soma excede a uma unidade apenas nas amostras com teor de nitrato igual ou superior a 10 mg/L visto que as concentrações em nitrito são insignificantes, ou seja, não oferecem risco a saúde (Tabela 19).

Tabela 19 – A soma das razões das concentrações de nitrito e nitrato e seus respectivos VMPs nas águas subterrâneas.

Amostra	N-NO ₃ (mg/L)	N-NO ₂ (mg/L)	$([N-NO_3] / 10 + [N-NO_2] / 1) \leq 1$
ARA_1	<0,1	<0,01	0,01
ARA_2	2,90	0,16	0,45
ARA_3	10,50	0,01	1,06
ARA_5	12,90	0,04	1,33
ARA_7	7,30	0,03	0,76
ARA_8	12,80	<0,01	1,29
ARA_9	1,30	0,01	0,14
ARA_10	7,70	<0,01	0,78
ARA_11	5,60	<0,01	0,57
ARA_12	2,80	0,02	0,30
ARA_16	12,70	0,01	1,28
ARA_17	13,90	0,17	1,56
ARA_18	13,20	0,11	1,43
ARA_19	13,60	<0,01	1,37
ARA_20	14,00	<0,01	1,41
ARA_21	8,60	<0,01	0,87
ARA_22	8,00	<0,01	0,81
ARA_23	12,20	0,01	1,23
ARA_24	16,30	<0,01	1,64
ARA_25	7,80	<0,01	0,79

Fonte: Elaborado pela autora (2022).

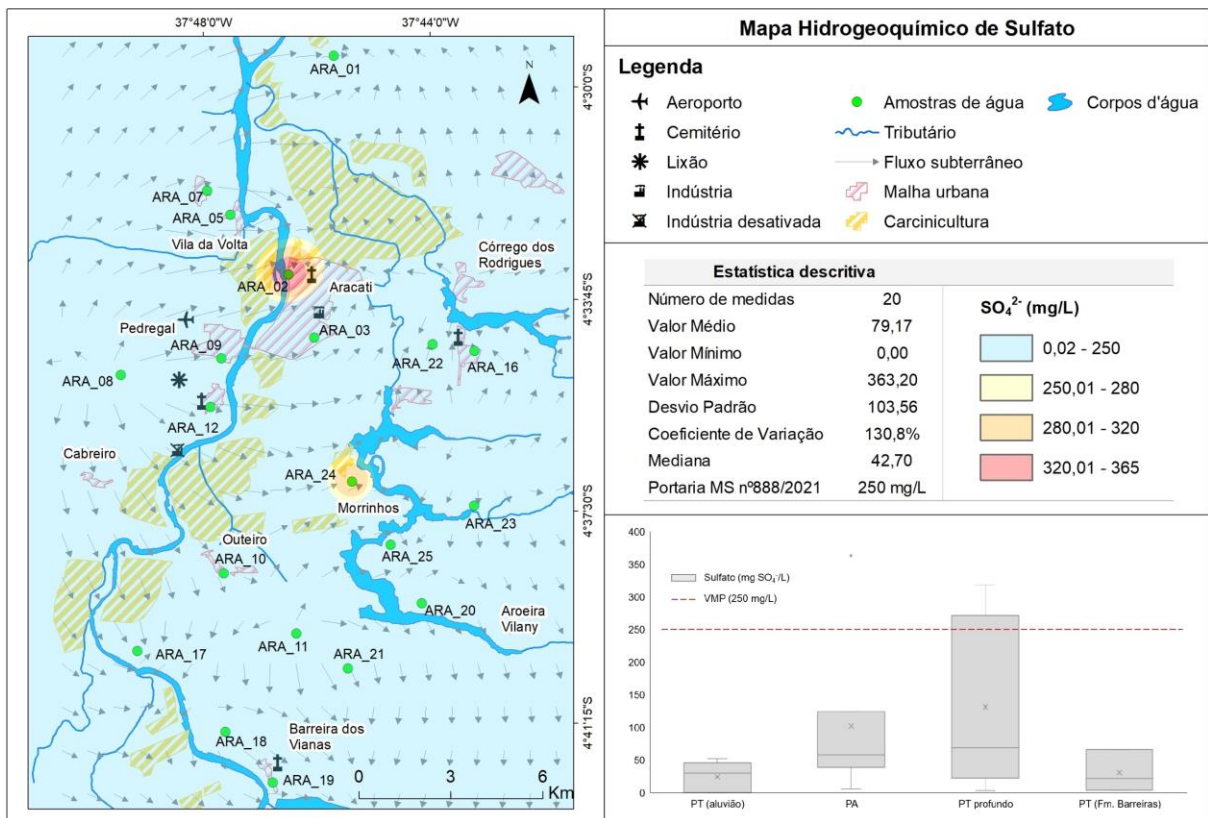
Os nitratos são altamente solúveis em água e altamente móveis no solo. Além disso, os teores de nitrato da água subterrânea são tipicamente inferiores a 6 mg/L. O íon nitrato é utilizado como indicador de contaminação, principalmente causada por atividades humanas. As fontes de contaminação por nitratos nas águas

subterrâneas incluem atividades agrícolas, saneamento *in situ* e descarte de efluentes domésticos. A contaminação do aquífero ocorre com a penetração direta da água superficial ou infiltração de água poluída devido à proteção inadequada de aquíferos vulneráveis contra efluentes (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128; MONTEIRO, 2003).

7.10 Sulfato

Os teores de sulfato nas amostras de água subterrânea variam de 2,50 a 363,20 mg/L e mediana de 42,70 mg/L. A concentração estava dentro dos limites permitidos pela Portaria MS nº 888/2021, exceto duas amostras ARA_02, cujo teor foi 363,2 mg/L e ARA_24 com 318,6 mg/L. As amostras coletadas em poços profundos apresentam maiores valores de sulfato (Figura 24).

Figura 24 - Distribuição espacial de sulfato nas águas subterrâneas.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

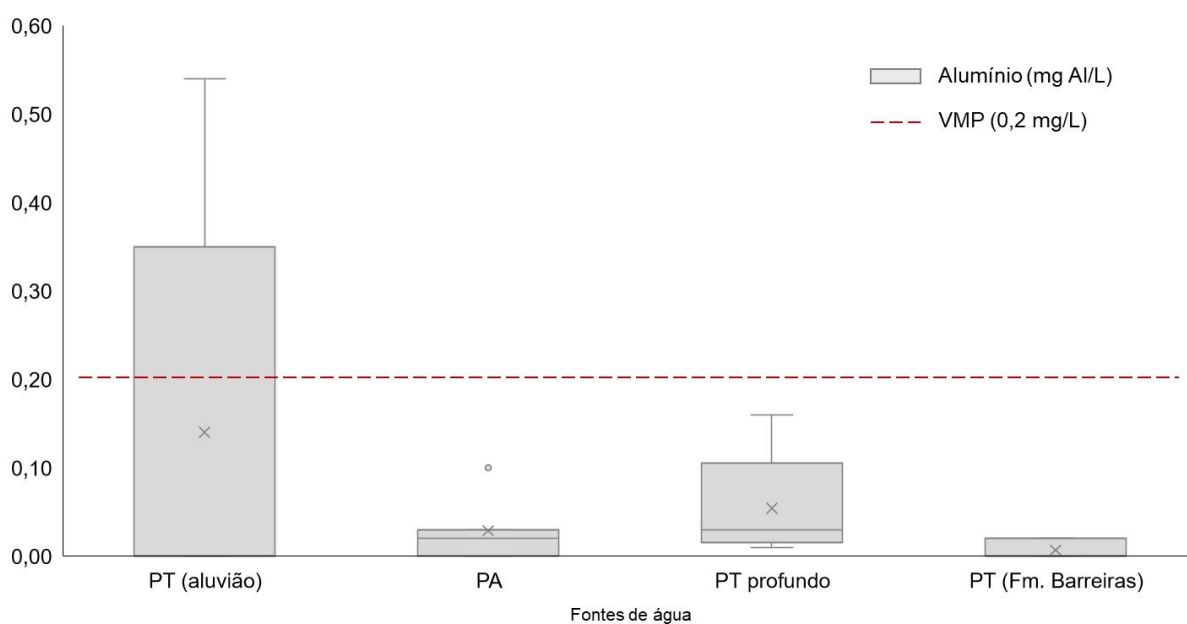
As águas subterrâneas, em geral, apresentam teores de sulfatos inferiores a 100 mg/L, principalmente na forma de SO₄²⁻ e HSO₄⁻. Das amostras analisadas, 16 (80%) destas apresentam concentrações inferiores a 100 mg/L. Percebe-se que a alta

concentração de sulfato ocorre de maneira pontual na área, em que excede ao VMP (250 mg/L) em duas amostras, ARA_02 e ARA_24. Estudos revelam que a maioria das águas subterrâneas ricas em sulfato é causada por processos de poluição humana, como fertilizantes, mineração, poeira de gesso, esgoto doméstico e efluentes industriais (MATTOS, 2020; VASCONCELOS; OLIVEIRA, 2017). Na presença dos íons de magnésio e sódio, o excesso de sulfato nas águas subterrâneas (>400 mg/L) pode causar efeitos laxativos e distúrbios gastrointestinais. O sulfato também tem sido associado a um aumento na salinidade do solo (SANTOS, 2008).

7.11 Alumínio

Os valores de alumínio nas amostras apresentaram-se dentro dos limites estabelecidos pela legislação (0,2 mg/L), exceto na amostra 25 que o valor foi de 0,54 mg/L. A ocorrência do alumínio em águas naturais é controlada pelo pH e por partículas minerais finamente suspensas. Foi observado que os pH mais ácidos estão presentes nas águas da aluvião, assim como os teores de alumínio (Gráfico 8).

Gráfico 8 – Concentração de Alumínio e as fontes de coleta das amostras em Aracati-CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

A amostra ARA_25 foi coletada de um poço tubular comunitário na localidade de Morrinhos, que abastece os distritos no município (ponto 36). Moradores de localidades circunvizinhas relataram que a água que ingerem vem dessa comunidade, pois a água captada apresenta boa qualidade. Existem carrocerias e caminhões pipa que se abastecem dessa água para distribuição das cidades vizinhas.

O aumento da concentração de alumínio está relacionado a maior acidez na água, pois a amostra ARA_25 apresentou pH de 4,26, esse valor está dentro do intervalo de solubilidade do alumínio (MASON, 1966). Próximo à área de captação do poço existe tanques de carcinicultura ativos e desativados, que podem estar contribuindo no aumento de alumínio na água. Essa contribuição pode está sendo favorecida pelo fluxo de águas subterrâneas que dá indícios de carreamento de substâncias provenientes dos reservatórios para a zona de captação em Morrinhos. Ressalta-se que, a localidade de Morrinhos apresenta mais de 10 poços fazendo a captação das águas subterrâneas, portanto, a superexploração das águas influencia no fluxo subterrâneo, e, conseqüentemente, acontece o carreamento de carga contaminante.

7.12 Fluoreto, Nitrito e Amônia

O fluoreto a legislação estabelece o VMP de 1,5 mg/L, e nenhuma amostra analisada ultrapassou esse valor máximo, com média de 0,08 mg/L e o maior valor foi encontrado na amostra ARA_02 com 0,30 mg/L.

A Portaria nº 888/2021 estabelece o VMP de 1,0 mg/L para nitrito, e não houve amostras com valores acima do máximo estabelecido. A média dos valores de nitrito nas amostras é de 0,03 mg/L, em que o valor máximo foi identificado na amostra ARA_17 com 0,17 mg/L. Além disso, em águas com maior salinidade a presença de íons de cloreto na água reduz ao risco toxicológico por nitrito (LEIRA *et al.*, 2017), portanto, essa afirmação explica as águas subterrâneas de Aracati apresentarem valores baixos para nitrito, pois são ricas em cloreto.

A legislação, ainda, estabelece o VMP para amônia é de 1,2 mg/L, e dentre as amostras analisadas, os valores de amônia estiveram muito abaixo do padrão para consumo humano, em que 17 (85%) amostras tem valores abaixo de 0,01 mg/L, e o maior valor foi identificado na amostra ARA_02 com 0,95 mg/L. A amônia é o produto

inicial da decomposição de resíduos orgânicos nitrogenados e a detecção dessa substância pode indicar presença desses resíduos. Nesse contexto, vale frisar que a concentração de amônia na amostra ARA_02 é relativamente elevada em relação as demais amostras, e juntamente com a presença de nitrito (0,16 mg/L), muito acima da média local (0,03 mg/L), indicam que a água subterrânea está recebendo carga poluidora recente, de fontes poluidoras próximas.

7.13 Parâmetros químicos sem VMP

Os íons de bicarbonato, carbonato, alcalinidade total, cálcio e magnésio, potássio, nitrogênio amoniacal e fosfato, não apresentam valores padrão estabelecidos pela Portaria MS nº 888/2021 (MS/GM, 2021). No entanto, foram realizadas análises desses parâmetros para estudo completo da qualidade das águas.

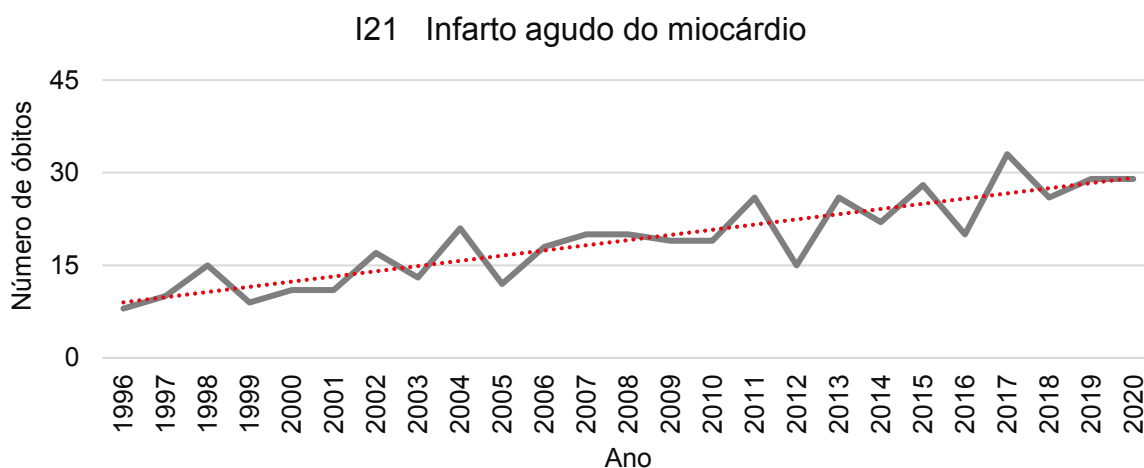
A concentração de bicarbonato varia de 0 a 695 mg/L, com média de 75,17 mg/L, enquanto o carbonato não está presente nas amostras. A acidez nas águas sugere a predominância dos íons HCO_3^- ao invés de CO_3^{2-} (CARACAS, 2013). A alcalinidade total tem valores entre 0 e 569,60 mg/L e média de 61,61 mg/L. O cálcio apresenta valores entre 2,40 e 128 mg/L e média de 28,44 mg/L. O teor de magnésio varia de 1,90 a 278,40 mg/L, com média de 44,69 mg/L. O potássio mostrou valores variando de 2,90 a 87,0 mg/L e média de 30,17 mg/L. A concentração de nitrogênio amoniacal foi detectada nas amostras ARA_01, ARA_2 e ARA_7 com valores de 0,31, 0,77 e 0,05 mg/L, respectivamente.

A concentração de fosfato reativo também foi detectada nas amostras ARA_01, ARA_2 e ARA_17 com valores de 0,02, 0,44 e 0,08 mg/L, respectivamente. Tomando como referência o VMP de fósforo total para as águas salobras de Classe 1 (0,124 mg/L P) pela Resolução CONAMA nº. 357/2005, e as concentrações encontradas em todas amostras, na maioria não detectada, observa-se que a concentração de 0,44 mg/L de fosfato reativo é anômala. Além disso, sabe-se que fósforo e nitrogênio são nutrientes presentes na ração, fertilizantes, esgotos domésticos etc. (FIGUEIRÊDO *et al.*, 2006).

7.14 Implicações na saúde humana

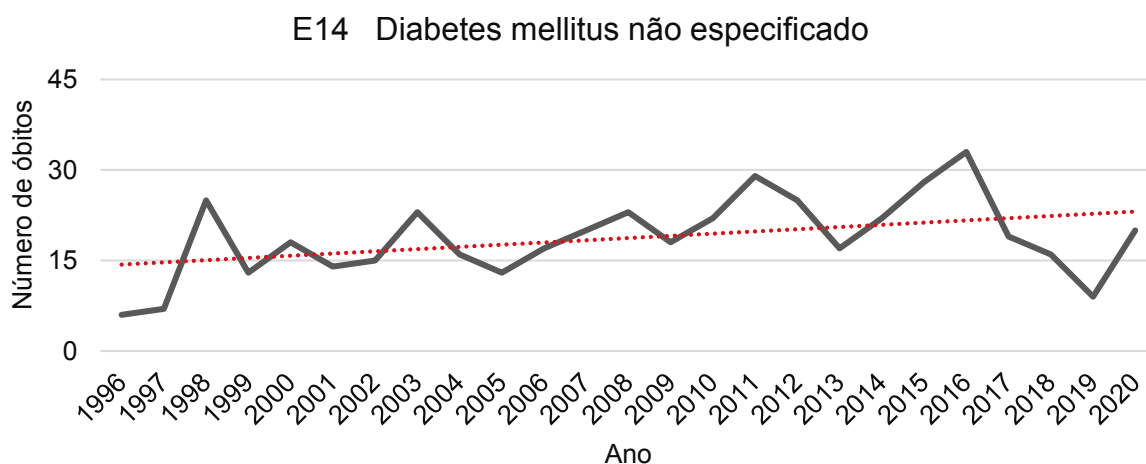
Aracati apresenta alto índice de mortalidade de doenças enquadradas na categoria CID-10 (MINISTÉRIO DA SAÚDE BRASIL, 2021) e pode-se observar o crescimento significativo ao longo dos anos de: I) Infarto (Gráfico 9); II) Diabetes (Gráfico 10); III) AVC (Gráfico 11); IV) hipertensão (Gráfico 12); V) insuficiência cardíaca (Gráfico 13); VI) neoplasia maligna brônquios e dos pulmões (Gráfico 14); VII) neoplasia maligna estômago (Gráfico 15); VIII) neoplasia maligna próstata (Gráfico 16); IX) neoplasia maligna mama (Gráfico 17);

Gráfico 9 – Número de óbitos por ano por Infarto agudo do miocárdio.



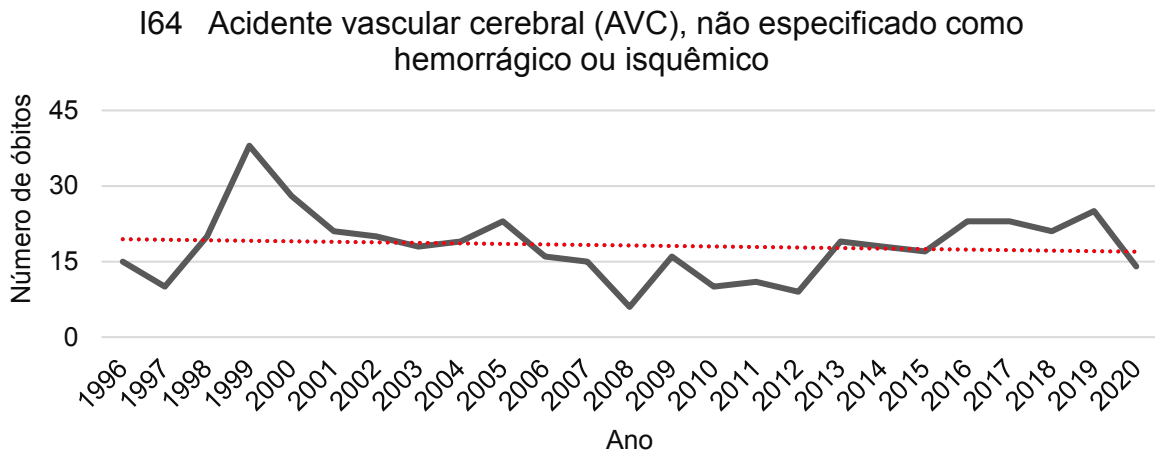
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Gráfico 10 - Número de óbitos por ano por Diabetes de tipo não especificado.



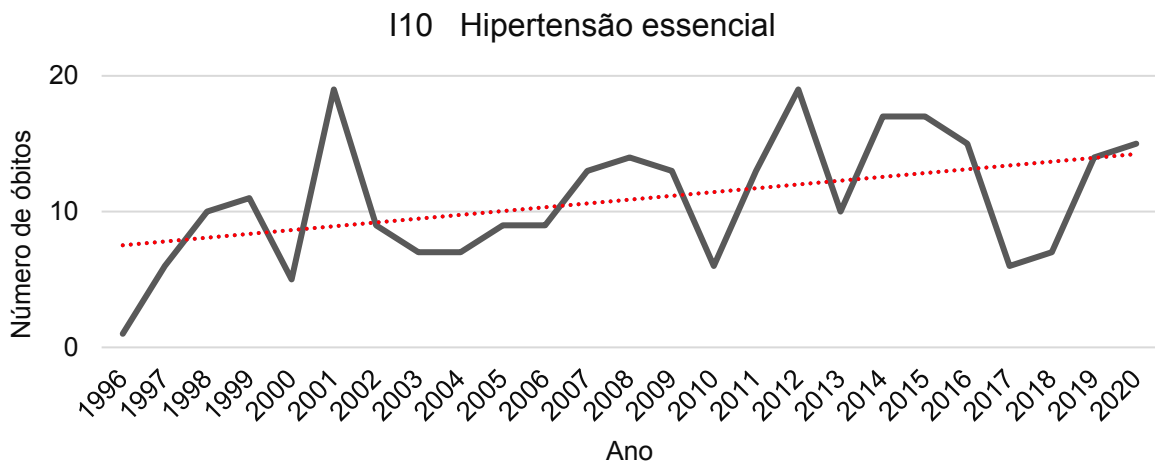
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Gráfico 11 - Número de óbitos por ano por AVC.



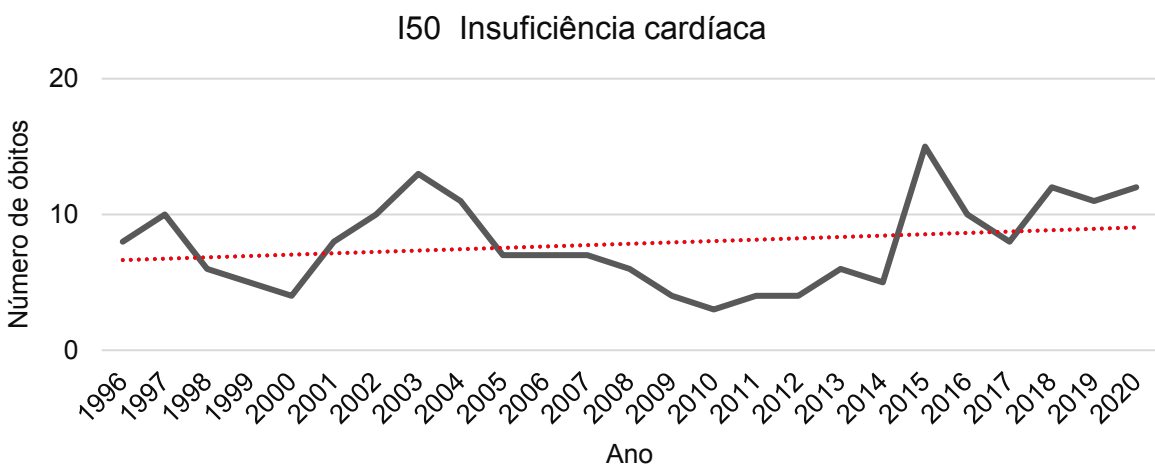
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Gráfico 12 - Número de óbitos por ano por Hipertensão essencial.



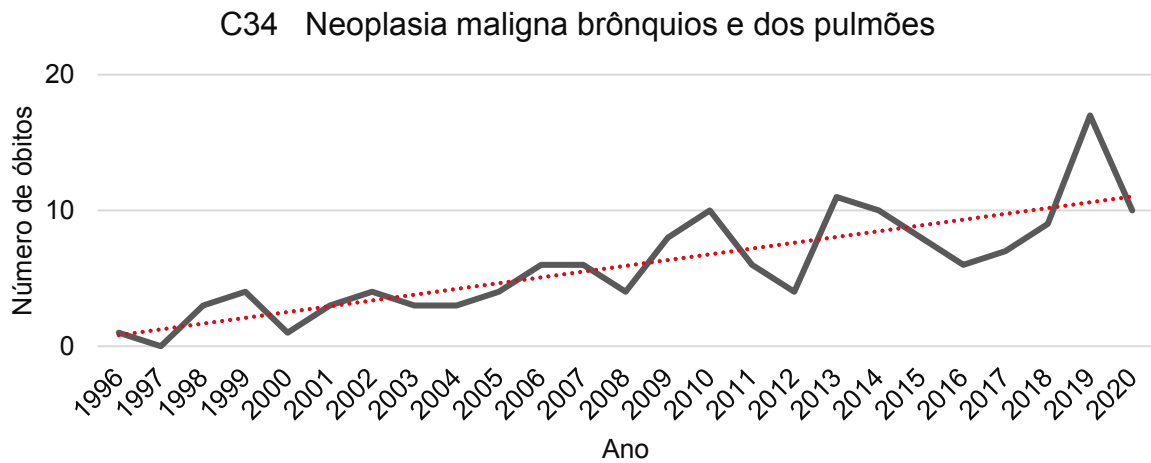
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Gráfico 13 - Número de óbitos por ano por Insuficiência cardíaca.



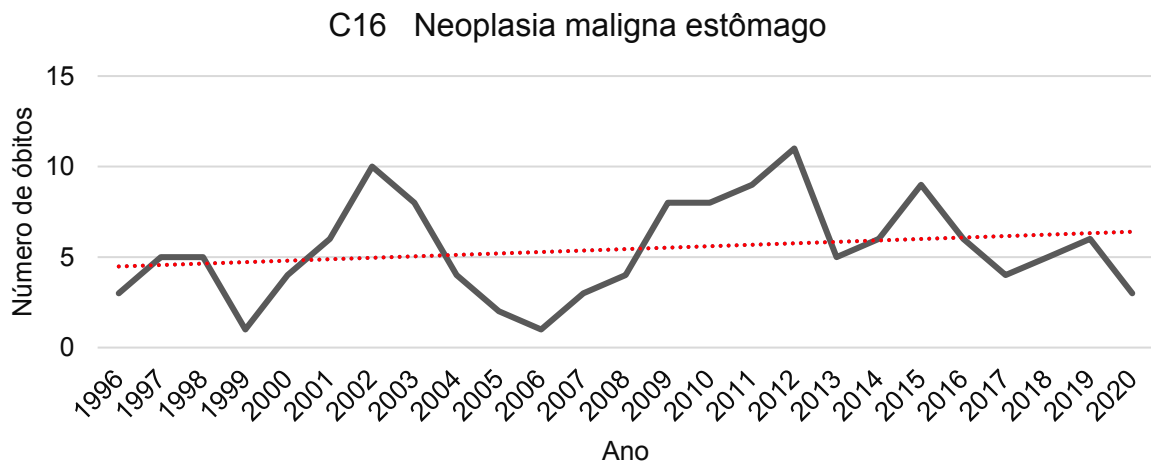
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Gráfico 14 - Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna brônquios e dos pulmões.



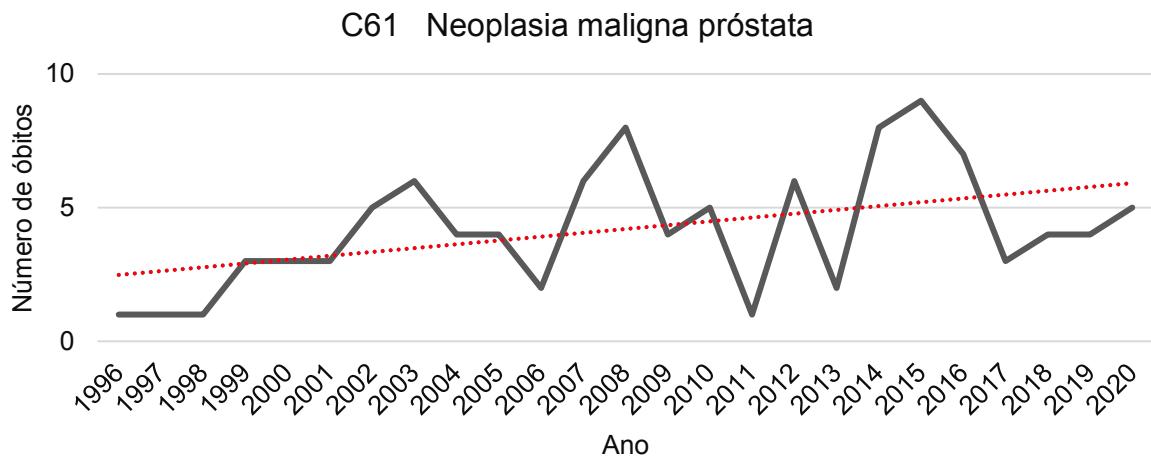
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021, com adaptações).

Gráfico 15 - Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna estômago.



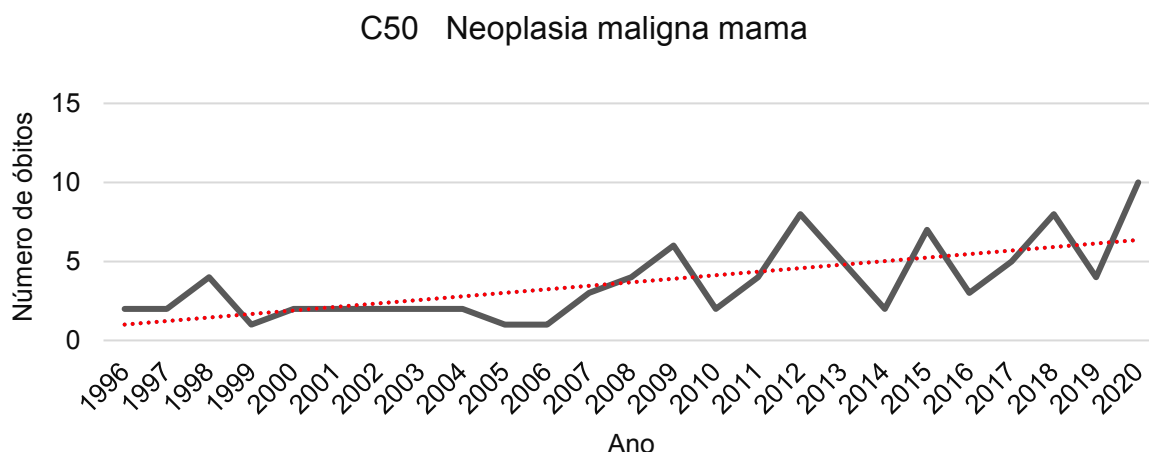
Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021, com adaptações).

Gráfico 16 - Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna próstata.



Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021, com adaptações).

Gráfico 17 - Número de óbitos por ano por Neoplasia maligna mama.



Fonte: Ministério da Saúde Brasil – DATASUS (2021), com adaptações.

Dentro do contexto da geologia médica, fundamentar as causas de doenças por veiculação hídrica na população exige um corpo técnico multidisciplinar, no entanto, fazer uma avaliação prévia e discutir em cima dos resultados da qualidade da água para o consumo humano é importante para identificar possíveis contaminações e as causas e incentivar outras novas pesquisas na região de estudo.

Dentro dos resultados de qualidade da água, todas as amostras estão comprometidas, pois apresentam pelo menos um elemento fora do padrão estabelecido para consumo de água. Além disso, observa-se que existem 03 amostras (ARA_02; ARA_08 e ARA_24) que estão comprometidas em pelo menos 07 parâmetros analisados.

A primeira (ARA_02) corresponde ao poço amazonas do tipo cacimbão (ponto 14) que atende a família, uso particular. Os moradores relatam que a água é salobra, e por isso a usam apenas para afazeres domésticos; no entanto, em situações de extrema necessidade fazem uso da água para consumo. Por estar situado dentro da cidade, possivelmente recebe água com carga contaminante dos tanques de carcinicultura, conforme mostra o fluxo das águas nos mapas hidrogeoquímicos, assim, eleva as concentrações dos íons na água.

A amostra ARA_08 é de um poço comunitário que capta água do aquífero Barreiras, comumente utilizado para uso doméstico (ponto 49). Os residentes também relatam sobre a água ser salobra e por isso utilizam a água da cisterna para consumo e para cozinhar. Contudo, outros moradores na localidade fazem o uso da água do poço para consumo humano, principalmente em períodos de escassez. Já a amostra

ARA_24, que corresponde a um poço comunitário (ponto 34) na entrada de Morrinhos, os moradores locais ressaltam que, embora a água na área costumasse ser doce, agora essa tende a ser mais salobra à medida que se aproxima do rio.

Notou-se que há carência de monitoramento e cuidados dos poços comunitários, bem como obras de saneamento básico em cidades mais afastadas da cidade sede. Essa situação pode provocar contaminação da água devido à presença de fossa sépticas, falta de manutenção dos poços e boca do poço desprotegida, e conseqüentemente, contribui para o aumento do teor de nitrato nas águas subterrâneas conforme foi observado nas amostras ARA_08 (12,8 mg/L) e ARA_24 (16,30 mg/L).

No que diz respeito aos riscos na saúde humana, as seguintes observações foram identificadas:

a) Existem áreas com captação de águas salobras destinadas ao consumo, e a ingestão. Excesso de sal pode causar diarreia, vômitos e comprometimento da função hepática. Além disso, a alta salinidade é seguida por um aumento nas concentrações de vários contaminantes inorgânicos (JABED; PAUL; NATH, 2018; ZABALA; MANZANO; VIVES, 2016);

b) Hipertensão e/ou pressão alta também são conseqüências da ingestão em excesso de sal e pode levar riscos maiores de derrame/AVC, infarto e insuficiência cardíaca (RASHEED *et al.*, 2016; SHAMMI *et al.*, 2019). No município, pode-se observar que infarto (Gráfico 9), hipertensão (Gráfico 12) e insuficiência cardíaca (Gráfico 13) vem crescendo a partir de 2017 e apresenta uma tendência a aumentar significativamente ao longo dos anos.

c) O nitrato no corpo humano causa deficiência de oxigênio que leva a danos neurológicos permanentes e dificuldade para respirar (metemoglobinemia ou síndrome do bebê azul) e, em casos mais graves, morte por asfixia. Estudos recentes mostraram associações entre nitrato na água potável e/ou em fontes alimentares e o desenvolvimento de tireoide e diabetes Tipo 1 (ATSDR, 2017). Embora não haja registros de óbitos por metemoglobinemia, existem muitos casos por diabetes no município, conforme apontando no Gráfico 10;

- d) Na presença dos íons de magnésio e sódio, o excesso de sulfato nas águas subterrâneas (> 400 mg/L) pode causar efeitos laxativos e distúrbios gastrointestinais (SANTOS, 2008).
- e) As águas mais ácidas tendem a dissolver metais e outras substâncias na água, que incluem ferro e alumínio, e quando ingeridas continuamente podem causar problemas na saúde, doença cardiovascular, diabetes mellitus, distúrbios renais, hepáticos, respiratórios e neurológicos (GHOSH *et al.*, 2020).
- f) A amostra ARA_25 contém teor elevado de alumínio (0,5 mg/L), e por ser local de distribuição de água para as cidades vizinhas, requer maior atenção na qualidade da água. A ingestão de alumínio pela água pode provocar problemas esqueléticos e neurológicos, bem como o desenvolvimento da doença de Alzheimer (ATSDR, 2008).
- g) O ferro, como outros minerais, é um micronutriente ou oligoelemento necessário na dieta e nutrição dos organismos vivos. O acúmulo de ferro no organismo, por outro lado, pode causar danos nos tecidos, levando à hemocromatose, síndrome caracterizada por pigmentação da pele, lesão pancreática, cirrose hepática e alta taxa de carcinoma hepático (BARRETT *et al.*, 2014, p. 752);

8 FONTES POTENCIAIS DE CONTAMINAÇÃO

O capítulo aborda as principais fontes contaminantes identificadas na fase de reconhecimento de campo da área de estudo e os impactos das cargas contaminantes nas águas subterrâneas da região.

8.1 Fontes poluidoras identificadas na área de estudo

O estudo de água contaminada refere-se a níveis de poluentes que ultrapassam os Valores Máximos Permitidos (VMP) e estão fora dos padrões de potabilidade por apresentarem risco à saúde. A mudança na qualidade da água subterrânea é determinada de acordo com o ambiente no qual o aquífero está localizado. Naturalmente, as águas subterrâneas recebem menores taxas de contaminantes em relação as águas superficiais, mas intensas atividades antrópicas sobre esses mananciais contribuem na poluição de sistemas aquíferos (DÖLL *et al.*, 2012; MACHIWAL e JHA, 2015).

Fontes contaminantes comuns nas águas subterrâneas podem ter diversas origens e incluem resíduos domésticos e industriais, usos agrícolas, lixiviados de aterros sanitários, bem como construção inadequada de poços que permite a entrada de águas superficiais poluídas (FOSTER *et al.*, 2003, p. 128).

Durante a fase de reconhecimento de campo da área de estudo, foram descobertas as potenciais fontes poluidoras próximas às obras de captação de águas subterrâneas. Dependendo do tipo de atividade, o potencial de geração de carga contaminante varia significativamente. A figura 25 mostra um mosaico das principais fontes poluentes identificadas em campo.

Na cidade de Aracati existem potenciais fontes poluidoras como o aeroporto, o cemitério, a indústria, bem como o saneamento básico precário. Mais ao norte da cidade, existem áreas de cultivo agrícola próximas as margens do rio Jaguaribe. No conjunto Pedregal, existe o lixão da cidade, e saneamento básico precário e despejos inadequados de resíduos domésticos. Ao longo das margens do rio Jaguaribe existem tanques de carciniculturas, em que é possível observar a pluma de efluente sendo descartado para o rio, ocupando, inicialmente, toda a superfície e seguindo de forma persistente pela direita.

Figura 25 – Fotografia aérea obtida por drone em 28 e 29 de outubro de 2020 sobre as áreas com potenciais fontes poluentes identificadas em campo.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

O lixão é o local de disposição dos resíduos sólidos que são provenientes das cidades do município e continua em atividade com fácil acesso ao local. Foi

observado que todo o lixão é a céu aberto e os resíduos despejados são queimados. Além disso, existem pessoas com condições financeiras mais carentes que moram próximo ao local (Figura 26).

Figura 26 – Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 da disposição dos resíduos sólidos do município de Aracati – CE a céu aberto.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Com relação aos poços abandonados, foram constatados dois destes na área de estudo, correspondentes aos pontos 52 e 53. O ponto 52 está localizado dentro de uma fazenda de carcinicultura, cujo poço visitado está situado entre dois reservatórios. Este poço estava aberto e a profundidade da água era visível a 63 cm do topo da boca do poço. O aumento do nível da água é em decorrência da infiltração das águas dos tanques de carcinicultura no solo, e conseqüentemente, atinge às águas subterrâneas, pois nem todos os reservatórios apresentam um revestimento impermeável na base para impedir a troca de substâncias através da água. No ponto 53, foi observado um poço desativado, no entanto, os moradores da localidade de Cabreiro mencionaram sobre existências de outros poços abandonados e desativados devido a salinidade das águas subterrâneas.

Segundo Azevêdo (2017), revestir os viveiros com material impermeabilizante auxilia na retenção e desinfecção de sólidos, reduz a lixiviação de sulfato ácido, evita a transpiração e a intrusão de águas subterrâneas, impede a infiltração de água de cultivo contendo nutrientes, produtos químicos e fertilizantes e, como resultado, evitar a contaminação e salinização do solo e águas subterrâneas.

De acordo com observações de campo, há uma descaracterização da paisagem em áreas próximas às atividades de carcinicultura, nas quais é um dos principais contribuintes para a degradação ambiental no estuário do rio Jaguaribe, que tem um impacto quase imediato nos manguezais (Figura 27).

Figura 27 – Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 do desmatamento de manguezais no município de Aracati – CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Existem tributários do rio que são aproveitados como canais de carcinicultura e cujas margens apresentavam vegetação morta e camadas de solo esbranquiçadas em virtude das camadas de sal que se depositam. As atividades de carcinicultura despejam rejeitos ao longo do rio, que é perceptível pela coloração esverdeada na água (Figura 28).

Figura 28 – Fotografia aérea obtida por drone em 28/10/2020 da disposição de efluentes de uma fazenda de carcinicultura no município de Aracati – CE.



Fonte: Elaborado pela autora (2020).

Para evitar que os resíduos entrem nos rios e manguezais e se dissolvam na água que é retirada das lagoas, a Associação de Criadores de Camarão (ABCC) recomenda a construção de um sistema de canais e lagoas de decantação. No entanto, muitas fazendas, principalmente pequenos produtores, carecem de lagoas de decantação e, por motivos financeiros ou outros, despejam os resíduos diretamente nos rios sem tratamento. Tal prática é recorrente em muitas fazendas no município de Aracati (RODRIGUES, 2007). Nesse contexto, foi possível fazer a coleta do efluente lançado no rio Jaguaribe para fins de investigação e reconhecimento, cujo resultado está ilustrado na Tabela 20.

Tabela 20 – Resultado das análises da amostra do efluente e os padrões estabelecidos pela Resolução COEMA nº 9/2021.

Parâmetros	Amostra ARA_14	COEMA nº 9/2021
pH a 25 °C	8,04	5,0 - 9,0
Condutividade Elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}$)	62.210	≤ 3.000
Nitrato ($\text{mg N-NO}_3^-/\text{L}$)	0,2	≤ 10
Nitrito ($\text{mg N-NO}_2^-/\text{L}$)	< 0,01	≤ 1
Nitrogênio Amoniacal Total ($\text{mg N-NH}_{3,4}/\text{L}$)	0,09	≤ 20
Fosfato reativo ($\text{mg P-PO}_4^{3-}/\text{L}$)	0,13	-
Turbidez	184	-
Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)	41.143	-

Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Os parâmetros foram comparados aos dados de qualidade de água estabelecidos pela Resolução COEMA nº 9 de 05 de agosto de 2021. Nota-se que os parâmetros do efluente se encontram em conformidade com os exigidos pela legislação vigente, com exceção da condutividade que apresenta um teor acima de vinte vezes o valor permitido.

A atividade de carcinicultura gera impactos ambientais significativos na natureza, especialmente através dos efluentes gerados. Por esse motivo, é crucial considerar mecanismos viáveis para minimizar os impactos ambientais, planejando adequadamente a utilização dos recursos naturais e elaborando estratégias eficientes de desenvolvimento sustentável.

As bacias de sedimentação são um sistema de tratamento comumente utilizado na carcinicultura, que busca reduzir a quantidade de matéria orgânica e nutrientes presente nos efluentes. Além disso, a utilização de bacias de sedimentação

é uma opção considerada mais fácil e econômica para os produtores de camarão. Vale ressaltar, no entanto, que o uso desse sistema requer uma boa gestão e manutenção, a fim de garantir a eficácia do tratamento e evitar possíveis impactos ambientais negativos (JOVENTINO; MAYORGA, 2008).

8.2 Os impactos das fontes contaminantes nas águas subterrâneas

Existem poços cadastrados no SIAGAS que estão localizados no centro da área de estudo entre as cidades de Aracati, Outeiro e Morrinhos em que não foi possível fazer coleta de água. Em conversa com os moradores dessa região, esses poços estão desativados em função da alta salinidade nas águas subterrâneas. Desses poços existentes, foram visitados dois deles, que correspondem aos pontos 38 e 39. O poço do ponto 38 apresentou o nível d'água a 65 cm da boca do poço e possui profundidade de 35 m, enquanto no ponto 39, o poço de 60 m de profundidade apresentou o nível d'água a 1,75 m da boca do poço. Nota-se que o nível d'água em profundidades próximas a superfície ressalta a interação dos tanques de carcinicultura com as águas subterrâneas e, conseqüentemente, saliniza o aquífero. Além disso, devido a essa situação, os moradores reclamam de a limpeza das fossas sépticas ocorrem entre dois a cinco dias.

Na localidade de Cabreiro e nos arredores os moradores mencionam que os poços estão abandonados e desativados, como observado nos pontos 52, 53 e 54. Os trabalhadores da fazenda de carcinicultura (ponto 52) citaram que havia outros poços no local, no entanto todos estavam desativados. Os viveiros já romperam e inundaram as estradas, deixando uma camada de sal (Figura 29); além disso, as estruturas das casas foram corroídas pela maresia. Segundo relatos dos moradores, antes da construção dos viveiros, a água dos poços era doce, assim como da lagoa e do rio Jaguaribe, e bebiam a água do rio/lagoa durante as secas.

Figura 29 – Solo com camadas de sal e vegetação desmatada na comunidade de Cabreiro.

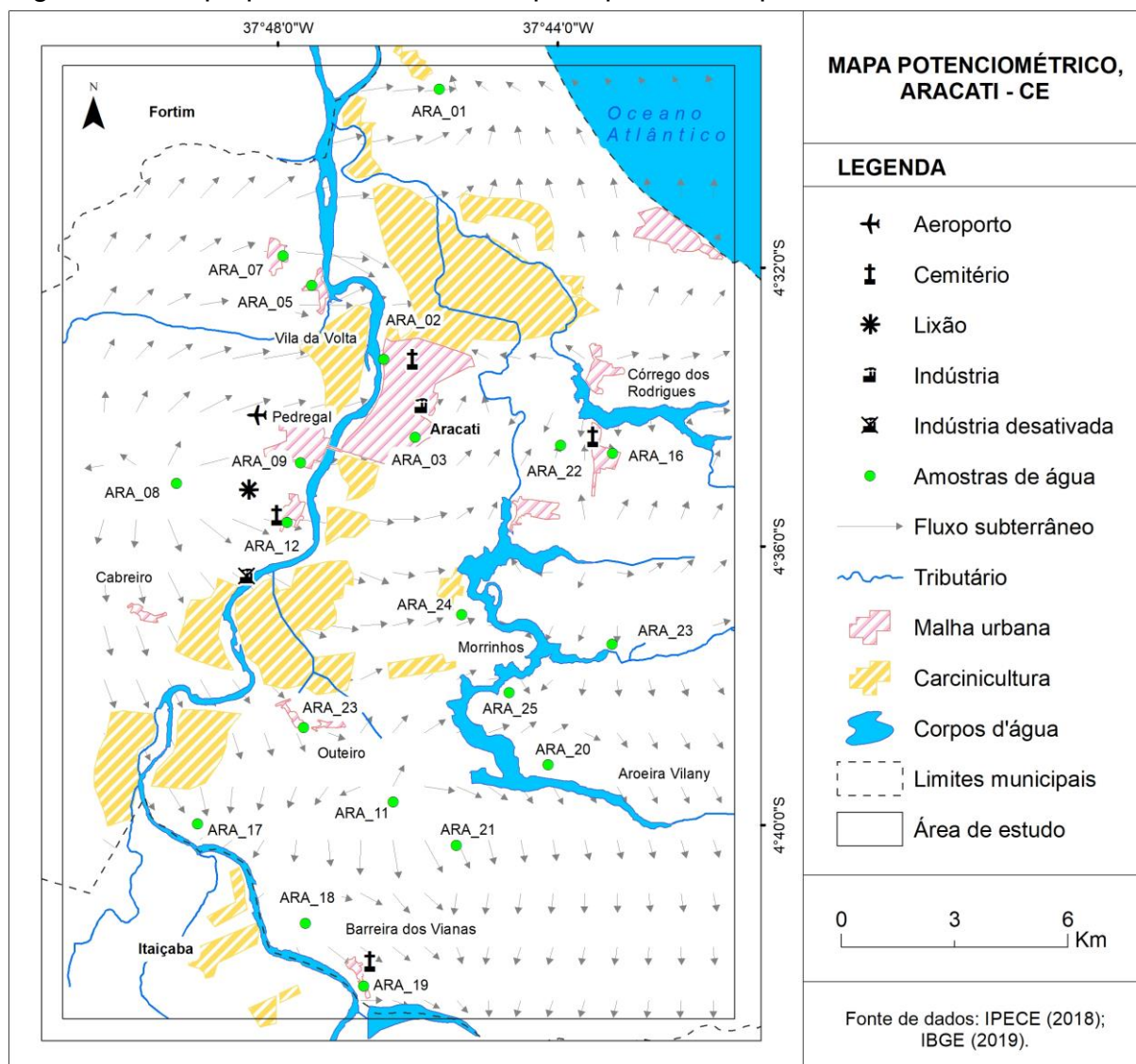


Fonte: Elaborado pela autora (2020).

A partir do mapa das potenciais fontes contaminantes (Figura 30) pode-se observar que, no geral, o fluxo das águas subterrâneas se desenvolve em duas frentes preferenciais de fluxo a partir do divisor de águas subterrâneas próximo ao Pedregal, que é representado por uma alta potenciometria no mapa: (1) direção sudoeste/nordeste até a foz do rio Jaguaribe; (2) direção noroeste/sudeste até Itaiçaba.

Percebe-se pelo fluxo das águas subterrâneas que aparentemente existe duas contribuições essenciais na salinização das águas: I) no entorno do rio Jaguaribe pode-se ter provável interação com as águas subterrâneas, e conforme visto no capítulo 5, o rio apresenta água salgada; II) a infiltração de águas dos tanques de carcinicultura nas águas subterrâneas, essa observação é mais evidente em regiões mais afastadas do rio e do mar.

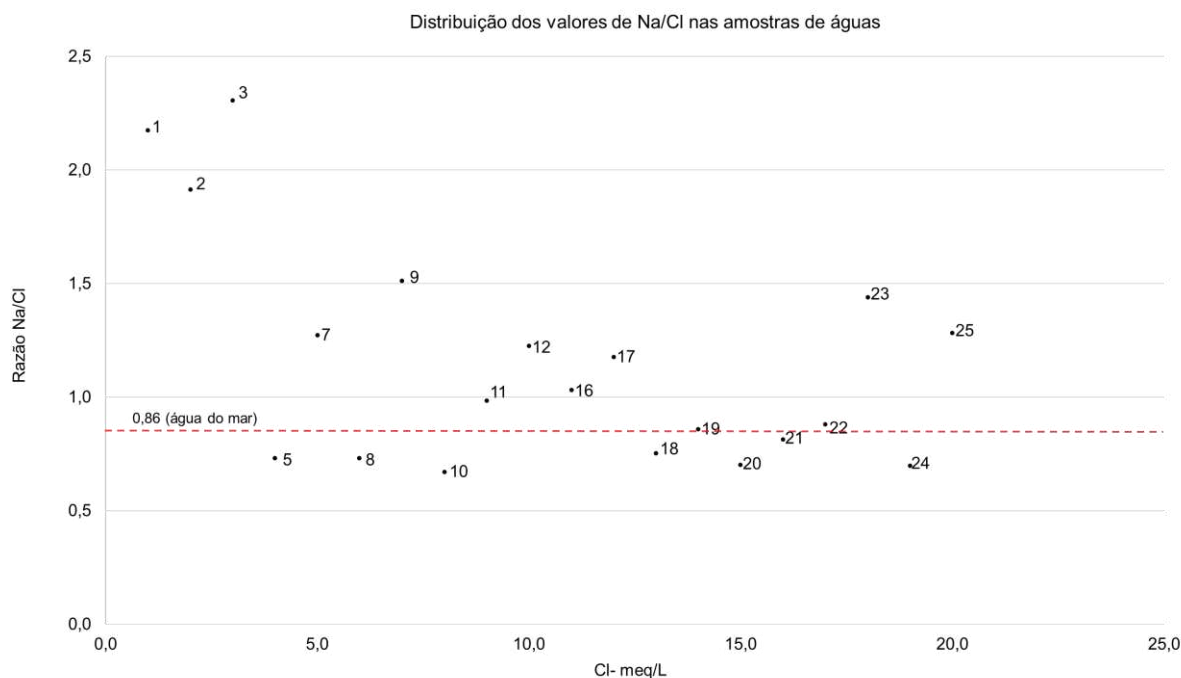
Figura 30 - Mapa potenciométrico e as principais fontes poluentes.



Fonte: Elaborada pela autora (2022).

Outra forma de visualizar a salinização das águas subterrâneas é através de gráficos de razão iônica de elementos. Esses gráficos são ferramentas amplamente utilizadas para identificar processos hidroquímicos essenciais em hidrologia subterrânea, como a salinização (HERCZEG; EDMUNDS, 2000). Dentro das informações disponíveis para esse estudo, utilizou-se a razão Na/Cl, que mostra as flutuações em função das concentrações de Cl, para identificar processos específicos responsáveis pelas variações de salinidade em sistemas aquíferos da área (Gráfico 18).

Gráfico 18 – Distribuição dos valores de Na/Cl das amostras de água subterrânea.



Fonte: Elaborado pela autora (2022).

O Gráfico de correlação 18, cujos eixos compartilham uma variável comum (cloreto) mostra as tendências esperadas na razão de concentração de Na^+/Cl^- versus Cl^- nas águas subterrâneas, a fim de deduzir um processo ou fonte específica de salinização. A água do mar tem uma proporção Na/Cl de 0,86, a salmoura e a água do mar antiga têm uma proporção inferior a 0,85 e a água doce rasa tem uma proporção próxima ou superior a 1.

Nove amostras de água subterrânea (5, 8, 10, 18, 19, 20, 21, 22 e 24) estão plotadas dentro do intervalo de proporção Na/Cl para água do mar e salmouras. Esse resultado mostra que existe provável influência de águas salinas dos tanques de carcinicultura nas águas subterrâneas na região, pois são águas com comportamento hidroquímico semelhante a água do mar.

As amostras 1 e 3 podem ter sua composição influenciada pelas fortes interações de água-rocha que aumentam os níveis de Na/Cl. As demais amostras estão dentro do intervalo de proporção Na/Cl para evapotranspiração e dissolução de halita (CHEN *et al.*, 2021; KEESARI; DAUJI, 2020).

9 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Esse capítulo aborda as conclusões com base na abordagem teórica, nos resultados alcançados por meio das análises e nas investigações realizadas na pesquisa, bem como as recomendações formuladas que poderão contribuir de forma significativa para o avanço e aprimoramento do tema estudado.

9.1 Conclusões

Foi possível realizar a caracterização dos mananciais superficiais e subterrâneos no município de Aracati a partir dos dados secundários, das observações de campo e do tratamento dos dados a fim de avaliar os impactos na saúde humana, além de fornecer base sólida para suporte às pesquisas multidisciplinares.

Os dados secundários permitiram a elaboração do mapa base com a informação do índice de vulnerabilidade natural do aquífero para cada poço cadastrado, que auxiliou na etapa de campo para selecionar as áreas prioritárias para coleta de água dos poços, bem como tornou-se uma ferramenta viável para investigação no âmbito da Geologia Médica.

Os longos períodos de seca que caracterizam o município de Aracati, interfere negativamente na recarga dos recursos hídricos e promove colapso no abastecimento de água e influencia na qualidade físico-química da água. O rio Jaguaribe, por exemplo, enquadra-se como água salina, cujo teor de salinidade está acima de 36‰ em virtude das marés e dos efluentes de carcinicultura, por isso não é um recurso usufruído para abastecimento doméstico e urbano, mas para as atividades econômicas como a carcinicultura e a pesca, bem como atividades de lazer. Portanto, faz-se necessária a implantação de poços estratégicos para reforçar a demanda do abastecimento e monitoramento da qualidade da água para consumo, pois o município apresenta um potencial para abastecimento urbano, em que até 85% da população pode ser abastecida com consumo mínimo diário de 115,4 litros/hab/dia.

Por outro lado, existem poços que captam águas comprometidas que acabam necessitando de tratamento adequado para consumo, pois foi observado que em análises realizadas no ano de 1998 já existia evidência de salinidade nas águas

subterrâneas de Aracati, que sugerem possível influência das carcinoculturas nas águas, visto que essa atividade teve início entre 1997 e 1998. Dessa forma, é importante frisar na gestão dos recursos hídricos para suprir a demanda dos moradores e um monitoramento da qualidade de água para evitar quaisquer problemas de saúde.

Os 53 poços existentes dentro da área delimitada à pesquisa são destinados para diversos fins, mas apenas 21 destes tem com finalidade abastecer as comunidades seja por meio de caminhões pipa, carrocerias, ou entre os moradores das comunidades, ingeridas de forma direta e indireta. Em um município cujas águas subterrâneas são armazenadas principalmente em um domínio sedimentar, os 40% dos poços visitados serem destinados ao consumo revela a importância da procura pelo abastecimento por meio desse recurso e levanta questionamentos da pouca exploração nessa região. Logo, as leituras *in situ* foram essenciais para investigação da qualidade da água, as quais revelaram que as águas subterrâneas refletem caráter levemente ácido e são águas salobras. A salinidade nas águas subterrâneas foi evidenciada por meio da caracterização hidrogeoquímica da região e pela análise estatística dos dados, em que esse padrão apresenta similaridade com padrão de águas influenciadas por intrusão salina, e para o caso do município em estudo, existe a influência pela infiltração das águas da carcinocultura.

Na avaliação da qualidade das águas subterrâneas, descobriu-se que cada amostra contém pelo menos um parâmetro fora do padrão estabelecido pela Portaria nº 888/2021 MS, o que pode ser devido à topografia mais baixa da região, que permite receber água com maior concentração de substâncias químicas de diversas fontes. Dentre os parâmetros restritores da potabilidade, destaca-se cloreto e nitrato. No entanto, existem águas classificadas como boa pelo Diagrama de Schoeller & Berkaloff de potabilidade que contêm elementos que ultrapassam o padrão estabelecido pela Portaria nº 888/2021 como turbidez, ferro e alumínio.

As águas subterrâneas na área de estudo de Aracati são uma das principais fontes de abastecimento da população residente, isso implica que através da ingestão e o contato diário da água contaminada podem afetar a saúde do público em geral, por exemplo, a contínua ingestão de água salobras/salgadas pode desenvolver doenças de hipertensão, pressão alta, AVC, infarto, insuficiência cardíaca, diarreia,

etc. Convém destacar que os gráficos 9, 12 e 13 com dados do DATASUS, mostram o aumento significativo de óbitos dessas doenças entre 1996 a 2020.

Além disso, por se tratar de um município que apresenta baixa qualidade de saneamento básico, é provável que também exista forte relação com os problemas de saúde para a maioria das pessoas, principalmente a partir da ingestão de água com teor de nitrogênio nitrato fora do permitido, podendo acarretar em doenças como metemoglobinemia e diabetes.

A alteração na qualidade da água subterrânea na área de estudo pode estar relacionada a diversas fontes presentes na região, em especial a interação do rio Jaguaribe com as águas subterrâneas, bem como a infiltração das águas dos tanques de carcinicultura contribuindo para salinização, conforme evidenciado pela direção do fluxo das águas subterrâneas, em consequente, os poços são abandonados e desativados, prejudicando a qualidade de vida das pessoas que dependem dessa forma de abastecimento.

Vale salientar que as observações levantadas no trabalho são referentes a água em condições de seca extrema, pois a coleta de água ocorreu no mês de outubro, portanto, pode haver alteração no teor de salinidade devido a sazonalidade da região, e sabe-se que a área apresenta condições geológicas ideais para a recarga das águas pluviais, o que reduz a salinidade do lençol freático. Sendo assim, é importante que o órgão ambiental realize monitoramento mais frequente da qualidade da água dos poços a fim de promover planejamento e gestão dos recursos hídricos e garantir a qualidade de vida da população municipal.

9.2 Recomendações

Foi visto que a contaminação das águas subterrâneas por sais e outros contaminantes provenientes de tanques de carcinicultura é um problema crescente em muitas regiões costeiras do mundo. Em Aracati, a salinização das águas subterrâneas pode ocorrer tanto em função das infiltrações das águas presentes nos tanques de carcinicultura, como por carreamento de águas do rio Jaguaribe evidenciado pelo mapa potenciométrico. A salinização do rio Jaguaribe decorre principalmente do represamento da água, do descarte de efluentes de carcinicultura e da intrusão salina em períodos de preamar. Para evitar a degradação da qualidade

dessas águas e proteger os aquíferos locais, é necessário implementar uma série de medidas e recomendações práticas.

Existe legislações específicas que estabelecem os requisitos para o tratamento e descarte de efluentes no Brasil. A Resolução CONAMA nº 430/2011 define os padrões de qualidade para o lançamento de efluentes em corpos d'água e estabelece a necessidade de monitoramento constante da qualidade da água. Além disso, a legislação estadual também pode estabelecer requisitos adicionais para o tratamento e descarte de efluentes, como é o caso da Resolução COEMA nº 9 DE 05/08/2021.

Existem diversas tecnologias disponíveis para o tratamento de efluentes de carcinicultura, contudo, independentemente da tecnologia adotada, é importante seguir as boas práticas de manejo de efluentes, que incluem a remoção dos sólidos em suspensão, a redução da carga orgânica, a remoção de nutrientes, a desinfecção, entre outras medidas (RODRIGUES, 2007).

Outras recomendações seguem de acordo com orientações apresentadas por ABCC (2005), Ribeiro et al. (2014) e Rodrigues (2007):

- a) utilização de equipamentos para tratamento de água, como a destilação, para remover o excesso de sal e outros contaminantes das águas utilizadas na carcinicultura.
- b) adoção de práticas sustentáveis na criação de camarões, como o uso de rações balanceadas e a implementação de sistemas de recirculação de água, que reduzem a necessidade de água fresca e, conseqüentemente, a produção de águas residuais.
- c) Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, por meio de análises químicas e físicas periódicas, para avaliar a efetividade das medidas adotadas e detectar eventuais problemas antecipadamente.

Em suma, a proteção e a preservação das águas subterrâneas são fundamentais para a manutenção do equilíbrio ambiental e da saúde pública. A implementação de medidas e recomendações efetivas assegura a sustentabilidade da carcinicultura e a proteção dos recursos hídricos.

REFERÊNCIAS

ABCC. **Código de conduta e de boas práticas de manejo e de fabricação para uma carcinicultura ambientalmente sustentável e socialmente justa**. [s.l.]:

Associação Brasileira de Criadores de Camarão, 2005. Disponível em:

[https://abccam.com.br/wp-](https://abccam.com.br/wp-content/uploads/2011/02/Cdigos_de_Conduta_ABCC_2005.pdf)

[content/uploads/2011/02/Cdigos_de_Conduta_ABCC_2005.pdf](https://abccam.com.br/wp-content/uploads/2011/02/Cdigos_de_Conduta_ABCC_2005.pdf). Acesso em:

14 mar. 2023.

ABDI, Hervé; WILLIAMS, Lynne J. Principal component analysis. **Wiley**

Interdisciplinary Reviews: Computational Statistics, v. 2, n. 4, p. 433–459, 2010.

ALLER, L.; BENNET, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating groundwater pollution using hydrological settings. Ada, USA: National WaterWell Association, 1987.

ALMEIDA, Ghislaine M. de; SILVA JUNIOR, Gerson Cardoso da. Fatores hidrogeológicos no estudo da intrusão salina em aquíferos costeiros da região litorânea do município de Maricá - RJ. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 30, n. 2, p. 104–117, 2007.

AMINOT, Alain; CHAUSSEPIED, Marcel. **Manuel des analyses chimiques en milieu marin**. Brest: Cnexo, 1983.

AMINOT, Alain; KÉROUEL, Roger. **Dosage automatique des nutriments dans les eaux marines: méthodes en flux continu**. Versailles: Editions Quae, 2007.

ANA. **Conjuntura dos Recursos Hídricos — Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos**. Brasília: ANA, 2009. Disponível em: www.snirh.gov.br. Acesso em: 22 dez. 2021.

APHA; AWWA; WEF. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. Washington, D.C.: American Public Health Association, American Water Works Association and Water Environment Federation, 2012.

ARRUDA, Natália de Souza. **Influência antrópica na qualidade dos aquíferos freáticos da sub-bacia do rio Monjolinho**. Dissertação, Universidade Federal de São Carlos, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/13546>. Acesso em: 27 mar. 2022.

ATSDR. **Toxicological profile for Aluminum**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service., 2008. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>. Acesso em: 10 jan. 2023.

ATSDR. **Toxicological profile for Chromium**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2012. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>. Acesso em: 2 fev. 2022.

ATSDR. **Toxicological profile for Manganese**. Atlanta, GA: U.S. Department of

Health and Human Services, Public Health Service, 2012. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>. Acesso em: 2 fev. 2022.

ATSDR. **Toxicological profile for Nitrate and Nitrite**. Atlanta, GA: U.S. Department of Health and Human Services, Public Health Service, 2017. Disponível em: <https://www.atsdr.cdc.gov/toxprofiledocs/index.html>. Acesso em: 16 abr. 2022.

AZEVEDO, Verônica Cristina Silva. **Carcinicultura: parâmetros integrativos como instrumentos de prevenção de impactos**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2017. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/21693>. Acesso em: 11 abr. 2022.

BARRETT, Kim E; BARMAN, Susan M.; BOITANO, Scott; *et al.* **Fisiologia medica de Ganong**. 24. ed. Porto Alegre: AMGH, 2014.

BARROSO, Andréia de Araújo Freitas; NESS, Ricardo Luiz Lange; GOMES FILHO, Raimundo Rodrigues; *et al.* Avaliação qualitativa das águas subterrâneas para irrigação na região do baixo Jaguaribe – Ceará. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v. 4, n. 3, p. 150–155, 2010.

BEZERRA, Luiz José Cruz. **Caracterização dos tabuleiros pré-litorâneos do Estado do Ceará**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/11465>. Acesso em: 2 dez. 2022.

BLITZKOW, Denizar; MATOS, Ana Cristina Oliveira Cancoro de; MACHADO, Wagner Carrupt; *et al.* MAPGEO2015: O NOVO MODELO DE ONDULAÇÃO GEOIDAL DO BRASIL. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 68, n. 10, p. 1873–1884, 2016. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/revistabrasileiracartografia/article/view/44289>. Acesso em: 29 mar. 2022.

BORGES, Ricarda Sobral. **Caracterização limnológica do estuário do Rio Jaguaribe - CE e do estuário do Rio Parnaíba - PI, Brasil**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2017. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/32957>. Acesso em: 28 maio 2022.

BRAGA, Roberta da Rocha; MATUSHIMA, Eliana Reiko. VALE DO JAGUARIBE: UM OÁSIS EM PERIGO NO SEMIÁRIDO BRASILEIRO – REVISÃO SISTEMÁTICA SOBRE CONTAMINAÇÃO AMBIENTAL E POTENCIAIS DANOS À BACIA E SEUS USUÁRIOS. **Revista de Geociências do Nordeste**, p. 24–34, 2021.

BUNNELL, Joseph E. Medical Geology: Emerging Discipline on the Ecosystem?Human Health Interface. **EcoHealth**, v. 1, n. 1, p. 15–18, 2004.

CARACAS, Isabelle Bezelga. **Influência da salinização em parâmetros de qualidade das águas subterrâneas na região costeira do Baixo Jaguaribe**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/19311>. Acesso em: 4 abr. 2022.

CARVALHO, A.C.O.; MARINS, R.V.; DIAS, F.J.S.; *et al.* Air-sea CO₂ fluxes for the Brazilian northeast continental shelf in a climatic transition region. **Journal of Marine Systems**, v. 173, p. 70–80, 2017.

CAVALCANTE, Maria Sousa. **Caracterização da matéria orgânica natural no estuário do rio Jaguaribe em diferentes estações climáticas em anos de seca prolongada**. PhD Thesis, Universidade Federal do Ceará, 2019. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49622>. Acesso em: 5 jan. 2022.

CETESB. **Qualidade das águas interiores no estado de São Paulo 2020**. São Paulo: CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/>. Acesso em: 8 dez. 2021.

CETESB. Decisão de Diretoria N.º 125/2021/E, de 09 de dezembro de 2021: Dispõe sobre a Aprovação da Atualização da Lista de Valores Orientadores para Solo e Água Subterrânea. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-subterraneas/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 26 jan. 2023.

CHEN, Xing; JIANG, Chunlu; ZHENG, Liugen; *et al.* Evaluating the genesis and dominant processes of groundwater salinization by using hydrochemistry and multiple isotopes in a mining city. **Environmental Pollution**, v. 283, p. 117381, 2021.

CHOWDHURY, Puja; MUKHOPADHYAY, Bhabani Prasad; BERA, Amit. Hydrochemical assessment of groundwater suitability for irrigation in the north-eastern blocks of Purulia district, India using GIS and AHP techniques. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, p. 103108, 2022.

CIVITTA, M. **La carte della vulnerabilità deliaquiferi all'inquinamento: teoria e pratica**. Bologna: Pitagora Editrice, 1994, 325p.

CIVITTA, M. **La carte della vulnerabilità deliaquiferi all'inquinamento: teoria e pratica**. Bologna: Pitagora Editrice, 1994, 325p.

CNRH. **Resolução nº 91, DE 5 DE NOVEMBRO DE 2008: Dispõe sobre procedimentos gerais para o enquadramento dos corpos de água superficiais e subterrâneos**. [s.l.]: Conselho Nacional de Recursos Hídricos, 2008. Disponível em: <https://cnrh.mdr.gov.br/resolucoes?limit=100&limitstart=100>. Acesso em: 18 jun. 2021.

COEMA. **Resolução COEMA nº 9 DE 05/08/2021: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes para a atividade de aquicultura no estado do Ceará, e dá outras providências**. Fortaleza: Diário Oficial da União, 2021. Disponível em: <https://www.semace.ce.gov.br/resolucoes-estaduais-2021/>. Acesso em: 18 abr. 2022.

COGERH. **Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará: Cadastro de poços Apodi** **COGERH**. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos. Disponível em: <https://portal.cogerh.com.br/>. Acesso em: 5 ago. 2020.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 396, de 3 de abril de 2008: Dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências**. [s.l.]: Diário Oficial da União, 2008.

Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/>. Acesso em: 18 jun. 2021.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005: Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências.** [s.l.]: Diário Oficial da União, 2005. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/>. Acesso em: 10 fev. 2020.

CONAMA. **Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011: Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA.** [s.l.]: Diário Oficial da União, 2011. Disponível em: <http://conama.mma.gov.br/>. Acesso em: 26 dez. 2022.

COSTA, B. G. B.; SOARES, T. M.; TORRES, R. F.; *et al.* Mercury Distribution in a Mangrove Tidal Creek Affected by Intensive Shrimp Farming. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v. 90, n. 5, p. 537–541, 2013.

CRUZ-FUENTES, Tatiana; CABRERA, María del Carmen; HEREDIA, Javier; *et al.* Groundwater salinity and hydrochemical processes in the volcano-sedimentary aquifer of La Aldea, Gran Canaria, Canary Islands, Spain. **Science of The Total Environment**, v. 484, p. 154–166, 2014.

CULHANE, Tom. **High Chloride Concentrations in Ground Water Withdrawn from Above Sea Level Aquifers, Whidbey Island, Washington.** [s.l.: s.n.], 1993. Disponível em: <https://apps.ecology.wa.gov/publications/SummaryPages/OFTR9307.html>. Acesso em: 12 abr. 2022.

CURRELL, Matthew J; DAHLHAUS, Peter; II, Hiroyuki. Stable isotopes as indicators of water and salinity sources in a southeast Australian coastal wetland: identifying relict marine water, and implications for future change. **Hydrogeology Journal**, v. 23, n. 2, p. 235–248, 2014.

CUSTODIO, Emilio; LLAMAS Manuel Ramón. **Hidrología subterránea.** 2. ed. Barcelona: Omega, 2001.

DIAS, Francisco José da Silva. **Hidrodinâmica das descargas fluviais para o estuário do Rio Jaguaribe (CE.).** Tese, Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1358>. Acesso em: 29 mar. 2022.

DOERFLIGER, N.; ZWAHLEN, F. **EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment.** In: Günay, G.; Jonshon, A.I. (Ed). International symposium and field seminar on karst waters and environmental impacts. Antalya, Turkey, Balkema, Rotterdam, 117–123, 1997.

DÖLL, P.; HOFFMANN-DOBREV, H.; PORTMANN, F. T.; *et al.* Impact of water withdrawals from groundwater and surface water on continental water storage

variations. **Journal of Geodynamics**, v. 59-60, p. 143–156, 2012. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0264370711000597>. Acesso em: 24 maio 2021.

FEITOSA, Fernando A.C.; FILHO, João Manoel; FEITOSA, Edilton Carneiro; *et al.* **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. Rio de Janeiro: CPRM, 2008.

FENZL, Norbert; RAMOS, José Francisco. **Introdução a hidrogeoquímica**. Belém: UFPA, 1988.

FERREIRA, Douglisnilson de Moraes. **Influência de atividades antrópicas sobre a salinização da água em área de dunas no Município de Guamaré RN**.

Dissertação, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, 2011. Disponível em: <https://repositorio.ufrn.br/handle/123456789/17654>. Acesso em: 1 dez. 2021.

FERREIRA, Rogelma Maria da Silva. **Hidroquímica e índices de saturação na determinação da salinidade das águas do Aquífero Jandaíra, na Chapada do Apodi**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2009. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/12778>. Acesso em: 26 jan. 2023.

FIGUEIRÊDO, Maria Cléa Brito de; ARAÚJO, Lúcia de Fátima Pereira; ROSA, Morsyleide de Freitas; *et al.* Impactos ambientais da carcinicultura de águas interiores. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 11, n. 3, p. 231–240, 2006.

FOSTER, S. **Contaminação de las águas subterrneas**. Lima, Peru: Organização Mundial de la Salud, 1987.

FOSTER, Stephen; HIRATA, RICARDO; GOMES, DANIEL; *et al.* **Protección de la calidad del agua subterránea: guía para empresas de agua, autoridades municipales y agencias ambientales**. Washington, D.C.: Banco Mundial, 2003.

FRANCO, Gustavo Barreto; SILVA, Demetrius David da; MARQUES, Eduardo Antonio Gomes; *et al.* Vulnerability analysis to contamination of the water aquifer and soil infiltration rate of Almada basin of the river and the adjacent coastal area. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 8, n. 3, p. 705–720, 2015.

FREITAS, H. B. *et al.* Avaliação do monitoramento das águas subterrâneas usadas para abastecimento humano na comunidade de Morrinhos, Aracati–Ceará. **Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, XX, p. 1-8, 2013.

FRIZZO, Sergio João. **Elementos químicos (metais pesados) em águas de abastecimento público no estado do Ceará**. Fortaleza: CPRM, 2006. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10014>. Acesso em: 1 fev. 2022.

FUNASA. **Manual Prático de Análise de Água**. 4. ed. Brasília: Fundação Nacional de Saúde, 2013.

FUNCEME. **Calendário de Chuvas**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.funceme.br/>. Acesso em: 6 out. 2021.

GATTO, Luiz Carlos Soares. **DIAGNÓSTICO AMBIENTAL DA BACIA DO RIO JAGUARIBE: diretrizes gerais para a ordenação territorial**. Salvador: IBGE, DGC, 1999.

GHOSH, Gopal Chandra; KHAN, Md. Jahed Hassan; CHAKRABORTY, Tapos Kumar; *et al.* Human health risk assessment of elevated and variable iron and manganese intake with arsenic-safe groundwater in Jashore, Bangladesh. **Scientific Reports**, v. 10, n. 1, 2020.

GODOY, Mario Duarte Pinto; DE LACERDA, Luiz Drude. River-Island morphological response to basin land-use Change within the Jaguaribe river estuary, NE Brazil. **Journal of Coastal Research**, v. 30, n. 2, p. 399–410, 2014.

GODOY, Mario Duarte Pinto; LACERDA, Luiz Drude de. CHANGES IN ESTUARINE ISLANDS AND RAINFALL TRENDS IN THE JAGUARIBE RIVER WATERSHED, CEARÁ STATE, BRAZIL. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 46, n. 2, 2013. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/arquivosdecienciadomar/article/view/902>.

GOMES, Diolande Ferreira; MOURA, Idembergue Barroso Macedo; FRISCHKORN, Horst; *et al.* Estudo hidroquímico e isotópico (^{18}O) do aquífero aluvial do Rio Banabuiú - trecho Morada Nova - Ceará. **Revista de Geologia**, v. 23, n. 1, p. 32–48, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/14886>. Acesso em: 16 abr. 2022.

GOMES, Maria da Conceição Rabelo. **Análise situacional qualitativa sobre as águas subterrâneas de Fortaleza, Ceará-Brasil como subsídio a gestão dos recursos hídricos**. Tese, Universidade Federal do Ceará, 2013. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/17482>.

GOMES NETO, Antonio de Oliveira. **Neotectônica do baixo vale do rio Jaguaribe - Ceará**. Tese (doutorado), Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, 2007. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/handle/11449/103049>. Acesso em: 16 jan. 2023.

Google Earth Pro V 7.3.2.5776. (2019). [software].

GOPINATH, S.; SRINIVASAMOORTHY, K.; SARAVANAN, K.; *et al.* Discriminating groundwater salinization processes in coastal aquifers of southeastern India: geophysical, hydrogeochemical and numerical modeling approach. **Environment, Development and Sustainability**, v. 21, n. 5, p. 2443–2458, 2018.

GRANJEIRO, Michel Lopes. **Análise estatística R-Modal, Q-Modal e Cluster no estudo da qualidade da água subterrânea do aquífero Jandaíra na Chapada do Apodi**. Tese de Doutorado, Universidade Federal do Ceará, 2012. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/12540>. Acesso em: 5 dez. 2022.

HASAN, Syed E. Medical Geology. **Encyclopedia of Geology**, p. 684–702, 2021.

HEATH, Ralph C. **Basic ground-water hydrology**. Reston, Va.? U.S. Geological Survey, 2004.

HEM, J.D. Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. **Water Supply Paper**, v. 2254, 1985.

HEM, John David. **Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water**. Reston, VA: U.S. Geological Survey, 1959. Disponível em: https://doi.org/10.3133/wsp1473_ed1. Acesso em: 18 abr. 2022.

HEM, John D. Factors affecting stream water quality, and water-quality trends in four basins in the conterminous United States 1905-90. **National water summary**, v. 91, p. 67–92, 1990.

HERCZEG, Andrew L.; EDMUNDS, W. Mike. Inorganic Ions as Tracers. **Environmental Tracers in Subsurface Hydrology**, p. 31–77, 2000.

HE, Zekang; MA, Chuanming; ZHOU, Aiguo; *et al.* Using hydrochemical and stable isotopic ($\delta^2\text{H}$, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^{11}\text{B}$, and $\delta^{37}\text{Cl}$) data to understand groundwater evolution in an unconsolidated aquifer system in the southern coastal area of Laizhou Bay, China. **Applied Geochemistry**, v. 90, p. 129–141, 2018.

IBGE. **Aracati**. Panorama. Disponível em: <https://cidades.ibge.gov.br/brasil/ce/aracati/panorama>. Acesso em: 26 dez. 2022.

IBGE. **Estimativas da população residente nos municípios brasileiros**. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/sociais/populacao/9103-estimativas-de-populacao.html?=&t=resultados>. Acesso em: 24 maio 2021.

IPECE. **Anuário Estatístico do Ceará**. IPECEDATA. Disponível em: <http://ipecedata.ipece.ce.gov.br/ipece-data-web/module/anuario.xhtml>. Acesso em: 17 nov. 2022.

IPECE. **i3Geo -Catálogo de metadados para download de arquivos georreferenciados**. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. Disponível em: <http://mapas.ipece.ce.gov.br/i3geo/ogc/index.php>. Acesso em: 17 mar. 2023.

IPECE. **Perfil Básico Municipal de Aracati**. Fortaleza: IPECE, 2017. Disponível em: <https://www.ipece.ce.gov.br/perfil-municipal/>. Acesso em: 10 maio 2021.

JABED, Md. Akib; PAUL, Alak ; NATH, Tapan Kumar. Peoples' Perception of the Water Salinity Impacts on Human Health: A Case Study in South-Eastern Coastal Region of Bangladesh. **Exposure and Health**, 2018.

JONES, B. F.; VENGOSH, A; ROSENTHAL, E; *et al.* Geochemical Investigations. *In*: **Seawater Intrusion in Coastal Aquifers — Concepts, Methods and Practices**. Dordrecht: Springer Science & Business Media, 1999, p. 51–71.

JOVENTINO, Fátima Karine Pinto ; MAYORGA, Maria Irles de Oliveira. Diagnóstico socioambiental e tecnológico da carcinicultura no município de Fortim, Ceará, Brasil. **Revista Eletrônica do PRODEMA (REDE)**, p. 80–96, 2008. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/4346>. Acesso em: 10 mar. 2023.

KEESARI, Tirumalesh ; DAUJI, Saha. Groundwater salinization processes: pitfalls of inferences from Na⁺/Cl⁻ versus Cl⁻ correlation plots. **Environmental Geochemistry and Health**, v. 43, n. 2, p. 949–969, 2020.

KHANORANGA; KHALID, Sofia. An assessment of groundwater quality for irrigation and drinking purposes around brick kilns in three districts of Balochistan province, Pakistan, through water quality index and multivariate statistical approaches. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 197, p. 14–26, 2019.

KUCHMENT, Lev. THE HYDROLOGICAL CYCLE AND HUMAN IMPACT ON IT. **Water Resources Management**, p. 10, 2004. Disponível em: <https://www.eolss.net/sample-chapters/c07/E2-16-10-01.pdf>. Acesso em: 12 jan. 2022.

KUMARI, M.K.N.; SAKAI, Kazuhito; KIMURA, Sho; *et al.* Classification of Groundwater Suitability for Irrigation in the Ulagalla Tank Cascade Landscape by GIS and the Analytic Hierarchy Process. **Agronomy**, v. 9, n. 7, p. 351, 2019.
LARGIER, John. Low-inflow estuaries: hypersaline, inverse, and thermal scenarios. **Contemporary Issues in Estuarine Physics**, p. 247–272, 2010.

LEIRA, Matheus Hernandez; CUNHA, Luciane Tavares da; BRAZ, Mirian Silvia; *et al.* Qualidade da água e seu uso em pisciculturas. **Pubvet**, v. 11, n. 1, p. 11–17, 2017. Disponível em: <https://www.pubvet.com.br/uploads/917aff074367e4333b44c8551115a114.pdf>. Acesso em: 9 dez. 2020.

LI, Chengcheng; GAO, Xubo; LI, Siqi; *et al.* A review of the distribution, sources, genesis, and environmental concerns of salinity in groundwater. **Environmental Science and Pollution Research**, v. 27, n. 33, p. 41157–41174, 2020.

LOGAN, J. **Interpretação de análises químicas da água**. Agency for International Development: Recife: S.Ed, 1965.

MACHIWAL, Deepesh; JHA, Madan K. Identifying sources of groundwater contamination in a hard-rock aquifer system using multivariate statistical analyses and GIS-based geostatistical modeling techniques. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 4, p. 80–110, 2015.

MAGESH, N. S.; KRISHNAKUMAR, S.; CHANDRASEKAR, N.; *et al.* Groundwater quality assessment using WQI and GIS techniques, Dindigul district, Tamil Nadu, India. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6, n. 11, p. 4179–4189, 2012.

MAIA, Saulo Roberio Rodrigues; FREIRE, George Satander Sá; GOMES, Diolande Ferreira; *et al.* Anomalias hidroquímicas nos aquíferos de Icapuí/CE: riscos à saúde

da população. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais**, v. 9, n. 2, p. 94–107, 2017.

MASON, B. **Principles of geochemistry**. 3. ed. New York: Wiley, 1966.

MATTOS, Jonatas Batista. **Análise da hidrogeoquímica das águas subterrâneas no município de Lençóis, Bahia**. Dissertação, Universidade Federal da Bahia, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufba.br/handle/ri/32094>. Acesso em: 25 abr. 2022.

MENDES, Luzia Suerlange Araujo dos Santos; DA SILVA NETO, Tomaz Alexandre; SOUSA, Joyce Shantala Fernandes de Oliveira; *et al.* Diagnóstico da oferta hídrica do município de Russas (CE): Uma análise descritiva como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1612, 2021.

MINISTÉRIO DA SAÚDE BRASIL. **Banco de dados do Sistema Único de Saúde - DATASUS**. Departamento de informática do Sistema Único de Saúde do Brasil. Disponível em: <http://www.datasus.gov.br>. Acesso em: 10 abr. 2022.

MOBUS, G. **Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www3.funceme.br/qualigraf/app/pagina/show/3>. Acesso em: 28 fev. 2022.

MONTEIRO, Adson Brito; CABRAL, Jaime J S P; BARBOSA, D. L; *et al.* **Vulnerabilidade e distribuição espacial dos nitratos no Aquífero Barreiras nos bairros de Ibura e Jordão, Recife, Pernambuco**. Recife: CPRM, 2003. Disponível em: <http://rigeo.cprm.gov.br/xmlui/handle/doc/659>. Acesso em: 6 abr. 2022.
MOURA-FÉ, Marcelo Martins de. Barreiras: Série, Grupo ou Formação? (Barreiras: Serie, Group or Formation?). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 7, n. 6, p. 1055, 2015.

MS/GM. **PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021: Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. [s.l.]: Diário Oficial da União, 2021. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso em: 24 maio 2021.

NASEEM, Shahid; BASHIR, Erum; AHMED, Pazeer; *et al.* Impact of Seawater Intrusion on the Geochemistry of Groundwater of Gwadar District, Balochistan and Its Appraisal for Drinking Water Quality. **Arabian Journal for Science and Engineering**, v. 43, n. 1, p. 281–293, 2017.

NOGUEIRA, G.; STIGTER, T.Y.; ZHOU, Y.; *et al.* Understanding groundwater salinization mechanisms to secure freshwater resources in the water-scarce city of Maputo, Mozambique. **Science of The Total Environment**, v. 661, p. 723–736, 2019.

NWS. **Sea Water**. www.weather.gov. Disponível em: <https://www.weather.gov/jetstream/seawater>.

OLIVEIRA, Huáscar Pinto Vidal de. **Evolução do uso e ocupação dos sistemas ambientais de municípios costeiros do baixo Jaguaribe-Ceará (1984 -2016): aplicação de geotecnologias para subsidiar o ordenamento territorial**. PhD Thesis, Federal University of Ceara, Fortaleza, Ceara, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/35583>.

OLIVEIRA, José Erasmo de. Implicações de Radioelementos no Meio Ambiente, Agricultura e Saúde Pública em Lagoa Real, Bahia, Brasil. *In: **Geologia Médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente***. Rio De Janeiro, Brasil: Serviço Geológico Do Brasil, Secretaria De Geologia, Mineração E Transformação Mineral, Ministério De Minas E Energia, 2006, p. 148–156.

OSMF. **OpenStreetMap**. Fundação OpenStreetMap (OSMF). Disponível em: <http://www.OpenStreetMap.org>. Acesso em: 10 jan. 2023.

PAULA, Davis Pereira de; MORAIS, Jäder Onofre de; PINHEIRO, Lidriana DE SOUZA. Impactos de eventos naturais e antrópicos em estuários tropicais: o estudo de caso do estuário do rio Jaguaribe, Fortim-CE, Brasil. *In: [s.l.: s.n.]*, 2009, p. 230–238. Disponível em: <https://www.abequa.org.br/trabalhos/gerais013.pdf>. Acesso em: 25 mar. 2022.

PAULA, D. P; MORAIS, J. O; PINHEIRO, L.S. ANÁLISE GEOAMBIENTAL DO ESTUÁRIO DO RIO JAGUARIBE-CE: TENSORES NATURAIS E ANTRÓPICOS. **Anais do 6º Simpósio Nacional de Geomorfologia**, p. 1–11, 2006. Disponível em: <http://lsie.unb.br/ugb/sinageo/6/6/245.pdf>. Acesso em: 23 ago. 2022.

PEDROSA, Adriana Albuquerque; CAVALCANTE, Itabaraci Nazareno; GOMES, Maria da Conceição Rabelo; *et al.* A OCUPAÇÃO E O USO DIFERENCIADOS DAS DUNAS EM FORTALEZA – CEARÁ E OS IMPACTOS NAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS. **Águas Subterrâneas**, 2011. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28076>. Acesso em: 1 fev. 2023.

PEREIRA FILHO, Antero. **Grupo Lua Cheia - A HISTÓRIA DO DIQUE DE ARACATI**. Grupo Lua Cheia. Disponível em: <https://www.luacheia.art.br/>. Acesso em: 18 mar. 2022.

PEREIRA JÚNIOR, José de Sena. **NOVA DELIMITAÇÃO DO SEMI-ÁRIDO BRASILEIRO**. Brasília: Biblioteca Digital da Câmara dos Deputados. Centro de Documentação e Informação, 2007.

PEREIRA JÚNIOR, Lindolfo Caetano; SOARES, Hugo Leonardo Trindade; CASTRO, Selma Simões de. Vulnerabilidade natural e risco de contaminação do Aquífero Bauru no município de Rio Verde – GO. **Águas Subterrâneas**, v. 29, n. 2, p. 129, 2015.

PINÉO, Tercyo Rinaldo Gonçalves; PALHETA, Edney Smith de Moraes; COSTA, F.G.; *et al.* Mapa geológico do estado do Ceará. (Projeto Geologia e Recursos Minerais do Estado do Ceará). Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/20418>. Acesso em: 21 jul. 2022.

PIPER, Arthur M. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. **Transactions, American Geophysical Union**, v. 25, n. 6, p. 914, 1944.

POTTER, Ian C.; CHUWEN, Benjamin M.; HOEKSEMA, Steeg D.; *et al.* The concept of an estuary: A definition that incorporates systems which can become closed to the ocean and hypersaline. **Estuarine, Coastal and Shelf Science**, v. 87, n. 3, p. 497–500, 2010.

PURCINO, Maurício Dias. **Espacialização dos parâmetros físico-hídricos do solo e associação com a vulnerabilidade à erosão hídrica em dois ambientes antropizados do ribeirão do cipó**. Dissertação, Universidade Federal de Alfenas, Universidade Federal de Alfenas, 2017. Disponível em: <https://bdtd.unifal-mg.edu.br:8443/handle/tede/1064>. Acesso em: 24 maio 2021.

RAKOTONDRABE, Felaniaina; NDAM NGOUPAYOU, Jules Remy; MFONKA, Zakari; *et al.* Water quality assessment in the Bétaré-Oya gold mining area (East-Cameroon): Multivariate Statistical Analysis approach. **Science of The Total Environment**, v. 610-611, p. 831–844, 2018.

RASHEED, Sabrina; SIDDIQUE, A. K.; SHARMIN, Tamanna; *et al.* Salt Intake and Health Risk in Climate Change Vulnerable Coastal Bangladesh: What Role Do Beliefs and Practices Play? **PLOS ONE**, v. 11, n. 4, p. e0152783, 2016.

RAZMKHAH, Homa; ABRISHAMCHI, Ahmad; TORKIAN, Ayoob. Evaluation of spatial and temporal variation in water quality by pattern recognition techniques: A case study on Jajrood River (Tehran, Iran). **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 4, p. 852–860, 2010.

RIBEIRO, Luisa Ferreira; SOUZA, Manuel C. M. B. N. de; BARROS, Francisco; *et al.* Desafios da carcinicultura: aspectos legais, impactos ambientais e alternativas mitigadoras. **Revista de Gestão Costeira Integrada**, v. 14, n. 3, p. 365–383, 2014.

RIOS, Jéssyca Hellen Lima. **Distribuição e fracionamento geoquímico de metais em sedimentos estuarinos do semiárido brasileiro sob diferentes estações climáticas**. MSc Thesis, Federal University of Ceara, 2018. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/32410>. Acesso em: 24 nov. 2021.

RODRIGUES, Francisco Gleison de Souza. **O agronegócio da carcinicultura marinha e os conflitos sociais e ambientais de uso e ocupação do estuário do Rio Jaguaribe no município de Aracati-CE**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/7833>. Acesso em: 18 abr. 2022.

RSTUDIO TEAM. **RStudio: Integrated Development for R**. rstudio.com. Disponível em: <http://www.rstudio.com/>.

SANTANA, Lígia M. B. M.; COSTA, Letícia V.; ABESSA, Denis M. S. A CONTAMINAÇÃO ANTRÓPICA E SEUS EFEITOS EM TRÊS ESTUÁRIOS DO LITORAL DO CEARÁ, NORDESTE DO BRASIL - REVISÃO. **Arquivos de Ciências do Mar**, v. 48, n. 2, p. 93–115, 2015. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/arquivosdecienciadomar/article/view/5853>. Acesso em: 27 jan. 2023.

SANTIAGO, Maria Marlúcia Freitas; SILVA, Carla Maria Salgado Vidal; FERREIRA, Rogelma Maria da Silva; *et al.* A QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS USADAS NA IRRIGAÇÃO DA CHAPADA DO APODI. **Águas Subterrâneas**, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23302>. Acesso em: 26 jan. 2023.

SANTOS, Almany Costa. Noções de Hidroquímica. *In*: **Hidrogeologia: conceitos e aplicações**. 3. ed. Rio De Janeiro: CPRM, 2008, p. 812.

SANTOS, Janaína Andrade dos. **Determinação de Cu e Zn em fazendas produtoras de camarão do litoral leste do Estado do Ceará**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2005. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/1366>. Acesso em: 27 mar. 2022.

SANTOS, Rodrigo A.; CRUZ, Manoel J. M.; NASCIMENTO, Sérgio A. Avaliação da vulnerabilidade natural de aquíferos cársticos: subsídios para uma gestão dos recursos hídricos subterrâneos (TEXTO DIDÁTICO). **Cadernos de Geociências**, v. 7, n. 1, 2010. Disponível em: <https://periodicos.ufba.br/index.php/cadgeoc/article/view/4096>. Acesso em: 20 dez. 2022.

SCARPELLI, Wilson. Introdução à geologia médica. **I FENAFEG, IGc da USP**, 2003.

SELVAKUMAR, S.; CHANDRASEKAR, N.; KUMAR, G. Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban development areas of Coimbatore, India. **Water Resources and Industry**, v. 17, p. 26–33, 2017.

SELVAKUMAR, S.; RAMKUMAR, K.; CHANDRASEKAR, N.; *et al.* Groundwater quality and its suitability for drinking and irrigational use in the Southern Tiruchirappalli district, Tamil Nadu, India. **Applied Water Science**, v. 7, n. 1, p. 411–420, 2017.

SENGUPTA, Pallav. Potential health impacts of hard water. **International Journal of Preventive Medicine**, v. 4, n. 8, p. 866–875, 2013. Disponível em: <https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/24049611/>. Acesso em: 7 dez. 2021.

SESA. **Cadernos de Informação em Saúde**. Secretaria de Saúde do Governo do Estado do Ceará. Disponível em: <https://www.saude.ce.gov.br/download/cadernos->

de-informacao-em-saude/. Acesso em: 2 abr. 2022.

SGB. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SIAGAS**. Serviço Geológico do Brasil. Disponível em: siagasweb.cprm.gov.br. Acesso em: 4 out. 2021.

SHAMMI, Mashura; RAHMAN, Md.; BONDAD, Serene; *et al.* Impacts of Salinity Intrusion in Community Health: A Review of Experiences on Drinking Water Sodium from Coastal Areas of Bangladesh. **Healthcare**, v. 7, n. 1, p. 50, 2019. Disponível em: <https://www.mdpi.com/2227-9032/7/1/50/htm>.

SILVA, Cassio Roberto; FIGUEIREDO, Bernardino Ribeiro; CAPITANI, Eduardo Mello de. Geologia médica no Brasil. *In: Geologia Médica no Brasil: efeitos dos materiais e fatores geológicos na saúde humana e meio ambiente*. Rio De Janeiro, Brasil: Serviço Geológico Do Brasil, Secretaria De Geologia, Mineração E Transformação Mineral, Ministério De Minas E Energia, 2006, p. 6–14.

SILVA, Kamillo Karol Ribeiro e. **Nos caminhos da memória, nas águas do Jaguaribe: memória das enchentes em Jaguaruana-Ce (1960, 1974, 1985)**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2006. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/3053>. Acesso em: 18 mar. 2022.

SILVA, Luciano de Oliveira. **Análise da qualidade da água subterrânea para abastecimento público: estudo de caso na comunidade Alto do ferrão, em Itaiçaba-CE**. Trabalho de Conclusão de Curso, Universidade Federal do Ceará, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufc.br/handle/riufc/59338>. Acesso em: 5 dez. 2022.

SILVA, P. C. G. da; MOURA, M. S. B. de; KIILL, L. H. P.; *et al.* Caracterização do Semiárido brasileiro: fatores naturais e humanos. *In: Semiárido brasileiro: pesquisa, desenvolvimento e inovação*. Petrolina, Pe: Embrapa Semiárido, 2010, p. cap. 1, p. 18-48. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/handle/doc/861906>. Acesso em: 27 dez. 2021.

SIQUEIRA, Ana Cláudia de Abreu; MAGINI, Christiano; DANTAS, Elton Luis; *et al.* Lateritas do Domínio Médio Coreaú – Comportamento geoquímico de mantos lateríticos do Noroeste do Estado do Ceará. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n. 2, p. 249–264, 2014.

SNS. **Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento – SNIS: 24º Diagnóstico dos Serviços de Água e Esgotos – 2018**. [s.l.: s.n.], 2019. Disponível em: www.snis.gov.br.

SOUSA, Joyce Shantala Fernandes de Oliveira; GADELHA, Amanda Aragão Moraes; MENDES, Luzia Suerlange Araújo dos Santos; *et al.* Anthropic Influences on the Quality of Underground Waters for Human Consumption in Russas, Ceará, Northeastern Brazil. **Anuário do Instituto de Geociências**, v. 44, 2021.

SOUSA, Joyce Shantala Fernandes de Oliveira; GADELHA, Amanda Aragão Moraes; SALGUEIRO, Ana Rita Goncalves Neves Lopes. **RELAÇÃO ENTRE**

MAPEAMENTO DE POTENCIAIS FONTES POLUIDORAS E A SITUAÇÃO DE SAÚDE AMBIENTAL NA SUB-BACIA DO BAIXO JAGUARIBE, CE. **Encontros Universitários da UFC**, v. 4, n. 2, p. 1969–1969, 2019. Disponível em: <http://www.periodicos.ufc.br/eu/article/view/59728>. Acesso em: 2 abr. 2022.

STURGES, Herbert A. The Choice of a Class Interval. **Journal of the American Statistical Association**, v. 21, n. 153, p. 65–66, 1926.

SUDARYANTO; NAILY, Wilda. Ratio of Major Ions in Groundwater to Determine Saltwater Intrusion in Coastal Areas. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, v. 118, p. 012021, 2018.

SZIKSZAY, Maria. Geoquímica das águas. **Boletim IG-USP. Série Didática**, v. 0, n. 5, p. 1, 1993. Disponível em: <https://www.revistas.usp.br/bigsd/article/download/45351/48963/0>. Acesso em: 23 mar. 2022.

TAOUIL, H.; LEMACHA, H.; DOUBI, M.; *et al.* Hydrochemical characterization of the waters of the river Tislit-Talsint, Eastern Morocco. **Chemistry Research Journal**, v. 3, n. 4, p. 30–35, 2018.

TAVARES, P. R. L.; CASTRO, M. A. H. de; COSTA, C. T. F. da; SILVEIRA, J. G. P. da; ALMEIDA JR. F. J. B. de. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. **REM**, v. 62, n.2, p. 227-236, 2009.

TAVARES, P. R. L.; SILVEIRA, J. G. P. da; COSTA, C. T. F. da; *et al.* MAPEAMENTO DA VULNERABILIDADE À POLUIÇÃO DO AQUÍFERO RIO DA BATATEIRA, UTILIZANDO O MÉTODO GOD, CRATO-CE. **Águas Subterrâneas**, 2008. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23758>. Acesso em: 24 mar. 2022.

TRIOLA, Mario F. **Introdução á estatística**. Rio de Janeiro: LTC, 1999.

TROUDI, Nizar; HAMZAOUI-AZAZA, Fadoua; TZORAKI, Ourania; *et al.* Assessment of groundwater quality for drinking purpose with special emphasis on salinity and nitrate contamination in the shallow aquifer of Guenniche (Northern Tunisia). **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 192, n. 10, 2020.

TUCCI, C.E.M. **Impactos da variabilidade climática e do uso do solo nos recursos hídricos**. Brasília: ANA, 2002.

UDDIN, Md. Galal; MONIRUZZAMAN, Md.; QUADER, Mohammad Abdul; *et al.* Spatial variability in the distribution of trace metals in groundwater around the Rooppur nuclear power plant in Ishwardi, Bangladesh. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 7, p. 220–231, 2018.

USGS. **Contamination of Groundwater**. U.S. Geological Survey. Disponível em:

Usgs.gov. Acesso em: 24 maio 2021.

VASCONCELOS, Maiana Azevedo; OLIVEIRA, Iara Brandão de. CARACTERIZAÇÃO PRELIMINAR DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NO ESTADO DA BAHIA QUANTO AOS TEORES DE SULFATO. **Águas Subterrâneas**, 2017.

VERAS, Ana Odilia de Carvalho. **Impactos Socioambientais no Estuário do Rio Jaguaribe: o Caso da Cidade de Aracati-Ce**. Dissertação, Universidade Federal do Ceará, 2010. Disponível em: <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/16103>. Acesso em: 29 abr. 2022.

VIEIRA, Ângelo Trévia; FEITOSA, Fernando A. C; BENVENUTI, Sara Maria Pinotti. **Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará: DIAGNÓSTICO DO MUNICÍPIO DE ARACATI**. Fortaleza: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 1998. Disponível em: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/15783>.

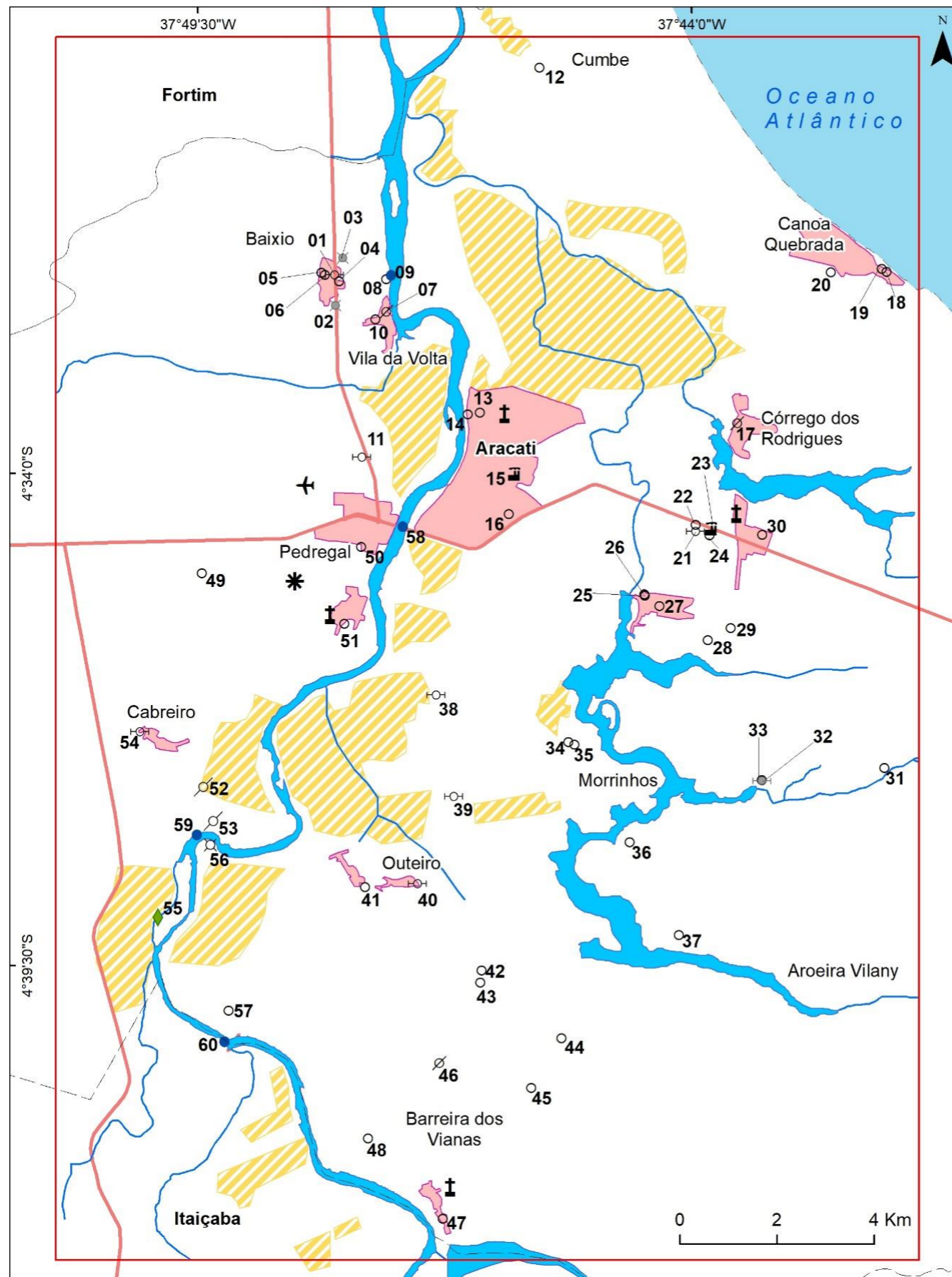
WALLER, Roger M. **Ground water and the rural homeowner**. Washington, D.C.: U.S. Dept. Of The Interior, 1988.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating first addendum**. 4. ed. [s.l.]: World Health Organization, 2017. Disponível em: <https://apps.who.int/iris/handle/10665/254637>. Acesso em: 22 abr. 2022.

WILLIAMS, A. T.; TUDOR, D. T. Temporal Trends in Litter Dynamics at a Pebble Pocket Beach. **Journal of Coastal Research**, v. 17, n. 1, p. 137–145, 2001.
WINTER, Thomas C; HARVEY, Judson W; FRANKE, O Lehn; *et al.* **Ground water and surface water: a single resource**. Denver, Colo.: U.S. Geological Survey, 1998.

ZABALA, M.E.; MANZANO, M.; VIVES, L. Assessment of processes controlling the regional distribution of fluoride and arsenic in groundwater of the Pampeano Aquifer in the Del Azul Creek basin (Argentina). **Journal of Hydrology**, v. 541, p. 1067–1087, 2016.

APÊNDICE A – MAPA DE PONTOS VISITADOS NA ÁREA DE ESTUDO



MAPA DE PONTOS VISITADOS EM CAMPO NA ÁREA DE ESTUDO



LEGENDA

- | | | |
|------------------|------------------------------|----------------------------|
| ○ Ativo | ● Coleta no rio | ~ Tributários |
| ⊘ Parado | ◆ Efluente de carcinicultura | Corpos d'água |
| ⊘ Abandonado | ■ Indústrias | Fazendas de carcinicultura |
| ⊘ Desativado | ✈ Aeroporto | Área urbana |
| ⊘ Destruído | ⊠ Cemitério | Limites municipais |
| ⊘ Obstruído | ✱ Lixão | Área de estudo |
| ⊘ Não Encontrado | | |

Fonte de dados: bases cartográficas de IPECE (2018), IBGE (2019) e © OpenStreetMap contributors.

APÊNDICE B – SCENARIO AND WATER SUPPLY DIAGNOSIS FOR CONSUMPTION IN THE MUNICIPALITY OF ARACATI, CEARÁ



Revista Brasileira de Recursos Hídricos
Brazilian Journal of Water Resources
Versão On-line ISSN 2318-0331
RBRH, Porto Alegre, v. 27, e33, 2022
Scientific/Technical Article

<https://doi.org/10.1590/2318-0331.272220220027>

Scenario and water supply diagnosis for human consumption in the municipality of Aracati, Ceará

Cenário e diagnóstico da oferta hídrica para o consumo humano no município de Aracati, Ceará

Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa¹ , Luzia Suerlange Araújo dos Santos Mendes¹ ,
Mickaelon Belchior Vasconcelos² , Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro¹ & Itabaraci Nazareno Cavalcante¹

¹Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, CE, Brasil

²Serviço Geológico do Brasil, Fortaleza, CE, Brasil

E-mails: joyceshantala@gmail.com (JSFOS), luzia.santos@nutec.ce.gov.br (LSASM), mickvasconcelos@yahoo.com.br (MBV),
ritasalgueiro@ufc.br (ARGNLS), itabaraciacavalcante@gmail.com (INC)

Received: March 25, 2022 - Revised: October 19, 2022 - Accepted: October 19, 2022

ABSTRACT

Aracati, a municipality in the State of Ceará, is experiencing water shortages. The unpredictability of rainfall and a lack of management of these resources worsen water scarcity. The work diagnosed water availability in the municipality to aid municipal water planning. The secondary data was precipitation, drilling wells, and water bodies mapped in Google Earth Pro®. The municipality presents a severe drought and has a poor water-to-land ratio. The 19 operating wells intended for human use have a daily output estimate sufficient to supply water to 65% of the local population. A further 23 wells are inactive, contributing another 20% to the groundwater supply deficit. Concerning water quality, there is fresh water in 23% of the wells, saline water in 25%, and brackish water in 52% of the wells. Therefore, it is critical to focus on managing and supporting projects for the sustainable use of water resources.

Keywords: Groundwater; Water body; Public supply.

RESUMO

Aracati, município do Estado do Ceará, apresenta problemas hídricos. A escassez de água é agravada pelas irregularidade de chuva e, também, pela falta de gestão desses recursos. O trabalho realizou um diagnóstico da disponibilidade hídrica no município fornecendo suporte no planejamento hídrico municipal. Utilizou-se os dados secundário de índices pluviométricos e poços de águas subterrâneas. O Google Earth Pro® foi usado para mapear as massas d'água. O município apresenta forte seca e baixa relação água-terreno. A avaliação de produção diária dos 19 poços ativos, destinados ao consumo humano, têm capacidade para abastecer 65% da população local. Outros 23 poços encontram-se desativados, causando um déficit de mais 20% da oferta hídrica subterrânea. Quanto a qualidade da água, 52% dos poços apresentam água salobra; 25%, água salgada; e 23% água doce. Portanto, ressalta-se a importância de gerir e promover iniciativas de uso sustentável dos mananciais hídricos.

Palavras-chave: Águas subterrâneas, Massas d'água, Abastecimento público.



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

1/10

INTRODUCTION

Brazil is a wealthy country regarding total water availability, but water scarcity is exacerbated by the spatial distribution of water, the unpredictability of rainfall, the growing demand for water, a lack of infrastructure, and a lack of public awareness. (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2020).

The country experienced a drought in 2017, affecting around thirty-eight million people. Around 80% of individuals impacted reside in the Northeast, and 55.5 percent of the total records are from Bahia, Ceará, and Pernambuco. Droughts and shortages afflicted more than twenty-two million people in Brazil in 2019, over eleven times the number of people affected by floods. Drought's effects are not always noticeable but tend to spread throughout the country. Drought's effects are broad and likely to happen nationwide (Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, 2018, 2020; Machado Neto et al., 2019).

Ceará's climate is affected by a precipitation regime characterized by variation in rainfall distribution both spatially and temporally (Souza Filho, 2018). Droughts have always been a concern for the State, particularly in the "Sertão Central" region, where the effects of water scarcity are more visible (Ceará, 2018).

Ceará has been experiencing one of the worst droughts ever recorded, with rainfall below the historical average since 2010, according to data from the *Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos* (FUNCEME) [Ceará Meteorology and Water Resources Foundation]. The low annual rainfall has resulted in a water crisis, threatening water availability in springs and reducing the volume of water bodies to the point where rivers are arid.

Groundwater supply becomes increasingly important during droughts. In Ceará, well drilling increased by 40% per year between 2012 and 2018. This water well deployment rate coincides with the last great drought, which lasted from 2012 to 2017 (Nunes & Medeiros, 2020). However, the wells' organization, management, and supervision are insufficient. If human activities and the inherent vulnerability of aquifers are not considered, human and environmental health are compromised (Uechi et al., 2016).

The water issue in Ceará is due to unpredictable rainfall patterns, high surface spring evaporation rates, and low crystalline rock storage capacity (Costa, 2022). The State's territory comprises a 70% crystalline basement (Silva et al., 2007); however, the coast of Ceará includes alluvial and coastal sediment formed by dune systems, paleodunes, and Barreira's formation, whose aquifer potential is high.

The Jaguaribe river estuary is located on Ceará's east coast and is part of the Low Jaguaribe hydrographic sub-basin, with the river serving as the State's main watercourse. Water sources generated by the basin's aquifer systems include the Potiguar sedimentary basin, alluvial deposit, crystalline rocks, and dunes (Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos, 2019).

Over 32 years, significant changes were observed in the coastal communities of Low Jaguaribe, with disordered urban growth, potentialized anthropic activities, and a lack of investment in basic sanitation by local or State governments (Borges, 2017; Oliveira, 2018). These modifications affect the properties of water resources, causing issues with both the supply and water demand of a certain quality and quantity (Lima et al., 2010).

Even though the dams and reservoirs are intended to boost water availability, given the region's climatic circumstances and causing water scarcity, they lead to a reduction in freshwater flow and, consequently, a significant saline intrusion in the Jaguaribe river estuarine region (Carvalho et al., 2017; Cavalcante, 2019). As a result, several effects occur, including changes in the hydrological regime and physicochemical quality of the water, nutrient retention by dams (Rios, 2018; Braga & Matushima, 2021), upstream mangrove migration following saline intrusion, and riverbank erosion due to a lack of sediment retained upstream of the estuary (Godoy & Lacerda 2013, 2014; Borges, 2017).

The municipality of Aracati, Ceará, developed along the Jaguaribe river's banks roughly fifteen kilometers upstream from the river's mouth. Surface water salinization in this area makes it unsuitable for irrigation, drinking, and other uses. In order to minimize this issue, it is vital to use groundwater for municipal supplies (Bezerra Diniz, 2018).

The involvement of public authorities in the effective and fully implemented management to ensure the municipal water supply is of the utmost importance. The quantity and quality of available surface and groundwater for municipal water supply must be monitored. In light of this, this study aimed to examine the water availability scenario in the municipality of Aracati-CE and contribute to research that can aid in managing these crucial resources.

MATERIALS AND METHODS

The study area's characteristics

Aracati is a municipality near the coast in the northeastern part of the State of Ceará. It covers an area of 1,227.197 square kilometers (Figure 1) (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2018). In the 2010 census, the resident population was 69,159 people, with a predicted population of 75,392 in 2020 (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021).

Aracati also has The Municipal Human Development Index (IDHM) of 0.655 (Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil, 2020). The municipality ranks 166th in the State, with only 4.5 percent of households having adequate sanitation (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2021). The primary economic activities include tourism, fishing, agriculture, sand, clay, diatomite, and oil mining (Rangel, 2019).

Aracati has an irregular rainfall regime, with a short rainy season (January to April) and an average rainfall of 935.9 mm, as well as a semi-arid tropical climate with average temperatures ranging from 26 to 28 degrees Celsius (Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará, 2018).

Sedimentary covers and alluvial deposits are two distinct hydrogeological domains in the region. The Barreiras Formation sediments constitute a zone with pronounced faciological variation, with more and fewer permeability levels intercalations, resulting in different hydrogeological parameters depending on the local context. These differences result in various groundwater productive potentialities. This local setting lends the Barreiras Formation aquitard features. Despite this, its utilization is quite advanced in some regions.



Figure 1. Location map of the municipality of Aracati, Ceará.

On the other hand, the dunes are a geological unit with considerable aquifer potential, with flows of 5 to 10 m³/h. Recent sandy-clay sediments occur along the channels of the major rivers and streams that drain the region, making alluvial deposits a viable alternative as a source with high relative importance from a hydrogeological standpoint. In most cases, the high permeability of sandy terms compensates for their thin thicknesses, resulting in large flows (Vieira et al., 1998).

Procedures for methodology

The municipality of Aracati's surface and groundwater supplies, as well as essential study topics like climate, geology, and saline intrusion in surface waters, were reviewed in the literature. Following that, the acquisition of secondary data from government platforms and public entities was completed: data on rainfall for the municipality throughout time from FUNCEME; data sheet of wells registered from *Sistema de Informação de Águas Subterrâneas* (SIAGAS) [Groundwater Information System]; vector data on the municipality of Aracati's delimitation from IBGE.

The pluviometry data utilized in this study aided in developing the region's hydroclimatological balance. In addition, using the Google Earth Pro® software, which is unrestricted, polygons were demarcated to map and classify the municipality's aquatic bodies. The polygons determine the following information: reservoir type, latitude, longitude, perimeter (km), and area (km²).

The image utilized is from the second half of 2021, and the viewpoint is from a height of about 1.4 kilometers.

The database from the SIAGAS has the following data important for this work: coordinates, the well's location and usage, the well's depth, stability flow, water analysis date, and electrical conductivity (EC). The EC product in natural waters and a good factor for a hot climatic zone, whose value is 0.65, were used to obtain total dissolved solids (TSD) values (Hem, 1985; Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2020).

The recorded values of the physical-chemical parameters for each well in the SIAGAS database are on different analysis dates, making it difficult to get sufficient information for an interpretation when considering the same period of data collection in the field.

Sturges' (1926) statistical approach was used to analyze the data, which allowed the number of classes, amplitudes, and interval sizes to be defined to conduct a consistent study of the data.

The data was entered into a Georeferenced Information System (GIS) and used to create thematic maps with spatial software. The Inverse Distance Weighting (IDW) interpolation method was used to create the depth map as a raster. Because the distribution of wells in the municipality is well-spatialized, the values were extrapolated and clipped with the municipal boundary.

The acquired data were processed to assess the region's precipitation conditions, the quantity of existing surface water bodies, the supply potential from surface water sources, and the groundwater quality. This data will be helpful for municipal water planning and future research on monitoring and managing water

resources in the region. Similar research was conducted for the State of Piauí (Vasconcelos et al., 2014) and the municipality of Russas, Ceará (Mendes et al., 2021).

The study raised essential questions about regional water supply issues and the importance of managing water sources.

RESULTS AND DISCUSSION

Analysis of pluviometry data

There is just one rainfall station in the municipality of Aracati: The Aracati station, whose data was used to create the 46-year history series. The latest 40 years (1981–2020) were used in this study. The rainy season in this series has an average annual precipitation of 918.65 mm, with the highest rainfall of 2,654.10 mm recorded in 1985, and the lowest annual rainfall of 220 mm recorded in 1993 (Figure 2).

In 2012, the State of Ceará experienced the worst recent drought, with accumulated precipitation of just 363.8 millimeters. This situation contributed to many of the population suffering from water access. In 91% of the cities in Ceará, the water crisis was severe (Costa, 2022). From 2012 to 2017, the State of Ceará had many municipalities in a state of emergency owing to drought (Machado Neto et al., 2019). Throughout this period, no considerable precipitation occurred, which is harmful to the recharge of the reservoirs (Costa, 2022).

The State of Ceará has an average annual precipitation value of roughly 800 mm (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2020). In this regard, the municipality is clearly above the state average. The rainy season in the municipality has been concentrated between January and July for the 40-year history series, accounting for more than 97% of the annual precipitation (Figure 3).

July marks the start of the dry season, which lasts until December. This scenario has an impact on the annual precipitation in the region. The rainfall indices were thus categorized into seven intervals using the Sturges method to identify the classes (Table 1).

The municipality of Aracati has experienced drought for the past 11 years, with the most severe years being 2012 and 2016, classified as severe droughts. The region saw five rainfall events that fell into the typical severe rainy (in 1984, 1986, and 1988) and heavy rainfall (in 1985 and 2009).

The data indicate that over half of the season ranges from severe drought to normal drought and low annual precipitation rates range from 220 to 942.1 mm. Prolonged periods of drought exacerbate the region's water crisis. Surface waters in certain regions tend to dry up or reach critical levels due to drought, depending on the size of the water bodies (Mendes et al., 2021).

Hydrography and water body mapping

The water bodies mapped in the municipality total 858 and are dispersed throughout the territory. These water bodies include surface waters, weirs, anthropogenic reservoirs (e.g., aquaculture ponds), and lagoons. The municipality has 93.7% of these water bodies concentrated on the alluvial plain. Water bodies account for

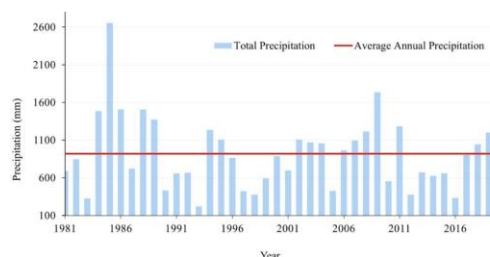


Figure 2. The historical series of annual rainfall averages from 1981 through 2020 in Aracati (obtained from Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2020).

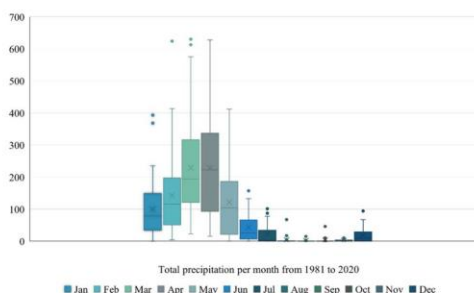


Figure 3. Precipitation (mm) in Aracati for the 40-year history series (obtained from Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, 2020).

Table 1. Frequency histogram (obtained from FUNCEME's data 2020).

Precipitation (mm)		Precipitation (mm)	Classification	%
220	f ₁	460.7	Severe drought	20
460.7	f ₂	701.4	Moderate drought	22.5
701.4	f ₃	942.1	Normal drought	12.5
942.1	f ₄	1182.8	Normal rainy	20
1182.8	f ₅	1423.5	Moderate rainy	12.5
1423.5	f ₆	1664.2	Severe rainy	7.5
1664.2	f ₇	2654.1	Rainy	5

4.12% of the municipality's total area in the research area. Water bodies cover an area ranging from 0.016 to 731.412 hectares. Based on the coverage of the areas and integrated into the GIS to examine the distribution of water bodies, four groups were formed using the Sturges technique (Figure 4).

The map shows the classification of slightly more than 90% of the water bodies in the research area, with a predominance of very small and small bodies. This observation shows that the municipality of Aracati frequently has a water crisis during dry spells, which jeopardizes the water potability of the municipality's water resources and, consequently, the quality of life for the local population. Natural reservoirs account for around 40% of the

municipality's reservoirs, with the remainder being fabricated reservoirs used for commercial (shrimp and fish farming) and recreational purposes (Figure 5).

As noted by Carvalho et al. (2017) and Cavalcante (2019), dams and reservoirs increase the retention of saline water in the Jaguaribe river estuary, particularly during drought years, compromising the recharge of surface springs and influencing the physicochemical quality of the water. This situation raises concerns about water availability for urban supply from natural springs.

The factors (low precipitation, scarcity, water crisis, and salinization of the waters) that have been examined thus far highlight the significance of managing water resources, and the rational exploitation of underground springs meets the population's needs and promotes sustainable development in the municipality.

Data analysis from the SIAGAS

The physical characteristics of wells

A survey conducted in the municipality of Aracati found 594 wells, with a well's density of close to 0.5 wells per km². In the database, 547 wells present final depth information: 42% of the wells range from 30 to 60 meters; 24% are shallow wells,

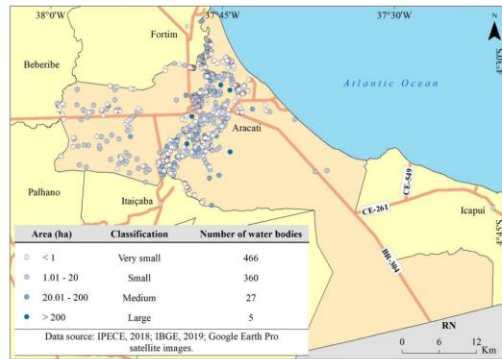


Figure 4. Surface classification of water bodies as a function of hectares.

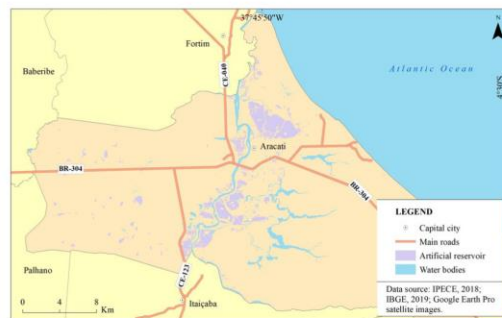


Figure 5. The Aracati's water bodies map.

ranging from 5 to 30 meters; 23% range from 60 to 100 meters; 4 are deeper wells with more than 100 meters; 8% present no data (Figure 6). According to the estimated population in 2021, there are 127 residents per well in Aracati.

There are 583 tubular wells registered with SIAGAS, ten dug wells, and one point type well. The hydrogeological distribution of these wells shows that five are in the fissure domain, thirty-six in the karst domain, seventy-nine in the sedimentary domain, and nine in multiple domains. Lithological profiles are present in 22% of these registered wells.

The graph in Figure 7 generated using SIAGAS data depicts the current State of the region's catchment works. Only 52 percent of the municipality's 594 wells are operational.

The most common use for wells is irrigation (49%), followed by industrial water supply (17%), livestock (14%), recreation (8%), urban water supply (5%), and domestic supply (2%). Some wells do not provide information (5 percent). Irrigation wells can be found to the east of the municipality due to a lack of surface water bodies, increasing farmers' demand for groundwater.

Well productivity in the Aracati municipality

The average daily water consumption per person in the country was 154.9 liters in 2018, an increase of 0.5% over 2016. Consumption in the Northeast ranged from 115.4 liters per person per day to 182 liters per person per day in the Southeast during

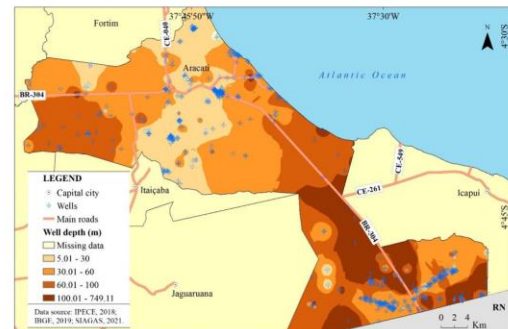


Figure 6. The spatial distribution of SIAGAS-registered wells in Aracati.

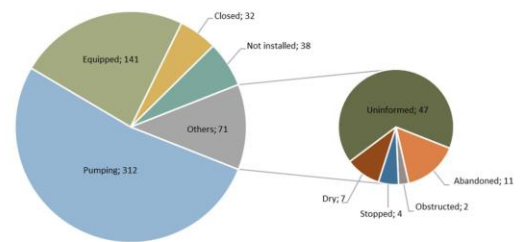


Figure 7. The recorded situation of the wells, Aracati-CE (obtained from Serviço Geológico do Brasil, 2021).

Scenario and water supply diagnosis for human consumption in the municipality of Aracati, Ceará

the same year (Brasil, 2005). A total daily output of 8,700.2 m³/day is required for the municipality to supply the population based on consumption in the Northeast.

The total daily production of the Aracati wells was calculated, as well as the number of people who could be served in the municipality, using information from the wells' constructive profiles: a) the situation of the wells, filtered by wells in use (pumping); b) the purposes of abstracted water, which are intended for human consumption and registered as urban supply and domestic supply; c) well stability flow.

In Figure 7, there are 312 wells in operation, but only nineteen are intended for human use and have registered flows (Table 2). *Companhia de Água e Esgoto do Ceará* (CAGECE) [The Water and Sewage Company of the State of Ceará] provides fourteen (14) of these wells, which operate 24 hours a day and have a total flow of 4,963.4 m³/day, enough to supply up to 43,011 people (57%).

Obtaining information about the pumping time was impossible for the five remaining wells. Therefore, an arbitrary analysis of possible operation scenarios with production values and the number of inhabitants served is presented in Table 3.

In the worst-case scenario, the wells operate 4 h/day, providing up to 330.4 m³/day and supplying more than 2 thousand people. In the intermediate scenario, the wells operate 6 h/day, producing 495.6 m³/day and supplying more than 4 thousand

people. The municipality gains almost 8% of the water supply to the population in the scenario for 8 h/day with operating wells. Therefore, the 19 currently active wells can supply up to 65% of the population, considering the average daily consumption of 115.4 liters/inhabitant/day.

A second evaluation was performed for deactivated wells for human consumption (both equipped and uninstalled). There are twenty-three wells in all. These wells were also evaluated in the context of three alternative groundwater exploration scenarios, as shown in Table 4.

The short-duration scenario (4h) contributes to the supply of more than 7 thousand people, adding 75% of the municipal population to the already active wells. The medium duration scenario (6 hours) can supply 15.3% of the population. In the best scenario, it is estimated that the municipality's maximum water supply would increase by about 1,770.8 m³/day, or about 20% of the municipality's minimum water supply. In this way, the active wells and possible ones could supply up to 85% of the population of Aracati.

The physicochemical characteristics of groundwater collected in the municipality

According to the SIAGAS database of wells registered for the municipality, there were ninety-four records of water analysis in the second semester with electrical conductivity (EC) values in 1998. Figure 8 depicts the spatial distribution of EC values in the municipality.

The electrical conductivity (EC) values range from 140 to 55000 µS.cm⁻¹, with the highest concentration in an alluvial deposit well. The aquifer type and the presence of pollutants from anthropogenic sources affect the ion concentration in water. Even though the collected database lacks information about aquifer types, the implications can be generated and related to depth data (Figure 6) and information about geology (Figure 8).

The easternmost alluvial deposits and dune regions have the lowest EC values. As can be observed, the values in these regions do not go above 1400 µS.cm⁻¹. These wells may be drawing water from these porous aquifers, as they have depths ranging from 5 to 30 meters in alluvial deposits and 30 to 60 meters in dune areas.

There are wells of varying depths, reaching over 100 m. These wells may draw water from the Barreiras or Jandaira aquifer, or both, and dissolve salts that increase the conductivity value.

Table 2. Flow stabilization of CAGECE's active wells intended for urban supply (obtained from SIAGAS data 2021).

ID	Number of registered wells	Flow (m ³ /h)	Flow (m ³ /day)
01	2300005158	10.28	246.72
02	2300005159	12	288
03	2300005194	8.52	204.48
04	2300005195	8.8	211.2
05	2300005196	8.34	200.16
06	2300005197	8.42	202.08
07	2300005198	7.2	172.8
08	2300005199	8.25	198
09	2300019950	15	360
10	2300019951	12	288
11	2300022125	18	432
12	2300022126	30	720
13	2300022127	30	720
14	2300022128	30	720

Source: Serviço Geológico do Brasil (2021).

Table 3. The five operating domestic supply wells' stability flow (obtained from SIAGAS' data 2021).

ID	Number of registered wells	Flow (m ³ /h)	(4h/day)	(6h/day)	(8h/day)
15	2300031345	16.5	66	99	132
16	2300031347	16.6	66.4	99.6	132.8
17	2300031353	16.5	66	99	132
18	2300031355	16.5	66	99	132
19	2300036664	16.5	66	99	132
Summation			330.4	495.6	660.8
Inhabitants supplied per day			2,863	4,295	5,726
Percentage of people served (%)			3.8%	5.7%	7.6%

Source: Serviço Geológico do Brasil (2021).

Table 4. “Stability flow” for deactivated urban and domestic supply wells (not installed and equipped) in the three scenarios (obtained from SIAGAS data 2021).

ID	Number of registered wells	Flow (m ³ /h)	(4h/day)	(6h/day)	(8h/day)
20	2300001912	10	40	60	80
21	2300001914	10	40	60	80
22	2300005139	1.2	4.8	7.2	9.6
23	2300005143	6.5	26	39	52
24	2300005145	1.5	6	9	12
25	2300005146	1	4	6	8
26	2300005150	3	12	18	24
27	2300005164	12	48	72	96
28	2300005167	5	20	30	40
29	2300005185	3	12	18	24
30	2300005187	1.2	4.8	7.2	9.6
31	2300005189	3.5	14	21	28
32	2300005190	3	12	18	24
33	2300005193	35	140	210	280
34	2300005274	7.54	30.16	45.24	60.32
35	2300005301	30	120	180	240
36	2300005302	30	120	180	240
37	2300005308	5	20	30	40
38	2300005313	2.6	10.4	15.6	20.8
39	2300010651	2.4	9.6	14.4	19.2
40	2300010652	7.92	31.68	47.52	63.36
41	2300021747	20	80	120	160
42	2300021748	20	80	120	160
Summation			885.44	1328.16	1770.88
Inhabitants supplied per day			7,673	11,509	15,346
Percentage of people served (%)			10.2	15.3	20.4

Source: Serviço Geológico do Brasil (2021).

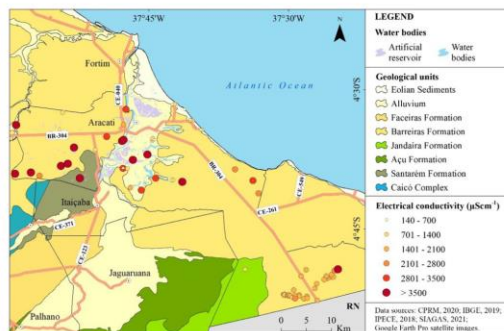


Figure 8. Electrical conductivity spatial distribution in the region (obtained from Serviço Geológico do Brasil, 2021).

The EC concentration ranges from 1400 to 2800 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$, with a sample exceeding 3500 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$ in the municipality’s easternmost area, close to the state border.

The western portion of the municipality has a higher concentration of EC. This increase may be related to the crystalline aquifer catchment, as these are deeper wells over 60 m deep. However, there are shallower wells located in the alluvial aquifer that have high EC. Due to the high EC concentrations, this

situation necessitates studies such as physical-chemical analysis of the groundwater, the study of stable isotopes to analyze the interaction of natural surface water with groundwater, and water quality monitoring.

The following characteristics are essential in evaluating the current and future scenarios of aquifers affected by salinity: (a) salinity sources, (b) processes that affect the geochemistry of affected aquifers, (c) saltwater movement, and (d) dimension of interaction with groundwater systems (Keesari & Dauji, 2021). Groundwater in coastal areas is susceptible to salinization by seawater intrusion. This situation makes groundwater unsuitable for human consumption or irrigation (Gopinath et al., 2019; Nogueira et al., 2019).

As observed, in Aracati, the well waters in the dune zone that are more susceptible to marine intrusion have values up to 1400 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$; on the other hand, wells situated in the inner area of the municipality have much higher conductivities. This context opens debates and investigations about the infiltration of waters altered by anthropogenic activity.

The Ministry of Health Ordinance N° 888/21 does not present reference content for EC. However, the conversion of EC to Total Dissolved Solids (TDS) shows that these are predominantly ionically rich waters. Twenty-six samples of water from the analyzed wells, intended for domestic and urban supply, have TDS concentrations higher than the maximum allowed by Ordinance N° 888, which is 500 mg/L (Brasil, 2021).

Table 5. Water classification according to estimated TSD values established by CONAMA Resolution N° 357/2005 (Brasil, 2005).

Intervals	Classification
0 a 500 mg/L	freshwater
500 a 1.500 mg/L	brackish water
> 1.500 mg/L	saltwater

The TSD intervals for classification are in Table 5. According to the water classification for Aracati in 1998, 52% of the ninety-four wells with documented values contain brackish water, 25 percent salt water, and 23 percent fresh water.

Due to the domination of sedimentary lands, the municipality of Aracati has high hydrogeological potential. In addition, the low investment in basic urban sanitation and the high natural vulnerability of sedimentary aquifers change the physical-chemical characteristics of water resources, causing problems with both water quality and quantity.

Groundwater quality is protected by monitoring physical-chemical and biological parameters, making it necessary to analyze its use and minimize health risks. Natural processes, such as geological formations, substantially impact groundwater quality fluctuations, but human activities can also significantly impact (Selvakumar et al., 2017).

CONCLUSIONS

Prolonged droughts are a defining feature of the municipality of Aracati, as shown by the analysis of the historical series (1981-2020). The study shows that only 4.12% of surface springs cover the entire municipality, and just over 90% of water bodies are very small and small bodies. The scarcity can seriously jeopardize the recharge of water resources and promotes a collapse in the water supply and the physicochemical quality of water.

Surface water distribution in the municipality of Aracati demonstrates the representativeness of water bodies in the municipality's economic development due to fish and shrimp farming. With successive droughts, strategic wells must be deployed to increase supply and demand and promote initiatives for the sustainable use of underground and surface water resources.

The study of the arbitrary well pumping scenarios enabled us to conclude that the municipality can ensure that up to 85% of the population can be provided with minimal daily consumption (115.4 liters per person per day) with sufficient planning, control, and monitoring of the wells.

As an estuarine region, Aracati presents saline intrusion in the groundwater. This observation is reflected in the water quality, where 52% of the wells present brackish water, 25% salt water, and only 23% fresh water. Besides, there are anthropic contributions that can cause significant variations in salinity.

Overall, the municipality has the potential for urban supply; however, some wells capture compromised water that needs adequate treatment for consumption. This observation highlights the importance of managing water resources to satisfy the residents' demands and monitoring water quality to avoid health problems.

The work laid a solid foundation for the municipality's water management and established boundaries for sustainability.

Since our work will be based on secondary data, it is advised that the information on field activities be updated to depict the current status of the municipality.

The information acquired can then be used in field activities for various purposes, including water resource preservation, risk assessment of water bodies and reservoir structure, and well recovery.

ACKNOWLEDGEMENTS

The authors would like to thank the Federal University of Ceará's Department of Geology, the Geoprocessing Laboratory of Ceará (GEOCE), and the Graduate Program in Geology for providing the necessary infrastructure, as well as the *Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico* (CNPq) [National Council for Scientific and Technological Development] and the *Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior* (CAPES) [Coordination for the Improvement of Higher Education Personnel].

REFERENCES

- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2018). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2018: informe anual*. Retrieved in 2021, October 18, from <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>
- Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico – ANA. (2020). *Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2020: informe anual*. Retrieved in 2021, October 18, from <https://www.snirh.gov.br/portal/centrais-de-conteudos/conjuntura-dos-recursos-hidricos>
- Atlas do Desenvolvimento Humano no Brasil – AtlasBR. Programa das Nações Unidas para o Desenvolvimento – PNUD. Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada – Ipea. Fundação João Pinheiro – FJP. (2020). *Ranking*. Retrieved in 2021, October 4, from <http://www.atlasbrasil.org.br/ranking>
- Bezerra Diniz, J. N. (2018). Water supply in northern Brazil: hydric management in Aracati (19th century). *Water and Landscape*, 11, 10-21. <http://dx.doi.org/10.17561/at.11.2998>.
- Borges, R. S. (2017). *Caracterização limnológica do estuário do Rio Jaguaribe-CE e do estuário do Rio Parnaíba-PI. Brasil* (Undergraduate dissertation). Federal University of Ceara, Fortaleza. Retrieved in 2021, October 20, from <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/32957>
- Braga, R. R., & Matushima, E. R. (2021). Vale do Jaguaribe: um oásis em perigo no semiárido brasileiro—Revisão sistemática sobre contaminação ambiental e potenciais danos à bacia e seus usuários. *Revista de Geociências do Nordeste*, 7(2), 24-34. <http://dx.doi.org/10.21680/2447-3359.2021v7n2ID24607>.
- Brasil. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. (2005, 18 de março). Resolução CONAMA n° 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.

- Brasil. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. (2021, 7 de maio). Portaria GM/MS nº 888. de 4 de maio de 2021. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017. para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília.
- Carvalho, A. C. O., Marins, R. V., Dias, F. J. S., Rezende, C. E., Lefèvre, N., Cavalcante, M. S., & Eschrique, S. A. (2017). Air-sea CO₂ fluxes for the Brazilian Northeast continental shelf in a climatic transition region. *Journal of Marine Systems*, 173, 70-80. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmarsys.2017.04.009>.
- Cavalcante, M. S. (2019). *Caracterização da matéria orgânica natural no estuário do rio Jaguaribe em diferentes estações climáticas em anos de seca prolongada* (PhD thesis). Federal University of Ceara, Fortaleza. Retrieved in 2021, January 5, from <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/49622>
- Ceará. Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará – SRHCE. (2018). *Plano de ações estratégicas de recursos hídricos do Ceará*. Retrieved in 2021, November 10, from <https://www.srh.ce.gov.br>
- Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos – COGERH. (2019). *Baixo Jaguaribe*. Retrieved in 2021, October 28, from <https://portal.cogerh.com.br/baixo-jaguaribe/>
- Costa, A. (2022). *Pior seca recente no CE completa 10 anos: “era quase impossível manter alimento e água para o gado” - Ceará*. Retrieved in 2022, July 18, from <https://diariodonordeste.verdesmares.com.br/ceara/pior-seca-recente-no-ce-completa-10-anos-era-quase-impossivel-manter-alimento-e-agua-para-o-gado-1.3192293>
- Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos – FUNCEME. (2020). *Calendário de chuvas*. Retrieved in 2021, October 6, from <http://www.funceme.br/>
- Godoy, M. D. P., & Lacerda, L. D. (2013). Changes in estuarine islands and rainfall trends in the Jaguaribe river watershed, Ceará state, Brazil. *Arquivos de Ciências do Mar*, 46(2), 47-54. <https://doi.org/10.32360/acmar.v46i2.902>.
- Godoy, M. D. P., & Lacerda, L. D. (2014). River-Island morphological response to basin land-use Change within the Jaguaribe river estuary. NE Brazil. *Journal of Coastal Research*, 30(2), 399-410. <http://dx.doi.org/10.2112/JCOASTRES-D-13-00059.1>.
- Gopinath, S., Srinivasamoorthy, K., Saravanan, K., & Prakash, R. (2019). Discriminating groundwater salinization processes in coastal aquifers of southeastern India: geophysical, hydrogeochemical and numerical modeling approach. *Environment, Development and Sustainability*, 21(5), 2443-2458. <http://dx.doi.org/10.1007/s10668-018-0143-x>.
- Hem, J. D. (1985). Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water. *Water Supply Paper*, 2254, <http://dx.doi.org/10.3133/wsp2254>.
- Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. (2021). *Cidades e estados: Aracati*. Retrieved in 2021, October 4, from <https://cidades.ibge.gov.br/>
- Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará – IPECE. (2018). *Perfil municipal 2017 Aracati*. Retrieved in 2021, October 4, from <https://www.ipece.ce.gov.br/perfil-municipal/>
- Keesari, T., & Dauji, S. (2021). Groundwater salinization processes: pitfalls of inferences from Na⁺/Cl⁻ versus Cl⁻ correlation plots. *Environmental Geochemistry and Health*, 43(2), 949-969. PMID:32588160. <http://dx.doi.org/10.1007/s10653-020-00622-2>.
- Lima, A., Cruz, F., Cavalcante, L., Chaves, L., Junior, M., & Santos, V. (2010). A gestão da oferta hídrica no Estado do Pará e seus aspectos condicionantes. *RBRH*, 15(3), 69-83. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrh.v15n3.p69-83>.
- Machado Neto, E. P., Oliveira, F. L. S., & Cruz, M. L. B. (2019). Seca no semiárido cearense: espacialização dos decretos de emergência dos eventos 2012 a 2017. *Revista da Casa da Geografia de Sobral*, 21(2), 1254-1267. <http://dx.doi.org/10.35701/rcgs.v21n2.483>.
- Mendes, L. S. A. S., Silva Neto, T. A., Sousa, J. S. F. O., Silva Neto, C. Â., Cavalcante, I. N., Vanconcelos, M. B., Braga, E. A. S., Girão, F. A. L., & Salgueiro, A. (2021). Diagnóstico da oferta hídrica do município de Russas (CE): uma análise descritiva como subsídio à gestão sustentável dos recursos hídricos. *Revista Brasileira de Geografia Física*, 14(3), 1612. <http://dx.doi.org/10.26848/rbgf.v14.3.p1612-1625>.
- Nogueira, G., Stigter, T. Y., Zhou, Y., Mussa, F., & Juízo, D. (2019). Understanding groundwater salinization mechanisms to secure freshwater resources in the water-scarce city of Maputo, Mozambique. *The Science of the Total Environment*, 661, 723-736. PMID:30684840. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.12.343>.
- Nunes, L. F. C. V., & Medeiros, P. H. A. (2020). Análise histórica da severidade de secas no Ceará: efeitos da aquisição de capital hidráulico sobre a sociedade. *Revista de Gestão de Água da América Latina*, 17(1), 18. <http://dx.doi.org/10.21168/rega.v17e18>.
- Oliveira, H. P. V. (2018). *Evolução do uso e ocupação dos sistemas ambientais de municípios costeiros do baixo Jaguaribe-Ceará (1984 -2016): aplicação de geotecnologias para subsidiar o ordenamento territorial* (PhD thesis). Universidade Federal do Ceará, Fortaleza. Retrieved in 2021, November 24, from <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/35583>
- Rangel, K. L. (2019). *Mitigação dos impactos socioambientais nos empreendimentos eólicos: o caso de Icapuí/CE* (MSc thesis). Federal University of Ceara, Fortaleza. Retrieved in 2021, November 24, from <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/50442>
- Rios, J. H. L. (2018). *Distribuição e fracionamento geoquímico de metais em sedimentos estuarinos do semiárido brasileiro sob diferentes estações climáticas* (MSc thesis). Federal University of Ceara, Fortaleza. Retrieved in 2021, November 24, from <http://www.repositorio.ufc.br/handle/riufc/32410>
- Selvakumar, S., Chandrasekar, N., & Kumar, G. (2017). Hydrogeochemical characteristics and groundwater contamination in the rapid urban

development areas of Coimbatore, India. *Water Resources and Industry*, 17, 26-33. <http://dx.doi.org/10.1016/j.wri.2017.02.002>.

Serviço Geológico do Brasil – SGB. (2021). *Sistema de Informações de Águas Subterrâneas - SLAGAS*. Retrieved in 2021, November 24, from <https://siagasweb.cprm.gov.br>

Silva, F. J. A., Araújo, A. L., & Souza, R. O. (2007). Águas subterrâneas no Ceará – poços instalados e salinidade. *Revista Tecnologia*, 28(2), 136-159. Retrieved in 2021, November 24, from <https://periodicos.unifor.br/tec/article/view/52/4461>

Souza Filho, F. A. (2018). *Estudo setorial especial: recursos hídricos*. Ceará 2050. Retrieved in 2021, October 4, from <http://www.ceara2050.ce.gov.br/>

Sturges, H. A. (1926). The choice of a class interval. *Journal of the American Statistical Association*, 21(153), 65-66. <http://dx.doi.org/10.1080/01621459.1926.10502161>.

Uechi, D. A., Gabas, S. G., & Lastoria, G. (2016). Análise de metais pesados no Sistema Aquífero Bauru em Mato Grosso do Sul. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, 22(1), 155-167. <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522016142430>.

Vasconcelos, M. B., Sousa, N. G., Genaro, D. T., Luz, C. A., & Tupinambá, M. K. F. (2014). Histórico das Perfurações de Poços Tubulares no Estado do Piauí. *Revista de Geologia*, 27(2), 111-126.

Vieira, A. T., Feitosa, F. A. C., & Benvenuti, S. M. P. (1998). *Programa de recenseamento de fontes de abastecimento por água subterrânea no estado do Ceará: diagnóstico do município de Aracati*. Repositório Institucional

de Geociências - CPRM. Retrieved in 2021, November 10, from <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/16041>

Authors contributions

Joyce Shantala Fernandes de Oliveira Sousa: Conceptualization; data acquisition and analysis; interpretation of results; paper writing and formatting of the article.

Luzia Suerlange Araújo dos Santos Mendes: Manuscript review and writing.

Mickaelon Belchior Vasconcelos: Contribution to the concept and methodology; supervision and review of work steps.

Ana Rita Gonçalves Neves Lopes Salgueiro: Supervision, manuscript review and writing.

Itabaraci Nazareno Cavalcante: Supervision, manuscript review and writing.

Editor-in-Chief: Adilson Pinheiro

Associated Editor: Michael Mannich

**APÊNDICE C – TABELA DE IDENTIFICAÇÃO DOS PONTOS E DAS AMOSTRAS
DE ÁGUA COLETADAS**

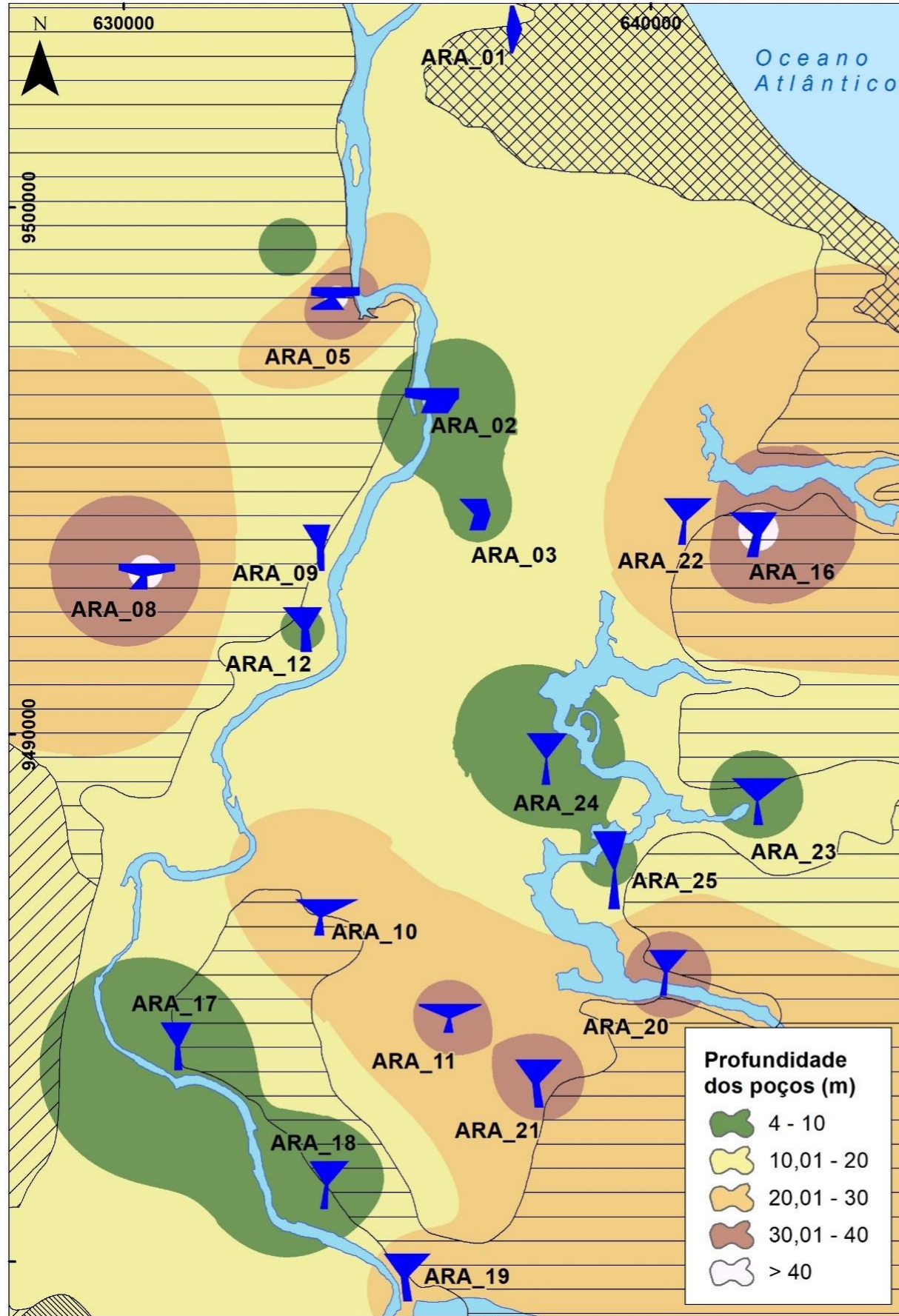
Identificação do ponto	Identificação da amostra	Local de coleta	Data da coleta	UTME	UTMN	Localidade
Ponto 01	-	-	-	633177	9499224	Baixio
Ponto 02	-	-	-	633191	9498584	Baixio
Ponto 03	-	-	-	633342	9499560	Volta (povoado)
Ponto 04	ARA_07	Poço	28/10/20 13:45	633260	9499091	Baixio
Ponto 05	-	-	-	632896	9499271	Baixio
Ponto 06	-	-	-	632965	9499227	Baixio
Ponto 07	-	-	28/10/20 12:20 *	634232	9498458	Vila da Volta
Ponto 08	-	-	-	634228	9499135	
Ponto 09	ARA_06	Rio	28/10/20 12:55	634340	9499218	
Ponto 10	ARA_05	Poço	28/10/20 12:20	634013	9498313	Vila da Volta
Ponto 11	-	-	-	633731	9495473	Pedregal
Ponto 12	ARA_01	Poço	28/10/20 9:20	637390	9503498	Cumbe
Ponto 13	-	-	-	636158	9496393	Centro - Aracati
Ponto 14	ARA_02	Poço	28/10/20 10:40	635916	9496357	Centro - Aracati
Ponto 15	-	-	-	636873	9495115	Centro - Aracati
Ponto 16	ARA_03	Poço	28/10/20 11:10	636754	9494302	Centro - Aracati
Ponto 17	-	-	28/10/20 0:00*	641459	9496164	Córrego dos Rodrigues
Ponto 18	-	-	-	644537	9499291	Canoa Quebrada
Ponto 19	-	-	-	644437	9499349	Canoa Quebrada
Ponto 20	-	-	-	643394	9499277	Canoa Quebrada
Ponto 21	-	-	30/10/20 8:40*	640611	9493942	Alto da Cheia
Ponto 22	ARA_22	Poço	31/10/20 8:40	640604	9494081	Alto da Cheia
Ponto 23	-	-	-	640924	9493988	Alto da Cheia
Ponto 24	-	-	-	640888	9493864	Alto da Cheia
Ponto 25	-	-	-	639561	9492620	Cajueiro
Ponto 26	-	-	-	639552	9492643	Cajueiro
Ponto 27	-	-	-	639860	9492409	Cajueiro

Ponto 28	-	-	-	640856	9491701	
Ponto 29	-	-	-	641329	9491952	
Ponto 30	ARA_16	Poço	29/10/20 14:45	641980	9493873	COAB
Ponto 31	-	-	-	644497	9489072	Tanque Salgado
Ponto 32	-	-	-	641978	9488808	Tanque Salgado I
Ponto 33	ARA_23	Poço	30/10/20 10:35	641965	9488822	Tanque Salgado I
Ponto 34	ARA_24	Poço	30/10/20 10:55	637988	9489609	Timbaúba
Ponto 35	-	-	-	638108	9489554	Timbaúba
Ponto 36	ARA_25	Poço	30/10/20 11:30	639243	9487544	Morrinhos
Ponto 37	ARA_20	Poço	30/10/20 11:45	640264	9485634	Aroeira Vilany
Ponto 38	-	-	28/10/20 16:35*	635259	9490572	Albuquerque
Ponto 39	-	-	28/10/20 16:45*	635630	9488490	Canapum
Ponto 40	-	-	-	634877	9486686	Outeiro
Ponto 41	ARA_10	Poço	28/10/20 17:10	633796	9486616	Tábua Lascada
Ponto 42	-	-	-	636200	9484906	Venâncio
Ponto 43	ARA_11	Poço	28/10/20 17:45	636167	9484652	Venâncio
Ponto 44	ARA_21	Poço	29/10/20 18:10	637845	9483507	Cantinho de Cima
Ponto 45	-	-	29/10/20 18:00*	637222	9482483	Manipussa
Ponto 46	-	-	-	635323	9482993	Córrego dos Gondins
Ponto 47	ARA_19	Poço	29/10/20 17:30	635392	9479788	Barreira dos Vianas
Ponto 48	ARA_18	Poço	29/10/20 17:05	633854	9481441	Varzinha
Ponto 49	ARA_08	Poço	28/10/20 14:25	630439	9493083	Angicos II
Ponto 50	ARA_09	Poço	28/10/20 15:35	633716	9493624	Pedregal
Ponto 51	ARA_12	Poço	29/10/20 10:05	633367	9492044	Pedra Redonda
Ponto 52	-	-	29/10/20 11:05*	630475	9488669	Cabreiro
Ponto 53	-	-	29/10/20 11:50*	630674	9487970	Cabreiro
Ponto 54	-	-	29/10/20 10:35*	629164	9489818	Tabuleiro do Cabreiro
Ponto 55	ARA_14	Efluente no rio	29/10/20 12:25	629541	9485997	
Ponto 56	-	-	29/10/20 15:50*	630626	9487478	Tabuleiro do Cabreiro

Ponto 57	ARA_17	Poço	29/10/20 16:40	630989	9484080	Boca do Forno
Ponto 58	ARA_04	Rio	28/10/20 11:50	634574	9494044	Centro - Aracati
Ponto 59	ARA_13	Rio	29/10/20 11:25	630335	9487694	
Ponto 60	ARA_15	Rio	29/10/20 13:40	630905	9483436	Próximo a barragem

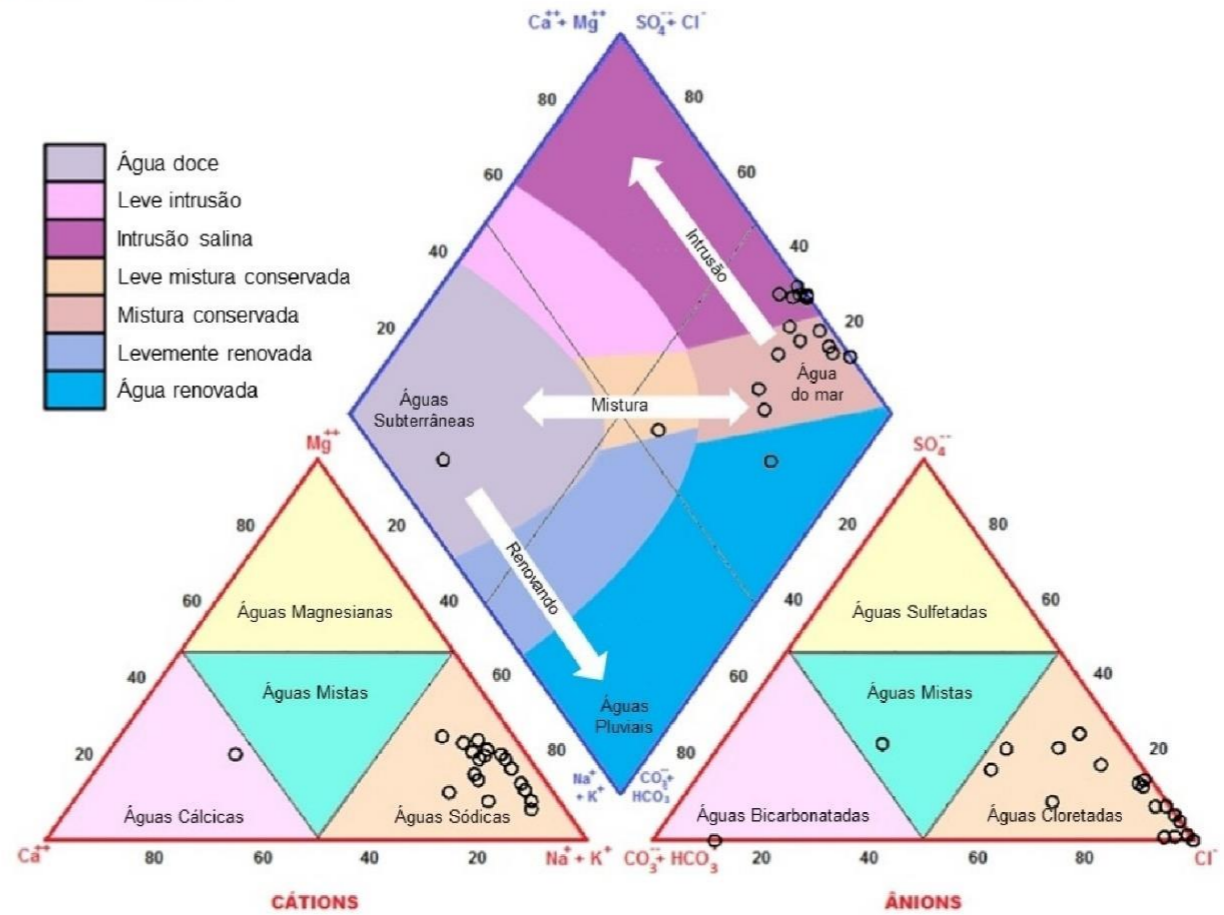
* Data de coleta dos níveis estáticos medidos nos poços visitados.

APÊNDICE D – COMPORTAMENTO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI, CE



VARIAÇÃO ESPACIAL DO COMPORTAMENTO HIDROQUÍMICO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NO MUNICÍPIO DE ARACATI

DIAGRAMA DE PIPER



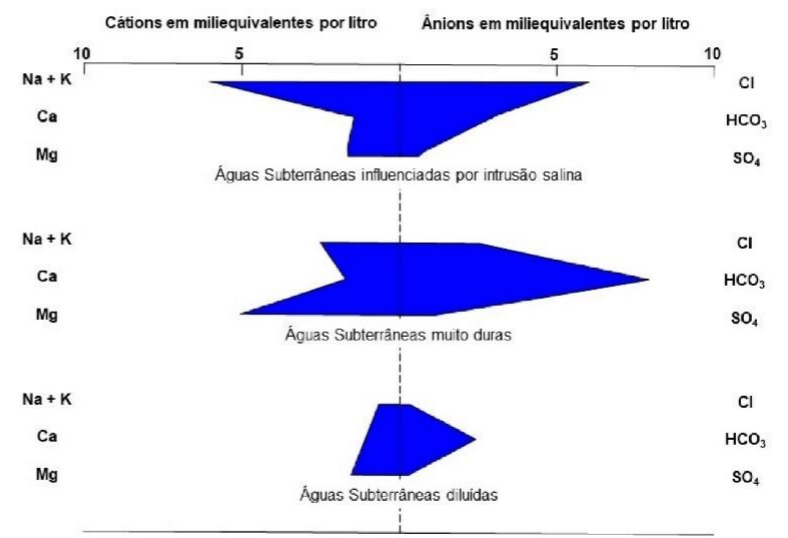
LEGENDA

- Corpos d'água
- Contornos das unidades**
- Depósitos eólicos litorâneos
- Depósitos aluvionares
- Barreiras
- Faceira
- Santarém

Sistema de Coordenadas: SIRGAS 2000
 Projeção: Universal Transversa de Mercator
 Zona 24S

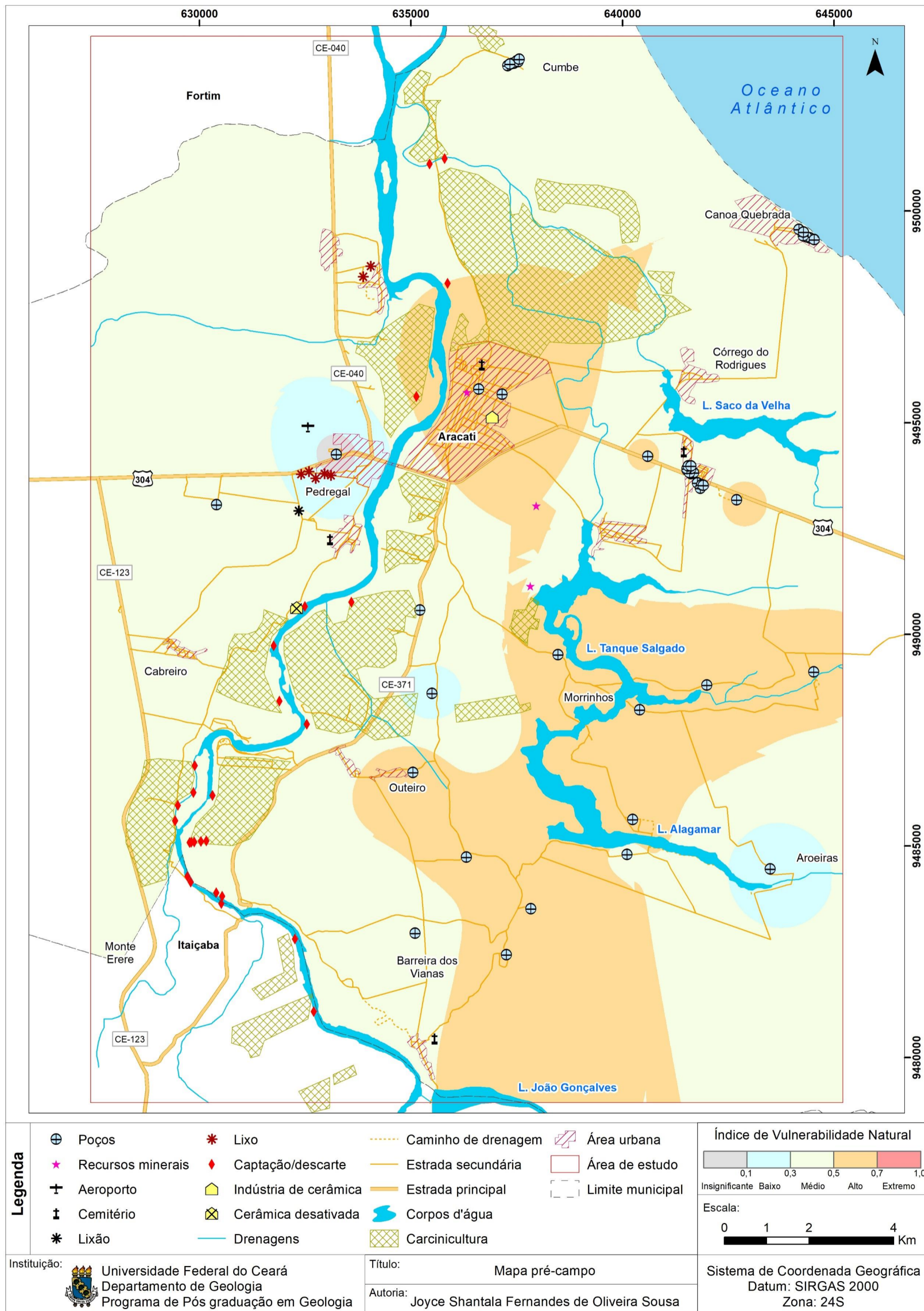


DIAGRAMA DE STIFF

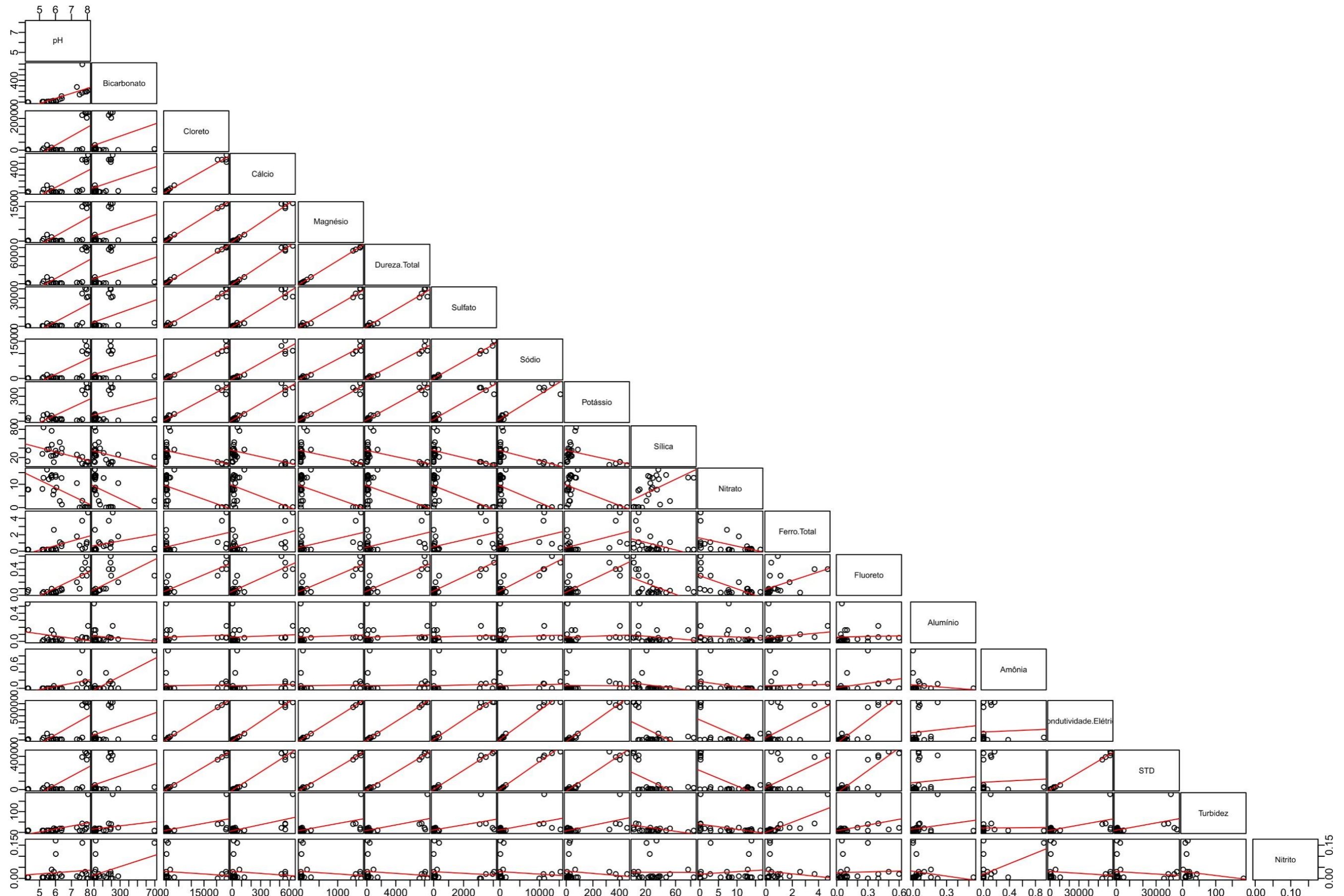


Fonte de dados: Diagrama de Piper adaptado de NASEEM, 2018;
 Diagrama de Stiff adaptado de Tom Culhane, 1993. Bases cartográficas em COGERH, 2021; CPRM, 2020.

APÊNDICE E – MAPA PRÉ-CAMPO



APÊNDICE F – MATRIZ DO GRÁFICO DE DISPERSÃO ENTRE OS PARÂMETROS ANALISADOS



APÊNDICE G – TABELA DE RESULTADOS DAS ANÁLISES DE ÁGUA SUBTERRÂNEA

Parâmetros	Unidades	1	2	3	5	7	8	9	10	11	12	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	Portaria MS nº 888/2021
pH a 25 °C		7,51	7,68	7,34	5,76	5,90	5,25	6,40	4,30	5,86	6,27	6,38	6,01	6,02	5,72	5,77	6,06	5,18	5,58	5,47	4,26	6,0 a 9,5
Condutividade Elétrica	µS/cm	267,50	4056,00	1121,00	5748,00	244,00	3670,00	610,00	1539,00	1889,00	992,80	1142,00	751,00	808,40	1074,00	1009,00	1135,00	715,70	480,50	10570,00	250,20	
Bicarbonato	mg/L	138,00	695,00	278,50	17,30	9,90	7,40	69,00	0,00	24,60	54,20	110,90	19,70	17,30	4,90	12,30	14,80	7,40	12,30	9,90	0,00	
Carbonato	mg/L	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Alcalinidade Total	mg/L	113,10	569,60	228,30	14,10	8,10	6,10	56,60	0,00	20,20	44,40	90,90	16,20	14,10	4,00	10,10	12,10	6,10	10,10	8,10	0,00	
Cloreto	mg/L	10,00	759,80	106,00	1639,50	40,00	1099,70	94,00	415,90	499,80	154,00	209,90	116,00	189,90	199,90	235,90	265,90	165,90	66,00	3259,00	38,00	250 mg/L
Cálcio	mg/L	32,00	52,00	32,00	76,00	6,40	56,00	15,20	24,00	17,60	20,80	8,80	16,00	14,40	33,60	16,00	8,00	5,60	4,00	128,00	2,40	
Magnésio	mg/L	8,20	62,40	40,30	172,80	5,80	96,00	7,20	33,60	33,60	16,30	25,90	13,90	22,10	13,40	23,50	13,00	13,90	11,50	278,40	1,90	
Dureza Total	mg/L	114,00	390,00	248,00	910,00	40,00	540,00	68,00	200,00	184,00	120,00	130,00	98,00	128,00	140,00	138,00	74,00	72,00	58,00	1480,00	14,00	300 mg/L
Sulfato	mg/L	<1,0	363,20	124,30	224,40	5,60	22,00	58,00	29,80	69,00	81,40	42,30	43,10	2,50	52,00	3,60	66,10	38,60	38,90	318,60	<1,0	250 mg/L
Sódio	mg/L	14,10	943,50	158,60	777,50	33,00	521,40	92,20	180,90	319,00	122,50	140,30	88,50	92,70	111,30	107,20	140,30	94,70	61,60	1475,00	31,60	200 mg/L
Potássio	mg/L	2,90	23,30	9,70	66,60	5,70	73,50	14,30	39,90	32,60	27,90	27,40	28,50	18,90	41,10	34,30	18,30	18,90	22,80	87,00	9,70	
Silica	mg/L	15,50	21,40	26,40	76,70	10,40	84,10	39,40	35,30	24,00	52,60	29,80	34,60	25,70	23,50	47,40	29,20	27,80	37,70	37,00	12,30	
Nitrato (N-NO ₃ ⁻)	mg/L	<0,1	2,90	10,50	12,90	7,30	12,80	1,30	7,70	5,60	2,80	12,70	13,90	13,20	13,60	14,00	8,60	8,00	12,20	16,30	7,80	10 mg/L
Nitrito (N-NO ₂ ⁻)	mg/L	<0,01	0,16	0,01	0,04	0,03	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,01	0,17	0,11	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,01	<0,01	<0,01	1 mg/L
Nitrogênio Amoniacal Total (N-NH ₃ ,4)	mg/L	0,31	0,77	<0,01	<0,01	0,05	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Ferro Total	mg/L	0,70	0,30	1,80	0,20	2,60	0,20	0,90	0,20	0,20	1,10	0,60	0,30	0,30	0,20	0,20	0,10	0,20	0,20	0,20	0,20	0,3 mg/L
Fluoreto	mg/L	0,10	0,30	0,20	0,10	0,04	0,05	0,08	0,08	0,04	0,07	0,10	0,05	0,06	0,03	0,04	0,04	0,03	0,02	0,05	0,05	1,5 mg/L
Alumínio	mg/L	<0,01	<0,01	0,03	0,16	0,10	0,02	0,02	0,16	0,01	0,03	0,02	<0,01	0,03	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,02	0,05	0,54	0,2 mg/L
Turbidez	uT	9,10	8,50	23,00	1,90	20,00	8,70	19,00	10,00	8,60	19,00	10,00	16,00	12,00	8,60	9,30	9,90	8,90	9,80	9,80	8,20	5 uT
Amônia (como NH ₃)	mg/L	0,38	0,93	<0,01	<0,01	0,06	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	1,2 mg/L
Fosfato reativo	mg/L	0,02	0,44	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	0,08	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	<0,01	
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	221,00	2933,00	820,00	3108,00	154,00	2016,00	395,00	793,00	1045,00	542,00	651,00	421,00	442,00	540,00	542,00	593,00	408,00	308,00	5469,00	132,00	500 mg/L

ANEXO A – QUINZE PRINCIPAIS CAUSAS DE MORTALIDADE POR RESIDÊNCIA NA CATEGORIA CID-10 QUE OCORRERAM NO MUNICÍPIO DE ARACATI NOS ANOS DE 1996 A 2020

	Categoria CID-10	1996	1997	1998	1999	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
I21	Infarto agudo do miocárdio	8	10	15	9	11	11	17	13	21	12	18	20	20	19	19	26	15	26	22	28	20	33	26	29	29
E14	Diabetes mellitus NE	6	7	25	13	18	14	15	23	16	13	17	20	23	18	22	29	25	17	22	28	33	19	16	9	20
I64	AVC NE como hemorragia isquêmica	15	10	20	38	28	21	20	18	19	23	16	15	6	16	10	11	9	19	18	17	23	23	21	25	14
R98	Morte s/assist.	102	88	24	28	8	1	46	30	24	20	15	10	8	4	4	2	12	5	9	3	2	1	-	1	-
J18	Pneumonia p/microg. NE	5	4	6	8	3	5	8	6	8	14	10	13	11	25	16	29	21	30	25	36	32	53	31	20	23
I69	Sequelas de doença cerebrovasculares	2	-	-	2	5	8	5	10	18	14	23	18	20	20	18	13	12	16	23	19	18	15	5	9	11
I10	Hipertensão essencial	1	6	10	11	5	19	9	7	7	9	9	13	14	13	6	13	19	10	17	17	15	6	7	14	15
X95	Agressão disparo outra arma de fogo ou NE	1	3	2	-	-	6	-	2	3	5	2	6	1	8	4	8	23	15	18	16	14	30	23	9	15
I50	Insuficiência cardíaca	8	10	6	5	4	8	10	13	11	7	7	7	6	4	3	4	4	6	5	15	10	8	12	11	12
R99	Outras causas mal definidas e NE mortalidade	11	6	3	6	6	10	11	9	12	11	9	4	5	3	6	3	5	11	3	3	1	7	8	6	6
C34	Neopl. Malig. dos brônquios e dos pulmões	1	-	3	4	1	3	4	3	3	4	6	6	4	8	10	6	4	11	10	8	6	7	9	17	10
C16	Neopl. Malig. do estômago	3	5	5	1	4	6	10	8	4	2	1	3	4	8	8	9	11	5	6	9	6	4	5	6	3
J44	Outras doenças pulmonares obstrutivas crônicas	2	-	1	2	1	2	2	3	6	1	1	3	4	8	7	7	3	7	3	9	7	9	7	10	10
C61	Neopl. Malig. da próstata	1	1	1	3	3	3	5	6	4	4	2	6	8	4	5	1	6	2	8	9	7	3	4	4	5
C50	Neopl. Malig. da mama	2	2	4	1	2	2	2	2	2	1	1	3	4	6	2	4	8	5	2	7	3	5	8	4	10

Fonte: DATASUS (2021, com adaptações).