



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

**KAREN VENDRAMINI DE ARAÚJO**

**HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE  
ICAPUÍ - CEARÁ**

**FORTALEZA**

**2024**

KAREN VENDRAMINI DE ARAÚJO

HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ -  
CEARÁ

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

Orientador: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.

Coorientadora: Dra. Diolande Ferreira Gomes Freire.

FORTALEZA

2024

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)

---

- A689h Araújo, Karen Vendramini de.  
Hidrogéocquímica dos aquíferos costeiros no município de Icapuí - Ceará / Karen Vendramini de Araújo. –  
2024.  
113 f. : il. color.
- Tese (doutorado) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Ciências, Programa de Pós-Graduação em  
Geologia, Fortaleza, 2024.  
Orientação: Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante.  
Coorientação: Profa. Dra. Diolande Ferreira Gomes Freire.
1. Modelagem geoquímica. 2. Análise multivariada. 3. Vulnerabilidade GALDIT. I. Título.  
CDD 551
-

KAREN VENDRAMINI DE ARAÚJO

HIDROGEOQUÍMICA DOS AQUÍFEROS COSTEIROS NO MUNICÍPIO DE ICAPUÍ -  
CEARÁ

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

Aprovada em: 27/06/2024.

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Itabaraci Nazareno Cavalcante (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Prof. Dr. Enéas Oliveira Lousada  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Profª. Dra. Maria da Conceição Rabelo Gomes  
Universidade do Estado do Pará (UEPA)

---

Dr. Idembergue Barroso Macedo de Moura  
Serviço Geológico do Brasil (SGB)

---

Dr. Mickaelon Belchior Vasconcelos  
Serviço Geológico do Brasil (SGB)

A Deus.

À minha família.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, pela força concedida para superar este desafio.

Ao meu marido Rafael Mota, por toda a ajuda, contribuições, apoio e parceria em todas as etapas deste trabalho.

Aos meus orientadores Prof. Dr George Satander Sá Freire (*in memoriam*) – DEGEO/CC/UFC e Prof. Dr Itabaraci Nazareno Cavalcante – DEGEO/CC/UFC e à minha coorientadora Dra. Diolande Ferreira Gomes Freire – DEGEO/CC/UFC, pelas orientações, sugestões e esclarecimentos.

Aos amigos do Departamento de Geologia, principalmente do Laboratório de Geologia Marinha e Aplicada e, em especial, aos amigos Dr. João Capistrano, Me. Inácio Neto, Me. Joel Pedrosa e Ma. Letycia Oliveira Venâncio, por toda a ajuda e companheirismo.

Aos professores do Departamento de Geologia/CC/UFC, especialmente à Profa. Dra. Narelle Maia, por concederem a licença de três meses que permitiu a conclusão desta Tese.

Aos professores participantes da banca examinadora, pelas sugestões e contribuições dadas.

“A persistência é o menor caminho para o êxito”. (Charles Chaplin).

## RESUMO

Este trabalho foi realizado no município de Icapuí - Ceará com o objetivo de avaliar o comportamento hidrogeoquímico dos aquíferos, buscando compreender os processos que controlam a composição química das águas subterrâneas. Na área ocorrem os Aquíferos Dunas, Barreiras, Jandaíra e Açú. A metodologia engloba cadastro dos poços, amostragem de água e sedimento, análises laboratoriais, balanço hidroclimatológico, análise estatística multivariada, classificação hidroquímica, modelagem hidrogeoquímica e análise da vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha, pelo método GALDIT. A análise estatística multivariada permitiu a seleção das variáveis de maior significância na composição das águas subterrâneas da área. As variações composicionais foram representadas por duas componentes, uma associada a processos de mineralização e uma relacionada a sazonalidade e poluição das águas. A modelagem hidrogeoquímica permitiu identificar que as características químicas das águas subterrâneas na área são controladas, principalmente, pelo intemperismo dos silicatos e a dissolução dos carbonatos, com contribuição das atividades antrópicas e influência marinha. A aplicação da metodologia GALDIT identificou para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras regiões com vulnerabilidade média e alta à salinização por avanço da cunha salina. Esses dois níveis de vulnerabilidade foram individualizados com base na distância dos pontos em relação à costa, altura do nível d'água acima do nível do mar e a razão  $rCl^-/rHCO_3^-$  que representa o impacto da intrusão marinha. A combinação das abordagens aplicadas contribuiu para a melhor compreensão do comportamento geoquímico das águas subterrâneas, demonstrando que os processos hidrogeoquímicos identificados são compatíveis com as características hidroquímicas observadas, haja vista que os parâmetros de maior significância identificados por meio da análise estatística multivariada são aqueles oriundos dos minerais que estão sob tendência de dissolução, sendo assim adicionados à solução, de acordo com a modelagem hidrogeoquímica, enquanto que os parâmetros de menor significância estão associados aos minerais sob tendência de precipitação, sendo conseqüentemente retirados da solução aquosa. Para os parâmetros significativos não correlacionados ao arcabouço geológico da área, a avaliação da influência marinha por meio da análise da vulnerabilidade à salinização por intrusão salina permitiu atribuir sua origem aos aerossóis marinhos.

**Palavras-chave:** modelagem geoquímica; análise multivariada; vulnerabilidade GALDIT.



## ABSTRACT

This work was carried out in the municipality of Icapuí - Ceará with the objective of evaluating the hydrogeochemical behavior of aquifers, seeking to understand the processes that control the chemical composition of groundwater. The Dunas, Barreiras, Jandaíra and Açu aquifers occur in the area. The methodology encompasses well registration, water and sediment sampling, laboratory analyses, hydroclimatological balance, multivariate statistical analysis, hydrochemical classification, hydrogeochemical modeling and vulnerability to salinization due to marine intrusion analysis, using the GALDIT method. Multivariate statistical analysis allowed the selection of the variables of greatest significance in the composition of groundwater in the area. Two components represents the compositional variations, one associated with mineralization processes and one related to seasonality and water pollution process. Through the hydrogeochemical modeling was possible to identify that the chemical characteristics of groundwater in the area are controlled, mainly, by the weathering silicates and the dissolution of carbonates, with contributions from anthropogenic activities and marine influence. The application of the GALDIT methodology identified regions with medium and high vulnerability to salinization due to the advance salt wedge for the Dunas/Barreiras coastal aquifer system. These two levels of vulnerability were individualized based on the distance of the points in relation to the coast, the height of the water level above sea level and the  $rCl^-/rHCO_3^-$  ratio, which represents the impact of marine intrusion. The combination of applied approaches contributed to a better understanding of the geochemical behavior of groundwater, demonstrating that the identified hydrogeochemical processes are compatible with the observed hydrochemical characteristics, since the most significant parameters identified through multivariate statistical analysis are those originating from minerals which are under a tendency to dissolve, thus being added to the solution, according to hydrogeochemical modeling, while the parameters of lesser significance are associated with minerals under a tendency to precipitation, and are consequently removed from the aqueous solution. For significant parameters not correlated to the geological framework of the area, the assessment of marine influence through analysis of vulnerability to salinization by saline intrusion made it possible to attribute their origin to marine aerosols.

**Keywords:** geochemical modeling; multivariate analysis; GALDIT vulnerability.

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AAH	Análise de Agrupamento Hierárquico
ACP	Análise de Componentes Principais
CE	Condutividade Elétrica
COGERH	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
FUNCEME	Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos
GPS	<i>Global Positioning System</i>
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IPECE	Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará
LCGRH	Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos
MS	Ministério da Saúde
NE	Nível Estático
NUTEC	Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará
SGB	Serviço Geológico do Brasil
SIAGAS	Sistema de Informações de Águas Subterrâneas
SIG	Sistema de Informação Geográfica
SOHIDRA	Superintendência de Obras Hidráulicas
SRH	Secretaria de Recursos Hídricos
STD	Sólidos Totais Dissolvidos
UTM	Universal Transversal de Mercator

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>11</b>
<b>1.1</b>	<b>Justificativa</b> .....	<b>12</b>
<b>1.2</b>	<b>Hipótese</b> .....	<b>13</b>
<b>1.3</b>	<b>Área de estudo</b> .....	<b>13</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>16</b>
<b>1.4.1</b>	<b>Geral</b> .....	<b>16</b>
<b>1.4.2</b>	<b>Específicos</b> .....	<b>17</b>
<b>2</b>	<b>REFERENCIAL TEÓRICO</b> .....	<b>18</b>
<b>2.1</b>	<b>Modelagem hidrogeoquímica</b> .....	<b>18</b>
<b>2.2</b>	<b>Análise estatística multivariada</b> .....	<b>19</b>
<b>2.3</b>	<b>Vulnerabilidade aquífera à salinização por intrusão marinha (GALDIT)</b> .....	<b>20</b>
<b>2.4</b>	<b>Aquíferos na região de Icapuí</b> .....	<b>21</b>
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	<b>22</b>
<b>3.1</b>	<b>Pesquisa bibliográfica</b> .....	<b>22</b>
<b>3.2</b>	<b>Cadastro dos poços</b> .....	<b>22</b>
<b>3.3</b>	<b>Amostragem de água, rocha e sedimento</b> .....	<b>24</b>
<b>3.4</b>	<b>Análises laboratoriais de água, rocha e sedimento</b> .....	<b>28</b>
<b>3.5</b>	<b>Balanço hidroclimatológico</b> .....	<b>28</b>
<b>3.6</b>	<b>Classificação hidroquímica</b> .....	<b>29</b>
<b>3.7</b>	<b>Estatística multivariada</b> .....	<b>30</b>
<b>3.8</b>	<b>Modelagem hidrogeoquímica</b> .....	<b>31</b>
<b>3.9</b>	<b>Vulnerabilidade dos aquíferos à salinização por intrusão marinha</b> .....	<b>32</b>
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	<b>34</b>
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</b> .....	<b>103</b>
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>106</b>
	<b>APÊNDICE A – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO CHUVOSO (FEVEREIRO/2019)</b> .....	<b>110</b>
	<b>APÊNDICE B – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO SECO (AGOSTO/2019)</b> .....	<b>111</b>

<b>APÊNDICE C – METAIS TRAÇO E FÓSFORO DISSOLVIDO ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO CHUVOSO (FEVEREIRO/2019)....</b>	<b>112</b>
<b>APÊNDICE D – METAIS TRAÇO E FÓSFORO DISSOLVIDO ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO SECO (AGOSTO/2019).....</b>	<b>113</b>

## 1 INTRODUÇÃO

De uma maneira geral, a composição das águas subterrâneas está diretamente relacionada com os tipos litológicos percolados, em decorrência das interações água/rocha. A classificação química inicial é baseada na concentração dos cátions e ânions presentes na água. A interpretação dos processos hidrogeoquímicos é mais complexa e tem como enfoque principal a compreensão da origem e evolução química dos constituintes presentes na água, em decorrência dos processos físico-químico-biogeoquímicos que acontecem durante o fluxo da água subterrânea nos aquíferos, desde a zona de recarga até os exutorios naturais (MESTRINHO, 2008).

Os principais processos naturais que ocorrem nas zonas saturadas e não saturadas do subsolo e que determinam o tipo e a quantidade de constituintes presentes na água são a dissolução de gases, reação ácido-base, sorção e troca iônica, dissolução/precipitação de minerais, oxidação/redução e os processos biológicos ou reações de biotransformação (MESTRINHO, 2006). A compreensão desses processos, combinada as condições hidrogeológicas e climáticas do meio, permite uma melhor interpretação da interação água/rocha e da qualidade da água para determinado uso. Adicionalmente, os efeitos da sazonalidade, da poluição antrópica e da influência marinha, em se tratando de aquíferos costeiros, também devem ser considerados.

O comportamento dos íons dissolvidos disponibilizados pelo intemperismo químico pode ser inferido através de modelagem hidrogeoquímica que constitui uma ferramenta necessária para se conhecer as características dos principais processos que ocorrem em um ou vários tipos de aquíferos que podem ser clásticos, cársticos ou fissurais. É um método que permite a representação matemática da hidrogeoquímica e requer o uso de programas de computação adequados, como o Phreeqc (PARKHURST; APPELO, 2013), que foi desenvolvido para o cálculo da hidrogeoquímica do "mundo real" (APPELO; POSTMA, 2005).

Segundo Cesar *et al.* (2011), a interpretação do comportamento geoquímico das águas através da modelagem pode auxiliar na compreensão de níveis de toxicidade, biodisponibilidade e mobilidade de elementos no ambiente, bem como suporte para o estabelecimento de indicadores de sustentabilidade ambiental, ações de mitigação e apoio à tomada de decisão, no que diz respeito, por exemplo, às medidas de saúde pública.

## 1.1 Justificativa

O estudo das características químicas das águas subterrâneas, bem como dos processos que as controlam é de extrema importância para o máximo aproveitamento desse recurso, com o direcionamento adequado para os diversos usos, a depender da sua qualidade, especialmente em regiões que apresentam um desequilíbrio entre a oferta e a demanda de água, devido às condições climáticas desfavoráveis, como é o caso do nordeste brasileiro, em especial o estado do Ceará.

O município de Icapuí é abastecido exclusivamente por águas subterrâneas, sendo essas utilizadas também para as diversas atividades desenvolvidas na região. O município possui importante atividade agrícola e se destaca na fruticultura, principalmente na produção de melão. A agricultura constitui uma atividade potencialmente poluidora, visto que depende de fertilizantes sintéticos para um maior rendimento, podendo afetar a qualidade dos recursos hídricos.

Outra atividade crescente na região é o turismo, que se não for realizado de forma sustentável pode se tornar uma atividade potencialmente poluidora, considerando-se que o município não possui rede de esgotamento sanitário e o aumento dos efluentes domésticos lançados em fossas sépticas eleva o risco de contaminação das águas subterrâneas.

Além de potencialmente contaminantes, essas atividades promovem o aumento na demanda de água podendo levar a exploração excessiva dos aquíferos, acarretando em problemas como a intrusão salina.

Pesquisas desenvolvidas anteriormente na área envolvendo as águas subterrâneas discutiram, principalmente, os aspectos hidroquímicos, hidrogeológicos e ambientais, a exemplo de Cavalcante *et al.* (1994), Braga Júnior *et al.* (2017) e Maia (2018), porém, a hidrogeoquímica ainda não havia sido abordada.

O desconhecimento da dinâmica das interações entre as águas subterrâneas e os aquíferos percolados, bem como da influência das atividades antrópicas desenvolvidas na área e ainda, do quanto os aquíferos costeiros são vulneráveis à uma possível contaminação por águas marinhas comprometem o gerenciamento dos recursos hídricos, pondo em risco o abastecimento de água do município devido às possíveis restrições de uso decorrentes do comprometimento da sua qualidade.

Diante do exposto, justifica-se a realização deste estudo devido a relevância do tema para a região, por se tratar de uma pesquisa pioneira abordando os processos que controlam as características químicas e, conseqüentemente, a qualidade das águas

subterrâneas, fornecendo subsídios para o desenvolvimento de pesquisas futuras visando o gerenciamento adequado e conservação desse recurso essencial para a região.

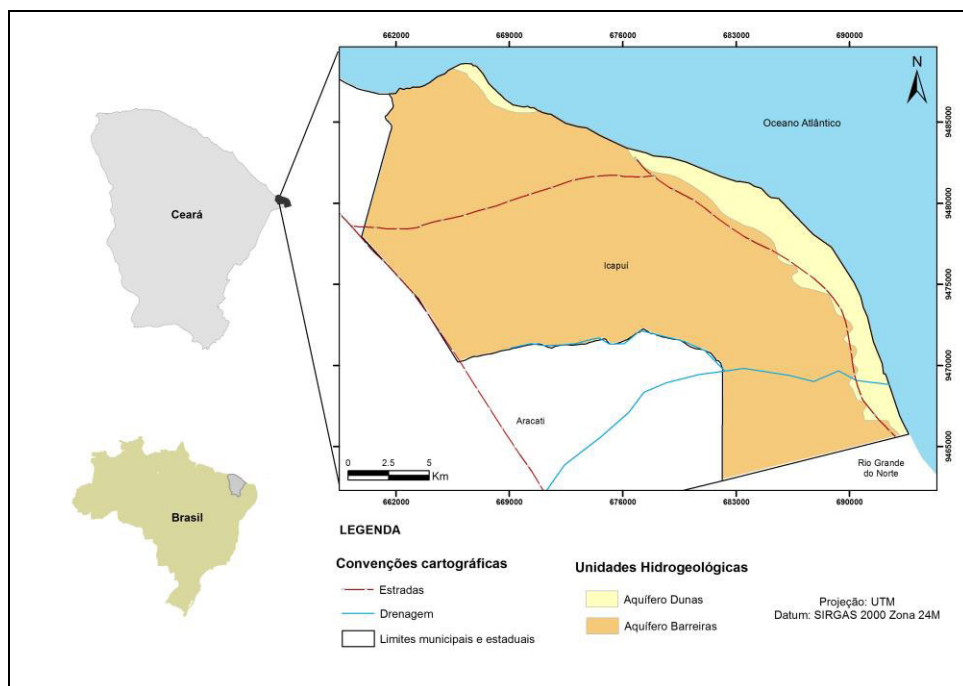
## 1.2 Hipótese

As características químicas e qualitativas das águas subterrâneas na área de pesquisa são controladas pela geologia, devido à presença de um arcabouço variado com diferentes materiais que promovem interações com as águas subterrâneas; pela influência das águas marinhas, por se tratarem de aquíferos costeiros, e pelas atividades antrópicas, tendo em vista a ausência de saneamento básico no município e o desenvolvimento de atividades potencialmente poluidoras como a carcinicultura e a agricultura.

## 1.3 Área de estudo

O município de Icapuí está localizado no extremo leste do estado do Ceará (Figura 1), com 421,4 km<sup>2</sup> e cerca de 20.000 habitantes, concentrados principalmente na zona costeira.

Figura 1 – Localização e distribuição das unidades hidrogeológicas na área de estudo



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2014, modificado)

O abastecimento de água é realizado exclusivamente por meio de poços tubulares administrados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE) e poços particulares. O município não dispõe de rede de esgotamento sanitário, e esse serviço é realizado por meio de fossas sépticas.

O clima é caracterizado como tropical quente semiárido brando, a temperatura média está entre 26 e 28°C e a pluviosidade média é de 949 mm/ano, apresentando chuvas mais expressivas nos meses de janeiro a maio (IPECE, 2021).

A região está inserida no contexto geológico da Bacia Potiguar que, segundo Soares *et al.* (2003), apresenta da base para o topo, as seguintes sequências: *Rift*, Transicional, *Drift* transgressiva e *Drift* regressiva (Figura 2).

A Sequência *Rift* é representada pelo Grupo Areia Branca (Cretáceo Inferior) composto pelas Formações Pendência e Pescada. A Sequência Transicional é representada pela Formação Alagamar do Grupo Areia Branca constituída pelos Membros Upanema e Galinhos. A Sequência *Drift* transgressiva é representada pelo Grupo Apodi (Cretáceo Inferior a Superior) composto pelas Formações Açú, Ponta do Mel, Quebradas e Jandaíra. A Sequência *Drift* regressiva é representada pelas Formações Ubarana, Guamaré, Serra dos Martins, Tibau e Barreiras compõem o Grupo Agulha (Cretáceo Superior ao Quaternário).

Os sedimentos de dunas, praias e aluviões de idade pré-holocênicos e holocênicos estão situados na porção emersa da Bacia Potiguar e correspondem a depósitos de origem aluvial, fluvial, marinha, eólica, lacustre e flúvio-estuarina (SOUZA, 2017).

De acordo com Mente (2008), em relação ao contexto hidrogeológico, a área está inserida na Província Costeira e Subprovíncia Potiguar representada pelos Aquíferos Dunas, Barreiras, Jandaíra e Açú (Figura 1).

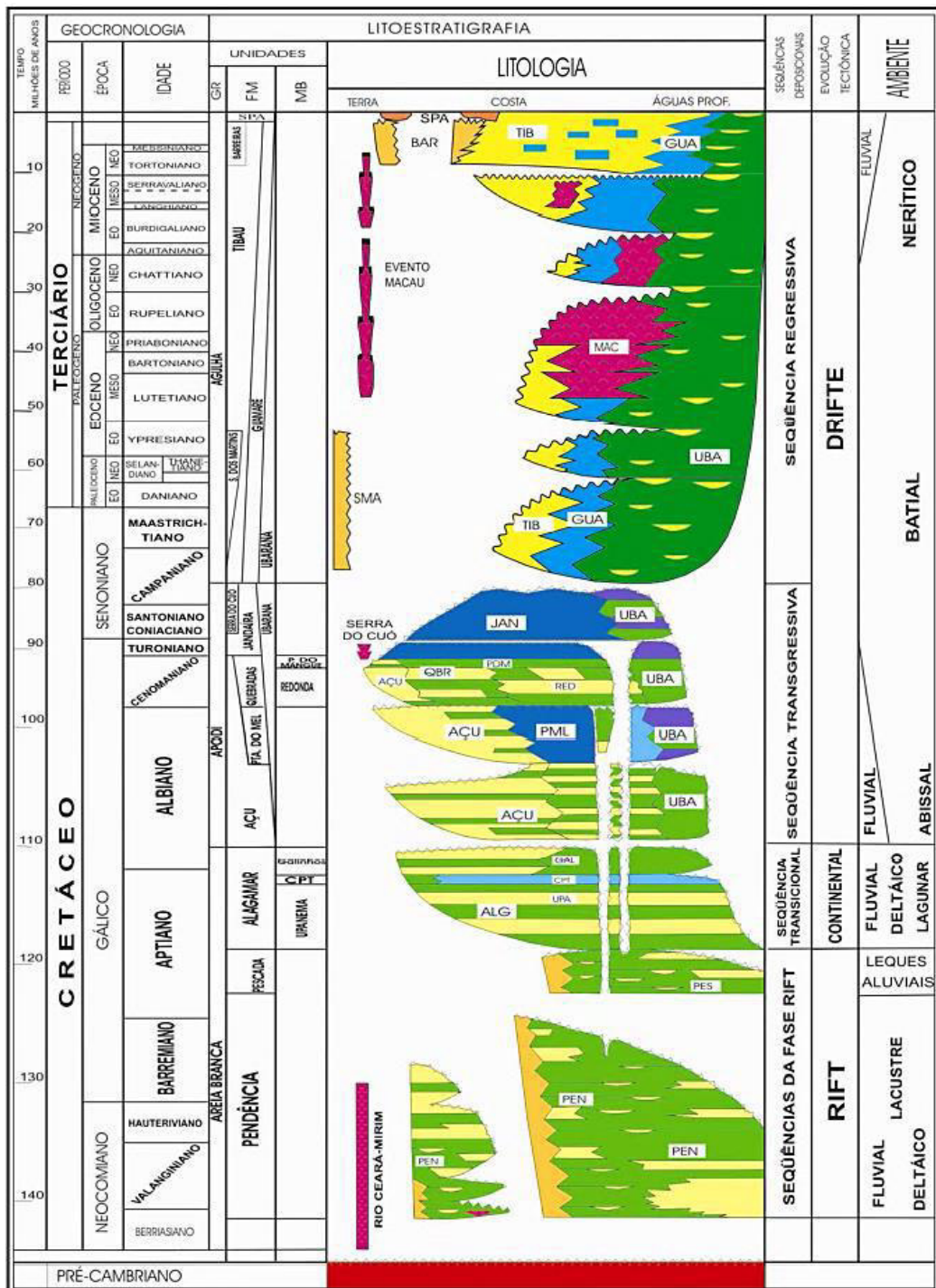
O Aquífero Dunas é formado pelos depósitos eólicos quaternários que ocorrem ao longo de toda a faixa costeira, com espessuras que variam de 6 a 20 m, de acordo com perfis construtivos e litológicos de poços existentes na área de estudo. Segundo Ferro (2018), os depósitos eólicos na área são compostos por areias quartzosas bem selecionadas de granulação fina a média.

O Aquífero Barreiras é composto por clastos da Formação Barreiras com idades que variam do Mioceno até o Plioceno-Pleistoceno e afloram em, aproximadamente, 90% da área de estudo, ocorrendo também subjacente ao Aquífero Dunas. A Formação Barreiras aflora sob a forma de falésias ao longo da costa do município, a partir das quais, Sousa (2002) identificou duas seções individualizáveis verticalmente. A primeira corresponde à seção superior, composta por arenitos avermelhados de aspecto maciço, granulometria de areia



média a grossa. A composição é predominantemente quartzosa, com grãos eventualmente recobertos por óxido de ferro, em matriz argilosa. Na seção inferior ocorrem arenitos finos silto-argilosos em cimento argiloso, localmente maciços com estratificação cruzada de baixo ângulo, e tonalidades amareladas, roxas e avermelhadas. São compostos, predominantemente, por grãos de quartzo, angulosos a sub-arredondados, e presença subordinada de feldspatos.

Figura 2 – Estratigrafia da Bacia Potiguar



Fonte: Soares et al. (2003).

Os Aquíferos Jandaíra e Açú são constituídos por sedimentos cretáceos do Grupo Apodi. O Aquífero Jandaíra localiza-se na porção superior da sequência carbonática da Formação Jandaíra, constituindo um aquífero heterogêneo, anisotrópico e de circulação cárstica, composto por calcários cinzas e cremes, margas, siltitos, folhelhos, argilitos e dolomitos, compreendendo calcarenitos com bioclastos de moluscos e algas (MORAIS *et al.*, 2005; VASCONCELOS *et al.*, 2010). No extremo oeste da área de estudo, as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra afloram na base das falésias da Formação Barreiras sob a forma de pequenos lajedos restritos à zona de praia. A partir de perfis construtivos e litológicos de poços existentes na área de estudo, foi possível identificar que o Aquífero Jandaíra ocorre a profundidades que variam entre 20 e 108 metros, com o contato superior concordante com o Aquífero Barreiras e o inferior com o Aquífero Açú.

O Aquífero Açú corresponde à porção inferior da Formação Açú, essencialmente arenosa, sendo constituído por arenitos predominantemente grosseiros a conglomeráticos na base, passando a arenitos médios na porção intermediária e arenitos mais finos no topo, com uma argilosidade continuamente crescente no sentido vertical (MORAIS *et al.*, 2005). De acordo com Braga Júnior *et al.* (2017), na área de estudo, a Formação Açú apresenta conglomerados na base, passando para arenitos grossos e no topo depósitos de planície de inundação. O Aquífero Açú ocorre em condições de confinamento na área, tanto pelas camadas argilosas da porção superior da Formação Açú quanto pela base do Aquífero Jandaíra, sendo detectado a profundidades superiores a 200 metros, conforme observado em perfis construtivos e litológicos de poços existentes na área de estudo.

## **1.4 Objetivos**

Os objetivos deste trabalho foram divididos em geral e específicos, conforme descritos a seguir:

### **1.4.1 Geral**

Analisar o comportamento hidrogeoquímico dos aquíferos costeiros no município de Icapuí - Ceará, buscando compreender os processos que controlam a composição química das águas subterrâneas.

### *1.4.2 Específicos*

- Calcular o balanço hidroclimatológico da área para caracterizar os períodos sazonais e estimar a infiltração efetiva;
- Caracterizar química e mineralogicamente as rochas e os sedimentos que constituem as unidades hidrogeológicas;
- Caracterizar a qualidade físico-química das águas subterrâneas;
- Identificar, por meio da análise estatística multivariada, os parâmetros que mais contribuem para as características químicas das águas subterrâneas;
- Discretizar estatisticamente e caracterizar os grupos hidroquímicos existentes nos sistemas aquíferos;
- Utilizar a modelagem hidrogeoquímica para inferir os processos responsáveis pelas características químicas das águas subterrâneas da área;
- Identificar e delinear as áreas mais vulneráveis à salinização por intrusão marinha e avaliar a qualidade das águas subterrâneas com base nos parâmetros associados à salinização.

## 2 REFERENCIAL TEÓRICO

Os trabalhos apresentados a seguir exemplificam os temas abordados em estudos hidrogeoquímicos e de vulnerabilidade aquífera à salinização por intrusão marinha, bem como trabalhos sobre os sistemas aquíferos de ocorrência na área.

### 2.1 Modelagem hidrogeoquímica

Nascimento *et al.* (2020) caracterizaram a hidrogeoquímica do Aquífero Fissural no município de Uauá - Bahia, e estudaram o processo de salinização da água subterrânea a partir dos seus cátions e ânions principais. O modelamento geoquímico utilizando o Phreeqc mostrou que os processos que removeram e produziram os principais íons responsáveis pela salinização da água subterrânea são resultados da decomposição intempérica com troca iônica entre a água subterrânea e os minerais albita, dolomita e silicatos ferromagnesianos, calcita e anortita.

Venâncio *et al.* (2020) realizaram o monitoramento da qualidade da água subterrânea na Região Metropolitana de Fortaleza - Ceará, para a obtenção e integralização dos aspectos hidrogeológicos da área, relacionados a qualidade e geoquímica dos Aquíferos Barreiras e Cristalino. A especiação aquosa utilizando Phreeqc demonstrou que as fases apresentam condições de supersaturação em 100% na composição oxido-hidróxido, indistintamente nos dois sistemas aquíferos. A composição aluminosa apresenta 66,67% dos índices de saturação (IS) em condições de supersaturação (precipitação) e 33,33% em condições de subsaturação (dissolução). A composição silicosa apresenta 70,96% dos IS em condições de supersaturação (precipitação) e 29,04% em condições de subsaturação (dissolução).

Gomes *et al.* (2021) analisaram a geoquímica das águas subterrâneas na porção centro-sul do estado da Bahia, no semiárido baiano, onde afloram o Complexo Paramirim, Unidade Boquira, Granito Boquira, Granito Veredinha, Serra do Espinhaço, Coberturas detríticas e Depósitos aluvionares. A Unidade Boquira é conhecida pelas mineralizações chumbozincíferas. A modelagem geoquímica indicou calcita, dolomita e quartzo como principais minerais com tendência de precipitação. Os autores associaram os dois primeiros à dissolução dos carbonatos da Unidade Boquira e o terceiro aos quartzitos da Formação Serra do Espinhaço.

## 2.2 Análise estatística multivariada

Bertossi *et al.* (2013) empregaram Análise de Componentes Principais e Análise de Agrupamento Hierárquico com o objetivo de selecionar as características físico-químicas mais importantes para explicar a variabilidade da qualidade das águas de uma sub-bacia hidrográfica rural no Sul do Estado do Espírito Santo, além de agrupar as águas estudadas quanto à similaridade das características selecionadas para verificar o efeito do tipo de cobertura do solo (agrícola, pecuário, florestal e urbano), de recurso hídrico (subterrâneo e superficial) e período de coleta (chuva e estiagem). A Análise de Componentes Principais promoveu a redução de dezenove parâmetros de qualidade em três componentes que explicaram 87,53% da variância total. Na Análise de Agrupamento Hierárquico foram formados quatro grupos distintos de qualidade da água que diferiram quanto à concentração das características físico-químicas e quanto ao tipo de recurso hídrico estudado, já os períodos de coleta e o tipo de cobertura do solo não influenciaram na segregação dos grupos formados.

Ado *et al.* (2019) utilizaram estatística multivariada em estudo hidrogeoquímico realizado no noroeste da Nigéria. A Análise Fatorial (AF) dos resultados físico-químicos indicou mineralização, intemperismo de silicatos e feldspato K, e as fontes antrópicas foram as principais responsáveis pelo quimismo das águas subterrâneas. A Análise Hierárquica de Cluster (HCA) revelou que os clusters de amostras foram controlados principalmente pela estrutura e não pela litologia, fonte de água ou altitude, pois 86% das amostras do *cluster I* ocorreram ao longo de uma zona de falha de tendência NNE-SSW. Os autores concluíram que a interação água-rocha, a tectônica e os fatores antropogênicos são responsáveis pela físico-química da água.

Gomes *et al.* (2020) identificaram e avaliaram as variáveis responsáveis pela contribuição de uma possível contaminação natural e/ou antrópica nas águas subterrâneas na porção centro-sul do estado da Bahia. Para isso, foram utilizadas técnicas de análise multivariada referente à análise fatorial em componentes principais e de agrupamento. A análise fatorial permitiu agrupar as variáveis em dois fatores principais que explicaram 93% da variância total acumulada. As variáveis estão fortemente relacionadas com as concentrações de metais e salinidade na água. A análise de agrupamento classificou as fontes hídricas de acordo com a qualidade das águas em três grupos em cada fator. Os autores concluíram que existe influência do *background* natural das rochas do município de Boquira nos recursos hídricos.

### 2.3 Vulnerabilidade aquífera à salinização por intrusão marinha (GALDIT)

Chachadi *et al.* (2003) estudaram o impacto da subida da água do mar nos aquíferos costeiros de Bardez, no estado de Goa, Índia. Foi utilizada a metodologia GALDIT para a caracterização da vulnerabilidade à intrusão salina em aquíferos costeiros. As pontuações GALDIT em cada um dos 56 poços de monitoramento das águas subterrâneas foram calculadas para o nível normal do mar existente e para a subida de 0,5 m do nível do mar. A partir dos mapas gerados, os autores identificaram que houve um aumento significativo na extensão da área de intrusão de água do mar.

Savariya e Bhatt (2014) realizaram o mapeamento da vulnerabilidade GALDIT das águas subterrâneas à intrusão de água do mar na região de Morbi-Maliya, na linha costeira de Saurashtra. Os mapas de vulnerabilidade da água do mar derivados usando o método GALDIT indicam que o aquífero é vulnerável de baixa a média à intrusão de água do mar. Os autores identificaram que o índice GALDIT das aldeias da região de Maliya é mais elevado em comparação com as aldeias da região de Morbi.

Costa Sobrinho *et al.* (2015) utilizaram o método GALDIT para avaliar a vulnerabilidade à intrusão da água do mar do sistema aquífero da Região Metropolitana do Recife (RMR), composto por um aquífero livre, o Boa Viagem, que se sobrepõe à dois aquíferos semiconfinados, o Cabo e o Beberibe. Como resultado da aplicação, mapas foram gerados para cada indicador do índice GALDIT e os autores observaram que a região do Aquífero Boa Viagem na RMR possui praticamente toda a área com perigo de salinização de moderado a alto.

Recinos *et al.* (2015) aplicaram o índice de vulnerabilidade GALDIT para um aquífero aluvial típico do Mediterrâneo, no nordeste da Grécia, sob condições hidrogeológicas variáveis em diferentes períodos de investigação (1992 e 2004). De acordo com a análise dos parâmetros GALDIT, os autores concluíram que a principal causa para esta observação é o declínio dramático do nível das águas subterrâneas do aquífero em estudo. A formação de um profundo cone de depressão causou uma grande perturbação no equilíbrio hidrodinâmico entre a água doce e a água do mar, o que resultou numa maior invasão da água do mar para o interior.

## 2.4 Aquíferos na região de Icapuí

Vasconcelos *et al.* (2010) caracterizaram o Aquífero Jandaíra na porção situada no estado do Ceará com base na avaliação das reservas de águas subterrâneas através da porosidade efetiva obtida a partir da interpretação de 19 testes de bombeamento e do monitoramento do nível estático de 32 poços em uma área onde o Aquífero Jandaíra apresenta-se como aquífero livre. Considerando o valor da porosidade efetiva de 17% atingiu-se o volume admissível de  $121 \times 10^9 \text{ m}^3$  para a reserva permanente.

Vasconcelos *et al.* (2015) obtiveram a configuração da estrutura hidrogeológica do Sistema Aquífero Dunas/Barreiras na zona norte de Natal, Rio Grande do Norte, identificando espessuras saturadas, direções de fluxo e condicionamento geológico por meio da aquisição de perfis de poços tubulares perfurados na área de estudo; análise de trabalhos anteriores, com informações dos parâmetros hidrodinâmicos; etapas de campo para a verificação do condicionamento geológico; coleta de dados de nível estático e perfuração de um poço de pesquisa. A integração dos dados obtidos identificou prováveis processos tectônicos na área de estudo, bem como a configuração da estrutura geológica da área.

Braga Júnior *et al.* (2017) analisaram as relações entre as cargas potenciométricas dos Aquíferos Barreiras-Jandaíra e Açu na área de Fazenda Belém, oeste da bacia sedimentar potiguar estado do Ceará e suas implicações na qualidade das águas subterrâneas. Os autores concluíram que os Aquíferos Açu e Barreiras-Jandaíra correspondem a sistemas aquíferos individualizados. O fato de que o rebaixamento do nível estático verificado no Aquífero Açu, não afetou as cargas potenciométricas do Aquífero Barreiras-Jandaíra e os tipos iônicos distintos definidos para os dois sistemas aquíferos, sugere a existência de um isolamento hidráulico e a inexistência de mistura de águas entre os mesmos, desde seu estado original até o presente.

Maia (2018) realizou estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - Ceará, avaliando a qualidade da água e sua possível relação com riscos de saúde da comunidade local. Foram realizadas análises físico-químicas, elementos traço, bacteriológicas e isótopos  $\delta^{18}\text{O}$ . O autor identificou resultados anômalos como presença de bactérias, *Escherichia coli* e coliformes totais, compostos nitrogenados e cromo, acima do valor permitido para o consumo humano, nas águas coletadas em alguns poços. O autor concluiu que o aumento dos casos de doenças diarreicas em Icapuí no período entre 2014 a 2015, e o reaparecimento da hepatite viral, podem estar associados aos dados de qualidade da água.

### **3 METODOLOGIA**

A metodologia adotada para este trabalho constou de pesquisa bibliográfica; cadastro de poços; amostragem e análises laboratoriais de água, rocha e sedimento; realização do balanço hidroclimatológico; classificação hidroquímica; análise estatística multivariada; modelagem hidrogeoquímica e análise da vulnerabilidade dos aquíferos à salinização por intrusão marinha.

#### **3.1 Pesquisa Bibliográfica**

Nesta etapa, foi realizado o levantamento de trabalhos relacionados aos assuntos a serem abordados, no âmbito nacional e internacional, bem como a coleta de dados referentes à área de estudo como, geologia, hidrogeologia, aspectos socioeconômicos e geoambientais, regionais e locais.

Esta pesquisa foi realizada junto à órgãos públicos, tais como o Serviço Geológico do Brasil (SGB), a Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), o Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará (IPECE), a Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), a Superintendência de Obras Hidráulicas (SOHIDRA) e o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE).

Os dados e informações obtidos com esse levantamento permitiram um melhor conhecimento das características da área, ajudando na elaboração das bases temáticas e desenvolvimento do texto do trabalho.

#### **3.2 Cadastro dos poços**

O cadastro dos poços iniciou-se com o levantamento das informações referentes aos poços existentes na área de estudo junto à órgãos públicos como SOHIDRA e SGB, por meio do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS, 2021), segundo o qual existem 126 poços cadastrados na área de estudo. Os dados construtivos e litológicos dos poços foram obtidos a partir das fichas técnicas de disponibilizadas por estes órgãos.

Foram selecionados 25 poços para a realização da pesquisa, com base na melhor distribuição na área, condições de acesso ao ponto de coleta, uso das águas e aquíferos captados. As informações referentes aos poços selecionados foram atualizadas durante a etapa de campo com a obtenção de dados de profundidade e nível estático não existentes nas fichas



técnicas. As medidas de nível estático dos poços foram obtidas utilizando medidor eletrosonoro de nível estático *Jaciri* com capacidade para 100 m (Foto 1), e cota altimétrica dos pontos, utilizando GPS Garmim GPSmap 60CSx.

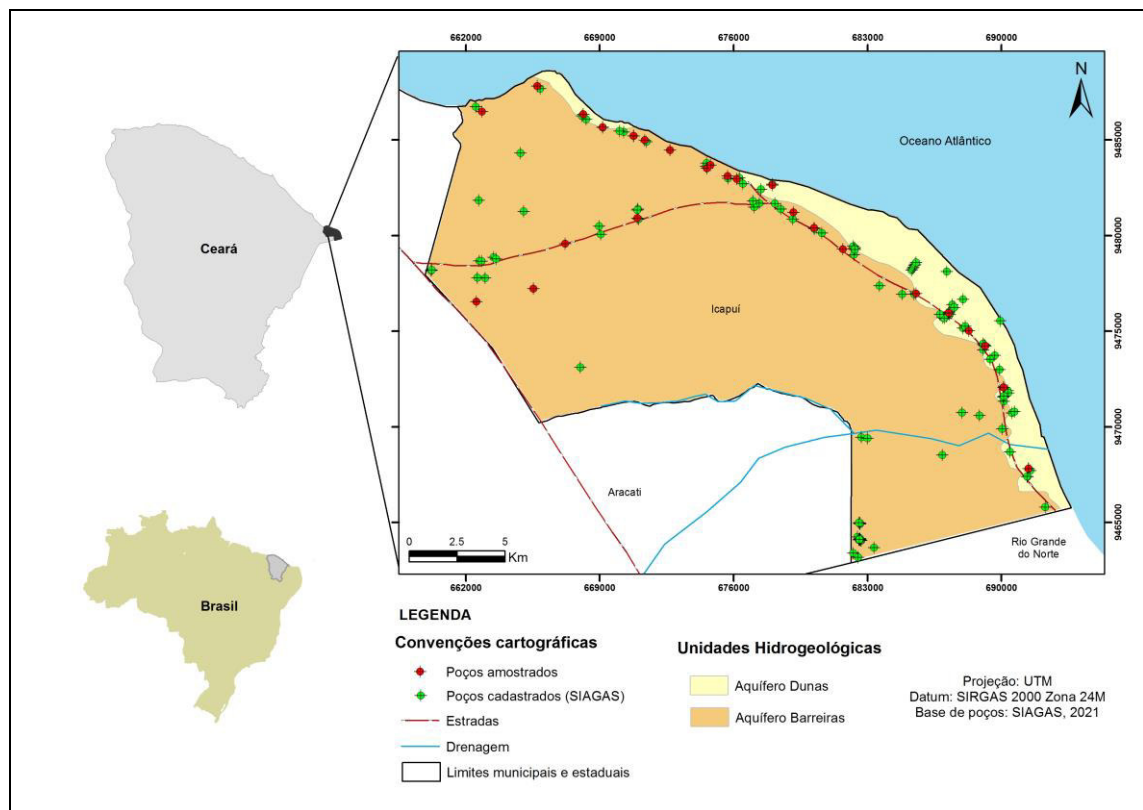
Foto 1 – Medição da profundidade do nível estático no poço P21 localizado no bairro Vila Nova, Icapuí - CE. Coord.: 9483102/675695 (agosto/2019)



Fonte: Autora

Os dados hidrogeológicos foram integrados com os pontos georreferenciados originando uma base de distribuição de poços e unidades hidrogeológicas em escala de 1:200.000 confeccionada em ambiente SIG (Figura 3).

Figura 3 – Distribuição dos poços cadastrados e amostrados nas unidades hidrogeológicas na área de estudo



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2014, modificado).

### 3.3 Amostragem de água, rocha e sedimento

Foram realizadas coletas de águas subterrâneas nos 25 poços selecionados durante o ano de 2019, nos meses de fevereiro e agosto.

As amostras foram coletadas nas saídas diretas do sistema de bombeamento (Foto 2) e acondicionadas em garrafas plásticas de 500 mL para as análises físico-químicas, em frascos em vidro âmbar de 100 mL para a análise de amônia, nos quais foram acrescentados os reagentes Fenol e Citrato, e em frascos plásticos de 100 mL para as análises de metais traço e fósforo, nos quais foi adicionado  $\text{HNO}_3$  para a acidificação da amostra até  $\text{pH} < 2$ . Os recipientes foram etiquetados e mantidos refrigerados à, aproximadamente, 4 °C até a realização dos procedimentos analíticos.

Foto 2 – Coleta das amostras de água subterrânea no poço P6 localizado no bairro Vila Nova, Icapuí - CE. Coord.: 9483508/674618 (agosto/2019)



Fonte: Autora

Foram coletadas 4 amostras de rochas e sedimentos, sendo uma amostra de cada unidade geológica (depósitos eólicos, Formação Barreiras, Formação Jandaíra e Formação Açu), para a realização das análises de fluorescência e difratometria de raios X. Os sedimentos eólicos foram amostrados em dunas que ocorrem na orla oeste de Icapuí (Foto 3). Os arenitos da Formação Barreiras e os calcários da Formação Jandaíra também foram amostrados na orla oeste de Icapuí, sendo os arenitos coletados nas falésias (Foto 4) e os calcários coletados em pequenos lajedos que ocorrem em uma área restrita na porção oeste da zona de praia (Foto 5). A Formação Açu não aflora na área de estudo, dessa maneira, os arenitos que compõem essa Formação foram amostrados em afloramentos localizados próximos ao município de Açu – RN (Foto 6). As amostras foram coletadas com o auxílio de martelo geológico e armazenadas em sacos plásticos transparentes hermeticamente fechados e devidamente etiquetados (local, dia e hora) até a realização dos procedimentos analíticos.

Foto 3 – Dunas localizadas na praia de Ponta Grossa, Icapuí - CE.  
Coord.: 9486690/667044 (agosto/2019)



Fonte: Autora

Foto 4 – Falésia da Formação Barreiras localizada na praia de Ponta Grossa, Icapuí - CE. Coord.: 9488241/665942 (agosto/2019)



Fonte: Autora

Foto 5 – Lajedos da Formação Jandaíra localizados na praia de Ponta Grossa, Icapuí - CE. Coord.: 9487032/664370 (agosto/2019)



Fonte: Autora

Foto 6 – Afloramentos da Formação Açú na Br 304, Açú - RN. Coord.: 9384971/715550 (agosto/2019)



Fonte: Autora

### 3.4 Análises laboratoriais de água, rocha e sedimento

Nas amostras de águas subterrâneas foram analisadas as concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{N-NO}_3^-$ ,  $\text{N-NO}_2^-$ ,  $\text{N-NH}_{3,4}$ ,  $\text{Br}^-$ ,  $\text{F}^-$ ,  $\text{SiO}_2$ , pH, alcalinidade total, dureza total, turbidez, ferro total, condutividade elétrica e sólidos totais dissolvidos pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará. As amostras coletadas para as análises de metais traço (alumínio, bário, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e fósforo dissolvido foram filtradas à vácuo utilizando membrana com porosidade  $0,45 \mu\text{m}$  e entregues ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC) para serem analisadas por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma de Argônio (ICP-OES).

O ferro presente nas amostras foi analisado sob duas formas, total e dissolvido. O ferro total foi utilizado para a avaliação de potabilidade, já que esse possui valor de referência estabelecido pela legislação adotada neste estudo, e o ferro dissolvido foi utilizado na modelagem Phreeqc, devido a técnica ICP-OES possibilitar a detecção de elementos que ocorrem em baixas concentrações.

As amostras de rochas e sedimentos foram trituradas a 200 mesh e submetidas às análises de fluorescência e difratometria de raios X. A fluorescência de raios X foi realizada no Laboratório de Microscopia Eletrônica de Varredura do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará para a identificação da composição química. A difratometria de raios X foi realizada no Laboratório de Cristalografia Estrutural do Departamento de Física da Universidade Federal do Ceará para a identificação dos minerais presentes.

### 3.5 Balanço Hidroclimatológico

O cálculo do balanço hidroclimatológico foi realizado com a aplicação da equação proposta por Thornthwaite e Mather (1955), devido a sua melhor adaptação às áreas com características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados, como é o caso da área de estudo. Este método utiliza a precipitação total, a temperatura, a evapotranspiração potencial e a capacidade de armazenamento do solo para estimar a evapotranspiração real e a infiltração efetiva.

Segundo a FUNCEME (2023), em Icapuí existem 5 postos pluviométricos de números 57, 419, 410, 416 e 508, porém foram utilizados apenas os dados históricos (1988 a 2022) do posto pluviométrico nº 57, localizado na sede do município de Icapuí, pois a

utilização dos demais postos foi inviabilizada em decorrência de falhas em suas séries históricas.

Como os postos pluviométricos não registram dados de temperatura, os mesmos foram estimados pelo Método de Regressão Linear, por meio do programa Celina (versão 1.0) desenvolvido pelo Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará (LCGRH, 2023), que utiliza as coordenadas e altitudes dos postos pluviométricos para estimar a temperatura média anual.

A evapotranspiração potencial (ETP) foi calculada por meio da equação 1, a partir da temperatura (T); do índice térmico anual (I) e do fator de correção que depende da latitude (K).

$$ETP = 16 (10T/ I)^a \times K \quad (1)$$

Segundo Castany (1975), solos arenosos apresentam uma capacidade de retenção de 50 mm e solos argilosos de 200 mm. Na área de estudo, os solos são caracterizados como Neossolos Quartzarênicos (IBGE, 2022), sendo assim atribuído um valor de 50 mm para a capacidade de armazenamento do solo.

A evapotranspiração real (ETR) foi obtida a partir das relações entre as taxas de precipitação (PPT) e a evapotranspiração potencial (ETP), da seguinte forma:

- Se  $PPT > ETP$  então  $ETR = ETP$
- Se  $PPT < ETP$  então  $ETR = PPT$

A partir da evapotranspiração real e da precipitação total foi possível estimar a infiltração efetiva, que corresponde à quantidade da água de precipitação disponível para a recarga subterrânea.

### **3.6 Classificação hidroquímica**

Os resultados das análises físico-químicas foram comparados com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) para a classificação em relação à potabilidade.

Para classificar as águas subterrâneas quanto à salinidade foram utilizados os valores estabelecidos pela Resolução Conama nº 357 (BRASIL, 2005), que classifica as águas

em doces, salobras e salgadas a partir das concentrações de sólidos totais dissolvidos.

A classificação de acordo com o conteúdo iônico dominante foi feita utilizando o Diagrama de Piper, confeccionado através do programa Qualigraf (MOBÜS, 2003). A representação nesse diagrama é feita em três campos onde são plotados os valores percentuais das concentrações, expressas em meq/L, dos principais constituintes iônicos para os cátions e os ânions, sendo possível identificar as fácies hidroquímicas, tais como sulfatadas cálcicas, magnesianas ou sódicas; cloretadas cálcicas, magnesianas ou sódicas e bicarbonatadas cálcicas, magnesianas ou sódicas, a depender da composição iônica predominante.

No que se refere à qualidade das águas para uso na irrigação foi utilizada a classificação proposta pelo *U.S. Salinity Laboratory*, a partir do gráfico elaborado por meio do programa Qualigraf (MOBÜS, 2003) que relaciona a condutividade elétrica a 25° C, como indicadora do perigo de salinização do solo, e a Razão de Adsorção de Sódio, como indicadora de perigo de sodificação. A Razão de Adsorção de Sódio (SAR) é calculada pela equação 2, onde “r” indica que as concentrações de Na<sup>+</sup>, Ca<sup>2+</sup> e Mg<sup>2+</sup> estão expressas em meq/L. Com base no SAR, as águas podem ser classificadas como: excelente (0 ≤ SAR ≤ 10); boa (10 ≤ SAR ≤ 18); regular (18 ≤ SAR ≤ 26) e de má qualidade (SAR >26).

$$SAR = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{r(Ca^{2+} + Mg^{2+})}{2}}} \quad (2)$$

### 3.7 Estatística multivariada

A análise estatística multivariada foi realizada por meio da análise fatorial, pelo método da análise de componentes principais (ACP), e análise de agrupamento hierárquico (AAH), utilizando o software *SPSS Statistics* (versão 17.0). A análise de componentes principais permitiu a identificação das variáveis de maior significância na composição das águas subterrâneas e a análise de agrupamento hierárquico promoveu a formação de grupos de amostras com águas de características químicas semelhantes.

Para a análise fatorial, inicialmente, foi gerada a matriz de correlação a partir dos dados originais para avaliação da eficiência da descrição dos dados, representada pelos autovalores da matriz. A verificação da adequação dos dados da análise fatorial foi realizada a partir do índice KMO (*Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy*) e do Teste Estatístico de Esfericidade de Bartlett. Posteriormente, foi feita a extração dos valores da



matriz de correlação por meio do método das componentes principais. Em seguida, realizou-se a rotação da matriz das cargas fatoriais geradas na extração utilizando o método de rotação varimax.

O agrupamento hierárquico foi realizado utilizando o método Ward, com a medida da similaridade obtida pela distância euclidiana quadrada. As amostras foram interligadas por suas associações, produzindo um dendrograma no qual as amostras similares quimicamente são agrupadas entre si. Os grupos gerados foram submetidos à análise de variância (*One-Way ANOVA*) e apresentaram níveis de significância inferiores a 5%, indicando a formação de um conjunto relativamente estável de grupos.

### 3.8 Modelagem hidrogeoquímica

Inicialmente, foi utilizado o Diagrama de Gibbs (GIBBS, 1970) para identificar os processos geoquímicos que contribuem para as características químicas das águas subterrâneas. Este diagrama define a precipitação pluviométrica, o intemperismo das rochas e o processo de evaporação como os principais mecanismos naturais que controlam a química das águas, as quais são avaliadas com base nas relações de STD versus a razão  $r\text{Na}^+/r(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  e de STD versus a razão  $r\text{Cl}^-/r(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ , onde “r” indica que as concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$  estão expressas em meq/L.

Posteriormente, os resultados das análises químicas de água, rocha e sedimento foram modelados utilizando o programa Phreeqc. Foi aplicado o modelo de especiação e solubilidade mineral utilizando o banco de dados termodinâmico Wateq4f devido a melhor adequação aos parâmetros analisados. Os índices de saturação (SI) obtidos pelo modelo foram usados para avaliar o grau de equilíbrio entre a água e as fases minerais. O SI é definido pela relação entre o Produto da Atividade Iônica ( $K_{IAP}$ ) e o Produto de Solubilidade ( $K_{SP}$ ) conforme demonstrado na Equação 3 (GARRELS; CHRIST, 1965):

$$SI = \log_{10} (K_{IAP}/K_{SP}) \quad (3)$$

Com base no valor dos SIs foi possível identificar os estados de saturação dos minerais como equilíbrio ou saturação ( $SI=0$ ), subsaturação ( $SI<0$ ) ou supersaturação ( $SI>0$ ). Os estados de saturação dos minerais indicam as direções dos processos geoquímicos. Assim, a subsaturação indica tendência à dissolução e a supersaturação indica tendência à precipitação da fase mineral, enquanto que o estado de equilíbrio ou saturação indica que o

mineral pode dissolver ou precipitar para se manter em equilíbrio na solução, na prática considera-se em equilíbrio o intervalo  $-0,05 < SI < 0,05$  (PARKHURST; APPELO, 2013).

### 3.9 Vulnerabilidade dos aquíferos à salinização por intrusão marinha

Para a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à salinização foram utilizados dados de 16 poços localizados na faixa urbana costeira da área que captam do sistema aquífero Dunas/Barreiras e possuem os parâmetros necessários para a aplicação da metodologia adotada. A avaliação foi realizada a partir da aplicação da metodologia GALDIT, desenvolvida por Chachadi e Lobo Ferreira (2001), que utiliza seis parâmetros, para os quais são atribuídos pesos relativos à influência no processo de intrusão de águas marinhas no aquífero. São utilizadas variáveis indicadoras com faixas de valores para os parâmetros mensuráveis. As variáveis são classificadas com base na importância para o comprometimento da vulnerabilidade do aquífero, variando de muito baixa a alta (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na metodologia GALDIT

Parâmetro	Peso	Variáveis indicadoras			
		2,5 (muito baixa)	5 (baixa)	7,5 (média)	10 (alta)
<b>G</b> - Ocorrência da água subterrânea	1	Aquífero limitado	Aquífero semiconfinado	Aquífero não confinado	Aquífero confinado
<b>A</b> - Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	3	< 5	5 - 10	10 - 40	> 40
<b>L</b> - Altura do nível do lençol freático acima do nível do mar (m)	4	> 2	1,5 - 2	1 - 1,5	< 1
<b>D</b> - Distância do ponto em relação à costa (m)	4	> 1000	750 - 1000	500 - 750	< 500
<b>I</b> - Impacto do estado existente de intrusão de água do mar ( $rCl/rHCO_3^-$ )	1	< 1	1 - 1,5	1,5 - 2	> 2
<b>T</b> - Espessura do aquífero (saturada) (m)	2	< 5	5 - 7,5	7,5 - 10	> 10

Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001)

Os valores das classes das variáveis indicadoras referentes a cada parâmetro foram utilizados para confecção de mapas temáticos, a partir dos quais foi calculado o índice de vulnerabilidade GALDIT (IG) por meio da relação ponderada apresentada na equação 4:

$$IG = \frac{\sum_{i=1}^6 (W_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (4)$$

Onde W é o peso para cada parâmetro, que varia conforme a influência de 1 (fraca) a 4 (forte), e R é o valor da classificação para cada variável, que de acordo com a importância vai de 2,5 (muito baixa) a 10 (alta).

A classificação da vulnerabilidade GALDIT foi feita a partir dos intervalos apresentados na tabela 2. Os valores obtidos para cada poço foram interpolados pelo método de krigagem para gerar o mapa de zoneamento da vulnerabilidade GALDIT para o aquífero.

Tabela 2 – Classificação da vulnerabilidade pelo índice GALDIT

Índice GALDIT	Classe de Vulnerabilidade
< 5	Baixa
5 - 7,5	Média
> 7,5	Alta

Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001)

#### **4 RESULTADOS E DISCUSSÕES**

Os resultados obtidos e suas discussões serão apresentados sob a forma de coletânea de artigos científicos, conforme alternativa sugerida pelo Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará.

Os artigos apresentados neste trabalho abordam os seguintes temas:

- Aplicação de análise estatística multivariada na identificação dos parâmetros de controle composicional das águas subterrâneas da área;
- Utilização de modelagem hidrogeoquímica para inferir os processos responsáveis pelas características químicas das águas subterrâneas da área;
- Análise da vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha no aquífero Dunas/Barreiras.

**MULTIVARIATE STATISTICS APPLIED TO THE IDENTIFICATION OF  
COMPOSITIONAL CONTROL PARAMETERS FOR GROUNDWATER**

**ESTATÍSTICA MULTIVARIADA APLICADA À IDENTIFICAÇÃO DE  
PARÂMETROS DE CONTROLE COMPOSICIONAL DAS ÁGUAS  
SUBTERRÂNEAS**

**ABSTRACT**

The objective of the present study was to identify the most influent parameters in the composition of groundwater in the municipality of Icapuí, Ceará - Brazil, seeking correlations with the composition of the percolating aquifer formations that can be associated with the sources of these components. For this purpose, multivariate statistical techniques were applied by means of a Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA). The PCA allowed a reduction of physicochemical parameters and determined the two components responsible for approximately 86% of total variance in the data for both sampling periods (rainy and dry). The first component is represented by variables that indicate natural rock weathering processes, and the second comprises seasonality and pollution indicators. Samples were also correlated through HCA according to compositional similarities, which were associated with possible natural or human sources.

**Keywords:** Factorial Analysis; Principal Component Analysis; Hierarchical Cluster.

**RESUMO**

Este estudo teve como objetivo identificar os parâmetros de maior influência na composição das águas subterrâneas no município de Icapuí, Ceará - Brasil, buscando correlacionar com a composição das formações aquíferas percoladas associando às possíveis fontes destes constituintes. Para tanto foram aplicadas técnicas estatísticas multivariadas de Análise de Componentes Principais (ACP) e Análise de Agrupamento Hierárquico (AAH). A ACP promoveu a redução dos parâmetros físico-químicos e definiu duas componentes responsáveis por aproximadamente 86% da variância total dos dados para ambos os períodos de coleta (chuvoso e estiagem). A primeira componente é representada pelas variáveis indicadoras de processos de intemperismo natural das rochas e a segunda é formada por indicadores de

sazonalidade e poluição. Por meio da AAH, as amostras foram correlacionadas de acordo com as similaridades composicionais, as quais foram associadas às possíveis fontes naturais ou antrópicas.

**Palavras-chave:** Análise Fatorial; Análise de Componentes Principais; Agrupamento Hierárquico.

## 1 INTRODUCTION

Groundwater is a considerably important resource, particularly in regions such as northeastern Brazil, where there is an unbalance between water supply and demand. Rainfall variability is a natural driving factor in these types of regions, which when temporally poorly distributed, and in combination with high evaporation rates, decreases the supply of water especially in superficial reservoirs.

Groundwater is the only source of water supply in nearly 40% of Brazilian municipalities, particularly small ones where it guarantees safe water with low treatment costs (Villar 2016). In the semiarid region of the country, aquifers have great strategic importance, particularly in coastal areas, such as in Icapuí, state of Ceará. This municipality has groundwater as its only water supply, which makes it extremely important for the water security of local communities and to guarantee economic activities.

Maia (2018) monitored the concentrations of nitrogen and microbiological compounds in groundwater in the municipality of Icapuí and correlated them with the cases of waterborne diseases. The results made it possible to attribute the presence of bacteria and nitrogen compounds to the increase in cases of diarrheal diseases, as well as the reappearance of cases of viral hepatitis.

Characterization and monitoring of the chemical composition of groundwater are indispensable when determining compatible and adequate uses with the qualitative conditions of this resource (Heibati et al. 2017; Molinari et al. 2019; Besser et al. 2019). Consistent space-time monitoring involves determining many water characteristics in several places and periods, which generates a large amount of correlated information (Bertossi et al. 2013).

Multivariate statistical analysis is an important tool when manipulating and interpreting data with many variables, since it allows to reduce the information contained in the original variables into a smaller set of statistical variables with minimal loss of information (Hair et al. 1998).

Different multivariate statistical techniques, such as the Principal Component Analysis (PCA) and Hierarchical Cluster Analysis (HCA), have been increasingly applied to studies regarding groundwater (Keita & Zhonghua 2017; Liu et al. 2017; Everest & Özcan 2019; Ado et al. 2019).

Gomes & Cavalcante (2017) used the techniques of Principal Component Analysis and Hierarchical Cluster Analysis to identify the similarity of the determinant variables of groundwater quality in the municipality of Fortaleza. They defined three components responsible for about 90% of the total variability of the data, the first component is indicative of pollution, the second of alkalinity and the third of salinity.

Thus, the aforementioned techniques were used in the present investigation with the aim of identifying the variables that most contribute to the physicochemical characteristics of groundwater, seeking to detect temporal and spatial variations caused by either human or natural factors associated with seasonality. Therefore, contributing to the understanding of a relationship between the composition of percolated rocks and groundwater in the municipality of Icapuí, Ceará – Brazil.

## **2 STUDY AREA**

The municipality of Icapuí is located in the eastern extremity of the state of Ceará (Figure 1), covers about 421 km<sup>2</sup>, and has approximately 20,000 inhabitants (IBGE 2021). Water supply is carried out through tubular wells administered by the publicly owned Autonomous Water and Sewage Service (SAAE) and through private wells.

The climate is Tropical Warm Semi-arid, with an average temperature of 26 to 28° C, and maximums between 30 and 31° C. According to the historical series from 1988 to 2021, the average total annual rainfall is 894 mm, with the highest precipitation between January and June, averaging 840 mm, and only 54 mm of average rainfall between July and December (FUNCEME 2021). Thus, the first half of the year is defined as the rainy season and the second as the dry season.

According to Mente (2008), the region is inserted within the hydrogeological context of the Coastal Province, more specifically in the Potiguar sub-province, represented by the Dunas, Barreiras, Jandaíra, and Açú aquifers.

The Dunas Aquifer corresponds to wind deposits that occur across the whole coastline, with widths between 6 and 20 meters and is composed, according to Maia (2018), of well selected sands of fine to mean grain size.

The Barreiras Aquifer is found outcropping or subjacent to the Dunas Aquifer and has the greatest water potential in the area, which is widely used. It is formed by silt-clay fine-grained sandstones and red sandstones of mean to coarse sand sizes, with conglomerate levels (Sousa 2002).

The Jandaíra Aquifer is located at depths between 20 and 108 meters, with concordant upper contact with the Barreiras Aquifer and lower contact with the Açu Aquifer. It is mainly composed of limestones, marls, siltites, and dolomites (Morais et al. 2005; Vasconcelos et al. 2010).

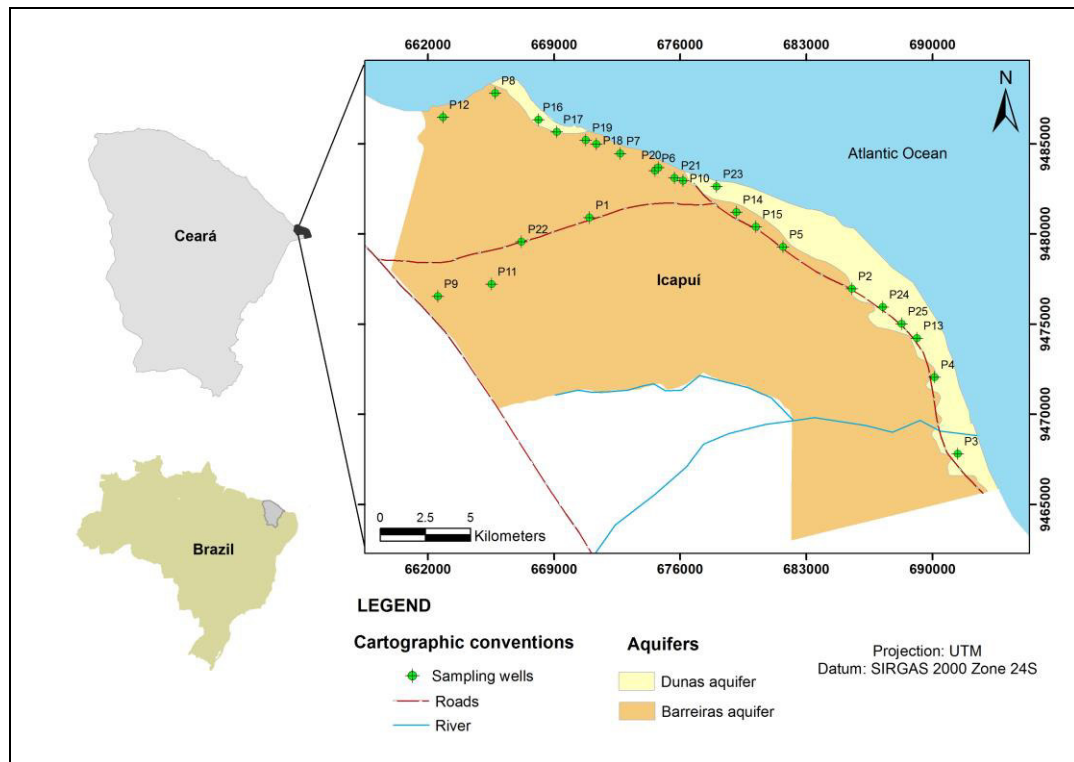
The Açu Aquifer occurs under confinement conditions, caused by both the clay layers of the upper portion of the Açu Formation and by the base of the Jandaíra Aquifer, and can be detected at depths greater than 200 meters. It is composed predominantly of coarse to conglomeratic sandstones at its base, moving up to medium sandstones in its intermediate portion, and with finer sandstones at the top, showing a continuous vertical increase in the amount of clay (Morais et al. 2005).

### **3 MATERIAL AND METHODS**

Data from 50 samples of groundwater collected from 25 wells in the municipality of Icapuí were used for physicochemical analyses (Figure 1). These samples were collected over the course of two campaigns, carried out in the months of February (rainy season) and August (dry season) of 2019, aiming to identify the influence of seasonality in the physicochemical characteristics of the water. The parameters analyzed included pH, electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), total alkalinity (TA), total hardness (TH), turbidity, major elements (bicarbonate, calcium, magnesium, chloride, sulfate, sodium, and silica), and minor elements (potassium, nitrate, fluoride, and bromide). X-ray fluorescence data was also obtained from four samples of the main aquifers in the area (Dunas, Barreiras, Jandaíra, and Açu) to identify the main oxides present and establish their proportions in each sample. This step was conducted seeking to associate possible origins to the constituents found in the groundwater. Sampling points were selected based on access to the sampling location and use of the water obtained, considering that 80% of the wells are intended for public supply.



Figure 1 - Distribution of the wells sampled and aquifers in the study area



Source: SGB (2014, modified).

The multivariate statistical analyses carried out were a Factorial Analysis, by means of PCA, and an HCA, using the SPSS Statistics software (version 17.0). The PCA regards the explanation of covariance structure through few linear combinations of the original variables being studied, with the objective of reducing the original dimension, facilitating the interpretation of the analyses conducted (Ferreira 1996). In general, the explanation for all the variability of a system determined by the variables can be done through its principal components (Buttafuoco et al. 2017; Calazans et al. 2018).

The factorial analysis was initiated by transforming the original data matrix into a correlation matrix. The KMO rate (Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy) was used to verify the adequacy of the data in the factorial analysis, which considers an analysis satisfactory with  $KMO > 0.5$ , in addition to Bartlett's Test of Sphericity, considered significant at  $p < 0.01$ , to test the null hypothesis that the variables analyzed were not correlated (Ferreira 1996; Hair et al. 1998). The values of the correlation matrix were later extracted through the PCA method. Then, the rotation of the factorial load matrix, generated in the extraction, was carried out using the varimax rotation method, which minimizes the number of variables with high loads in different factors, allowing the association of a variable with a single factor (Keita & Zhonghua 2017; Gomes et al. 2020).

Finally, the samples were clustered based on the similarities of the characteristics analyzed, considering the attributes explained by each component in the factorial analysis. To do so, the HCA technique was used, which interlinks the samples according to their associations, producing a dendrogram where samples that are considered similar due to the variables chosen are clustered together (Dabgerwal & Tripathi 2016; Tiri et al. 2017). The HCA was conducted through the Ward method, with the similarity measure obtained by means of the squared Euclidean distance. The groups generated were submitted to an analysis of variance (One-Way ANOVA) and presented significance levels below 5%, indicating that they formed a relatively stable set of groups (Gomes & Cavalcante 2017; Gomes et al. 2020).

## **4 RESULTS AND DISCUSSION**

### **4.1 Principal Component Analysis (PCA)**

The PCAs were carried out based on simulations initially using 17 physicochemical variables. In the final simulation, 12 variables presented significant results in the definition of the most adequate model to explain the variation in data in both sampling periods (rainy and dry).

Regarding the model for rainy season sampling, the variables that were found to be significant were EC, chloride, calcium, magnesium, TH, sulfate, potassium, bromide, TDS, pH, bicarbonate, and TA. In turn, the representative variables for the dry period were EC, chloride, calcium, magnesium, TH, sulfate, bromide, TDS, pH, bicarbonate, TA, and nitrate ( $\text{N-NO}_3^-$ ).

The correlation between the variables selected for the model referring to the rainy period can be observed in Table 1. Nearly 77% of correlation coefficients were above 0.5, indicating a significant correlation between variables, as indicated by Gomes & Cavalcante (2017) and Gomes et al. (2020). A similar behavior was observed for the dry period (Table 2), with nearly 70% of coefficients presenting values higher than 0.5.

Table 1 - Correlation matrix of the variables from samples collected in the rainy period (February/2019)

Variable	pH	EC	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TA	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
pH	1.000											
EC	0.373	1.000										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.810</b>	<b>0.652</b>	1.000									
TA	<b>0.825</b>	<b>0.633</b>	<b>0.999</b>	1.000								
Cl <sup>-</sup>	0.285	<b>0.988</b>	<b>0.543</b>	<b>0.524</b>	1.000							
Ca <sup>2+</sup>	0.348	<b>0.845</b>	<b>0.608</b>	<b>0.589</b>	<b>0.842</b>	1.000						
Mg <sup>2+</sup>	0.326	<b>0.949</b>	<b>0.584</b>	<b>0.563</b>	<b>0.947</b>	<b>0.810</b>	1.000					
TH	0.354	<b>0.940</b>	<b>0.627</b>	<b>0.606</b>	<b>0.937</b>	<b>0.956</b>	<b>0.946</b>	1.000				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.192	<b>0.687</b>	0.338	0.321	<b>0.685</b>	0.403	<b>0.733</b>	<b>0.589</b>	1.000			
K <sup>+</sup>	0.084	<b>0.707</b>	0.290	0.266	<b>0.702</b>	0.418	<b>0.713</b>	<b>0.587</b>	<b>0.635</b>	1.000		
Br <sup>-</sup>	0.348	<b>0.919</b>	<b>0.656</b>	<b>0.640</b>	<b>0.902</b>	<b>0.810</b>	<b>0.805</b>	<b>0.849</b>	<b>0.557</b>	<b>0.522</b>	1.000	
TDS	0.429	<b>0.995</b>	<b>0.696</b>	<b>0.678</b>	<b>0.977</b>	<b>0.840</b>	<b>0.947</b>	<b>0.936</b>	<b>0.715</b>	<b>0.689</b>	<b>0.919</b>	1.000

Source: Prepared by the author.

Note: Highlighted in bold are the coefficients were above 0.5, indicating a significant correlation between variables.

The correlation found among pH, bicarbonate, and alkalinity was expected, given that pH is essentially a function of dissolved carbonic gas and alkalinity of the water. Moreover, alkalinity is a direct consequence of the presence or absence of carbonates, bicarbonates, and hydroxides. The strong correlation (> 0.8) among EC, chloride, calcium, magnesium, TH, bromide, and TDS indicated a greater influence of these ions in the variations of conductivity in the water analyzed, as well as in the concentration of TDS. The correlation with hardness can be explained by the presence of calcium and magnesium, since these ions define water hardness.

Table 2 - Correlation matrix of the variables from samples collected in the dry period (August/2019)

Variable	pH	EC	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TA	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
pH	1.000											
EC	0.421	1.000										
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.831</b>	<b>0.654</b>	1.000									
TA	<b>0.848</b>	<b>0.631</b>	<b>0.998</b>	1.000								
Cl <sup>-</sup>	0.348	<b>0.991</b>	<b>0.561</b>	<b>0.538</b>	1.000							
Ca <sup>2+</sup>	0.390	<b>0.862</b>	<b>0.613</b>	<b>0.591</b>	<b>0.853</b>	1.000						
Mg <sup>2+</sup>	0.321	<b>0.961</b>	<b>0.529</b>	<b>0.505</b>	<b>0.968</b>	<b>0.794</b>	1.000					
TH	0.379	<b>0.956</b>	<b>0.608</b>	<b>0.584</b>	<b>0.953</b>	<b>0.959</b>	<b>0.933</b>	1.000				
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	0.284	<b>0.657</b>	<b>0.507</b>	0.478	<b>0.606</b>	0.365	<b>0.694</b>	<b>0.538</b>	1.000			
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0.537</b>	-0.073	-0.391	-0.411	-0.039	0.161	-0.016	0.088	-0.283	1.000		
Br <sup>-</sup>	0.424	<b>0.945</b>	<b>0.648</b>	<b>0.625</b>	<b>0.932</b>	<b>0.880</b>	<b>0.854</b>	<b>0.916</b>	<b>0.503</b>	-0.012	1.000	
TDS	0.479	<b>0.995</b>	<b>0.713</b>	<b>0.691</b>	<b>0.977</b>	<b>0.858</b>	<b>0.955</b>	<b>0.950</b>	<b>0.687</b>	-0.113	<b>0.932</b>	1.000

Source: Prepared by the author.

Note: Highlighted in bold are the coefficients were above 0.5, indicating a significant correlation between variables.

The PCAs applied showed KMO rates of 0.785 and 0.680 for the samplings conducted in the rainy and dry periods, respectively, indicating that the description of data variability was satisfactory.

The simulations conducted with the 12 variables collected during the rainy and dry periods explained 86.2% and 85.8% of total variance, respectively, and presented two components. Component 1 for the rainy and dry periods explained 70.9% and 68.5% of data variability, and were represented by the variables EC, chloride, calcium, magnesium, TH, sulphate, potassium, bromide, and TDS. These characterize components associated with water mineralization processes that result from water/rock interactions throughout percolation in different substrates. The component 2 of each period corresponded to 15.3% and 17.3% of the variance in the data sets collected in both seasons (rainy and dry, respectively) and encompass the variables pH, bicarbonate, alkalinity, and nitrate. These were defined as components associated with alterations in the acidity, alkalinity, and neutrality conditions of the waters analyzed. The presence of nitrate as a significant variable in samples from the dry period could be associated with a lower volume of rainfall that interferes in the dilution of this parameter, promoted by rainfall recharge.

The Table 3 shows the factorial loads and variance explained by the components

after applying the orthogonal rotation through the varimax method to minimize the number of variables that present high loads in each factor, as used in other studies (Keita & Zhonghua 2017; Gomes & Cavalcante 2017; Ado et al. 2019; Gomes et al. 2020).

Table 3 - Factorial loads and variance explained in the principal component analyses, after rotation through the varimax method

Variable	Rainy period		Dry period	
	C1	C2	C1	C2
pH	0.044	<b>0.915</b>	0.242	<b>0.883</b>
Electrical conductivity	<b>0.920</b>	0.371	<b>0.962</b>	0.237
Bicarbonate	0.345	<b>0.914</b>	0.511	<b>0.800</b>
Total alkalinity	0.318	<b>0.926</b>	0.482	<b>0.819</b>
Chloride	<b>0.949</b>	0.262	<b>0.968</b>	0.146
Calcium	<b>0.751</b>	0.431	<b>0.908</b>	0.118
Magnesium	<b>0.923</b>	0.293	<b>0.949</b>	0.125
Total hardness	<b>0.875</b>	0.384	<b>0.977</b>	0.128
Sulphate	<b>0.764</b>	0.051	<b>0.576</b>	0.342
Bromide	<b>0.804</b>	0.423	<b>0.923</b>	0.216
Total dissolved solids	<b>0.901</b>	0.424	<b>0.945</b>	0.309
Potassium	<b>0.798</b>	-0.046	-	-
Nitrate (N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	-	-	0.179	<b>-0.791</b>
Variance explained %	70.913	15.326	68.506	17.334
Variance accumulated %	86.240		85.841	

Source: Prepared by the author.

Legend: C1 - Component 1; C2 - Component 2.

Note: Highlighted in bold are the factorial loads of the variables that represent each component.

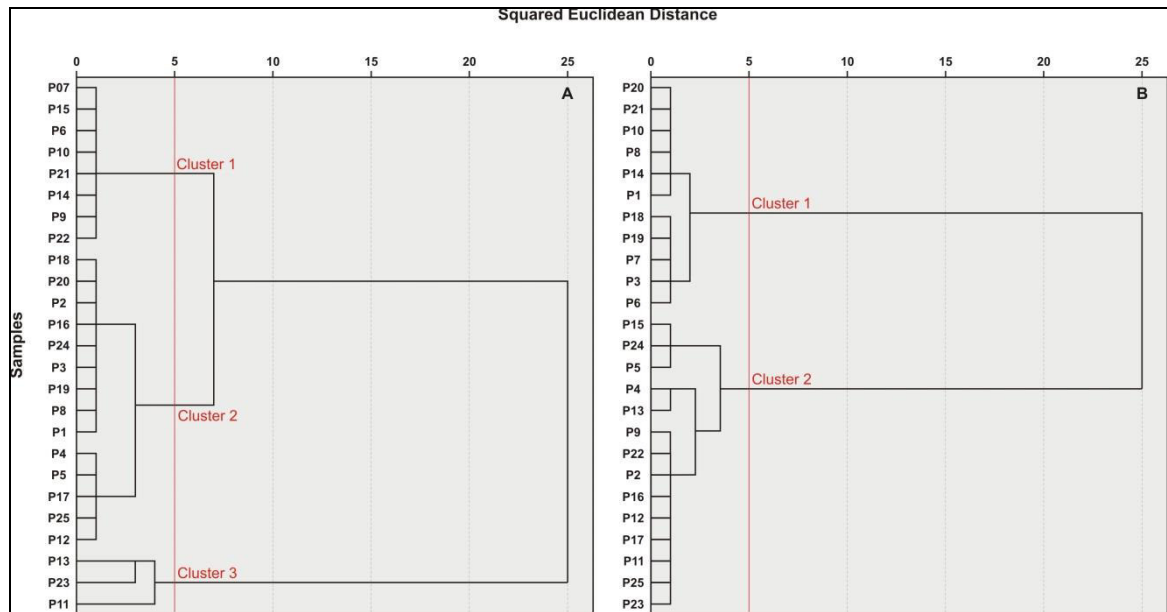
## 4.2 Hierarchical Cluster Analysis (HCA)

The HCA allowed the compartmentalization of samples into groups according to chemical similarities. The number of clusters was defined by the first big difference between coefficients that were re-dimensioned in the cluster. The cut-off point to define the homogeneous clusters was at 5, allowing a better measure of similarity for the formation of groups in both periods. In total, three clusters were formed for the first component and two clusters for the second component for both seasons.

The dendrograms of the samples collected during the rainy period show that in the first component (EC, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, TH, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, Br<sup>-</sup>, and TDS), out of the 25 samples, 8

(32%) compose cluster 1, 14 (56%) form cluster 2, and 3 (12%) are in cluster 3 (Figure 2A). In the second component (pH,  $\text{HCO}_3^-$ , TA) the samples are divided into two clusters, in which the first comprises 11 samples (44%) and the second, 14 (56%) (Figure 2B).

Figure 2 - Dendrograms resulting from the hierarchical cluster analysis, for the rainy period, of the variables explained by: A. Component 1; B. Component 2

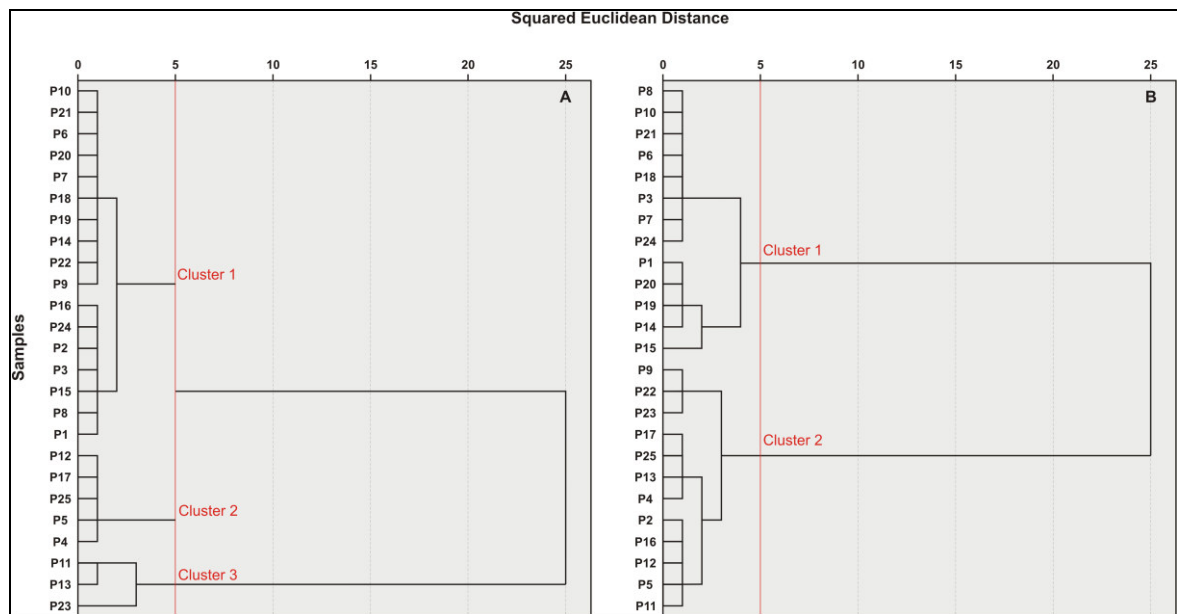


Source: Prepared by the author.

The dendrograms of the samples collected during the dry period show that in the first component (EC,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , TH,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Br}^-$ , and TDS), the 25 samples were distributed among the clusters as follows: 68% (17 samples) in cluster 1, 20% (5 samples) in cluster 2 and 12% (3 samples) in cluster 3 (Figure 3A). In the second component (pH,  $\text{HCO}_3^-$ , TA, and  $\text{N-NO}_3^-$ ) the two clusters formed comprised: 13 samples (52%) in cluster 1 and 12 samples (48%) in cluster 2 (Figure 3B).

The distribution of samples in the clusters of each component was based on the variations in concentration of the elements present, mainly due to the aquifers involved, influence of seasonality, and human factors. Table 4 shows the mean concentrations of variables for the samples in each cluster.

Figure 3 - Dendrograms resulting from the hierarchical cluster analysis, for the dry period, of the variables explained by: A. Component 1; B. Component 2



Source: Prepared by the author.

Table 4 - Mean values of the parameters of samples collected during the rainy and dry periods, distributed in the hierarchical clusters

		Rainy period											
Component	Cluster	pH	EC	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TA	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	K <sup>+</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
			(μS/cm)	----- (mg/L) -----									
1	1	6.5	518.6	79.19	68.9	80.5	7.1	4.6	37.2	26.1	9.1	0.6	331.6
	2	6.5	1 472.9	139.6	114.4	312.8	39.4	25.8	206.0	49.9	20.7	1.2	841.8
	3	7.2	3 612.0	259.6	212.7	933.0	146.7	85.6	723.3	174.8	25.9	2.9	2 104.7
2	1	5.7	845.7	25.1	20.6	184.3	13.0	12.2	83.3	40.2	15.7	0.7	465.4
	2	7.3	1 878.8	220.7	183.2	413.9	64.6	37.3	316.9	70.7	19.1	1.6	1 116.6
		Dry period											
Component	Cluster	pH	EC	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	TA	Cl <sup>-</sup>	Ca <sup>2+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	TH	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Br <sup>-</sup>	TDS
			(μS/cm)	----- (mg/L) -----									
1	1	5.9	898.9	68.6	58.6	178.1	18.3	14.1	104.2	39.8	7.9	0.7	508.9
	2	7.0	2 046.2	242.5	198.8	427.9	70.7	29.9	301.6	89.1	6.3	2.5	1 175.8
	3	7.0	4 379.3	273.6	224.2	1 159.7	172.0	96.0	830.0	131.1	6.7	4.7	2 394.3
2	1	5.5	887.8	25.0	20.5	188.3	15.6	15.3	102.5	42.4	9.2	0.7	474.6
	2	7.2	2 259.1	239.5	199.6	516.5	81.5	39.9	369.8	80.3	5.5	2.5	1 295.3

Source: Prepared by the author.

Legend EC - Electrical conductivity; TA – Total alkalinity; TH – Total hardness; TDS – Total dissolved solids.

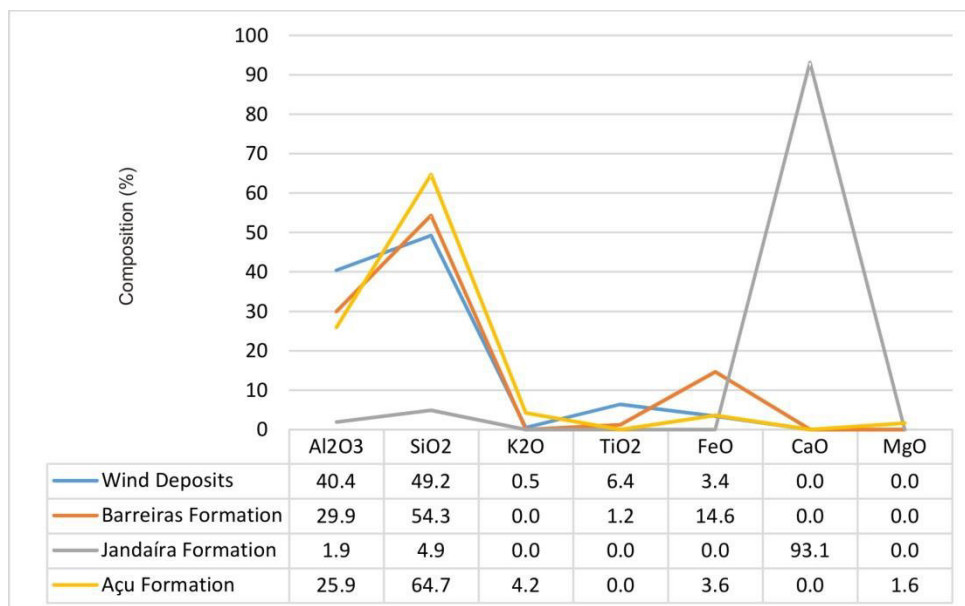


The wells that compose cluster 1 of the first component regarding the rainy period have depths that vary between 10 and 685 meters and obtain water from the Dunas, Barreiras, and Açú aquifers, the latter of which can only be reached by wells that are at least 200 meters deep (western portion of the area). The waters from these wells are characterized by low ionic concentrations associated with the sandy constitution of the aquifers, predominantly composed of  $\text{SiO}_2$  (Figure 4), which has low solubility in normal temperature conditions but higher solubility in geothermal groundwater conditions (Gomes et al. 2018). The low salt concentrations also indicate a lower marine influence in these wells. Cluster 2 encompasses wells with intermediate depths, varying between 36 and 115 meters. These waters originate from the Barreiras and Jandaíra aquifers, the latter of which does not outcrop and is detected 100 m below the surface in the western portion of the study area and from 30 m in depth onwards in the eastern coastal zone. The waters in this cluster present ions with higher mean concentrations in relation to cluster 1, thus indicating a greater contribution from seawater, as well as from the limestones in the Jandaíra aquifer due to dissolution processes involving calcite. The three wells that form cluster 3 present variable depths. The two more shallow ones are located along the coastal zone (10 and 32 meters), catching water from the Dunas, Barreiras and Jandaíra aquifers, respectively, while the deepest one is located in the western portion of the study area (594 meters) and catches water from the Açú aquifer. Its waters have the highest mean concentrations in the component and may be related to a marine influence, which the Dunas and Barreiras unconfined aquifers are more susceptible, as well as to the mineralization of the waters resulting from the interaction with the substrate over the percolation associated with the Açú aquifer. According to Celligoi (1999), higher concentrations of sulphate, bromide, and chloride can be attributed to both marine aerosols and to the influence of seawater over continental water, due to the location of the wells near the coastline. High potassium and magnesium values may be associated with percolation through the Açú aquifer, given the presence of these elements in the rocks that compose its framework, identified by means of X-ray fluorescence analyses (Figure 4). These analyses also enabled to attribute the higher concentrations of calcium in the water to the limestones of the Jandaíra aquifer, considering the predominance of this element (nearly 93%) in the composition of the rocks analyzed, associated with high mobility (Reimann & Caritat 1998).

The wells that represent cluster 1 in the second component of the rainy period are shallow to reasonably deep, with waters that originate from the Dunas and Barreiras aquifers. This cluster is characterized by acidic water that may be associated with the composition of the Dunas and Barreiras aquifers, which are rich in silica and aluminium (Figure 4), and with

the sampling period. According to Gomes and Cavalcante (2017), the introduction of recent waters in the aquifer (meteoric water), with higher concentrations of  $\text{CO}_2$ , promotes an increase in groundwater acidity. Cluster 2 is composed of wells with depths that vary between 10 and 685 meters (western sector) that obtain water from all four aquifers: Dunas, Barreiras, Jandaíra, and Açú. The waters in this cluster vary from neutral to alkaline. According to Hounslow (1995), higher values of pH are usually found in waters in which there is a predominance of  $\text{Na}^+$  and  $\text{Ca}^{2+}$  ions or in bicarbonate-rich waters. The more alkaline property of these waters in the cluster may be an indication of a greater contribution from the Jandaíra aquifer in its origin.

Figure 4 - Main oxides present in the aquifers of the study area



Source: Prepared by the author.

Cluster 1 of the first component for the dry period is formed by the same wells as cluster 1 and another nine wells from cluster 2 of the first component for the rainy period. Thus, these are also characterized by waters with low salinity, though an increase in the values of this cluster can be observed in comparison to the samples collected during the rainy period. This demonstrates the influence of seasonality in the variation of ionic concentrations in groundwater, especially in regions where there are shallow aquifers, in which a decrease in underground recharge during periods with less rainfall contributes to an increase of salt concentrations in the waters. The 5 wells that compose this cluster 2 are also part of the second cluster of the first component for the rainy period sampling, presenting the same characteristics regarding intermediate salinity of the waters. Cluster 3 was also formed by the

same wells that compose the third cluster of the first component in the rainy period sampling. This cluster is represented by waters with high salt concentrations, particularly chloride. The presence of chloride in groundwater can be attributed to the dissolution of saline deposits, saline intrusions, effluent discharges from chemical industries and domestic sewage (Celligoi 1999). The higher chloride values in the waters of this cluster are possibly associated with marine influence and influence from domestic sewage, given the absence of basic sanitation conditions in the area.

Cluster 1 of the second component in the dry period is composed, again, by the same wells of cluster 1 and another two wells from cluster 2 of the second component in the rainy period, represented by shallow wells with acidic waters. Nitrate was a significant parameter in the samples collected during the dry period, probably because of the lower dilution process that takes place in this condition in comparison to the rainy period. The absence of basic sanitation in the area, with consequent use of septic tanks, contributes to an increase in nitrate concentrations in the water (Sadler et al. 2016; Maia 2018). In the cluster 1 the nitrate presents values varying between 3.6 and 21.4 mg/L for  $\text{N-NO}_3^-$ , with six of the thirteen samples (46%) showing values above the recommendations by the Ministry of Health for drinking water in Brazil, which is a maximum value of 10 mg/L for  $\text{N-NO}_3^-$  and approximately equivalent to the orientation of the World Health Organization (WHO) that establishes limits at 50 mg/L for  $\text{NO}_3^-$  and 11.3 mg/L for  $\text{N-NO}_3^-$ . This value was defined as a protective measure against childhood methemoglobinemia (WHO 2011), though other negative health outcomes, including cancer, are associated with ingesting water with high levels of nitrate (Sadler et al. 2016; Maia 2018). Cluster 2 of the second component in the dry period is composed by wells that also part of the cluster 2 of the second component in the rainy period. This cluster encompasses wells deeper than cluster 1, reaching 685 meters, and that obtain water from the Dunas, Barreiras, Jandaíra and Açú aquifers, which have pH varying between neutral and alkaline. Nitrate values were lower here than in cluster 1, probably due to the greater depths of the wells. This makes the water less susceptible to superficial contaminations, as also observed by Maia (2018).

## 5 CONCLUSIONS

The factorial analysis by means of PCA allowed the selection of the parameters that hold the most significance regarding the composition of groundwater in the municipality of Icapuí, Ceará. Compositional variations were represented by two components, one

associated with mineralization processes, controlled by electrical conductivity, chloride, calcium, magnesium, total hardness, sulphate, potassium, bromide and total dissolved solids, and another related to seasonality and water pollution, controlled by pH, bicarbonate, total alkalinity and nitrate.

The HCA promoted the clustering of water samples with similar chemical characteristics for each factor. This enabled establishing possible correlations regarding potential origins and elements present. These, in turn, were attributed mainly to natural sources generated through geochemical processes caused by the interaction of groundwater with percolated aquifers.

The multivariate statistical analysis showed an important contribution as a tool in the development of studies that include monitoring physicochemical parameters in groundwater. This is due to the reduction of parameters for analysis without compromising the quality of the information, making the process more efficient from a logistical and economic perspective, especially in regions that have groundwater as their main source of water supply, requiring constant monitoring of compositional alterations.

## 6 ACKNOWLEDGMENTS

The authors would like to thank the Environmental Geochemistry and Electron Microscopy Laboratories of the Geology Department of the Federal University of Ceará, for their support in carrying out the physicochemical and X-ray fluorescence analyses.

## REFERENCES

ADO, M, ADEYEYE, O, XIAO, C, LIANG, X. Hydrogeochemistry of Groundwater from Kazaure Area, NW Nigeria using Multivariate Statistics, **E3S Web of Conferences** **98**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807001>.

BERTOSSI, APA, MENEZES, JPC, CECÍLIO, RA, GARCIA, GO, NEVES, MA. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 2025-2036, 2013.

BESSER, H, REDHAOUNIAB, B, BEDOUIA, S, AYADIA, Y, KHELIFIB, F, HAMEDB, Y. Geochemical, isotopic and statistical monitoring of groundwater quality: Assessment of the potential environmental impacts of the highly polluted CI water in Southwestern Tunisia, **Journal of African Earth Sciences**, [s. l.], 153, 144–155, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2019.03.001>.

BUTTAFUOCO, G, GUAGLIARDI, I, TARVAINEN, I, JARVA, J. A multivariate approach to study the geochemistry of urban topsoil in the city of Tampere, Finland, **Journal of Geochemical Exploration**, [s. l.], 181, 191–204, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gexplo.2017.07.017>.

CALAZANS, GM, PINTO, CC, COSTA, EP, PERINI, AF, OLIVEIRA, SC. Using multivariate techniques as a strategy to guide optimization projects for the surface water quality network monitoring in the Velhas river basin, Brazil, **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], 190-726, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7099-z>.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas, **Geografia (Londrina)**, Londrina, 8(1), 91-97, 1999. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.1999v8n1p91>.

DABGERWAL, DK, TRIPATHI, SK. Assessment of surface water quality using hierarchical cluster analysis, **International Journal of Environment**, [s. l.], 5, 32-44, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.3126/ije.v5i1.14563>

EVEREST, T, ÖZCAN, H. Applying multivariate statistics for identification of groundwater resources and qualities in NW Turkey, **Environmental Monitoring and Assessment**, [s. l.], 191, 47, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10661-018-7165-6>.

FERREIRA, DF. **Análise multivariada**. Lavras, Minas Gerais, 1996.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Postos Pluviométricos**. Fortaleza: FUNCEME, 2023.

GOMES, LS, FURTADO, ACR, SOUZA, MC. A Sílica e suas Particularidades, **Revista Virtual de Química**, [s. l.], 10(4), 2018. Disponível em: <http://rvq.sbq.org.br>

GOMES, MCR, CAVALCANTE, IN. Aplicação da análise estatística multivariada no estudo da qualidade da água subterrânea, **Revista Águas Subterrâneas**, [s. l.], 31(1), 134-149, 2017.

GOMES, MCR, ANJOS, JASA, DALTRO, RR. Multivariate statistical analysis applied to the evaluation of groundwater quality in the central-southern portion of the state of Bahia – Brazil. **Revista Ambiente & Água**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2020.

HAIR JR, JF, ANDERSON, RE, TATHAN, RL, BLACK, WC. **Multivariate data analysis**, New Jersey: Prentice Hall, 928 p., 1998.

HEIBATI, M, STEDMON, CA, STENROTH, K, RAUCH, S, TOLJANDER, J, SÄVE-SÖDERBERGH, M, MURPHY, KR. Assessment of drinking water quality at the tap using fluorescence spectroscopy, **Water Research**, [s. l.], 125, 1-10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2017.08.020>.

HOUNSLOW, AW. **Water quality data: analysis and interpretation**, Lewis Publishers New York, Boca Raton, 1995.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

KEITA, S, ZHONGHUA, T. The assessment of processes controlling the spatial distribution of hydrogeochemical groundwater types in Mali using multivariate statistics, **Journal of African Earth Sciences**, [s. l.], 134, 573-589, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2017.07.023>.

LIU, P, HOTH, N, DREBENSTEDT, C, SUN, Y, XU, Z. Hydro-geochemical paths of multi-layer groundwater system in coal mining regions - Using multivariate statistics and geochemical modeling approaches, **Science of the Total Environment**, [s. l.], 601-602, 1-14, 2017. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.05.146>.

MAIA, S.R.R. **Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - CE**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MENTE, A.A. Água Subterrânea no Brasil. In: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3ª ed. revisada e ampliada**. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. p. 31-48.

MOLINARI, A, GUADAGNINI, L, MARCACCIO, M, GUADAGNINI, A. Geostatistical multimodel approach for the assessment of the spatial distribution of natural background concentrations in large-scale groundwater bodies. **Water Research**, [s. l.], 149, 522-532, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.09.049>.

MORAIS, F.; MELO, J.G. DE; MEDEIROS, J.I. DE; SRIVASTAVA, N.K.; DINIZ FILHO, J.B.; LOPES, V.L.; OLIVEIRA, J.A. DE; VASCONCELOS, M.B. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste brasileiro**. Avaliação do aquífero Açú na borda sul da bacia Potiguar – Trecho: Upanema-Afonso Bezerra. Recife: CPRM/FINEP, 82 p., 2005.

REIMANN, C, CARITAT, P. **Chemical Elements in the Environment**. Factsheets for the Geochemist and Environmental Scientist, Ix 398 pp. Berlin, Heidelberg, New York, London, Paris, Tokyo, Hong Kong: Springer-Verlag, 1998.

SADLER, R, MAETAM, B, EDOKPOLO, B, CONNELL, D, YU, J, STEWART, D, PARK, MJ, GRAY, D, LAKSONO, B. Health risk assessment for exposure to nitrate in drinking water from village wells in Semarang, Indonesia, **Environmental Pollution**, [s. l.], 216, 738-745, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.envpol.2016.06.041>.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Mapa Geodiversidade do Estado do Ceará, escala 1:750.000**. 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14692>. Acesso em 10 mai. 2021.

SOUSA, D.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

TIRI, A, LAHBARI, N, BOUDOUKHA, A. Assessment of the quality of water by hierarchical cluster and variance analyses of the Koudiat Medouar Watershed, East Algeria, **Applied Water Science**, [s. l.], 7, 4197-4206, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s13201-014-0261-z>.

VASCONCELOS, S.M.S.; TEIXEIRA, Z.A.; ALVES NETO, J. Caracterização do aquífero Jandaíra, porção situada no estado do Ceará, Brasil. **Revista de Geologia**, Fortaleza, vol. 23, n. 1, p. 50-60, 2010.

VILLAR, PC. As águas subterrâneas e o direito à água em um contexto de crise, **Revista Ambiente & Sociedade**, [s. l.], 19, 83-102, 2016.

World Health Organization. **Guidelines for drinking-water Quality**. Genebra: WHO, 2011.

## **MODELAGEM HIDROGEOQUÍMICA E QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS COSTEIROS NO NORDESTE DO BRASIL**

### **HYDROGEOCHEMICAL MODELING AND GROUNDWATER QUALITY IN COASTAL AQUIFERS IN NORTHEAST BRAZIL**

#### **RESUMO**

Os estudos hidrogeoquímicos permitem avaliar tanto as características químicas das águas subterrâneas quanto suas associações com os processos geoquímicos responsáveis pela composição química e, conseqüentemente, a qualidade dessas águas. Dentre as principais abordagens utilizadas em avaliações hidrogeoquímicas, pode-se destacar a modelagem geoquímica, a partir da qual é possível identificar as condições de equilíbrio químico água/rocha por meio do cálculo dos índices de saturação mineral para identificar os processos que controlam as características químicas e qualitativas das águas subterrâneas. Dessa maneira, o presente estudo teve como objetivo identificar os principais mecanismos responsáveis pelo comportamento hidrogeoquímico, bem como avaliar as condições de equilíbrio das espécies minerais que compõem o arcabouço hidrogeológico da região costeira do nordeste do Brasil, por meio da modelagem geoquímica, para inferir os processos de controle composicional e qualitativo, com base nos padrões de potabilidade, das águas subterrâneas. Os resultados mostram a predominância de águas do tipo cloretadas sódicas com concentrações de sólidos totais dissolvidos, cloreto, dureza total, sulfato, sódio, ferro total, nitrato, turbidez, bário e chumbo fora dos padrões de potabilidade. O intemperismo promovido pelas interações entre as águas subterrâneas e os minerais que compõem os aquíferos percolados representa o principal fator de controle hidrogeoquímico na área. A modelagem hidrogeoquímica indicou condição de supersaturação para o quartzo, a goethita e a hematita, e de subsaturação para caulinita, muscovita, ilita e calcita nas amostras analisadas, justificando as altas concentrações observadas para os elementos provenientes dos minerais com tendência à dissolução, adicionando íons em solução, e as baixas concentrações para os elementos oriundos dos minerais com tendência à precipitação, sendo, portanto, retirados da solução. Os resultados sugerem que o intemperismo dos silicatos e a dissolução dos carbonatos representam os principais processos de controle composicional das águas subterrâneas da região, com contribuição de atividades antrópicas e da influência marinha.



**Palavras-chave:** Phreeqc; índices de saturação; potabilidade; Bacia Potiguar.

## **ABSTRACT**

Hydrogeochemical studies make it possible to evaluate both the chemical characteristics of groundwater and its associations with the geochemical processes responsible for the chemical composition and, consequently, the quality of these waters. Among the main approaches used in hydrogeochemical assessments, geochemical modeling can be highlighted, from which it is possible to identify the conditions of water/rock chemical equilibrium through the calculation of mineral saturation indices to identify the processes that control the chemical and qualitative characteristics of the waters. Thus, the present study aimed to identify the main mechanisms responsible for hydrogeochemical behavior, as well as evaluate the equilibrium conditions of the mineral species that make up the hydrogeological framework of the coastal region of northeastern Brazil, through geochemical modeling, to infer the compositional and qualitative control processes, based on potability standards, of groundwater. The results show the predominance of sodium chlorinated waters with concentrations of total dissolved solids, chloride, total hardness, sulfate, sodium, total iron, nitrate, turbidity, barium and lead outside potability standards. Weathering promoted by interactions between groundwater and minerals that make up percolated aquifers represents the main hydrogeochemical control factor in the area. Hydrogeochemical modeling indicated supersaturation conditions for quartz, goethite and hematite, and undersaturation for kaolinite, muscovite, illite and calcite in the analyzed samples, justifying the high concentrations observed for elements from minerals with a tendency to dissolution, adding ions in solution, and low concentrations for elements originating from minerals prone to precipitation, therefore being removed from the solution. The results suggest that silicate weathering and carbonate dissolution represent the main compositional control processes of groundwater in the region, with contributions from anthropogenic activities and marine influence.

**Keywords:** Phreeqc; saturation indices; potability, Potiguar Basin.

## **1 INTRODUÇÃO**

O estudo hidrogeoquímico é essencial para o entendimento dos processos que controlam a composição química e a qualidade das águas subterrâneas, pois permite avaliar as

associações entre os constituintes encontrados e as interações com o substrato, bem como identificar possíveis relações com outras variáveis ambientais como por exemplo as alterações sazonais na dinâmica de recarga dos aquíferos, as atividades antrópicas e a influência marinha, em se tratando de aquíferos costeiros.

A modelagem geoquímica é uma das abordagens mais aplicadas em avaliações hidrogeoquímicas e constitui a representação matemática das informações através do uso de programas computacionais, como o Phreeqc (PARKHURST & APPELO, 2013).

Um dos modelos mais utilizados é o de especiação e solubilidade mineral que fornece informações sobre as espécies minerais em solução e os índices (ou estados) de saturação dos minerais (SRIDHARAN & NATHAN, 2018; NASCIMENTO *et al.*, 2020; VENÂNCIO *et al.*, 2020; GOMES *et al.*, 2021).

Geralmente, uma análise química fornece concentrações totais de elementos em solução. Um cálculo de especiação distribui esses totais entre espécies químicas usando um modelo aquoso, os resultados do cálculo de especiação são as atividades de todas as espécies aquosas que são utilizadas para calcular os índices de saturação de minerais relativos à água (PARKHURST & APPELO, 2013).

Os índices de saturação são usados para avaliar o grau de equilíbrio entre a água e o respectivo mineral. Muitas vezes, entretanto, não há equilíbrio e o estado de saturação apenas indica a direção em que as reações podem ocorrer; logo, para a subsaturação, a dissolução é esperada, sendo que a supersaturação, no entanto, sugere precipitação (APPELO & POSTMA, 2005). Mudanças no estado de saturação também são úteis para distinguir os diferentes estágios da evolução hidroquímica e ajudam a identificar quais reações geoquímicas são importantes no controle da composição química da água (COETSIERS & WALRAEVENS, 2006; CARNEIRO, 2013).

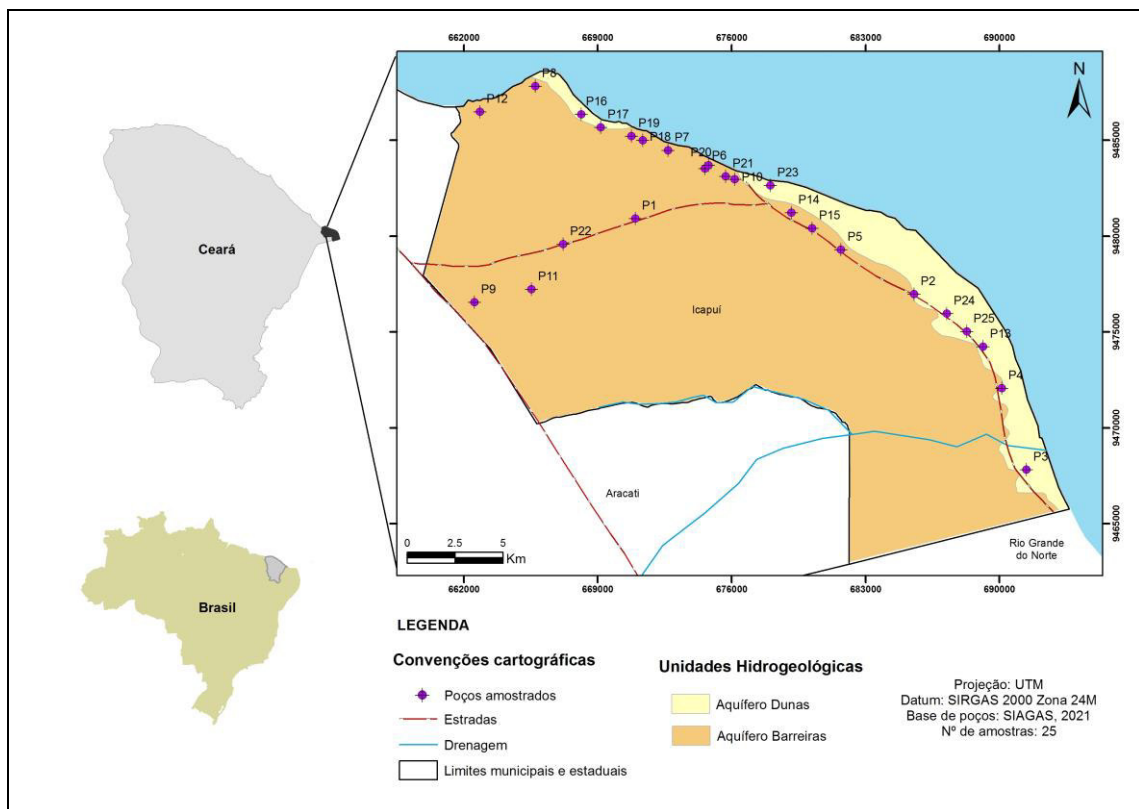
Dessa maneira, o presente estudo teve como objetivo identificar os principais mecanismos responsáveis pelo comportamento hidrogeoquímico, considerando as variações sazonais na dinâmica de recarga para os aquíferos e suas contribuições para as características químicas das águas subterrâneas, bem como avaliar as condições de equilíbrio das espécies minerais que compõem o arcabouço hidrogeológico da área, por meio da modelagem geoquímica, para inferir os processos de controle composicional e qualitativo das águas subterrâneas da região costeira do nordeste do Brasil.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

O município de Icapuí está localizado no extremo leste do estado do Ceará, Brasil (Figura 1), com aproximadamente 421,4 km<sup>2</sup> e cerca de 20000 habitantes (IBGE, 2022). O clima é caracterizado como tropical quente semiárido brando, a temperatura média está entre 26 e 28° C e a pluviosidade média é de 949 mm/ano, com período chuvoso de janeiro a maio (IPECE, 2021).

O abastecimento de água no município é realizado exclusivamente por meio de poços tubulares administrados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), e poços particulares. O município também não dispõe de rede de esgotamento sanitário, dessa maneira, os esgotos domésticos são coletados por meio de fossas sépticas.

Figura 1 – Distribuição dos poços amostrados e unidades hidrogeológicas na área de estudo



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2014, modificado)

A região está inserida no contexto hidrogeológico da Província Costeira e Subprovíncia Potiguar representada pelos Aquíferos Dunas, Barreiras, Jandaíra e Açú (MENTE, 2008).

O Aquífero Dunas é formado pelos depósitos eólicos quaternários que ocorrem ao

longo de toda a faixa costeira, com espessuras que variam de 6 a 20 m, de acordo com perfis construtivos e litológicos dos poços existentes na área de estudo. Segundo Ferro (2018), os depósitos eólicos na área são compostos por areias quartzosas bem selecionadas de granulação fina a média.

O Aquífero Barreiras é composto por clastos de idades que variam do Mioceno até o Plioceno-Pleistoceno que afloram na maior parte da área de estudo, porém também ocorrem subjacente ao Aquífero Dunas. Sousa (2002) identificou que a seção superior da Formação Barreiras é composta por arenitos avermelhados de aspecto maciço, granulometria de areia média a grossa, com níveis conglomeráticos. A composição é predominantemente quartzosa, com grãos eventualmente recobertos por óxido de ferro, em matriz argilosa. Na seção inferior ocorrem arenitos finos siltico-argilosos em cimento argiloso, localmente maciços, com estratificação cruzada de baixo ângulo e tonalidades amareladas, roxas e avermelhadas.

Os Aquíferos Jandaíra e Açú são constituídos por sedimentos cretáceos do Grupo Apodi (SOARES *et al.*, 2003). A partir de perfis construtivos e litológicos dos poços existentes na área, foi possível identificar que o Aquífero Jandaíra ocorre a profundidades que variam entre 20 e 108 metros, com o contato superior concordante com o Aquífero Barreiras e o inferior com o Aquífero Açú. Este aquífero corresponde à porção superior da sequência carbonática da Formação Jandaíra, constituindo um aquífero heterogêneo, anisotrópico e de circulação cárstica, composto por calcários cinzas e cremes, margas, siltitos, folhelhos, argilitos e dolomitos, compreendendo calcarenitos com bioclastos de moluscos e algas (MORAIS *et al.*, 2005; VASCONCELOS *et al.*, 2010). No extremo oeste da área de estudo, as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra afloram na base das falésias da Formação Barreiras sob a forma de pequenos lajedos restritos à zona de praia.

O Aquífero Açú é detectado na área em profundidades superiores a 200 metros, conforme observado em perfis construtivos e litológicos dos poços, e corresponde à porção inferior da Formação Açú a qual, segundo Braga Júnior *et al.* (2017), apresenta conglomerados na base, passando para arenitos grossos e no topo depósitos de planície de inundação. Ocorre em condições de confinamento, tanto pelas camadas argilosas da porção superior da Formação Açú quanto pela base do Aquífero Jandaíra.

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

Foram utilizados dados de análises físico-químicas de 50 amostras de águas subterrâneas coletadas em 25 poços no município de Icapuí, Ceará (Figura 1 e Tabela 1),

selecionados com base nos critérios de distribuição na área, acesso ao ponto de coleta, uso das águas e aquíferos captados.

As coletas foram feitas durante duas campanhas realizadas nos meses de fevereiro (período chuvoso) e agosto (período de estiagem) de 2019.

Os períodos sazonais foram caracterizados por meio do balanço hidroclimatológico utilizando o método proposto por Thornthwaite e Mather que, segundo Vasconcelos (1996), é o que melhor se adapta às áreas com as características climáticas que apresentam alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados. Este método utiliza a precipitação total, a temperatura, a evapotranspiração potencial e a capacidade de armazenamento do solo para obter a evapotranspiração real e a infiltração efetiva, que representa a componente responsável pela recarga dos aquíferos. Foram utilizados dados pluviométricos, disponibilizados pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME, 2023), registrados pelo posto pluviométrico nº 57 que possui uma série histórica de 34 anos (1988 a 2022). Os postos pluviométricos não registram dados de temperatura, assim, esta foi estimada por meio do Método de Regressão Linear utilizando o programa Celina (versão 1.0) desenvolvido pelo Laboratório de Climatologia Geográfica e Recursos Hídricos da Universidade Federal do Ceará (LCGRH, 2023). Para a capacidade de armazenamento do solo foi adotado o valor referente aos solos arenosos, predominantes na área segundo IBGE (2022). De acordo com Castany (1975), solos arenosos apresentam capacidade de retenção de 50 mm.

As amostras coletadas foram submetidas às análises físico-químicas, englobando pH, condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos, alcalinidade total, bicarbonato, carbonato, cloreto, cálcio, magnésio, dureza total, sulfato, sódio, potássio, ferro total, sílica, nitrato, nitrito, amônia, turbidez, fluoreto e brometo. As análises foram realizadas pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal do Ceará utilizando a metodologia estabelecida pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, 2012). Os metais traço (alumínio, bário, cobre, ferro, manganês, níquel, chumbo e zinco) e o fósforo dissolvido foram analisados por Espectrometria de Emissão Óptica com Plasma de Argônio (ICP-OES), realizada pelo Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará (NUTEC), a partir das amostras filtradas à vácuo utilizando membrana com porosidade 0,45 µm.

Tabela 1 - Poços amostrados na área de estudo nos meses de fevereiro (período chuvoso) e agosto (período seco) de 2019

Ponto	Latitude (UTM)	Longitude (UTM)	Profundidade (m)	Nível estático (m)		Aquíferos captados
				Período chuvoso	Período seco	
P1	9480900	670967	108	85.2	85	Barreiras
P2	9476967	685543	50	24	24.8	Barreiras
P3	9467807	691426	36	11.7	11.6	Barreiras
P4	9472049	690125	49	27.8	28	Barreiras
P5	9479277	681720	42	4.4	3.7	Barreiras
P6	9483508	674618	67	28	27.6	Barreiras
P7	9484457	672682	74	68.6	65.2	Barreiras
P8	9487815	665742	78	41	40.8	Barreiras
P9	9476540	662560	370	-	-	Açu
P10	9482947	676166	60	5.4	4.8	Barreiras
P11	9477219	665533	594	-	-	Açu
P12	9486479	662841	85	30	30.1	Barreiras
P13	9474220	689154	32	5	5.3	Barreiras/Jandaíra
P14	9481202	679135	10	2.5	2.6	Dunas
P15	9480397	680221	-	-	-	-
P16	9486341	668148	115	33.7	33.8	Barreiras/Jandaíra
P17	9485657	669165	95	50	52.3	Jandaíra
P18	9484988	671368	45	27.8	28	Barreiras
P19	9485204	670775	-	-	-	-
P20	9483688	674797	45	28	28.1	Barreiras
P21	9483102	675695	45	25.6	25.9	Barreiras
P22	9479567	667195	685	-	-	Açu
P23	9482630	678025	10	-	-	Dunas
P24	9475953	687262	40	15.6	15.7	Barreiras/Jandaíra
P25	9475015	688297	45	11.4	11.5	Barreiras/Jandaíra

Fonte: Elaborada pela autora.

O ferro presente nas amostras foi analisado sob duas formas, total e dissolvido. O ferro total foi utilizado para a avaliação de potabilidade, já que esse possui valor de referência estabelecido pela legislação adotada neste estudo, e o ferro dissolvido foi utilizado na modelagem Phreeqc, devido a técnica ICP-OES possibilitar a detecção de elementos que ocorrem em baixas concentrações.

Os resultados das análises físico-químicas foram comparados com a Portaria nº

888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) com o objetivo de avaliar a adequação para o consumo humano. A classificação de acordo com o conteúdo iônico dominante foi feita utilizando o Diagrama de Piper, confeccionado através do programa Qualigraf (MOBÜS, 2003).

Os principais processos geoquímicos que contribuem para as características químicas das águas subterrâneas foram identificados por meio do Diagrama de Gibbs (GIBBS, 1970) que define a precipitação pluviométrica, o intemperismo das rochas e o processo de evaporação como os principais mecanismos naturais que controlam a química das águas. A avaliação das águas é feita com base na relação entre os sólidos totais dissolvidos e as razões  $r\text{Na}^+ / r(\text{Na}^+ + \text{Ca}^{2+})$  e  $r\text{Cl}^- / r(\text{Cl}^- + \text{HCO}_3^-)$ , onde “r” indica que as concentrações de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{HCO}_3^-$  estão expressas em meq/L.

Também foram coletadas amostras de sedimentos e rochas para a realização de análise de difratometria de raios X pelo Laboratório de Cristalografia Estrutural da Universidade Federal do Ceará. Foram analisadas 4 amostras, sendo uma de cada um dos principais aquíferos existentes na área (Dunas, Barreiras, Jandaíra e Açú) para identificação das composições mineralógicas, a partir das quais foram calculados os índices de saturação utilizando o programa Phreeqc (Versão 3.5).

O Phreeqc permite simular diversas reações e processos que ocorrem nos ambientes naturais, decorrentes das interações entre água e o meio geológico. Por conta disso, vem sendo utilizado em diversos estudos hidrogeoquímicos ao redor do mundo com as mais variadas aplicações (RICHARDS *et al.*, 2017; SRIDHARAN & NATHAN, 2018; CARLING *et al.*, 2019; VENÂNCIO *et al.*, 2020).

Neste estudo foi aplicado o modelo de especiação e solubilidade mineral utilizando o banco de dados termodinâmico Wateq4f devido a melhor adequação aos íons analisados. Os índices de saturação (SI) obtidos pelo modelo foram usados para avaliar o grau de equilíbrio entre a água e as fases minerais. O SI é definido pela relação entre o Produto da Atividade Iônica ( $K_{\text{IAP}}$ ) e o Produto de Solubilidade ( $K_{\text{SP}}$ ) conforme demonstrado na Equação 1 (GARRELS & CHRIST, 1965):

$$\text{SI} = \log_{10} (K_{\text{IAP}}/K_{\text{SP}}) \quad (1)$$

Com base no valor dos SIs foi possível identificar os estados de saturação dos minerais como equilíbrio ou saturação (SI=0), subsaturação (SI<0) ou supersaturação (SI>0). Os estados de saturação dos minerais indicam as direções dos processos geoquímicos. Assim,

a subsaturação indica tendência à dissolução e a supersaturação indica tendência à precipitação da fase mineral, enquanto que o estado de equilíbrio ou saturação indica que o mineral pode dissolver ou precipitar para se manter em equilíbrio na solução, na prática considera-se em equilíbrio o intervalo  $-0,05 < SI < 0,05$  (PARKHURST & APPELO, 2013).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 Balanço Hidroclimatológico

Segundo o balanço hidroclimatológico da área, anualmente ocorre uma infiltração efetiva média de 96,87 mm (Tabela 2). Observa-se que nos meses de março e abril a precipitação pluviométrica é superior a evapotranspiração real promovendo a infiltração de cerca de 11% da chuva média anual. Essa infiltração, além de promover a recarga dos aquíferos, também pode alterar suas características hidroquímicas, por meio da diluição das concentrações de elementos presentes nas águas subterrâneas, ou até promover sua contaminação, a partir da lixiviação de compostos poluentes.

Tabela 2 - Balanço Hidroclimatológico da área de estudo (1988 - 2022)

Mês	PPT (mm)	T (°C)	Im	K	ETP (mm)	PPT - ETP	C (mm)	ETR (mm)	Ie (mm)
Jan	103,51	28,0	13,252	1,06	173,39	-69,88	0,00	103,51	0,00
Fev	132,42	27,8	13,110	0,95	151,23	-18,81	0,00	132,42	0,00
Mar	227,45	27,4	12,828	1,04	156,69	70,76	50,00	156,69	20,76
Abr	218,59	27,0	12,548	1,00	142,48	76,11	50,00	142,48	76,11
Mai	124,66	26,9	12,479	1,02	143,30	-18,64	31,36	124,66	0,00
Jun	37,14	26,4	12,133	0,99	129,52	-92,38	0,00	37,14	0,00
Jul	18,73	25,9	11,789	1,02	124,10	-105,37	0,00	18,73	0,00
Ago	2,87	26,6	12,271	1,03	138,67	-135,80	0,00	2,87	0,00
Set	1,75	27,0	12,548	1,00	142,48	-140,73	0,00	1,75	0,00
Out	3,75	27,3	12,758	1,05	156,01	-152,26	0,00	3,75	0,00
Nov	5,51	27,6	12,969	1,03	159,53	-154,02	0,00	5,51	0,00
Dez	20,16	27,8	13,110	1,06	168,74	-148,58	0,00	20,16	0,00
<b>Total</b>	<b>896,54</b>	-	<b>151,80</b>	-	<b>1786,13</b>	-	<b>131,36</b>	<b>749,67</b>	<b>96,87</b>

Legenda: PPT = Precipitação média; T = Temperatura média; Im = Índice térmico mensal; K = Fator de correção que depende da latitude; ETP = Evapotranspiração potencial; C = Capacidade de armazenamento; ETR = Evapotranspiração real e Ie = Infiltração efetiva.



Embora o balanço hidroclimatológico mostre a ocorrência de infiltração apenas nos meses de março e abril, observa-se que nos cinco primeiros meses do ano ocorrem precipitações superiores a 100 mm, nos quais, em anos individualizados e dependendo das condições climáticas, pode haver um excedente hídrico superior a capacidade de armazenamento do solo (50 mm) favorecendo a infiltração para os aquíferos.

Nos meses de junho a dezembro ocorrem menores precipitações pluviométricas, promovendo o aumento da evapotranspiração potencial em relação à evapotranspiração real que, nesses meses, se iguala a precipitação, resultando em uma situação de deficiência hídrica e ausência de infiltração.

#### **4.2 Características químicas e qualitativas das águas subterrâneas**

A água subterrânea tende a aumentar as concentrações das substâncias dissolvidas à medida que percola diferentes aquíferos, porém fatores como o clima, a composição da água de recarga e as atividades antrópicas, também podem provocar o aumento dessas concentrações.

A partir dos resultados analíticos das 50 amostras coletadas, foi possível identificar as características químicas e a qualidade, a partir dos padrões para o consumo humano, das águas subterrâneas em cada período sazonal. Na tabela 3 são apresentadas as concentrações mínimas, máximas, médias e desvio padrão dos parâmetros analisados nas amostras, bem como os valores máximos permitidos em águas potáveis, segundo a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021). Observa-se que o conjunto de dados de medidas dos parâmetros de qualidade de água apresentaram elevados valores de desvio padrão, revelando valores anômalos na maioria dos parâmetros analisados. Essa variabilidade dos dados pode estar associada à captação de diferentes camadas aquíferas, bem como à influência de águas marinhas ou contaminações antrópicas.

As águas apresentam tendência neutra a levemente ácida, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco, com valores médios de pH de  $6,6 \pm 0,9$  e  $6,3 \pm 1,0$ , respectivamente, com discreta diminuição do pH no período seco. As amostras P9 e P22 apresentam pH alcalino, em torno de 8, distante da média, sugerindo águas de tipo hidroquímico diferente das demais. A alcalinidade total é representada pelos bicarbonatos e também não apresenta variações significativas entre os períodos sazonais, com médias de  $111,7 \pm 91,9$  (período chuvoso) e  $106,5 \pm 96,7$  mg/L (período seco).

Tabela 3 – Valores mínimos, máximos, médios e desvio padrão dos parâmetros físico-químicos analisados nas amostras de águas subterrâneas da área de estudo

Parâmetro	Período Chuvoso (fevereiro 2019)			Período seco (agosto 2019)			VMP
	Média e DP	Mínima	Máxima	Média e DP	Mínima	Máxima	
pH	6,59 ± 0,93	5,19	8,18	6,31 ± 1,00	4,47	8,12	-
CE (µS/cm)	1.424 ± 1.020,97	186,7	4.491	1.546 ± 1.207,42	450,2	4.788	-
STD (mg/L)	830,08 ± 587,41	122	2.631	868,56 ± 655,28	249	2.538	500
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	134,66 ± 110,71	4,9	354,9	127,95 ± 116,15	4,9	362,3	-
CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	0,78 ± 2,77	0	12,1	0,97 ± 3,35	0	12,1	-
AT (mg/L)	111,67 ± 91,92	4	290,9	106,49 ± 96,71	4	296,9	-
Cl <sup>-</sup> (mg/L)	312,87 ± 278,30	30	1.189,6	345,82 ± 337,88	46	1.279,6	250
DT (mg/L)	214,08 ± 222,84	10	830	230,8 ± 252,42	12	1.000	300
Ca <sup>2+</sup> (mg/L)	41,92 ± 49,22	1,6	212	47,2 ± 59,57	3,2	264	-
Mg <sup>2+</sup> (mg/L)	26,22 ± 26,68	1	93,6	27,08 ± 28,17	1	108	-
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/L)	57,3 ± 62,49	0,6	288,5	60,62 ± 48,50	0,4	224,1	250
Na <sup>+</sup> (mg/L)	190,11 ± 126,36	23,2	630,5	189,38 ± 135,43	41,9	588,2	200
K <sup>+</sup> (mg/L)	17,6 ± 7,77	2,8	36,9	17,17 ± 6,69	2,4	28,5	-
FeT (mg/L)	0,11 ± 0,007	<LD	0,12	0,4 ± 0,17	<LD	0,6	0,3
SiO <sub>2</sub> (mg/L)	23,42 ± 8,11	10,8	43,5	20,64 ± 5,27	12,2	32	-
N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	5,88 ± 3,52	0,1	14,4	8,09 ± 4,62	<LD	21,4	10
N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg/L)	-	<LD	<LD	-	<LD	<LD	1
N-NH <sub>3,4</sub> (mg/L)	-	<LD	0,34	-	<LD	0,8	1,2
F <sup>-</sup> (mg/L)	0,34 ± 0,17	0,2	1	0,28 ± 0,19	0,1	1	1,5
Br <sup>-</sup> (mg/L)	1,23 ± 0,92	0,4	4,7	1,71 ± 1,54	<LD	6,2	-
Turbidez (uT)	2,48 ± 0,52	1,8	3,5	1,02 ± 1,57	0,2	8,3	5
Al (mg/L)	0,04 ± 0,02	<LD	0,05	0,03 ± 0,03	<LD	0,08	0,2
Ba (mg/L)	0,1302 ± 0,17	0,0005	0,8579	0,1613 ± 0,22	0,0005	0,9219	0,7
Cu (mg/L)	0,0039 ± 0,004	0,0005	0,0176	0,0025 ± 0,001	0,0005	0,0054	2
Fe (mg/L)	0,016 ± 0,03	<LD	0,115	0,02 ± 0,04	<LD	0,135	-
Mn (mg/L)	0,0116 ± 0,02	<LD	0,0821	0,0127 ± 0,02	<LD	0,0787	0,1
Ni (mg/L)	0,0049 ± 0,002	<LD	0,0068	0,0032 ± 0,002	<LD	0,0078	0,07
P (mg/L)	0,0067 ± 0,009	<LD	0,0462	0,0165 ± 0,043	<LD	0,2095	-
Pb (mg/L)	0,0073 ± 0,003	<LD	0,014	0,0077 ± 0,005	<LD	0,0231	0,01
Zn (mg/L)	0,0114 ± 0,02	<LD	0,0802	0,0067 ± 0,01	<LD	0,0692	5

Legenda: DP – Desvio Padrão; CE – Condutividade Elétrica; STD – Sólidos Totais Dissolvidos; AT – Alcalinidade Total; DT – Dureza Total; FeT – Ferro Total; LD – Limite de detecção; VMP – Valor Máximo Permitido.

De acordo com o conteúdo iônico dominante, as águas subterrâneas na área apresentam três fácies hidroquímicas. Nas quais, 22 amostras (88%) representam águas cloretadas sódicas, 2 amostras (8%) são bicarbonatadas sódicas e 1 amostra (4%) cloretada cálcica, para ambos os períodos sazonais (Figura 2).

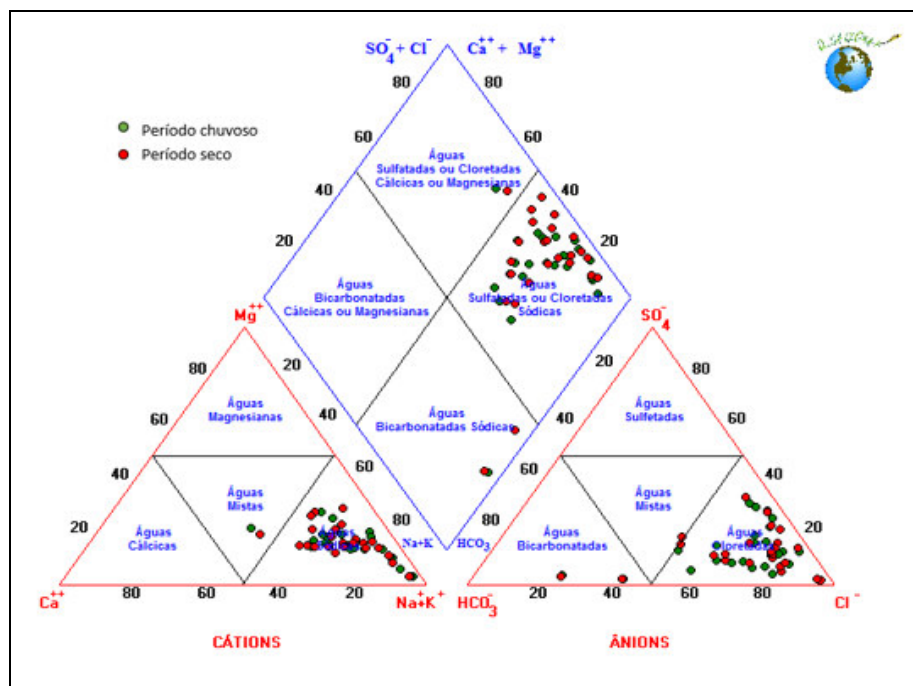
A predominância de águas do tipo cloretadas-sódicas está associada, principalmente, à captação dos Aquíferos Dunas e Barreiras. O caráter livre destes aquíferos os tornam mais susceptíveis à lixiviação de sais, oriundos dos aerossóis marinhos, depositados no solo, bem como à infiltração de águas de lagoas costeiras, muitas vezes salobras devido ao processo de evaporação e concentração de sais.

As amostras que apresentam águas do tipo bicarbonatadas-sódicas foram coletadas nos poços P9 e P22 localizados na região mais distante da costa, os quais apresentam profundidades de 370 e 685 metros, respectivamente, captando de níveis aquíferos profundos associados, principalmente, as camadas areníticas da Formação Açú.

A fácies hidroquímica cloretadas-cálcicas foi identificada nas amostras coletada no poço P11 que possui 594 metros de profundidade e também capta do Aquífero Açú.

A presença dos íons  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{HCO}_3^-$  nas águas provenientes do Aquífero Açú indica contribuição dos calcários da Formação Jandaíra sobrepostos, por meio da percolação vertical de águas enriquecidas pela dissolução de  $\text{CaCO}_3$ .

Figura 2 – Classificação iônica das águas subterrâneas na área de estudo



Fonte: Mobüs (2003).

Com relação a qualidade das águas subterrâneas para o consumo humano, foram avaliados os parâmetros com padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL, 2021) (Tabela 4).

Tabela 4 – Amostras com concentrações fora dos padrões de potabilidade na área de estudo, segundo a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde

Parâmetro	Amostras	
	Período Chuvoso	Período seco
Sólidos Totais Dissolvidos	P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9, P11, P12, P13, P16, P17, P18, P19, P23, P24, P25	P1, P2, P3, P4, P5, P8, P9, P11, P12, P13, P16, P17, P23, P24, P25
Cloreto	P1, P3, P4, P5, P8, P11, P12, P13, P16, P17, P19, P23, P24, P25	P1, P3, P4, P5, P8, P11, P12, P13, P16, P17, P23, P24, P25
Dureza Total	P11, P12, P13, P17, P23	P5, P11, P12, P13, P17, P23
Sulfato	P23	-
Sódio	P1, P4, P5, P8, P11, P12, P13, P17, P23, P25	P4, P5, P11, P12, P13, P17, P23, P25
Ferro Total	-	P1, P9, P23
Nitrato	P1, P11, P12	P1, P11, P12, P14, P15, P19, P20, P24
Turbidez	-	P9
Bário	P1	P1, P14
Chumbo	P14, P15, P18, P19	P14, P15, P18, P19

Fonte: Elaborada pela autora.

As concentrações de sólidos totais dissolvidos encontram-se acima do valor máximo permitido (VMP) para consumo humano, em cerca de 60% das amostras nos dois períodos sazonais. Em relação ao cloreto é possível observar a influência da sazonalidade nos valores das amostras, visto que no período chuvoso os valores variaram entre 30 e 1.189 mg/L e no período seco entre 46 e 1.279 mg/L. Para ambos os períodos, mais de 50% das amostras apresentaram valores acima do máximo permitido para cloreto em águas potáveis.

A dureza total, obtida a partir das concentrações de  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ , é expressa em teor de  $\text{CaCO}_3$ . Segundo Custódio e Llamas (1983), as águas, em relação à dureza, são classificadas em brandas ( $< 50$  mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), pouco duras (50 - 100 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ), duras (100 - 200 mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ) e muito duras ( $> 200$  mg/L de  $\text{CaCO}_3$ ). Em aproximadamente 60% das amostras analisadas as águas foram classificadas como duras ou muito duras, em ambos os períodos sazonais. O VMP para dureza total em águas destinadas

ao consumo humano foi superado em cerca de 20% das amostras, tanto no período chuvoso quanto no seco. A maior ocorrência de águas duras e muito duras na área pode ser atribuída a interação com as rochas carbonáticas da Formação Jandaíra.

O sulfato variou de 0,6 a 288,5 mg/L no período chuvoso e 0,4 a 224,1 mg/L no período seco. Apenas a amostra P23 ultrapassou o valor máximo permitido para águas potáveis, a amostra foi coletada durante o período chuvoso e pode estar associada a infiltração de águas recentes por precipitação. Segundo Celligoi (1999), consideráveis quantidades de sulfato são adicionadas ao ciclo hidrológico com as precipitações da atmosfera, provenientes, dentre outras fontes, dos aerossóis marinhos. Assim como o sulfato, o sódio apresentou concentrações mais elevadas no período chuvoso, porém com valores acima dos padrões de potabilidade em ambos os períodos, com cerca de 40% no período chuvoso e 30% no período seco. Para o íon fluoreto todas as amostras encontram-se dentro dos padrões de potabilidade nos dois períodos sazonais.

Quanto ao ferro total, somente a amostra P9 apresentou concentração acima do valor máximo permitido, com 0,6 mg/L durante o período seco, podendo estar associado aos níveis lateríticos presentes na Formação Barreiras. A turbidez, parâmetro associado aos sólidos em suspensão nas águas, apresenta valores dentro dos padrões de potabilidade na maioria das amostras, com ocorrência de maiores valores durante o período chuvoso, podendo estar relacionada ao carreamento de material, como argila, silte ou matéria orgânica, promovido pela recarga pluviométrica. Porém, a amostra P9 apresentou valor de 8,3 uT, acima do VMP para a turbidez, durante o período seco, podendo estar associado à presença de ferro particulado, tendo em vista que esta amostra apresenta também a maior concentração de ferro total no mesmo período.

Sobre os compostos nitrogenados, observa-se na Tabela 3 que as concentrações de amônia estão abaixo do valor máximo permitido, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco. No entanto, para o nitrato as concentrações ultrapassam o VMP em ambos os períodos. A ausência de saneamento básico na área, associada ao predomínio de aquíferos arenosos, naturalmente mais vulneráveis à percolação de poluentes, contribui para o aumento das concentrações de nitrato nas águas. O valor máximo permitido para nitrato em águas potáveis no Brasil (10 mg/L como N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) é um pouco mais restritivo que a diretriz da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 50 mg/L como NO<sub>3</sub><sup>-</sup> ou 11,3 mg/L como N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. No período chuvoso, 3 das 25 amostras apresentaram valores acima de 10 mg/L de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, enquanto que no período seco, 8 amostras ficaram acima do VMP. O aumento das concentrações de nitrato no período seco é decorrente, provavelmente, do menor volume de

precipitação que interfere na diluição deste parâmetro promovida pela recarga pluviométrica.

Com relação aos metais traço, as concentrações de alumínio, cobre, manganês, níquel e zinco não apresentaram anomalias significativas, estando todas as amostras dentro dos padrões de potabilidade. Porém, as concentrações de bário e chumbo apresentaram valores acima do máximo permitido pelo Ministério da Saúde. No período chuvoso os valores de bário chegaram a 0,8 mg/L e o chumbo apresentou máximo de 0,01 mg/L. No período seco as concentrações de bário e chumbo atingiram 0,9 e 0,02 mg/L, respectivamente. Maia (2018) atribui a presença de chumbo nas águas subterrâneas da região às fontes naturais, principalmente à camada laterítica da Formação Barreiras. Análises geoquímicas realizadas por Souza (2017) nos sedimentos e lateritos da Formação Barreiras nas falésias da região apresentaram chumbo em concentrações até duas vezes maiores do que os valores médios definidos por Turekian e Wedepohl (1961) para arenitos que é de 7 ppm. O bário também é atribuído às fontes naturais, estando associado tanto aos arenitos da Formação Barreiras quanto aos carbonatos da Formação Jandaíra. Tendo em vista, que as concentrações encontradas por Souza (2017) nos sedimentos de ambas as formações foram também superiores aos valores médios definidos por Turekian e Wedepohl (1961).

### **4.3 Mineralogia dos aquíferos**

O arcabouço mineralógico das unidades geológicas existentes na área é composto essencialmente por silicatos, carbonatos, óxidos e óxi-hidróxidos. A mineralogia foi identificada a partir dos difratogramas das amostras de rochas e sedimentos que compõem os quatro aquíferos principais.

Os sedimentos dunares que constituem o Aquífero Dunas são compostos, essencialmente, por quartzo e apresentam caulinita subordinada (Figura 3). Segundo Maia (2018), as dunas na área de estudo são formadas por areias quartzosa e/ou quartzo-feldspáticas e, por tratar-se de uma geração mais antiga de dunas, apresentam desenvolvimento de processos pedogênicos.

Os arenitos lateríticos que compõem o Aquífero Barreiras apresentam quartzo predominante, caulinita subordinada e quantidades acessórias de goethita e hematita (Figura 4). De acordo com Souza (2017), o quartzo e a caulinita provêm substancialmente da erosão e alteração de rochas de composição granítica do embasamento cristalino. São, portanto, de origem pedogênica, bem como podem ter sido retomadas a partir do próprio sistema deposicional continental da Formação Barreiras. A goethita e a hematita são também de

origem pedogênica, possivelmente integradas aos sedimentos originais da Formação Barreiras.

Figura 3 – Difratoograma da amostra de sedimentos de dunas

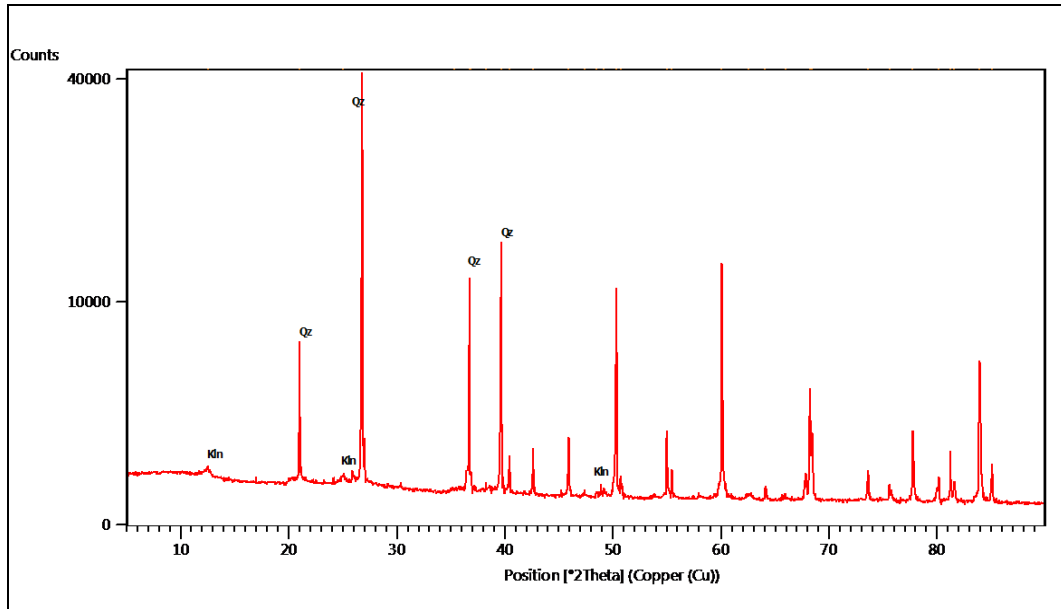
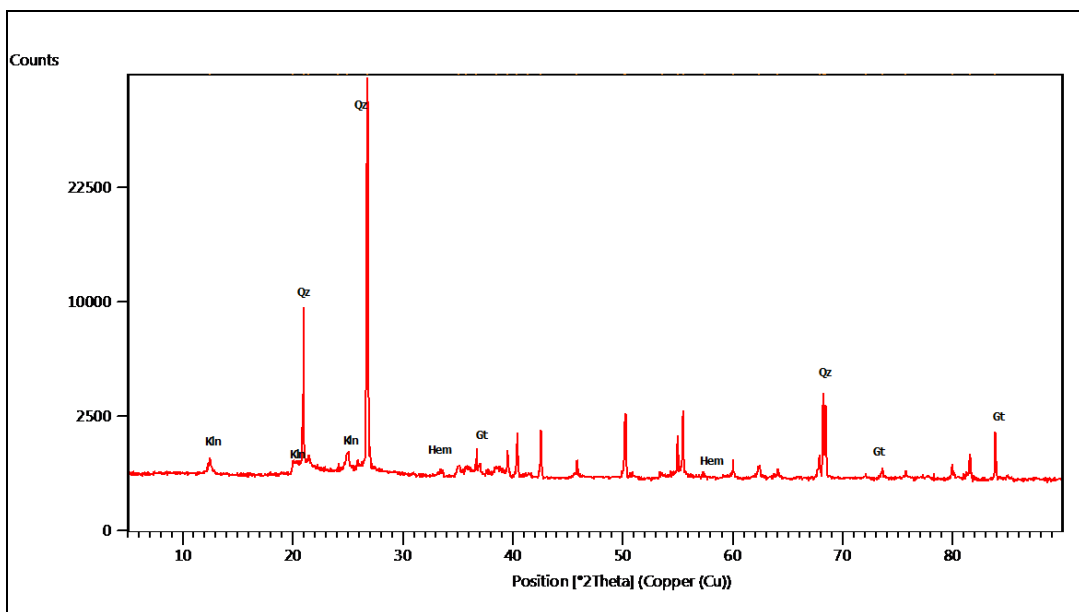


Figura 4 – Difratoograma da amostra da Formação Barreiras



As rochas carbonáticas que formam o Aquífero Jandaíra são compostas, essencialmente, por calcita e apresentam quartzo como mineral acessório (Figura 5). A presença de quartzo nos calcários da Formação Jandaíra também foi identificada por Sena (2017) e pode indicar que a formação destas rochas tenha ocorrido em ambientes proximais

da plataforma continental interna.

Os arenitos que constituem o Aquífero Açú apresentam quartzo predominante, muscovita, caulinita e ilita subordinadas e quantidades acessórias de goethita e hematita (Figura 6). Segundo Maraschin *et al.* (2010), o constituinte detrítico mais frequente é o quartzo. A muscovita está concentrada em arenitos de granulação fina a média e muitas vezes caulinizada. Os arenitos da Formação Açú sofreram intensas alterações diagenéticas que promoveram a precipitação de caulinita, ilita-esmectita e óxidos de ferro.

Figura 5 – Difratoograma da amostra da Formação Jandaíra

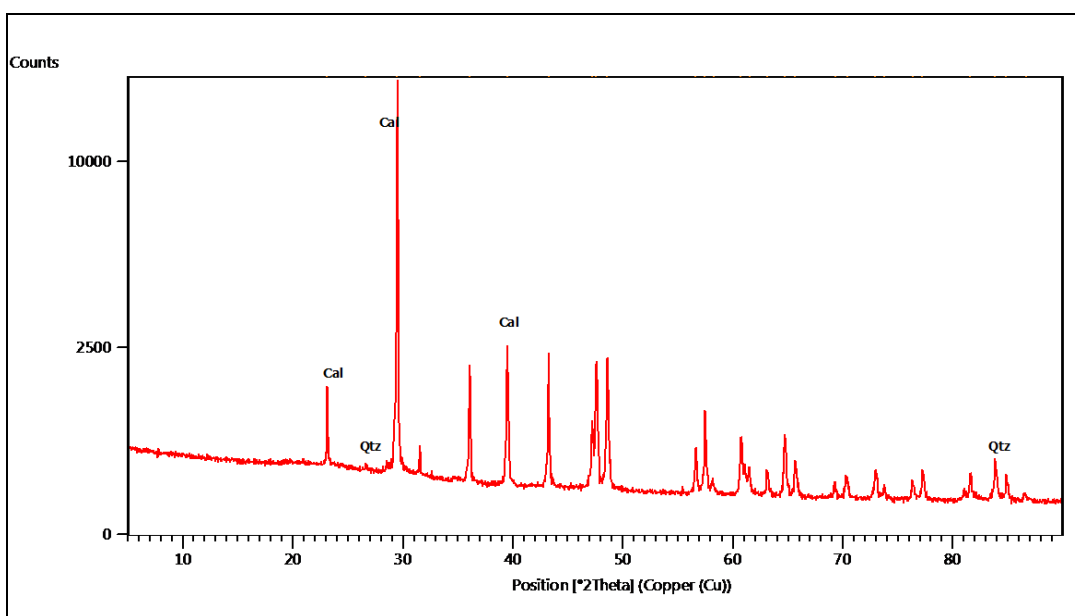
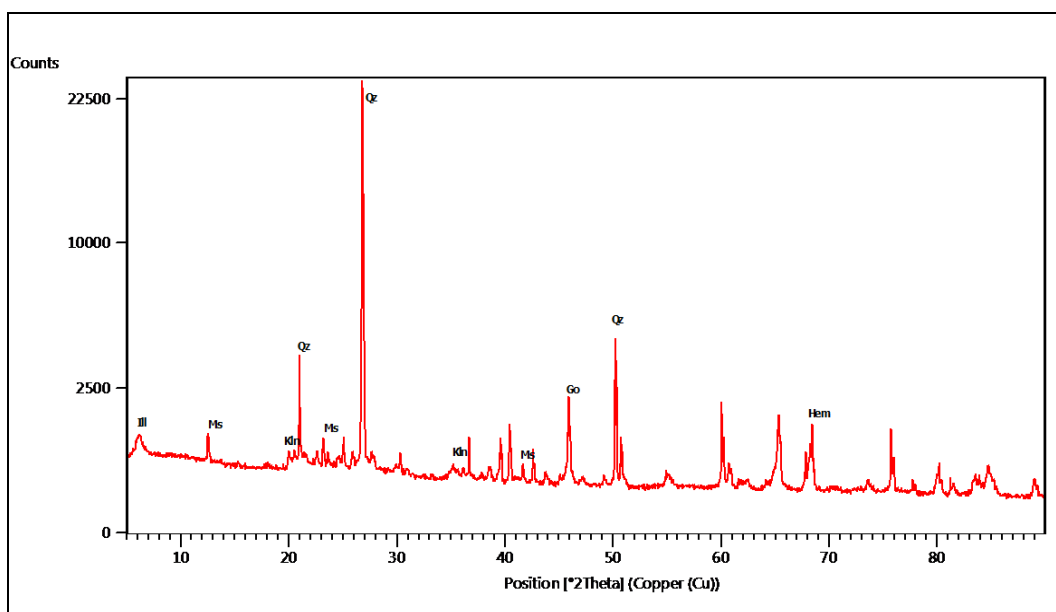


Figura 6 – Difratoograma da amostra da Formação Açú





#### 4.4 Hidrogeoquímica

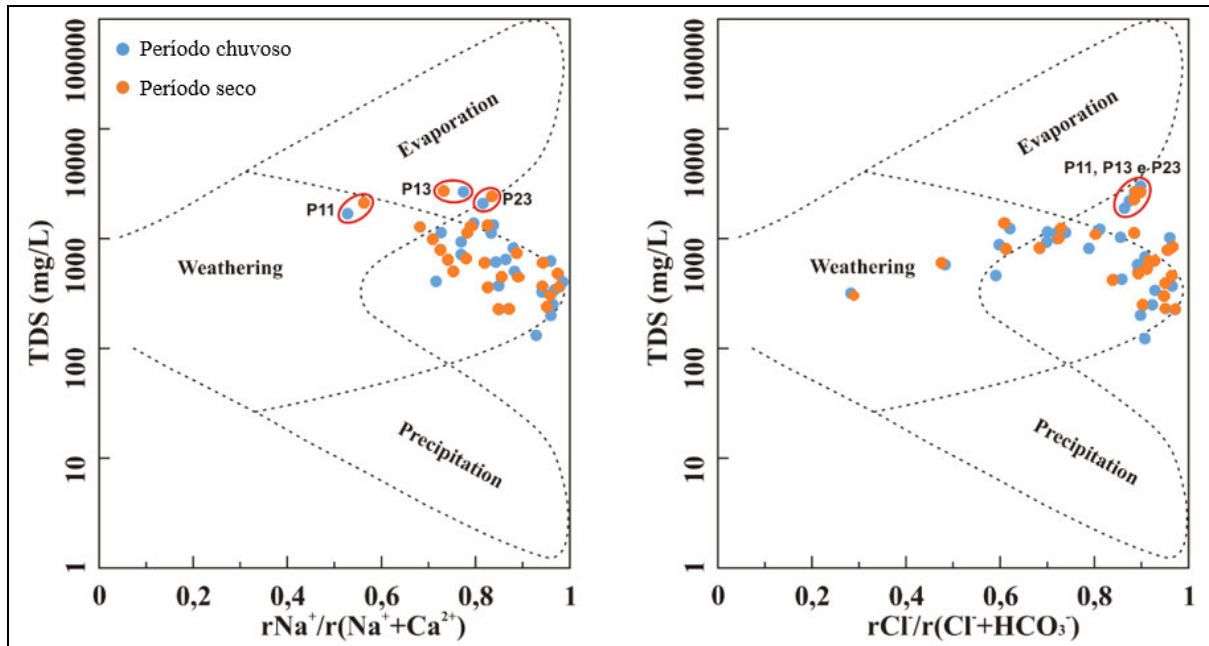
A hidrogeoquímica na área é predominantemente controlada pelo intemperismo, promovido pela interação entre as águas subterrâneas e as rochas que compõem os aquíferos percolados.

Observa-se na figura 7 que as amostras se encontram no domínio do intemperismo tendendo ao limite do domínio da evaporação indicando características de águas marinhas, ou seja, ricas em sódio e pobres em cálcio, ricas em cloreto e pobres em bicarbonato. Porém, as concentrações desses elementos não tornam as águas salinas, de modo geral são doces a levemente salobras, e por isso, com exceção das amostras P13 e P23, não se encontram delimitadas no domínio de águas evaporadas.

A razão  $rNa^+/rCl^-$  de 0,817, para uma das duas amostras do poço P13, se aproxima da razão encontrada para a água do mar, 0,858 (RICHTER & KREITLER, 1993), corroborando, portanto, com o resultado do Diagrama de Gibbs, o qual indica domínio de processo de evaporação. Assim, pode-se supor uma contribuição de água marinha na recarga do referido poço, o qual apresentou a maior concentração em STD (2.631 mg/L) entre todas as amostras, sobretudo após o período de estiagem, ou apenas evolução natural no processo de mineralização da água (interação água-rocha). A mesma discussão vale para o poço P23, cujas amostras apresentam  $rNa^+/rCl^- = 0,810$  e as quais atingem o limite do domínio do intemperismo tendendo ao domínio da evaporação no Diagrama de Gibbs.

As águas do poço P11, juntamente com as dos poços P13 e P23 são as mais salobras da área, em que os sólidos totais dissolvidos ultrapassa 2.000 mg/L. Porém, essas águas não são enriquecidas em sódio em relação ao cálcio, como se observa para as águas no domínio evaporação e, portanto, estão delimitadas no domínio das rochas, processo de interação água-rocha, mas com tendência a salinização de uma amostragem para outra, visto que a concentração de STD foi de 1.697 mg/L (período chuvoso) para 2.227 mg/L (período seco). Essa rápida mudança na composição química da água pode estar relacionada a intenso bombeamento do poço, captando águas de outras formações ou mais profundas. Também pode-se supor contribuição marinha no período mais seco em que o nível da água em relação ao mar é mais baixo.

Figura 7 – Mecanismos naturais de controle hidrogeoquímico



Fonte: Gibbs (1970).

#### 4.4.1 Modelagem de especiação e solubilidade mineral

O modelo de especiação e solubilidade mineral, utilizando o programa Phreeqc, foi iniciado com os cálculos de concentração molar, atividade iônica e coeficiente de atividade das espécies químicas presentes nas amostras de água subterrânea, a partir dos quais foram obtidos os índices de saturação das fases minerais identificadas nas formações aquíferas.

As fases minerais analisadas na modelagem incluem silicatos (quartzo, caulinita, muscovita e ilita), óxi-hidróxido e óxido de ferro (goethita e hematita) e carbonato (calcita). Nas tabelas 5 e 6 encontram-se os índices de saturação dos referidos minerais e os teores de pH nas águas subterrâneas em cada período sazonal.

Para os silicatos observa-se que o quartzo apresentou condição de supersaturação com índices de saturação positivos em todas as amostras e em ambos os períodos sazonais, indicando tendência de formação da fase sólida mineral (precipitação) a partir da solução. As condições de pH das águas subterrâneas da área que variam de neutras a levemente ácidas favorecem essa tendência para precipitação, tendo em vista que a sílica é pouco solúvel em pH inferior a 8, sua solubilidade aumenta em meios mais alcalinos.

A caulinita e a muscovita (kmica) apresentaram condições de subsaturação com índices de saturação negativos, indicando tendência de dissolução em 92% das amostras no período chuvoso e 84% no período seco. As amostras P19 e P23 no período chuvoso e P9,

P15, P23 e P24 no período seco apresentaram-se supersaturadas nesses minerais. O comportamento idêntico observado para estes minerais em todas as amostras ocorre devido a caulinita ser o produto principal da dissolução da muscovita quando o potássio é completamente lixiviado, porém, se o potássio se mantém ocorre a formação da illita.

Para a illita observou-se comportamento semelhante com tendência de dissolução em 92% das amostras no período chuvoso e 96% no período seco. Nas amostras P19 e P23 no período chuvoso e P24 no período seco a illita apresenta tendência de precipitação.

As variações no aporte hídrico entre os períodos sazonais modificam as condições de pH, bem como o equilíbrio soluto/solvente, promovendo as alterações observadas na solubilidade dos aluminossilicatos e argilas, representados pela muscovita, caulinita e illita, nas amostras associadas a captação dos Aquíferos Dunas e Barreiras.

Em relação aos óxi-hidróxidos e óxidos de ferro, as águas subterrâneas da área encontram-se supersaturadas na maioria das amostras analisadas, em ambos os períodos sazonais.

A goethita apresenta condição de supersaturação (precipitação) em 68% das amostras no período chuvoso e 80% das amostras no período seco. A condição de subsaturação (dissolução) é observada nas amostras P6, P8, P12, P20, P21 e P24 no período chuvoso e nas amostras P6, P14, P19, P21 e P25 no período seco. Nas amostras P13 e P15, a goethita apresenta condição de saturação (dissolvendo ou precipitando para se manter em equilíbrio na solução) com índices de saturação entre -0,05 e 0,05 no período chuvoso.

A hematita apresenta tendência de precipitação em 92% das amostras no período chuvoso e 84% das amostras no período seco. Nas amostras P8 e P21 no período chuvoso e P6, P14, P19 e P21 no período seco a hematita apresenta condição de subsaturação, com tendência a dissolução.

A goethita forma-se, normalmente, em condições oxidantes acumulando-se por precipitação direta a partir de águas marinhas e meteóricas. A formação da hematita está relacionada, principalmente, ao metassomatismo por soluções, porém, também pode se formar por precipitação química de  $Fe_2O_3$  coloidal e alteração diagenética de sedimentos ricos em ferro (DEER *et al.*, 1992).

A maior tendência de precipitação identificada para os minerais de ferro é responsável pela ocorrência de níveis lateríticos presentes ao longo das falésias da Formação Barreiras na área, tendo em vista que esses níveis são constituídos principalmente por óxidos e óxi-hidróxidos de ferro, como a hematita e a goethita.

Para a fase mineral carbonática existente na área, representada pela calcita,

observa-se também a predominância da condição de subsaturação, com tendência de dissolução em 88% das amostras no período chuvoso e 96% no período seco, com tendência de precipitação na amostra P11 no período seco e condição de saturação (equilíbrio) nas amostras P11, P13 e P23 no período chuvoso.

Tabela 5 - Índices de saturação mineral e pH nas amostras de água subterrânea coletadas durante o período chuvoso

Amostra	pH	Quartzo	Caulinita	Kmica	Ilita	Calcita	Goethita	Hematita
P1	5,57	0,37	-0,89	-0,51	-5,25	-3,23	1,95	5,92
P2	7,27	0,59	-8,42	-10,47	-12,03	-0,38	5,45	12,90
P3	6,21	0,53	-8,46	-11,37	-13,15	-2,29	3,44	8,90
P4	7,21	0,56	-8,39	-10,30	-11,95	-0,19	0,26	2,53
P5	7,57	0,66	-8,87	-10,66	-11,99	-0,25	0,66	3,33
P6	6,73	0,47	-7,78	-10,06	-12,15	-2,95	-0,77	0,46
P7	5,88	0,50	-9,72	-13,88	-15,27	-2,80	1,91	5,83
P8	5,21	0,63	-13,36	-19,71	-19,80	-4,08	-5,35	-8,70
P9	8,17	0,33	-10,69	-13,08	-14,30	-0,39	7,16	16,33
P10	5,28	0,55	-13,85	-20,72	-20,81	-4,80	0,99	3,99
P11	7,00	0,34	-8,47	-10,76	-12,54	-0,01	4,94	11,89
P12	7,05	0,52	-8,17	-10,01	-11,76	-0,48	-0,07	1,87
P13	7,11	0,55	-8,27	-10,11	-11,78	-0,03	0,00	2,01
P14	5,19	0,62	-13,56	-20,37	-20,40	-5,30	0,45	2,92
P15	7,05	0,49	-8,19	-10,35	-12,19	-1,11	0,04	2,08
P16	7,02	0,74	-7,67	-9,34	-11,06	-0,56	5,11	12,22
P17	7,05	0,72	-7,75	-9,38	-11,13	-0,32	4,61	11,22
P18	5,95	0,81	-9,79	-13,61	-14,69	-2,75	1,50	5,01
P19	5,97	0,84	4,49	7,76	1,77	-2,50	2,83	7,66
P20	5,29	0,50	-13,84	-20,45	-20,51	-4,29	-0,27	1,46
P21	5,31	0,56	-12,96	-19,31	-19,63	-4,58	-4,98	-7,96
P22	8,18	0,34	-10,67	-13,55	-14,59	-0,58	0,73	3,47
P23	7,51	0,24	3,79	8,54	2,26	0,00	7,67	17,35
P24	6,96	0,62	-7,79	-9,58	-11,45	-0,84	-0,23	1,55
P25	7,17	0,60	-8,22	-10,02	-11,72	-0,33	0,20	2,40

Fonte: Elaborada pela autora.

As águas subterrâneas na área apresentam tendência neutra a levemente ácida, tanto para o período chuvoso quanto para o período seco, favorecendo a dissolução da calcita na maioria das amostras. Na amostra P11, porém, observa-se a tendência de precipitação

durante o período seco, que pode estar associada à influência de águas oriundas dos calcários que compõem o Aquífero Jandaíra, as quais são ricas em cálcio, tendo em vista que a amostra P11, em ambos os períodos sazonais, apresenta as maiores concentrações de cálcio da área, ultrapassando 200 mg/L, cujas médias são  $41,92 \text{ mg/L} \pm 49,22 \text{ mg/L}$  e  $47,2 \text{ mg/L} \pm 59,57 \text{ mg/L}$ , para os períodos chuvoso e seco, respectivamente.

Tabela 6 - Índices de saturação mineral e pH nas amostras de água subterrânea coletadas durante o período seco

Amostra	pH	Quartzo	Caulinita	Kmica	Ilita	Calcita	Goethita	Hematita
P1	5,28	0,38	-14,07	-20,57	-20,72	-3,59	0,94	3,88
P2	7,28	0,61	-8,40	-10,37	-11,96	-0,43	4,97	11,94
P3	6,20	0,54	-8,50	-11,43	-13,20	-2,31	2,79	7,59
P4	7,12	0,57	-8,20	-10,13	-11,85	-0,31	0,06	2,13
P5	7,32	0,71	-8,30	-10,01	-11,50	-0,41	5,79	13,59
P6	5,84	0,46	-10,03	-14,21	-15,66	-3,90	-3,41	-4,81
P7	5,79	0,50	-10,23	-14,59	-15,88	-2,86	1,94	5,89
P8	5,17	0,66	-1,84	-2,40	-6,53	-4,09	0,67	3,35
P9	8,12	0,38	0,78	3,75	-1,30	-0,44	7,87	17,74
P10	5,28	0,62	-0,50	-0,65	-5,23	-4,36	0,95	3,92
P11	7,02	0,38	-8,44	-10,87	-12,53	0,10	3,71	9,42
P12	6,90	0,60	-7,76	-9,55	-11,45	-0,43	4,89	11,78
P13	6,77	0,59	-7,61	-9,45	-11,32	-0,32	4,45	10,92
P14	4,47	0,61	-6,07	-9,58	-12,30	-5,38	-1,08	-0,15
P15	5,31	0,43	0,63	1,39	-3,80	-3,76	0,72	3,44
P16	6,86	0,42	-8,03	-10,17	-12,15	-0,67	4,71	11,43
P17	6,84	0,41	-8,03	-10,10	-12,11	-0,51	4,52	11,05
P18	5,53	0,50	-11,74	-17,06	-17,83	-3,14	0,84	3,70
P19	5,57	0,48	-11,54	-16,74	-17,60	-3,27	-4,25	-6,49
P20	5,15	0,50	-13,99	-20,84	-20,85	-4,39	0,19	2,39
P21	5,07	0,57	-13,30	-20,08	-20,31	-4,91	-5,70	-9,39
P22	7,95	0,36	-10,18	-13,12	-14,31	-0,67	6,09	14,20
P23	7,30	0,29	1,92	5,38	-0,12	-0,12	7,49	16,99
P24	6,73	0,65	5,45	10,05	3,61	-1,54	5,08	12,17
P25	7,02	0,39	-8,38	-10,55	-12,43	-0,41	-0,14	1,73

Fonte: Elaborada pela autora.

## 5 CONCLUSÕES

A região de Icapuí apresenta alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados, o que influencia diretamente na dinâmica de recarga dos aquíferos, podendo promover alterações nas características químicas das águas subterrâneas de um período para o outro. O cálculo do balanço hidroclimatológico demonstrou que nos meses de março e abril a precipitação pluviométrica é superior a evapotranspiração real promovendo a infiltração de cerca de 11% da chuva média anual, favorecendo a recarga dos aquíferos. Enquanto que nos meses de junho a dezembro ocorrem as menores precipitações pluviométricas, igualando a evapotranspiração real à precipitação total, o que resulta em uma situação de deficiência hídrica e ausência de infiltração para os aquíferos.

As águas subterrâneas da área são, predominantemente, do tipo cloretadas-sódicas e apresentam tendência neutra a levemente ácida, tanto no período chuvoso quanto no período seco. As características de potabilidade mostraram-se fora dos padrões recomendados em ambos os períodos sazonais para as concentrações de sólidos totais dissolvidos, cloreto, dureza total, sódio, nitrato, bário e chumbo. O sulfato apresentou concentração fora do padrão de potabilidade apenas no período chuvoso, enquanto que o ferro total e a turbidez apresentaram concentrações acima dos padrões recomendados durante o período seco.

As características hidroquímicas observadas são decorrentes dos processos geoquímicos atuantes na área, principalmente, o intemperismo promovido pelas interações entre as águas subterrâneas e os minerais que compõem os aquíferos percolados. A modelagem hidrogeoquímica indicou condição de supersaturação para o quartzo, a goethita e a hematita, e de subsaturação para caulinita, muscovita, ilita e calcita.

A predominância na condição de supersaturação, com tendência à precipitação, para o óxi-hidróxido e óxido de ferro justifica as baixas concentrações desse elemento encontradas nas amostras analisadas, bem como, as altas concentrações de sólidos dissolvidos, incluindo sílica, potássio e cálcio, estão associadas à condição de subsaturação, com tendência à dissolução, observada para os aluminossilicatos e a fase carbonática, representada pela calcita.

As concentrações de cloreto, sódio e sulfato estão associadas, principalmente, à influência marinha, e as concentrações acima dos padrões encontradas para o nitrato indicam contaminação por atividades antrópicas. A contaminação antrópica na área requer atenção, visto que as concentrações de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) são iguais ou superiores a 8 mg/L em cerca de 20% e 30% das amostras, nos períodos chuvoso e seco, respectivamente, fazendo-se

necessárias a adoção de medidas de saneamento para evitar o aumento destas concentrações que podem levar à inadequação das águas subterrâneas ao consumo humano.

A modelagem hidrogeoquímica permitiu identificar que as características químicas e qualitativas das águas subterrâneas na área são controladas, principalmente, pelo intemperismo dos silicatos e a dissolução dos carbonatos, com contribuição da influência marinha e atividades antrópicas.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará e ao Núcleo de Tecnologia e Qualidade Industrial do Ceará, pela realização das análises físico-químicas, e ao Laboratório de Cristalografia Estrutural da Universidade Federal do Ceará, pela realização da difratometria de raios X.

## REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. Washington: D.C. 22 ed., 2012.

APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Leiden: A.A. Balkema. 558 p., 2005.

BRAGA JUNIOR, M.G.; MELO, J.G.; DINIZ FILHO, J.B. Comportamento hidrodinâmico e hidroquímico do sistema aquífero Barreiras-Jandaíra-Açu na área da Fazenda Belém, oeste da Bacia Potiguar, CE. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 31(3):222-242, 2017.

BRASIL. **Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, 29 p., 2021.

CARLING, G.T.; ROMANOWICZ, E.A.; JIN, L.; FERNANDEZ, D.P.; TINGEY, D.G.; GOODSELL, T.H. Redox conditions and pH control trace element concentrations in a meandering stream and shallow groundwater of a semiarid mountain watershed, Red Canyon, Wyoming, USA. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], 78:510, 2019.

CARNEIRO, F.A. **Modelagem hidrogeoquímica do sistema aquífero pelito-carbonático existente no CNPMS da EMBRAPA Sete Lagoas/MG – Brasil**. 2013. 338 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Programa de pós-graduação em saneamento, meio ambiente e recursos hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2013.

CASTANY, G. **Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas**. Editora Omega S. A. Barcelona. Espanha. 738 p., 1975.

CELLIGOI, A. Considerações sobre análises químicas de águas subterrâneas. **Geografia (Londrina)**, Londrina, 8(1), 91-97, 1999. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5433/2447-1747.1999v8n1p91>.

COETSIERS, M.; WALRAEVENS, K. Chemical characterization of the Neogene Aquifer, Belgium. **Hydrogeology Journal**, [s. l.], 14:1556–1568, 2006.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterrânea**. 2º edição. Barcelona: Omega. Vol. 2, 1983.

DEER, W.A.; HOWIE, R.A.; ZUSSMAN, J. **Uma introdução aos minerais constituintes das rochas**. 2º edição, 1992.

FERRO, I.M.M. **Morfodinâmica e vulnerabilidade ambiental na região costeira de Icapuí, Ceará**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Postos Pluviométricos**. Fortaleza: FUNCEME, 2023.

GARRELS, R.M. AND CHRIST, C.L. **Solutions, Minerals and Equilibria**. W. H. Freeman, San Francisco, 450 p., 1965.

GIBBS, R. J. Mechanisms controlling World Water Chemistry. **Science**, [s. l.], v. 170, n. 3962, p. 1088-1090, 1970.

GOMES, M.C.R.; MELO, D.H.C.T.B.; COSTA, M.S.; ANJOS, J.A.S.A.; TRINTA, M.M.A.; CAVALCANTE, I.N. Análise geoquímica das águas subterrâneas no município de Boquira, no semiárido baiano – Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 35, n. 1, p. 7-16, 2021.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal**. Fortaleza: IPECE, 2021.

LABORATÓRIO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA E RECURSOS HÍDRICOS (LCGRH). **Celina: Planilha de cálculo**, versão 1,0. Departamento de Geografia, Centro de Ciências, Fortaleza, 2023.

MAIA, S.R.R. **Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - CE**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MARASCHIN, A.J.; MIZUSAKI, A.M.; VASCONCELOS, P.M.; HINRICHS, R.; DE ROS, L.F.; ANJOS, S.M.C. Depositional age definition of the Açú Formation (Potiguar Basin,



northeastern Brazil) through  $^{40}\text{Ar}$ - $^{39}\text{Ar}$  dating of early-authigenic K-feldspar overgrowths. **Pesquisas em Geociências**, [s. l.], 37(2):85-96, 2010.

MENTE, A.A. Água Subterrânea no Brasil. *In*: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações. 3. ed. revisada e ampliada**. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. p. 31-48.

MOBÜS, G. **Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Fortaleza, 2003.

MORAIS, F.; MELO, J.G. DE; MEDEIROS, J.I. DE; SRIVASTAVA, N.K.; DINIZ FILHO, J.B.; LOPES, V.L.; OLIVEIRA, J.A. DE; VASCONCELOS, M.B. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste brasileiro**. Avaliação do Aquífero Açú na borda sul da bacia Potiguar – Trecho: Upanema-Afonso Bezerra. Recife: CPRM/FINEP, 82 p., 2005.

NASCIMENTO, S.A.M.; GOMES, M.C.R.; RIBEIRO, R.S. Caracterização hidrogeoquímica do aquífero fissural no município de Uauá, Bahia – Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 34, n. 2, p. 195-202, 2020.

PARKHURST, D.L.; APPELO, C.A.J. **Description of input and examples for PHREEQC (version 3). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations**. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497p., 2013.

RICHARDS, L.A.; MAGNONE, D.; SOVANN, C.; KONG, C.; UHLEMANN, S.; KURAS, O.; VAN DONGEN, B.E.; BALLENTINE, C.J.; POLYA, D.A. High resolution profile of inorganic aqueous geochemistry and key redox zones in an arsenic bearing aquifer in Cambodia. **Science of the Total Environment**, [s. l.], 590–591, 540–553, 2017.

RICHTER, B.C.; KREITLER, C.W. **Geochemical techniques for identifying sources of groundwater salinization**. United States of America, Library of Congress Cataloging-in-publication Data, 1993.

SENA, M.; R.; S. **Petrofísica e caracterização mineralógica de rochas carbonáticas do Nordeste Brasileiro**. 2017. 81 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Programa de Pós-Graduação em Exploração Petrolífera e Mineral, Universidade Federal de Campina Grande, Campina Grande, 2017.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Mapa Geodiversidade do Estado do Ceará, escala 1:750.000**. 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14692>. Acesso em 10 mai. 2021.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS). **Banco de dados de poços do Ceará**. Disponível em <https://siagasweb.sgb.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SOARES, U. M.; ROSSETTI, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia Potiguar. **Fundação Paleontológica Phoenix**, Aracaju, v. 56, p.1-10, 2003.

SOUSA, D.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

SOUZA, D. P. **Estudo geoquímico-mineralógico de litologias aflorantes na orla litorânea de Icapuí – Ceará**. 2017. 81 p. Dissertação (Mestrado em Geologia) – Programa de Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2017.

SRIDHARAN, M.; NATHAN, D.S. Chemometric tool to study the mechanism of arsenic contamination in groundwater of Puducherry region, South East coast of India. **Chemosphere**, [s. l.], 208, 303-315, 2018.

TUREKIAN, K.K. AND WEDEPOHL, K.H. Distribution of the Elements in Some Major Units of the Earth's Crust. **Geological Society of America Bulletin**, [s. l.], v. 72, p. 175-192, 1961.

VASCONCELOS, S.M.S. Estimativa da Recarga Subterrânea a partir do Balanço Hídrico – Exemplo de Fortaleza (CE). **Revista de Geologia**, Fortaleza, vol. 6, nº 1, 27-34, 1996.

VASCONCELOS, S.M.S.; TEIXEIRA, Z.A.; ALVES NETO, J. Caracterização do Aquífero Jandaíra, porção situada no estado do Ceará, Brasil. **Revista de Geologia**, Fortaleza, vol. 23, nº 1, 50-60, 2010.

VENÂNCIO, L.O.; GOMES, D.F.; FREIRE, G.S.S.; LIMA NETO, I.O. Monitoramento da qualidade e hidrogeoquímica das águas subterrâneas do setor noroeste da região metropolitana de Fortaleza, CE. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, 34(2):138-160, 2020.

## VULNERABILIDADE À SALINIZAÇÃO POR INTRUSÃO MARINHA EM AQUÍFERO COSTEIRO DO ESTADO DO CEARÁ

### VULNERABILITY TO SALINIZATION BY MARINE INTRUSION IN A COASTAL AQUIFER IN THE STATE OF CEARÁ

#### RESUMO

Os aquíferos costeiros constituem importante fonte de abastecimento de água para o estado do Ceará, sobretudo na época de estiagem, quando os reservatórios superficiais não apresentam a totalidade de seus volumes. Assim, esses aquíferos são frequentemente afetados pelo problema de intrusão marinha induzida pela exploração inadequada. O presente estudo foi desenvolvido com o objetivo de identificar o grau de vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras no município de Icapuí, Ceará, bem como avaliar a qualidade das águas subterrâneas com base nos parâmetros associados à salinização, tendo em vista a sua importância para a região por constituir a principal fonte de abastecimento de água. Para tanto foi aplicada a metodologia GALDIT que utiliza indicadores mapeáveis, representados pelo tipo de aquífero, condutividade hidráulica, altura da superfície potenciométrica, distância dos poços em relação à costa, razão  $rCl^-/rHCO_3^-$  e espessura saturada, para quantificar e classificar a vulnerabilidade de aquíferos costeiros à intrusão da água do mar. Os resultados indicaram áreas com vulnerabilidade média e alta à salinização no sistema aquífero, definidas, principalmente, pela distância dos poços em relação à costa, a altura da superfície potenciométrica e a razão  $rCl^-/rHCO_3^-$ . A qualidade das águas subterrâneas encontra-se comprometida, em relação à concentração de sais, em mais de 60% das amostras analisadas, porém, essa salinização está, provavelmente, mais relacionada aos aerossóis marinhos e/ou à infiltração de águas salobras de lagoas costeiras do que à mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pela intrusão salina. Entretanto, a vulnerabilidade do sistema aquífero Dunas/Barreiras na área requer maior atenção em relação a gestão dos recursos hídricos, visto que modificações na demanda atual, com conseqüente aumento na exploração, podem acarretar no avanço da cunha salina em direção ao continente.

**Palavras-chave:** GALDIT; Cunha salina; Salinidade; Aquífero Dunas/Barreiras.

## ABSTRACT

Coastal aquifers are an important source of water supply for the state of Ceará, especially during the dry season, when surface reservoirs are not at their full volumes. In this way, these aquifers are often affected by the problem of marine intrusion induced by inadequate exploitation. The present study was developed with the objective of identifying the degree of vulnerability to salinization by marine intrusion for the Dunas/Barreiras coastal aquifer system in the municipality of Icapuí, Ceará, as well as evaluating the quality of groundwater based on parameters associated with salinization, in view of its importance for the region as it constitutes the main source of water supply. For this purpose, the GALDIT methodology was applied, which uses mappable indicators, represented by the type of aquifer, hydraulic conductivity, potentiometric surface height, distance of the wells from the coast,  $rCl^-/rHCO_3^-$  ratio and saturated thickness, to quantify and classify the vulnerability from coastal aquifers to seawater intrusion. The results indicated areas with medium and high vulnerability to salinization in the aquifer system, defined mainly by the distance of the wells in relation to the coast, the height of the potentiometric surface and the  $rCl^-/rHCO_3^-$  ratio. In relation to the concentration of salts, the quality of the groundwater is compromised in more than 60% of the analyzed samples, however, this salinization is probably more related to marine aerosols and/or the infiltration of brackish waters from coastal lagoons than the mixing of marine and continental groundwater promoted by saline intrusion. However, the vulnerability of the Dunas/Barreiras aquifer system in the area requires greater attention in relation to the management of water resources, since changes in current demand, with a consequent increase in exploitation, may lead to the advance of the saline wedge towards the continent.

**Keywords:** GALDIT; Saline wedge; Salinity; Dunas/Barreiras Aquifer.

## 1 INTRODUÇÃO

Os aquíferos costeiros têm sido submetidos à constante pressão em decorrência da crescente urbanização nessas regiões, com consequente aumento da demanda de água para as diversas atividades domésticas, agrícolas e industriais.

A exploração inadequada desses recursos causa efeitos negativos, como o avanço da cunha salina comprometendo a qualidade das águas subterrâneas em relação à salinidade, restringindo seu uso ou, a depender do nível de comprometimento, exigindo a utilização de

sistemas de tratamento, como dessalinização por osmose reversa, para permitir o seu aproveitamento. Dessa maneira, a identificação do grau de vulnerabilidade dos aquíferos em relação à intrusão marinha contribui de forma direta para a boa gestão dos recursos hídricos.

Estudo realizado por SILVA & GOMES (2007) na região da Beira-mar de Fortaleza – Ceará, comprovou o problema de intrusão marinha nos poços da área gerado pela superexploração de água subterrânea dentro da zona de transição entre água doce e água marinha.

Segundo LOBO FERREIRA & CABRAL (1991), a vulnerabilidade, em se tratando das águas subterrâneas, é definida como a sensibilidade da qualidade das águas a uma carga contaminante imposta, por diferentes poluentes ou à intrusão da água do mar, determinada pelas características intrínsecas do aquífero.

Para aquíferos costeiros, é necessária a utilização de uma metodologia apropriada para mapear a distribuição espacial das áreas litorâneas em relação à vulnerabilidade potencial de intrusão da água do mar, que leve em conta os fatores hidrogeológicos, principalmente aqueles que podem ser obtidos com certa facilidade nos órgãos gestores de recursos hídricos ou através de experimentos simples e rápidos (COSTA SOBRINHO *et al.* 2015).

CHACHADI *et al.* (2003) desenvolveram a metodologia GALDIT para representar um índice de vulnerabilidade específico para salinização de aquíferos costeiros que pudesse vir a substituir, nestas situações, o índice DRASTIC (ALLER *et al.* 1987). O método GALDIT é composto por duas partes principais: a designação de unidades mapeáveis, denominadas configurações hidrogeológicas, e a superposição de um sistema de classificação. Dessa maneira, tem sido aplicado em estudos com diferentes tipos de aquíferos costeiros, sejam semiconfinados a confinados (RECINOS *et al.* 2013) ou não confinados (SAVARIYA & BHATT 2014, COSTA SOBRINHO *et al.* 2015, HALLAL *et al.* 2019).

Neste estudo, o índice GALDIT foi aplicado para o sistema aquífero Dunas/Barreiras que constitui a principal fonte de abastecimento para a região costeira do município de Icapuí, Ceará, com o objetivo de identificar e delinear as áreas mais vulneráveis à salinização por intrusão marinha, bem como avaliar a qualidade das águas subterrâneas com base nos parâmetros físico-químicos associados à salinização, buscando fornecer subsídios para a gestão adequada e preservação dos recursos hídricos costeiros.

## 2 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo compreende a faixa urbana costeira do município de Icapuí localizado no extremo leste do estado do Ceará (Figura 1), com aproximadamente 421 km<sup>2</sup> e cerca de 20.000 habitantes, concentrados principalmente na zona costeira do município. Nos últimos dez anos é notável o aumento no número de pousadas, bares e restaurantes com maior fluxo de turistas e consequente aumento na demanda por água.

O clima é caracterizado como tropical quente semiárido brando, a temperatura média está entre 26 e 28°C e a pluviosidade média é de 949 mm, apresentando chuvas mais expressivas nos meses de janeiro a maio (IPECE 2021).

O abastecimento de água é realizado por meio de poços tubulares administrados pelo Serviço Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), e poços particulares, que captam principalmente do Sistema Aquífero Dunas/Barreiras.

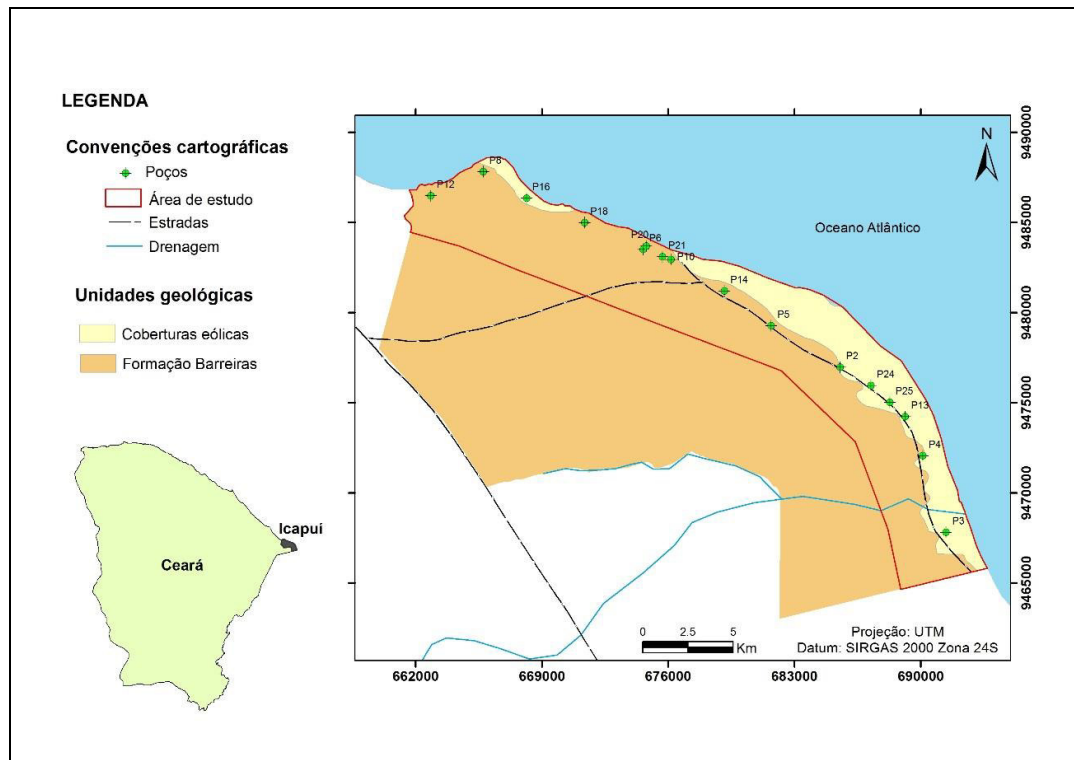
O Aquífero Dunas corresponde aos depósitos eólicos quaternários que ocorrem ao longo de toda a faixa costeira, com espessuras que variam de 6 a 20 m, compostos, segundo FERRO (2018), por areias quartzosas bem selecionadas, de granulação fina a média.

O Aquífero Barreiras é composto por clastos de idades que variam do Mioceno até o Plioceno-Pleistoceno e ocorre tanto subjacente ao aquífero Dunas quanto aflorante, possuindo o maior potencial hídrico da área.

A Formação Barreiras aflora na área sob a forma de falésias ao longo da costa, a partir das quais, SOUSA (2002) identificou duas seções individualizáveis verticalmente. A primeira corresponde à seção superior, composta por arenitos avermelhados de aspecto maciço, granulometria de areia média a grossa. A composição é predominantemente quartzosa, com grãos eventualmente recobertos por óxido de ferro, em matriz argilosa. Na seção inferior ocorrem arenitos finos silto-argilosos em cimento argiloso, localmente maciços com estratificação cruzada de baixo ângulo, e tonalidades amareladas, roxas e avermelhadas. São compostos, predominantemente, por grãos de quartzo, angulosos a sub-arredondados, e presença subordinada de feldspatos.

Neste estudo as duas unidades aquíferas foram consideradas um sistema hidráulico único, Dunas/Barreiras, conforme indicado por MELO (1998) a partir de análise das variações das cargas hidráulicas e das feições litológicas e estruturais dos aquíferos, e ainda, conforme identificado por VASCONCELOS *et al.* (2015), pela não demarcação do contato entre o topo da Formação Barreiras e a base dos sedimentos de dunas.

Figura 1 – Distribuição dos poços amostrados e unidades geológicas na área de estudo



Fonte: Serviço Geológico do Brasil (2014, modificado).

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

Foram utilizados neste estudo dados de 16 poços localizados na faixa urbana costeira do município de Icapuí, Ceará (Figura 1), a partir dos quais foram obtidos os parâmetros utilizados na aplicação da metodologia GALDIT e coletadas amostras para realização de análises físico-químicas.

A amostragem das águas subterrâneas foi dividida em duas campanhas, totalizando 32 amostras coletadas, a primeira realizada em fevereiro (período chuvoso) e a segunda em agosto (período de estiagem) de 2019, visando identificar variações sazonais nas características químicas relacionadas à salinização. Os parâmetros obtidos englobam condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD),  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  e  $\text{Cl}^-$ , e foram analisados pelo Laboratório de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal do Ceará utilizando a metodologia estabelecida pelo Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA 2012).

O método GALDIT, desenvolvido por CHACHADI & LOBO FERREIRA (2001), utiliza seis parâmetros, para os quais são atribuídos pesos relativos à influência no processo de intrusão de águas marinhas no aquífero. São utilizadas variáveis indicadoras com

faixas de valores para os parâmetros mensuráveis. As variáveis são classificadas com base na importância para o comprometimento da vulnerabilidade do aquífero, variando de muito baixa a alta (Tabela 1).

Tabela 1 – Parâmetros utilizados na metodologia GALDIT

Parâmetro	Peso	Variáveis indicadoras			
		2,5 (muito baixa)	5 (baixa)	7,5 (média)	10 (alta)
<b>G</b> - Ocorrência da água subterrânea	1	Aquífero limitado	Aquífero semiconfinado	Aquífero não confinado	Aquífero confinado
<b>A</b> - Condutividade hidráulica do aquífero (m/dia)	3	< 5	5 - 10	10 - 40	> 40
<b>L</b> - Altura do nível do lençol freático acima do nível do mar (m)	4	> 2	1,5 - 2	1 - 1,5	< 1
<b>D</b> - Distância do ponto em relação à costa (m)	4	> 1000	750 - 1000	500 - 750	< 500
<b>I</b> - Impacto do estado existente de intrusão de água do mar ( $rCl/rHCO_3^-$ )	1	< 1	1 - 1,5	1,5 - 2	> 2
<b>T</b> - Espessura do aquífero (saturada) (m)	2	< 5	5 - 7,5	7,5 - 10	> 10

Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

Os valores das classes das variáveis indicadoras referentes a cada parâmetro foram utilizados para confecção de mapas temáticos, a partir dos quais foi calculado o índice de vulnerabilidade GALDIT (*IG*) por meio da relação ponderada apresentada na equação 1:

$$IG = \frac{\sum_{i=1}^6 (W_i \cdot R_i)}{\sum_{i=1}^6 W_i} \quad (1)$$

Onde *W* é o peso para cada parâmetro, que varia conforme a influência de 1 (fraca) a 4 (forte), e *R* é o valor da classificação para cada variável, que de acordo com a importância vai de 2,5 (muito baixa) a 10 (alta).

Para o parâmetro G (ocorrência da água subterrânea) o sistema aquífero Dunas/Barreiras foi classificado como não confinado com base nos perfis construtivos e litológicos dos poços cadastrados na área (SIAGAS 2021), nos quais não foi identificada a presença de camadas com características confinantes ou semiconfinantes sobrepostas ao aquífero.

A condutividade hidráulica, parâmetro A, foi obtida a partir de dados disponíveis na literatura em estudos desenvolvidos para o sistema aquífero Dunas/Barreiras devido à



ausência de dados necessários para a determinação desse parâmetro utilizando os poços cadastrados na área. Dessa maneira, foi utilizado o valor médio de condutividade hidráulica determinado por MELO (1998) que sumarizou os dados históricos dos parâmetros hidrodinâmicos do sistema aquífero Dunas/Barreiras.

O nível d'água acima do mar (NA) foi calculado a partir da profundidade do nível estático (NE) e da cota altimétrica (CA) de cada poço (Equação 2). As medidas de nível estático foram feitas utilizando medidor eletro-sonoro de nível estático com capacidade para 100 m e as cotas altimétricas foram obtidas com GPS Garmim GPSmap 60CSx. Os dados calculados foram interpolados utilizando o método de krigagem para produzir o mapa referente ao zoneamento do parâmetro L.

$$NA = CA - NE \quad (2)$$

As distâncias dos poços em relação à costa foram estimadas considerando, conforme o método, três distâncias perpendiculares à linha de maré alta de 500, 750 e 1000 m. Os intervalos definidos para cada distância foram confeccionados em ambiente SIG para gerar o mapa referente ao parâmetro D.

A razão  $rCl^-/rHCO_3^-$  pode ser utilizada como critério na identificação do impacto da intrusão marinha em aquíferos costeiros, tendo em vista que o  $Cl^-$  é o íon dominante na água do mar, estando disponível apenas em pequenas quantidades nas águas subterrâneas continentais. As razões  $rCl^-/rHCO_3^-$  nas amostras analisadas foram calculadas a partir da conversão das concentrações em  $mg L^{-1}$  desses elementos para  $meq L^{-1}$  e os valores obtidos foram interpolados utilizando o método de krigagem para a confecção do mapa de zoneamento para o parâmetro I.

O parâmetro T, representado pela espessura do aquífero, foi estimado a partir das fichas técnicas dos poços, utilizando dados construtivos e litológicos, obtidos em órgãos públicos como Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) e Serviço Geológico do Brasil (SGB), neste último, por meio do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS 2021).

A classificação da vulnerabilidade GALDIT foi feita a partir dos intervalos apresentados na tabela 2. Os valores obtidos para cada poço foram interpolados pelo método de krigagem para gerar o mapa de zoneamento da vulnerabilidade GALDIT para o aquífero.

Tabela 2 – Classificação da vulnerabilidade pelo índice GALDIT

Índice GALDIT	Classe de Vulnerabilidade
< 5	Baixa
5 - 7,5	Média
> 7,5	Alta

Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

Para avaliar as águas subterrâneas com base nos parâmetros associados à salinização foram utilizados, inicialmente, os valores estabelecidos pela Resolução Conama nº 357 (CONAMA 2005), que classifica as águas em doces, salobras e salgadas a partir das concentrações de sólidos totais dissolvidos (Tabela 3).

Tabela 3 – Enquadramento das águas com base na salinidade

Classificação	STD (mg L <sup>-1</sup> )
Águas Doces	< 500
Águas Salobras	500 – 30.000
Águas Salinas	> 30.000

Fonte: CONAMA (2005).

Posteriormente, foi realizada a classificação iônica para identificar quais fácies hidroquímicas representam as águas da região, utilizando o diagrama triangular de Piper elaborado no programa Qualigraf (MOBÜS 2003).

Os resultados das análises físico-químicas foram comparados com a Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde (BRASIL 2021) e com as recomendações da Organização Mundial da Saúde (WHO 2011) com o objetivo de avaliar a adequação para o consumo humano.

Para avaliar a qualidade das águas subterrâneas para uso na agricultura (irrigação) foi adotada a classificação proposta pelo U.S. Salinity Laboratory, que relaciona a condutividade elétrica (CE) como indicadora do perigo de salinização do solo e a Razão de Adsorção de Sódio (RAS) (Equação 3) como indicadora do perigo de sodificação.

$$RAS = \frac{rNa^+}{\sqrt{\frac{r(Ca^{+2} + Mg^{+2})}{2}}} \quad (3)$$

## **4 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1 Vulnerabilidade do aquífero à salinização**

A partir dos parâmetros propostos pelo método GALDIT foram estimados os índices de vulnerabilidade à intrusão salina para o sistema aquífero costeiro na área.

Os dados obtidos nos dois períodos sazonais não apresentaram variações significativas nos valores a ponto de promover alterações nas variáveis indicadoras. Dessa maneira, tanto para o período seco quanto para o chuvoso, as amostras se enquadraram nas mesmas classes de acordo com o método GALDIT.

#### **4.1.1 Ocorrência da água subterrânea (G)**

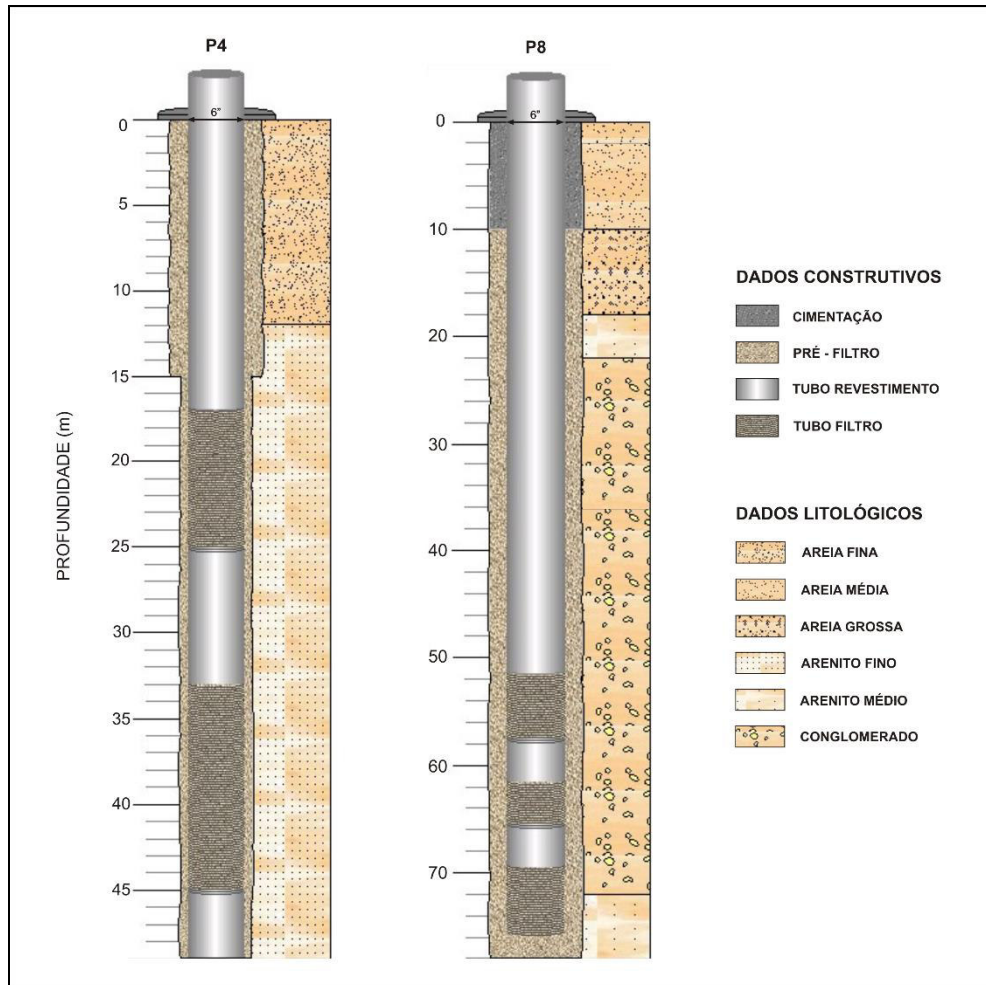
O aquífero não confinado submetido à pressão atmosférica está mais susceptível ao avanço da cunha salina do que o semiconfinado, pois este mantém a pressão hidráulica a um mínimo, devido às fugas associadas aos aquíferos adjacentes, protegendo-se assim da intrusão marinha. Ao contrário, um aquífero confinado, sob alta pressão hidráulica, é o mais vulnerável pela existência de importantes cones de depressão e pela imediata expulsão de água dos poços durante o bombeamento (HALLAL *et al.* 2019).

Na área de estudo, o sistema aquífero Dunas/Barreiras possui caráter não confinado, conforme identificado por meio de perfis litológicos dos poços, por exemplo P4 e P8 (Figura 2). Portanto, a classe de ocorrência da água subterrânea para todos os pontos, corresponde ao valor 7,5.

#### **4.1.2 Condutividade hidráulica (A)**

Por definição a condutividade hidráulica do aquífero é uma medida da capacidade do aquífero de transmitir água sob o efeito do gradiente hidráulico. A maior condutividade hidráulica resulta em um cone de depressão mais amplo e de maior extensão para intrusão de água do mar (SAVARIYA & BHATT 2014). A condutividade hidráulica média estimada para o sistema aquífero Dunas/Barreiras foi de 14,7 m/dia (MELO 1998), sendo atribuído o valor de 7,5 para todos os pontos.

Figura 2 – Perfis construtivos e litológicos dos poços P4 e P8 cadastrados na área de estudo

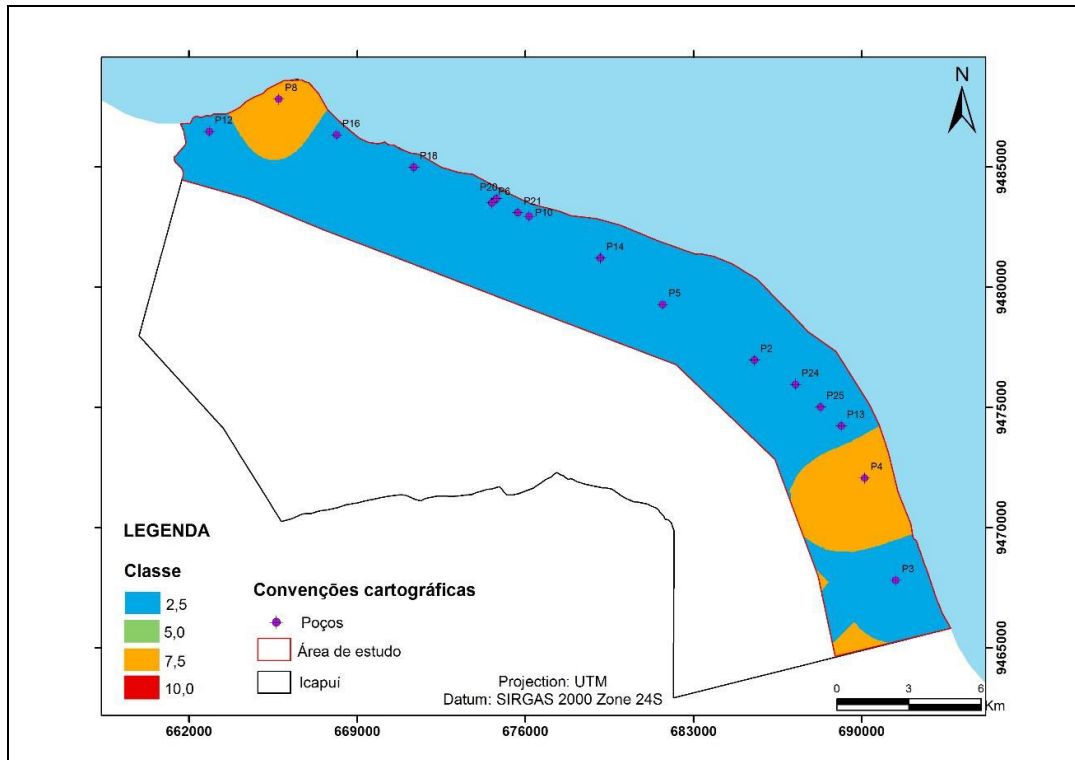


Fonte: Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (2021).

#### 4.1.3 Altura do nível da água subterrânea acima do nível do mar (L)

Quanto maior o nível de água subterrânea acima do nível médio do mar, maior a carga hidráulica e menor o risco de intrusão marinha. Na maior parte da área (Figura 3), os poços apresentam nível d'água acima de 2 m, sendo atribuído para estes pontos o valor de 2,5, apenas dois poços (P4 e P8) apresentam nível d'água entre 1 e 1,5 m correspondendo ao valor de classificação 7,5.

Figura 3 – Altura do nível da água acima do nível do mar (parâmetro L)

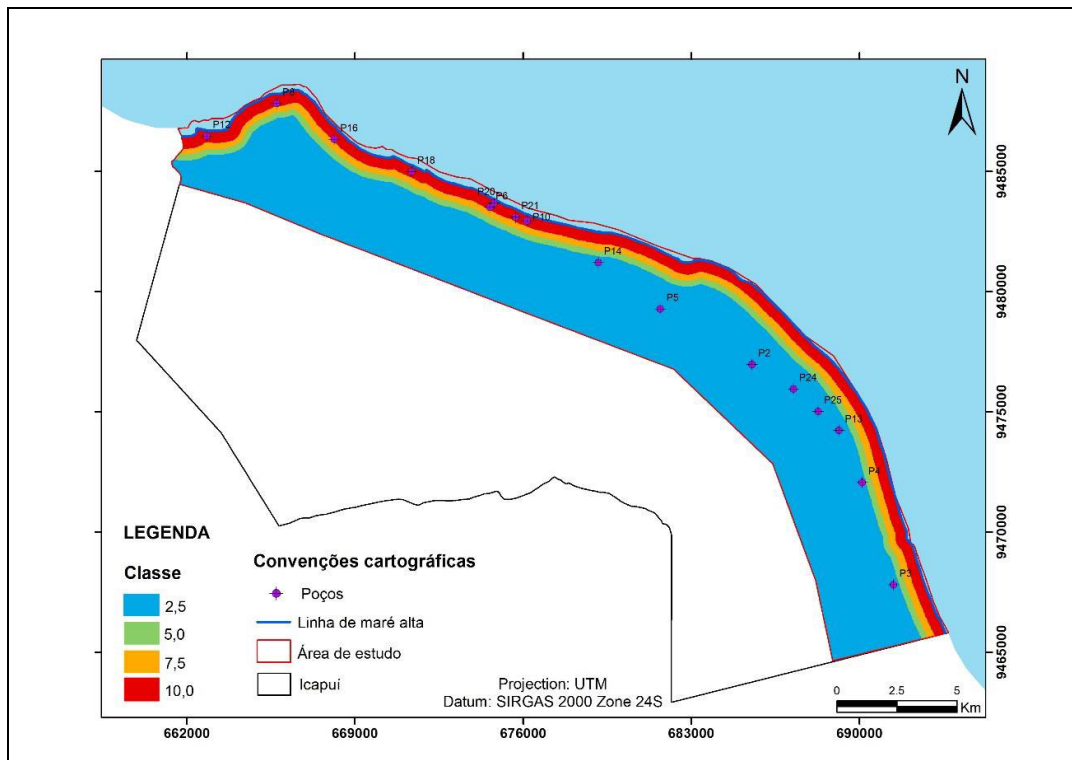


Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

#### 4.1.4 Distância do ponto em relação à costa (D)

O impacto da intrusão da água do mar geralmente diminui quando se desloca perpendicularmente da costa para o interior. Observa-se na Figura 4 que 50% dos poços encontram-se a menos de 500 m da linha de costa em maré alta e os outros 50% estão a mais de 1000 m da referida linha. Assim, de acordo com a distância dos pontos em relação à costa foram atribuídos valores de 2,5 e 10,0 para este parâmetro.

Figura 4 - Distância dos pontos em relação à costa (parâmetro **D**)



Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

#### 4.1.5 Impacto do estado existente de intrusão de água do mar (I)

A razão  $rCl/rHCO_3^-$  varia de 0,1 a 5 em águas continentais (CUSTÓDIO & LLAMAS 1983). Como o conteúdo em  $HCO_3^-$  é relativamente constante nas águas subterrâneas, essa razão presta-se para mapear o processo de concentração de sais no sentido do fluxo subterrâneo; ainda que o processo faça crescer ligeiramente o denominador, um aumento na razão  $rCl/rHCO_3^-$  indica um avanço no processo de concentração (SANTOS 2008).

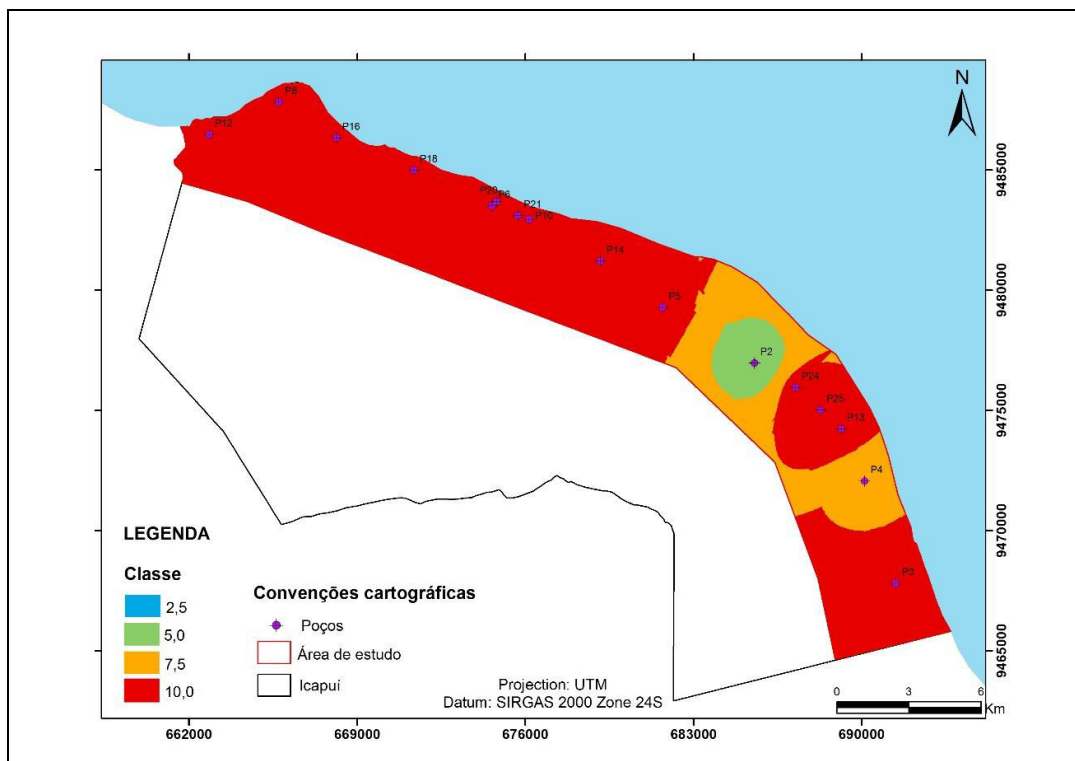
Na maior parte da área de estudo a razão  $rCl/rHCO_3^-$  foi maior que 2,0, correspondendo ao valor de classificação 10,0 (alta) em 87% das amostras (Figura 5). Apenas nas amostras P2 e P4 a razão  $rCl/rHCO_3^-$  foi inferior a 2,0 (Tabela 4), para estes pontos foram atribuídos os valores GALDIT 5,0 e 7,5, respectivamente. Os altos valores para a razão  $rCl/rHCO_3^-$  indicam a ocorrência de um processo de salinização com contribuição marinha devido a predominância do íon  $Cl^-$  sobre o  $HCO_3^-$ , nas águas subterrâneas da área.

Tabela 4 – Razões  $rCl^-/rHCO_3^-$  nas amostras analisadas

Amostra	Período Chuvoso			Período Seco		
	$Cl^-$	$HCO_3^-$	$rCl^-/rHCO_3^-$	$Cl^-$	$HCO_3^-$	$rCl^-/rHCO_3^-$
	-----(meq L <sup>-1</sup> )-----					
P2	4,96	3,51	1,41	4,79	3,23	1,48
P3	7,56	0,69	11,00	7,56	0,69	11,00
P4	9,36	5,82	1,61	9,14	5,94	1,54
P5	11,96	2,30	5,19	15,79	2,34	6,74
P6	3,39	0,28	11,94	3,39	0,24	13,96
P8	9,02	0,28	31,83	8,97	0,28	31,63
P10	1,41	0,16	8,69	1,75	0,20	8,68
P12	15,23	3,84	3,97	13,76	3,51	3,92
P13	33,56	4,85	6,92	36,10	4,81	7,51
P14	0,85	0,08	10,54	2,20	0,08	27,40
P16	7,78	3,39	2,29	7,39	3,27	2,26
P18	5,24	0,73	7,21	5,24	0,73	7,21
P20	3,89	0,20	19,31	3,84	0,20	19,03
P21	2,20	0,20	10,91	2,14	0,12	17,68
P24	7,56	2,14	3,53	8,35	0,89	9,40
P25	10,27	4,16	2,47	11,28	4,16	2,71

Fonte: Elaborada pela autora.

Figura 5 – Impacto do estado existente de intrusão de água do mar (parâmetro I)



Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).

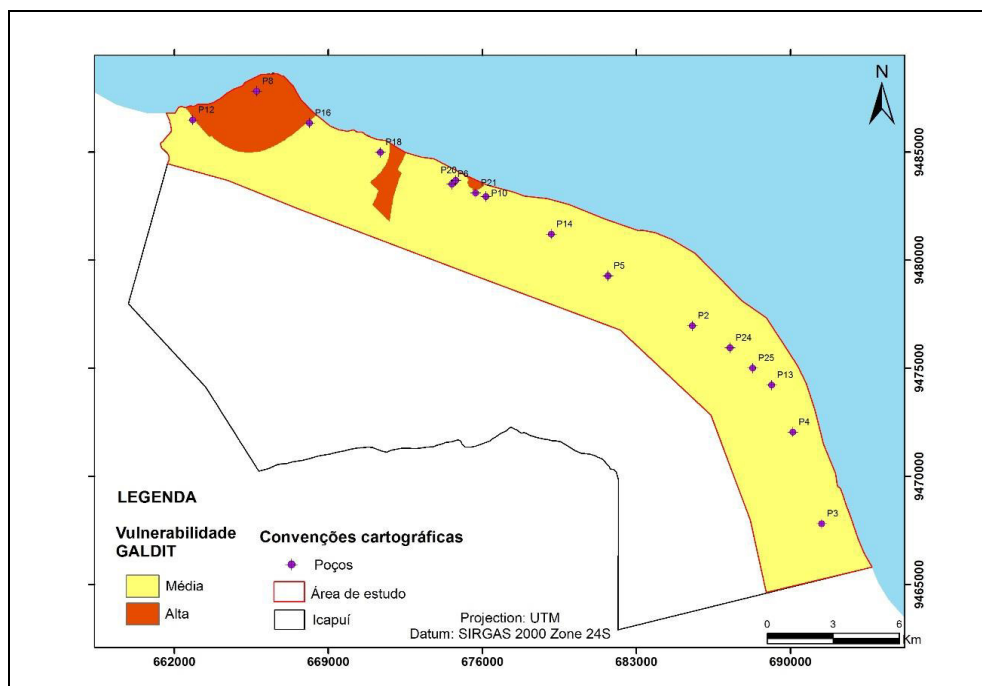
#### 4.1.6 Espessura saturada do aquífero (T)

A espessura saturada de um aquífero livre desempenha um papel importante na determinação da extensão da intrusão de água do mar na área costeira, pois quanto mais espesso o aquífero, maior a vulnerabilidade à intrusão da água do mar (SAVARIYA & BHATT 2014). A partir dos perfis construtivos e litológicos dos poços cadastrados na área (SIAGAS 2021), estimou-se espessura saturada média de 29 m para o aquífero Dunas/Barreiras, portanto, para este parâmetro atribuiu-se o valor 10,0 a todos os pontos.

#### 4.1.7 Vulnerabilidade GALDIT

Com base nos índices calculados, o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras apresenta vulnerabilidade à salinização por intrusão marinha variando de média a alta. Na maior parte da área o aquífero possui vulnerabilidade média à salinização, porém na porção oeste observa-se a ocorrência de regiões com alta vulnerabilidade (Figura 6). As áreas mais vulneráveis estão associadas às regiões que apresentam nível d'água acima do nível do mar inferior a 1,5 m, poços localizados a menos de 500 m da linha de costa e águas com razão  $rCl^-/rHCO_3^-$  superior a 2,0.

Figura 6 – Vulnerabilidade GALDIT para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras



Fonte: Chachadi e Lobo Ferreira (2001).



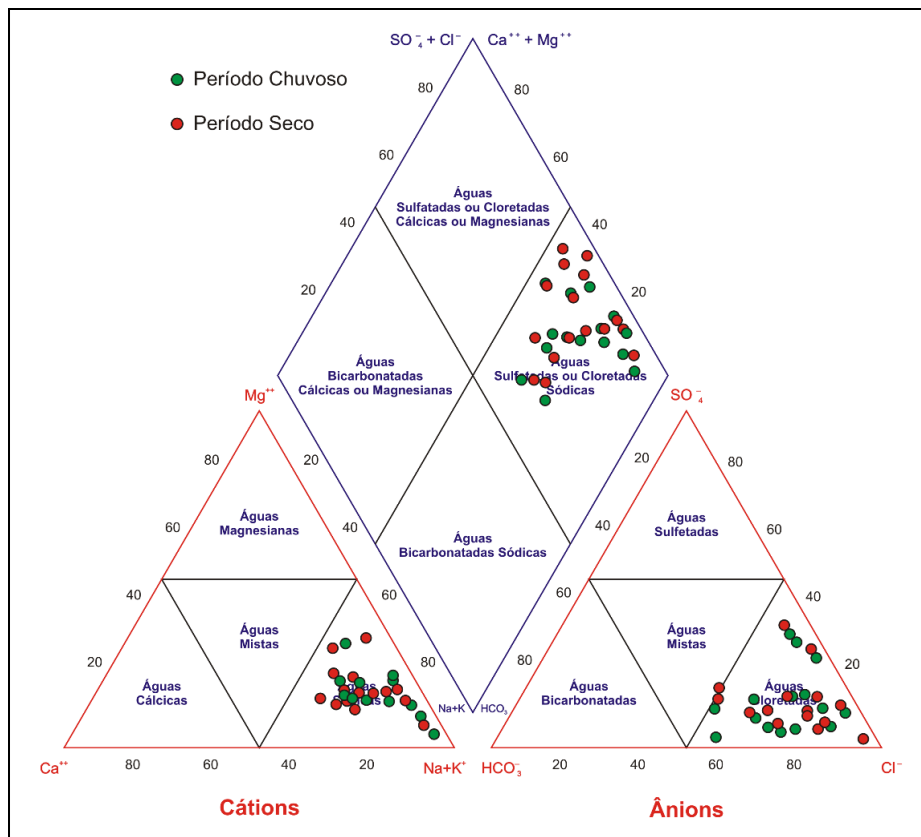
## 4.2 Salinidade e padrões de qualidade das águas subterrâneas

A salinização das águas está diretamente relacionada com aumento dos sólidos dissolvidos. Dessa maneira, a Resolução Conama nº 357 (CONAMA 2005) classifica as águas em doces, salobras e salinas a partir das concentrações de STD.

Na área, cerca de 60% das amostras se enquadram como águas salobras e 40% como águas doces. De modo geral, as condições climáticas e fatores antrópicos não causaram mudanças apreciáveis na salinidade de um período sazonal para o outro e nem tendência de aumento ou diminuição.

Com base nos constituintes iônicos dominantes as águas são classificadas em cloretadas sódicas (Figura 7). A predominância dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  sobre os demais corrobora para a maior contribuição marinha na salinização das águas subterrâneas, seja por intrusão da cunha salina, lixiviação de sais depositados no solo, provenientes de aerossóis marinhos, ou infiltração de água de lagoas costeiras, muitas vezes salobras, devido ao processo de evaporação e concentração de sais.

Figura 7 – Classificação iônica das águas subterrâneas



Fonte: Mobüs (2003).

De acordo com MAIA (2018), essa salinização não está relacionada diretamente à mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pelo avanço da cunha salina, visto que o autor analisou o conteúdo isotópico de amostras de água coletadas em 56 poços na área de estudo, as quais apresentaram valores de  $\delta^{18}\text{O}$  negativos, entre -2,56 e -5,31,  $\bar{x} = -3,83$ , compatíveis com dados obtidos pela IAEA (1981) para as chuvas do litoral de Fortaleza-CE, indicando águas de recarga pluviométrica atual.

A composição isotópica das águas subterrâneas, desde que não haja nenhum novo fator de modificação, deve ser semelhante a água de precipitação que a originou. No entanto, alguns fatores podem alterar sua composição isotópica, entre os quais pode-se citar a mistura com águas de origem não meteórica, como águas superficiais continentais ou marinhas, e a influência de águas fósseis. Nos reservatórios superficiais, submetidos ao processo de evaporação, ocorre um enriquecimento nos isótopos pesados, como o  $\delta^{18}\text{O}$ , na água residual em relação ao valor inicial (SALATI *et al.* 1971). Em estudo realizado por GOMES *et al.* (2007) no rio Jaguaribe-Ceará verificou-se que durante o período chuvoso as águas apresentaram valores negativos de  $\delta^{18}\text{O}$ , enquanto que no período seco, com maior evaporação, as águas tornaram-se enriquecidas em  $\delta^{18}\text{O}$  apresentando concentrações positivas. Dessa maneira, águas subterrâneas enriquecidas em  $\delta^{18}\text{O}$  podem indicar infiltração de águas superficiais ou contaminação por águas marinhas, em decorrência de intrusão salina.

Como não foram verificadas grandes alterações na demanda de água na região, durante o período entre a realização do estudo desenvolvido por MAIA (2018) e o desenvolvimento deste, segundo o Sistema Autônomo de Água e Esgoto (SAAE), que justificassem alterações no equilíbrio da interface águas subterrâneas marinhas/continentais, e levando em conta o caráter livre do aquífero, a origem dos íons  $\text{Na}^+$  e  $\text{Cl}^-$  pode ser atribuída à lixiviação de espécies químicas depositadas sob o solo, provenientes dos aerossóis marinhos, promovida pela recarga pluviométrica.

Com relação aos padrões de qualidade, os parâmetros associados à salinidade foram avaliados com base nos valores estabelecidos para consumo humano e uso na agricultura, tendo em vista os usos preponderantes na região.

As concentrações de STD apresentaram valores acima do máximo permitido (VMP) para consumo humano, que é de  $500 \text{ mg L}^{-1}$ , em cerca de 60% das amostras nos dois períodos sazonais. O cloreto apresentou concentrações superiores a  $250 \text{ mg L}^{-1}$  (VMP) em 56% das amostras, atingindo máximas de 1189,6 e  $1279,6 \text{ mg L}^{-1}$  nos períodos chuvoso e seco, respectivamente. O sulfato não apresentou concentrações fora do padrão de potabilidade

(250 mg L<sup>-1</sup>). No entanto, o sódio apresentou valores acima do VMP de 200 mg L<sup>-1</sup> em cerca de 30% das amostras, tanto no período chuvoso quanto no período seco.

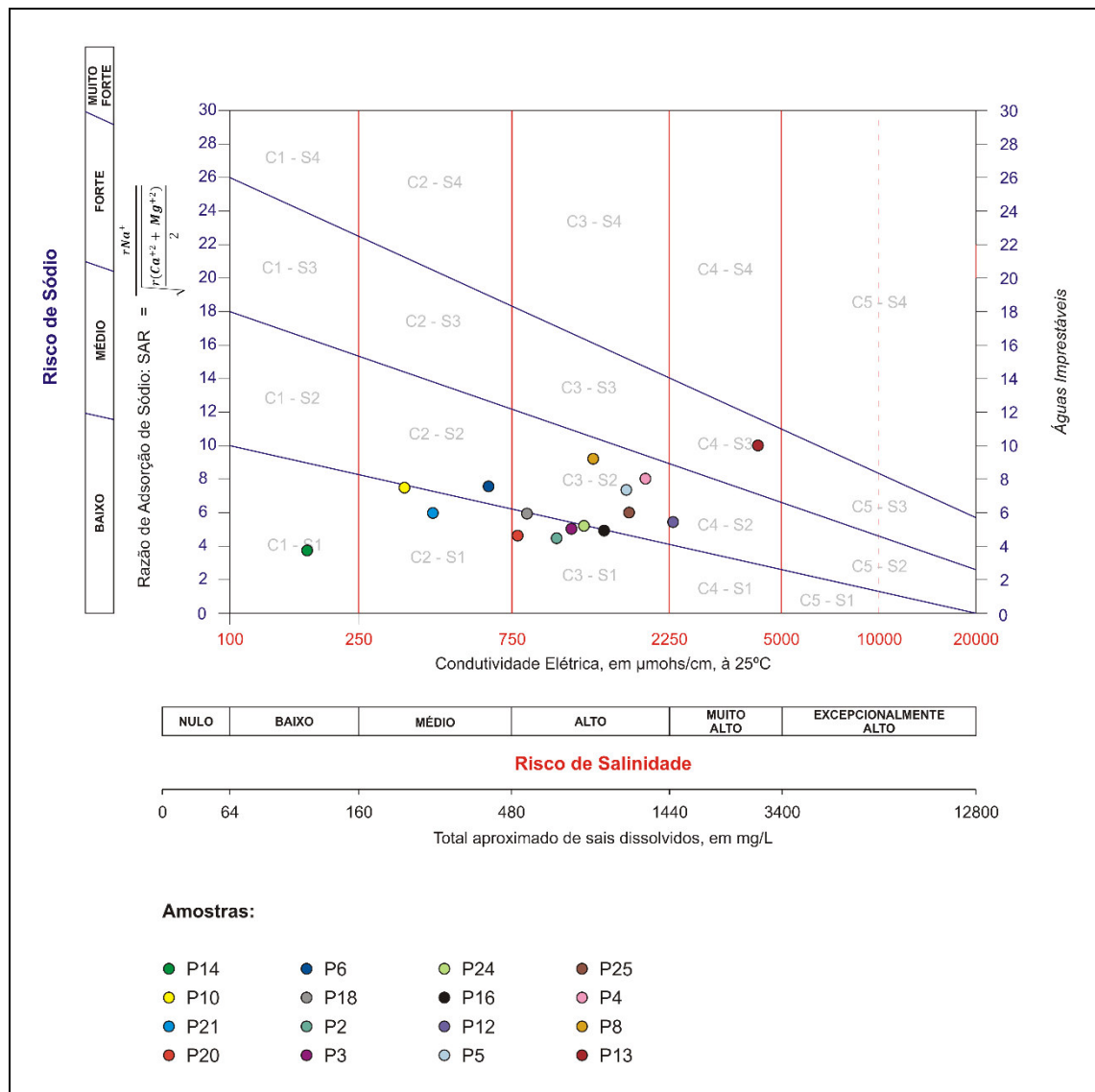
Segundo a organização mundial da saúde (WHO 2011), a presença de altos níveis de sólidos dissolvidos compromete a palatabilidade da água, conferindo sabor salgado, além de causar incrustação excessiva em tubulações de água, aquecedores, caldeiras e eletrodomésticos. A palatabilidade da água com um nível de STD inferior a cerca de 600 mg L<sup>-1</sup> é geralmente considerada boa. A água potável torna-se significativamente menos palatável com níveis superiores a 1000 mg L<sup>-1</sup>. Os limites de sabor para o ânion cloreto dependem do cátion associado e estão na faixa de 200 a 300 mg L<sup>-1</sup> para cloreto de sódio, potássio e cálcio. Concentrações acima de 250 mg L<sup>-1</sup> são cada vez mais prováveis de serem detectadas pelo paladar. A concentração limite de gosto para sódio na água depende do ânion associado e da temperatura da solução. À temperatura ambiente, o limiar de sabor médio para sódio é de cerca de 200 mg L<sup>-1</sup>.

Com base na classificação para uso na agricultura (irrigação), as águas subterrâneas apresentaram variações do período chuvoso (Figura 8) para o período seco (Figura 9).

As amostras coletadas durante o período chuvoso possuem risco de salinização variando de baixo a muito alto (classes C1, C2, C3 e C4), enquanto as coletadas no período seco possuem risco de salinização médio a muito alto (classes C2, C3 e C4). Apenas a amostra P14 apresenta modificação no risco de salinização, representado pela condutividade elétrica, de um período sazonal para o outro, com menor risco no período chuvoso do que no período seco. Isso se deve, possivelmente, ao mecanismo de diluição promovido pela recarga pluviométrica refletido pela diminuição da condutividade elétrica nessa amostra por se tratar de um poço raso associado a um ambiente arenoso com maior permeabilidade, tornando-o mais susceptível às alterações sazonais.

Segundo SANTOS (2008), a classe C1 corresponde às águas que podem ser utilizadas para a maioria das culturas, na maioria dos solos, com pequeno risco de incidentes quanto à salinização do solo, a classe C2 representa águas que podem ser utilizadas em solos de lixiviação moderada, como solos areno-argilosos, e não trazem risco para culturas de baixa tolerância salina, as águas pertencentes a classe C3 só são indicadas para solos bem drenados e apenas para os cultivos de alta tolerância salina e a classe C4 representa águas não indicadas para irrigação.

Figura 8 – Classificação das águas subterrâneas para uso na agricultura (período chuvoso)



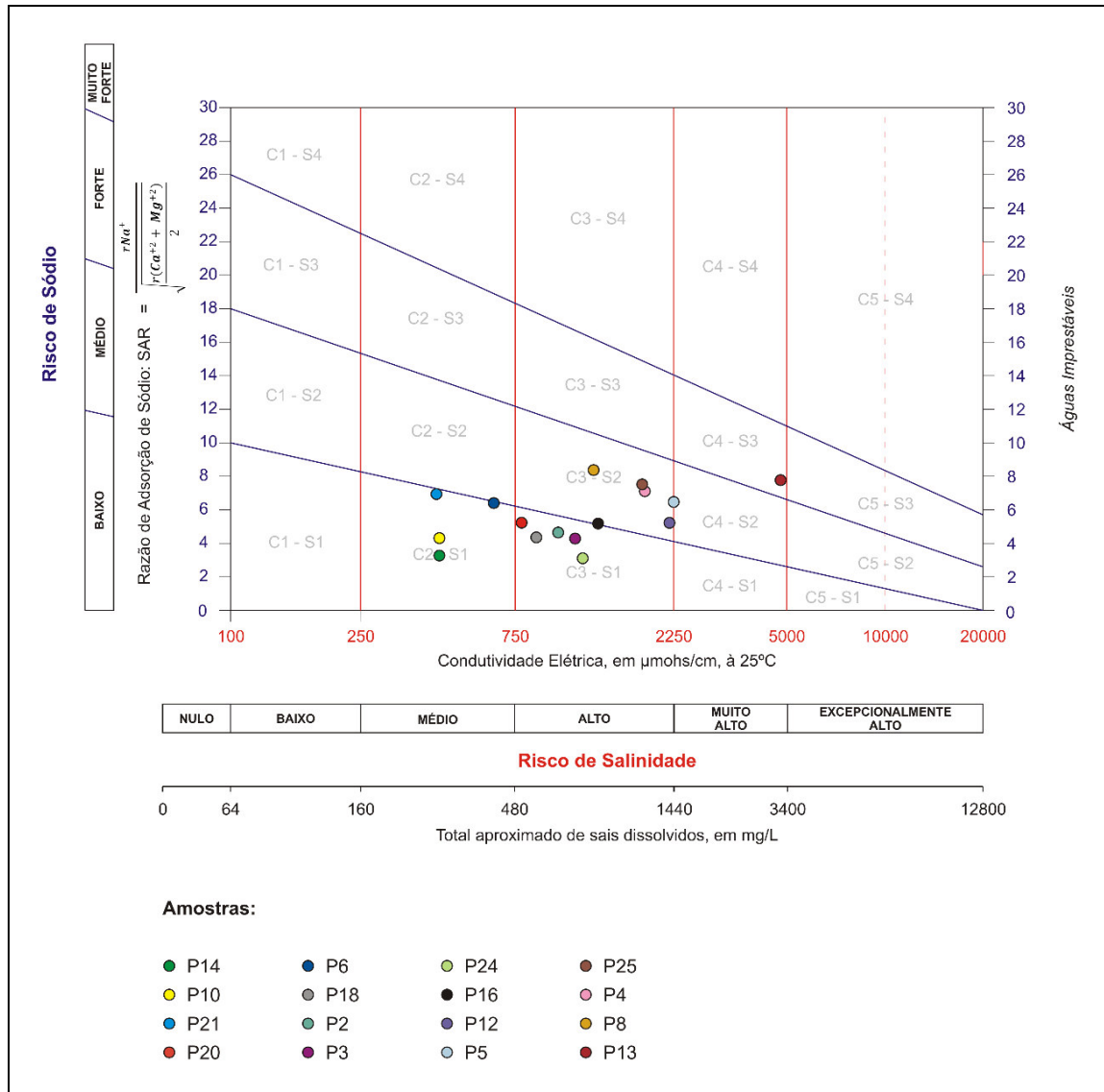
Fonte: Mobüs (2003).

Em relação ao risco de sodificação, as amostras coletadas em ambos os períodos sazonais estão distribuídas nas classes S1, S2 e S3, com risco variando de baixo a forte. Nota-se na que nas amostras P6, P18 e P24 o risco, representado pela razão de adsorção de sódio (RAS), é maior no período chuvoso do que no período seco. O aumento da RAS durante o período chuvoso pode estar associado à lixiviação do Na presente no solo oriundo dos aerossóis marinhos.

A classe S1 indica águas que podem ser utilizadas para a maioria dos solos e em quase todos os cultivos; as águas representadas pela classe S2 não são indicadas para solos de textura fina e forte capacidade de troca catiônica; enquanto as águas de classe S3 representam

alto risco de teores nocivos de sódio para a maioria dos solos, sendo indicadas apenas para cultivos com alta tolerância a esse elemento (SANTOS 2008).

Figura 9 – Classificação das águas subterrâneas para uso na agricultura (período seco)



Fonte: Mobüs (2003).

## 5 CONCLUSÕES

A aplicação da metodologia GALDIT identificou para o sistema aquífero costeiro de Icapuí regiões com vulnerabilidade média e alta à salinização por avanço da cunha salina. Esses dois níveis de vulnerabilidade foram individualizados com base na distância dos pontos

em relação à costa, altura do nível d'água acima do nível do mar e a razão  $rCl/rHCO_3^-$  que representa o impacto da intrusão marinha.

A salinização das águas subterrâneas indica influência marinha, comprometendo a qualidade para consumo humano em mais de 60% das amostras analisadas, e em cerca de 75% para uso na agricultura. Porém, provavelmente, está mais relacionada a uma contaminação oriunda dos aerossóis marinhos lixiviados do solo ou infiltração de água de lagoas costeiras do que por mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pela intrusão salina.

Entretanto, a vulnerabilidade média a alta do sistema aquífero Dunas/Barreiras na área requer maior atenção com o gerenciamento dos poços, tanto no que diz respeito aos aspectos qualitativos, quanto aos aspectos quantitativos, tendo em vista que modificações na demanda atual podem promover um desequilíbrio na exploração desse recurso, aumentando o risco do avanço da cunha salina em direção ao continente.

Dessa maneira, espera-se que as informações fornecidas neste estudo possam constituir em subsídios para gestão dos recursos hídricos, bem como para o desenvolvimento de políticas públicas direcionadas à preservação, visto a sua importância para a região, sob o risco do comprometimento da disponibilidade de água para fins de abastecimento em decorrência da contaminação por águas marinhas.

## 6 AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da Universidade Federal do Ceará, pelo apoio na realização das análises físico-químicas.

## REFERÊNCIAS

ALLER, L.; LEHR, J.H.; PETTY, R. **DRASTIC: A Standardized system of evaluating groundwater pollution potential using hidrogeologic settings**. United States: EPA, 1987.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA). **Standard Methods for Examination of Water and Wastewater**. Washington: D.C. 22 ed., 2012.

BRASIL. **Portaria nº 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, 29 p., 2021.

BRASIL. **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. Brasília, DF, 36p., 2005.

CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères dans l'intrusion d'eau de mer à l'aide de la méthode GALDIT. **Actes de l'atelier sur la modélisation en hydrogéologie**, Université Anna, Chennai, p. 143–156, 2001

CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P.; CHOUDRI, B.S. Intrusion in Coastal Aquifers Using GALDIT Model. APRH/CEAS, *In. Seminário Sobre Águas Subterrâneas*, Lisboa, 2003.

COSTA SOBRINHO, A.F.; CABRAL, J.J.S.P.; PAIVA, A.L.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do Aquífero Boa Viagem – Região Metropolitana do Recife. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 116-128, 2015.

CUSTÓDIO, E.; LLAMAS, M.R. **Hidrologia Subterránea**. 2º edição. Barcelona: Omega. Vol. 2., 1983.

FERRO, I.M.M. **Morfodinâmica e vulnerabilidade ambiental na região costeira de Icapuí, Ceará**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

GOMES, D.F.; FRISCHKORN, H.; FREIRE, J.S.S. Medidas de  $\delta^{18}\text{O}$  e hidroquímica de águas superficiais e subterrâneas no estudo da interação rio – aquífero, na região de Limoeiro do Norte – Baixo Jaguaribe – CE. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 21(1): 93-109, 2007.

HALLAL, D.D.; KHELFI, M.E.A.; ZAHOUANI, S.; BENAMGHAR, A.; HADDAD, O.; AMMARI, A.; LOBO-FERREIRA, J.P. Application of the GALDIT method combined with geostatistics at the Bouteldja aquifer (Algeria). **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], 78:22, 2019.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal**. Fortaleza: IPECE, 2021.

INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY (IAEA). **Statistical treatment of environmental isotope data in precipitation**. Vienna: IAEA. (Technical Reports Series, 206). 253p., 1981.

LOBO-FERREIRA, J.P. AND CABRAL, M. **Proposal for an Operational Definition of Vulnerability from the European Community's Atlas of Groundwater Resources**. *In. the Meeting of the European Institute for Water, Groundwater Work Group* Brussels, 1991.

MAIA, S.R.R. **Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - CE**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MELO, J.G. **Avaliação de riscos de contaminação e proteção das águas subterrâneas – Zona Norte de Natal, RN**. Relatório Interno. Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN)/Divisão de Hidrogeologia, Natal, 1998.

MOBÜS, G. **Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Fortaleza, 2003.

RECINOS, N; KALLIORAS, A; PLIAKAS, F; SCHUTH, C. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 73, p. 1017–1032, 2015.

SALATI, E.; GUSMÃO, G.A.; MATSUI, E.; CERVELLINI, A. **Estudo preliminar das concentrações de  $^{18}\text{O}$  e D em águas do nordeste brasileiro**. Boletim Científico. Centro de Energia Nuclear na Agricultura USP-CNEN. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz. Piracicaba, São Paulo, 1971.

SANTOS, A.C. Noções de Hidroquímica. *In*: FEITOSA, F. A. C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E. C.; DEMETRIO, J. G. A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM. cap. 05. p. 325-357, 2008.

SAVARIYA, P.; BHATT, N. Assessing Groundwater Vulnerability to Seawater Intrusion in Morbi-Maliya Using GALDIT Method. **International Journal for Scientific Research & Development**, [s. l.], v. 2, n. 4, 2014.

SILVA, B.T.A.; GOMES, C.C. **Intrusão marinha em poços de exploração de água subterrânea, na Beira-mar de Fortaleza – Ceará**. *In*: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 17, São Paulo, 2007.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS). **Banco de dados de poços do Ceará**. Disponível em <https://siagasweb.sgb.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SOUSA, D.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

VASCONCELOS, M.B.; MELO, J.G.; DEMÉTRIO, J.G.A. Configuração hidrogeológica do sistema aquífero Dunas/Barreiras na zona norte de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. **Ciências Naturais**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 145-158, 2015.

WORLD HEALTH ORGANIZATION. **Guidelines for drinking-water Quality**. Genebra, 564 p., 2011.



## 5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A análise do comportamento hidrogeoquímico no município de Icapuí permitiu identificar os processos geoquímicos que controlam as características químicas das águas subterrâneas a partir da aplicação de análise estatística multivariada, modelagem hidrogeoquímica e a avaliação da influência marinha.

A análise estatística multivariada permitiu a seleção das variáveis de maior significância na composição das águas subterrâneas da área. As variações composicionais foram representadas por duas componentes, uma associada a processos de mineralização, controlada pela condutividade elétrica, cloreto, cálcio, magnésio, dureza total, sulfato, potássio, brometo e sólidos totais dissolvidos, e uma relacionada a sazonalidade e poluição das águas, controlada pelo pH, bicarbonato, alcalinidade total e nitrato.

A região de Icapuí apresenta alternância de períodos secos e chuvosos bem diferenciados, o que influencia diretamente na dinâmica de recarga dos aquíferos, podendo promover alterações nas características químicas das águas subterrâneas de um período para o outro. A partir do cálculo do balanço hidroclimatológico foi possível identificar que nos meses de março e abril a precipitação pluviométrica é superior a evapotranspiração real, promovendo a infiltração de cerca de 11% da chuva média anual, favorecendo a recarga dos aquíferos. Enquanto que nos meses de junho a dezembro ocorrem as menores precipitações pluviométricas, igualando a evapotranspiração real à precipitação total, o que resulta em uma situação de deficiência hídrica e ausência de infiltração para os aquíferos.

As águas subterrâneas são, predominantemente, do tipo cloretadas sódicas e apresentam tendência neutra a levemente ácida, tanto no período chuvoso quanto no período seco. As características de potabilidade mostraram-se fora dos padrões recomendados em ambos os períodos sazonais para as concentrações de sólidos totais dissolvidos, cloreto, dureza total, sódio, nitrato, bário e chumbo. O sulfato apresentou concentração fora do padrão de potabilidade apenas no período chuvoso, enquanto que o ferro total e a turbidez apresentaram concentrações acima dos padrões recomendados durante o período seco.

As características hidroquímicas observadas são decorrentes dos processos geoquímicos atuantes na área, principalmente, o intemperismo promovido pelas interações entre as águas subterrâneas e os minerais que compõem os aquíferos percolados.

A modelagem hidrogeoquímica indicou condição de supersaturação para o quartzo, a goethita e a hematita, e de subsaturação para caulinita, muscovita, illita e calcita. A predominância na condição de supersaturação, com tendência à precipitação, para o óxi-

hidróxido e óxido de ferro justifica as baixas concentrações desse elemento encontradas nas amostras analisadas, bem como, as altas concentrações de sólidos dissolvidos, incluindo sílica, potássio e cálcio, estão associadas à condição de subsaturação, com tendência à dissolução, observada para os aluminossilicatos e a fase carbonática, representada pela calcita. As concentrações de cloreto, sódio e sulfato estão associadas, principalmente, aos aerossóis marinhos e as concentrações acima dos padrões encontradas para o nitrato indicam contaminação por atividades antrópicas.

A modelagem hidrogeoquímica permitiu identificar que as características químicas das águas subterrâneas na área são controladas, principalmente, pelo intemperismo dos silicatos e a dissolução dos carbonatos, com contribuição das atividades antrópicas e influência marinha.

A aplicação da metodologia GALDIT identificou para o sistema aquífero costeiro Dunas/Barreiras regiões com vulnerabilidade média e alta à salinização por avanço da cunha salina. Esses dois níveis de vulnerabilidade foram individualizados com base na distância dos pontos em relação à costa, altura do nível d'água acima do nível do mar e a razão  $rCl^-/rHCO_3^-$  que representa o impacto da intrusão marinha.

A salinização das águas subterrâneas indica influência marinha, comprometendo a qualidade para consumo humano em mais de 60% das amostras analisadas, e em cerca de 75% para uso na agricultura. Porém, provavelmente, está mais relacionada a uma contaminação oriunda dos aerossóis marinhos lixiviados do solo ou infiltração de águas de lagoas costeiras do que por mistura de águas subterrâneas marinhas e continentais promovida pela intrusão salina.

Diante do exposto, conclui-se, portanto, que a combinação das abordagens descritas acima contribuiu para a melhor compreensão do comportamento geoquímico das águas subterrâneas, demonstrando que os processos hidrogeoquímicos identificados são compatíveis com as características hidroquímicas identificadas.

Observa-se que os parâmetros de maior significância identificados por meio da análise estatística multivariada são aqueles oriundos dos minerais que estão sob tendência de dissolução, sendo assim adicionados à solução, de acordo com a modelagem hidrogeoquímica. Enquanto que os parâmetros de menor significância estão associados aos minerais sob tendência de precipitação, sendo consequentemente retirados da solução aquosa. Para os parâmetros significativos não correlacionados ao arcabouço geológico da área, a avaliação da influência marinha por meio da análise da vulnerabilidade à salinização por intrusão salina permitiu atribuir sua origem aos aerossóis marinhos.

Nos últimos anos, é notável o crescimento do turismo na região, tornando necessário o planejamento adequado das atividades relacionadas, visando evitar danos ambientais, sociais e econômicos. Nesse sentido, recomenda-se o melhoramento do saneamento básico existente, com a implantação de rede de esgotamento sanitário, e da coleta e disposição de resíduos sólidos. Recomenda-se também, que a exploração dos aquíferos seja realizada de maneira sustentável, especialmente em áreas de alta vulnerabilidade à salinização, visando evitar uma possível contaminação das águas por intrusão marinha. Recomenda-se ainda, o monitoramento regular dos constituintes químicos das águas subterrâneas para identificar possíveis alterações qualitativas que possam vir à comprometer a disponibilidade de água para fins de abastecimento.

## REFERÊNCIAS

- ADO, M, ADEYEYE, O, XIAO, C, LIANG, X. Hydrogeochemistry of Groundwater from Kazaure Area, NW Nigeria using Multivariate Statistics, **E3S Web of Conferences** **98**, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199807001>. Acesso em: 2 out. 2019.
- APPELO, C.A.J.; POSTMA, D. **Geochemistry, groundwater and pollution**. Leiden: A.A. Balkema. 558 p., 2005.
- BERTOSSI, APA, MENEZES, JPC, CECÍLIO, RA, GARCIA, GO, NEVES, MA. Seleção e agrupamento de indicadores da qualidade de águas utilizando Estatística Multivariada. **Semina: Ciências Agrárias**, [s. l.], v. 34, n. 5, p. 2025-2036, 2013.
- BRAGA JUNIOR, M.G.; MELO, J.G.; DINIZ FILHO, J.B. Comportamento hidrodinâmico e hidroquímico do sistema aquífero Barreiras-Jandaíra-Açu na área da Fazenda Belém, oeste da bacia potiguar, CE. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 31, n. 3, p. 222-242, 2017.
- BRASIL. **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. Brasília, DF, 36p., 2005.
- BRASIL. **Portaria n° 888 de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde**. Dispõe sobre os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília, DF, 29 p., 2021.
- CASTANY, G. **Prospecção e Exploração de Águas Subterrâneas**. Editora Omega S. A. Barcelona. Espanha. 738pp, 1975.
- CAVALCANTE, I.N.; PAIVA, M.H.A.; TEIXEIRA, F.J.; BIANCHI, L. Aspectos hidroquímicos das águas subterrâneas da região costeira de Icapuí - Ceará. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], 1994. Recuperado de <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/24352>, 1994.
- CESAR, R.; COLONESE, J.; SILVA, M.; EGLER, S.; BIDONE, E.; CASTILHOS, Z.; POLIVANOV, H. Distribuição de mercúrio, cobre, chumbo, zinco e níquel em sedimentos de corrente da bacia do rio Piabanha, Estado do Rio de Janeiro. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 25, n. 1, p. 35–45, 2011.
- CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P. Cartographie de la vulnérabilité des aquifères dans l'intrusion d'eau de mer à l'aide de la méthode GALDIT. **Actes de l'atelier sur la modélisation en hydrogéologie**, Université Anna, Chennai, p. 143–156, 2001.
- CHACHADI, A.G.; LOBO-FERREIRA, J.P.; CHOUDRI, B.S. Intrusion in Coastal Aquifers Using GALDIT Model. APRH/CEAS, *In*. **Seminário Sobre Águas Subterrâneas**, Lisboa, 2003.
- COSTA SOBRINHO, A.F.; CABRAL, J.J.S.P.; PAIVA, A.L.R.; MONTENEGRO, S.M.G.L. Uso do índice GALDIT para avaliação da vulnerabilidade à salinização do Aquífero Boa Viagem – Região Metropolitana do Recife. **Águas Subterrâneas**, [s. l.], v. 29, n. 1, p. 116-

128, 2015.

FERRO, I.M.M. **Morfodinâmica e vulnerabilidade ambiental na região costeira de Icapuí, Ceará**. 2018. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) – Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2018.

FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS. **Postos Pluviométricos**. Fortaleza: FUNCEME, 2023.

GARRELS, R.M. AND CHRIST, C.L. **Solutions, Minerals and Equilibria**. W. H. Freeman, San Francisco, 450 p., 1965.

GIBBS, R. J. Mechanisms controlling World Water Chemistry. **Science**, [s. l.], v. 170, n. 3962, p. 1088-1090, 1970.

GOMES, M.C.R.; MELO, D.H.C.T.B.; COSTA, M.S.; ANJOS, J.A.S.A.; TRINTA, M.M.A.; CAVALCANTE, I.N. Análise geoquímica das águas subterrâneas no município de Boquira, no semiárido baiano – Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 35, n. 1, p. 7-16, 2021.

GOMES, MCR, ANJOS, JASA, DALTRO, RR. Multivariate statistical analysis applied to the evaluation of groundwater quality in the central-southern portion of the state of Bahia – Brazil. **Revista Ambiente & Água**, [s. l.], v. 15, n. 1, 2020.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2022.

INSTITUTO DE PESQUISA E ESTRATÉGIA ECONÔMICA DO CEARÁ. **Perfil Básico Municipal**. Fortaleza: IPECE, 2021.

LABORATÓRIO DE CLIMATOLOGIA GEOGRÁFICA E RECURSOS HÍDRICOS (LCGRH). **Celina: Planilha de cálculo**, versão 1,0. Departamento de Geografia, Centro de Ciências, Fortaleza, 2023.

MAIA, S.R.R. **Estudo hidroquímico-ambiental do aquífero costeiro do município de Icapuí - CE**. 2018. 109 f. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2018.

MENTE, A.A. Água Subterrânea no Brasil. *In*: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. p. 31-48.

MESTRINHO, S.S.P. Fundamentos de Hidrogeoquímica. *In*: DELGADO, C.D; ALBERICH, M.V.E.; LÓPEZ-VERA, F. **Recursos Hídricos: Conceptos básicos y estudios de caso en Iberoamérica**. 2. ed. Montevideo: Piriguazú Ediciones, 2006. p. IV33-IV46.

MESTRINHO, S.S.P. Geoquímica das Águas Subterrâneas. *In*: FEITOSA, F.A.C.; MANOEL FILHO, J.; FEITOSA, E.C.; DEMETRIO, J.G.A. (Org.). **Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações**. 3. ed. revisada e ampliada. Rio de Janeiro: CPRM e LABHID, 2008. p. 359-379.

MOBÜS, G. **Qualigraf: software para interpretação de análises físico-químicas, versão Beta**. Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME). Fortaleza, 2003.

MORAIS, F.; MELO, J.G. DE; MEDEIROS, J.I. DE; SRIVASTAVA, N.K.; DINIZ FILHO, J.B.; LOPES, V.L.; OLIVEIRA, J.A. DE; VASCONCELOS, M.B. **Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste brasileiro**. Avaliação do aquífero Açú na borda sul da bacia Potiguar – Trecho: Upanema-Afonso Bezerra. Recife: CPRM/FINEP, 82 p., 2005.

NASCIMENTO, S.A.M.; GOMES, M.C.R.; RIBEIRO, R.S. Caracterização hidrogeoquímica do aquífero fissural no município de Uauá, Bahia – Brasil. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 34, n. 2, p. 195-202, 2020.

PARKHURST, D.L.; APPELO, C.A.J. **Description of input and examples for PHREEQC (version 3). A computer program for speciation, batch-reaction, one-dimensional transport, and inverse geochemical calculations**. U.S. Geological Survey Techniques and Methods, book 6, chap. A43, 497p., 2013.

RECINOS, N; KALLIORAS, A; PLIAKAS, F; SCHUTH, C. Application of GALDIT index to assess the intrinsic vulnerability to seawater intrusion of coastal granular aquifers. **Environmental Earth Sciences**, [s. l.], v. 73, p. 1017–1032, 2015.

SAVARIYA, P.; BHATT, N. Assessing Groundwater Vulnerability to Seawater Intrusion in Morbi-Maliya Using GALDIT Method. **International Journal for Scientific Research & Development**, [s. l.], v. 2, n. 4, 2014.

SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (SGB). **Mapa Geodiversidade do Estado do Ceará, escala 1:750.000**. 2014. Disponível em: <https://rigeo.sgb.gov.br/handle/doc/14692>. Acesso em 10 mai. 2021.

SISTEMA DE INFORMAÇÕES DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS (SIAGAS). **Banco de dados de poços do Ceará**. Disponível em <https://siagasweb.sgb.gov.br>. Acesso em: 17 jun. 2021.

SOARES, U. M.; ROSSETTI, E. L.; CASSAB, R. C. T. Bacias sedimentares brasileiras: Bacia Potiguar. **Fundação Paleontológica Phoenix**, Aracaju, v. 56, p.1-10, 2003.

SOUSA, D.C. **Litoestratigrafia e deformação Cenozóica na região de Icapuí, Ceará, e implicações para a estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar (NE do Brasil)**. 2002. 222 f. Tese (Doutorado em Geodinâmica) – Centro de Ciência Exatas e da Terra, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.

THORNTHWAITE, C,W,; MATHER, J,R, **The water balance**, Publications in Climatology, New Jersey: Drexel Institute of Technology, 104p, 1955.

VASCONCELOS, M.B.; MELO, J.G.; DEMÉTRIO, J.G.A. Configuração hidrogeológica do sistema aquífero Dunas/Barreiras na zona norte de Natal, Rio Grande do Norte, Brasil. **Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi. Ciências Naturais**, [s. l.], v. 10, n. 1, p. 145-158, 2015.

VASCONCELOS, S.M.S.; TEIXEIRA, Z.A.; ALVES NETO, J. Caracterização do aquífero Jandaíra, porção situada no estado do Ceará, Brasil. **Revista de Geologia**, Fortaleza, vol. 23, n. 1, p. 50-60, 2010.

VENÂNCIO, L.O.; GOMES, D.F.; FREIRE, G.S.S.; LIMA NETO, I.O. Monitoramento da qualidade e hidrogeoquímica das águas subterrâneas do setor noroeste da região metropolitana de Fortaleza, CE. **Geochimica Brasiliensis**, Ouro Preto, v. 34, n. 2, p. 138-160, 2020.

**APÊNDICE A – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO CHUVOSO (FEVEREIRO/2019)**

Amostra	pH	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Bicarbonato (mg HCO <sub>3</sub> -/L)	Carbonato (mg CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /L)	Alcalinidade Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Cloreto (mg Cl-/L)	Cálcio (mg Ca <sup>2+</sup> /L)	Magnésio (mg Mg <sup>2+</sup> /L)	Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L)	Sódio (mg Na <sup>+</sup> /L)	Potássio (mg K <sup>+</sup> /L)	Sílica (mg SiO <sub>2</sub> /L)	Nitrato (mg N-NO <sub>3</sub> -/L)	Nitrito (mg N-NO <sub>2</sub> -/L)	Nitrogênio Amoniacal Total (mg N-NH <sub>3,4</sub> /L)	Ferro Total (mg Fe/L)	Fluoreto (mg F-/L)	Brometo (mg/L Br-)	Turbidez (UNT)	Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)
P1	5,57	1.657,0	22,2	0,0	18,2	447,9	27,2	24,0	168	0,6	203,8	28,8	14,8	14,4	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,0	2,3	833
P2	7,27	1.089,0	214,4	0,0	175,7	175,9	41,6	19,2	184	56,5	152,3	12,0	24,4	5,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,6	0,9	2,7	718
P3	6,21	1.183,0	41,9	0,0	34,3	267,9	28,8	25,0	176	51,6	160,2	20,4	21,3	4,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,9	1,8	636
P4	7,21	2.006,0	354,9	0,0	290,9	331,9	49,6	30,7	252	29,4	289,4	18,5	22,6	3,8	<0,001	<0,01	<0,1	0,4	1,7	2,3	1.144
P5	7,57	1.817,0	140,5	0,0	115,1	423,9	46,4	27,8	232	41,4	249,8	18,5	29,0	4,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,4	1,3	1,9	996
P6	6,73	644,1	17,3	0,0	14,1	120,0	4,0	5,8	34	48,1	99,9	11,6	18,6	6,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,4	0,6	1,8	355
P7	5,88	649,9	44,4	0,0	36,4	134,0	16,0	9,1	78	37,9	94,0	10,2	19,8	4,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,7	2,9	386
P8	5,21	1.373,0	17,3	0,0	14,1	319,9	11,2	18,2	104	57,6	211,7	20,4	26,6	7,6	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,1	2,0	716
P9	8,17	721,3	216,9	12,1	198,0	102,0	4,0	1,4	16	0,9	160,2	9,2	13,7	0,4	<0,001	<0,01	0,11	0,4	0,9	2,3	510
P10	5,28	362,0	9,9	0,0	8,1	50,0	2,4	1,9	14	34,1	64,2	8,8	22,3	2,2	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,4	2,1	203
P11	7,00	3.055,0	244,0	0,0	200,0	789,8	212,0	72,0	830	34,5	262,0	14,8	13,5	12,4	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	2,4	1,9	1.697
P12	7,05	2.323,0	234,1	0,0	191,9	539,8	59,2	68,2	432	50,3	259,7	25,5	20,8	10,1	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	2,0	2,8	1.302
P13	7,11	4.491,0	295,7	0,0	242,4	1.189,6	152,0	91,2	760	201,4	630,5	26,0	21,8	5,1	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	4,7	1,9	2.631
P14	5,19	186,7	4,9	0,0	4,0	30,0	1,6	3,8	20	3,0	23,2	8,6	26,4	4,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,4	3,4	122
P15	7,05	579,1	98,6	0,0	80,8	84,0	23,2	10,1	100	32,1	66,1	11,6	19,3	6,9	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,6	3,5	375
P16	7,02	1.414,0	207,0	0,0	169,7	275,9	52,8	31,7	264	47,2	190,4	22,0	34,4	5,2	<0,001	<0,01	<0,1	0,4	1,1	2,7	884
P17	7,05	1.805,0	231,7	0,0	189,9	383,9	81,6	27,8	320	51,2	225,0	25,5	33,2	5,8	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,8	2,5	1.085
P18	5,95	860,0	44,4	0,0	36,4	185,9	16,0	12,5	92	52,3	132,5	20,4	40,8	6,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,4	0,6	3,1	533
P19	5,97	1.160,0	49,3	0,0	40,4	255,9	25,6	16,3	132	44,3	164,2	17,6	43,5	8,9	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,1	2,8	656
P20	5,29	780,9	12,3	0,0	10,1	138,0	7,2	13,0	72	64,8	100,2	16,0	19,7	9,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,6	2,0	411
P21	5,31	446,3	12,3	0,0	10,1	78,0	3,2	4,3	26	47,8	69,0	10,0	22,7	4,8	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,5	2,7	268
P22	8,18	559,7	229,2	7,3	200,0	46,0	2,4	1,0	10	4,9	132,3	2,8	14,2	0,2	<0,001	<0,01	<0,1	0,5	0,5	2,7	434
P23	7,51	3.290,0	239,0	0,0	195,9	819,7	76,0	93,6	580	288,5	421,0	36,9	10,8	0,1	<0,001	0,34	0,12	1,0	1,6	3,1	1.986
P24	6,96	1.285,0	130,6	0,0	107,1	267,9	48,0	21,1	208	37,5	175,5	22,0	26,2	9,6	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	1,1	1,8	771
P25	7,17	1.868,0	253,8	0,0	208,1	363,9	56,0	25,9	248	114,7	215,7	22,0	25,1	5,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	2,2	2,9	1.100



**APÊNDICE B – PARÂMETROS FÍSICO-QUÍMICOS ANALISADOS NAS AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO SECO (AGOSTO/2019)**

Amostra	pH	Condutividade Elétrica (µS/cm)	Bicarbonato (mg HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L)	Carbonato (mg CO <sub>3</sub> <sup>2-</sup> /L)	Alcalinidade Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Cloreto (mg Cl <sup>-</sup> /L)	Cálcio (mg Ca <sup>2+</sup> /L)	Magnésio (mg Mg <sup>2+</sup> /L)	Dureza Total (mg CaCO <sub>3</sub> /L)	Sulfato (mg SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> /L)	Sódio (mg Na <sup>+</sup> /L)	Potássio (mg K <sup>+</sup> /L)	Sílica (mg SiO <sub>2</sub> /L)	Nitrato (mg N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> /L)	Nitrito (mg N-NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> /L)	Nitrogênio Amoniacal Total (mg N-NH <sub>3,4</sub> /L)	Ferro Total (mg Fe/L)	Fluoreto (mg F <sup>-</sup> /L)	Brometo (mg/L Br <sup>-</sup> )	Turbidez (UNT)	Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)
P1	5,28	1.654,0	19,7	0,0	16,2	439,9	25,6	25,0	168	1,1	194,7	28,5	15,1	12,4	<0,001	<0,01	0,3	0,3	1,9	1,1	804
P2	7,28	1.087,0	197,2	0,0	161,6	169,9	39,2	16,8	168	64,1	148,0	14,1	25,3	7,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	1,0	0,3	707
P3	6,20	1.190,0	41,9	0,0	34,3	267,9	28,8	25,4	178	69,5	140,8	20,3	21,6	3,6	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,7	0,6	632
P4	7,12	2.012,0	362,3	0,0	296,9	323,9	48,0	29,8	244	154,0	254,6	18,2	23,0	3,8	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	2,4	0,5	1.231
P5	7,32	2.280,0	142,9	0,0	117,2	559,8	59,2	37,4	304	84,3	254,6	21,3	32,0	4,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	3,3	1,6	1.212
P6	5,84	640,0	14,8	0,0	12,1	120,0	4,0	5,8	34	49,4	86,1	15,1	18,3	6,4	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,6	1,7	342
P7	5,79	649,3	46,8	0,0	38,4	126,0	16,0	8,6	76	36,3	79,4	14,1	19,8	4,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,3	0,8	368
P8	5,17	1.354,0	17,3	0,0	14,1	317,9	12,0	16,8	100	65,6	187,2	24,4	28,7	7,1	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,5	0,2	701
P9	8,12	732,4	219,3	12,1	200,0	102,0	4,0	1,4	16	0,9	167,1	4,3	15,2	<0,1	<0,001	<0,01	0,6	0,7	0,9	8,3	514
P10	5,28	453,8	12,3	0,0	10,1	62,0	5,6	5,8	38	47,7	49,8	10,0	26,1	6,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,3	0,7	249
P11	7,02	4.105,0	266,2	0,0	218,2	1.089,7	264,0	81,6	1.000	59,7	374,5	10,0	14,8	15,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	5,0	0,2	2.227
P12	6,90	2.205,0	214,4	0,0	175,7	487,8	99,2	30,7	376	62,0	232,1	24,4	24,7	10,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	2,5	0,9	1.222
P13	6,77	4.788,0	293,3	0,0	240,4	1.279,6	164,0	98,4	820	109,4	520,4	26,4	24,2	5,1	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	6,2	1,6	2.538
P14	4,47	458,2	4,9	0,0	4,0	78,0	5,6	12,5	66	0,4	41,9	17,1	25,8	14,3	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	<0,01	0,6	249
P15	5,31	847,5	12,3	0,0	10,1	154,0	24,0	25,0	164	56,2	83,8	21,1	16,7	21,4	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	0,6	0,4	487
P16	6,86	1.351,0	199,6	0,0	163,6	261,9	61,6	21,6	244	56,8	183,2	16,2	16,5	7,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	1,5	0,6	848
P17	6,84	1.772,0	239,0	0,0	195,9	367,9	81,6	27,8	320	60,5	214,5	20,1	16,1	5,5	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	2,4	0,5	1.051
P18	5,53	878,0	44,4	0,0	36,4	185,9	16,8	13,0	96	33,0	109,8	16,2	19,7	7,6	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,2	0,7	472
P19	5,57	911,9	37,0	0,0	30,3	187,9	13,6	11,5	82	41,8	120,3	15,2	19,0	10,5	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,8	0,4	493
P20	5,15	786,0	12,3	0,0	10,1	136,0	8,0	12,5	72	75,8	109,8	15,2	20,0	10,9	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	0,5	0,6	438
P21	5,07	450,2	7,4	0,0	6,1	76,0	4,0	3,4	24	41,3	78,6	9,3	23,4	4,5	<0,001	<0,01	<0,1	0,1	0,3	0,6	263
P22	7,95	570,0	224,3	12,1	204,0	46,0	3,2	1,0	12	3,6	117,6	2,4	14,5	0,1	<0,001	<0,01	<0,1	0,5	<0,01	0,3	413
P23	7,30	4.245,0	261,2	0,0	214,1	1.109,7	88,0	108,0	670	224,1	588,2	27,0	12,2	<0,1	<0,001	0,8	0,3	1,0	3,0	0,8	2.418
P24	6,73	1.269,0	54,2	0,0	44,4	295,9	38,4	33,1	234	33,3	122,9	22,1	28,0	10,0	<0,001	<0,01	<0,1	0,3	1,5	0,6	672
P25	7,02	1.962,0	253,8	0,0	208,1	399,9	65,6	24,0	264	84,7	274,6	16,2	15,2	6,7	<0,001	<0,01	<0,1	0,2	2,0	0,8	1.163

**APÊNDICE C – METAIS TRAÇO E FÓSFORO DISSOLVIDO ANALISADOS NAS  
AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO  
CHUVOSO (FEVEREIRO/2019)**

<b>Amostra</b>	<b>Al (mg/L)</b>	<b>Ba (mg/L)</b>	<b>Cu (mg/L)</b>	<b>Fe (mg/L)</b>	<b>Mn (mg/L)</b>	<b>Ni (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>	<b>Pb (mg/L)</b>	<b>Zn (mg/L)</b>
P1	<0,01	0,8579	0,0176	0,017	0,0358	0,0054	0,0027	0,0055	0,0802
P2	<0,01	0,0854	0,0032	0,001	<0,0005	<0,0005	0,0060	0,0062	0,0039
P3	<0,01	0,1056	0,0024	0,006	0,0207	<0,0005	0,0036	0,0052	0,0023
P4	<0,01	0,0516	0,0019	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0034	0,0058	0,0014
P5	<0,01	0,0765	0,0016	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0062	0,0084	<0,0005
P6	<0,01	0,0565	0,0012	<0,001	0,0120	<0,0005	<0,0005	0,0056	<0,0005
P7	<0,01	0,0910	0,0061	0,002	<0,0005	0,0048	0,0005	<0,0005	0,0025
P8	<0,01	0,0573	0,0031	<0,001	0,0821	0,0068	0,0018	<0,0005	0,0029
P9	<0,01	0,0890	0,0007	0,027	0,0013	<0,0005	0,0025	0,0045	0,0010
P10	<0,01	0,0464	0,0011	0,011	0,0047	<0,0005	0,0012	0,0073	0,0164
P11	<0,01	0,3222	0,0058	0,001	<0,0005	<0,0005	0,0023	0,0024	<0,0005
P12	<0,01	0,1944	0,0031	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0087	0,0059	<0,0005
P13	<0,01	0,0804	0,0037	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0110	0,0055	<0,0005
P14	<0,01	0,2497	0,0015	0,005	0,0031	<0,0005	0,0030	0,0118	<0,0005
P15	<0,01	0,1659	0,0013	<0,001	0,0024	<0,0005	0,0111	0,0120	0,0006
P16	<0,01	0,0787	0,0025	0,002	0,0008	<0,0005	0,0162	0,0095	<0,0005
P17	<0,01	0,0695	0,0029	<0,001	0,0010	<0,0005	0,0147	0,0090	<0,0005
P18	<0,01	0,0740	0,0017	<0,001	0,0007	<0,0005	0,0020	0,0128	<0,0005
P19	0,03	0,0805	0,0025	0,008	0,0012	<0,0005	0,0024	0,0140	0,0051
P20	<0,01	0,0501	0,0107	0,001	0,0270	<0,0005	0,0019	0,0058	0,0045
P21	<0,01	0,0642	0,0154	<0,001	0,0083	<0,0005	0,0009	0,0088	0,0164
P22	<0,01	0,0576	0,0010	<0,001	0,0006	<0,0005	0,0012	0,0040	<0,0005
P23	0,05	0,0038	0,0023	0,115	0,0046	0,0027	0,0462	0,0026	<0,0005
P24	<0,01	0,1777	0,0027	<0,001	0,0017	<0,0005	0,0036	0,0083	<0,0005
P25	<0,01	0,0704	0,0022	<0,001	0,0013	<0,0005	0,0086	0,0074	<0,0005

**APÊNDICE D – METAIS TRAÇO E FÓSFORO DISSOLVIDO ANALISADOS NAS  
AMOSTRAS DE ÁGUAS SUBTERRÂNEAS COLETADAS DURANTE O PERÍODO  
SECO (AGOSTO/2019)**

<b>Amostra</b>	<b>Al (mg/L)</b>	<b>Ba (mg/L)</b>	<b>Cu (mg/L)</b>	<b>Fe (mg/L)</b>	<b>Mn (mg/L)</b>	<b>Ni (mg/L)</b>	<b>P (mg/L)</b>	<b>Pb (mg/L)</b>	<b>Zn (mg/L)</b>
P1	<0,01	0,7414	0,0022	0,012	0,0324	0,0032	0,0017	0,0027	0,0077
P2	<0,01	0,0744	0,0022	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0068	0,0055	0,0023
P3	<0,01	0,3718	0,0018	0,002	0,0249	<0,0005	0,0029	0,0055	<0,0005
P4	<0,01	0,0493	0,0018	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0023	0,0055	0,0041
P5	<0,01	0,0828	0,0019	0,002	<0,0005	<0,0005	0,0056	0,0072	0,0067
P6	<0,01	0,0577	0,0014	<0,001	0,0099	<0,0005	<0,0005	0,0049	0,0015
P7	<0,01	0,0901	0,0042	0,003	0,0006	0,0041	0,0013	<0,0005	0,0018
P8	0,01	0,0656	0,0045	0,014	0,0787	0,0078	0,0010	0,0021	0,0235
P9	<0,01	0,0992	0,0025	0,135	0,0118	<0,0005	0,0204	0,0049	0,0692
P10	0,01	0,0617	0,0014	0,011	0,0098	<0,0005	0,0026	0,0079	0,0058
P11	<0,01	0,1709	0,0053	<0,001	<0,0005	<0,0005	0,0025	0,0025	<0,0005
P12	<0,01	0,1602	0,0028	0,002	0,0012	<0,0005	0,0136	0,0061	0,0014
P13	<0,01	0,0858	0,0054	0,002	0,0006	0,0007	0,0128	0,0057	0,0006
P14	0,01	0,9219	0,0011	0,025	0,0106	<0,0005	0,0032	0,0223	0,0018
P15	0,08	0,1832	0,0012	0,006	0,0162	0,0017	0,2095	0,0231	0,0014
P16	<0,01	0,0804	0,0020	0,002	0,0010	<0,0005	0,0170	0,0092	0,0038
P17	<0,01	0,0693	0,0026	0,001	0,0010	<0,0005	0,0180	0,0090	0,0008
P18	<0,01	0,0859	0,0009	0,002	0,0008	<0,0005	0,0025	0,0123	0,0008
P19	<0,01	0,0725	0,0016	<0,001	0,0012	<0,0005	0,0008	0,0118	0,0006
P20	<0,01	0,0474	0,0050	0,005	0,0251	<0,0005	0,0017	0,0058	0,0026
P21	<0,01	0,0686	0,0023	<0,001	0,0085	<0,0005	0,0008	0,0074	0,0031
P22	<0,01	0,0563	0,0007	0,002	0,0008	<0,0005	0,0044	0,0032	<0,0005
P23	<0,01	0,0041	0,0017	0,130	0,0074	0,0029	0,0528	0,0022	0,0008
P24	0,03	0,2507	0,0021	0,008	0,0193	0,0018	0,0032	0,0094	0,0040
P25	<0,01	0,0824	0,0034	<0,001	0,0038	<0,0005	0,0091	0,0076	0,0029