



Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbge>



Avaliação da qualidade das águas subterrâneas de fontes alternativas de abastecimento na cidade de Mossoró/RN

Anderson Mikael de Souza Silva¹; Lucas Matheus Garcia Tôrres²; Filipe da Silva Peixoto³

¹Mestre em Geografia, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte, Campus Central, Mossoró, Rio Grande do Norte. andersonmikael@outlook.com.br, ORCID: 0000-0002-4919-5369. ²Doutorando em Geografia, Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa, Paraíba. lucasgarciageografo@gmail.com, ORCID: 0000-0002-3004-320X. ³Doutor em Geologia, Professor Assistente I, Departamento de Geografia, Universidade do Estado do Rio Grande do Norte. felipepeixoto@uem.br, ORCID: 0000-0001-5409-3001 (autor correspondente).

Artigo recebido em 08/10/2024 e aceito em 26/07/2025

RESUMO

A qualidade da água subterrânea é significativamente influenciada pelas características geológicas e pedológicas, as quais refletem sua composição química e aptidão para diferentes usos. O crescimento urbano e o aumento da demanda hídrica para atividades domésticas, industriais e agrícolas tem intensificado a escassez quantitativa e qualitativa bem como a pressão sobre esses mananciais. Diante desse cenário, o presente artigo realizou uma análise da qualidade da água subterrânea de fontes alternativas de abastecimento na zona urbana de Mossoró, Rio Grande do Norte - RN. Partindo da identificação de poços na área de estudo, foi elaborado um cadastro com informações sobre as condições sanitárias do poço, uso da água, data de instalação, proprietário, localização, profundidade e nível estático. Posteriormente, foram coletadas amostras de água as quais foram encaminhadas para análise de parâmetros físicos e químicos, cujos dados foram inseridos em Sistemas de Informação Geográficas - SIGs. Com base nos resultados, realizou-se a classificação das amostras de água para uso doméstico, irrigação e industrial. Os parâmetros químicos STD, dureza, Cl⁻ e Na⁺ foram identificados como os principais limitantes, inclusive foi constatado contaminação por compostos nitrogenados, provavelmente por efluentes doméstico. Apesar dessas restrições, os poços analisados ainda são utilizados como fontes alternativas de abastecimento, principalmente para uso doméstico, irrigação e para serviços gerais de limpeza. Os achados desde estudo podem contribuir para a gestão e gerenciamento dos recursos hídricos na cidade de Mossoró.

Palavras-chave: Sistema de Informação Geográfica, Hidroquímica de aquíferos, Uso e gestão das águas.

Evaluation of groundwater quality from alternative supply sources in the city of Mossoró-RN

ABSTRACT

Groundwater quality is significantly influenced by geological and pedological characteristics, which reflect chemical composition and suitability for different uses. Urban growth and increased water demand for domestic, industrial and agricultural activities have intensified the quantitative and qualitative scarcity and pressure on these springs. Given this scenario, this article analyzed the quality of groundwater from alternative supply sources in the urban area of Mossoró, Rio Grande do Norte - RN. Starting with the identification of wells in the study area, a register was drawn up with information on the well's sanitary conditions, water use, installation date, owner, location, depth and static level. Subsequently, water samples were collected and sent for analysis of physical and chemical parameters, the data from which was entered into Geographic Information Systems (GIS). Based on the results, the water samples were classified for domestic use, irrigation and industry. The chemical parameters STD, hardness, Cl⁻ and Na⁺ were identified as the main limiting factors, furthermore there is contamination for nitrogen compounds, probably by domestic sewage. Despite these restrictions, the wells analyzed are still used as alternative sources of supply, mainly for domestic use, irrigation and for general cleaning services in enterprises. The findings of this study contribute to the management of water resources in Mossoró.

Key words: Geographic Information System, Aquifer hydrochemistry, Water use and management.

Introdução

A qualidade natural da água é determinada por vários estágios do ciclo hidrológico, bem como por reações químicas, físicas e biológicas. Esses processos, juntamente com fatores naturais e atividades humanas, tais como o aumento da população e economia associada ao uso e ocupação do solo são fatores que afetam diretamente a qualidade da água (Rao *et al.*, 2021). Ademais, esses determinam a composição e a evolução da qualidade da água.

Compreender as influências na composição hidroquímica é crucial para estratégias eficazes de gestão e conservação da água, pois elas ajudam a identificar fontes potenciais de poluição e medidas destinadas a remediação. Esse conhecimento contribui para a criação de práticas apropriadas de gerenciamento de água que podem garantir a sustentabilidade desses recursos hídricos para as gerações futuras (Beilicci e Beilicci, 2022).

O aspecto qualitativo é tão importante quanto o quantitativo. Ao considerando os usos, principalmente para aqueles que exigem melhor qualidade, águas de características químicas adequadas em volumes suficientes e com boa acessibilidade são consideradas muito escassas (Dhaswadikar, 2022). A Portaria GM/MS nº 888/2021 do Ministério da Saúde (2021, art. 5º, inciso I), define que água para consumo humano é “água potável destinada à ingestão, preparação de alimentos e higiene pessoal, independentemente da sua origem”. Ademais, água potável é considerada a água que atenda ao padrão de potabilidade estabelecido no anexo XX da referida portaria. Outras definições que são importantes para este trabalho tratam sobre os tipos de abastecimento de água para consumo humano. São eles, de acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021 do MS (2021, art. 5º, incisos V, VI e VII):

Sistema de abastecimento de água para consumo humano (SAA): uma instalação que tem várias obras, materiais e itens, começando na área de coleta da água até as ligações das casas. Seu objetivo é fornecer água limpa para muitas pessoas por meio de uma rede de abastecimento.

Solução alternativa coletiva de abastecimento de água para consumo humano (SAC): sistema de abastecimento coletivo de água potável, porém, sem rede de distribuição.

Solução alternativa individual de abastecimento de água para consumo humano (SAI): sistema de abastecimento de água para consumo humano que atenda a residências com uma única família ou seus agregados.

As duas primeiras modalidades devem ser objeto de controle e monitoramento da qualidade da água pelo operador do sistema, já a última está sujeita a vigilância municipal da qualidade da água.

As soluções alternativas de abastecimento de água - SAI são comuns para milhões de pessoas ao redor do mundo, principalmente, onde não existe abastecimento de qualidade capaz de suprir as demandas qualitativas dos usuários.

Segundo a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (Unesco, 2022), nos países com economias em desenvolvimento, o uso de água de poços privados para autoabastecimento urbano tem proliferado nos últimos anos. A prática geralmente começa como uma estratégia de enfrentamento diante do abastecimento irregular ou inadequado de água encanada, e depois continua perpetuamente como uma estratégia de redução de custos para evitar o pagamento de tarifas de água mais altas. Cidades como Manaus no Brasil e Bangalore na Índia representam bem essa situação (Barreto *et al.*, 2023; Bharanidharan *et al.*, 2022).

O uso de águas subterrâneas são cruciais para a resiliência das cidades e podem diminuir significativamente o impacto de secas e da poluição. Contudo, é necessário um gerenciamento eficaz e sustentável, permitindo assim, que as cidades se adaptem as mudanças climáticas e mantenham serviços essenciais que garantam a segurança hídrica dos cidadãos (La Vigna, 2022).

O autoabastecimento urbano por meio de águas subterrâneas tem aumentado, especialmente em cidades em crescimento, provocando uma necessidade de melhoria nas estruturas de gerenciamento. A regulamentação, o monitoramento e a colaboração entre os órgãos competentes e usuários privados são fundamentais para a saúde pública e para a sustentabilidade dos recursos hídricos urbanos (Foster *et al.*, 2022).

Dentre as fontes alternativas de abastecimento, os poços, sejam eles tubulares ou escavados, estão entre as mais comuns. Os poços são “um sistema geralmente vertical, feito pelo homem, que tem ação em subsuperfície, usado para a captação, recarga ou observação das águas subterrâneas através de mecanismos artificiais ou naturais” (Vasconcelos, 2015, p. 9).

A construção de um poço pode variar conforme à demanda, qualidade, recursos financeiros disponíveis e das técnicas para perfuração ou escavação do poço. A depender da qualidade e quantidade da água subterrânea a mesma pode ser empregada para os mais diversos

tipos de usos (agricultura, indústria, abastecimento urbano ou lazer). Cada uma dessas atividades apresenta um padrão de qualidade mínima, e indicadores, por meio dos quais é possível diagnosticar a compatibilidade da qualidade com relação ao tipo de uso.

Na cidade de Mossoró, as águas subterrâneas representam cerca de 70% do montante utilizado no abastecimento urbano. A Companhia de Águas e Esgotos do Rio Grande do Norte (CAERN), empresa estatal de economia mista opera por meio de 27 poços com profundidades entre 800 e 1.020 metros localizados dentro do perímetro urbano ou nas suas imediações (Peixoto *et al.*, 2021).

De acordo com o Instituto Nacional de Meteorologia (INMET), Mossoró, está inserido no quadro geográfico do Semiárido Setentrional nordestino, o município brasileiro apresenta média pluviométrica anual de 689.80 mm, temperatura média anual por volta de 27,4°C e umidade relativa média anual em torno de 70%. A estação chuvosa concentrada entre os meses de fevereiro a maio e um período de chuvas escassas nos meses subsequentes.

A hidrogeologia da região é propícia à boa disponibilidade hídrica subterrânea por meio do Sistema Aquífero Apodi (SAA), que engloba principalmente os aquíferos Jandaíra e Açu. Tratando de aspectos determinantes para entender as características dos aquíferos, a disposição estratigráfica da Bacia Potiguar com propriedades hidrodinâmicas diferentes produz entre os aquíferos Jandaíra e Açu, uma camada semipermeável conhecida com aquífero quebradas, que atua como uma camada superior confinante do aquífero Açu (Manoel Filho, 2010).

Essa configuração confinante do aquífero Açu resulta na presença de poços artesianos. Quanto ao aquífero Jandaíra, suas águas apresentam Sólidos Totais Dissolvidos (STD) acima de 900 mg/l. Este aquífero aflora em certas áreas e, em outras, é sobreposto pela Formação Barreiras e por depósitos aluviais.

Em Mossoró, o abastecimento de água atendia 98% dos domicílios em 2022 (Silva & Peixoto, 2024). No entanto, Peixoto *et al.* (2022) observaram tendência de segregação socioespacial de serviços básicos para a maioria dos bairros periféricos, especialmente quanto à instalação de infraestrutura para coleta de esgoto doméstico.

Em consequência disso, alguns domicílios se utilizam de poços para suprir de maneira alternativa suas demandas de água doméstica, principalmente em consequência da frequente intermitência do abastecimento, no entanto, as

fontes subterrâneas podem estar expostas a contaminação pelos efluentes domésticos não coletados.

Não obstante o fornecimento de água abrangendo quase toda a cidade de Mossoró, alguns usuários optam por manter poços particulares para se autoabastecerem de forma complementar suprimindo a alta demanda, ou de forma alternativa se precavendo de problemas de intermitência na rede pública.

Nesse contexto, o objetivo dessa pesquisa foi avaliar a qualidade da água dos poços utilizados como fontes alternativas de abastecimento compondo o SAI. A avaliação foi para os usos de abastecimento doméstico, irrigação e industrial. Esse estudo gerou uma caracterização hidroquímica das amostras de águas e aquíferos de comportamentos livres (Aluvião e Jandaíra), destacando seus usos atuais e seus potenciais usos, compatíveis com a qualidade diagnosticada.

Material e métodos

Caracterização da área de estudo

A área de estudo está inserida no município de Mossoró e trata de dois setores da zona urbana (Figura 1). A delimitação dos setores foi realizada a partir da divisão de bairros realizada pela Prefeitura Municipal de Mossoró - PMM (PMM, 2010). O Setor 1 da pesquisa foi classificado como central composto por oito bairros (Centro, Ilha de Santa Luzia, Doze Anos, Boa Vista, Alto da Conceição, Belo Horizonte, Lagoa do Mato e Aeroporto). O Setor 2 é uma área periférica composta por um único bairro (Dom Jaime Câmara).

A escolha dos bairros ocorreu por meio de fatores de centralidade geográfica, tempo de ocupação e expansão dos serviços de saneamento. Os bairros do Setor 1 foram selecionados por estarem mais próximos da área central da cidade e por serem mais antigos, com ocupação consolidada e contemplados pelo SAA desde a década de 1960.

O Setor 2 é constituído por um bairro mais recente, produzido pela forte expansão horizontal que a cidade sofreu ao longo da década de 1980, com início da ocupação localizado na zona periférica da cidade e com SAA, disponível de forma mais tardia.

Geologicamente, a área de estudo está localizada na Província Borborema, mais especificamente na Bacia Potiguar que é constituída por três grandes grupos sedimentares que da base para o topo são: Areia Branca, Apodi e Agulha (Araripe & Feijó, 1994; Peixoto & Dias,

2023). Além desses, a Bacia Potiguar é composta por depósitos cenozoicos, que na área urbana de Mossoró são representados pelos Depósitos Aluvionares e a Formação Barreiras.

A porção emersa da Bacia Potiguar abrange aproximadamente 26.700 km², delimitando-se a leste com a Bacia de Pernambuco-Paraíba, por meio do Alto de Touros; a noroeste com a Bacia do Ceará, pelo Alto de Fortaleza; e ao sul com rochas do embasamento cristalino (Portella & Fabianoviscs, 2017).

As unidades hidrogeológicas que compõem a Bacia Potiguar na área de estudo constituem o SAA composto pelos aquíferos Açú e Jandaíra. O aquífero Açú é uma unidade hidrogeológica de extrema importância para o abastecimento público no Oeste Potiguar sendo utilizado pela CAERN para abastecer pequenas e médias cidades como Mossoró, Upanema e Baraúna.

De acordo com o Serviço Geológico do Brasil (SGB, 2005), sua litologia é constituída, principalmente, por arenitos pouco argilosos, arcossianos, predominantemente quartzosos, médios a grossos e, por vezes, conglomeráticos.

Na altura da cidade de Mossoró o topo do aquífero Açú apresenta variação entre 600 e 860

metros e apresentam água de boa qualidade com características termais, com temperaturas entre 46 e 52 °C (Peixoto *et al.*, 2021). Conforme Moraes *et al.* (2005) a Formação Jandaíra apresenta uma ampla variação litológica, tanto vertical como horizontalmente, sendo constituída por calcários cinzas e cremes, margas, siltitos, folhelhos, argilitos e dolomitos.

O aquífero Jandaíra localiza-se na porção superior da sequência carbonática da Formação Jandaíra, com espessuras que variando de 50 a 250 metros (SGB, 2005). Trata-se de um aquífero essencialmente livre, heterogêneo, hidraulicamente anisotrópico e de circulação cárstica em seu interior.

A Formação Barreiras ocorre na área de estudo recobrando a Formação Jandaíra e tem pacotes com espessuras de até 40 metros. Sua composição litológica é formada por rochas argilo-arenosas ou areno-argilosas até conglomeráticas.

A ocorrência dos Aluviões está associada ao leito do Rio Apodi-Mossoró sendo composto principalmente por areia, cascalho, silte e argila. Sua espessura pode chegar a até 30 m de profundidade com vazões entre 10 e 100 m³ h⁻¹ (Marcon *et al.*, 2015).

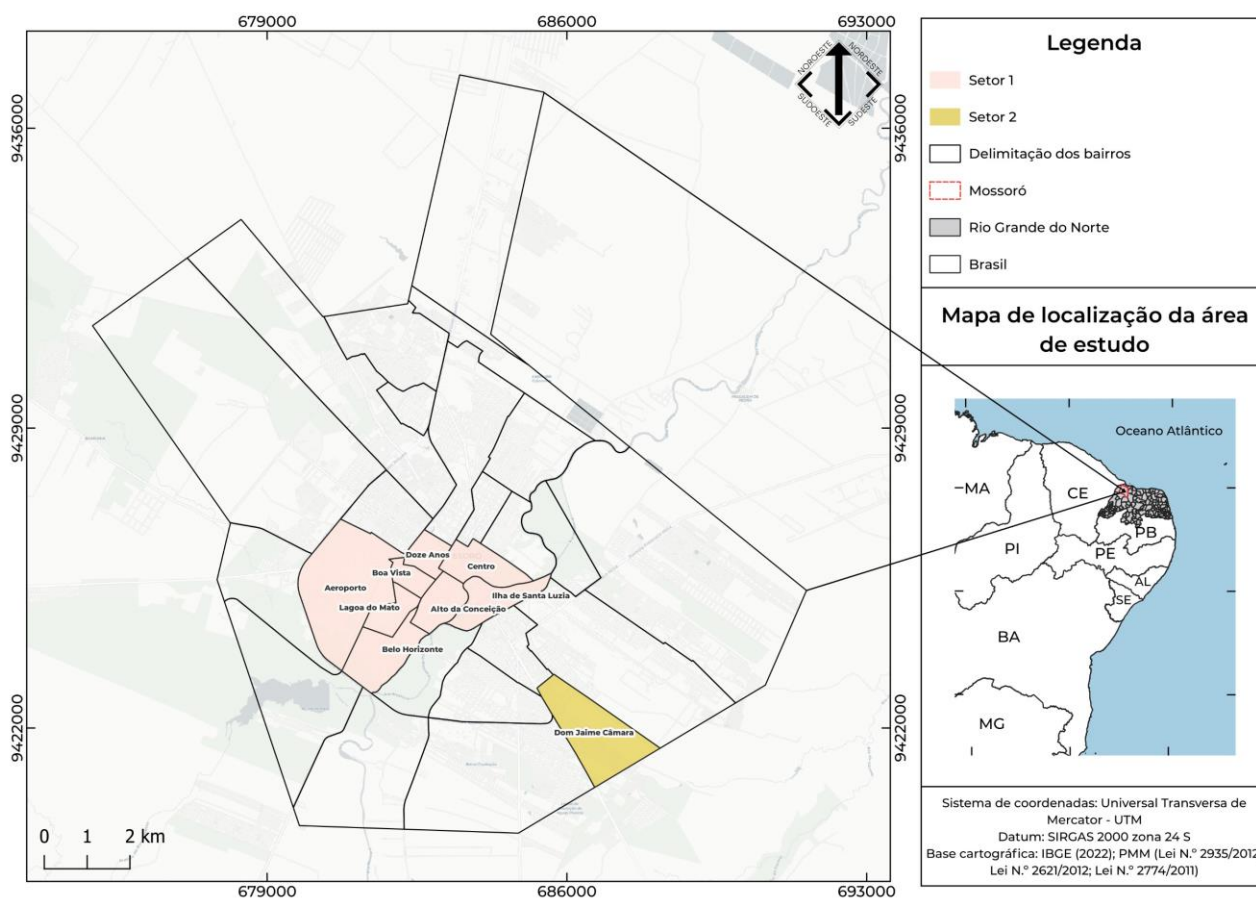


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo.

Metodologia

A metodologia da pesquisa foi dividida em etapas, inicialmente foram levantadas as fichas dos poços na área urbana de Mossoró, disponíveis no Sistema de Informação sobre Águas Subterrâneas (SIAGAS), operacionalizado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM).

Através dos dados obtidos, foi elaborado um mapa de localização dos poços na zona urbana de Mossoró usando a divisão por bairros, disponibilizada pela PMM (2010). De posse desses dados, foram selecionadas as áreas de interesse da pesquisa (Setor 1 e Setor 2).

O passo seguinte foi a atualização do cadastro de poços nos setores da pesquisa. Através da visita de campo, os bairros selecionados foram percorridos em busca dos poços já existente no cadastro do SIAGAS para averiguar a situação deles e para busca de novos poços, inexistentes no cadastro prévio.

O trabalho de campo foi realizado em duas etapas. A primeira, conduzida entre os meses de novembro e dezembro de 2020, consistiu na atualização e construção de um cadastro de poços, com base em dados secundários e primários. Na segunda etapa, foram coletadas amostras de água nos poços, para análise laboratorial de parâmetros físico-químicos.

A coleta das amostras ocorreu no dia 16 de novembro de 2021. A água foi extraída dos poços por meio dos seus respectivos sistemas de bombeamento e armazenada em recipiente de material plástico inerte de polipropileno. Em seguida, as amostras foram conduzidas para análises no Laboratório de Eletroquímica e Química Analítica da Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (LEQA/UERN).

As análises realizadas foram de natureza física e química, ao todo foram coletadas seis amostras de água dos poços, submetidas a testes de 24 parâmetros. Os parâmetros carbonato (CO_3^{2-}), nitrogênio amoniacal total (N-NH_3^-), amônio (NH_4^+) e amônia molecular (N-NH_3) ficaram abaixo do limite de detecção em todas as amostras, por isso, foram descartados do universo amostral, dessa forma, restaram 20 parâmetros para serem trabalhados: Cálcio (Ca^{2+}), Magnésio (Mg^{2+}), Sódio (Na^+), Potássio (K^+), Ferro (Fe^{2+}), Bicarbonato (HCO_3^-), Sulfato (SO_4^{2-}), Fosfato (PO_4^{3-}), Cloreto (Cl^-), Brometo (Br^-), Fluoreto (F^-), Nitrato (NO_3^-), Nitrito (NO_2^-), alcalinidade total (Alc), dureza total, condutividade elétrica (CE), potencial hidrogeniônico (pH), sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade e turbidez.

Após a obtenção dos dados das análises, foi realizado o tabelamento, interpretação e cruzamento das informações por meio de estatística descritiva, utilizando o software Excel. Para a análise multivariada de componentes principais (ACP), empregou-se o software Andad 2.0. A classificação das águas com base nos íons e cátions foi realizada por meio do software Qualigraf versão 1.1.

Os parâmetros de potabilidade foram avaliados com base no Anexo XX da Portaria GM/MS nº 888/2021 do MS. A classificação da água para uso em irrigação seguiu o diagrama proposto por Richards (1954). Para a classificação do uso industrial, foram empregados o Índice de Estabilidade do Carbonato de Cálcio (IE), desenvolvido por Ryznar (1944), e o Índice de Saturação do Carbonato (I), elaborado por Langelier (1936).

Foi realizada estatística multivariada baseada em análise ACP, a qual se trata de um tipo de estatística multivariada, cujos resultados se apresentam a relação das variâncias de todos os parâmetros de qualidade da água considerados para análise. Assim, a partir dela foi possível identificar a associação entre os parâmetros e descrever mecanismos subsequentes de evolução hidroquímica.

Segundo Matiatos (2016), por meio da ACP, pode-se realizar redução de dados para pesquisa nos ambientes hidrogeológicos, visando melhor entender a qualidade da água e sua interrelação com seu hidrossistema. De acordo com Gomes (2021, p. 3) este procedimento reduz “a dimensão original das (n) variáveis, gerando coeficientes de correlação, facilitando a interpretação do domínio de observações e identificando grupos de dados correspondentes aos seus principais componentes de qualidade”.

A relação entre os parâmetros se dá a partir das suas variâncias para os planos fatoriais construídos nas análises. Para a ACP aqui conduzida, foi realizada a verificação da adequação dos dados a partir dos índices *Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy* (KMO) e do teste estatístico de esfericidade de Bartlett, segundo Hair Jr. et al. (1998).

Este último, testa a hipótese nula de que as variáveis analisadas não são correlacionadas. Foi rejeitada essa hipótese para os 20 parâmetros conforme os testes sobresscritos. A análise realizada atingiu 82,8% da variância total acumulada em 3 planos fatoriais (Tabela 1):

Tabela 1. Planos fatoriais.

Planos fatoriais	Variância	
	Variância (%)	Acumulada (%)
1	50,0	50,0
2	18,8	68,8
3	14,0	82,8

No plano fatorial 1, foram contempladas as variâncias de Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , K^+ , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} , Cl^- , Br, Dureza, STD e turbidez. No plano fatorial 2 foram explicadas relações entre as variâncias do Fe^{2+} , HCO_3^- , F^- , NO_3^- . No plano fatorial 3, foram identificadas as relações do NO_3^- , e pH. Somente o parâmetro NO_2^- não obteve valor suficiente para interpretação conforme os planos fatoriais 1, 2 e 3.

Resultados e discussão

Similaridades hidroquímica e classificação das águas

A ACP aplicada foi importante para identificar as relações entre os parâmetros, indicando tendências na evolução hidroquímica, principalmente com relação aos íons maiores, Ca^{2+} , Mg^{2+} , Na^+ , SO_4^{2-} , Cl^- e de íons menores Br e PO_4^{3-} que se encontraram agrupados (Figura 2). Naturalmente, parâmetros que refletem o somatório de íons como Dureza, CE também se encontram nessa relação, pois alguns dos íons supracitados são os que mais contribuem para esses parâmetros. O K^+ foi, dos íons mais comuns, o único que esteve desagrupado, pois além de ser mais presente em rochas sedimentares, ele é facilmente incorporado a matriz lamítica ou de sedimentos argilosos (Hem, 1985), tais rochas compõe majoritariamente o meio hidrogeológico representado no presente estudo.

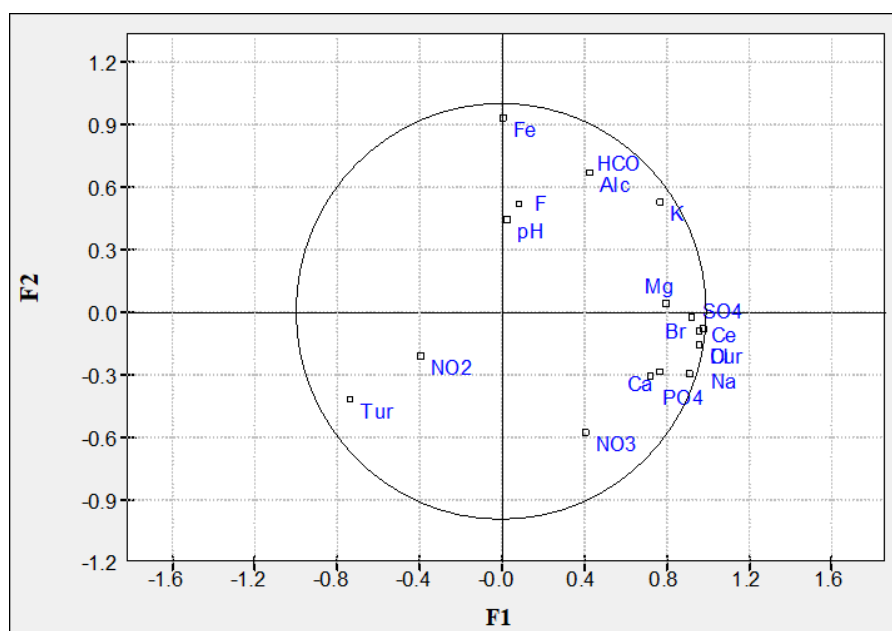


Figura 2. Relação entre planos fatoriais 1 e 2.

Legenda: pH – Potencial hidrogeniônico; Ce – condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$); Alc – alcalinidade (mg/l); Dur – dureza total (mg/l); Cl – cloreto (Cl^- mg/l); HCO_3^- – bicarbonato (HCO_3^- mg/L); SO_4^{2-} – sulfato (SO_4^{2-} mg/L); Na – sódio (Na^+ mg/L); Ca – cálcio (Ca^{2+} mg/L); K – potássio (K^+ mg/L); Mg – Magnésio (Mg^{2+} mg/L); F – fluoreto (F^- mg/L); Br – brometo (Br^- mg/L); PO_4^{3-} – fósforo (PO_4^{3-} mg/L); NO_2^- – nitrito (NO_2^- mg/L); NO_3^- – nitrato (NO_3^- mg/L); Tur – Turbidez (UTN)

No plano fatorial 2, há associação entre a alcalinidade e o HCO_3^- , a qual pode ser explicada Silva, A. M. S., Tôrres, L. M. G., Peixoto, F. S.

peelo fato de que o carbonato ativo nas análises se dá sobretudo em forma de HCO_3^- , por conta da

tendência de pH neutro à levemente básicos, produzindo a capacidade de neutralização de ácidos e determinando os valores de alcalinidade (Hem, 1985). Enquanto Fe^+ , F^- e NO_3^- não possuem, aparentemente, qualquer associação. No entanto, é na relação entre os Planos fatoriais 2 e 3 (Figura 3) que se apresentam associação entre NO_3^- e PO_4^- , sendo indicadores de contaminação, evidenciada no poço P32 com concentração acima de 10 mg/L de NO_3^- . Esse poço é o único tubular

locado na aluvião (Figura 4), próximo a um canal construído para regular as vazões de cheia, a fim de dirimir as inundações que ocorriam no centro da cidade. Após a construção dos canais em 1986, por meio do processo de tricotomização do rio Apodi-Mossoró, estes passaram a receber efluentes domésticos do entorno, o que ocorre até os dias atuais, pois o serviço de coleta de esgoto atende a área apenas parcialmente.

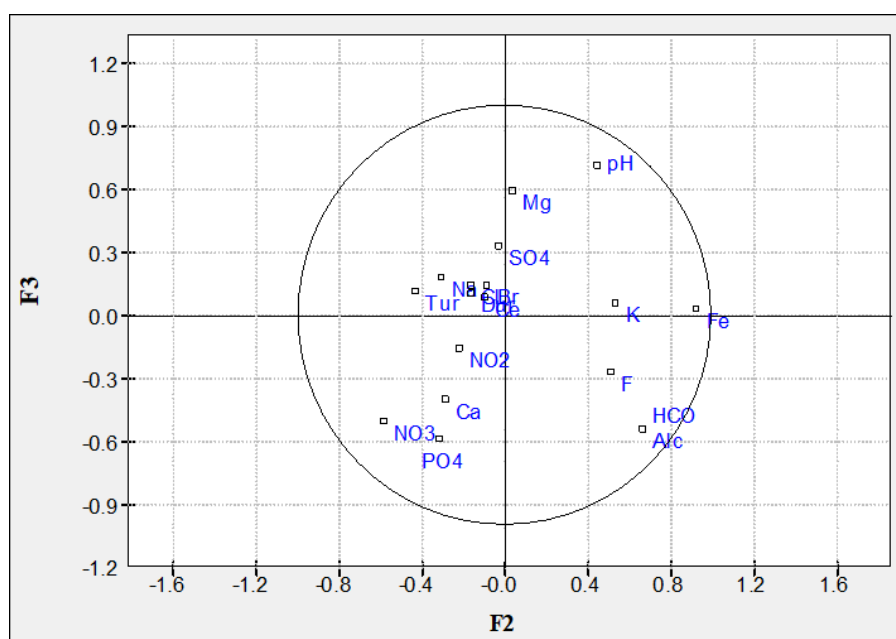


Figura 3. Relação entre planos fatoriais 2 e 3.

Legenda: pH – Potencial hidrogeniônico; Ce – condutividade elétrica ($\mu\text{S}/\text{cm}^2$); Alc – alcalinidade (mg/l); Dur – dureza total (mg/l); Cl – cloreto (Cl^- mg/l); HCO – bicarbonato (HCO_3^- mg/L); SO_4 - sulfato (SO_4^{2-} mg/L); Na – sódio (Na^+ mg/L); Ca – cálcio (Ca^{2+} mg/L); K – potássio (K^+ mg/L); Mg – Magnésio (Mg^{2+} mg/L); F – fluoreto (F^- mg/L); Br – brometo (Br^- mg/L); PO_4 – fósforo (PO_4^{3-} mg/L); NO_2 – nitrito (NO_2^- mg/L); NO_3 – nitrato (NO_3^- mg/L); Tur – Turbidez (UTN)

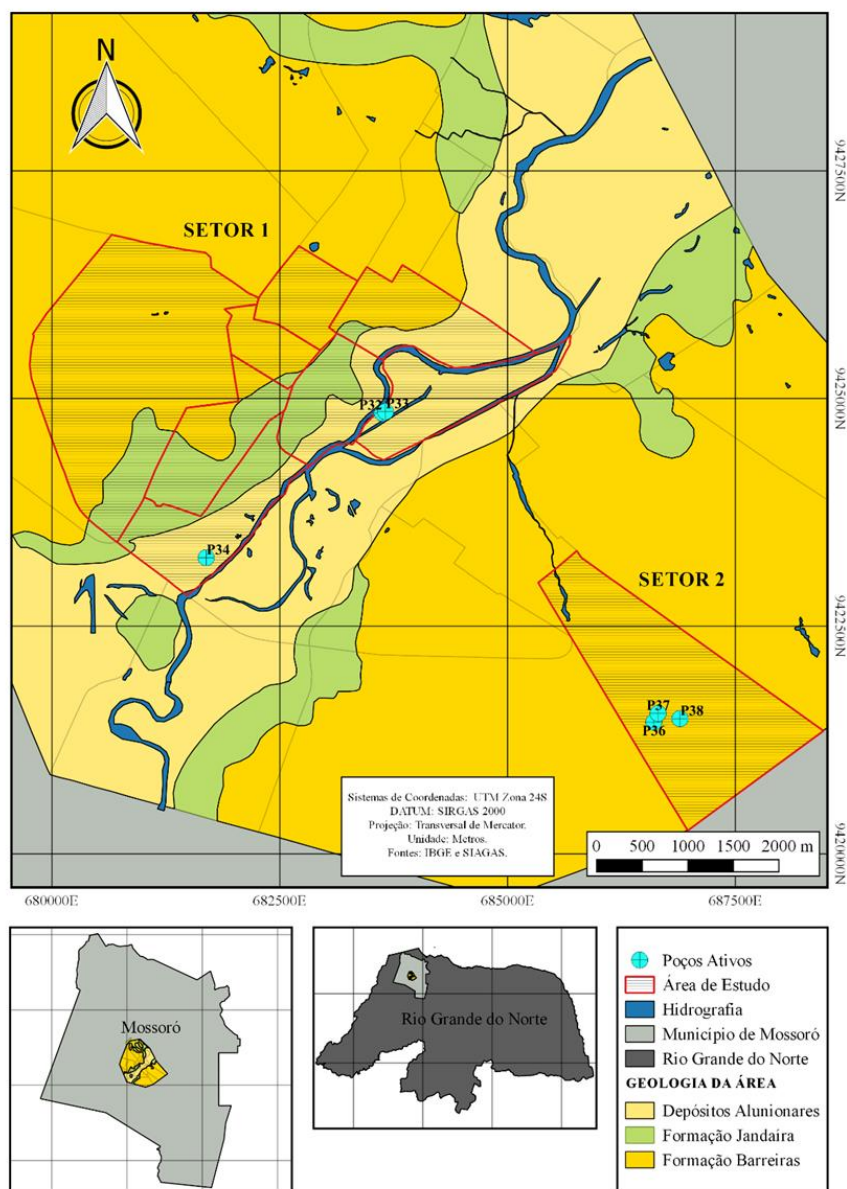


Figura 4. Mapa geológico da área de estudo e localização dos poços.

Pode-se ainda, perceber uma relação inversa desses parâmetros com o pH, indicando o aumento da acidez da água, resultante do processo de nitrificação. Tórres (2024) também conseguiu visualizar essa relação e corroborar com ela, quando analisou águas em uma área urbana do semiárido brasileiro no mesmo sistema aquífero. Isso foi indicado por Peixoto e Cavalcante (2021) ao analisar as influências das fossas sépticas e rudimentares nas concentrações de compostos nitrogenados nas águas subterrâneas na cidade de Fortaleza-CE. Os autores citados corroboram no entendimento que esses contaminantes provavelmente possuem efluentes domésticos como fontes.

Ademais, salienta-se que o nitrato é um dos contaminantes mais perigosos e disseminados das águas subterrâneas, surgiu como uma questão

Silva, A. M. S., Tórres, L. M. G., Peixoto, F. S.

urgente nas regiões áridas e semiáridas (Jayarajan e Kuriachan, 2021; Rahman *et al.*, 2021) e, quando a exposição humana a este íon é prolongada a níveis elevados, representa sérios riscos à saúde, tendo como principal risco a metemoglobinemia (síndrome do bebê azul) em bebês, e aumenta a vulnerabilidade de adultos à disfunção da tireoide, hipertensão e câncer de estômago (Rahman *et al.*, 2021; Gao *et al.*, 2022; Kom *et al.*, 2022).

A classificação iônica das águas por meio do Diagrama de Piper (Figura 5) demonstra que as amostras analisadas nos poços P32 e P33 estão localizados geologicamente nos Depósitos Aluvionares do Rio Apodi-Mossoró, sua classificação iônica apresentou-se como Mista Cloretada para ambas as amostras. O poço P34 também está localizado nos depósitos aluvionares, um pouco mais distante da margem do rio e a

montante dos poços P32 e P33. A classificação iônica de sua amostra de água foi Mista Bicarbonatada.

Os outros 3 poços estão localizados no Setor 2 da pesquisa, no bairro Dom Jaime Câmara, em área de ocorrência da Formação Barreiras. A amostra do poço P36 foi classificada como mista e

as amostras dos poços P37 e P38 foram, ambas, classificadas como Cálcicas Bicarbonatadas. As concentrações de cálcio que resultaram nessa classe, possivelmente evidenciam interação entre os aquíferos Jandaíra e Barreiras, já que na área de ocorrência desses poços há níveis freáticos que variam entre 1,5 a 4,0 metros.

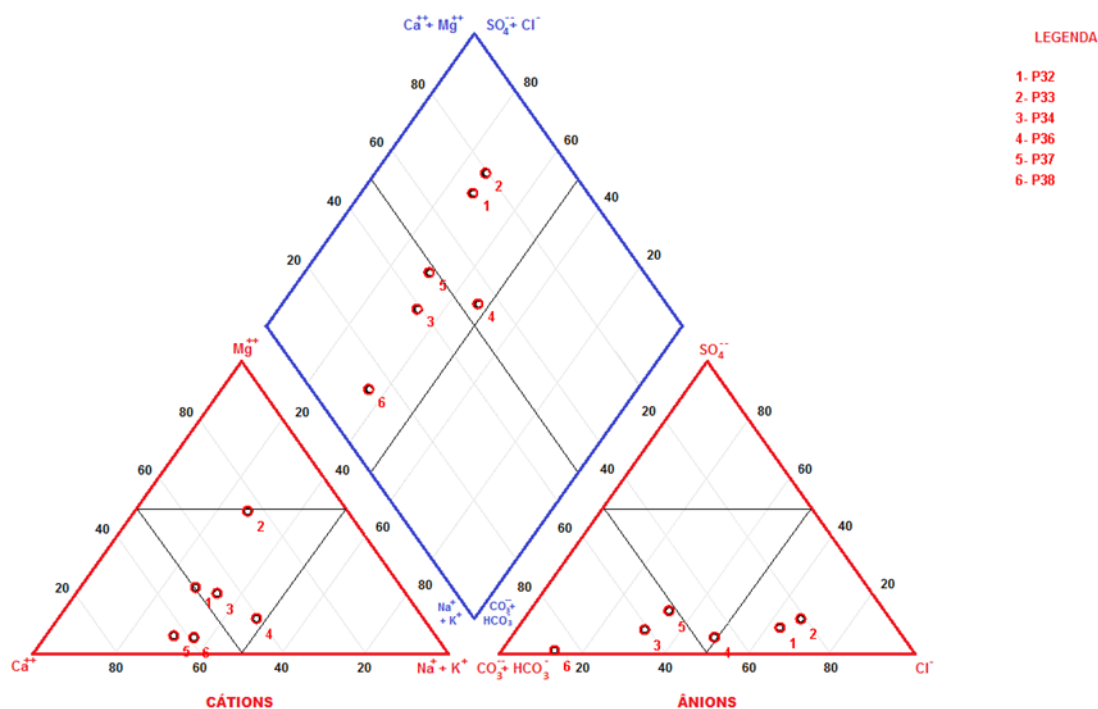


Figura 5. Classificação iônica das águas segundo o Diagrama de Piper

Segundo Peixoto *et al.* (2021) a Formação Barreiras tem a função de um aquífero de transferência na área de Mossoró, sendo assim, as Formações Barreiras e Jandaíra estariam hidráulicamente conectadas. No trabalho de Braga Junior *et al.* (2017) as águas do aquífero Jandaíra foram classificadas em sua maioria como Cálcicas Bicarbonatadas ou Bicarbonatadas Mistas, coincidindo com a classificação das águas dos poços que se encontram localizados na Formação Barreiras, mas que captam também águas do aquífero Jandaíra.

Dentre as obras de captação analisadas nessa pesquisa, algumas fontes são direcionadas para uso doméstico, a maioria desses poços é utilizado de forma complementar nas demandas domésticas para usos menos nobres ou até para irrigação de áreas verdes como gramados, jardins e plantas. Isso acontece em virtude de o SAA está presente em praticamente todas as áreas da cidade. Uma evidência disso é a presença dos poços localizados no Setor 2 (P36, P37 e P38), outrora utilizados como fonte para consumo humano em

períodos que não existia o SAA na área, esses poços manuais ainda são utilizados como fontes alternativas em função das frequentes intermitências no abastecimento.

Avaliação da qualidade da água para uso doméstico

Com a crescente demanda de água nos centros urbanos, o uso sustentável dos aquíferos urbanos é uma alternativa, os aquíferos livres localizados nas áreas urbanas podem ser fontes de abastecimento para atividades que não exigem água potável (Page *et al.*, 2018). Essa alternativa de abastecimento para atividades que não exigem a potabilidade foi identificada na área estudada, Mossoró/RN (Silva e Peixoto, 2024). E, isso corroborou com este estudo, pois nas fontes alternativas avaliadas, nenhum poço é utilizado para dessedentação humana.

Vale salientar que o aumento das atividades das sociedades urbano-industriais em escala global, abrangendo atividades domésticas,

industriais e agricultura têm levado a uma deterioração notável na qualidade das águas subterrâneas (Yang *et al.*, 2024, Zhang *et al.*, 2021).

A estatística descritiva mostra as concentrações máximos, mínimos, médias, desvio padrão e coeficiente de variância para cada parâmetro analisado (Tabela 2). Através desses dados, é possível realizar uma caracterização e classificação por meio dos atributos e seus respectivos valores. O valor máximo registrado de

STD entre as amostras foi de 2.797 mg/l, sendo o valor mínimo 307 mg/l e o valor médio 1.421 mg/l. Assim, de uma forma geral, as águas seriam classificadas como salobras. Apenas uma amostra apresentou valor abaixo de 500 mg/l que é o valor máximo permitido (VMP) de STD para consumo humano estipulado pelo MS (2021). A qual se trata da amostra do poço P38, os demais são considerados inapropriados para consumo humano segundo esse parâmetro.

Tabela 2. Estatística Descritiva dos Parâmetros Analisados

Parâmetro	Máximo	Mínimo	Média	Desvio Padrão	C.V
Ca⁺ (mg/L)	839,00	236,00	434,67	190,76	0,44
Mg²⁺(mg/L)	525,00	24,00	157,50	179,83	1,14
Na⁺(mg/L)	430,80	181,30	280,97	109,24	0,39
K⁺(mg/L)	185,60	46,60	130,92	48,50	0,37
Fe²⁺(mg/L)	0,63	0,00	0,14	0,22	1,61
HCO₃⁻(mg/L)	720,40	240,10	511,92	158,99	0,31
SO₄²⁻(mg/L)	202,87	7,56	93,10	69,81	0,75
PO₄³⁻(mg/L)	0,37	0,00	0,06	0,14	2,24
Cl⁻(mg/L)	850,55	47,94	379,39	327,64	0,86
Br⁻(mg/L)	2,45	0,11	1,04	0,98	0,94
F⁻(mg/L)	1,15	0,36	0,68	0,27	0,40
N-NO₃⁻(mg/L)	11,09	1,64	4,48	3,45	0,77
N-NO₂⁻(mg/L)	0,23	0,00	0,05	0,08	1,77
Alc. Total(mg/L)	720,40	240,10	511,92	158,99	0,31
Dur. Total (mg/L)	1075,00	280,00	592,17	302,67	0,51
CE (µs/cm²)	4370,00	480,00	2220,67	1479,19	0,67
pH	8,00	7,00	7,55	0,35	0,05
STD (mg/L)	2797,00	307,00	1421,17	946,86	0,67
Turd. (UT)	13,80	3,48	6,76	3,97	0,59
Salin. (mg/L)	2320,40	210,00	1135,23	807,27	0,71

A tabela 2 reúne a estatística descritiva dos parâmetros analisados nesta pesquisa que

apresentam VMP estipulado na Portaria 888/2021 do Ministério da Saúde. Os valores acima dos

recomendados estão destacados a seguir na Tabela 3:

Tabela 3. Parâmetros analisados e padrão de potabilidade

Parâmetros	P32	P33	P34	P36	P37	P38	VMP	Unidade
Na	429,70	430,80	181,30	265,40	184,40	194,20	200,00	mg/l
Fe	0,00	0,16	0,63	0,00	0,05	0,00	0,30	mg/l
SO ₄ ²⁻	169,49	202,87	79,66	44,32	54,69	7,56	250,00	mg/l
Cl ⁻	850,55	811,43	209,47	267,80	89,16	47,94	250,00	mg/l
F ⁻	0,78	0,51	1,15	0,45	0,83	0,36	1,50	mg/l
N-NO ₃ ⁻	11,09	1,78	2,02	3,55	6,83	1,64	10,00	mg/l
N-NO ₂ ⁻	0,00	0,00	0,03	0,23	0,02	0,00	1,00	mg/l
Dur. Total	1075,00	948,00	420,00	280,00	410,00	420,00	300,00	mg/l
STD	2797,00	2573,00	1149,00	1161,00	540,00	307,00	500,00	mg/l
Turd.	3,48	3,69	3,48	5,76	13,80	10,35	5,00	UT

A tabela 3 evidencia que nenhuma das amostras atende todos os requisitos determinados pela portaria supracitada. Dessa forma, essas águas necessitam passar por tratamentos específicos para poderem ser utilizadas para este fim.

Marcon *et al.* (2015), analisando amostras de água do Aquífero Jandaíra em comunidades rurais do RN chegaram à conclusão que consumir água desse aquífero sem um tratamento adequado pode apresentar riscos à saúde pública. Somente em um dos poços analisados que se trata do poço P32 a água é utilizada após processo de dessalinização, mas para uso de serviços gerais de limpeza e irrigação de jardins. Os demais poços não apresentam nenhum sistema de tratamento e suas águas são utilizadas de forma bruta.

Os poços P32 e P33 apresentaram os maiores valores para STD, respectivamente. As concentrações de Na²⁺ também estão acima do máximo permitido para uso doméstico, assim como o Cl⁻. Ambos os poços estão localizados às margens do rio Apodi-Mossoró captando o aquífero aluvionar. As altas concentrações de STD, Cl⁻ e Na²⁺ podem estar relacionados à influência

marinha no aquífero aluvionar, o local possui um sistema ambiental cuja gênese está ligada a planície fluviomarinha, já que a maré adentrava o estuário até a altura do centro da cidade.

No entanto, após as obras de barramento de maré realizada a jusante no final do século XIX, a secção do rio cujos referidos poços estão locados não mais possui influência direta da água do mar. Assim, os resultados levam a crer que a maré avançava até o atual bairro Ilha de Santa Luzia onde estão localizados ambos os poços. Outra evidência que corrobora que esta área sofreu a influência marinha é o alto valor do Cl⁻ nas amostras P32 e P33 que apresentam concentrações de 850 e 811 mg/L, respectivamente.

Além disso, a razão Cl⁻/Br⁻ dos mesmos poços citados com relação aos demais poços investigados (Tabela 4), os poços P34, P36, P37 e P38 estão associados a recarga de região costeira de clima árido, sendo que os outros dois poços (P32, P33 e P34) não se enquadraram nessa classificação, mais próximos à influência de águas marinhas, de acordo com a classificação de Alcalá e Custódio (2008).

Tabela 4. Valores da Razão Cl⁻ / Br⁻

POÇO	P32	P33	P34	P36	P37	P38
Razão Cl ⁻ /Br ⁻ em mg/L	783,49	773,36	713,52	1099,97	1861,52	818,94

A presença de Cl^- é bastante comum nas águas subterrâneas em quantidades de até 250 mg/L. Já nas águas dos mares e oceanos este íon apresenta altos índices de concentração variando entre 18.000 e 21.000 mg/L (Feitosa *et al.*, 2008). Por outro lado, segundo Fernandes *et al* (2005) a origem dos altos teores de Cl^- nas águas subterrâneas da Chapada do Apodi está relacionada aos altos índices de evaporação. A junção de altos índices de evaporação do clima semiárido, mobilização dos íons para o baixo curso e estuário do rio e a influência marinha na área da aluvião podem explicar os níveis elevados de Cl^- .

A média da dureza total obtida nas 6 amostras coletadas foi de 592,17 mg/L de CaCO_3 . O valor máximo obtido foi de 1.075 mg/L no poço P32 e o valor mínimo corresponde à única amostra que ficou no padrão estabelecido (P38), com concentração de 280 mg/L de CaCO_3 . As demais amostras tiveram valores acima do padrão permitido de CaCO_3 (300 mg/L).

Todas as amostras apresentam concentração de CaCO_3 acima de 200 mg/l o que as caracterizam como águas muito duras segundo a classificação de Custodio e Llamas (1983). Quanto maior a dureza total na água, maior o consumo de sabão, dificultando a geração de espuma, comprometendo uma série de atividades domésticas. Ademais, águas muito duras podem causar incrustações e problemas de higiene na limpeza de utensílios domésticos e roupas.

Com relação aos demais poços, devido à geologia da área ser caracterizada pela presença da Formação Jandaíra sotoposta às Aluviões e Formação Barreiras, os poços localizados nessas unidades podem, ainda, ter um regime misto de captação, explorando águas ou tendo alguma influência direta, ou indireta da Formação Jandaíra.

A turbidez nas amostras P36, P37 e P38 estão acima do VMP recomendado pela Portaria de

888/2021 do Ministério da Saúde. Todas essas amostras foram coletadas em poços escavados, que por sua vez não contam com revestimentos e filtros adequados. Nesses poços, a água fica em contato direto com os sedimentos da formação geológica o que causa maior presença de sedimentos suspensos, refletida nos valores de alta turbidez da água. O parâmetro pH se apresenta nos limites recomendados pela legislação vigente. Os valores encontrados nas amostras variam entre 7,0 e 8,0 sendo a média 7,55, enquanto o padrão estabelecido pela legislação vigente é de 6,0 e 9,5.

Avaliação da qualidade da água para uso agrícola

Quando se trata de qualidade da água para irrigação, a classificação é determinada pela concentração de alguns parâmetros como o Na^+ , Cl^- , K^+ , SO_4^{2-} , HCO_3^- , Br^- , STD e a concentração total de cátions que influenciam no crescimento das plantas. Além, das características químicas das águas, também deve-se levar em consideração as características da espécie vegetal que será cultivada (tolerância à salinidade e ciclo de vida) e as propriedades do solo, tais como permeabilidade, porosidade, composição mineral e textura (Feitosa *et al.*, 2008).

Se tratando da classificação por meio do parâmetro STD com base nos valores estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005, a Figura 6 mostra que duas amostras (P32 e P33) foram classificadas como águas salgadas com STD acima de 1500 mg/L. As amostras P34, P36 e P37 foram classificadas como águas salobras com STD entre 501 e 1500 mg/L e apenas a amostra P38 foi classificada como água doce com STD abaixo de 500 mg/L (Figura 6).

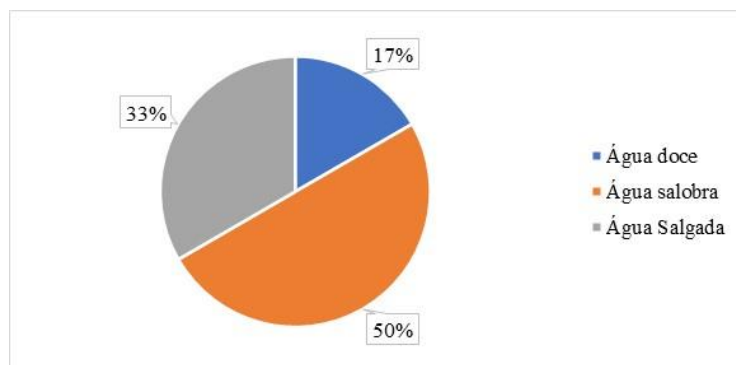


Figura 6. Classificação das águas por meio do parâmetro STD com base nos valores estabelecidos pela resolução CONAMA 357/2005.

Uma das classificações mais utilizadas para averiguar a qualidade da água para agricultura, metodologia do United States Salinity Laboratory — USSSL, proposta por Richards (1964), baseia-se na Razão de Adsorção de Sódio (RAS), como indicador do perigo de alcalinização ou sodificação do solo, e na condutividade elétrica da água (CE), como indicador do perigo de salinização do solo (Feitosa *et al.*, 2008).

As amostras P32 e P33 foram classificadas como C4-S2, apresentam muito alto risco de salinidade e médio risco de sodificação. No geral, não servem para irrigação, com exceção em solos bem arenosos permeáveis e com culturas de alta

tolerância à salinidade (Figura 7). As amostras P34, P36 e P37 estão na classe C3-S1, com alto risco de salinização e baixo risco de absorção de sódio, por apresentarem alta salinidade também não são indicadas para irrigação, excepcionalmente em solos bem drenados e para plantas de alta tolerância à salinidade.

A amostra P38 foi classificada como C2-S1, com baixo risco de absorção de sódio e médio risco de salinização, pode ser usada para cultivar quase todos os vegetais com baixa tolerância a salinidade de preferência em solos silto-arenosos, siltosos ou areno-argilosos quando houver uma lixiviação moderada do solo.

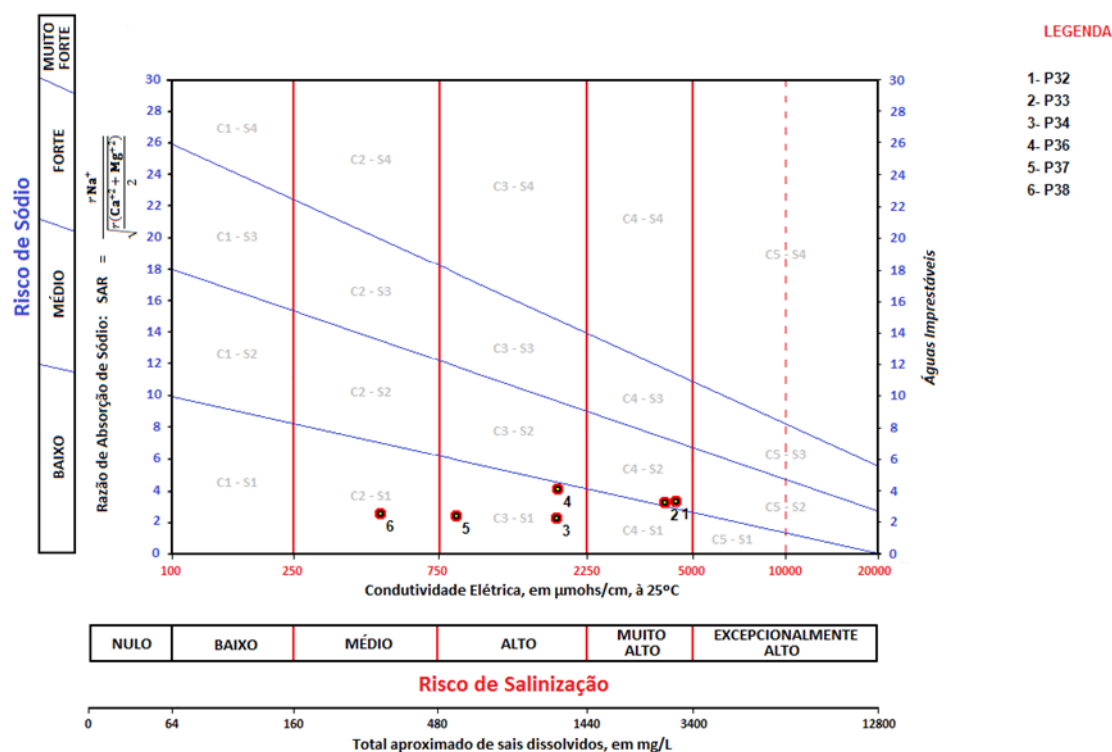


Figura 7. Classificação das águas para irrigação segundo o USSSL

Uma atividade que não apresenta tantas restrições é a dessedentação animal, com o STD de 1.421 mg/L em média as amostras analisadas seriam classificadas no campo de boa aptidão segundo Logan (1965). Poderiam ser utilizadas para o consumo animal de aves, porcos, ovelhas, gado e cavalos conforme citado por Mackee e Wolf (1966) apud Feitosa *et al.*, (2008).

Avaliação da qualidade da água para uso Industrial

Devido à grande variedade de atividades industriais existem vários padrões de águas que podem ser utilizadas na indústria a depender da atividade específica. Uma das características mais importantes para uso industrial é a capacidade de ataque químico e de precipitações químicas sobre os materiais (Zhang *et al.*, 2023).

Ou seja, tendências a corrosão, neutralidade ou inscristabilidade. Essas características estão ligadas diretamente a parâmetros como dureza e pH, bem como a concentração de carbonatos (Feitosa *et al.*, 2008).

Uma forma de analisar o índice de estabilidade de carbonato de cálcio (CaCO_3) (IE) das águas naturais foi desenvolvida por Ryznar (1944). Langelier (1936) desenvolveu um meio de analisar o índice de saturação do carbonato de cálcio (CaCO_3) (I). Ambos os índices são

acompanhados de valores que indicam a capacidade de ataque e incrustação química das águas (Tabelas 5 e 6).

Tabela 5. Classificação Segundo o índice de Langelier

Amostra	Resultado	Classificação
P32	1,10	Incrustante
P33	1,45	Incrustante
P34	1,38	Incrustante
P36	0,21	Incrustante
P37	1,01	Incrustante
P38	1,12	Incrustante
> 0	Incrustante	
= 0	Neutra	
< 0	Agressiva	

Tabela 6. Classificação conforme o índice de Riznar

Amostra	Resultado	Classificação
P32	4,99	Muito Incrustante
P33	5,10	Moderadamente Incrustante
P34	5,04	Moderadamente Incrustante
P36	6,57	Pouco Incrustante ou Agressiva
P37	5,79	Moderadamente Incrustante
P38	5,25	Moderadamente Incrustante
4,0 - 5,0 - Muito Incrustante		
5,0 - 6,0 - Moderadamente Incrustante		
6,0 - 7,0 - Pouco Incrustante ou Agressiva		
7,0 - 7,5 – Agressiva		
7,5 - 9,0 - Francamente Agressiva		
> 9,0 - Muito Agressiva		

Conforme os resultados da tabela 5 todas as amostras apresentaram tendência a incrustação. Para o IE o resultado é muito semelhante, as amostras P33, P34, P37 e P38 foram classificadas como moderadamente incrustantes, a amostra P32 pouco incrustante ou agressiva e a amostra P32 foi classificada como muito incrustante. Essa tendência de incrustação está relacionada diretamente com a dureza total das águas que foi classificada como muito dura para todas as amostras.

A dureza da água está associada a elevadas concentrações de íons Ca^{2+} e Mg^{2+} , o que pode torná-la imprópria para consumo doméstico e industrial. Em áreas com predominância de rochas calcárias, dolomíticas e outros minerais ricos nesses cátions divalentes, as águas subterrâneas tendem a apresentar altos teores de dureza. Em

regiões onde há influência de processos naturais, como nas planícies flúviomarinhas hipersalinas, de elevada evaporação e a baixa pluviosidade promovem a cristalização de sais na superfície do solo, impactando diretamente a composição das águas subterrâneas. Para mitigar esse problema, são empregados processos de abrandamento da água, como precipitação, métodos termoquímicos, osmose inversa e troca iônica, sendo este último uma alternativa eficiente e economicamente viável, com vantagens como alta seletividade, baixa geração de resíduos (Oliveira, et al., 2022; Souza et al., 2024).

Conclusão

As análises de qualidade das amostras de águas dos poços apontaram os parâmetros de STD, Dureza, Cl^- e Na^+ como os principais limitantes para determinados tipos de usos. As águas rasas dos depósitos aluvionares se mostraram impróprias para o consumo humano, com indícios de contaminação por NO_3^- , sem um tratamento adequado essas águas não podem ser destinadas para dessedentação humana. No âmbito do uso doméstico as águas investigadas poderiam ser utilizadas para tarefas de usos menos nobres, como a lavagem de pisos, a descarga sanitária do vaso e a irrigação de algumas plantas a depender da espécie e tipo de solo, assim como indica a aptidão para uso agrícola.

No geral, as águas não apresentaram alto risco de salinização para os solos, necessitando de precauções em seus usos, sendo adequadas para solos bem drenados e arenosos para espécies que apresentem boa tolerância à salinidade. Uma outra atividade que não há tantas restrições para a qualidade da água constatada é a dessedentação animal. Quanto ao uso na indústria as amostras analisadas apresentaram tendência para incrustações por serem muito duras, necessitando assim de tratamentos prévios para serem aplicadas nessa atividade, processo esse que encarece seu uso, assim, a depender do volume de demanda, muitas empresas dispensariam esse custo.

Com a grande abrangência do SAA a maioria das residências e estabelecimentos comerciais possuem ligação com a rede de abastecimento. Os poços cadastrados nessa pesquisa são basicamente obras de captação que foram utilizadas antes da chegada do SAA e que resistiram ao tempo sendo mantidas por seus proprietários e usuários para o uso alternativo e emergencial.

Referências

- Alcalá, F. J., Custodio, E., 2008. Using the Cl/Br ratio as a tracer to identify the origin of salinity in aquifers in Spain and Portugal. *Journal of Hydrology* 359(1-2), 189207, <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2008.06.028>.
- Araripe, P. T., Feijó, F. J., 1994. Carta Estratigráfica da Bacia Potiguar. Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis. Disponível em <https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadas-concluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/5a-rodada-licitacoes-blocos/arquivos/areas->

Outra consideração a ser feita é que o uso das águas subterrâneas por estabelecimentos comerciais e indústrias de médio a grande porte em Mossoró pode ser objeto de estudo, esses usuários costumam demandar um volume considerável de água e buscarem fontes alternativas de abastecimento que geralmente é um poço tubular, nessa pesquisa observou-se uma certa dificuldade para abordar esses usuários por questões burocráticas administrativas das empresas. Uma forma de abordagem direta seria através de fiscalização por meio dos órgãos responsáveis, realizando um cadastro de poços mais abrangente e completo.

Agradecimentos

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) CAPES pelo financiamento por meio dos projetos: PDPG-POSDOC / Programa de Desenvolvimento da Pós-Graduação (PDPG) Pós-Doutorado Estratégico 2912/2022 /88881.691894/2022-01 e AUXPE DS Estaduais 0900/2022 / 88881.719864/2022-01. E Pelo suporte financeiro através da concessão de bolsa de estudos do primeiro autor durante o curso de Mestrado em Geografia. Agradecem também à Universidade do Estado do Rio Grande do Norte (UERN) pelo apoio institucional, ao Laboratório de Geoprocessamento e Cartografia (LABGEO) e ao Laboratório de Eletroquímica e Química Analítica (LEQA) pelo apoio disponibilizado, fundamentais para a realização deste trabalho.

oferecidas/ce_potiguar.pdf. Acesso: 23 jun. 2024.

- Barreto, Y. B., Wahnfried, I. D., Trindade, P. H. D., 2023. Testes de bombeamento e com traçador para determinar confinamento e parâmetros hidráulicos do aquífero Alter do Chão em Manaus. *Geociências* 42(1), 85-95, <https://doi.org/10.3390/geosciences42010085>.
- Beilicci, E., Beilicci, R., 2022. Advanced Hydroinformatic Tools for Modelling of Associated Processes with Water Quality. *Air and Water – Components of the Environment Conference Proceedings*, p. 164-175, https://doi.org/10.24193/awc2022_16.
- Bharanidharan, B., Priyanka, B. N., Kumar, K. R. S., Kumar, M., Srinivas, V. V., Nibgoor, S. R.,

- Kishore, Y. D., 2022. Investigation of groundwater consumption to cope with the inadequate piped water supply in continuous and intermittent supply systems: A case study in Bangalore, India. 2nd International Joint Conference on Water Distribution System Analysis (WDSA) & Computing and Control in the Water Industry (CCWI), <https://doi.org/10.4995/wdsa-ccwi2022.2022.14821>.
- Braga Junior, M. G., Melo, J. G. de, Diniz Filh, J. B., (2017). Comportamento Hidrodinâmico e Hidroquímico do Sistema aquífero Barreiras-Jandaíra-Açu na área da Fazenda Belém, oeste da Bacia Poiguar. *Águas Subterrâneas* 31(3), 222-242.
- Custodio, E., Llamas, M. R., 1983. Noções de hidroquímica. *Hidrología Subterránea*, Vol. 2 (2ªed).
- Dhaswadikar, U. S., 2022. Study of the physiochemical parameters for testing water: A review. *World Journal Of Advanced Research and Reviews*, 14(3), 570–575. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2022.14.3.060>.
- Feitosa, F. A. C., Filho, J. M., Feitosa, E. C., Demetrio, J. G., 2008. Noções de hidroquímica. *Hidrogeologia: Conceitos e Aplicações*, 3ª ed., pp. 325-350.
- Fernandes, M. A. B. et al. A origem dos cloretos nas águas subterrâneas na chapada do Apodi – Ceará. *Águas Subterrâneas*, [S. l.], v. 19, n. 1, 2005. Doi: 10.14295/ras.v19i1.1349. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/1349>. Acesso: 21 jul. 2024.
- Foster, S. C., Hirata, R., Eichholz, M., Alam, M. F., 2022). Urban Self-Supply from Groundwater—An Analysis of Management Aspects and Policy Needs. *Water*, 14(4), 575, <https://doi.org/10.3390/w14040575>.
- Gao, Y., Qian, H., Ren, W., Wang, H., Liu, F., Yang, F., 2020. Hydrogeochemical characterization and quality assessment of groundwater based on integrated-weight water quality index in a concentrated urban area. *Journal of Cleaner Production* 260, 121006, <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.121006>.
- Gomes, M. da C. R., Nascimento, S. A. de M., 2021. Caracterização das águas subterrâneas no Alto Cristalino de Salvador-Bahia com auxílio da estatística multivariada. *Anuário do Instituto de Geociências*, 44. Disponível <https://revistas.ufjf.br/index.php/aigeo/article/view/40600>. Acesso: 12 nov. 2024.
- Hair Jr., J. F., Anderson, R. E., Tatham, R. L., Black, W. C., 1998. *Multivariate data analysis* 5, 5th ed.
- Hem, J. D., 1985. Estudo e interpretação das características químicas da água natural. Departamento do Interior do Serviço Geológico dos EUA.
- Instituto Nacional de Meteorologia. (s.d.). Portal INMET. Recuperado de <https://portal.inmet.gov.br/>.
- Jayarajan S. K. P., Kuriachan L., 2021. Correction to: Exposure and health risk assessment of nitrate contamination in groundwater in Coimbatore and Tirupur districts in Tamil Nadu, South India. *Environ Sci Pollut Res Int*. 28(47), 1 0248-10261, doi: 10.1007/s11356-021-17079-0. 1. doi: 10.1007/s11356-020-11552-y.
- Kom, P. K., Gurugnanam, B., Bairavi, S., 2022. Non-carcinogenic health risk assessment of nitrate and fluoride contamination in the groundwater of Noyyal basin, India. *Geodesy and Geodynamics* 13, 619-631, <https://doi.org/10.1016/j.geog.2022.04.003>.
- La Vigna, F., 2022. Review: Urban groundwater issues and resource management, and their roles in the resilience of cities. *Hydrogeology Journal*, 30(6), 1657–1683. <https://doi.org/10.1007/s10040-022-02517-1>.
- Langelier, W. F., 1936. The analytical control of anti-corrosion water treatment. *Journal of the American Water Works Association*, 28(10), 1500-1521, <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.1936.tb13785.x>.
- Logan, J., 1965. Interpretação de análises químicas de água. U.S. Agency for International Development, p 67.
- Manoel Filho, J., et al., 2010. Avaliação dos recursos hídricos subterrâneos e proposição de modelo de gestão compartilhada para os aquíferos da Chapada do Apodi, entre os estados do Rio Grande do Norte e Ceará. Brasília, Brasil: Agência Nacional de Águas.
- Marcon, A. E., Martins, C. A., Stein, P., 2015. Caracterização das águas subterrâneas do aquífero Jandaíra em subsídio ao programa água doce no Rio Grande do Norte (PAD/RN). *Águas Subterrâneas*. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28357>. Acesso: 11 ma. 2024.

- Matiatos, I., 2016. Nitrate source identification in groundwater of multiple land-use areas by combining isotopes and multivariate statistical analysis: A case study of Asopos basin (Central Greece). *Science of the Total Environment*, 541, 802-814, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.134>.
- MS - Ministério da Saúde, 2021. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. Estabelece os procedimentos de controle e vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União. Disponível: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>. Acesso: 09 fev. 2024.
- Morais, F., et al., 2005. Comportamento das bacias sedimentares da região semi-árida do Nordeste brasileiro: Avaliação do aquífero Açu na borda sul da bacia Potiguar – Trecho: Upanema-Afonso Bezerra. Recife, Brasil: Serviço Geológico do Brasil. Disponível: <https://rigeo.cprm.gov.br/handle/doc/10564>.
- Oliveira, E. S., Alves, C. R., França, A. M., Nascimento, R. F., Sasaki, J. M., & Loiola, A. R. (2022). Zeólita NaA sintetizada sobre fibra de vidro como estratégia para otimização do abrandamento de águas duras. *Química Nova*, 45, 16-22. <https://doi.org/10.21577/0100-4042.20170797>
- Oliveira, F. R., Cardoso, F. B. F., Manoel Filho, J., Kirchheim, R., Feitosa, E., Renck Teixeira, H., Varella Neto, P. L., Gonçalves, M. V. C., Nascimento, F. S., 2012. Gestão compartilhada de águas subterrâneas na chapada do Apodi, entre os estados do Ceará e Rio Grande do Norte. *Águas Subterrâneas*. Disponível: <https://aguassubterraneas.abas.org/assubterraneas/article/view/27730>. Acesso: 19 nov. 2024.
- Peixoto, F. D. S., & Cavalcante, I. N., 2021. Sewage static system influence on the concentrations of nitrogen compounds in unconfined aquifers. *Engenharia Sanitária e Ambiental* 26, 273-281.
- Peixoto, F. da S., Oliveira, J. P. de, Santos, H. D. C. dos., 2021. O Esgotamento Sanitário e Expansão Urbana em Mossoró-RN. *Sociedade E Território* 33(2), 189–211, <https://doi.org/10.21680/2177-8396.2021v33n2ID23413>.
- Peixoto, F. da S., Tôrres, L. M. G., Ferreira, I. C. S., & Silva, A. M. de S. (2021). A city on waters: Use and quality of the groundwater in Mossoró-RN. *Geosaberes* 12(0), 294-307, <https://doi.org/10.26895/geosaberes.v12i0.1114>.
- Peixoto, F. S.; Dias, G. H.. Hidrogeologia da porção oeste da Bacia Potiguar: aspectos quantitativos e problemática para gestão da água subterrânea. IN: Peixoto, F. S.; Guedes, J. A.; Grigio, A. M.; Dias, G. H.; Diodato, M.A. (orgs). *Hidrogeografia e gestão das águas no semiárido*. Mossoró, RN: Edições UERN, 2023.
- Portella, A.Y., Fabianovicz, R., 2017. Bacia Potiguar: sumário geológico e setores em oferta. Disponível: <https://www.gov.br/anp/pt-br/rodadas-anp/rodadasconcluidas/concessao-de-blocos-exploratorios/14a-rodada-licitacoesblocos/arquivos/areasoferta/sumario-potiguar.pdf>. Acesso: 17 jan. 2024.
- PMM - Prefeitura Municipal de Mossoró, 2010. Lei nº 2.621, de 12 de maio de 2010. Dispõe sobre denominação de bairro e dá outras providências. Gabinete da Prefeita: Mossoró, 2010.
- Rahman, A., Mondal, N. C., Tiwari, K. K., 2021 Anthropogenic nitrate in groundwater and its health risks in the view of background concentration in a semi arid area of Rajasthan, India. *Sci Rep* 11, 9279, <https://doi.org/10.1038/s41598-021-88600-1>.
- Rao, N.S.; Dinakar, A.; Kumari, B.K.; Karunanidhi, D.; Kamalesh, T., 2021. Seasonal and spatial variation of groundwater quality vulnerable zones of Yellareddygudem watershed, Nalgonda district, Telangana State, India *Arch. Environ. Contam. Toxicol.* 80 (1), pp. 11-30.
- Richards, L. A., 1954. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils (Agriculture Handbook No. 60). U.S. Department of Agriculture.
- Ryznar, J. W., 1944. A new index for determining amount of calcium carbonate scale formed by a water. *Journal-American Water Works Association* v. 36, n. 4, p. 472-483.
- Serviço Geológico do Brasil. (2005). Aspectos gerais da área do projeto: Projeto Aquíferos da Chapada do Apodi. Disponível: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/8d3286b3-4dac-46dd-b266->

- 98e23b1e0468/attachments/Apodi%20RF%20Volume%20I%20-%20Aspectos%20Gerais.pdf. Acesso: 06 fev. 2024.
- Silva, A. M. S., Peixoto, F. S., 2024. Captação e uso das águas subterrâneas em Mossoró-RN, Brasil. *Agua y Territorio* 24(2), 101-114, <https://doi.org/10.17561/at.24.7084>.
- Silva, C. M. S. V., Santiago, M. M. F., Frischkorn, H., Granjeiro, M. L., Manoel Filho, J., de Miranda, T. S., Mendes Filho, J., 2010. Caracterização Físico-Química das Águas Subterrâneas na Bacia Potiguar. *Águas Subterrâneas*. <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/23025>. Acesso: 13 mai. 2024.
- Souza, C. D. S. e, Souza, R. F. de, & Costa, D. F. da S. (2024). Utilização da estrutura DPSIR para monitorar e identificar as atividades humanas na planície flúviomarinha do rio Apodi-Mossoró, semiárido brasileiro. *Revista Geográfica Acadêmica*, 18(1), 53–68. <https://revista.ufr.br/rga/article/view/7891/4025>
- Tôrres, L. M. G., Silva, A. I. T., Peixoto, F. S., & Silveira, R. N. C. M., 2024. Uso e captação de águas subterrâneas em zonas rurais no semiárido brasileiro. *Planeta Amazônia: Revista Internacional de Direito Ambiental e Políticas Públicas* 16, 95-110. <https://periodicos.unifap.br/index.php/planeta>.
- Unesco, 2022. Relatório Mundial das Nações Unidas sobre o Desenvolvimento dos Recursos Hídricos 2022: águas subterrâneas: tornar visível o invisível. Groundwater: Making the invisible visible UNESCO, Paris.
- Vasconcelos, M. B. (2015). Poços para captação de águas subterrâneas: Revisão de conceitos e proposta de nomenclatura. *Águas Subterrâneas*. Disponível <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/28288>.
- Yang, X., Qu, S., Wang, J., Zhao, Y., Ren X., Dong, S., Yu, R., 2024. Trace element distribution, sources, toxicity risk characteristics associated with lacustrine groundwater discharge in boreal lakes: Implications for the eco-environmental security in the Yellow River Basin, China. *Ecological Indicators* 167 112600, <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2024.112600>
- Zhan, X., Weiting, L., Si C., Rongwen, Y., Chang, Y., Xingjun, Z., Junyi, L., Yangshuang, W., Yunhui, Z., 2021. Machine learning approaches to identify hydrochemical processes and predict drinking water quality for groundwater environment in a metropolis. *Journal of Hydrology: Regional Studies* 58, 102227, <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102227>.
- Zhang, Y., Geißen, S., & Track, T. (2023). *Água na Indústria*. Publicação UWA. <https://doi.org/10.2166/9781789064346>