

Artigos

Avaliação da qualidade da água de dessalinizadores no semiárido do Ceará, Brasil

Assessment of water quality from desalinators in the semiarid of Ceará, Brazil

João Batista dos Santos Gurgel¹; Maria Thereza Rocha Chaves²; Jackson Anderson Sena Ribeiro²; Waleska Martins Eloi²; Rinaldo dos Santos Araújo²;¹ Instituto Agropoulos do Ceará. Fortaleza, CE.² Instituto Federal do Ceará (IFCE), Fortaleza, CE.✉ gurgelsms@hotmail.com, waleska@ifce.edu.br, rinaldo@ifce.edu.br, mtchaves50@gmail.com, jacksonsenaribeiro@gmail.com

Palavras-chave:

Água subterrânea;
Semiárido;
Osmose reversa;
Potabilidade.

Keywords

Groundwater;
Semiarid;
Reverse osmosis;
Potability.

Revisão por pares.

Recebido em: 12/04/2024.

Aprovado em: 10/06/2024.

Resumo

A escassez de recursos hídricos é uma preocupação crescente em diversas regiões do mundo, sendo intensificada em áreas semiáridas. Diante desse desafio, a dessalinização da água surge como uma técnica promissora para suprir a demanda por água potável em diversas comunidades. Nessa perspectiva, esta pesquisa se propõe a investigar a qualidade da água obtida por meio de dessalinizadores nos municípios de Ibaretama e Ibicuitinga, no Sertão Central do estado do Ceará. A base de dados utilizada foi constituída a partir de visitas in loco, laudos e relatórios da qualidade das águas durante os anos de 2020 a 2023 nestas localidades. Para a análise experimental foram utilizados resultados de análises físico-químicas da água bruta dos poços subterrâneos e da água tratada por processo de osmose reversa. Os perfis de qualidade da água bruta e das águas dessalinizadas foram obtidos segundo o método de Logan e a partir dos diagramas de Piper das amostras. O monitoramento da qualidade das águas foi executado para os parâmetros de: Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Fe, Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, condutividade elétrica, pH e turbidez. Os resultados mostraram que todas as amostras de água bruta não atenderam a legislação brasileira quanto a potabilidade, enquanto todas as amostras dessalinizadas apresentaram-se em conformidade. Em geral, os dessalinizadores apresentaram elevada eficiência na remoção de sais produzindo água adequada para o consumo humano segundo as características físico-químicas avaliadas.

Abstract

The scarcity of water resources is a growing concern in several regions of the world, being intensified in semiarid areas. Faced with this challenge, water desalination emerges as a promising technique to meet the demand for drinking water in several communities. In perspective, this research aims to investigate the quality of water obtained through desalination plants in the cities of Ibaretama and Ibicuitinga in the Central Sertão of the state of Ceará. The database was created from onsite visits, reports and water quality reports from 2020 to 2023 in these municipalities. For the experimental analysis, results from physical-chemical analyses of raw water from underground wells and water treated by the reverse osmosis process were used. The quality profiles of raw water and desalinated water were obtained according to the Logan method and from the Piper diagrams of the samples. Water quality monitoring was carried out for the parameters of Na⁺, K⁺, Ca⁺⁺, Mg⁺⁺, Fe, Cl⁻, CO₃²⁻, HCO₃⁻, SO₄²⁻, NO₃⁻, NO₂⁻, electrical conductivity, pH, and turbidity. The results showed that all raw water samples did not comply with Brazilian legislation regarding potability, while all desalted samples were in compliance. In general, desalination plants showed high efficiency in removing salts and producing water suitable for human consumption according to physical-chemical characteristics evaluated.

DOI: <http://doi.org/10.14295/ras.v38i1.30266>

1. INTRODUÇÃO

O Estado do Ceará, situado em uma região caracterizada pelo clima semiárido típico do bioma Caatinga, enfrenta desafios ambientais significativos que impactam tanto seus ecossistemas naturais quanto suas estruturas sociais. A ocorrência frequente de prolongados períodos de estiagem é uma das principais características dessa região (Brandão; Freitas, 2014). As crises hídricas recorrentes estão intimamente ligadas à irregularidade espacial e temporal das chuvas, concentradas principalmente nos meses de fevereiro a maio. Além disso, a elevada taxa de evaporação na área

dificulta o armazenamento de água entre os períodos chuvosos (Barros, 2019; Brasil, 2012).

A qualidade de vida das comunidades rurais no semiárido brasileiro é diretamente influenciada pela disponibilidade de recursos naturais, como a água. Nesses locais, a implementação de soluções alternativas de abastecimento, como dessalinizadores e cisternas, têm contribuído para melhorar o acesso a água potável de qualidade (Amaral, Ferreira; Navoni, 2021; Azevêdo, 2015).

Na região Nordeste do Brasil, devido à escassez de água potável, os poços tubulares são uma importante fonte de água. No entanto, a maioria dessas águas apresenta níveis de sais acima dos padrões de potabilidade, sendo frequentemente caracterizadas como águas salinas. Diante disso, a dessalinização por osmose reversa se destaca como um processo eficaz para produzir água de boa qualidade para o consumo humano a partir dessas fontes (Monteiro *et al.*, 2009).

A dessalinização por osmose reversa (OR) é uma tecnologia consolidada e em constante evolução, essencial para mitigar a escassez de água doce em regiões áridas. Faria-Díaz *et al.* (2021) destacam a integração da OR com tecnologias de dessalinização térmica e energias renováveis como uma estratégia promissora para reduzir o consumo de energia e a produção de salmoura. Karabelas *et al.* (2017) ressaltam a importância da eficiência das bombas de alta pressão e dos dispositivos de recuperação de energia, bem como das características de permeabilidade e antiincrustação das membranas de OR. A sustentabilidade da dessalinização por OR também é uma preocupação crescente, com atenção especial voltada para as práticas de manejo do rejeito e as instalações de captação de água bruta, que tendem a dominar a avaliação da sustentabilidade nos próximos anos.

A existência de tecnologias para dessalinização da água despertou o interesse do Governo Federal Brasileiro, por meio do Ministério do Meio Ambiente (Brasil, 2012) e outras instituições federais, estaduais e organizações da sociedade civil, de forma que em 2004 foi formulado e implementado em âmbito nacional, o "Programa Água Doce" (PAD).

A dessalinização no Brasil, especialmente na região Nordeste e no estado do Ceará, tem se mostrado uma alternativa viável para o abastecimento de água em áreas afetadas pela escassez hídrica. Haguenauer *et al.* (2019) discutem as oportunidades e desafios para a aplicação de sistemas de dessalinização integrados a energias renováveis no semiárido brasileiro, destacando o potencial para a implementação de unidades híbridas fotovoltaicas e eólicas.

Conforme Pereira *et al.* (2021), no Ceará, a necessidade de segurança hídrica levou ao desenvolvimento de projetos de dessalinização em larga escala, visando a produção de água dessalinizada para atender à demanda crescente da população e do turismo. Além disso, estudos como o de Kreis *et al.* (2023) sobre aquíferos cristalinos não confinados no estado do Ceará fornecem insights importantes sobre o ciclo hidrológico que podem influenciar a gestão da dessalinização. Essas pesquisas são fundamentais para o planejamento e a implementação de tecnologias de dessalinização que sejam ambientalmente sustentáveis e economicamente viáveis. O Estado do Ceará é dividido em 14 regiões de planejamento, a saber: Cariri, Centro Sul, Grande Fortaleza, Litoral Leste, Litoral Norte, Litoral Oeste/Vale do Curu, Maciço de Baturité, Serra da Ibiapaba, Sertão Central, Sertão de Canindé, Sertão dos Crateús, Sertão dos Inhamuns, Sertão de Sobral e Vale do Jaguaribe (IPECE,

2015) e dados do PAD no território cearense mostram a implantação de 252 sistemas de dessalinização em 44 municípios destas diversas regiões, sendo 24 dessalinizadores distribuídos em 13 municípios do sertão central cearense.

A qualidade da água é uma preocupação para as comunidades em regiões áridas, como o Sertão Central do Ceará. Nesse contexto, a dessalinização emerge como uma tecnologia para fornecer acesso à água potável na região, mitigando os impactos da escassez hídrica. Destaca-se a importância do monitoramento dos parâmetros de qualidade da água, indispensável para avaliar se o recurso está adequado para o consumo humano, pois altos níveis de sais podem causar diversos problemas de saúde.

Nestes contextos, este estudo visa investigar a qualidade da água produzida por dessalinizadores no Sertão Central do estado do Ceará, avaliando a conformidade desta água com os padrões de potabilidade estabelecidos na legislação brasileira, por meio da Portaria GM/MS Nº 888 de 4 de maio de 2021.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

Para esta pesquisa foram selecionados os municípios de Ibaretama e Ibicuitinga, os quais estão localizados na região central do estado do Ceará com áreas territoriais aproximadas de 879,2 km² e 423,8 km² e populações de 11956 e 11611 habitantes respectivamente, segundo o censo do IBGE (2022).

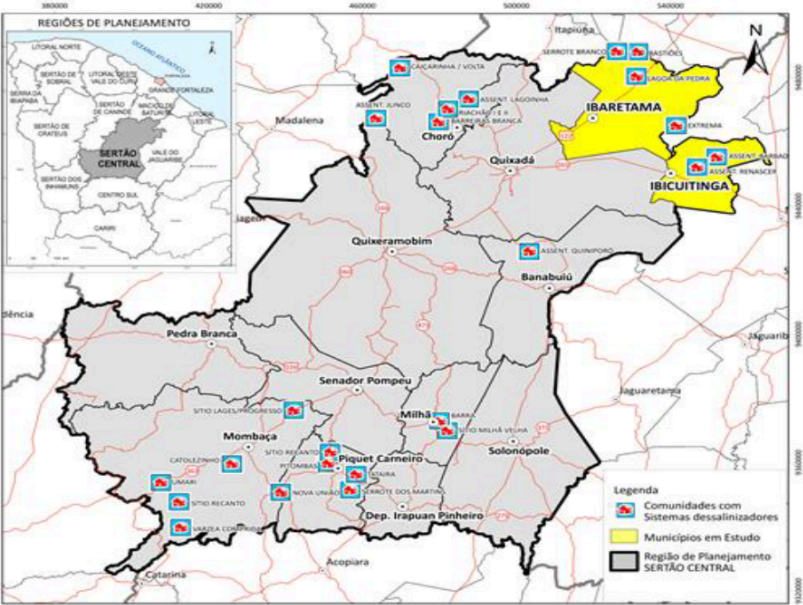
O sertão central cearense (Figura 1) apresenta relevo predominantemente plano e aberto com serras pouco elevadas ou muito abruptas, sendo composto por depressões sertanejas e maciços residuais (Rabelo *et al.*, 2022). Já o clima caracteriza-se como tropical quente semiárido, apresentando precipitação média de aproximadamente 793 mm concentrada entre os meses de janeiro a abril. A temperatura média varia entre 24° C e 28° C e a vegetação é representada por caatinga arbustiva densa, caatinga arbustiva fechada, caatinga arbustiva aberta, floresta caducifólia espinhosa, floresta mista dicotillo-palmácea e floresta subcaducifólia tropical pluvial (Gomes, Medeiros, Alburquerque, 2010).

Cajazeiras (2020) descreve que em Ibaretama/CE, os aquíferos aluvionar, coberturas Indiferenciadas e fraturado são cruciais para o armazenamento de águas subterrâneas. O aquífero fraturado, abrangendo 85% da área municipal com 745,01 km² é o mais extenso, sendo formado por rochas pré-cambrianas como gnaisses, xistos e granitos, sua recarga ocorre via precipitação e infiltração dos sedimentos aluvionares. Com uma vazão de 2,5 m³/h, o aquífero fraturado sustenta cerca de 200 habitantes, sendo estratégico contra a seca e estiagem. A dessalinização é recomendada devido à alta salinidade das águas. Já

Ibicuitinga é caracterizada por três domínios hidrogeológicos principais: rochas cristalinas, coberturas sedimentares e depósitos aluvionares. As rochas cristalinas predominam na região e constituem o aquífero fissural. Neste sistema, a água subterrânea é armazenada em reservatórios pequenos e

descontínuos criados pelas fraturas nas rochas. Os poços nesse domínio hidrogeológico tendem a apresentar baixa vazão e a qualidade da água é frequentemente afetada pela salinização, um fenômeno influenciado pelas condições climáticas locais (Oliveira; Feitosa, 1998).

Figura 1 - Localização dos dessalinizadores no Sertão Central do Ceará, Brasil



Fonte: COINF/SRH (2024)

Particularmente, as cidades selecionadas encontram-se inseridas no sertão central cearense em uma região de clima semiárido, sendo a caatinga, a vegetação predominante (SRH, 2024). A maior parte da população vive na zona rural, tem renda baseada na agricultura familiar com criação de caprinos, ovinos e pequenos comércios. Conforme Cajazeiras (2020), a municipalidade de Ibaretama apresenta um total de 105 poços tubulares devidamente registrados, dos quais 5 (4%) foram identificados como obstruídos de forma irreversível. Adicionalmente, 20 poços (16%) permanecem desativados ou aguardam instalação, enquanto os 100 poços restantes (80%) estão em pleno funcionamento. É pertinente destacar que a gestão pública detém a posse majoritária desses poços, totalizando 92 unidades (73,6%), enquanto a iniciativa privada é responsável por 32 poços (25,6%). Ainda, segundo Cajazeiras (2020), aproximadamente um terço da população de Ibaretama reside em localidades com escassez de abastecimento hídrico, o que representa um obstáculo ao desenvolvimento socioeconômico da região. A questão hídrica no município de Ibicuitinga é uma temática

complexa e de extrema relevância, especialmente considerando o contexto semiárido em que se insere. De acordo com o Atlas da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH) de 2024, Ibicuitinga possui uma variedade de poços que são utilizados para a captação de água subterrânea, essencial para o abastecimento da população e para a irrigação na agricultura. Os poços rasos são do tipo rasos, também conhecidos como cacimbas, que acessam águas mais superficiais e profundos ou artesanais, que alcançam os aquíferos mais profundos. A quantidade e a distribuição desses poços são determinadas pela demanda hídrica da população e pelas características geológicas da região. A situação dos poços é monitorada constantemente visando avaliar a qualidade e a vazão da água. Em termos de propriedade, há uma divisão entre poços públicos, gerenciados pelo poder municipal ou estadual, e poços privados, em sua maioria utilizados para fins agrícolas ou por residências que não têm acesso à rede pública de água. O município de Ibicuitinga conta com 114 poços tubulares, sendo destes 10 instalados na sede do município e o restante na sua zona rural (COGERH, 2024).

2.2. Monitoramento dos parâmetros físico-químicos

O monitoramento da qualidade de água, com coleta, transporte e análises físico-químicas foi realizado por um serviço terceirizado. Todos os dados e informações gerados nos processos de monitoramento e de manutenção dos sistemas implantados foram encaminhados ao Banco de Dados do Programa Água Doce e disponibilizados para esta pesquisa a partir de permissão oficial da Coordenadoria de Infraestrutura (COINF/SRH), órgão gestor responsável. Os dados das amostras de água bruta e do permeado (água dessalinizada por osmose reversa) foram coletados e arquivados entre 2020 e 2022 e tabulados para a realização desta pesquisa.

Em tempo, o presente estudo focou na avaliação da qualidade da água nos assentamentos Extrema e Serrote Branco, localizados em Ibareta e Barbadinha e Renascer, em Ibicuitinga. Para a análise foram selecionados os laudos de doze amostras de água, coletadas de quatro poços profundos, dois em cada município, nos meses de novembro de 2020, fevereiro de 2021 e março de 2022. A qualidade da água foi avaliada antes (água bruta) e após o processo de dessalinização (água tratada). É importante ressaltar que todos os poços estavam equipados com sistemas de dessalinização ativos do Programa Água Doce, operando eficientemente durante o período de coleta das amostras.

Os dessalinizadores possuem sistema de pré-tratamento composto por um conjunto de filtros de cartucho. A água bruta segue por meio de uma tubulação para a bomba principal (booster) de alta pressão, que por sua vez a joga (entrada) nos vasos permeadores que contêm um conjunto de até seis membranas de alta retenção de sais e microrganismos. A outra extremidade do conjunto de vasos permeadores contém duas saídas, sendo uma de água do permeado (água doce) e outra de água do concentrado (rejeito). A água do permeado é direcionada para uma caixa d'água com capacidade para 5.000 L, a qual é conectada a um chafariz eletrônico para fornecimento da água tratada a população. A água do

rejeito é direcionada para outra caixa d'água de 5.000 litros e para um cocho de dessedentação animal. Quando o reservatório do rejeito e o cocho estão cheios, o excedente de líquido é enviado para um tanque de contenção. As membranas de separação em poliamidas usadas têm vida útil média de 6 anos, mas esse período é determinado pela qualidade da água de alimentação, presença de antincrustantes, limpeza, manutenção e operação dos sistemas. Os dessalinizadores utilizam filtros em polietileno de 5 µm no pré-tratamento, evitando assim problemas como a incrustação e bioincrustação. O processo requer ainda o uso de um antincrustante (Flocon® 260), o qual é aplicado por uma bomba dosadora diretamente nos vasos permeadores, evitando que os sais se prendam na superfície, causando a saturação das membranas. As partículas do antincrustante não conseguem passar pelas membranas, sendo eliminadas juntamente com o rejeito. O equipamento possui ainda um sistema automático de cloração para garantir a qualidade final da água fornecida. A água dessalinizada é utilizada principalmente para o fornecimento de água potável para a população, sendo comum que em regiões semiáridas a água dessalinizada seja usada para consumo humano, agricultura de pequena escala e necessidades domésticas.

Os resultados encontrados foram comparados com a Portaria GM/MS nº 888 de 04 de maio de 2021 (Brasil, 2021) que dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água e estabelece um valor máximo permitido (VMP) para parâmetros da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade e com a Resolução Conama nº 396/2008, a qual dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas (BRASIL, 2008).

2.3. Caracterização analítica

As análises de caracterização físico-química e microbiológica encontram-se descritas na Tabela 1. Todas as análises seguiram os métodos oficiais descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017).

Tabela 1 – Métodos de caracterização físico-química e microbiológica das águas oriundas dos poços e dessalinizadores estudados

Parâmetro	Unidade	Princípio analítico	Método
Na ⁺	mg/L	Fotometria de chama	SMWW – 3500 B
K ⁺	mg/L	Fotometria de chama	SMWW – 3500 B
Ca ⁺⁺	mg/L	Titulometria de complexação com EDTA	SMWW – 3500 B
Mg ⁺⁺	mg/L	Titulometria de complexação com EDTA	SMWW – 3500 B
Fe	mg/L	Espectrofotometria	SMWW – 3500 B
Cl ⁻	mg/L	Titulação com nitrato de prata	SMWW – 4500 B
CO ₃ ²⁻	mg/L	Volumetria de neutralização	SMWW – 2320 B
HCO ₃ ⁻	mg/L	Volumetria de neutralização	SMWW – 2320 B
SO ₄ ²⁻	mg/L	Turbidimétrico	SMWW – 4500 E
NO ₃ ⁻	mg/L	Espectrofotométrico	SMWW – 4500 B
NO ₂ ⁻	mg/L	Colorimétrico	SMWW – 4500 B
CE	µs/cm	Análise eletrométrica direta	SMWW – 2510 B
pH	-	Análise eletrométrica direta	SMWW – 4500 B
TU	uT	Nefelometria	SMWW – 2130 B
Coliformes totais e <i>Escherichia Coli</i>	NMP/100 mL	Determinação pela técnica do substrato enzimático	SMWW – 9223 B

2.4. Balanço iônico das águas

Em uma análise hidroquímica completa, a concentração total de íons positivos (cátions) deve ser aproximadamente igual à concentração de íons negativos (ânions), sendo o desvio percentual dessa igualdade determinado pelo coeficiente de erro da análise. O balanço iônico (BI) foi definido a partir da estatística de Logan (1965), descrito na Equação 1 (BI).

$$BI (\%) = \left[\frac{r \sum \text{ânions} - r \sum \text{cátions}}{r \sum \text{ânions} + r \sum \text{cátions}} \right] \times 100 \quad (1)$$

O balanço iônico (BI) fica definido quando se verifica que a soma dos ânions é aproximadamente igual à soma dos cátions em mEq/L, resultando em um coeficiente de erro máximo de 10% (Logan, 1965), o qual foi adotado como referência de caracterização e aceitação neste estudo.

2.5. Classificação iônica das águas subterrâneas

Para a classificação iônica das águas coletas e tratadas foi utilizado o Diagrama de Piper. Neste diagrama os valores dos principais constituintes estão representados em unidades percentuais a partir de cátions e ânions, permitindo uma identificação das fácies hidroquímicas. O losango situado entre os 8 triângulos dos cátions e dos ânions representa a composição conjunta dos cátions e ânions que irá permitir uma correlação com o tipo litológico representativo do sistema aquífero. O tipo de

água resulta da proporção dos principais constituintes dissolvidos (Piper, 1944).

Para a maior parte das águas subterrâneas naturais, Hem (1985) estabeleceu uma relação do tipo:

$$STD = \epsilon \times CE \quad (2)$$

Onde: STD é a concentração de sólidos dissolvidos (mg/L), CE é a condutividade elétrica (µS/cm) e ϵ a constante de proporcionalidade relacionada as características físico-químicas da água em estudo.

Segundo Custodio e Llamas (1983) a condutividade elétrica (CE) guarda uma estreita relação com STD a 18 °C, sendo o valor de ϵ adotado por estes autores de 0,74. Para águas onde os íons dominantes são HCO₃⁻ e Cl⁻ o valor é normalmente inferior a 0,55. O software QualiGraf calcula os STD (sólidos totais dissolvidos) empregando um valor de 0,65 (ϵ); considerado bom para a região Nordeste, tipicamente de clima quente (Hem, 1985).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Caracterização dos poços e dessalinizadores

Os dados dos poços, números de famílias beneficiadas, capacidade dos equipamentos dos sistemas de dessalinização deste estudo estão descritos na Tabela 2.

Tabela 2 - Caracterização dos poços e dessalinizadores no Sertão Central do Ceará

Município		Ibaretama		Ibicuitinga	
Comunidade		Extrema	Serrote Branco	Barbadinha	Renacer
Nº de famílias atendidas		41	25	22	47
Coordenadas dos poços	S	04°50'23,36"	04°37'50,01"	04°56'00,33"	04°57'50,06"
	W	38°37'31,11"	38°45'51,84"	39°44'22,97"	38°34'26,47"
Dados do poço	Profundidade (m)	56	52	42	42,5
	Vazão (m³/h)	2,9	4	6	2,9
	Capacidade (L/h)	800	400	400	800
Sistema de dessalinização	Vazão Alimentação (L/h)	2.300	1.140	1.200	2.350
	Concentração	1.500	740	800	1.550
	Recuperação (%)	34,8%	35,1%	33,3%	33,3%

Na Tabela 2 verifica-se que nos municípios avaliados, e suas respectivas localidades, um quantitativo de 135 famílias é beneficiado com o sistema de dessalinização do PAD, notadamente em uma região onde a disponibilidade hídrica é crítica. A água proveniente desses sistemas é essencial para a subsistência das comunidades locais, e o acesso a água potável envolve além da sobrevivência questões socioeconômicas. Os poços que abastecem os sistemas de dessalinização do PAD no sertão central cearense têm profundidade média de 55 m e vazão variando entre 1,0 m³/h a 12 m³/h. Os dessalinizadores de 400 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 35% e possuem dois filtros de cartucho no pré-tratamento e duas membranas. Os dessalinizadores de 800 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 40% e possuem três filtros de cartucho para o pré-tratamento e quatro membranas. Os dessalinizadores de 1200 L/h foram projetados para operar com recuperação média de 45% e possuem quatro filtros de cartucho no pré-tratamento e seis membranas. O processo de osmose reversa remove sólidos totais dissolvidos (STD) com concentrações acima de 45.000 mg/L, podendo ser aplicado eficientemente na dessalinização de águas salinas e salobras (Younos; Tulou, 2005).

Ressalta-se que a baixa vazão dos poços no Sertão Central

Cearense pode ser explicada por uma série de fatores hidrogeológicos e ambientais característicos da região. O sertão central é uma área semiárida com um clima predominantemente quente e seco e uma vegetação típica de caatinga. Os solos, embora propícios à agricultura de subsistência, são frequentemente rasos e pedregosos, com afloramentos rochosos que limitam a infiltração da água e, consequentemente, a recarga dos aquíferos. Além disso, a região é marcada pela presença de rochas do embasamento cristalino que possuem baixo potencial hidrogeológico devido as suas baixas porosidade e permeabilidade. Isso significa que os aquíferos fraturados, que são os mais comuns na área, têm uma capacidade limitada de armazenar e transmitir água. As águas subterrâneas, quando presentes, são encontradas em fraturas e fissuras das rochas, mas esses reservatórios são tipicamente descontínuos e apresentam vazões reduzidas (Oliveira, 2016; Barbat, 2018).

3.2. Análises físico-químicas das amostras de água bruta

As Tabela 3 e 4 apresentam os resultados das análises físico-químicas das amostras de água bruta e de água tratada (dessalinizada) dos poços nos municípios de Ibaretama e Ibicuitinga, respectivamente, ao longo dos 3 anos de monitoramento (2020 a 2022).

Tabela 3 - Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas e tratada dos poços em estudo no município de Ibareta, Ceará, nos anos de 2020 a 2022

Parâmetro	Local / Mês.Ano												VMP (mg/L)
	Comunidade Extrema						Comunidade Serrote Branco						
	11.2020		02.2021		03.2022		11.2020		02.2021		03.2022		
	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	
Na ⁺ (mg/L)	854,00	14,10	1800,00	17,20	1250,00	23,90	950,00	17,20	2810,00	21,90	737,00	45,60	200
K ⁺ (mg/L)	6,60	1,00	7,20	1,00	9,10	1,00	28,90	1,00	22,20	1,00	33,10	1,80	-
Ca ⁺⁺ (mg/L)	1618,35	39,59	948,31	8,25	810,42	2,00	1714,27	8,36	2043,60	2,00	892,62	2,00	-
Mg ⁺⁺ (mg/L)	1399,98	28,97	2089,90	65,23	1409,51	9,62	1387,74	25,10	1900,65	25,97	2022,64	2,00	-
Cl ⁻ (mg/L)	2553,38	37,13	4857,29	42,51	2432,07	33,63	3274,03	43,96	6791,15	40,85	2895,49	84,52	250 ^a ; 100-700 ^b
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	2,00	2,00	10,00	10,00	2,00	2,00	2,00	2,00	10,00	10,00	2,00	2,00	-
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	336,84	25,16	336,41	28,55	292,50	13,93	135,90	15,10	149,58	14,06	120,24	9,77	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	47,72	10,00	43,45	10,00	43,23	10,00	264,56	10,00	332,58	10,00	258,46	10,00	250 ^a ; 1000 ^c
NO ₃ ⁻ (mg/L)	15,22	0,10	17,18	0,10	13,67	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	1,00	0,10	10 ^a ; 90 ^c
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1,0 ^{a,b} ; 10 ^c
Fe (mg/L)	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	4,44	0,10	3,62	0,10	0,10	0,10	0,3 ^a ; 5,0 ^b
CE (µS/cm)	9105,00	123,50	9295,00	100,30	9975,00	117,00	8182,00	139,30	8241,00	108,70	9143,00	253,60	-
SDT* (mg/L)	5918,25	80,27	6041,75	65,19	6483,75	76,05	5318,30	90,54	5356,65	70,65	5942,95	164,84	500 ^a
pH	8,30	8,30	8,40	8,90	7,60	7,30	7,30	6,40	7,70	8,30	7,37	8,34	-
TU (uT)	1,41	0,10	0,26	0,21	0,39	0,42	45,53	0,16	95,00	0,29	124,00	0,45	5 uT ^a
BI (%)	49,60	48,49	34,88	49,57	47,89	14,80	41,43	29,76	30,90	25,10	46,48	10,27	-
Classificação iônica	Mista Cloretada	Mista Cloretada	Magnésiana Cloretada	Magnésiana Cloretada	Mista Cloretada	Sódica Cloretada	Magnésiana Cloretada	Magnésiana Cloretada	Mista Cloretada	Magnésiana Cloretada	Magnésiana Cloretada	Sódica Cloretada	-

VMP - Valor Máximo Permitido. ^aÁgua potável conforme Portaria MS 888/2021, ^bÁgua para irrigação conforme CONAMA 396/2008 e ^cÁgua para dessedentação animal conforme CONAMA 396/2008.

*Estimado a partir da Equação 2 (Hem, 1985).

Tabela 4 - Dados físico-químicos, balanço iônico e classificação das águas brutas e tratadas dos poços em estudo no município de Ibicuitinga, Ceará, nos anos de 2020 a 2022.

Parâmetro	Local / Mês.Ano												VMP (mg/L)
	Comunidade Barbadinha						Comunidade Renascer						
	11.2020		02.2021		03.2022		11.2020		02.2021		03.2022		
	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	Água bruta	Água tratada	
Na ⁺ (mg/L)	1172,00	9,80	591,00	51,50	1600,00	70,30	334,00	10,90	2000,00	13,50	1360,00	21,20	200
K ⁺ (mg/L)	13,30	1,00	14,10	1,00	18,90	1,30	21,30	1,00	29,50	1,00	37,40	1,00	-
Ca ⁺⁺ (mg/L)	3044,87	41,02	2289,23	15,50	1931,01	2,00	808,15	40,00	620,12	12,28	548,56	2,00	-
Mg ⁺⁺ (mg/L)	2099,98	19,79	4133,51	63,01	2455,92	17,44	908,15	61,83	1417,43	50,13	1456,63	20,85	-
Cl ⁻ (mg/L)	3651,42	30,11	3847,11	89,44	3613,41	77,97	1021,75	29,91	4347,99	37,46	2023,80	23,80	250 ^a ; 100-700 ^b
CO ₃ ²⁻ (mg/L)	2,00	2,00	10,00	10,00	2,00	2,00	2,00	2,00	10,0	10,00	2,00	2,00	-
HCO ₃ ⁻ (mg/L)	212,41	20,73	140,69	24,41	233,62	3,12	91,40	23,35	170,27	26,27	146,46	14,56	-
SO ₄ ²⁻ (mg/L)	83,11	10,00	64,32	10,00	63,55	54,00	10,00	10,00	17,51	10,00	10,81	10,00	250 ^a ; 1000 ^c
NO ₃ ⁻ (mg/L)	7,31	1,00	12,91	1,13	7,53	0,10	4,78	0,10	17,43	0,10	23,40	0,10	10 ^a ; 90 ^c
NO ₂ ⁻ (mg/L)	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	1,0 ^{ab} ; 10 ^c
Fe (mg/L)	0,16	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,10	0,3 ^a ; 5,0 ^b
CE (µS/cm)	11650,00	359,00	11590,00	260,80	12120,00	219,50	2980,00	98,92	5322,00	94,43	5126,00	81,32	-
SDT* (mg/L)	7572,50	233,35	7533,50	169,52	7878,00	142,67	1937,00	64,30	3459,30	61,38	3331,90	52,86	500 ^a
pH	7,60	7,00	8,00	5,30	6,95	6,00	7,70	7,20	8,00	7,70	7,14	8,30	-
TU (uT)	0,36	0,35	0,33	0,37	0,38	0,38	0,74	0,10	0,31	0,34	0,36	0,51	5 uT ^a
BI (%)	55,30	47,66	62,05	40,71	54,95	14,68	61,93	66,95	30,20	45,01	55,24	39,97	-
Classificação iônica	Mista Cloretada	Mista Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Sódica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Mista Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	Magnesiânica Cloretada	-

VMP - Valor Máximo Permitido. ^aÁgua potável conforme Portaria MS 888/2021. ^bÁgua para irrigação conforme CONAMA 396/2008 e ^cÁgua para dessedentação animal conforme CONAMA 396/2008.

*Estimado a partir da Equação 2 (Hem, 1985).

Os dados da Tabela 3 mostram que as águas brutas dos poços das comunidades Extrema e Serrote Branco no município de Ibareta apresentaram nos anos de 2020 a 2023 altas concentrações de magnésio e cloretos (média de Mg^{2+} de 1.701,74 mg/L e de Cl^- de 3.800,57 mg/L), níveis elevados de sal (média de Na^+ de 1.400,17 mg/L), condutividade elétrica elevada (média de CE de 8990,17 $\mu S/cm$) e pH (médio) de 7,78. As concentrações de SO_4^{2-} , NO_3^- e NO_2^- são baixas quando comparados aos VMP da Portaria GM/MS 888/2021, enquanto os sólidos dissolvidos estimados a partir de Hem (1985) encontram-se muito elevados (média STD de 5843,61 mg/L). As águas na comunidade de Extrema são notadamente límpidas (turbidez < 1,5 uT) e pouco ferrosas (média de Fe de 0,1 mg/L), o que contrasta com os valores médios de 44,43 uT e 1,41 mg/L de Fe na comunidade de Serrote Branco. Os valores elevados turbidez e ferro em Serrote Branco podem estar associado a alguma contaminação do poço no período do estudo.

No município de Ibicuitinga, o monitoramento das águas brutas nos assentamentos de Barbadinha e Renascer também indicou, no período em estudo, altas concentrações de magnésio e cloreto (médias Mg^{2+} de 2078,60,74 mg/L e Cl^- de 3084,25 mg/L), águas salobras com níveis moderados de sal (média de Na^+ de 1176,17 mg/L), condutividade elétrica elevada (média de CE de 8131,33 $\mu S/cm$) e pH (médio) de 7,57. as concentrações de SO_4^{2-} , NO_2^- e Fe são baixas quando comparadas aos VMP da Portaria GM/MS 888/2021, enquanto o NO_3^- (média de 12,23 mg/L) apresentou-se acima do VMP estabelecido pela referida portaria. Os sólidos dissolvidos, tal como observado na cidade de Ibareta, também se apresentaram elevados (média STD de 5285,73 mg/L). As águas em todos os poços de Ibicuitinga são de aspecto límpido (média de Tu de 0,41 uT).

As diferenças significativas nas concentrações de íons após o tratamento por osmose reversa podem ter sido influenciadas por vários fatores que alteram a eficiência de dessalinização, principalmente aqueles associados a qualidade/vida útil da membrana empregada, a pressão e temperatura de operação, o tamanho do íon sob difusão, entre outros aspectos. Além disso, alguns contaminantes na água de alimentação podem afetar diretamente as condições operacionais do dessalinizador, como a taxa de fluxo e a pressão de operação. Para os sistemas de osmose reversa em uso nas cidades investigadas relata-se uma periodicidade de substituição das membranas, o que provavelmente contribuiu para a variabilidade observada nas concentrações das espécies iônicas monitoradas.

Quanto à potabilidade, nenhum dos poços atendeu completamente a legislação vigente, no que se refere aos parâmetros analisados (Na^+ , Fe, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , STD e turbidez), conforme a Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 (Brasil, 2021). Os valores de concentração de Cl^- também desqualificam as amostras em ambas as cidades para irrigação, conforme indicado nas diretrizes da resolução nº 396 de 2008 (Brasil, 2008). Os valores encontrados para

cloreto (Cl^-) nesta pesquisa foram próximos aos relatados por Barros (2019) para águas subterrâneas localizadas na zona rural de Itapipoca-CE, cujos valores variaram entre 1369,6 mg/L a 7557,7 mg/L.

Ademais, nenhum dos poços nas cidades de Ibareta e Ibicuitinga atenderam ao balanço iônico de Logan (1965) para BI, justificando a necessidade de tratamento adequado para as águas dos poços das comunidades nestas localidades.

Os diagramas de Piper das águas brutas nos municípios de Ibareta e Ibicuitinga estão apresentados na Figura .

Segundo o diagrama de Piper, nos poços da cidade de Ibareta 50% das águas brutas são classificadas como "magnesianas cloretadas" e 50% são "mistas cloretadas" (Figura 2a), enquanto 66% das águas brutas de Ibicuitinga são classificadas como "magnesianas cloretadas" e 33% são "mistas cloretadas" (Figura b). Barros (2019) classificou as águas subterrâneas de 8 poços em Itapipoca-CE, usando Diagrama de Piper e observou em sua maioria águas do tipo "sódicas cloretadas". O autor relata que Itapipoca apresenta três domínios hidrogeológicos distintos: rochas cristalinas, coberturas sedimentares e depósitos aluvionares, sendo que as rochas cristalinas predominam na área e representam o que é denominado comumente de aquífero fissural, semelhante ao que se observa nos municípios de Ibareta e Ibicuitinga.

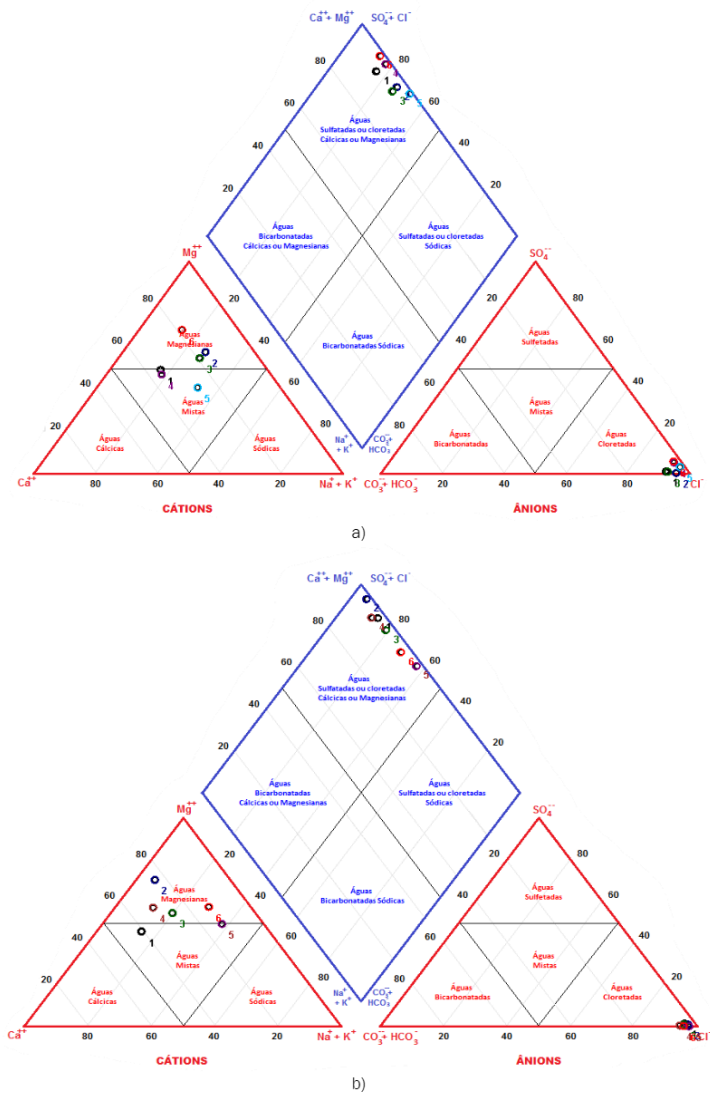
Amaral (2021) empregou o diagrama de Piper para a classificação das águas brutas provenientes de 47 poços tubulares situados no estado do Rio Grande do Norte e os resultados revelaram que mais da metade dos poços (56%) apresentaram águas classificadas como "mistas cloretadas", seguidas por águas do tipo sódica cloretadas (38%), águas mistas (4%) e águas magnesianas cloretadas (2%). No que tange à distribuição de cátions, o estudo de Amaral (2021) constatou que 60% das amostras exibiram uma composição mista de sódio, magnésio e potássio, enquanto a prevalência de sódio foi observada em 38% das amostras e magnésio em apenas 2% das mesmas. Quanto aos ânions, o cloreto predominou em 96% das amostras analisadas, sendo que em apenas 4% dos poços investigados foi identificada uma distribuição mista de íons, incluindo cloreto, sulfato e carbonatos.

Os dados da Tabela 4 mostraram que em todas as amostras de águas dessalinizadas nos municípios de Ibareta e Ibicuitinga as concentrações de Na^+ , Fe, Cl^- , SO_4^{2-} , NO_2^- , NO_3^- , STD e os valores de turbidez são bem inferiores aos VMP estabelecidos na Portaria GM/MS Nº 888 de 4 de maio de 2021 (Brasil, 2021), o que confere potabilidade e indica a boa eficiência do sistema de osmose reversa utilizado. Resultados semelhantes foram encontrados por Bonfim (2020) que analisou a qualidade da água de 9 poços que fizeram uso de dessalinizadores na cidade de Crateús, Ceará, para os parâmetros examinados de alcalinidade, bicarbonato, cálcio, cloreto, condutividade, dureza total,

ferro, fluoreto, magnésio nitrato, nitrato, nitrogênio amoniacal, pH, potássio, sílica, sódio, sólidos totais dissolvidos, sulfato e turbidez. Os resultados mostraram, à exceção de alguns valores de pH, o atendimento aos demais padrões de potabilidade estabelecidos pelo Ministério da

Saúde (Brasil, 2021). Já no que se refere à água subterrânea bruta, o estudo de Bonfim (2020) indicou que apenas um poço apresentava todos os parâmetros de qualidade de água adequados ao consumo humano.

Figura 2 - Diagrama de Piper das águas subterrâneas brutas dos poços nos municípios de Ibareta (a) e Ibicuitinga (b).



Neves *et al.* (2017) caracterizaram amostras de 5 poços na cidade de Pentecoste, Ceará, antes e após o processo de dessalinização por osmose reversa para os parâmetros de pH, condutividade elétrica, Na, K e Ca. Os autores observaram que os dessalinizadores apresentaram alta eficiência na redução da salinidade das águas e relataram que o funcionamento pode resultar em um pH relativamente ácido, abaixo dos níveis recomendados para o consumo humano. Esse comportamento em relação ao pH não foi observado em nenhum dos poços selecionados no presente estudo e as eficiências de dessalinização observadas também foram elevadas, sendo encontrados remoções médias de salinidade (Na^+ , Cl^- e condutividades) superiores a 98% das águas poços em Ibareta e a 97% das águas brutas em Ibicuitinga.

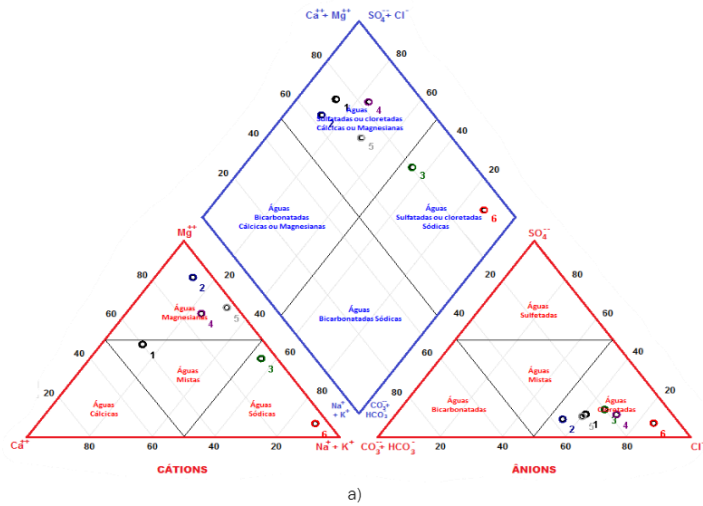
Pinheiro *et al.* (2018) conduziram uma avaliação do processo de dessalinização da água subterrânea na comunidade Caatinga Grande, localizada em São José do Seridó, RN. O estudo abordou uma variedade de parâmetros, incluindo aspectos físicos (pH, condutividade elétrica e salinidade), químicos (nitrato, nitrito, amônia, sódio, potássio e cloretos) e microbiológicos (coliformes totais, termotolerantes e *E. coli*). Os resultados das análises da água provenientes do sistema de dessalinização indicaram que o dessalinizador usado foi eficaz na redução dos parâmetros físico-químicos avaliados, mantendo a água dentro dos padrões de potabilidade estabelecidos. No entanto, a presença de

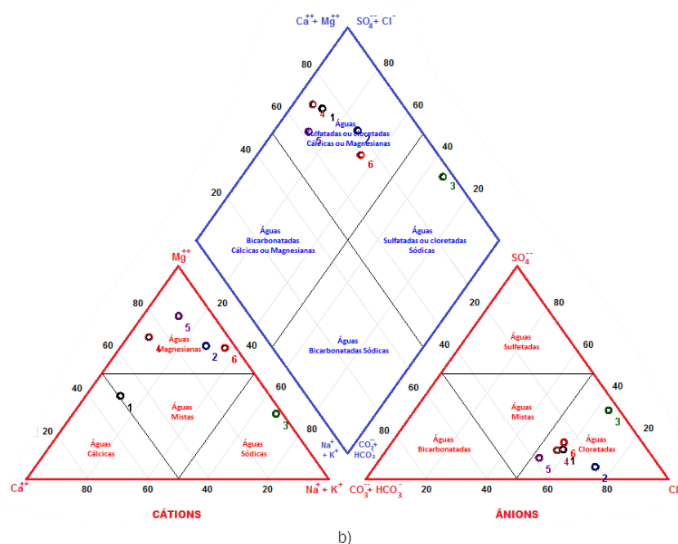
coliformes na água tratada foi relacionada a contaminação microbiológica associada à falta de técnicas adequadas no manuseio e armazenamento da água tratada. Nesta pesquisa a caracterização microbiológica ficou restrita as amostras de água dessalinizada, sendo observado para a cidade de Ibareta na comunidade de Extrema a “presença” de coliformes totais e *E. coli* nas águas tratadas provenientes da coleta de 02.2021 e a “ausência” de ambas as formas microbianas na coleta de 03.2022. Na comunidade de Serrote Branco, ainda em Ibareta, os resultados mostraram a “presença” de coliformes totais e a “ausência” de *E. coli*. Já em Ibicuitinga, na comunidade de Barbadinha, foram observadas presença de coliformes totais e *E. coli* nas águas tratadas da coleta de 02.2021 e a “ausência” das formas microbianas na coleta de 03.2022. Os resultados microbiológicos na comunidade Renascer se destacaram, mostrando “ausência” de coliformes e *E. coli* em toda as amostras tratadas em ambas as datas de coleta.

Estes dados do monitoramento microbiológico, assim como observado por Pinheiro *et al.* (2018) reforçam a necessidade de um rigoroso controle asséptico nos procedimentos de coleta e manipulação das amostras de água a fim de garantir a saúde dos potenciais consumidores.

Os diagramas de Piper das águas dessalinizadas por osmose reversa nos poços dos municípios de Ibareta e Ibicuitinga estão apresentados na Figura 3.

Figura 3 - Diagrama de Piper das águas dessalinizadas dos poços nos municípios de Ibareta (a) e Ibicuitinga (b)





b)

O diagrama de Piper para os poços do município de Ibarretama mostra que, após o processo de dessalinização (Figura 3a), 50% das amostras de água são identificadas como "magnesianas cloretadas", enquanto os outros 50% são de águas classificadas como "cloretadas mistas". Após o tratamento, o cátion predominante detectado nas amostras de água foi o Mg^{++} com frequência de 50%, enquanto o ânion predominante foi o Cl^- com uma prevalência de 100%. Quando aplicada a relação de Hem (1985), a média de concentração de sólidos totais dissolvidos (STD) das amostras de água tratada por osmose reversa foi de 91,26 mg/L, o qual, associado aos demais parâmetros físico-químicos analisados, permite classificá-las, do ponto de vista inorgânico, como "potável", conforme estabelecido na Portaria GM/MS Nº 888 do Ministério da Saúde (MS).

No que concerne às amostras de água dessalinizada do município de Ibiçuitinga (Figura 3b) observa-se que 66% delas são caracterizadas como "magnesianas cloretadas", 17% são identificadas como "cloretadas mistas" e outras 17% como "sódicas cloretadas". Após o tratamento, verificou-se que o cátion Mg^{++} foi o predominante nas águas dessalinizadas com frequência de 67%, enquanto o ânion predominante foi o Cl^- com 100% de prevalência. Semelhante ao observado em Ibarretama, a média de STD (120,68 mg/L) e os valores dos outros parâmetros físico-químicos analisados, permitem classificar, do ponto de vista inorgânico, as águas dessalinizadas dos poços de Ibiçuitinga como "potável".

4. CONCLUSÕES

As águas analisadas apresentam alta mineralização devido a

formação geológica típica do semiárido nordestino e alta residência nos meios em que percolam, o que pode ser constatado pelos valores elevados de condutividade elétrica. A análise de íons nas águas subterrâneas dos poços nos dois municípios e suas 4 localidades em estudo no sertão central cearense ratificam três tipos hidroquímicos dominantes: água "magnesianas cloretada", água "mistas cloretadas" e água "sódica cloretada".

Particularmente, em todas as amostras brutas dos poços foram observadas elevadas concentrações de sódio e magnésio, caracterizando-as como impróprias para o consumo humano. O Mg^{++} foi o cátion predominante nas águas de todos os poços em estudo, enquanto o cloreto foi o ânion prevalente.

As águas permeadas ou tratadas para remoção de sais, por sua vez, apresentaram em sua maioria, baixa mineralização resultante do processo de dessalinização por osmose reversa. A classificação das mesmas como "água potável" foi confirmada a partir da Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021 do Ministério da Saúde.

Em geral, o sistema de osmose reversa desenvolvido apresentou elevada eficiência de operação durante o período do estudo nas localidades monitoradas. Em tempo, destaca-se o impacto social às centenas de pessoas atendidas com água de boa qualidade é considerável (e inegável) nos seus aspectos de saúde e desenvolvimento humano, porém é necessário que se considere em uma análise técnica mais profunda os contextos de natureza econômica, custos de manutenção, rotinas de monitoramento, longevidade e

sustentabilidade das execuções, os quais não foram investigados nesta pesquisa.

REFERÊNCIAS

- AMARAL, K. D. S. *Sistemas de dessalinização do semiárido do Rio Grande do Norte: percepção social e avaliação da qualidade da água para atividades agropecuárias*. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Centro de Ciências Biológicas, Programa de Pós-graduação em Desenvolvimento e Meio Ambiente (PRODEMA). Tese de Doutorado. Natal, RN, 2021. 165p.
- AMARAL, K.; FERREIRA, D. M.; NAVONI, J. A. Avaliação das águas subterrâneas salobras do semiárido do Rio Grande do Norte: qualidade e impactos sob atividades agropecuárias de subsistência. *Águas Subterrâneas*, v. 35, n. 3, e-30077, 2021. <https://doi.org/10.14295/ras.v35i3.30077>
- APHA. *Standard methods for the examination of water and waste water*. American Public Health Association, Washington, 23 Edition, 2017.
- AZEVEDO, A. C. Verso e reverso das políticas públicas de água para o semiárido brasileiro. *Revista Política e Planejamento Regional*, v. 2, n. 2, p. 373-392, 2015.
- BARBATI, D. O. *Hidrogeologia do semiárido Cearense*. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo, Instituto de Geociências, 2018. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/44/44138/tde-30052019-131248/pt-br.php>. Acesso em: 29 maio 2024.
- BARROS, I. B. B. F. *Paralisação e desperdício: um estudo sobre a qualidade da água de poços inutilizados no município de Itapipoca/CE*. 148 f. Dissertação (Mestrado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Centro de Ciências, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2019. <https://doi.org/10.14295/ras.v33i4.29745>
- BONFIM, F. *Qualidade das águas de abastecimento do município de Crateús - CE, nos anos de estiagem: águas naturais, dessalinizadas e rejeito salino*. 2020. 156p. Tese (Doutorado em Desenvolvimento e Meio Ambiente) - Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- BRANDÃO, R. D. L.; FREITAS, L. C. B. *Geodiversidade do estado do Ceará*. Fortaleza: CPRM, 2014. 214p. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/100192/5/1/Geodiversidadep37.pdf>. Acesso em: 05 mar. 2024.
- BRASIL. *A Questão da Água no Nordeste*. Centro de Gestão e Estudos Estratégicos, Agência Nacional de Águas. - Brasília, DF: CGEE, 2012. Disponível em: <https://livroaberto.ibict.br/bitstream/1/669/4/A%20quest%C3%A3o%20da%20%C3%A1gua%20no%20Nordeste.pdf>. Acesso em: 08 fev. 2024.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Ministério do Meio Ambiente. *Resolução Conama nº 396/2008*: dispõe sobre a classificação e diretrizes ambientais para o enquadramento das águas subterrâneas e dá outras providências. Brasília: CONAMA, 2008.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Gabinete do Ministro. *Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021*. Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Diário Oficial da União, Brasília, DF, 07 mai. 2021, seção 1, ed.85, p. 127.
- CAJAZEIRAS, C. C. A. *Análise da vulnerabilidade e risco à escassez hídrica no semiárido: caso de estudo Ibaratama/CE*. Tese (Doutorado em Geologia) - Departamento de Geologia, Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2020.
- CEARÁ. Secretaria do Planejamento e Gestão (SEPLAG). *Perfil da Macrorregião do Sertão Central*. Disponível em: <https://www.seplag.ce.gov.br/wp-content/uploads/sites/14/2011/05/Perfil-Regional-Sertao-Central.pdf>. Acesso em: 31 maio 2024.
- COGERH. *Atlas dos Recursos Hídricos do Ceará 2024*. Disponível em: <http://portal.cogerh.com.br>. Acesso em: 30 maio 2024.
- COINF/SRH. *Mapa da Qualidade da Água no Sertão Central do Ceará*. 2024.
- CUSTODIO, E.; LLAMAS, M. R. *Hidrologia subterránea*. 2 ed. Barcelona: Omega S/A, v. 2, 1983.
- FERIA-DÍAZ, J. J.; CORREA-MAHECHA, F.; LÓPEZ-MÉNDEZ, M.C.; RODRÍGUEZ-MIRANDA, J.P.; BARRERA-ROJAS, J. Recent desalination technologies by hybridization and integration with reverse osmosis: A review. *Water*, v. 13, n. 10, p. 1369, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13101369>
- FUNCEME. *QualiGraf*: Ferramenta para análise gráfica da qualidade de amostras d'água. Disponível em: <https://qualigraf.funceme.br/>. Acesso em: 10 out. 2023.
- GOMES, D. D. M.; MEDEIROS, C. N.; ALBUQUERQUE, E. L. S. *Análise tempo-espacial das ocorrências de focos de calor no estado do Ceará: configuração dos cenários no contexto das unidades fitogeográficas e das Macrorregiões de Planejamento*. Texto para Discussão - IPECE, Fortaleza, n. 90, p. 1-28, 2010.
- HAGUENAUER, G. M.; SILVA, G. D. P. da; SHARQAWY, M. H.; NETO, S. de A.; VIANA, D. de B.; FREITAS, M. A. V. de. Current and future opportunities for renewable integrated desalination systems in the Brazilian semiarid region. *Desalination and Water Treatment*, v. 166, p. 279-295, 2019. <https://doi.org/10.5004/dwt.2019.24472>
- HEM, J. D. *Study and interpretation of the chemical characteristics of natural water*. Department of the Interior, US Geological Survey, 1985.
- IBGE. *Classificação e caracterização dos espaços rurais e urbanos do Brasil: uma primeira aproximação*. Coordenação de Geografia. Rio de Janeiro: IBGE, p. 84, 2022.
- IPECE. Instituto de Pesquisa e Estratégia Econômica do Ceará. *As regiões de planejamento do estado do Ceará*. Secretaria do Planejamento e Gestão. Fortaleza: 2015. p. 33.
- KARABELAS, A. J.; KOUTSOU, C. P.; SIOUTOPOULOS, D. C.; PLAKAS, K. V.; KOSTOGLU, M. *Desalination by Reverse Osmosis*. In: Figoli, A., Criscuoli, A. (eds) Sustainable Membrane Technology for Water and Wastewater Treatment. Green Chemistry and Sustainable Technology. Springer, Singapore, 2017. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5623-9_6
- KREIS, M. B.; TAUPIN, J. D.; LACHASAGNE, P.; MARTINS, E. Transpiration from crystalline unconfined aquifers as the cause of groundwater salinization in a semiarid area of Brazil. *Hydrogeol. J.*, v. 32, n. 3, p. 739-758, 2023. <https://doi.org/10.1007/s10040-023-02755-x>
- LOGAN, J. *Interpretação de análises químicas da água*. Trad. LEMOS, A. M. Recife: U. S. Agency for International Development, 1965. 75 p.
- MONTEIRO, G.; SILVA, J. N.; LÔBO, H. Simulação e análise de sistema de dessalinização via osmose inversa: Considerações para análise da qualidade da água. *Enciclopédia Biosfera*, v. 5, n. 8, 2009.
- NEVES, A. L. R.; ALVES, M. P.; LACERDA, C. F. D.; GHEYI, H. R. Aspectos socioambientais e qualidade da água de dessalinizadores nas comunidades rurais de Pentecoste-CE. *Revista Ambiente & Água*, v. 12, p. 124-135, 2017. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1722>
- OLIVEIRA, F. V. C. DE; FEITOSA, F. A. C. *Diagnóstico do Município de Ibicuitinga*. Programa de Recenseamento de Fontes de Abastecimento por Água Subterrânea no Estado do Ceará, República Federativa do Brasil Ministério de Minas e Energia CPRM - Serviço Geológico do Brasil Diretoria de Hidrologia e Gestão Territorial

Residência de Fortaleza, 1998. Disponível em: https://rigeo.cprm.gov.br/bitstream/doc/16139/1/Rel_bicuitinga.pdf. Acesso em: 30 maio 2024.

OLIVEIRA, M. *Geomorfologia do Sertão Cearense*. 2016. Disponível em: <https://www.profmoises.com/2016/03/comrelacao-aos-aspectos-geomorfologicos.html>. Acesso em: [31/05/2024].

PEREIRA, S. P.; ROSMAN, P. P. C.; SÁNCHEZ-LIZASO, J. L.; LIMA NETO, I. E.; SILVA, R. A. G.; RODRIGUES, M. Brine outfall modeling of the proposed desalination plant of Fortaleza, Brazil. *Desalination and Water Treatment*, v. 234, p. 22-30, 2021. <https://doi.org/10.5004/dwt.2021.27557>

PINHEIRO, L. G.; FERREIRA, D. M.; SILVA, F. L.; MEDEIROS, J. A.; MEDEIROS, L. C.; PEIXE, P. D.; MOREIRA, S. A. Avaliação da sustentabilidade do processo de dessalinização de água no semiárido potiguar: Estudo da comunidade Caatinga Grande. *Sociedade & Natureza*, v. 30, n. 1, pp. 132-157, 2018. <https://doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-6-X>

PIPER, A. L. A graphic procedure in the geochemical interpretation of water-analyses. *Transactions, American Geophysical Union*, v. 25, n. 6, p. 914-928, 1944. <https://doi.org/10.1029/TR025i006p00914>

RABELO, D. R., VIDAL, D. B., SANTOS, M. R. S., FRASCARELI, D. Processos exógenos na formação da depressão sertaneja do sertão central do estado do Ceará, Brasil. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, v. 5, n.1, p. 835-841, 2022. <https://doi.org/10.34188/bjaerv5n1-062>

SRH. Secretaria dos Recursos Hídricos. *Programa Água Doce – PAD*. Secretaria dos Recursos Hídricos do Ceará, 2024. Disponível em: <https://www.srh.ce.gov.br/programa-agua-doce-pad/>. Acesso em: 03 mar. 2024.

YOUNOS, T.; TULOU, K. E. Overview of desalination techniques. *Journal of Contemporary Water Research & Education*, v. 132, n. 1, p. 3-10, 2005. <https://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2005.mp132001002.x>