

Variações em índices de estabilidade da água em reservatório sob condição de seca acentuada do trópico semiárido brasileiro

Variations in water stability indices in a reservoir under dry conditions in the Brazilian semi-arid tropic

• **Data de entrada:**

10/05/2019

• **Data de aprovação:**


04/10/2019

Stephanie de Oliveira Souza^{1*} | Ana Carolina de Oliveira Nobre Batista¹ |
Maria Patrícia Sales Castro¹ | Fernando José Araújo da Silva¹


DOI: <https://doi.org/10.36659/dae.2020.086>

ORCID ID

Souza SO  <https://orcid.org/0000-0002-4130-0099>

Batista ACON  <https://orcid.org/0000-0003-4808-8980>

Castro MPS  <https://orcid.org/0000-0001-7342-1867>

Silva FJA  <https://orcid.org/0000-0002-3260-8876>

Resumo

Nas regiões áridas e semiáridas é comum a captação e o armazenamento de água em reservatórios superficiais, que constituem a principal fonte de abastecimento para os múltiplos usos da água. O clima semiárido potencializa o processo de salinização das águas, o que representa um dos principais problemas de qualidade da água enfrentado em reservatórios dessas regiões. Nesse contexto, avaliou-se a qualidade iônica das águas superficiais do reservatório cearense Sítios Novos por meio do cálculo de índices de estabilidade da água. Realizou-se a abordagem estatística dos dados de qualidade de água desse reservatório referentes ao período de 2004 a 2017. Determinou-se a influência do ciclo climático anual e a variação temporal dos índices de Saturação de Langelier, Estabilidade de Ryznar, Larson-Skold, Incrustação de Puckorius e de Agressividade. Os resultados apontaram águas do tipo cloretadas sódicas, evidenciando a influência da litologia local e a proximidade com o oceano. Houve potencial corrosivo, como indicado pela maioria dos índices de estabilidade da água. As estações chuvosas e secas não apresentaram influências estatisticamente significativas sobre os índices avaliados, mesmo sendo perceptível no cálculo desses índices a deterioração da qualidade de água no período de estiagem. Conclui-se que a avaliação das águas superficiais do Trópico Semiárido por intermédio de índices de estabilidade da água é uma excelente ferramenta para a gestão da qualidade desses recursos, indicando possíveis limitações aos usos finais e norteador medidas preventivas e corretivas.

Palavras-chave: Trópico semiárido. Corrosão. Índices de estabilidade da água.

Abstract

In arid and semi-arid regions, it's common to capture and store water for later use in surface reservoirs. These reservoirs serve as the main source of water during times of drought. The semi-arid climate enhances the process of water salinization, which is one of the main water quality issues faced in reservoirs located in these regions. The ionic quality of the surface waters of the Ceará reservoir Sítios Novos was evaluated by calculating the water stability indices. The water quality data of this reservoir were analyzed for the period from 2004-2017. The influence of annual climatic cycle and the time variation of the Langelier Saturation, Ryznar Stability, Larson-Skold, Puckorius

¹ Universidade Federal do Ceará- Fortaleza - Ceará - Brasil.

* **Autora correspondente:** stephanie_souza@hotmail.com.

and Aggressiveness indexes were determined. The results showed sodium chloride waters, evidently caused by the influence of the local lithology and the proximity to the ocean. There was corrosive potential as indicated by most water stability indices. The rainy and dry seasons didn't present statistically significant influences on the indexes evaluated, although the deterioration of the water quality in the drought period is perceptible in the computation of these indices. It's concluded that the evaluation of the superficial waters of the Semi-Arid Tropic through water stability indices is an excellent tool for the management of the quality of these resources, indicating possible limitations of end uses and guiding preventive and corrective measures.

Keywords: Semi-Arid tropic. Corrosion. Water stability index.

1 INTRODUÇÃO

A ocorrência irregular de chuvas, em distribuição espacial e temporal, combinada à elevada taxa de evaporação, ocasiona secas periódicas no Trópico Semiárido Brasileiro, localizado quase que inteiramente na região Nordeste do país. Esse cenário de escassez hídrica tem sido enfrentado historicamente com a implantação de reservatórios artificiais (AMMAR et al., 2017). No entanto, as condições climáticas do semiárido brasileiro podem transformar as águas desses reservatórios em verdadeiros depósitos de elementos químicos. Têm-se como fontes as águas de drenagem afluyente e a precipitação sobre a área da bacia hidrográfica (MEIRELES et al., 2007). Dessa maneira, os reservatórios do Nordeste Brasileiro tendem a apresentar níveis de concentração de sais mais elevados no período de estiagem, quando a temperatura e a evapotranspiração na região são mais elevadas. A partir disso, pode haver danos ambientais com reflexos socioeconômicos em razão de limitações quanto ao uso da água (MARENGO; TORRES e ALVES, 2017). Ressalta-se, assim, que a avaliação da qualidade dessas águas e a detecção de possíveis deteriorações são importantes para o manejo das bacias hidrográficas.

Quanto à qualidade da água, os potenciais de corrosão e incrustação são importantes indicadores. Estes devem ser considerados no gerenciamento e nas operações dos sistemas de

produção e distribuição de água (KURDI; FERDOWS e MAGHSOUDI, 2015). Parâmetros físicos, químicos e biológicos estão relacionados à formação de incrustação e corrosão, como pH, dióxido de carbono, alcalinidade, dureza, sólidos dissolvidos totais, teor de oxigênio dissolvido, temperatura e velocidade de escoamento da água (ALIPOUR et al., 2015; KURDI; FERDOWS e MAGHSOUDI, 2015).

A corrosão decorre de reações físicas e químicas entre o material do condutor hidráulico e o ambiente, que podem ocasionar a diluição do material na solução (MIRZABEYGI et al., 2016). Já a incrustação pode ser formada a partir de uma variedade de espécies químicas dissolvidas em água. A água contém cátions de cálcio e magnésio em conjunção com os ânions bicarbonato, carbonato, cloreto e sulfato. Esse conjunto origina as formas mais comuns de deposição como incrustação, tais como: carbonato de cálcio, carbonato de magnésio, sulfato de cálcio e cloreto de magnésio (KURDI; FERDOWS e MAGHSOUDI, 2015).

Os potenciais de corrosão e de incrustação em águas naturais podem acarretar sérias dificuldades operacionais em sistemas consumidores, bem como problemas financeiros e de segurança (AL-RAWAJFEH; AL-SHAMAILAH, 2007). Nos sistemas de produção e distribuição de água, podem causar falhas nas tubulações, mudanças indesejadas na qualidade da água, efeitos adver-

tos na saúde dos consumidores, com impactos econômicos, hidráulicos e estéticos (ALIPOUR et al., 2015; SHANKAR; ARCOT, 2018; TAGHIPOUR et al., 2012). A deposição e a agregação de sólidos no interior das tubulações restringe o uso seguro da água para fins industriais. Particularmente em sistemas de geração de energia elétrica, resfriamento e caldeiras industriais, o excesso de incrustação poderá causar a redução da eficiência e a obstrução tubária dos equipamentos, com elevação dos custos totais (BHARDWAJ; SINGH, 2011; SHAH et al., 2019). Valores elevados de sólidos dissolvidos totais, dureza e sulfato também tornam essa água insegura em indústrias têxteis e de papel. Já em indústrias de alimentos, a desinfecção e o tratamento devem ser feitos antes do uso (BHARDWAJ; SINGH, 2011).

Diferentes índices de estabilidade da água foram desenvolvidos como ferramentas de monitoramento (MIRZABEYGI et al., 2016). De maneira geral, esses índices foram baseados no conceito de saturação de carbonato de cálcio, para determinar a tendência de corrosão ou incrustação em condutos de transporte de água, sistemas de aquecimento ou refrigeração em plantas industriais, sistemas de irrigação por gotejamento, sistemas de abastecimento de água potável, entre outros (NIA et al., 2010). Os índices mais comuns na avaliação do caráter corrosivo e da tendência incrustante da água são: Índice de Saturação de Langelier, Índice de Estabilidade de Ryznar, Índice de Larson-Skold, Índice de Incrustação de Puckorius e Índice de Agressividade (AL-RAWAJFEH; AL-SHAMAILEH, 2007; ALIPOUR et al., 2015; CORTES et al., 2016; TAGHIPOUR et al., 2012).

O processo de salinização de reservatórios durante períodos de longa estiagem constitui relevante ameaça ao uso da água. No Nordeste brasileiro, no que tange ao ciclo hidrológico anual, esse recurso é mais demandado justamente quando há situação de maior escassez, que ocor-

re no segundo semestre de cada ano. Portanto, importa conhecer o conteúdo iônico das águas e seus atributos em relação aos períodos de secas mais alongadas. É crucial avaliar a variação do potencial de corrosão ou incrustação nessas águas, principalmente se abastecerem complexos industriais e núcleos urbanos.

O presente artigo busca avaliar a qualidade da água de um reservatório no Nordeste Brasileiro quanto a diferentes índices de estabilidade (i.e., quanto ao potencial de corrosão e/ou incrustação). O estudo verifica ainda a influência da predominância de quadras chuvosas deficitárias ao longo de 28 semestres sucessivos (2004 a 2017), bem como a acentuada redução do volume reservado sobre os índices de estabilidade da água.

2 METODOLOGIA

2.1 Área de estudo

O reservatório do estudo está localizado no município de Caucaia, no norte do estado do Ceará, Brasil. O açude Sítios Novos, situado nas coordenadas geográficas 504.470 E e 9.583.122 N, pertence à Bacia Metropolitana e represa o rio São Gonçalo (Fig. 1). Possui bacia hidrográfica de 446 km², bacia hidráulica de 2.010 hectares, capacidade de 126.000 hm³ e foi construído em 1999 (CEARÁ, 2018). Destina-se a abastecer o Complexo Industrial e Portuário do Pecém, a sede do município de São Gonçalo e os distritos de Umarituba, Catuana, Siupé e Sítios Novos (COGERH, 2008). Esse reservatório nos últimos anos (2004 a 2018) apresentou redução considerável no volume disponível devido à estiagem prolongada na região.

A bacia hidrográfica do açude Sítios Novos está localizada nas proximidades da região litorânea oeste do estado do Ceará. A temperatura média anual varia entre 26 e 30°C, com pluviometria de 950,0 mm/ano e evaporação média de

959,5 mm/ano. O período chuvoso ocorre entre os meses de janeiro e maio. A bacia apresenta cobertura vegetal típica de mangue, próxima à costa, e caatinga arbustiva densa na porção mais ocidental. Os solos podem ser classificados como Planossolos e Planossolos Solódicos (COGERH, 2008). A geologia da região é constituída 80% por rochas cristalinas pertencentes ao Pré-cambriano (Complexo Gnaise Migmatítico - PEgn) e por coberturas sedimentares Tércio-quadernárias representadas pela Formação Barreiras (Tqb) (CEARÁ, 2009).

Em relação ao uso e ocupação do solo, existem áreas antropizadas à montante do reservatório. A faixa de proteção do açude se apresentou, de modo geral, bem preservada. As áreas degradadas mais significativas estavam no trecho final do reservatório. A mata ciliar do rio foi substituída, por alguns quilômetros, por áreas de cultivos agrícolas. Identificou-se ainda a presença de fossas rudimentares ao longo dos trechos próximos de montante, indicando contribuição para os riachos que fluem para o açude (COGERH, 2008).

2.2 Parâmetros do estudo

Amostras de água foram coletadas próximas à torre de tomada de água da barragem e efetuadas à profundidade de 30 cm abaixo da superfície líquida. A frequência de coleta foi trimestral,

no período de 2004 a 2017, perfazendo ao todo 56 amostras.

Os íons analisados para o estudo foram: sódio (Na^+), potássio (K^+), cálcio (Ca^{2+}), magnésio (Mg^{2+}), bicarbonato (HCO_3^-), carbonato (CO_3^{2-}), cloreto (Cl^-) e sulfato (SO_4^{2-}). Essas informações foram complementadas pelos seguintes parâmetros: condutividade elétrica (CE), dureza total (DT), pH, sólidos dissolvidos totais (STD) e temperatura da água (T). Os procedimentos analíticos seguiram os métodos descritos em APHA (1998).

Destaca-se que os dados de qualidade de água do reservatório Sítios Novos integram a base de monitoramento da qualidade da água conduzido pela Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH). Esses dados foram complementados com informações referentes à precipitação registrada na estação pluviométrica do reservatório e o volume operacional disponível (VD) no momento de cada coleta.

Obtiveram-se dados de condutividade elétrica, pH e temperatura da água no ponto de coleta citado anteriormente para a construção do perfil vertical da coluna d'água. Utilizou-se sonda multiparamétrica modelo YSI 6600 V2 entre as profundidades de 0,30 e 3,0 m no período de 2015 a 2017.

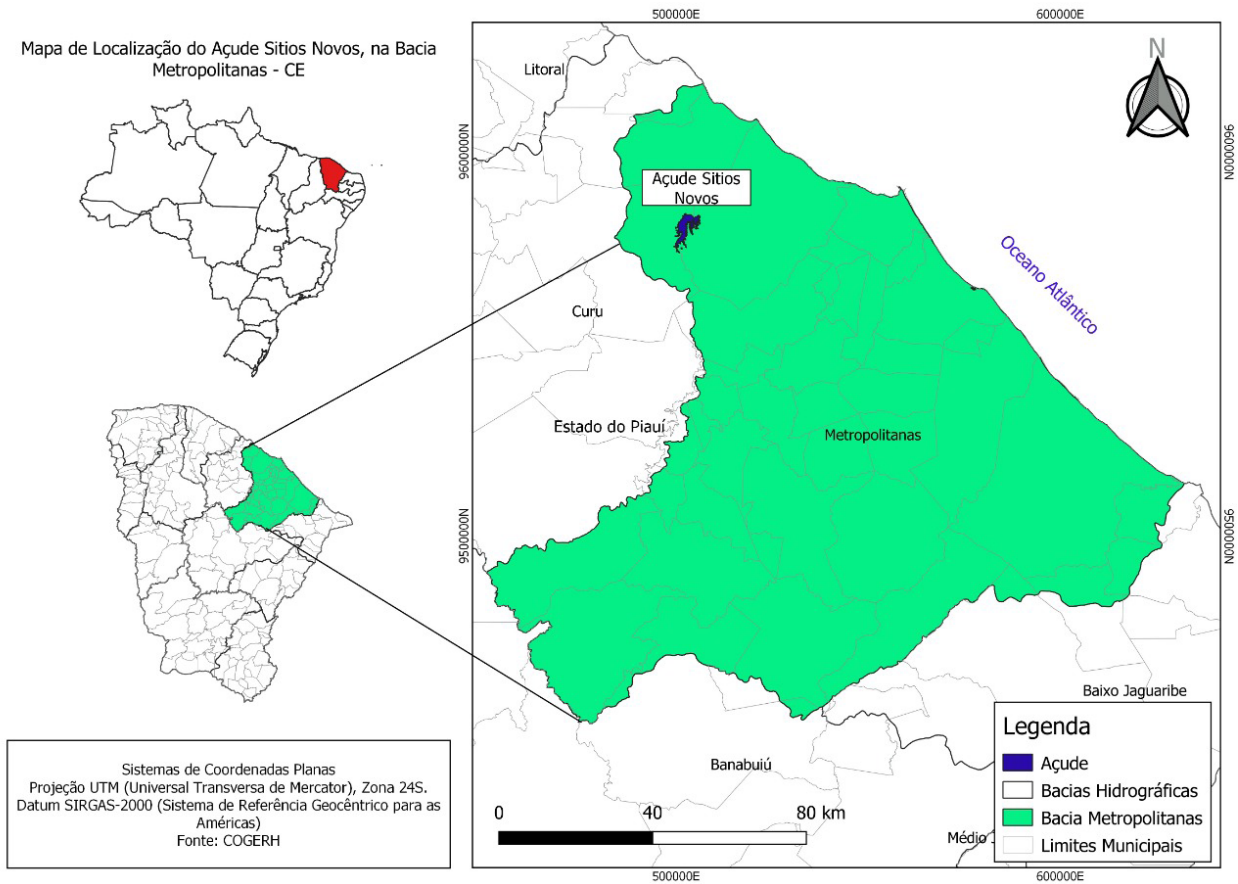


Figura 1 – Localização do Açude Sítios Novos.

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

2.3 Índices de estabilidade da água

Os potenciais de corrosão e incrustação foram avaliados por índices de estabilidade da água. As equações e os critérios de classificação estão resumidos na Tabela 1.

2.3.1 Índice de Saturação de Langelier

O Índice de Saturação de Langelier (LSI) é bastante empregado para indicar o potencial de corrosão ou incrustação da água contendo carbonatos, que está diretamente associado ao seu pH (ZHANG et al., 2011). O índice compara o pH da água de interesse com o pH da respectiva água saturada em relação ao carbonato de cálcio (pHs) (SHEIKHO-LESLAMI, 2005). A determinação de pHs é feita com os seguintes parâmetros: concentração de

sólidos dissolvidos totais (STD) em mg/L, temperatura da água (T) em °C, concentração de Ca^{2+} e alcalinidade (Alc), como $mg\ CaCO_3/L$.

2.3.2 Índice de Estabilidade de Ryznar

O Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) infere sobre o potencial de incrustação de uma solução aquosa. Considera a quantidade de carbonato de cálcio potencialmente a ser formada e prevê a corrosividade de águas não formadoras de incrustação (MILLETTE et al., 1980). O RSI é uma extensão prática do Índice de Saturação de Langelier com base em registro e compilação de práticas e experimentos. Assim, o RSI oferece uma correspondência mais próxima entre os resultados previstos e os obtidos no campo (AL-RAWAJFEH, 2004).

Tabela 1 – Índices de estabilidade da água.

| Índice | Equação | Valor do Índice | Condição da Água |
|---|---|-------------------|---|
| Índice de Saturação de Langelier (LSI) ¹ | $LSI = pH - pH_s$ $pH_s = (9,3 + A + B) - (C + D)$ $A = \frac{(\log[STD] - 1)}{10}$ $B = -13,12 \cdot [\log(T + 273,15)] + 34,55$ $C = \log[Ca^{2+}] - 0,4$ $D = \log[Alc]$ | $0,5 < LSI < 2$ | Incrustação forte |
| | | $0 < LSI < 0,5$ | Incrustação suave |
| | | $LSI = 0$ | Balancedo |
| | | $-0,5 < LSI < 0$ | Corrosão suave |
| | | $-2 < LSI < -0,5$ | Corrosão severa |
| Índice de Estabilidade de Ryznar (RSI) ¹ | $RSI = 2 \cdot pH_s - pH$ | $4 < RSI < 5$ | Incrustação severa |
| | | $5 < RSI < 6$ | Incrustação média |
| | | $6 < RSI < 7$ | Pouca incrustação ou corrosão |
| | | $7 < RSI < 7,5$ | Corrosão média |
| | | $7,5 < RSI < 9$ | Corrosão elevada |
| | | $RSI > 9$ | Corrosão severa |
| Índice de Incrustação de Puckorius (PSI) ² | $PSI = 2 \cdot pH_s - pH_{EQ}$ $pH_{EQ} = 1,465 \cdot \log[Alc] + 4,54$ | $PSI < 4,5$ | Tendência a incrustação |
| | | $4,5 < PSI < 6,5$ | Baixa tendência de incrustação e corrosão |
| | | $PSI > 6,5$ | Tendência a corrosão |
| Índice de Agressividade (IA) ³ | $IA = pH + \log[(Alc) \times (D_{ca})]$ | $AI < 10$ | Altamente agressiva |
| | | $10 < AI < 12$ | Moderadamente agressiva |
| | | $AI > 12$ | Não agressiva |
| Índice de Larson-Skold (ILS) ² | $ILS = \frac{[Cl^-] + [SO_4^{2-}]}{[HCO_3^-] + [CO_3^{2-}]}$ | $ILS < 0,8$ | Corrosão baixa |
| | | $0,8 < ILS < 1,2$ | Corrosão significativa |
| | | $ILS > 1,2$ | Corrosão elevada |

Fontes: ¹Carrier (1965); ²Vasconcelos et al. (2015); ³Imran et al. (2005).

2.3.3 Índice de Incrustação de Puckorius

O Índice de Incrustação de Puckorius (PSI) leva em consideração dois outros parâmetros críticos: a alcalinidade total e a quantidade máxima de precipitado que pode se formar em condições de equilíbrio (PRISYAZHNIUK, 2007; SHEIKHOESLAMI, 2005). O PSI quantifica a relação entre o estado de supersaturação da água e a formação de incrustação, levando em consideração a capacidade tampão da água (CORTES et al., 2016; PRISYAZHNIUK, 2007). Esse índice fornece uma indicação mais precisa das tendências à incrustação do carbonato de cálcio (PUCKORIUS; BROOKE, 1991). O PSI utiliza o pH de equilíbrio (pH_{EQ}) em vez do pH da amostra.

2.3.4 Índice de Agressividade

O Índice de Agressividade (IA) mede a tendência de a água deteriorar a estrutura de tubos de

cimento-amianto (fibrocimento) (IMRAN et al., 2005). Esse índice considera os efeitos do pH da amostra, da alcalinidade total (mg $CaCO_3/L$) e da concentração de cálcio, expressa como mg $CaCO_3/L$ (DAVIL et al., 2009; TAGHIPOUR et al., 2012).

2.3.5 Índice de Larson-Skold

A agressividade natural da água a tubos de aço e de ferro fundido pode ser verificada pelo Índice de Larson-Skold (ILS). Esse índice deduz o poder corrosivo da água a partir da proporção de agentes corrosivos, cloretos e sulfatos, e agentes inibidores, propriedades protetoras do bicarbonato e carbonato (IMRAN et al., 2005). As concentrações de Cl^- , SO_4^{2-} , HCO_3^- e CO_3^{2-} utilizadas no cálculo do ILS são expressas em miliequivalentes por litro (meq/L).

2.4 Recursos computacionais

Utilizou-se o *software* Qualigraf, disponível em FUNCEME (2014), para a classificação hidroquímica. Para análise estatística dos dados empregaram-se o *software R: A Language and Environment for Statistical Computing* com a interface Rstudio (TEAM, 2018) e o *software Paleontological Statistical (PAST)* (HAMMER; HARPER e RYAN, 2001).

3 RESULTADOS

Os parâmetros de qualidade da água e os resultados dos índices de estabilidade da água para as amostras de estudo do açude Sítios Novos são apresentados nas Tabelas 2 e 3, respectivamente.

A partir dos dados de concentração dos íons presentes nas amostras, determinaram-se os íons dominantes com base no diagrama de Piper. Ressaltou-se a distinção do ciclo climático anual (período chuvoso *versus* período de estiagem) como mostrado na Fig. 2.

As distribuições dos conjuntos de dados, que tiveram como base o Critério de Informação de

Akaike (AIC) e os resultados da análise de variância para cada um dos índices de estabilidade, podem ser vistos na Tabela 4.

As funções mais representativas das relações existentes entre os índices de estabilidade da água estão na Tabela 5. A associação entre esses índices foi determinada com base na regressão linear simples. Destaca-se que LSI, IA, RSI e PSI apontaram condições de estabilidade de água semelhantes.

Salienta-se ainda que correlações de *Pearson* a um nível de significância de 5% ($\alpha = 0,05$) foram obtidas entre a redução do volume disponível do reservatório e o incremento do potencial corrosivo dessas águas. Tais correlações foram para os seguintes índices de estabilidade da água: LSI ($r = 0,22$), ILS ($r = -0,63$), RSI ($r = -0,24$), PSI ($r = -0,21$) e IA ($r = 0,16$).

Os resultados referentes à Análise de Componentes Principais, utilizada para avaliar tendências entre alguns parâmetros físico-químicos, estão nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 2 – Parâmetros de estudo das águas do açude Sítios Novos.

| Parâmetro | Média | Mínimo | Máximo | CV ¹ |
|--|--------|--------|---------|-----------------|
| Temperatura da água (°C) | 29,3 | 27,1 | 30,0 | 0,026 |
| pH | 7,88 | 7,11 | 8,77 | 0,046 |
| CE ($\mu\text{S.cm}^{-1}$) | 855 | 345 | 2958 | 0,740 |
| STD (mg.L^{-1}) | 565 | 231 | 1889 | 0,699 |
| Turbidez (uT) | 22 | 3 | 62 | 0,566 |
| DT ($\text{mg CaCO}_3.\text{L}^{-1}$) | 162,8 | 75,5 | 523,0 | 0,613 |
| Na ⁺ (mg.L^{-1}) | 115,5 | 40,6 | 421,4 | 0,826 |
| K ⁺ (mg.L^{-1}) | 11,2 | 7,4 | 31,2 | 0,484 |
| Ca ²⁺ (mg.L^{-1}) | 15,4 | 3,0 | 31,0 | 0,488 |
| Mg ²⁺ (mg.L^{-1}) | 30,2 | 9,3 | 111,1 | 0,774 |
| HCO ₃ ⁻ (mg.L^{-1}) | 101,6 | 49,5 | 146,0 | 0,236 |
| CO ₃ ²⁻ (mg.L^{-1}) | 1,0 | 0,1 | 4,7 | 1,155 |
| Cl ⁻ (mg.L^{-1}) | 247,1 | 86,0 | 960,4 | 0,873 |
| SO ₄ ²⁻ (mg.L^{-1}) | 18,8 | 3,0 | 87,2 | 1,105 |
| NO ₃ ⁻ (mg.L^{-1}) | 0,68 | 0,16 | 1,86 | 0,480 |
| VD | 54,71 | 0,46 | 100 | 0,667 |
| Precipitação (mm) | 310,35 | 0,00 | 1207,17 | 1,100 |
| Temperatura do ar (°C) | 25,51 | 23,87 | 26,85 | 0,030 |

¹ CV: Coeficiente de variação.

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

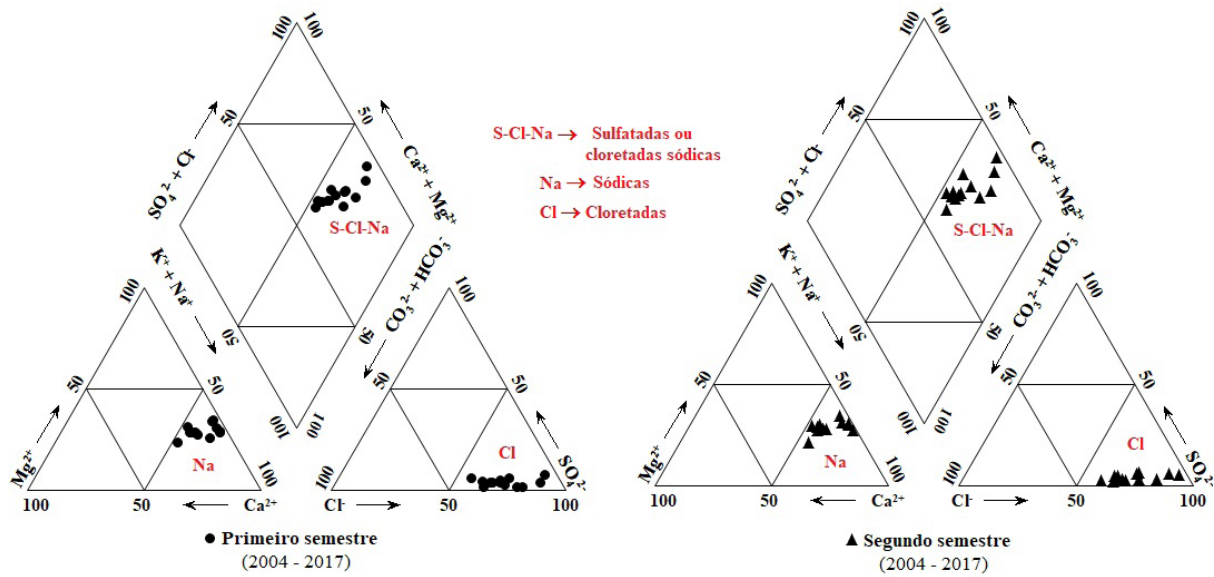


Figura 2 – Diagrama de Piper para as águas do açude Sítios Novos no período chuvoso e de estiagem (1º e 2º semestres de cada ano).

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Tabela 3 – Índices de estabilidade da água para as águas do Açude Sítios Novos.

| Ano/Semestre | LSI | Classe | RSI | Classe | ILS | Classe | PSI | Classe | IA | Classe |
|--------------|--------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|-------------|-----------|--------------|-----------|
| 2004.1 | -0,40 | CSU | 8,68 | CE | 2,00 | CE | 9,16 | TC | 11,44 | MA |
| 2004.2 | -0,57 | CSU | 8,91 | CE | 1,65 | CE | 9,32 | TC | 11,28 | MA |
| 2005.1 | -0,21 | CSU | 8,39 | CE | 1,68 | CE | 8,84 | TC | 11,64 | MA |
| 2005.2 | 0,04 | ISU | 8,18 | CE | 2,21 | CE | 8,97 | TC | 11,91 | MA |
| 2006.1 | -0,65 | CS | 8,92 | CE | 3,02 | CE | 9,07 | TC | 11,21 | MA |
| 2006.2 | -0,51 | CS | 8,74 | CE | 2,18 | CE | 9,05 | TC | 11,36 | MA |
| 2007.1 | -0,18 | CSU | 8,40 | CE | 2,88 | CE | 9,03 | TC | 11,67 | MA |
| 2007.2 | -0,51 | CS | 8,81 | CE | 2,47 | CE | 9,22 | TC | 11,36 | MA |
| 2008.1 | -0,60 | CS | 8,86 | CE | 2,86 | CE | 9,13 | TC | 11,25 | MA |
| 2008.2 | 0,05 | ISU | 7,97 | CE | 2,00 | CE | 8,46 | TC | 11,92 | MA |
| 2009.1 | -0,35 | CSU | 8,51 | CE | 1,90 | CE | 8,90 | TC | 11,50 | MA |
| 2009.2 | -1,05 | CS | 9,52 | CS | 2,34 | CE | 9,84 | TC | 10,79 | MA |
| 2010.1 | -0,40 | CSU | 8,69 | CE | 2,28 | CE | 9,17 | TC | 11,44 | MA |
| 2010.2 | -1,45 | CS | 10,73 | CS | 3,73 | CE | 11,56 | TC | 10,41 | MA |
| 2011.1 | -0,55 | CS | 9,87 | CS | 3,95 | CE | 11,71 | TC | 11,29 | MA |
| 2011.2 | -0,50 | CS | 8,80 | CE | 2,14 | CE | 9,21 | TC | 11,36 | MA |
| 2012.1 | -0,40 | CSU | 8,70 | CE | 2,38 | CE | 9,18 | TC | 11,44 | MA |
| 2012.2 | -0,51 | CS | 8,82 | CE | 2,69 | CE | 9,22 | TC | 11,36 | MA |
| 2013.1 | -1,18 | CS | 10,08 | CS | 3,74 | CE | 10,54 | TC | 10,67 | MA |
| 2013.2 | -1,52 | CS | 10,58 | CS | 4,00 | CE | 10,75 | TC | 10,35 | MA |
| 2014.1 | -0,07 | CSU | 8,81 | CE | 4,63 | CE | 10,09 | TC | 11,81 | MA |
| 2014.2 | -0,30 | CSU | 9,10 | CS | 6,14 | CE | 10,14 | TC | 11,61 | MA |
| 2015.1 | -0,38 | CSU | 8,96 | CE | 9,86 | CE | 9,79 | TC | 11,53 | MA |
| 2015.2 | -1,25 | CS | 10,05 | CS | 12,70 | CE | 10,37 | TC | 10,69 | MA |
| 2016.1 | -0,96 | CS | 9,38 | CS | 18,60 | CE | 9,66 | TC | 10,95 | MA |
| 2016.2 | -0,65 | CS | 9,10 | CS | 28,16 | CE | 9,85 | TC | 11,32 | MA |
| 2017.1 | -0,94 | CS | 8,98 | CE | 2,71 | CE | 8,65 | TC | 10,92 | MA |
| 2017.2 | -0,01 | CSU | 7,99 | CE | 3,72 | CE | 8,41 | TC | 11,91 | MA |
| Média | -0,57 | CS | 9,02 | CS | 4,95 | CE | 9,55 | TC | 11,30 | MA |
| CV | -0,75 | - | 0,08 | - | 1,19 | - | 0,09 | - | 0,04 | - |
| TI (%) | 7,14 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| B (%) | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - | 0 | - |
| TC (%) | 92,86 | - | 100 | - | 100 | - | 100 | - | 100 | - |

¹ B: Balanceado; CE: Corrosão elevada; CS: Corrosão severa; CSU: Corrosão suave; CV: Coeficiente de variação; MA: Moderadamente agressiva; TC: Tendência a corrosão; TI: Tendência a incrustação.

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Tabela 4 – Distribuições teóricas e testes de variância dos índices de estabilidade da água.

| Açude Sítios Novos | | FDP | ANOVA | | | Kruskal-Wallis | | |
|--------------------|-------------|-----------|------------------------|----------------------|---------|--------------------|----------------------|---------|
| | | | F _{calculado} | F _{crítico} | p-valor | H _{teste} | H _{crítico} | p-valor |
| LSI | 1º semestre | Gama | 0,40 | 4,23 | 0,53 | 0,28 | 3,84 | 0,60 |
| | 2º semestre | Gama | | | | | | |
| RSI | 1º semestre | Lognormal | 0,30 | 4,23 | 0,59 | 0,23 | 3,84 | 0,63 |
| | 2º semestre | Lognormal | | | | | | |
| PSI | 1º semestre | Lognormal | 0,10 | 4,23 | 0,75 | 0,61 | 3,84 | 0,43 |
| | 2º semestre | Lognormal | | | | | | |
| ILS | 1º semestre | Lognormal | 0,19 | 4,23 | 0,67 | 0,04 | 3,84 | 0,84 |
| | 2º semestre | Lognormal | | | | | | |
| IA | 1º semestre | Weibull | 0,24 | 4,23 | 0,63 | 0,14 | 3,84 | 0,71 |
| | 2º semestre | Weibull | | | | | | |

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Tabela 5 – Correlações entre os índices de estabilidade da água.

| Índices de estabilidade da água | Equação | R ² |
|---------------------------------|---------------------------|----------------|
| LSI x IA | LSI = 0,998. IA - 11,855 | 0,994 |
| RSI x LSI | RSI = -1,492. LSI + 8,166 | 0,827 |
| RSI x IA | RSI = -1,488. IA + 25,834 | 0,821 |
| PSI x RSI | PSI = 0,737. RSI + 1,981 | 0,779 |

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Tabela 6 – Variância das componentes principais para as variáveis selecionadas.

| Componentes | Autovalor | % Variância |
|-------------|-----------|-------------|
| PC1 | 3,124 | 54,077 |
| PC2 | 1,020 | 17,654 |
| PC3 | 0,745 | 12,894 |
| PC4 | 0,468 | 8,105 |
| PC5 | 0,212 | 3,663 |
| PC6 | 0,105 | 1,819 |
| PC7 | 0,052 | 0,898 |
| PC8 | 0,033 | 0,579 |
| PC9 | 0,015 | 0,254 |
| PC10 | 0,003 | 0,057 |
| PC11 | 0,000 | 0,001 |

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

Tabela 7 – Correlações estatísticas entre variáveis e os dois primeiros componentes principais.

| Variáveis | PC1 | PC2 |
|-------------------------------|--------|--------|
| pH | -0,001 | -0,044 |
| Temperatura da água | -0,052 | 0,154 |
| HCO ₃ ⁻ | -0,144 | 0,099 |
| CO ₃ ²⁻ | 0,410 | 0,090 |
| Alcalinidade | -0,117 | 0,105 |
| STD | 0,406 | 0,090 |
| Ca ²⁺ | -0,026 | 0,299 |
| Cl ⁻ | 0,438 | 0,074 |
| SO ₄ ²⁻ | 0,439 | 0,080 |
| VD | -0,473 | -0,036 |
| Precipitação | -0,144 | 0,914 |

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

4 DISCUSSÃO

4.1 Adequação industrial

A água pode ser utilizada de diversas maneiras na indústria, como solvente, transporte de substâncias dissolvidas, constituinte do próprio produto industrial, fluido de limpeza, aquecimento, resfriamento e geração de vapor. As propriedades físicas, químicas, biológicas e estéticas da água determinam sua adequação e desempenham papel importante na eficiência de um processo, na seleção de materiais e na vida útil dos condutos usados para transporte de fluidos nas indústrias (SHAH et al., 2019).

A qualidade da água para aplicações industriais difere em vários aspectos de outros usos. A maior parte das indústrias possui uma variedade de processos com requisitos próprios de qualidade da água. Assim, a água apropriada a determinado processo pode ser inadequada a outro em uma mesma indústria. Portanto, a qualidade da água necessária às atividades industriais dependerá do tipo de atividade, das especificações dos processos e do quanto o usuário está disposto a investir no tratamento da água com a qualidade desejada versus o custo de manutenção do maquinário, caso a água seja de qualidade inferior (BHARDWAJ; SINGH, 2010; SPULBER; SABBAGHI, 2012).

Cloreto

Altas concentrações de cloreto podem aumentar a taxa de corrosão do aço e do alumínio, bem como podem ocasionar sabor salgado à água e às bebidas (OMS, 2011; SAJITHA; VIJAYAMMA, 2016; SHAH et al., 2019). Segundo a Organização Mundial de Saúde (2011), a Resolução Conama N° 357/2005 (águas doces) e o Padrão de Potabilidade da Água (PRC N° 05/2017 do Ministério da Saúde), o limite permissível para cloreto é de 250 mg/L. Os valores médios de Cl^- variaram de 86,0 a 960,4 mg/L (Tabela 2), indicando a inconformidade quanto ao limite desejável de algumas amostras.

Dureza total

A dureza da água é atribuível à presença de minerais alcalinos, principalmente cálcio, magnésio e ocasionalmente bicarbonatos (BHARDWAJ; SINGH, 2011). Sais de dureza podem causar incrustações em tubulações e redução da vida útil de equipamentos. Conforme a Tabela 2, a dureza total variou de 75,5 a 523,0 mg CaCO_3/L , devido principalmente à concentração de magnésio e não à de cálcio. O limite desejável para dureza total na água potável, de acordo com a PRC N° 05/2017 MS, é de 500 mg CaCO_3/L . As amostras que excederam o limite de 300 mg CaCO_3/L são consideradas muito duras.

pH

O pH é um dos mais importantes parâmetros de qualidade da água e, geralmente, não tem impacto direto sobre os consumidores. Frequentemente, o pH ótimo requerido está na faixa de 6,5 a 9,5 (OMS, 2011). Baseado na Resolução Conama N° 357/2005 (águas doces), a faixa desejável de pH é entre 6 e 9. De acordo com a Tabela 2, o pH variou de 7,11 a 8,77. Dessa forma, os valores médios de pH das amostras estavam dentro dos limites referidos.

Sódio

O sódio é um constituinte natural da água bruta, porém a sua concentração pode aumentar devido a fontes de poluição, como escoamento superficial decorrente de precipitação e solução com sabão e detergente. A alta concentração dá sabor amargo à água (SAJITHA; VIJAYAMMA, 2016). A concentração de sódio variou de 40,6 a 421,4 mg/L (Tabela 2). Baseado na PRC N° 05/2017 MS, o valor máximo permissível (VMP) para o sódio é 200 mg/L. Desse modo, amostras com valores médios acima do VMP estavam em inconformidade.

Sólidos dissolvidos totais

A alta concentração de STD está associada à alta concentração de íons, que eleva a condutividade da água (AGATEMOR; OKOLO, 2008). Comumente, essa alta concentração de STD pode ocasionar a formação de espuma em caldeiras e deposição de incrustações (SHAH et al., 2019). A formação dos filmes protetores, que retardam a corrosão, dependerá da natureza dos sólidos dissolvidos (AGATEMOR; OKOLO, 2008). O limite desejável de STD indicado pela Resolução Conama Nº 357/2005 (águas doces) e PRC Nº 05/2017 MS é de 500 mg/L e 1000 mg/L, respectivamente. Os valores médios de STD variaram de 231 a 1889 mg/L (Tabela 2), indicando a inadequação de algumas amostras quanto aos limites referidos.

Sulfato

A concentração do íon sulfato para alguns processos industriais, como produção de açúcar e fabricação de concreto, deve ser abaixo de 20 mg/L (SHAH et al., 2019). O limite desejável de SO_4^{2-} , como indicado pelo Padrão de Potabilidade da Água (PRC Nº 05/2017 MS), pela Resolução Conama Nº 357/2005 (águas doces) e pela OMS (2011) é de 250 mg/L. Observa-se que os valores médios de SO_4^{2-} variaram de 3,0 a 87,2 mg/L (Tabela 2), estando dentro do limite apontado.

Turbidez

A turbidez pode ser tanto de origem não mineral, em que há presença predominante de matéria orgânica ou algas em suspensão, como de origem mineral, quando os agentes causadores são argilominerais (CALIJURI; CUNHA, 2013). O limite de turbidez preconizado pela PRC Nº 05/2017 MS é de 5 uT, enquanto a Resolução Conama Nº 357/2005 (águas doces) estabelece os seguintes limites: 40 uT (Classe 1) e 100 uT (Classe 2 e 3). Os valores de turbidez média variaram de 3 a

62 uT (Tabela 2), indicando a inadequação de algumas amostras quanto aos limites referidos.

A quantidade de material fino em suspensão acima dos limites estabelecidos pelos padrões de qualidade da água para consumo humano e de potabilidade podem retratar uma tendência corrosiva das águas avaliadas. A corrosão pode incrementar o crescimento bacteriano na água, resultando no aumento da sua turbidez e na redução da sua qualidade estética (KURDI; FERDOWS e MAGHSOUDI, 2015).

4.2 Classificação iônica das águas do reservatório de estudo

O erro médio do balanço iônico nas amostras de água do açude Sítios Novos foi de 3,4% (0,1 a 9,6%). Dessa forma, o desvio percentual da eletroneutralidade não excedeu o erro máximo recomendado e aqui utilizado como baliza (i.e. 10%), indicando o equilíbrio iônico entre cátions e ânions e, portanto, a confiabilidade dos valores medidos (DINKA; LOISKANDL e NDAMBUKI, 2015).

A avaliação do caráter iônico individual ou emparelhado dos íons não é o ideal para obtenção dos melhores resultados, logo a química combinada de todos os íons deve ser considerada (SHAH et al., 2019). Baseado no diagrama de Piper, determinaram-se os íons dominantes nas amostras de água do reservatório de estudo, a fim de entender a química dessas águas. Esse traçado é comumente utilizado para classificação e comparação de grupos distintos de águas quanto aos íons dominantes.

Averiguou-se, conforme mostrado na Fig. 2, que as águas analisadas foram somente do tipo cloretadas sódicas durante as estações chuvosa e seca no período estudado (2004 a 2017). Assim, Na^+ e Cl^- são os íons dominantes entre os sais que constituem a quantidade total de sais dissolvidos. Deduz-se, claramente, que a amplitude

da CE e do teor de STD é decorrência direta das concentrações desses íons dominantes. Sabe-se que STD está relacionado a CE e que ambos podem ocasionar impacto no potencial de corrosão e na solvência de compostos, como CaCO_3 , nas amostras de água.

Araújo Neto et al. (2014) destacam que a precipitação sobre a bacia carrega sais e elementos químicos, que refletem as propriedades das rochas e dos solos por meio do escoamento superficial e da percolação. Silva Jr., Gheyi e Medeiros (1999) afirmam que as águas do embasamento cristalino do Nordeste são em sua maioria cloretadas sódicas, com alguma variação devido à litologia do local de origem.

Segundo Leprun (1983), as águas superficiais do semiárido nordestino de embasamento cristalino são do tipo cloretadas sódicas e obedecem às seguintes relações para cátions e ânions, respectivamente: $\text{Na}^+ > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+$ e $\text{Cl}^- > \text{HCO}_3^- > \text{SO}_4^{2-}$. Santiago (1984) também encontrou águas do tipo cloretadas sódicas em seu estudo, ao analisar as águas dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré no semiárido cearense. Assim, a água superficial contém minerais dissolvidos de camadas do solo por meio dos quais ela percorreu

e está continuamente submetida às características litológicas e geoclimáticas.

Ademais, as concentrações de sais contidas na precipitação atmosférica, notadamente cloretos, tendem a decrescer com a distância entre o local de precipitação e o oceano (SOUZA FILHO; CAMPOS, 2005). Deste modo, as águas superficiais estudadas apresentaram maiores concentrações dos íons cloreto e sódio como decorrência natural da litologia local de embasamento cristalino e da proximidade com o oceano, já que dista aproximadamente 30 km da costa.

No período de 2004 a 2017, a área do reservatório do estudo apresentou o predomínio de precipitações médias abaixo das médias normais. Isso é verificável pela razão entre o valor observado de precipitação e o valor normal. A redução do evento de precipitação tem como consequência mais relevante a rápida redução do volume armazenado no reservatório (VD) (Fig. 3). Nota-se ainda que a concentração dos íons dominantes, notadamente cloreto, aumentou com a redução do volume disponível do açude Sítios Novos, por efeito da redução da diluição e do incremento da concentração de sais, potencializando o processo de salinização dessas águas (Fig. 4).

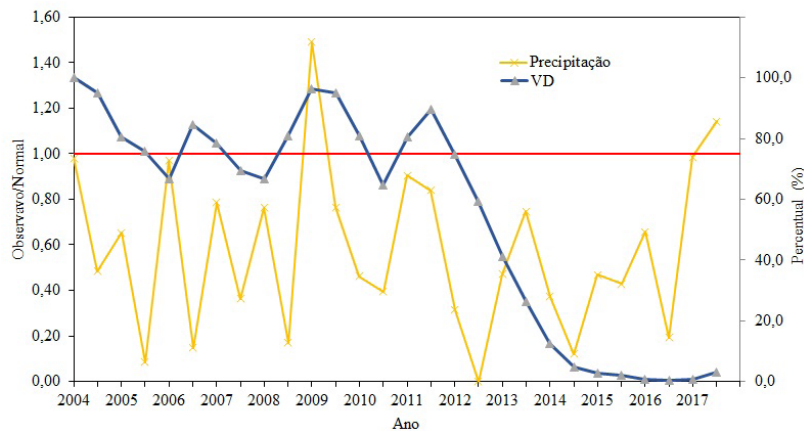


Figura 3 – Variação da precipitação na área do açude Sítios Novos e do percentual de volume disponível do reservatório.

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

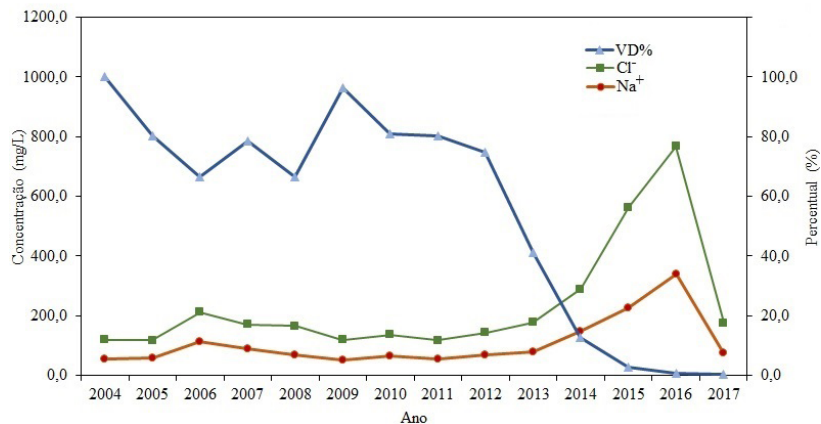


Figura 4 – Variação dos íons dominantes com o percentual de volume disponível nas águas do açude Sítios Novos. Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

O açude Sítios Novos registrou redução no volume armazenado e passou de 84,3% em 2011 para 1,9% de sua capacidade total em 2017. A redução no volume implicou diminuição da profundidade média da coluna líquida 13,3 m para 2,1 m. Uma coluna líquida mais rasa sofre ação de mistura mais intensa, notadamente por ação dos ventos e maior instabilidade térmica. Assim, a concentração de espécies químicas dissolvidas, principalmente Na⁺ e Cl⁻, pode estar associada principalmente à evaporação e à baixa taxa de renovação das águas no reservatório durante o período analisado.

A declaração acima é reforçada pelos achados do estudo de Freire, Calijuri e Santaella (2009). Os autores destacam que a estabilidade de processos nos reservatórios está diretamente ligada à variação do seu volume. Em períodos de estiagem, a tendência natural de redução do volume torna o reservatório mais suscetível à mistura e instabilidade térmica, pois fatores como o vento atuam mais facilmente em uma coluna d'água rasa. Por outro lado, reservatórios com maior coluna d'água tendem à estabilidade, pois são mais resistentes à ação do vento e da chuva, favorecendo os processos de estratificação térmica e química (ESTEVES, 2011).

Santos et al. (2017) identificaram alterações nos parâmetros físicos e químicos da água e do

estado trófico no açude Castanhão, grande reservatório cearense na região semiárida, após a diminuição do volume do reservatório devido à escassez de chuvas durante quatro anos consecutivos (2011 a 2014). A redução de 50% do volume hídrico, a consequente falta de renovação das águas pelas chuvas, a forte evaporação e a influência permanente das atividades antrópicas favoreceram a concentração de sais, o aumento do pH (7,5-8,7), da condutividade elétrica (295-353 $\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) e da turbidez (< 4,2 NTU), além do acúmulo de nutrientes nesse reservatório. Segundo os autores, a estratificação térmica da coluna d'água ocorreu quando o volume era máximo, apontando que variações no nível da água do reservatório podem resultar em alterações na estrutura física e química do sistema.

No período de 2015.2 a 2017.2 (Fig. 5), a amplitude dos gradientes verticais de CE, pH e temperatura da água foi baixa. A condutividade elétrica, indicador de estratificação salina “quimioclina”, praticamente não variou no período analisado. Souza Filho, Martins e Porto (2006) observaram comportamento semelhante no reservatório cearense Frios, indicando que o mesmo estava bem misturado verticalmente quanto à concentração de sais totais, com total ausência de quimioclina.

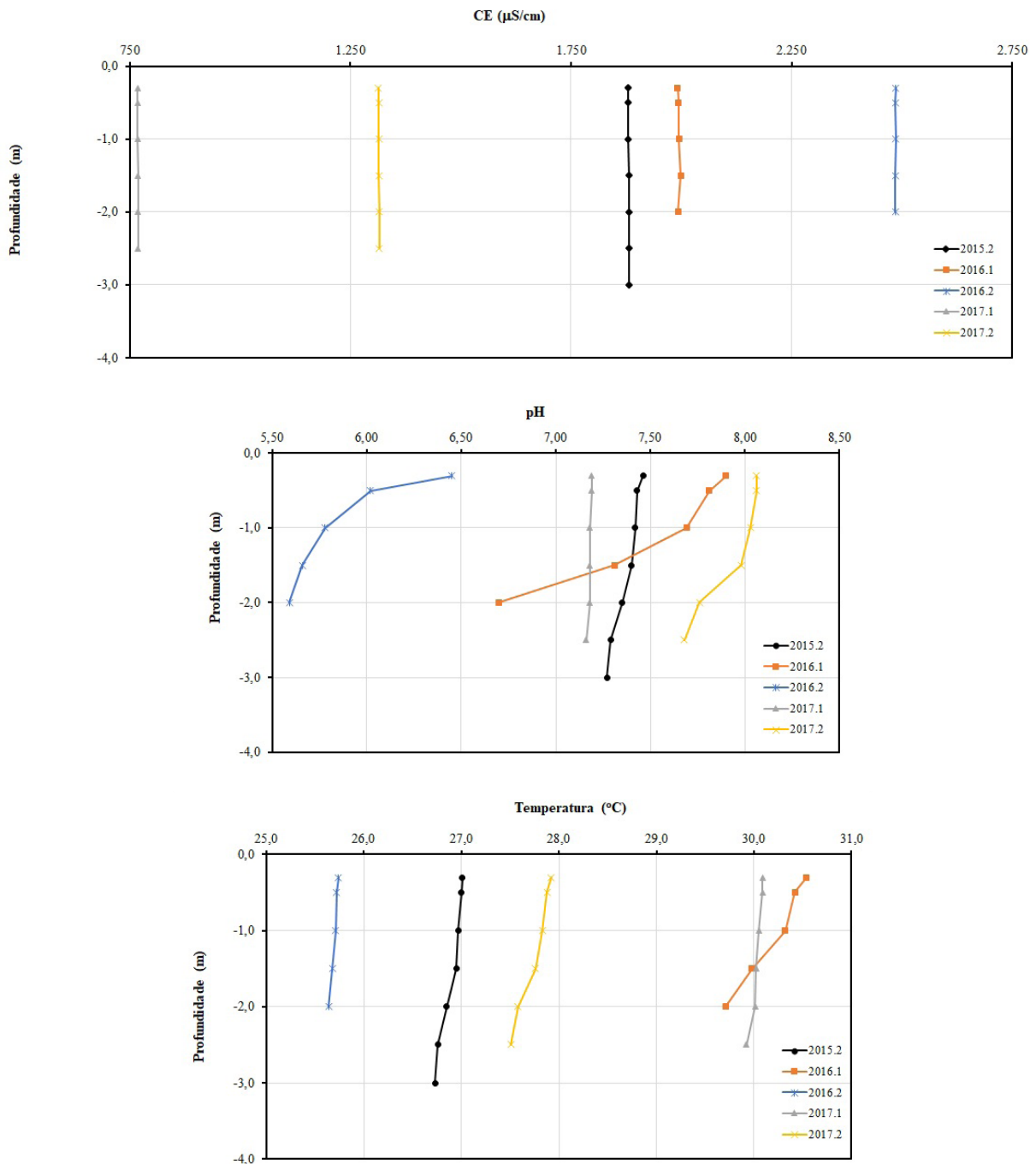


Figura 5 – Variação do perfil de CE, pH e temperatura no açude Sítios Novos.
 Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

O pH esteve dentro da faixa alcalina (8,1 -7,2), exceto para o perfil referente a 2016.2 (6,5-5,6). Valores mais altos de pH foram encontrados na superfície, relacionando-se à maior atividade algal na assimilação do CO₂ durante o processo de fotossíntese, liberando radicais hidroxilas

(VIDAL; CAPELO NETO, 2013). Segundo França et al. (2013), o aumento dos processos fotossintéticos ocasiona a elevação do pH e a consequente redução da matéria orgânica, enquanto valores baixos de pH estão associados à contribuição do solo, presença de CO₂, ácidos minerais e sais

hidrolisados. A redução do pH ao longo do perfil vertical pode ser proveniente de decomposição intensificada com a entrada de material alóctone e ressuspensão de sedimentos, principalmente quando há maiores precipitações (VIDAL; CAPELO NETO, 2013), como no perfil de 2016.1.

Dantas, Bittencourt-Oliveira e Moura (2012) e Lee, Biggs e Fang (2018) seguiram como critério para o estabelecimento de termoclina o gradiente térmico maior ou igual a 0,5 °C/m. Com base nesse critério, a redução de temperatura foi observada entre as profundidades de 1 a 2 m somente no perfil referente a 2016.1. Não há, portanto, evidência forte sobre a ocorrência de estratificação sazonal. Entretanto, processos em escala nictemeral de estratificação e mistura são comuns em reservatórios do semiárido brasileiro, como observado por Souza Filho, Martins e Porto (2006).

4.3 Índices de estabilidade da água

A água pode promover incrustação, corrosão ou ambos, a depender da sua química específica, caracterizando uns dos problemas mais críticos de qualidade da água (SHANKAR; ARCOT, 2018). As médias dos índices de estabilidade nos primeiros e segundos semestres de cada ano estão na Tabela 3. De acordo com os resultados do LSI, as águas do açude Sítios Novos apresentaram uma alternância entre as classes corrosão suave e corrosão severa nos primeiros semestres, havendo o predomínio da classe corrosão suave (57,1%). Já nos segundos semestres, observou-se as seguintes classes do LSI: incrustação suave, corrosão suave e corrosão severa, com predomínio desta última classe (71,4%). Dessa forma, as águas avaliadas podem ter ocasionado altas taxas de corrosão, porém não tiveram potencial incrustante significativo.

A avaliação da estabilidade da água com o RSI mostrou que todas as amostras apresentaram potencial corrosivo, que variou entre elevado e severo, sendo inadequadas para transporte por tubulações (HARITASH; GAUR e GARG, 2016). Segundo Shah et al. (2019), valores de RSI maiores que 7 revelam que a formação de carbonato de cálcio não levará a um filme inibidor de corrosão. Ao comparar o RSI com o LSI, cabe ratificar o que declaram Nia et al. (2010). Esses autores destacam que o RSI estima um risco de incrustação menor do que aquele referido no LSI, como observado nos resultados aqui obtidos.

Quanto ao ILS, todas as amostras apresentaram grau de corrosão elevada, tanto nos primeiros como nos segundos semestres de cada ano avaliado. Dessa forma, essas águas tenderam à corrosão de tubos de aço e de ferro fundido, reduzindo a eficiência do processo industrial. A corrosão metálica observada é fortemente relacionada às concentrações de Cl^- e SO_4^{2-} em relação à de HCO_3^- . Segundo Agatemor e Okolo (2008), o incremento salino com os ânions Cl^- e SO_4^{2-} eleva a tendência corrosiva da água. Isso foi notável a partir de 2012, quando houve uma elevação acentuada de Cl^- com a redução do volume disponível do reservatório (Fig. 4). Tal fato influenciou o ILS como destacado pela correlação negativa moderada obtida entre ILS e VD ($r = -0,63$) e pela Fig. 6.

Baseado no PSI, águas estudadas exibiram tendência corrosiva independentemente do período avaliado, confirmando que essas águas eram deficitárias de íons responsáveis pela formação de incrustações. Cabe ressaltar que a baixa concentração de HCO_3^- também pode ser responsável pela tendência corrosiva da água (AGATEMOR; OKOLO, 2008). O IA indicou potencial de corrosão moderada das águas do estudo para condutores hidráulicos à base de cimento como material principal.

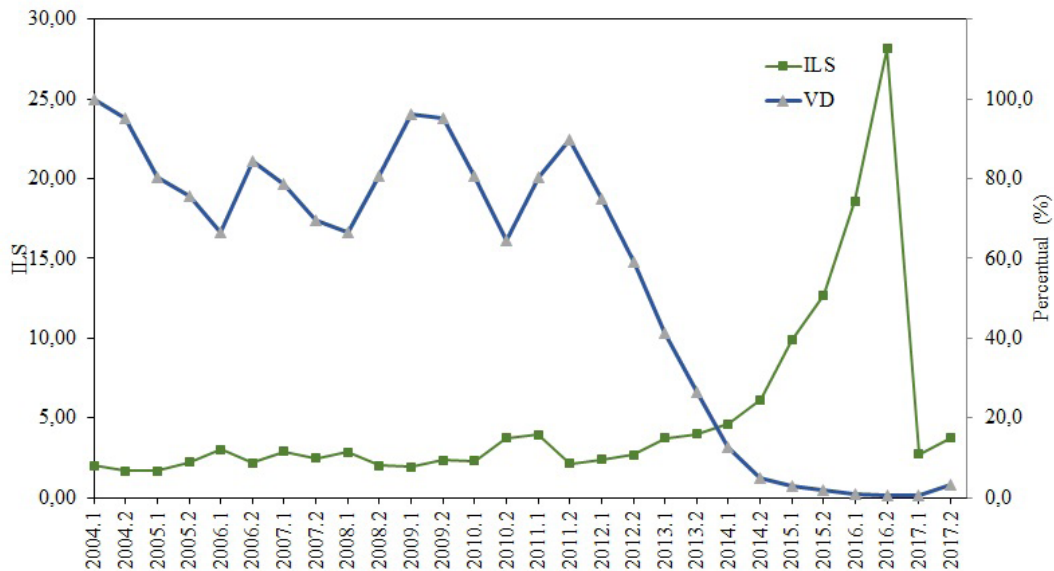


Figura 6 – Variação do Índice de Larson-Skold com o percentual de volume disponível nas águas do açude Sítios Novos.

Fonte: Elaborada pelos autores (2019).

As águas avaliadas pelos índices de estabilidade da água não originaram potencial incrustante significativo nos tubos de transporte de água, porém podem ter implicado na sua corrosão. De tal modo, além do monitoramento do conteúdo iônico da água, os potenciais corrosivo e incrustante devem ser considerados nos programas de controle da qualidade da água, pois são inerentes à proteção da saúde pública e à qualidade da água. Ademais, é preciso selecionar o índice mais adequado e em conformidade à situação real do sistema estudado, visto que variados índices de estabilidade da água podem delinear diferentes condições de estabilidade.

4.4 Análise estatística

Compararam-se os resultados semestrais de cada um dos índices de estabilidade calculados (LSI, RSI, PSI, LSI e IA). Esses resultados mostraram que não houve diferença significativa para o período de 2004 a 2017 no açude Sítios Novos (Tabela 4). Isso foi verificado tanto no teste paramétrico ANOVA (p -valor $> 0,05$ e $F_{\text{calculado}} <$

$F_{\text{crítico}}$) como no não paramétrico *Kruskal-Wallis* (p -valor $> 0,05$ e $H_{\text{teste}} < H_{\text{crítico}}$). Dessa maneira, o ciclo climático anual não teve influência significativa sobre o potencial de corrosão e de incrustação das águas avaliadas pelos referidos índices de estabilidade da água.

A análise estatística multivariada também foi realizada para caracterizar e avaliar a qualidade da água do Açude Sítios Novos quanto a sua estabilidade. O método de Análise de Componentes Principais (ACP) permite reduzir o número de variáveis originais, mantendo a maior quantidade de informação possível em termos da variação total contida no conjunto de dados (CORTES et al., 2016).

As componentes principais PC1 e PC2 apresentaram autovalor superior a 1 e explicaram 71,73% da variância total nas amostras (Tabela 6). Os *loadings* das variáveis em cada componente estão na Tabela 7.

O fator PC1 evidenciou o incremento das concentrações de CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} e STD com a redução do volume disponível do reservatório, con-

firmando a tendência corrosiva observada pelos índices de estabilidade da água. A maior concentração de íons dissolvidos e especificamente de Cl^- , um dos principais ânions contribuintes do conteúdo de STD, beneficiou o potencial corrosivo das águas estudadas. O fator PC2 evidenciou o peso da precipitação e, em menor escala, da concentração de Ca^{2+} . Esse componente indica o aumento da precipitação em paralelo com a transferência de Ca^{2+} do sedimento para a massa líquida, que pode originar incrustação quando ultrapassado seu limite de solubilidade.

Vale ressaltar que as componentes principais PC1 e PC2 também possuem correlação com parâmetros ligados à composição iônica das águas do reservatório estudado, portanto são úteis para o entendimento do processo de salinização desse reservatório.

5 CONCLUSÕES

Este trabalho avaliou o potencial corrosivo e incrustante das águas superficiais do açude Sítios Novos entre 2004 e 2017. Os resultados mostraram o predomínio de águas do tipo cloretadas sódicas no reservatório, justificada pela proximidade deste com a costa e pela litologia local de embasamento cristalino.

Quanto à estabilidade da água, depreende-se que as águas estudadas foram potencialmente corrosivas. Deste modo, a tendência corrosiva observada pode ter afetado as atividades industriais da região, como do Complexo Industrial e Portuário do Pecém, caso utilizada sem tratamento prévio, e induzido a redução da qualidade química, microbiológica e estética da água durante o período analisado. Como um todo, não houve diferença estatisticamente significativa ao longo de cada ano para os índices computados, apesar da observação da deterioração destes com a redução da precipitação e do volume reservado.

A ACP promoveu a redução de onze características das águas superficiais estudadas para dois componentes principais, que explicaram 71,73% da variância total, mostrando que os parâmetros mais representativos na estabilidade química das águas do açude Sítios Novos foram CO_3^{2-} , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{2+} , STD, VD e Precipitação.

Mediante o exposto, o conhecimento do conteúdo iônico das águas superficiais e a representação de seus atributos por meio de índices são primordiais para avaliação da qualidade da água. É possível, assim, apontar possíveis limitações de usos e tornar-se uma ferramenta para a gestão sustentável da água. Conclui-se que os resultados aqui obtidos fornecem informações valiosas sobre a adequação geral das águas do açude Sítios Novos para fins industriais. Esses achados podem auxiliar os usuários finais e os tomadores de decisão a identificarem o pré-tratamento de água necessário à adequação ao uso industrial na área de estudo.

6 AGRADECIMENTOS

À Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH) e à Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (Funceme) pelo fornecimento dos dados utilizados no estudo. À Fundação Cearense de Apoio ao Desenvolvimento Científico e Tecnológico (Funcap) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelas bolsas concedidas aos autores.

7 CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Conceitualização, Souza SO e Silva FJA; **Metodologia**, Souza SO e Silva FJA; **Investigação**, Souza SO; **Redação - Primeira versão**, Souza SO, Batista ACON e Castro MPS; **Redação - Revisão & Edição**, Souza SO, Silva FJA, Batista ACON e Castro MPS; **Aquisição de Financiamento**, Silva FJA; **Recursos**, Silva FJA; **Supervisão**, Silva FJA.

8 REFERÊNCIAS

- AGATEMOR, C.; OKOLO, P. O. Studies of corrosion tendency of drinking water in the distribution system at the University of Benin. **The Environmentalist**, v. 28, n. 4, p. 379-384, 2008. <https://www.doi.org/10.1007/s10669-007-9152-2>
- ALIPOUR, V.; DINDARLOO, K.; MAHVI, A. H.; REZAEI, L. Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in a drinking water distribution system: a case study of Bandar Abbas city, Iran. **Journal of Water and Health**, v. 13, n. 1, p. 203-209, 2015. <https://www.doi.org/10.2166/wh.2014.157>
- AL-RAWAJFEH, A. E. **Modelling and simulation of CO₂ release in multiple effect distillers for seawater desalination**. Shaker, 2004.
- AL-RAWAJFEH, A. E.; AL-SHAMAILAH, E. M. Inhibition of corrosion in steel water pipes by ammonium pyrrolidine dithiocarbamate (APDTC). **Desalination**, v. 206, n. 1-3, p. 169-178, 2007. <https://www.doi.org/10.1016/j.desal.2006.02.065>
- AMMAR, R.; KAZPARD, V.; EL SAMRANI, A. G.; AMACHA, N.; SAAD, Z.; CHOU, L. Hydrodynamic influence on reservoir sustainability in semi-arid climate: A physicochemical and environmental isotopic study. **Journal of Environmental Management**, v. 197, p. 571-581, 2017. <https://www.doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.04.030>
- APHA. **Standard Methods for the examination of water and wastewater**, 20th ed., American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, Washington, 1998, 937pp.
- ARAÚJO NETO, J. R.; SALES, M. M.; PALÁCIO, H. A. Q.; BRASIL, J. B.; CHAVES, L. C. G. Seleção dos indicadores da salinidade das águas superficiais da bacia Metropolitana do Ceará pelo emprego da análise multivariada. **Water Resources and Irrigation Management**, v.3, n. 2, p. 37-46, 2014. <https://www.doi.org/10.19149/2316-6886/wrim.v3n2p37-46>
- BHARDWAJ, V.; SINGH, D. S. Surface and groundwater quality characterization of Deoria District, Ganga plain, India. **Environmental Earth Sciences**, v. 63, n. 2, p. 383-395, 2011. <https://www.doi.org/10.1007/s12665-010-0709-x>
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria nº 5 de 28 de setembro de 2017. Dispõe sobre a consolidação das normas sobre as ações e os serviços de saúde do Sistema Único de Saúde. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, nº 190, Seção 1, p. 360, 2017.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Brasília, DF: **Diário Oficial da União**, 2005.
- CALIJURI, M. C.; CUNHA, D. G. F. **Engenharia Ambiental: conceitos, tecnologia e gestão**. 1. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2013. 832 p.
- CARRIER AIR CONDITIONING COMPANY: **Handbook of Air Conditioning System Design**. McGraw-Hill Books. New York, 1965.
- CEARÁ. Secretaria dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará. **Atlas eletrônico dos recursos hídricos do Ceará**. Disponível em: <http://atlas.srh.ce.gov.br/infra-estrutura/acudes/detalha- CaracteristicasTecnicas.php?cd_ac_ude=175&status=0>. Acesso em: 20 jul. 2018.
- CEARÁ. **Caderno regional das bacias Metropolitanas / Conselho de Altos Estudos e Assuntos Estratégicos**, Assembleia Legislativa do Estado do Ceará. Fortaleza: INESP, 2009. 136p.
- COMPANHIA DE GESTÃO DOS RECURSOS HÍDRICOS (COGERH). **Inventário ambiental do açude Sítios Novos 2008**. Fortaleza: COGERH, 2008. 37p.
- CORTES, J. E.; MUÑOZ, L. F.; GONZALEZ, C. A.; NIÑO, J. E.; POLO, A.; SUSPES, A.; SIACHOQUE, S.C.; HERNÁNDEZ, A.; TRUJILLO, H. Hydrogeochemistry of the formation waters in the San Francisco field, UMV basin, Colombia—A multivariate statistical approach. **Journal of Hydrology**, v. 539, p. 113-124, 2016. <https://www.doi.org/10.1016/j.jhydrol.2016.05.010>
- DANTAS, E. W.; BITTENCOURT-OLIVEIRA, M. C.; MOURA, A. N. Dynamics of phytoplankton associations in three reservoirs in northeastern Brazil assessed using Reynolds' theory. **Limnologia**, v. 42, n. 1, p. 72-80, 2012. <https://www.doi.org/10.1016/j.limno.2011.09.002>
- DAVIL, M. F.; MAHVI, A. H.; NOROUZI, M.; MAZLOOMI, S.; AMARLUIE, A.; TARDAST, A.; KARAMITABAR, Y. Survey of corrosion and scaling potential produced water from Ilam water treatment plant. **World Applied Sciences Journal**, v. 7, n. 11, p. 11-24, 2009.
- DINKA, M. O.; LOISKANDL, W.; NDAMBUKI, J. M. Hydrochemical characterization of various surface water and groundwater resources available in Matahara areas, Fantalle Woreda of Oromiya region. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 3, p. 444-456, 2015. <https://www.doi.org/10.1016/j.ejrh.2015.02.007>
- ESTEVEZ, F. A. **Fundamentos da Limnologia**. 3. ed. Rio de Janeiro: Interciência, 2011. 790 p.
- FRANÇA, J. M. B.; WACHHOLZ, F.; NETO, J. A. C.; PAULINO, W. D. Comportamento das variáveis qualitativas do açude Pereira de Miranda—Pentecoste/CE, no período de estiagem. **Geociências**, v. 32, n. 4, p. 586-599, 2013.
- FREIRE, R. H. F.; CALIJURI, M. C.; SANTAELLA, S. T. Longitudinal patterns and variations in water quality in a reservoir in the semi-arid region of NE Brazil: responses to hydrological and climatic changes. **Acta Limnologia Brasiliensia**, São Carlos, v. 21, n. 2, p. 251- 262. 2009.

- FUNDAÇÃO CEARENSE DE METEOROLOGIA E RECURSOS HÍDRICOS (FUNCEME). **Qualigraf**. Fortaleza: FUNCEME, 2014. Disponível em: <<http://www.funceme.br/qualigraf/app/pagina/show/2>>. Acesso em: 01 jun. 2018.
- HAMMER, Ø.; HARPER, D. A. T.; RYAN, P. D. PAST: Paleontological Statistics software package for education and data analysis. **Palaentologia Electronica**, v. 4, p. 1-9, 2001.
- HARITASH, A. K.; GAUR, S.; GARG, S. Assessment of water quality and suitability analysis of River Ganga in Rishikesh, India. **Applied Water Science**, v. 6, n. 4, p. 383-392, 2016. <https://www.doi.org/10.1007/s13201-014-0235-1>
- IMRAN, S. A.; DIETZ, J. D.; MUTOTI, G.; TAYLOR, J. S.; RANDALL, A. A. Modified Larsons ratio incorporating temperature, water age, and electroneutrality effects on red water release. **Journal of Environmental Engineering**, v. 131, n. 11, p. 1514-1520, 2005. [https://www.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9372\(2005\)131:11\(1514\)](https://www.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9372(2005)131:11(1514))
- KURDI, M.; FERDOWS, M. S.; MAGHSOUDI, A. Sensitivity of corrosion and scaling indices based on ions; case study Iran. **Water Quality, Exposure and Health**, v. 7, n. 3, p. 363-372, 2015. <https://www.doi.org/10.1007/s12403-015-0156-8>
- LEE, R.; BIGGS, T.; FANG, X. Thermal and hydrodynamic changes under a warmer climate in a variably stratified hypereutrophic reservoir. **Water**, v. 10, n. 9, p. 1284, 2018. <https://www.doi.org/10.3390/w10091284>
- LEPRUN, J.C. **Primeira Avaliação das Águas Superficiais do Nordeste**. Relatório de fim de convênio de manejo e conservação do solo do Nordeste brasileiro. Recife: SUDENE-DRN, 1983, p. 91-141.
- MARENGO, J. A.; TORRES, R. R.; ALVES, L. M. Drought in Northeast Brazil - past, present, and future. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 129, n. 3-4, p. 1189-1200, 2017. <https://www.doi.org/10.1007/s00704-016-1840-8>
- MEIRELES, A. C. M.; ANDRADE, E. M. D.; FRISCHKORN, H.; CRISOSTOMO, L. A.; PALÁCIO, H. A. Q. Avaliação das águas do Açude Araras utilizadas para irrigação, Bacia do Acaraú - Ceará. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. **Anais...** São Paulo: ABRH, 2007. p. 1-12.
- MILLETTE, J. R.; HAMMONDS, A. F.; PANSING, M. F.; HANSEN, E. C.; CLARK, P. J. Aggressive water: Assessing the extent of the problem. **Journal (American Water Works Association)**, v. 72, n. 5, p. 262-266, 1980. <https://www.doi.org/10.1002/j.1551-8833.1980.tb04510.x>
- MIRZABEYGI, M.; NAJI, M.; YOUSEFI, N.; SHAMS, M.; BIGLARI, H.; MAHVI, A. H. Evaluation of corrosion and scaling tendency indices in water distribution system: a case study of Torbat Heydariye, Iran. **Desalination and Water Treatment**, v. 57, n. 54, p. 25918-25926, 2016. <https://www.doi.org/10.2166/wh.2014.157>
- NIA, M. G.; RAHIMI, H.; SOHRABI, T.; NASERI, A.; TOFIGHI, H. Potential risk of calcium carbonate precipitation in agricultural drain envelopes in arid and semi-arid areas. **Agricultural Water Management**, v. 97, n. 10, p. 1602-1608, 2010. <https://www.doi.org/10.1016/j.agwat.2010.05.014>
- PRISYAZHNIUK, V. A. Prognosticating scale-forming properties of water. **Applied Thermal Engineering**, v. 27, n. 8-9, p. 1637-1641, 2007. <https://www.doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2005.12.004>
- PUCKORIUS, P. R.; BROOKE, J. M. A new practical index for calcium carbonate scale prediction in cooling tower systems. **Corrosion**, v. 47, n. 4, p. 280-284, 1991. <https://www.doi.org/10.5006/1.3585256>
- SAJITHA, V.; VIJAYAMMA, S. A. Study of physico-chemical parameters and pond water quality assessment by using water quality index at Athiyannoor Panchayath, Kerala, India. **Emergent Life Sciences Research**, v. 2, n. 1, p. 46-51, 2016.
- SANTIAGO, M. M. F. **Mecanismos de salinização em regiões áridas. Estudo dos açudes Pereira de Miranda e Caxitoré**. 1984. 176 f. Tese (Doutorado em Geociências) Universidade de São Paulo, São Paulo, 1984.
- SANTOS, J. A.; MARINS, R. V.; AGUIAR, J. E.; CHALLAR, G.; SILVA, F. A.; LACERDA, L. D. Hydrochemistry and trophic state change in a large reservoir in the Brazilian northeast region under intense drought conditions. **Journal of Limnology**, v. 76, n. 1, 2017. <https://www.doi.org/10.4081/jlimnol.2016.1433>
- SHAH, M.; SIRCAR, A.; VARSADA, R.; VAISHNANI, S.; SAVALIYA, U.; FALDU, M.; VAIDYA, D.; BHATTACHARYA, P. Assessment of geothermal water quality for industrial and irrigation purposes in the Unai geothermal field, Gujarat, India. **Groundwater for Sustainable Development**, v. 8, p. 59-68, 2019. <https://www.doi.org/10.1016/j.gsd.2018.08.006>
- SHANKAR, B.; ARCOT, U. A critical evaluation of the water stability indices for the groundwaters of bommasandra industrial area in Bangalore, India. **American Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 5, n. 1, p. 8-16, 2018.
- SHEIKHOLESLAMI, R. Scaling potential index (SPI) for CaCO₃ based on Gibbs free energies. **AIChE Journal**, v. 51, n. 6, p. 1782-1789, 2005. <https://www.doi.org/10.1002/aic.10415>
- SILVA JÚNIOR, L. G. A.; GHEYI, H. R.; MEDEIROS, J. F. Composição química de águas do cristalino do Nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 3, n. 1, p. 11-17, 1999. <https://www.doi.org/10.1590/1807-1929/agriambi.v3n1p11-17>
- SOUZA FILHO, F. A.; CAMPOS, J. N. B. Um método paramétrico de avaliação do potencial de salinização de reservatórios aplicado a regiões semi-áridas. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 10, n. 2, p. 5-14, 2005.
- SOUZA FILHO, F. A.; MARTINS, E. S. P. R.; PORTO, M. O processo de mistura em reservatórios do semiárido e sua implicação na

qualidade da água. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 11, n. 4, p. 109-119, 2006.

SPULBER, N.; SABBAGHI, A. Economics of water resources: from regulation to privatization. **Springer Science & Business Media**, 2012.

TAGHIPOUR, H.; SHAKERKHATIBI, M.; POURAKBAR, M.; BELVASI, M. Corrosion and scaling potential in drinking water distribution system of Tabriz, northwestern Iran. **Health Promotion Perspectives**, v. 2, n. 1, p. 103, 2012. <https://www.doi.org/10.5681/hpp.2012.013>

TEAM, R. C. R: **A Language and Environment for Statistical Computing**. Vienna, Austria: R Foundation for Statistical Computing, 2018. Disponível em: <<https://www.r-project.org/>>. Acesso em: 15 jan. 2018.

VASCONCELOS, H. C.; FERNÁNDEZ-PÉREZ, B. M.; GONZÁLEZ, S.; SOUTO, R. M.; SANTANA, J. J Characterization of the corrosive

action of mineral waters from thermal sources: a case study at Azores Archipelago, Portugal. **Water**, v. 7, n. 7, p. 3515-3530, 2015. <https://www.doi.org/10.3390/w7073515>

VIDAL, T. F.; CAPELO NETO, J. Impacto da estratificação térmica na qualidade da água de reservatório do semiárido. In: XX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 20., 2013, Bento Gonçalves. **Anais...** Bento Gonçalves: ABRH, v. 1, n. 8, 2013.

WORLD HEALTH ORGANIZATION (OMS). **Guidelines for Drinking Water Quality - fourth edition**. Geneva: WHO, 2011.

ZHANG, Y.; GHYSELBRECHT, K.; MEESSCHAERT, B.; PINOY, L.; VAN DER BRUGGEN, B. Electrodialysis on RO concentrate to improve water recovery in wastewater reclamation. **Journal of Membrane Science**, v. 378, n. 1, p. 101-110, 2011. <https://www.doi.org/10.1016/j.memsci.2010.10.036>