ANÁLISE QUALITATIVA DA QUALIDADE DA ÁGUA SUBTERRÂNEA NA FOZ DO RIO SÃO FRANCISCO

Rayssa Tavares de Mendonça[1]; Emannuele Silva e Macedo[2] & Paulo Sérgio de Rezende Nascimento[3]

RESUMO – O presente estudo analisou a qualidade das águas subterrâneas na Foz do Rio São Francisco, em Sergipe, por meio da integração de dados hidrogeoquímicos e geotecnologias em ambiente SIG. Foram avaliados os parâmetros amônia, cloreto, dureza, ferro, pH, sólidos dissolvidos totais (SDT), sódio e sulfato, considerando os limites estabelecidos pela legislação brasileira. Os resultados evidenciaram dois domínios hidrogeoquímicos distintos: o domínio fissural cristalino do noroeste, caracterizado por águas mais mineralizadas, alcalinas e com elevados teores de SDT e sódio; e o domínio granular costeiro, influenciado pela intrusão salina, pela elevada vulnerabilidade dos aquíferos e pela contaminação antrópica associada à deficiência de saneamento e à carcinicultura. Também foram identificadas elevadas concentrações de ferro e amônia em áreas hidromórficas da planície costeira. A análise integrada permitiu identificar áreas críticas de vulnerabilidade hídrica, destacando a necessidade de monitoramento contínuo, da manutenção das vazões ecológicas e da adoção de medidas de tratamento e dessalinização para a proteção dos aquíferos costeiros.

ABSTRACT – This study analyzed groundwater quality in the São Francisco River estuary basin, located in the state of Sergipe, Brazil, through the integration of hydrogeochemical data and geotechnologies within a GIS environment. The parameters evaluated included ammonia, chloride, hardness, iron, pH, total dissolved solids (TDS), sodium, and sulfate, considering the limits established by Brazilian legislation. The results revealed two distinct hydrogeochemical domains: the crystalline fractured aquifer domain in the northwestern sector, characterized by more mineralized and alkaline waters with high TDS and sodium concentrations; and the coastal granular aquifer domain, influenced by saline intrusion, high aquifer vulnerability, and anthropogenic contamination related to inadequate sanitation and shrimp farming activities. High concentrations of iron and ammonia were also identified in hydromorphic areas of the coastal plain. The integrated analysis enabled the identification of critical areas of water vulnerability, highlighting the need for continuous monitoring, maintenance of ecological river flows, and the adoption of treatment and desalination measures to protect coastal aquifers.

Palavras-Chave – Águas subterrâneas. Intrusão salina. Hidrogeoquímica.

[1]) Graduanda do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, CEP: 49100-000, rayssamendoncaa1@gmail.com
[2]) Graduanda do Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, CEP: 49100-000, manuh@academico.ufs.br
[3]) Orientador e Professor, Departamento de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Sergipe, Avenida Marechal Rondon, s/n, Jardim Rosa Elze, São Cristóvão, SE, CEP: 49100-000, psrn.geologia@gmail.com

INTRODUÇÃO

A Foz do Rio São Francisco, localizada no estado de Sergipe, representa uma importante unidade territorial para o gerenciamento dos recursos hídricos no Nordeste brasileiro (Fernandes *et al.*, 2022). Compreendendo uma área estuarina de transição entre os ambientes continental e marinho, o estuário abrange 17 municípios sergipanos que dependem diretamente das funções ecológicas e econômicas associadas ao baixo curso do rio (Cruz *et al.*, 2021).

Diante das limitações para o uso das águas superficiais, as águas subterrâneas tornaram-se uma importante alternativa de abastecimento para as comunidades ribeirinhas (Neves et al., 2017). Entretanto, a qualidade e a disponibilidade desses recursos vêm sendo progressivamente influenciadas pelas alterações hidrodinâmicas observadas no estuário. Entre os principais fatores destacam-se as intervenções antrópicas associadas à regularização das vazões por usinas hidrelétricas instaladas a montante, que reduziram significativamente a descarga de água doce em direção ao oceano (Cunha *et al*., 2018). Como consequência, houve a diminuição da capacidade de escoamento do rio e o favorecimento do avanço da água salina para o interior do estuário. Somado a esse cenário, a elevação do nível médio do mar atua como um fator agravante, intensificando a intrusão salina e comprometendo a integridade dos aquíferos costeiros da região (Yauri; Barbieri, 2022).

Dessa forma, compreende-se que a pressão antropogênica sobre os corpos hídricos dessa região costeira tem comprometido a disponibilidade de recursos hídricos potáveis, tornando essencial a investigação dos parâmetros hidrogeoquímicos para subsidiar o gerenciamento sustentável da região (Nascimento *et al.*, 2024). Nesse contexto, torna-se fundamental a realização de uma análise ambiental integrada que relacione os condicionantes físicos da área de estudo com os parâmetros de qualidade das águas subterrâneas. Assim, o presente estudo tem como objetivo avaliar espacialmente a qualidade da água subterrânea na Foz do Rio São Francisco por meio de geotecnologias, considerando parâmetros físico-químicos com base nos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021.

MATERIAL E MÉTODO

A presente área de estudo compreende a região da Foz do Rio São Francisco, localizada no litoral norte do estado de Sergipe, entre as coordenadas geográficas 10°15'12" e 10°38'22"S e 36°31'00" e 36°54'34"W, abrangendo os municípios de Brejo Grande, Cedro de São João, Ilha das Flores, Japoatã, Malhada dos Bois, Neópolis, Pacatuba, Propriá, Santana do São Francisco e São Francisco, além de porções dos municípios de Amparo do São Francisco, Aquidabã, Canhoba, Japaratuba, Muribeca, Pirambu e Telha (Figura 1).

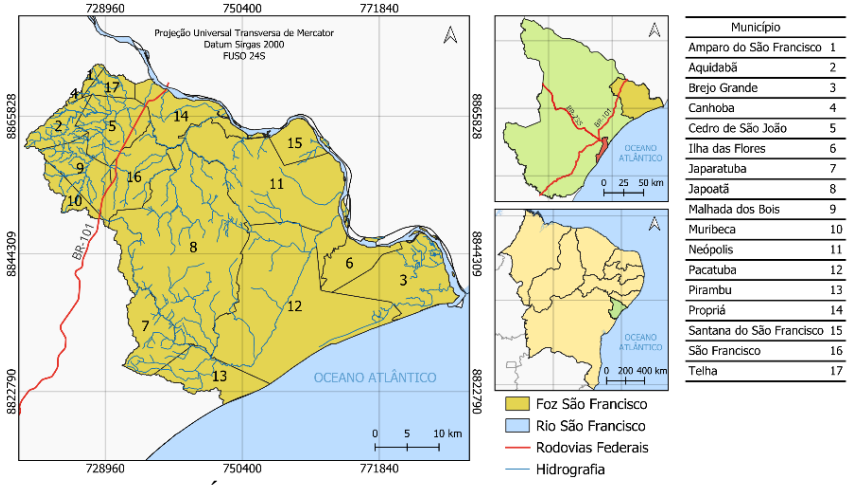


Figura 1 – Área de estudo. Fonte: Adaptado de SEMAC (2023).

A metodologia adotada neste estudo foi estruturada a partir de uma abordagem integrada entre aspectos físico-químicos e análise geoespacial, visando compreender a distribuição espacial dos parâmetros de qualidade das águas subterrâneas e sua relação com as características ambientais da região da Foz do Rio São Francisco. Inicialmente, procedeu-se à compilação, organização e padronização das bases cartográficas e dos dados hidrogeoquímicos. Para isso, foram utilizados dados provenientes de bases oficiais, incluindo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), Atlas de Qualidade da Água Subterrânea da Embrapa Tabuleiros Costeiros e o portal SERHidro, disponibilizado pela Secretaria de Estado do Meio Ambiente e dos Recursos Hídricos de Sergipe (SEMAC).

Além das informações ambientais, foram incorporados dados hidroquímicos relacionados aos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, incluindo sólidos dissolvidos totais (SDT), cloreto, sódio, ferro, amônia, sulfato, dureza e pH, parâmetros amplamente utilizados na avaliação da qualidade e potabilidade das águas subterrâneas. Em seguida, foram realizados procedimentos de integração temática em ambiente de Sistema de Informações Geográficas (SIG), utilizando o software QGIS, adotando-se o sistema de referência SIRGAS 2000, projeção UTM, Fuso 24S. Assim, permitiu-se a elaboração dos mapas de geologia, geomorfologia, pedologia, hidrografia e distribuição espacial dos parâmetros físico-químicos analisados.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A área de estudo é marcada pela transição entre o Domínio Macururé (Figura 2A), composto por rochas metamórficas mais resistentes ao intemperismo, o Grupo Barreiras, associado aos tabuleiros costeiros sedimentares, e os depósitos quaternários holocênicos presentes na planície costeira e nas áreas fluviais. No Domínio Macururé predominam Neossolos Litólicos e Luvissolos

Crômicos (Figura 2B), geralmente rasos e mais suscetíveis à erosão, enquanto nos sedimentos do Grupo Barreiras destacam-se os Argissolos Vermelho-Amarelos, cuja diferenciação textural favorece processos erosivos (Genovez et al., 2005).

Essas unidades não apenas condicionam a dinâmica superficial, mas também influenciam a composição hidrogeoquímica das águas subterrâneas, uma vez que a interação entre litologia, solos e circulação hídrica favorece a dissolução de minerais e modifica a composição iônica da água (Santos *et al*., 2021). Nas áreas sujeitas à saturação hídrica ocorrem principalmente Gleissolos, enquanto na planície costeira predominam Neossolos Quartzarênicos e Espodossolos, associados a sedimentos arenosos de elevada permeabilidade. Essa condição aumenta a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação e potencializa os efeitos da intrusão salina na região costeira (Silva *et al*., 2017).

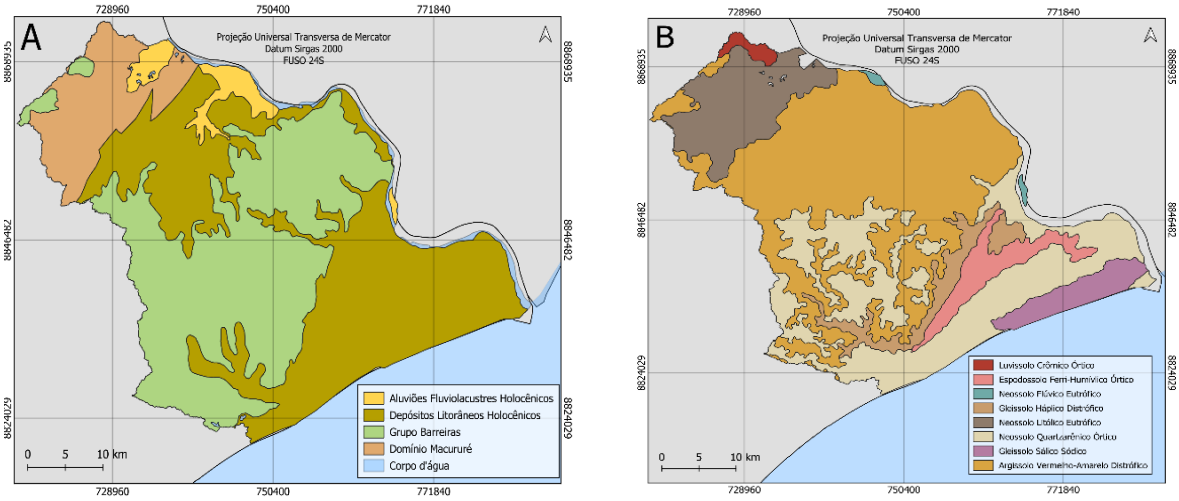


Figura 2 - Mapas temáticos de geologia (A) e pedologia (B). Fonte: Adaptado de IBGE (2023).

No que se refere à geomorfologia (Figura 3A), a área apresenta uma transição entre o Pediplano do Baixo São Francisco, os Tabuleiros Costeiros e a faixa costeira composta pelo Delta do São Francisco, planícies litorâneas e terraços fluviais (Sena-Souza et al., 2022). Essas unidades mantêm estreita relação com os domínios geológicos e influenciam a dinâmica erosiva e a estabilidade das vertentes. Além disso, a elevada permeabilidade dos sedimentos quaternários aumenta a vulnerabilidade ambiental, favorecendo a infiltração e o transporte de contaminantes para os aquíferos (Saraiva-Maia et al., 2024; Silva & Bezerra, 2023).

A hidrogeologia da área compreende três principais domínios aquíferos (Figura 3B): granular, fissural e cárstico. O aquífero granular, associado aos sedimentos do Grupo Barreiras, ocupa a maior parte da região e apresenta elevada produtividade, constituindo importante reserva hídrica subterrânea, embora seja vulnerável à intrusão salina e à contaminação (Gonçalves; Vieira, 2021). O

aquífero fissural ocorre na porção noroeste, associado ao Domínio Macururé, onde o armazenamento de água depende de fraturas e falhas, resultando em menor produtividade e maior variabilidade das vazões. Já o aquífero cárstico ocorre de forma localizada na porção centro-oeste, associado às rochas calcárias da Bacia Sergipe-Alagoas. As características hidrogeoquímicas desses sistemas refletem as interações entre litologia, dinâmica hidrológica e processos de salinização (Silva *et al*., 2015; Vieira *et al*., 2025).

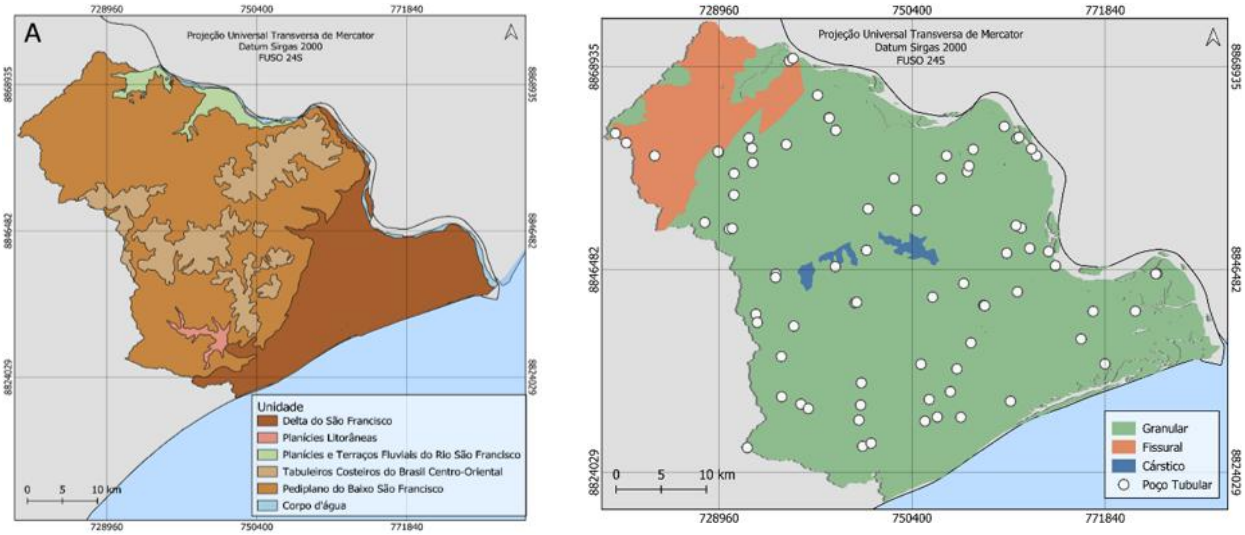


Figura 3 - Mapas temáticos de geomorfologia (A) e tipos de aquíferos (B). Fonte: Adaptado de IBGE (2023); SEMAC (2023).

Para subsidiar a análise das parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas, apresenta-se inicialmente a Tabela 1, contendo os Valores Máximos Permitidos (VMP) estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, parâmetros que foram utilizados como referência para a análise da conformidade da qualidade das águas subterrâneas na área de estudo.

Tabela 1 – Valores do padrão organoléptico de potabilidade.

Parâmetro	**VMP - Valor Máximo Permitido (mg/L)**
SDT	500
Sódio	200 (8,7 mmol/L)
Cloreto	250 (7,04 mmol/L)
Dureza	300
pH	6,0 a 9,0
Ferro	0,3
Amônia	1,2
Sulfato	250 (2,6 mmol/L)

Fonte: Adaptado de BRASIL: Ministério da Saúde. Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021.

Os sólidos dissolvidos totais (SDT) apresentam um padrão hidrogeoquímico bem definido na área de estudo (Figura 4A). Os menores valores (<300 mg/L) concentram-se nos setores central e sul, associados ao aquífero granular do Grupo Barreiras, onde a maior recarga hídrica favorece águas menos mineralizadas. Em contrapartida, os maiores teores ocorrem no domínio aquífero fissural do Macururé e na faixa costeira, refletindo processos de mineralização natural e influência da intrusão salina. Na região noroeste, a baixa precipitação e a elevada evapotranspiração favorecem o enriquecimento mineral, enquanto na zona costeira o aumento da salinidade está relacionado à influência marinha e à mistura entre águas doces e salinas (Barbosa-Filho; Oliveira, 2021; Filho; Milanez, 2021). Assim, a qualidade das águas subterrâneas é condicionada tanto pela litologia quanto pela dinâmica hidrológica e costeira (Silveira et al., 2025).

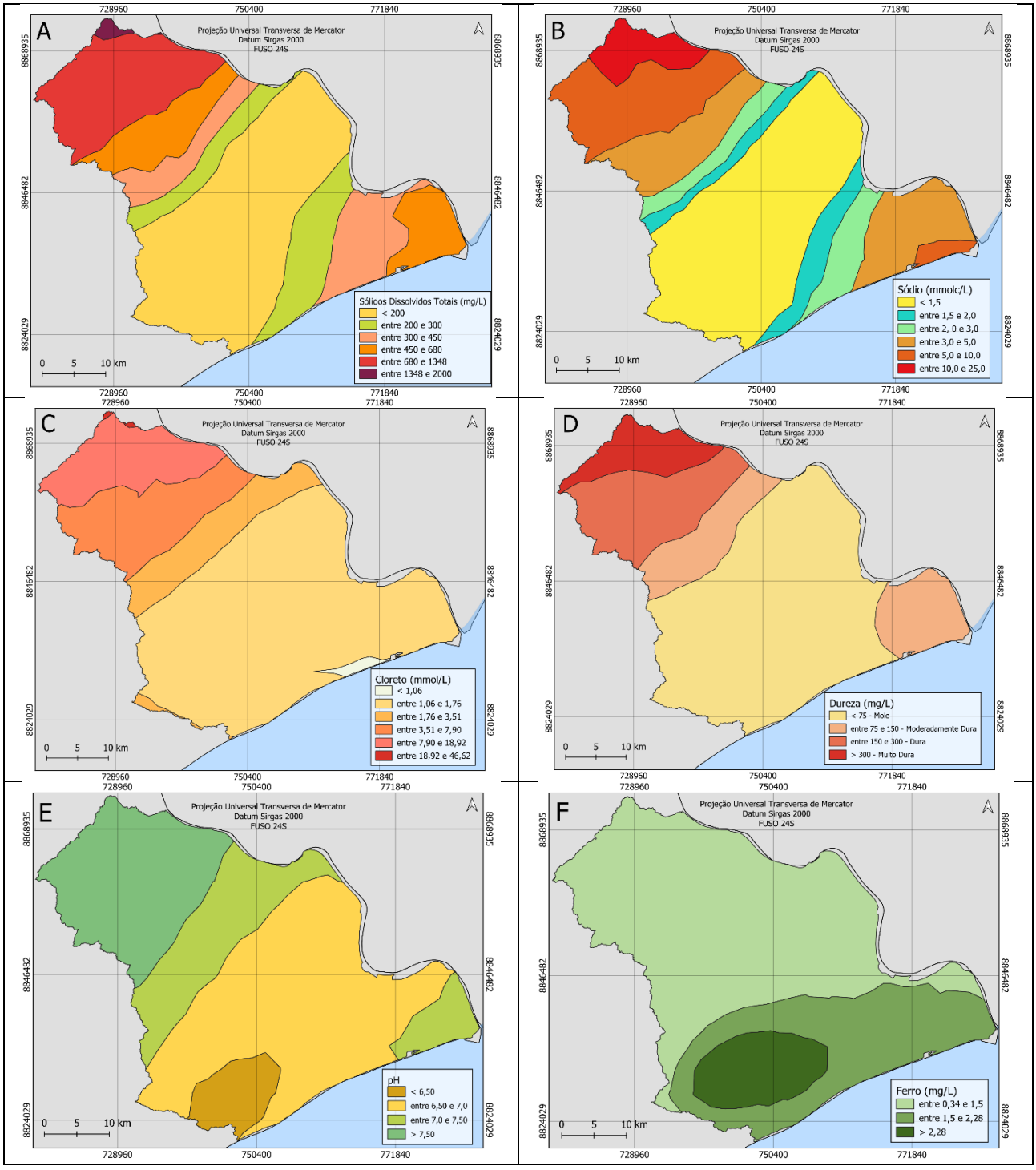
A distribuição espacial do sódio (Figura 4B) e do cloreto (Figura 4C) acompanha o padrão observado para os SDT. As maiores concentrações ocorrem no extremo noroeste, associadas ao domínio fissural cristalino, e na faixa costeira, sob influência marinha e da intrusão salina. Enquanto na região costeira a salinização é o principal fator controlador, nas áreas interiores a mineralização resulta principalmente do intemperismo das rochas do embasamento cristalino (Kreis *et al*., 2023).

Os padrões de dureza (Figura 4D) e pH (Figura 5E) apresentam forte relação com os solos e as litologias da região. Na porção sul-central predominam águas ácidas e pouco mineralizadas, associadas aos sedimentos arenosos dos Tabuleiros Costeiros. Já no noroeste predominam águas alcalinas e mais duras, em decorrência da dissolução de minerais ricos em cálcio e magnésio presentes no embasamento cristalino. Na faixa costeira predominam águas de pH neutro a levemente alcalino e dureza moderada, associadas aos depósitos marinhos quaternários. A elevada vulnerabilidade dos aquíferos costeiros e cársticos reforça a necessidade de monitoramento contínuo (Ribeiro *et al*., 2017).

O ferro dissolvido (Figura 4F) constitui um dos principais parâmetros de desconformidade na área, com concentrações superiores ao limite de potabilidade. Os maiores teores concentram-se nas planícies úmidas de Pacatuba e Japaratuba, onde condições redutoras favorecem a solubilização do ferro e sua incorporação às águas subterrâneas. A distribuição da amônia (Figura 4G) evidencia a influência das atividades antrópicas na planície costeira. As maiores concentrações ocorrem nos municípios de Pacatuba, Brejo Grande e Ilha das Flores, associadas à infiltração de efluentes domésticos e resíduos da carcinicultura.

A elevada permeabilidade dos solos arenosos e as condições hidromórficas favorecem a permanência do íon amônio nas águas subterrâneas, indicando contaminação recente e vulnerabilidade dos aquíferos superficiais (Lima & Neto, 2020; Santos et al., 2024). O sulfato (Figura

4H) apresentou baixas concentrações em toda a área de estudo, permanecendo abaixo dos limites de potabilidade. Sua ocorrência está associada principalmente ao intemperismo natural das rochas do embasamento cristalino, sem evidências de influência antrópica significativa.



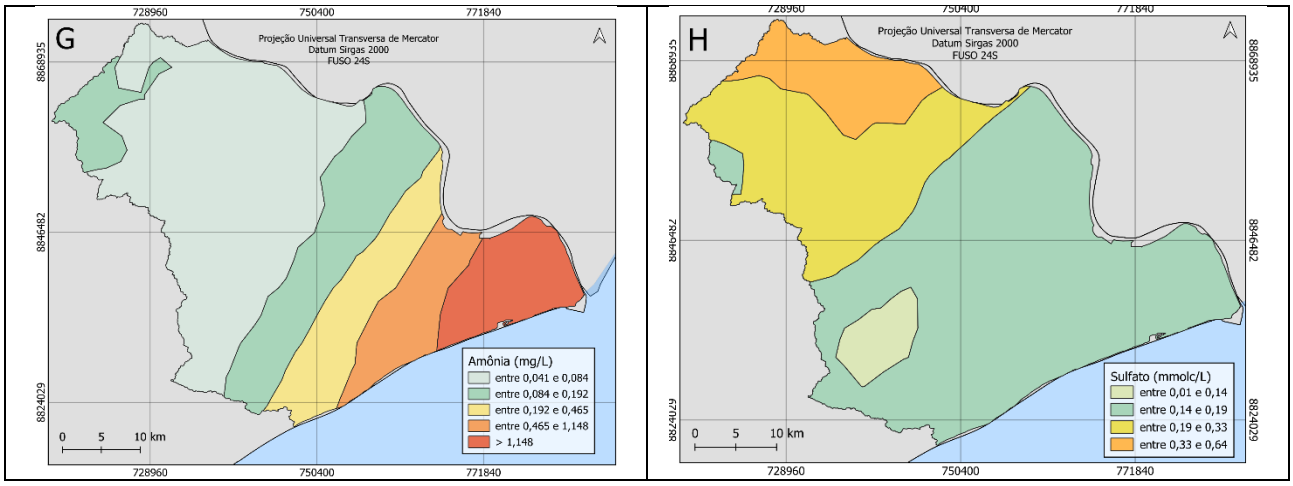


Figura 4 - Mapa de espacialização dos dados físico-químicos: SDT (a), sódio (b), cloreto (c), dureza (d), pH (e), ferro (f), amônia (g) e sulfato (h). Fonte: Adaptado de Resende, Cruz e Amorim (2009).

CONCLUSÃO

A integração de fatores físicos e atributos hidroquímicos em ambiente SIG permitiu diagnosticar a qualidade da água subterrânea na Foz do Rio São Francisco. Os resultados evidenciaram dois domínios hidrogeoquímicos principais. No domínio fissural do Macururé, predominam águas alcalinas, duras e com elevados teores de sólidos dissolvidos totais e sódio, associados à baixa recarga e à intensa evapotranspiração. No domínio granular costeiro, destacam-se processos de salinização relacionados à intrusão salina, além de concentrações elevadas de ferro e amônia favorecidas por ambientes hidromórficos e por fontes antrópicas difusas. Diante desse cenário, recomenda-se a adoção de medidas de dessalinização e tratamento da água nas áreas mais críticas, bem como a manutenção das vazões ecológicas do rio para minimizar a intrusão salina e proteger os aquíferos costeiros.

REFERÊNCIAS

BARBOSA FILHO, J.; OLIVEIRA, I.B. (2021). *"Development of a groundwater quality index: GWQI, for the aquifers of the state of Bahia, Brazil using multivariable analyses"*. Scientific Reports 11(1), pp. 1-23.

CRUZ, M.A.S.; CARDOSO JUNIOR, J.C.A.; GONÇALVES, A.A.; AMORIM, J.R.A.; ARAGÃO, R. (2021). *"Avaliação de metodologias de transferência de vazões de referência em bacias hidrográficas: sua aplicação na bacia do rio Japaratuba - Sergipe - Brasil"*. Revista Brasileira de Geografia Física 14(03), pp. 1571–1585.

CUNHA, C.J.; VILLAR, J.W.C., PINHEIRO, L.S. (2018). "*A regularização da vazão como indicador de pressão hidrológico e geomorfológico no sistema estuarino do Rio São Francisco".* Revista Sustentare. Edição especial, p.55-68.

DINIZ FILHO, J.B.; MILANEZ, C.L. (2021). *"Dados hidrogeológicos dos aquíferos cretáceos infrabarreiras no litoral oriental do RN"* in Anais do XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

FERNANDES, M.M.; LIMA, A.H.S.; WANDERLEY, L.L.; FERNANDES, M.R.M.; ARAUJO FILHO, R.N. (2022). *"Fragmentação florestal na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, Brasil"*. Ciência Florestal 32(3), pp. 1227–1246.

GENOVEZ, A.M.; NETO, F.L.; SARTORI, A. (2005). *"Classificação Hidrológica de Solos Brasileiros para a Estimativa da Chuva Excedente com o Método do Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos Parte 1: Classificação"*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos 10(4), pp. 05-18.

GOLÇALVES, J.A.C.; VIEIRA, E.M. (2021). *"Aquífero Barreiras: Alto Potencial Hídrico Subterrâneo na Porção do Baixo Rio Doce no Estado Espírito Santo"* in Anais do XX Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

KREIS, M.; TAUPIN, J.D.; PATRIS, N.; VERGNAUD-AYRAUD, V.; LEDUC, C.; et al. (2023). *"Explaining the groundwater salinity of hard-rock aquifers in semi-arid hinterlands using a multidisciplinary approach"*. Hydrological Sciences Journal 68(15), pp. 2189–2207.

LIMA, R.B.; FERREIRA NETO, J.V. (2020). *"Qualidade das águas subterrâneas na bacia Endorreica do Tabuleiro do Martins, Maceió-AL"*. Revista de Geografia 37(3), pp. 277–298.

MESTRINHO, S.S.P.; LUZ, J.A.G. (2004). *"Análise exploratória espacial e temporal dos dados de poços tubulares da bacia do rio Itapicuru, Bahia"* in Anais do XIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

NEVES, A.L.R.; ALVES, M.P.; LACERDA, C.F.; GHEYI, H.R. (2017). *"Aspectos socioambientais e qualidade da água de dessalinizadores nas comunidades rurais de Pentecoste-CE"*. Ambiente & Água 12(1), pp. 124–135.

RIBEIRO, D.D.M.; NASCIMENTO, S.A.M.; GARCIA, A.J.V. (2017). *"Caracterização hidrogeológica dos aquíferos cársticos Sapucari e Maruim, Bacia Sedimentar de Sergipe-Alagoas, Nordeste do Brasil"*. Águas Subterrâneas 31(3), pp. 207–221.

SANTOS, C.J; LÄMMLE, L; MOREIRA; V.B; PICANÇO, J.L; MINCATO, R.L; AYER, J.E.B. (2021). *"Avaliação da qualidade da água no aquífero raso em Campos dos Goytacazes, Rio de Janeiro, Brasil"*. Revista Brasileira de Geografia Física 14(06), pp. 3241-3254.

SANTOS, M.J.; RIOS, I.H.R.; SOUZA, R.J.; ALBUQUERQUE, E.S. (2024). *"Avaliação de parâmetros químicos e microbiológicos das águas subterrâneas do município de Parintins - AM como indicadores de poluição das águas".* Águas Subterrâneas 38(1), p. e-30257.

SARAIVA-MAIA, J.J.O.; SANTOS, D.L.N.; SOUZA, A.L.E.; SILVA, M.D.; ALMEIDA, N.V. (2024). *"Vulnerabilidade à erosão do solo na bacia hidrográfica do Baixo São Francisco: uma visão integrada entre geomorfologia e cobertura e uso da terra"*. Revista Contexto Geográfico 9(18), pp. 468–484.

SENA-SOUZA, J.P.; CRESPO, T.V.; SOARES, G.C.S.; COSTA, L.R.F.; LEITE, M.R. (2022). *"Influência do relevo na dinâmica temporal do uso e cobertura da terra no norte de Minas Gerais, Brasil"*. Revista Brasileira de Geografia Física 15(05), pp. 2475-2485.

SILVA, C.N.; NEGRÃO, F.I.; SILVA, D.R.; OLIVEIRA, I.B.; OLIVEIRA, P.R.N.; ABREU, A.S.; SANTOS, A.A. (2015). *"Avaliação preliminar dos tipos hidroquímicos e qualidade das águas subterrâneas nos domínios hidrogeológicos do Estado de Sergipe"*. In Anais do XVIII Congresso Brasileiro de Águas Subterrâneas.

SILVA, F.L.; OLIVEIRA, E.Z.; PICHARILLO, C.; RUGGIERO, M.H.; COSTA, C.W.; MOSCHINI, L.E. (2017). *"Naturalidade da paisagem verificada por meio de indicadores ambientais: manancial do Rio Monjolinho, São Carlos-SP"*. Revista Brasileira de Geografia Física 10(3), pp. 970-980.

SILVA, T.C; BEZERRA, I.S. (2023). "*Vulnerabilidade à perda de solos no município de Lucena-PB: avaliação para os anos de 2018 a 2040"* Revista Brasileira de Geografia Física 16(05), pp. 2464-2479.

SILVA, V.M.E, DOS SANTOS, M.B., SILVEIRA, V.S.T, SANTANA, C.M.S., SILVA, M.J., ALEXANDRE, B.G.C., DIAS, G.R. (2025). *"Variação sazonal da qualidade das águas subterrâneas em diferentes domínios hidrogeológicos na bacia hidrográfica do Rio Piauí (Sergipe)"*. Scientia Plena, 21(11).

SILVA, K.B.; AMORIM, R.R.; REGO, N.A.C. (2019). *"Mecanismos de precificação de recurso hídrico: uma perspectiva geossistêmica".* Revista Caminhos de Geografia 20(69), pp. 36–48.

SILVEIRA, T.V.S.; SILVA, J.M.; SATURNINO, N.M.S.R.; SANTOS, M.B.; VIEIRA, M.E.S.; GARCIA, C.A.B.; GONÇALVES, R.D. (2025). *"Padrões hidrogeoquímicos na Bacia do Rio Piauí: uma abordagem estatística multivariada"*. Scientia Plena 21(11).

YAURI, W.L.M; BARBIERI, R. (2022). *"Intrusão salina em um sistema rio – planície de inundação tropical influenciado por macromarés – Rio Pindaré (MA)"*. Oecologia Australis 26(2), pp. 271–285.