

Variações Sazonais dos Parâmetros Físico-Químicos do Sistema Aquífero Quaternário Costeiro em Sergipe

Seasonal Variability of Physicochemical Parameters in the Coastal Quaternary Aquifer System of Sergipe

C. S. M. Santos¹; M. I. dos Santos²; V. T. Romanha¹; N. M. S. R. Saturnino³;
R. D. Gonçalves^{1,3*}

¹Departamento de Geologia, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

²Programa de Pós-Graduação em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

³Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, 49107-230, São Cristóvão-Sergipe, Brasil

*roger.dias@academico.ufs.br

(Recebido em 13 de julho de 2025; aceito em 05 de outubro de 2025)

Este estudo avaliou as variações temporais e espaciais dos parâmetros físico-químicos do Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), localizado no campus da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão. Foram realizadas duas campanhas de monitoramento em 15 poços tubulares, nos períodos seco (outubro de 2023) e chuvoso (julho de 2024). Os parâmetros analisados incluíram temperatura, oxigênio dissolvido (OD), condutividade elétrica (CE), sólidos totais dissolvidos (STD), salinidade, pH e turbidez. Observou-se aumento nos teores de OD durante o período chuvoso, enquanto CE e STD apresentaram redução, sugerindo diluição por recarga. A salinidade permaneceu estável e o pH manteve-se predominantemente ácido, sem variações sazonais expressivas. A turbidez apresentou valor anômalo em um poço na estação seca, indicando possível contaminação pontual. A análise espacial revelou padrões consistentes de CE, STD e pH ao longo do gradiente hidráulico, refletindo a interação entre a água subterrânea e a geologia local. A variação observada no poço situado próximo à rodovia indica possível influência antrópica. Os resultados reforçam a relevância do monitoramento contínuo para a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, contribuindo para a detecção de variações hidroquímicas associadas ao clima e a atividades antrópicas.

Palavras-chave: sonda multiparâmetros, São Cristóvão (SE), monitoramento hidroquímico.

This study assessed the temporal and spatial variability of physicochemical parameters in the Quaternary Aquifer System (SAQ) at the Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES), located on the campus of the Federal University of Sergipe, in São Cristóvão, Brazil. Two monitoring campaigns were conducted in 15 tubular wells during the dry (October 2023) and rainy (July 2024) seasons. The parameters measured included temperature, dissolved oxygen (DO), electrical conductivity (EC), total dissolved solids (TDS), salinity, pH, and turbidity. An increase in DO levels was observed during the rainy season, while EC and TDS values decreased, suggesting dilution due to aquifer recharge. Salinity remained stable, and pH values were predominantly acidic with no significant seasonal variation. Turbidity showed anomalous values in one well during the dry season, indicating possible localized contamination. Spatial analysis revealed consistent patterns of EC, TDS, and pH along the hydraulic gradient, indicating interaction between groundwater and the local geology. Notably, variations observed in the well near the highway suggest potential anthropogenic influence. These findings highlight the importance of continuous groundwater quality monitoring to support sustainable resource management and to identify hydrochemical changes driven by seasonal dynamics and human activities.

Keywords: multiparameter probe, São Cristóvão (SE), hydrochemical monitoring.

1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso essencial à vida e um indicador sensível das transformações ambientais. Além de sua função ecológica, desempenha papel estratégico como insumo em diversos setores produtivos que sustentam a economia global [1]. Apesar de aproximadamente dois terços da superfície terrestre estarem cobertos por água, apenas uma pequena fração é doce, concentrando-se principalmente em geleiras e aquíferos subterrâneos [2, 3].

Nas últimas décadas, a crescente escassez hídrica tem impulsionado o uso das águas subterrâneas como fonte prioritária para o abastecimento humano e atividades produtivas [4-6]. No Brasil, cerca de 40% das sedes urbanas dependem exclusivamente de mananciais subterrâneos, enquanto 3% contam com abastecimento misto com predominância subterrânea [7]. Todavia, esse recurso vem sofrendo degradação progressiva em áreas urbanas, rurais e regiões costeiras, onde a pressão antrópica tem comprometido sua qualidade e disponibilidade [8].

A crescente urbanização e industrialização têm ampliado a presença de substâncias poluentes nas águas superficiais e subterrâneas, elevando os riscos de contaminação [9-11]. No Brasil, os principais desafios associados à gestão das águas subterrâneas incluem a superexploração dos aquíferos, a impermeabilização do solo – principalmente em áreas de recarga – e a contaminação por agentes poluentes [12, 13]. Em muitas regiões, a degradação da qualidade da água está diretamente relacionada à expansão urbano-industrial e ao uso crescente de poços privados, frequentemente operados sem controle adequado [14].

Diante desse cenário, a análise da qualidade da água torna-se fundamental para compreender os impactos das atividades antrópicas e para desenvolver estratégias de prevenção e remediação [15-17]. A qualidade da água subterrânea é influenciada pela concentração de constituintes particulados e dissolvidos, que refletem as propriedades físico-químicas das rochas e solos por onde a água percola, alterando a geoquímica das águas subterrâneas [18, 19]. Segundo a CETESB [20], o monitoramento sistemático da qualidade da água subterrânea é essencial para o entendimento da hidrogeoquímica dos aquíferos e da condição dos parâmetros de qualidade.

Nas últimas quatro décadas, a pesquisa sobre a identificação de fontes de contaminantes na água subterrânea cresceu exponencialmente em número de estudos [21], mas observa-se uma estagnação no avanço rumo a soluções eficazes e à aplicação prática dessas pesquisas [22]. O gerenciamento de riscos relacionados à qualidade da água subterrânea exige uma abordagem baseada em dados concretos, permitindo avaliar os impactos potenciais na saúde humana e nos ecossistemas, como enfatizado por McBean (2023) [9]. Este estudo destaca que o processo de gestão de riscos nesse contexto envolve a avaliação criteriosa das alternativas de políticas públicas e técnicas de remediação; a integração dos resultados da avaliação de riscos com dados de engenharia, considerando também fatores sociais, econômicos e políticos; e a tomada de decisão sobre as melhores estratégias de mitigação. Por isso, torna-se urgente a ampliação e implementação de redes de monitoramento quali-quantitativo.

Nesse contexto, este trabalho tem como objetivo avaliar a variação temporal e espacial dos parâmetros físico-químicos do Sistema Aquífero Quaternário (SAQ), por meio da rede de monitoramento denominada SEHRES (*Sergipe Hydrogeological Research Site*). Para tanto, foram realizadas duas campanhas de monitoramento físico-químico, em outubro de 2023 (estação seca) e julho de 2024 (estação chuvosa), com a subsequente análise qualitativa das águas subterrâneas de 15 poços tubulares monitoráveis distribuídos na região.

A caracterização dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas permite a construção de mapas temáticos que revelam a variação temporal e espacial desses parâmetros no contexto do SAQ. O monitoramento contínuo e integrado neste sítio científico visa assegurar a confiabilidade e consistência dos dados obtidos, fundamentais para a compreensão da dinâmica do aquífero e para a correta avaliação de sua vulnerabilidade.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Caracterização da Área

O SEHRES é uma rede de monitoramento periódico implementada para fins de estudos hidrogeológicos e ambientais [23], composta por poços tubulares com aproximadamente 20 metros de profundidade e vazões de estabilização que chegam a 13 m³/h. Esses poços estão inseridos em um aquífero superficial, poroso e livre, que representa as águas subterrâneas rasas do campus “José Aloísio de Campos” da Universidade Federal de Sergipe (UFS), situado no município de São Cristóvão (SE) (Figura 1).

A região estudada encontra-se na Bacia Hidrográfica do Rio Sergipe, que abrange o território do estado juntamente com mais sete bacias hidrográficas. O Rio Poxim, sub-bacia que corta a

região no sentido noroeste-sudeste, compreende o Rio Poxim-Açu, curso d'água mais relevante dessa sub-bacia. Este rio exerce papel fundamental no abastecimento hídrico de órgãos públicos, incluindo a própria UFS.

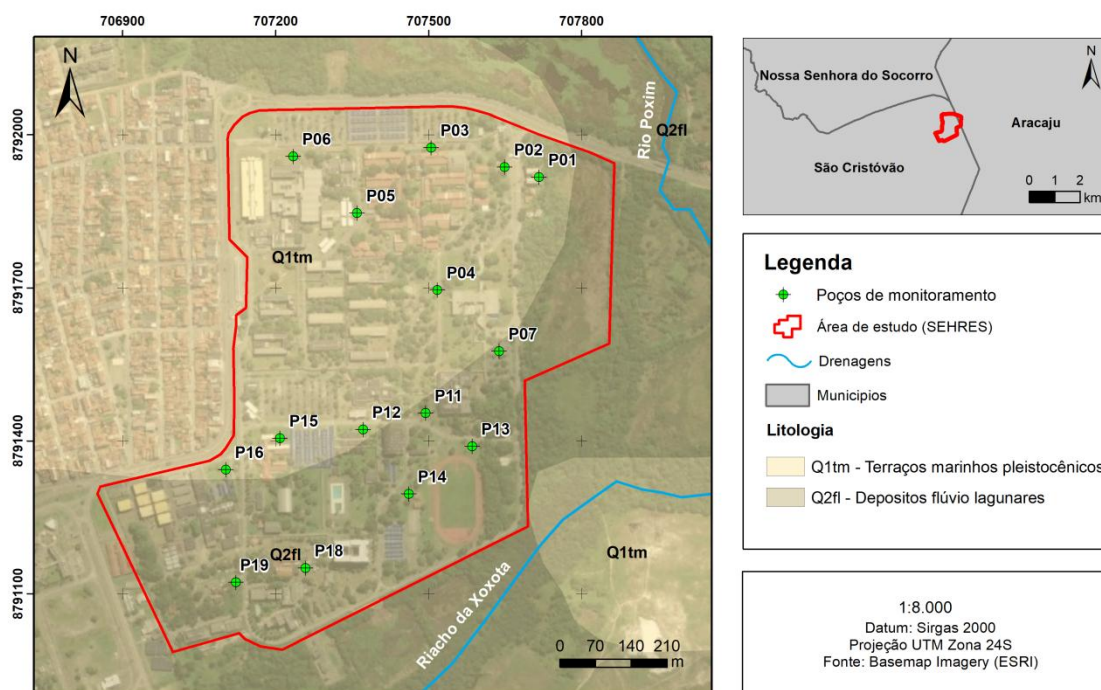


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo, denominada de SEHRES – Sergipe Hydrogeological Research Site, situada no Campus da Universidade Federal de Sergipe, em São Cristóvão – SE.

Geologicamente, a área apresenta diversas unidades sedimentares, incluindo afloramentos do Grupo Barreiras, terraços marinhos pleistocênicos e depósitos flúvio-lagunares, conforme apresentado na Figura 1. Os sedimentos quaternários recobrem as rochas sedimentares do Grupo Barreiras, marcando os eventos transgressivos marinhos do Pleistoceno e Holoceno na faixa costeira.

Os depósitos flúvio-lagunares, compostos principalmente por sedimentos arenosos e argilosos com alto teor de matéria orgânica, se distribuem ao longo de drenagens acima dos terraços marinhos pleistocênicos, recobrendo as porções inferiores dos vales do Grupo Barreiras [24]. A litologia desses terraços é constituída por areias bem selecionadas, geralmente encontradas em áreas mais rebaixadas do relevo e próximas às paleofalésias, que foram esculpidas nos sedimentos do Grupo Barreiras durante uma das últimas transgressões marinhas [25].

Subjacente às formações continentais superficiais ocorre o Grupo Piaçabuçu, no qual está inserido a Formação Calumbi, identificada em profundidade na região estudada. Essa unidade marca uma transição na evolução sedimentar da bacia, caracterizada pela substituição de depósitos carbonáticos por siliciclásticos ao final do Cretáceo. Nesse período, ocorreu o recuo da linha de costa, seguido por processos de erosão da planície litorânea e da plataforma continental então exposta. Posteriormente, com uma nova transgressão marinha, a plataforma foi novamente recoberta por sedimentos, favorecendo a deposição em um ambiente transgressivo, onde predominam os folhelhos característicos da Formação Calumbi [25].

Do ponto de vista climático, o SEHRES está situado em uma região de clima tropical úmido com estação seca no verão, caracterizado por sazonalidade bem definida, que influencia diretamente tanto a recarga do aquífero quanto a dinâmica do fluxo subterrâneo [26]. Durante a estação chuvosa, a maior infiltração da água da chuva favorece a reposição do aquífero e intensifica a interação entre águas subterrâneas e cursos d'água superficiais [27]. Já na estação seca, a redução da precipitação pode ocasionar o rebaixamento do nível freático, tornando os corpos hídricos mais dependentes da descarga subterrânea para manutenção do fluxo.

Conforme dados do serviço de informações meteorológicas *InstaRain* (disponível em instarain.com.br), os meses de abril a junho apresentam as maiores lâminas de chuva, sendo maio o mês mais chuvoso e dezembro o mais seco. As chuvas mensais registradas entre março de 2023 e dezembro de 2024 podem ser visualizadas na Figura 2.

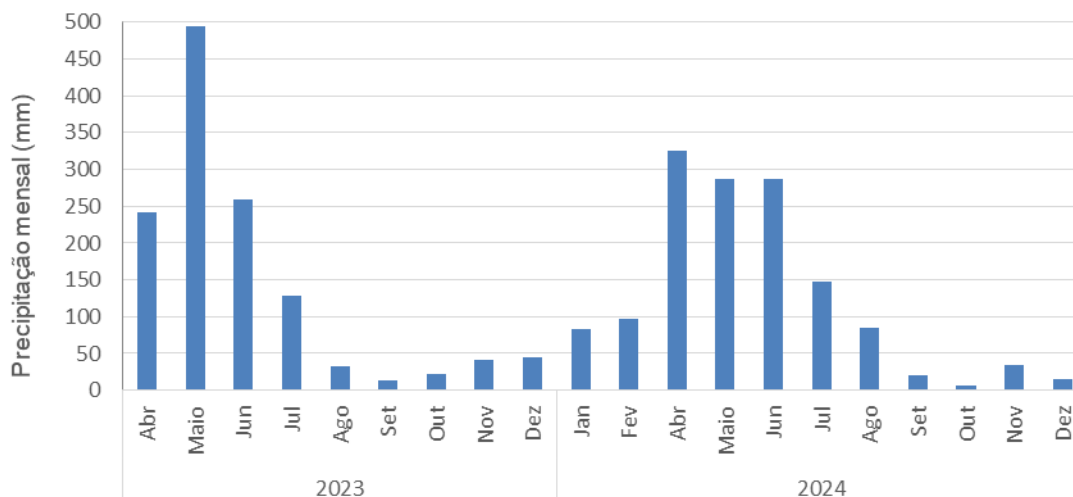


Figura 2: Precipitação mensal acumulada na área de estudo. As coletas foram realizadas em outubro/23 e julho/24. Fonte: InstaRain, Estação Ponto Novo.

2.2 Parâmetros Físico-Químicos

As coletas dos parâmetros físico-químicos foram realizadas em 27/10/2023 (estação seca) e 29/07/2024 (estação chuvosa), abrangendo os 15 poços monitoráveis presentes na área de estudo. A medição foi feita utilizando uma sonda multiparâmetros do modelo YSI EXO 1, fornecida pelo Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS). Este equipamento, utilizado em estudos ambientais, é reconhecido pela precisão e confiabilidade na medição de parâmetros físico-químicos em diversos corpos hídricos, incluindo rios, estuários, oceanos e aquíferos subterrâneos.

A sonda conta com quatro sensores digitais e é projetada para fornecer medições rápidas e eficazes, sendo adequada para monitoramentos de longa duração. Antes da coleta, o equipamento foi calibrado adequadamente e programado para realizar registros com intervalos de 1 segundo, permitindo o cálculo automático das médias e desvios padrão dos dados.

Foram monitorados os seguintes parâmetros: temperatura ($^{\circ}\text{C}$), oxigênio dissolvido (mg L^{-1}), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$), sólidos totais dissolvidos (mg L^{-1}), salinidade (ppt), pH, turbidez (NTU), profundidade (m) e localização geográfica, obtida por meio de GPS integrado.

Na fase de tratamento dos dados, os valores dos parâmetros coletados foram tabulados e, com o uso do software ArcGIS (versão Desktop 10.5), integrados em um sistema de informações geográficas (SIG). Em seguida, foram confeccionados mapas temáticos representando a distribuição espacial e temporal dos parâmetros físico-químicos por meio de técnicas de interpolação espacial, empregando interpoladores como *Inverse Distance Weighting* (IDW), krigagem e *spline*.

Além disso, foram gerados diagramas de caixa (*boxplots*), com o auxílio do software PAST 5.2.1, para auxiliar na interpretação estatística dos dados. Para uma avaliação mais aprofundada, os dados foram submetidos a uma análise estatística formal no ambiente de programação R Studio v.4.5. A normalidade da distribuição dos dados de cada parâmetro foi verificada através do Teste de Shapiro-Wilk, com o objetivo de determinar a abordagem estatística mais adequada. A comparação entre os períodos seco e chuvoso foi realizada com o Teste de Wilcoxon para amostras pareadas, que é o equivalente não paramétrico do Teste t de Student. A correlação entre os parâmetros foi quantificada por meio do Coeficiente de Correlação de Spearman. Para todas as análises de hipótese, foi considerado um nível de significância de 5% ($\alpha=0,05$).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos foram organizados em tabelas (Tabelas 1, 2 e Tabela 3 para o Coeficiente de Correlação de Spearman), representados em diagramas de caixa (Figura 3) e espacialmente por meio de mapas temáticos (Figuras 4 a 9), permitindo uma análise detalhada da distribuição dos parâmetros na área de estudo. Os parâmetros físico-químicos avaliados incluíram temperatura (°C), OD (mg L⁻¹), CE (μS cm⁻¹), STD (mg L⁻¹), salinidade (ppt), pH e turbidez (NTU).

Tabela 1: Resultados dos parâmetros físico-químicos – campanha realizada em 27/10/2023 (estação seca).

POÇO	Temperatura (°C)	O.D (mg L ⁻¹)	C.E. (μS cm ⁻¹)	STD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH	NTU
P01	28,97	0,25	191,90	124,70	0,09	5,36	0,03
P02	27,77	0,62	233,70	151,87	0,11	4,57	0,00
P03	27,33	0,59	403,20	262,10	0,19	5,62	0,00
P04	29,17	0,37	114,80	74,64	0,05	5,69	0,22
P05	28,28	0,34	160,40	104,28	0,07	5,73	0,04
P06	29,05	0,24	408,60	265,59	0,19	5,66	0,94
P07	28,80	0,23	82,90	53,89	0,04	5,29	0,05
P11	28,45	0,26	160,20	104,00	0,07	4,73	0,05
P12	29,81	0,73	160,40	104,31	0,07	6,39	0,50
P13	29,23	0,27	110,70	71,98	0,05	5,07	0,00
P14	29,06	1,74	161,40	104,92	0,07	4,88	0,04
P15	29,61	0,30	436,20	283,55	0,21	5,62	0,77
P16	30,18	7,33	453,50	294,75	0,22	7,11	0,00
P18	28,36	0,22	425,50	276,58	0,20	5,48	0,02
P19	28,57	0,56	414,16	269,16	0,20	5,14	16,3

Tabela 2: Resultados dos parâmetros físico-químicos – campanha realizada em 29/07/2024 (estação chuvosa). A sonda apresentou inconsistências nas leituras de turbidez, motivo pelo qual esse parâmetro não foi considerado nesta campanha.

POÇO	Temperatura (°C)	O.D (mg L ⁻¹)	C.E. (μS cm ⁻¹)	STD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
P01	28,83	0,50	176,00	114,42	0,08	5,30
P02	28,05	0,40	104,20	67,70	0,05	4,42
P03	27,39	4,50	267,60	173,96	0,13	5,82
P04	28,98	0,60	124,80	81,12	0,06	5,05
P05	28,01	0,70	174,00	113,12	0,08	5,08
P06	28,75	3,30	200,00	129,97	0,09	5,69
P07	29,18	5,50	89,10	57,94	0,04	5,36
P11	28,61	2,00	202,10	131,34	0,09	3,40
P12	29,05	2,00	151,60	98,53	0,07	5,74
P13	28,87	4,20	98,50	64,02	0,04	4,29
P14	29,09	1,50	162,70	105,75	0,08	4,96
P15	28,74	1,50	288,60	187,59	0,14	5,71
P16	29,84	3,60	466,40	303,13	0,22	6,03
P18	27,60	2,60	413,00	268,46	0,20	3,80
P19	28,54	1,30	446,50	290,19	0,21	3,44

A partir das análises das correlações de Spearman (Tabela 3) foi possível observar que em ambos os períodos, observou-se correlação quase perfeita entre CE, STD e salinidade ($\rho \approx 0,99-1,0$), confirmando a interdependência direta entre essas variáveis, uma vez que a CE expressa a concentração de íons dissolvidos, a qual se reflete nos valores de STD e na salinidade. O OD apresentou correlação fraca com CE, STD e salinidade em ambos os períodos ($\rho < 0,2$ no período seco e $\rho < 0,1$ no chuvoso), sugerindo que a dinâmica do OD nas águas subterrâneas não

está diretamente relacionada à concentração de sais dissolvidos. O pH exibiu correlações fracas com a maioria das variáveis ($p < 0,25$), embora no período chuvoso tenha se destacado pela maior associação com OD ($p = 0,33$), possivelmente refletindo a influência da recarga hídrica sobre a oxigenação do aquífero e a oxidação de sulfetos.

Tabela 3: Matriz de correlação de Spearman (ρ) entre os parâmetros físico-químicos analisados.

Período Seco					
	O.D (mg L ⁻¹)	C.E. (μ S cm ⁻¹)	STD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
O.D (mg L ⁻¹)	1	0,19	0,2	0,17	0,18
C.E. (μ S cm ⁻¹)	0,19	1	1	0,99	0,25
STD (mg L ⁻¹)	0,2	1	1	0,99	0,25
Salinidade (ppt)	0,17	0,99	0,99	1	0,23
pH	0,18	0,25	0,25	0,23	1
Período Chuvoso					
	O.D (mg L ⁻¹)	C.E. (μ S cm ⁻¹)	STD (mg L ⁻¹)	Salinidade (ppt)	pH
O.D (mg L ⁻¹)	1	0,06	0,06	0,09	0,33
C.E. (μ S cm ⁻¹)	0,06	1	1	0,99	0,10
STD (mg L ⁻¹)	0,06	1	1	0,99	0,10
Salinidade (ppt)	0,09	0,99	0,99	1	0,12
pH	0,33	0,10	0,10	0,12	1

Complementarmente, o teste de normalidade (Shapiro-Wilk) indicou que a maior parte das variáveis não apresentou distribuição normal, justificando o uso do teste não paramétrico de Wilcoxon. A partir dele, verificou-se que apenas o OD e o pH apresentaram diferenças estatisticamente significativas entre os períodos seco e chuvoso ($p < 0,05$), ao passo que a CE, STD e a salinidade não apresentaram diferenças sazonais significativas em termos de mediana ($p > 0,05$). Entretanto, os parâmetros de CE, STD e salinidade apresentam uma diferença de distribuição dos valores, como pode ser visto na Figura 3.

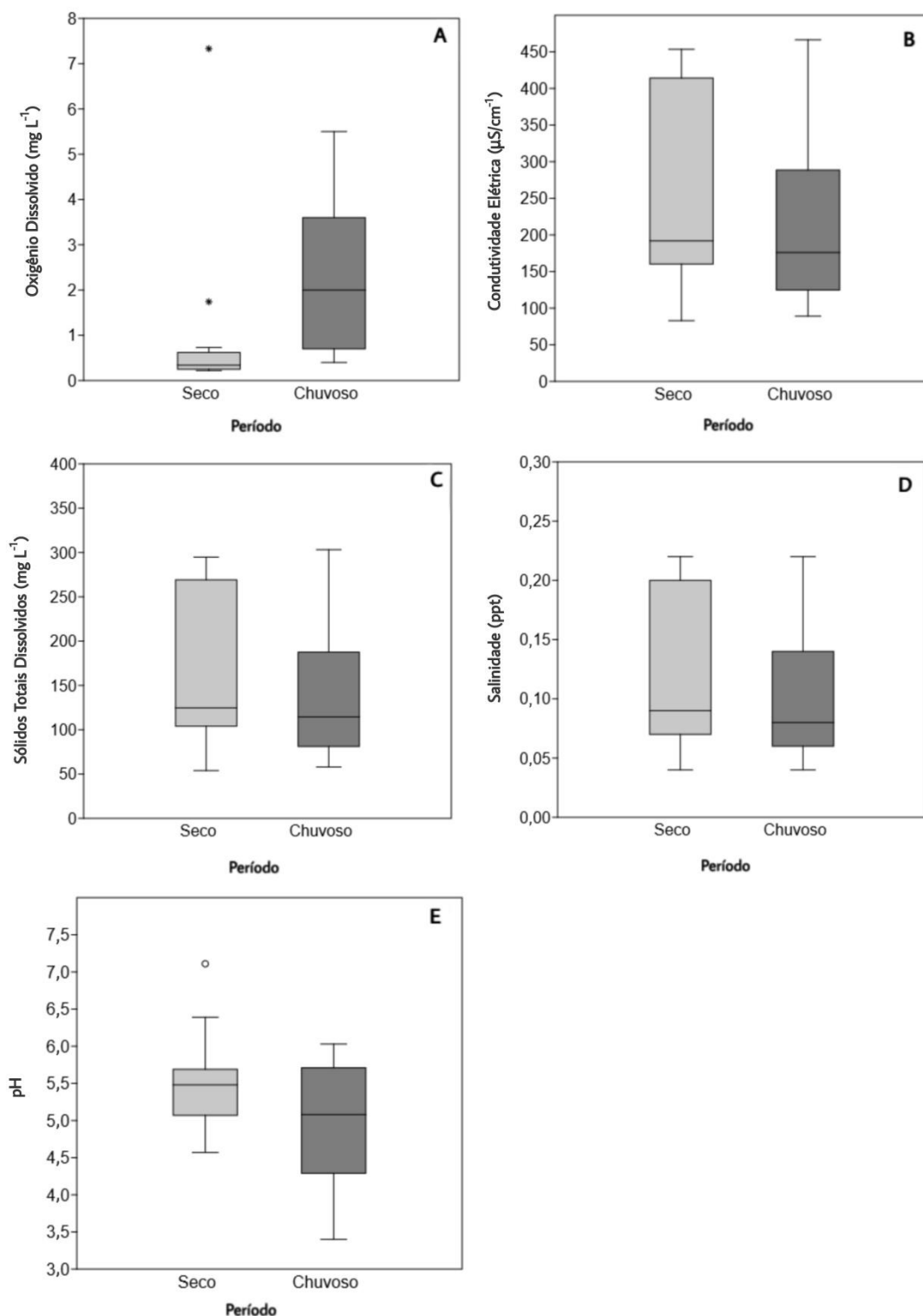


Figura 3: Diagramas de caixa com outliers (\circ) e outliers extremos ($*$) dos parâmetros físico-químicos: oxigênio dissolvido (mg L^{-1} – A), condutividade elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$ – B), sólidos totais dissolvidos (mg L^{-1} – C), salinidade (ppt – D) e pH (– E), aferidos nas águas dos poços do SEHRES.

Os diagramas de caixa apresentados na Figura 3 ilustram a variação dos parâmetros físico-químicos entre os períodos seco (2023) e chuvoso (2024) nos poços monitorados no SEHRES. De modo geral, observou-se uma redução nas concentrações de condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e salinidade durante o período chuvoso. Em contrapartida, o oxigênio dissolvido apresentou aumento significativo nesse período. Destaca-se também a presença de outliers extremos nos valores de OD durante o período seco, indicando dados atípicos.

O pH apresentou pouca variação entre os períodos, mantendo-se, em geral, dentro de uma faixa levemente ácida a neutra. Durante o período seco, os valores de pH apresentam menor variação, concentrando-se próximos à mediana. Já no período chuvoso, observa-se maior amplitude nesses valores, possivelmente devido à infiltração da água da chuva. Esses resultados reforçam a influência do regime sazonal sobre a qualidade hidroquímica do aquífero.

A Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021, do Ministério da Saúde, estabelece limites para parâmetros bacteriológicos, físicos e químicos da água utilizada para o consumo humano no Brasil [28]. Embora as águas dos poços analisados sejam utilizadas apenas ocasionalmente para irrigação, a presença de outros poços no mesmo aquífero, ainda sem monitoramento, reforça a importância de estudos sistemáticos, especialmente considerando seu potencial uso futuro para abastecimento humano ou dessedentação animal.

A concentração de oxigênio dissolvido (OD) apresentou variações significativas entre as campanhas (Figura 4), com a maioria dos poços registrando aumento nos valores durante a estação chuvosa, com exceção dos poços P14 e P16. Em outubro de 2023, o OD variou de 0,22 mg L⁻¹ (P18) a 7,33 mg L⁻¹ (P16), enquanto em julho de 2024 os valores oscilaram entre 0,40 mg L⁻¹ (P02) e 5,50 mg L⁻¹ (P07).

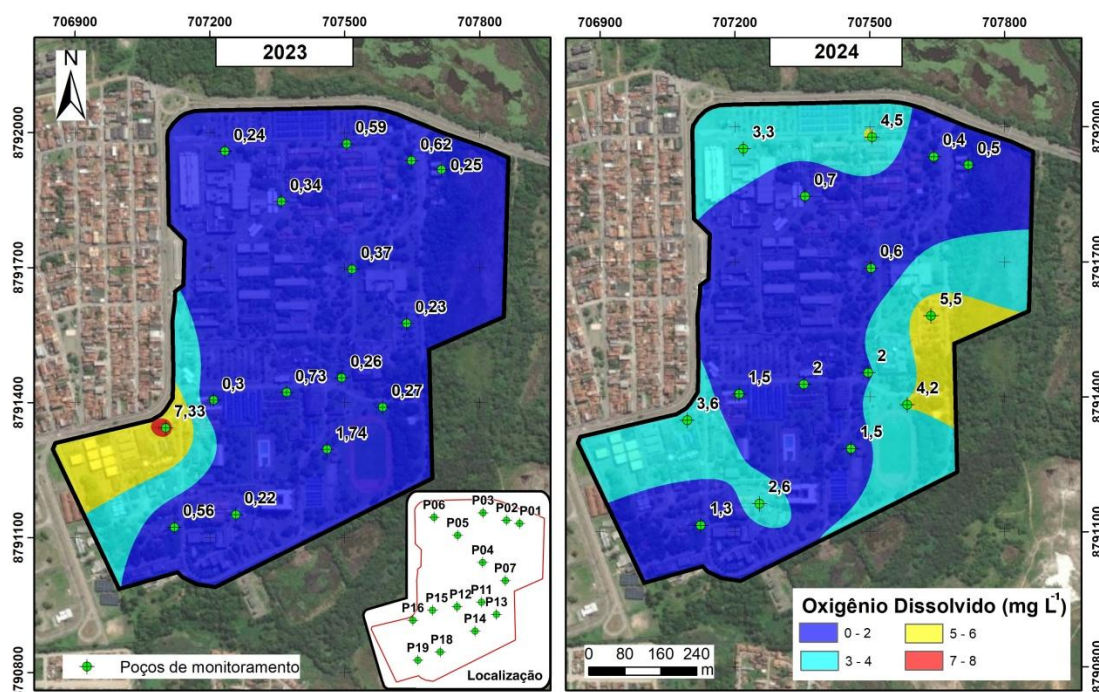


Figura 4: Mapas de distribuição espacial do Oxigênio Dissolvido (mg L⁻¹) nas campanhas realizadas nos poços do SEHRES em 27/10/2023 e 29/07/2024, respectivamente.

Segundo Feitosa et al. (2008) [29], águas subterrâneas tendem a apresentar baixas concentrações de OD, geralmente entre 0 e 5 mg L⁻¹, devido ao consumo de oxigênio durante a oxidação da matéria orgânica durante a trajetória da água na zona não saturada.

A presença de valores elevados de OD em alguns poços, especialmente no P16 durante o período chuvoso, pode estar relacionada às características do aquífero onde o SEHRES está inserido: sedimentos arenosos, rasos e altamente permeáveis, que favorecem taxas rápidas de infiltração. De acordo com Fetter (2014) [30], a água da chuva recém-infiltrada geralmente contém oxigênio dissolvido em níveis próximos à saturação. Quando essa água penetra diretamente no aquífero, sem atravessar camadas do solo com alta carga de matéria orgânica (que promoveriam remoção microbiana do oxigênio), ela pode manter seu caráter oxidante até alcançar o lençol freático.

Adicionalmente, durante a recarga, podem ser incorporadas bolhas de ar ao fluxo de infiltração, o que potencializa a entrada de oxigênio molecular em concentrações superiores à

solubilidade de equilíbrio, elevando ainda mais os níveis detectados de OD [31, 32]. A redução no OD do poço P16 entre as campanhas pode estar relacionada a variações na recarga, à atividade biológica local ou à influência de fontes antrópicas intermitentes, como infiltração de efluentes.

A condutividade elétrica (CE) expressa a capacidade que a água possui de conduzir corrente elétrica, propriedade que está intimamente relacionada à concentração e mobilidade dos íons dissolvidos em sua composição, especialmente os íons inorgânicos [33]. Este parâmetro pode refletir interferências ambientais, como a contaminação por efluentes ou outras fontes de poluição.

Observa-se uma queda significativa nos valores de CE entre os períodos analisados, sobretudo nas águas dos poços situados a montante da área de estudo (Figura 5). A CE foi mais elevada durante o período seco, o que pode estar relacionado à menor diluição, maior tempo de residência da água e intensificação da interação com os materiais geológicos. Segundo Brasil (2006) [34], águas subterrâneas naturais apresentam CE entre 10 e 100 $\mu\text{S cm}^{-1}$; valores acima desse intervalo podem refletir condições de contaminação antrópica, como a infiltração de efluentes domésticos e industriais. Este parâmetro, fortemente correlacionado com a concentração de STD, é útil na identificação de alterações na qualidade da água, inclusive aquelas associadas a fontes de contaminação [35].

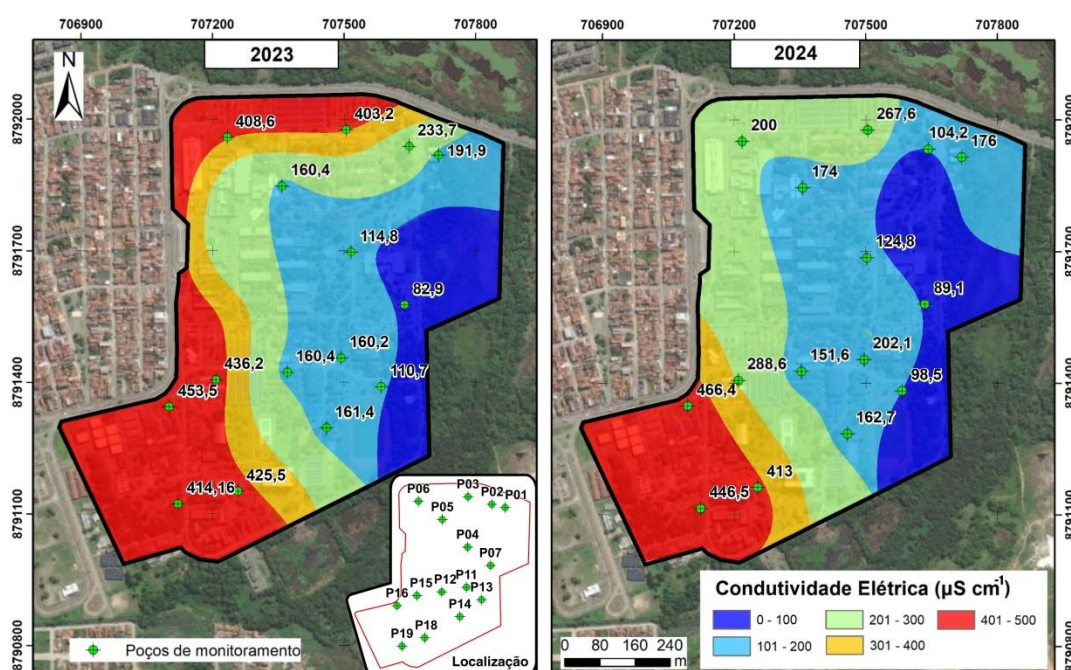


Figura 5: Mapas de distribuição espacial da Condutividade Elétrica ($\mu\text{S cm}^{-1}$) nas campanhas realizadas nas datas 27/10/2023 e 29/07/2024, respectivamente.

Em julho de 2024, foi registrada uma redução expressiva nos valores de STD nos poços P02, P03, P06 e P15 (Figura 6), essa diminuição está associada ao aumento da recarga pluviométrica que ocorre no período chuvoso. Por outro lado, os poços P11, P16 e P19 apresentaram aumento nos valores de STD, o que indica maior concentração de solutos na água subterrânea, como o cálcio (Ca^{2+}) e o magnésio (Mg^{2+}), ou até mesmo aporte de contaminantes, como eventuais vazamentos de esgotos [36]. De acordo com a Portaria GM/MS nº 888/2021, o valor de STD máximo permitido em águas destinadas para consumo humano é de 500 mg L^{-1} [28]. Todos os poços monitorados permaneceram abaixo desse limite, indicando conformidade com a norma.

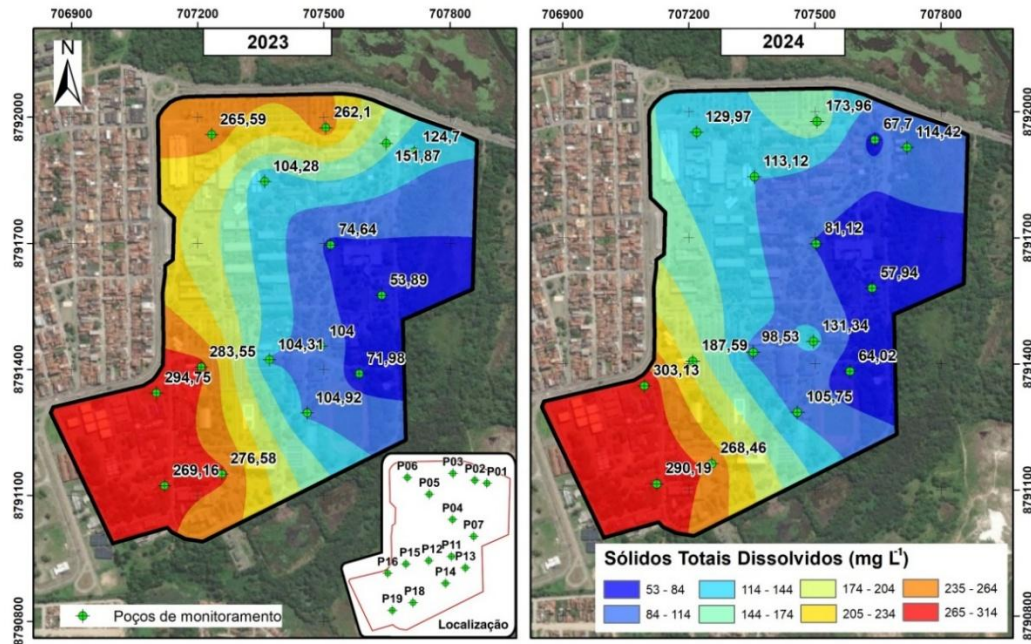


Figura 6: Mapas de distribuição espacial de Sólidos Totais Dissolvidos (STD) nas campanhas realizadas nas datas 27/10/2023 e 29/07/2024, respectivamente.

A análise temporal dos dados de CE e STD sugere que há uma maior diferença de concentração de sais dissolvidos nas águas dos poços localizados na área de recarga do aquífero (Figura 7). Esse comportamento ocorre devido ao aumento da recarga subterrânea durante o período chuvoso. A entrada de água da chuva menos mineralizada no sistema aquífero acarreta mistura que causa maior diluição, consequentemente diminuindo os valores de CE e STD [35, 37].

Esses parâmetros, assim como a salinidade, são variáveis representativas para a caracterização do grau de mineralização das águas subterrâneas. Eventuais fontes difusas e pontuais de contaminação urbana podem resultar em aumento destes parâmetros, contudo os resultados não permitem delimitar a intensidade e influência dessas fontes.

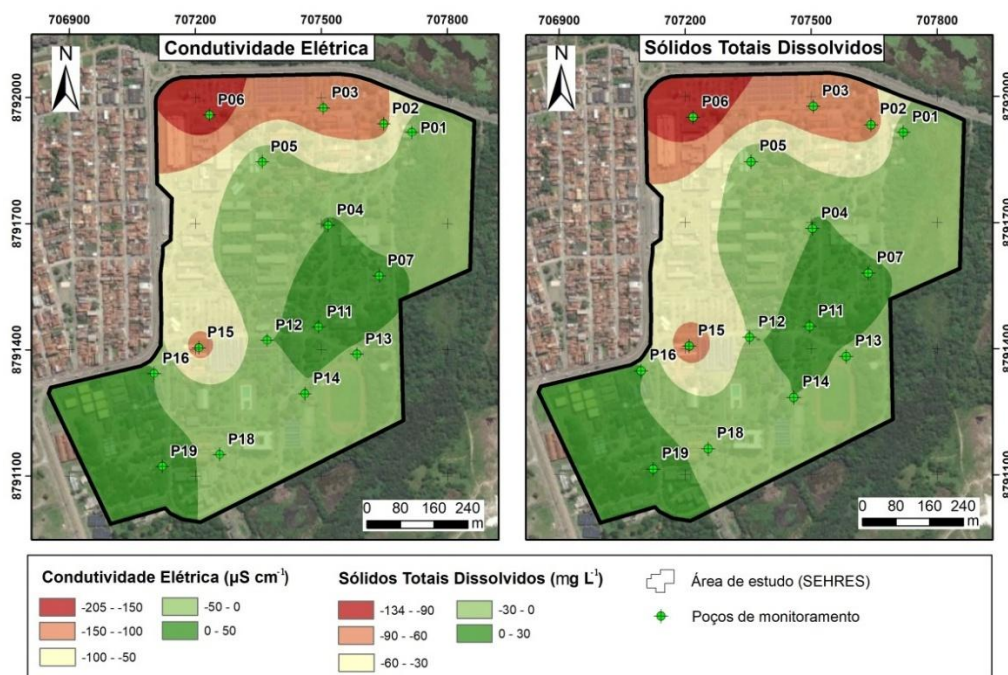


Figura 7: Diferença nos parâmetros de CE e STD da estação seca para a estação chuvosa.

Nas duas campanhas realizadas, os valores de salinidade variaram entre 0,04 (P07) e 0,22 (P16) (Figura 8), sem alterações expressivas entre os períodos analisados. Essa estabilidade sugere a ausência de eventos relevantes de entrada de águas menos salinas ou de mistura com outras fontes hídricas. Os maiores valores de salinidade foram registrados a montante do sistema aquífero em ambas as campanhas, o que está em consonância com os padrões observados para CE e STD.

Esse comportamento reforça que a origem da salinidade está diretamente associada à maior concentração de íons dissolvidos na região. A variação na salinidade pode estar relacionada a processos hidrogeoquímicos naturais, como a interação com formações rochosas, que podem liberar íons na água subterrânea por meio de processos de dissolução mineral e, a evapotranspiração, que pode concentrar sais na zona vadosa e, posteriormente, transportá-los para o aquífero por infiltração [38, 39].

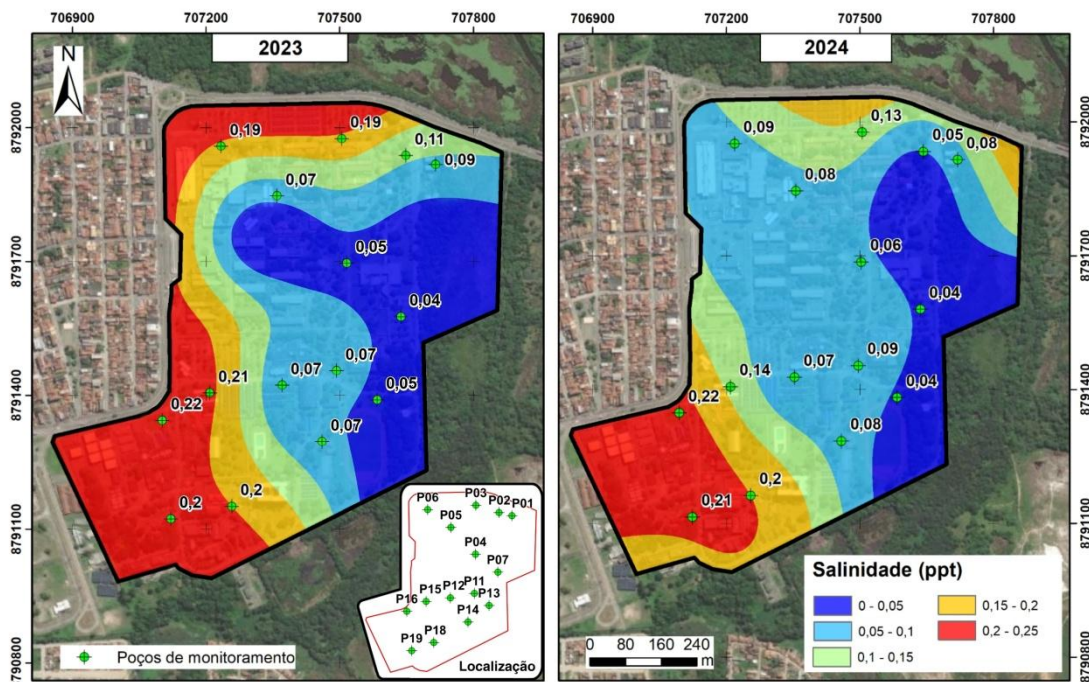


Figura 8: Mapas de distribuição espacial da Salinidade nas campanhas realizadas em 27/10/2023 e 29/07/2024, respectivamente.

Os valores de pH observados nas campanhas indicam que a maioria dos poços apresentam águas levemente ácidas, com pouca variação sazonal (Figura 9). Essa estabilidade sugere a ausência de processos significativos de acidificação ou alcalinização entre as estações seca e chuvosa. O teste estatístico de Wilcoxon indicou diferença estatisticamente significativa entre as campanhas ($p < 0,05$), resultado que pode ser atribuído à baixa variabilidade interna das amostras, tornando perceptíveis pequenas variações sazonais.

Valores baixos de pH em águas subterrâneas podem estar associados a uma série de fatores naturais e antrópicos. Entre os processos naturais, destacam-se a infiltração de águas com características naturalmente ácidas, a dissolução de minerais ácidos e reações de oxidação de sulfetos. A decomposição da matéria orgânica também pode gerar ácidos orgânicos, contribuindo para a redução do pH. Além disso, fontes antrópicas, como o lançamento de efluentes urbanos, podem influenciar a acidez da água subterrânea, especialmente no caso do poço P16, situado próximo à rodovia. Devido a isso, é importante que seja realizado um monitoramento contínuo desse parâmetro, especialmente em áreas urbanas, que estão sujeitas à interferência de diversas fontes de poluição [40].

A turbidez da água está relacionada à existência de partículas em suspensão, como sedimentos, matéria orgânica, microrganismos e compostos minerais, que reduzem sua transparência.

Elementos como zinco, ferro, manganês podem influenciar esse parâmetro, assim como a areia fina e o silte, contribuindo para o aumento da turbidez [41].

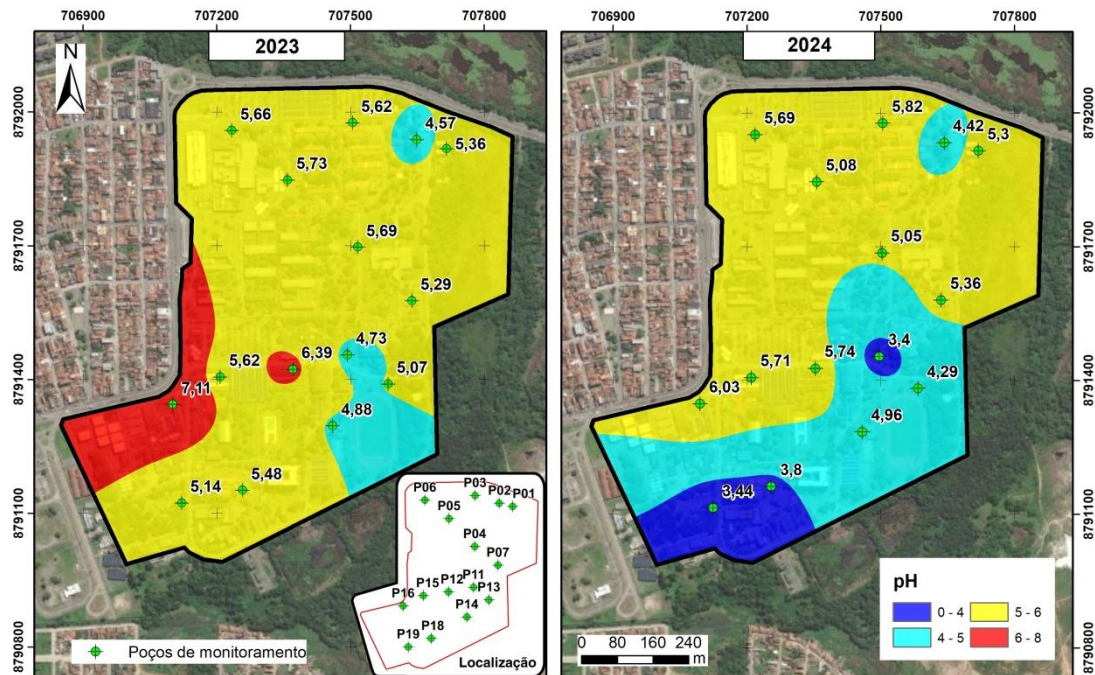


Figura 9: Mapas de distribuição espacial do pH nas campanhas realizadas em 27/10/2023 e 29/07/2024, respectivamente.

Na primeira campanha de monitoramento, realizada no período seco, o poço P19 apresentou turbidez de 16,33 NTU. De acordo com a Portaria de Consolidação GM/MS nº 888/2021, o valor máximo permitido para turbidez em águas subterrâneas destinadas ao consumo humano é de 1,0 NTU. Já para a água distribuída em sistemas públicos de abastecimento, o padrão organoléptico de potabilidade estabelece um limite de 5,0 NTU [28]. Assim, excetuando-se o poço P19, todos os demais apresentaram valores dentro dos limites estabelecidos pela legislação vigente.

É importante enfatizar que os poços P18 e P19 estão situados nas proximidades da lagoa de estabilização da universidade, anteriormente utilizada para o descarte de efluentes do campus, o que sugere uma possível influência de contaminação por resíduos. Outros parâmetros analisados podem ter sido impactados, embora isso não esteja evidente nos resultados deste estudo. Na segunda campanha, conduzida em julho de 2024, a sonda multiparâmetros apresentou inconsistências na leitura de turbidez, motivo pelo qual os dados desse parâmetro foram desconsiderados para a estação chuvosa.

4. CONCLUSÃO

A análise espacial dos parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas revela um padrão bem definido de CE, STD e pH, que se mantém concordante ao longo do gradiente hidráulico, da área de recarga até a jusante, tanto no período chuvoso quanto no período seco. Entre outubro de 2023 e julho de 2024, verificou-se uma redução nos valores de CE e STD nas águas de alguns poços na região montante da área de estudo, registrando maiores concentrações desses parâmetros durante o período seco.

A água presente no poço P16, localizado próximo à rodovia, apresentou valores elevados de pH no período seco, além de alterações significativas na concentração de OD. Essa variação pode estar relacionada a impactos antrópicos, como resíduos provenientes da rodovia, assim como infiltração de substâncias químicas [40].

A análise sazonal dos parâmetros físico-químicos permitiu compreender a variação desses parâmetros ao longo de um ano hidrológico. Os resultados destacam a condição de vulnerabilidade do aquífero, que se caracteriza por ser raso, livre e arenoso, e se encontra inserido em área urbana, fatores que aumentam sua susceptibilidade a contaminações e alterações no clima.

A análise sazonal dos parâmetros físico-químicos realizada ao longo de um ano hidrológico possibilitou compreender tanto a flutuação natural desses parâmetros quanto os impactos potenciais de pressões antrópicas sobre o sistema hídrico. Os resultados destacam a condição de vulnerabilidade do aquífero em dois aspectos principais: i) a sua natureza rasa, porosa e livre, localizado em área urbanizada, o que o torna mais exposto ao impacto de contaminantes; e ii) a influência das variações climáticas em um ciclo hidrológico, que atuam sobre a qualidade da água e reforçam a importância de se considerar a dinâmica temporal ao avaliar o comportamento hidroquímico do aquífero. Assim, a continuidade do monitoramento permite identificar de forma mais consistente alterações na qualidade da água, sejam elas associadas a fontes de contaminação urbana ou a variações climáticas.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecimentos ao Instituto Tecnológico e de Pesquisas do Estado de Sergipe (ITPS) pelo fornecimento da sonda multiparâmetros que foi empregada nas coletas dos parâmetros físico-químicos.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Liu Y, Zhou L, Ma X, Li W, Li J. Comprehensive study of groundwater hydrochemistry, driving forces, and health risks in representative rural agglomerations, Northern China. *ACS Omega*. 2025 Apr 30;10(18):18391-403. doi: 10.1021/acsomega.4c10697
2. França CLE, Anjos FSC, Anjos DSC, Souza LSS, Souza RS, Finazzi GA, et al. Caracterização físico-química das águas superficiais do Rio São Francisco nos municípios de Juazeiro/BA e Petrolina/PE. *Rev Ibero-Am Ciênc Ambient*. 2019;10(6):218-30. doi: 10.6008/cbpc2179-6858.2019.006.0019
3. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). Água no mundo [Internet]; 2021 [citado em 28 abr 2025]. Disponível em: <https://www.gov.br/ana/pt-br/acesso-a-informacao/acoes-e-programas/cooperacao-internacional/agua-no-mundo>.
4. Nur Fatimah MZ, Zainuddin AH, Ley JL, Ahmad ZA, Noorain MI, Sefie A, et al. Spatial analysis of groundwater hydrochemistry through integrated multivariate analysis: A case study in the urbanized Langat Basin, Malaysia. *Int J Environ Res Public Health*. 2021;18(11):5733. doi: 10.3390/ijerph18115733
5. Li B, Wu D, Yu D, Li C, Wang J, Xing L, et al. Comprehensive analysis of groundwater hydrochemistry and nitrate health risks in the Baiquan basin, Northern China. *PeerJ*. 2025 Apr 15;13:e19233. doi: 10.7717/peerj.19233
6. Maliehe TS, Mavingo N, Selepe TN, Masoko P, Mashao FM, Nyamutswa N. Determination of the quality of groundwater in Mankweng, Limpopo Province, South Africa, using the water quality index. *Int J Environ Res Public Health*. 2024 Oct 30;21(11):1444. doi: 10.3390/ijerph21111444
7. Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA). ANA 556.04(81) A265c AGE: Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: informe anual 2023. Brasília: ANA; 2024.
8. Dyring M, Rohde MM, Froend R, Hofmann H. Coastal groundwater-dependent ecosystems are falling through policy gaps. *Groundwater*. 2024 Mar 28;62(2):184-94. doi: 10.1111/gwat.13352
9. McBean E. Groundwater quality and examples of risk interpretation procedures. The Groundwater Project. Ontario (Canada): Guelph; 2023.
10. Xu J, Liu G, Liu R, Si W, He M, Wang G, et al. Hydrochemistry, quality, and integrated health risk assessments of groundwater in the Huaibei Plain, China. *Environ Sci Pollut Res Int*. 2023 Dec;30(59):123466-79. doi: 10.1007/s11356-023-30966-y
11. Abbasnia A, Yousefi N, Mahvi AH, Nabizadeh R, Radfard M, Yousefi M, et al. Evaluation of groundwater quality using water quality index and its suitability for assessing water for drinking and irrigation purposes: Case study of Sistan and Baluchistan province (Iran). *Hum Ecol Risk Assess: An Int J*. 2018;25(4):988-1005. doi: 10.1080/10807039.2018.1458596
12. Brasil. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos e Ambiente Urbano. MMA 038 FOL: Águas subterrâneas: Um recurso a ser conhecido e protegido. Brasília (DF): MMA; 2007.

13. Teramoto EH, Engelbrecht BZ, Gonçalves RD, Chang HK. Probabilistic backward location for the identification of multi-source nitrate contamination. *Stoch Environ Res Risk Assess.* 2021 Apr 7;35(4):941-54. doi: 10.1007/s00477-020-01966-y
14. Bertolo RA, Hirata R, Aly Junior O. Método de valoração da água subterrânea impactada por atividades contaminantes no Estado de São Paulo. *Águas Subterr.* 2019 Aug 26;33(3):303-13. Disponível em: <https://aguassubterraneas.abas.org/asubterraneas/article/view/29479>.
15. Ullah A, Hussain A, Wang Y, Awais M, Sajjad MM, Ejaz N, et al. Integrated assessment of groundwater quality dynamics and land use/land cover changes in rapidly urbanizing semi-arid region. *Environ Res.* 2024 Nov;260:119622. doi: 10.1016/j.envres.2024.119622
16. Yuan H, Yang S, Wang B. Hydrochemistry characteristics of groundwater with the influence of spatial variability and water flow in Hetao Irrigation District, China. *Environ Sci Pollut Res Int.* 2022 Oct;29(47):71150-64. doi: 10.1007/s11356-022-20685-1
17. Fentahun A, Mechal A, Karuppannan S. Hydrochemistry and quality appraisal of groundwater in Birr River Catchment, Central Blue Nile River Basin, using multivariate techniques and water quality indices. *Environ Monit Assess.* 2023 May 11;195(6):655. doi: 10.1007/s10661-023-11198-6
18. Viel EU, Nascimento FS, Fenzl N. Qualidade da água do aquífero Alter do Chão: Comunidade Jaca-Mim, Zona Rural do Oeste do Pará, Amazônia, Brasil. *Int J Sci Manag Tourism.* 2024 Feb;10(1):543-62. doi: 10.55905/ijsmtv10n1-025
19. Cheong SM, Joseph B, Ahmad Idham K, Ahmad Rusyaidi MM, Yong JC, Aadiana G. Key insight of groundwater quality and nutrients contamination in Pulau Kapas, Terengganu. *Mar Pollut Bull.* 2024 Dec;209(Pt A):117102. doi: 10.1016/j.marpolbul.2024.117102
20. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Variáveis de qualidade da água e objetivos do diagnóstico de qualidade da água. São Paulo: CETESB; 2017.
21. Zhang F, Yuan Y, Xi B, Lu H, Jiang Y, Hui K, et al. Hydrochemistry characteristics and genesis of shallow groundwater in diverse industrial agglomeration areas in typical alluvial plain of the Yellow River. *Sci Total Environ.* 2025 Jan 1;958:177764. doi: 10.1016/j.scitotenv.2024.177764
22. Gómez-Hernández JJ, Xu T. Contaminant source identification in aquifers: A critical view. *Math Geosci.* 2022 Feb 27;54(2):437-58. doi: 10.1007/s11004-021-09976-4
23. Santos CSM, Saturnino NMSR, Dias LSS, Da Costa SSL, Garcia CAB, Gonçalves RD. Distribuição espacial de parâmetros físico-químicos do Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe: estudo de caso no Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES) em São Cristóvão/SE. *Sci Plena.* 2024;20(8):1-11. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089908
24. Bittencourt ACSP, Martin L, Dominguez JML, Ferreira YA. Evolução paleogeográfica quaternária da costa do estado de Sergipe e da costa sul do estado de Alagoas. *Rev Bras Geociências.* 1983;13(2):93-7. doi: 10.25249/0375-7536.19831329397
25. Campos Neto OPA, Lima WS, Cruz FEG. Bacia de Sergipe-Alagoas. *Boletim de Geociências da Petrobrás* [Internet]. 01 nov 2007;15(2):405-1. Disponível em: <https://bgp.petrobras.com.br/bgp/article/view/334>.
26. Fadipe OO, Adebajo AU, Thanni MO, Olawuyi OA. Assessment of groundwater quality for irrigation purposes in Ilesha West local government, Osun State, Nigeria. *Water Cycle.* 2022;3:160-70. doi: 10.1016/j.watcyc.2022.10.001
27. Saturnino NMSR, De Jesus MFS, Dias LSS, Santos CSM, Gonçalves RD. Aplicação do método WTF para estimativa de recarga subterrânea no Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe, Brasil. *Sci Plena.* 2024;20(8):1-10. doi: 10.14808/sci.plena.2024.089909
28. Brasil. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS Nº 888 de 04 de maio de 2021. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. Brasília (DF): Diário Oficial da União. Disponível em: <https://www.in.gov.br/en/web/dou/-/portaria-gm/ms-n-888-de-4-de-maio-de-2021-318461562>.
29. Feitosa FAC, Manoel Filho J, Feitosa EC, Demetrio JGA. Hidrogeologia: conceitos e aplicações. 3. ed. Rio de Janeiro: CPRM - Serviço Geológico do Brasil; 2008.
30. Fetter CW. Applied Hydrogeology. 4. ed. Harlow: Pearson Education Limited; 2014.
31. Cook P. Introduction to isotopes and environmental tracers as indicators of groundwater flow. Ontario (Canada): Guelph; 2020.
32. Gonçalves RD, Teramoto EH, Engelbrecht BZ, Soto MAA, Chang HK, van Genuchten MT. Quasi-saturated layer: Implications for estimating recharge and groundwater modeling. *Groundwater.* 2020;58:432-40. doi: 10.1111/gwat.12916
33. da Silva MKM, Silva MRC, Ferreira RM, Monteiro AS. Análise da contaminação da água de poços artesianos no município de Pio XII, Maranhão. *Cad Pedagógico* [Internet]. 2024;21(13):e12482. Available from: <https://ojs.studiespublicacoes.com.br/ojs/index.php/cadped/article/view/12482>.
34. Brasil. Ministério da Saúde, Secretaria de Vigilância em Saúde. Vigilância e controle da qualidade de água para consumo humano. Brasília (DF): MS; 2006.

35. Kharaka YK, Hitchon B, Hanor JS. Groundwater and petroleum. The Groundwater Project. Ontario (Canada): Guelph; 2023. doi: 10.21083/978-1-77470-041-9
36. Peng J, Kumar K, Gross M, Wen TKZ. Removal of total dissolved solids from wastewater using a revolving algal biofilm reactor. *Wat Env Res*. 2029;92:766-78.
37. Appelo CAJ, Postma D. Geochemistry, groundwater and pollution. 2. ed. London: CRC Press; 2004. doi: 10.1201/9781439833544
38. Lin CY, Abdullah MH, Praveena SM, Yahaya AHB, Musta B. Delineation of temporal variability and governing factors influencing the spatial variability of shallow groundwater chemistry in a tropical sedimentary island. *J Hydrol*. 2012;432-33:26-42.
39. Jiang L, Yao Z, Liu Z, Wang R, Wu S. Hydrochemistry and its controlling factors of rivers in the source region of the Yangtze River on the Tibetan Plateau. *J Geochem Explor*. 2015;155:76-83. doi: 10.1016/j.gexplo.2015.04.009
40. Akhtar N, Syakir Ishak MI, Bhawani SA, Umar K. Various natural and anthropogenic factors responsible for water quality degradation: A review. *Water*. 2021;13(19):2660. doi: 10.3390/w13192660
41. Matos T, Martins MS, Henriques R, Goncalves LM. A review of methods and instruments to monitor turbidity and suspended sediment concentration. *J Water Process Eng*. 2024;64:105624. doi: 10.1016/j.jwpe.2024.105624