ANÁLISE DE AGRUPAMENTO HIDROGEOQUÍMICO APLICADA ÀS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS RASAS DO SEHRES, SERGIPE

Maria Eduarda da Silva Vieira [1] ; Maria Beatriz dos Santos [2] ; Thizá Vitoria Sacramento Silveira[3] & Roger Dias Gonçalves[4]

RESUMO - Este estudo avaliou os padrões hidrogeoquímicos das águas subterrâneas rasas do Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES), em São Cristóvão/SE. Foram analisadas amostras de 15 poços de monitoramento coletadas em março e julho de 2024, representando os períodos seco e chuvoso, respectivamente. Os parâmetros físico-químicos e iônicos foram submetidos à análise de agrupamento hierárquico pelo método de Ward, com o objetivo de identificar similaridades entre os poços e variações sazonais na composição das águas. Os resultados indicaram grupos hidrogeoquímicos distintos, associados a diferentes graus de mineralização, variações nos teores de cloreto, sódio, sulfato, potássio, cálcio, nitrato e condutividade elétrica. No período seco, observou-se maior contraste entre os poços, enquanto no período chuvoso ocorreu reorganização dos agrupamentos, refletindo efeitos de diluição e mobilização de solutos pela recarga. Os poços P15, P16, P18 e P19 mantiveram maior mineralização, enquanto P01, P02, P03 e P04 apresentaram maiores teores relativos de nitrato no período chuvoso. Os resultados demonstram a utilidade da análise de agrupamento como ferramenta de apoio ao monitoramento hidrogeoquímico do SAQ.

ABSTRACT - This study evaluated the hydrogeochemical patterns of shallow groundwater from the Quaternary Aquifer System (QAS) at the Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES), in São Cristóvão, Sergipe, Brazil. Samples from 15 monitoring wells were analyzed in March and July 2024, representing the dry and rainy seasons, respectively. Physicochemical and ionic parameters were subjected to hierarchical cluster analysis using Ward's method to identify similarities among wells and seasonal variations in groundwater composition. The results indicated distinct hydrogeochemical groups associated with different degrees of mineralization and variations in chloride, sodium, sulfate, potassium, calcium, nitrate, and electrical conductivity. During the dry season, greater contrast among wells was observed, whereas in the rainy season the clusters were reorganized, reflecting both dilution effects and solute mobilization driven by recharge. Wells P15, P16, P18, and P19 remained associated with higher mineralization, while P01, P02, P03, and P04 showed relatively higher nitrate concentrations during the rainy season. The results demonstrate the usefulness of cluster analysis as a supporting tool for hydrogeochemical monitoring of the QAS.

Palavras-Chave - SEHRES; Análise de agrupamento hierárquico; Método de Ward.

[1]) Grupo de Pesquisas Hidrogeológicas e Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. mariaeduardavieira@academico.ufs.br
[2]) Grupo de Pesquisas Hidrogeológicas e Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. mbeatrix039@gmail.com
[3]) Grupo de Pesquisas Hidrogeológicas e Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. vitoriathiza@gmail.com
[4]) Departamento de Geologia, Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, SE, Brasil. roger.dias@academico.ufs.br

1 - INTRODUÇÃO

A água subterrânea constitui uma das principais fontes de abastecimento hídrico, particularmente onde o aquífero raso é a principal fonte de abastecimento humano (Cardoso *et al*., 2025), ocorrendo especialmente em regiões onde a disponibilidade de água superficial é limitada, desempenhando papel fundamental na manutenção das atividades humanas e dos ecossistemas (Hirata e Conicelli, 2019). No entanto, sua qualidade pode ser influenciada por diversos fatores, incluindo características geológicas, processos hidrogeoquímicos e atividades antrópicas, como agricultura e a ausência de saneamento básico (Onwuka *et al*., 2019).

Além da maior disponibilidade em determinados períodos do ano, as águas subterrâneas geralmente apresentam melhores características físico-químicas quando comparadas às águas superficiais, devido ao processo natural de filtração promovido pelas camadas do solo e das rochas (Carvalho *et al*., 2015). Em razão disso, esse recurso é frequentemente empregado para o abastecimento humano, bem como para atividades agrícolas, industriais e domésticas, desempenhando papel fundamental na manutenção das atividades socioeconômicas (Carvalho *et al*., 2020).

O monitoramento hidrogeoquímico em aquíferos costeiros rasos é essencial para identificar alterações na qualidade da água e fontes de contaminação. Nesse cenário, a análise de agrupamento hierárquico (HCA) destaca-se por classificar dados hidrogeoquímicos (Gadelha *et al*., 2023), identificar tendências e agrupar poços com comportamentos semelhantes (Chai *et al*., 2022). Este trabalho aplica a HCA a múltiplos parâmetros físico-químicos, para aprofundar a caracterização hidrogeoquímica do SEHRES.

O presente estudo tem como objetivo geral analisar e comparar os parâmetros físico-químicos das águas subterrâneas coletadas no *Sergipe Hydrogeological Research Site* (SEHRES) durante a campanha amostral de 2024, com ênfase na caracterização da composição hidrogeoquímica. Busca-se comparar os períodos seco e chuvoso, investigando sua influência na qualidade da água subterrânea rasa. O estudo também visa identificar padrões sazonais nos dados hidrogeoquímicos e avaliar a influência dos controles geológicos locais na variabilidade espacial e temporal dos parâmetros analisados, contribuindo para a compreensão da dinâmica da qualidade hídrica em aquíferos costeiros rasos.

2 - MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA DE ESTUDO

Localizado entre Aracaju e São Cristóvão, no estado de Sergipe, o *Sergipe Hydrogeological Research Site* (Figura 1), encontra-se inserido em um aquífero raso e livre, denominado Sistema Aquífero Quaternário (SAQ) (Santos *et al*., 2025). O principal corpo hídrico localizado nessa região é o rio Poxim, que atravessa a área em sua porção leste, integrando a sub-bacia hidrográfica do rio Poxim, inserida na bacia do rio Sergipe (dos Santos *et al*., 2025). A área de estudo possui 19 poços tubulares catalogados, dos quais 15 foram selecionados para a realização das campanhas de coleta destinadas às análises físico-químicas das águas subterrâneas.

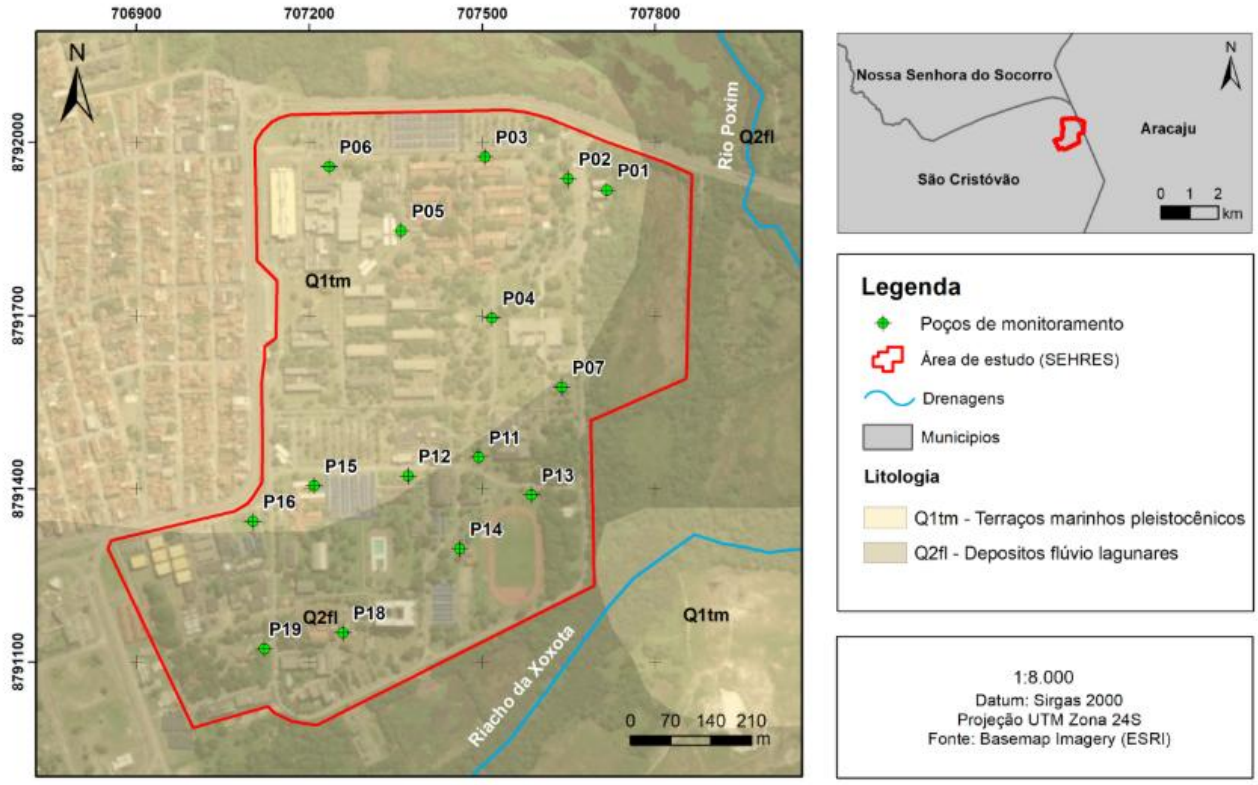


Figura 1 – Mapa de localização e unidades geológicas aflorantes na área de estudo.

2.2 ANÁLISE QUÍMICA

As amostras foram coletadas diretamente nos poços de monitoramento utilizando um dispositivo do tipo bailer. Previamente à coleta definitiva, o bailer e os frascos de amostragem foram submetidos a um processo de ambientação tripla, visando minimizar contaminações externas e assegurar a representatividade das amostras.

Previamente às análises, as amostras foram filtradas em membranas de seringa com porosidade de 0,22 µm para remoção de partículas em suspensão que pudessem interferir na separação cromatográfica. Posteriormente, uma alíquota de 125 µL foi transferida para frascos do tipo vial, os quais foram devidamente vedados e inseridos no sistema de injeção automática

A caracterização da composição iônica foi realizada por cromatografia iônica no equipamento Dionex ICS-3000, conforme o método 4110 do *Standard Methods* (APHA, 2012). A separação dos ânions empregou hidróxido de potássio (KOH) como fase móvel, enquanto a dos cátions utilizou ácido metanossulfônico (CH_3SO_3H), ambos na concentração de 1,0 mol L^{-1}. As análises foram conduzidas sob fluxo de 0,350 mL min^{-1}, temperatura controlada de 30 °C e tempo total de corrida de 32 minutos por amostra. A quantificação das espécies iônicas foi obtida por integração dos picos cromatográficos, com base em curvas de calibração previamente estabelecidas a partir de padrões analíticos (dos Santos *et al*., 2025).

2.3 ANÁLISE DE AGRUPAMENTO (MÉTODO DE WARD)

Com o objetivo de examinar a similaridade entre as amostras e compreender a distribuição dos parâmetros hidrogeoquímicos, foi utilizada uma abordagem de análise de agrupamento hierárquico. Para a formação dos grupos, adotou-se o método de Ward (Ward, 1963), que considera a redução da variabilidade interna como critério de agregação. Esse procedimento permite organizar as amostras em conjuntos mais consistentes, facilitando a identificação de tendências e diferenças na composição

A Análise de Agrupamento Hierárquico (HCA) tem se consolidado como uma ferramenta estatística robusta na investigação da qualidade das águas subterrâneas, permitindo a delimitação de unidades hidrogeoquimicamente semelhantes e a identificação de padrões espaciais em áreas com distintos condicionantes geológicos e ambientais (Moitinho *et al*., 2025). Estudos recentes demonstram que a aplicação da HCA, especialmente quando combinada com o método de Ward e a padronização dos dados pelo Z-score (Bu *et al*., 2020), possibilita a categorização de poços com base em variações sazonais e múltiplos controles hidrogeoquímicos, como litologia, recarga hídrica e intervenções antrópicas (Silveira *et al*., 2025).

3 - RESULTADOS

Os parâmetros físico-químicos e iônicos das amostras de água subterrânea coletadas nos 15 poços do SEHRES em março e julho de 2024 (períodos seco e chuvoso) estão tabulados em Santos (2026). As variáveis analisadas incluem íons maiores (cloreto, sulfato, sódio, potássio, cálcio,

magnésio, fluoreto, bromato, clorito, nitrato, nitrito, amônia, fósforo), parâmetros físico-químicos (pH, condutividade elétrica – CE, sólidos totais dissolvidos – STD) e glifosato. Valores abaixo do limite de detecção (LD) foram substituídos por LD/2 para fins de análise estatística, conforme recomendado para estudos hidrogeoquímicos. A análise hidrogeoquímica das águas subterrâneas foi realizada a partir dos parâmetros físico-químicos e iônicos apresentados em Santos (2026), referentes às campanhas amostrais conduzidas nos meses de março e julho de 2024, correspondente ao período seco e chuvoso, respectivamente. Inicialmente, os dados foram submetidos à normalização estatística, com o objetivo de reduzir a influência das diferentes escalas de magnitude entre os parâmetros analisados e possibilitar uma comparação mais adequada entre as amostras. Posteriormente, aplicou-se a análise de agrupamento hierárquico, representada por meio dos dendrogramas (Figuras 2 e 3), permitindo a identificação de grupos com características hidrogeoquímicas semelhantes e a realização de comparação entre os períodos.

O primeiro grande grupo subdivide-se em dois subgrupos: o vermelho (P19) e o azul (P03, P06, P16, P18), caracterizando-se pela alta salinidade e mineralização, com elevados teores de cloreto, sódio, potássio, CE e STD. O poço P19 diferencia-se pela forte anomalia pontual de potássio e por teores mais elevados de nitrato e nitrito, além das menores concentrações de cálcio e magnésio do grupo, sugerindo menor interação água-rocha e impacto antrópico por fertilizantes NPK.

O segundo grande grupo também se subdivide em dois subgrupos. O subgrupo verde (P05 e P15) apresenta elevadas concentrações de amônia e cálcio. O poço P15 destaca-se pelos maiores valores de magnésio e STD. O cálcio elevado pode estar relacionado à dissolução de minerais carbonáticos (dolomita, calcita), enquanto a associação entre amônia e sólidos dissolvidos pode indicar influência antrópica (atividades agrícolas ou resíduos orgânicos).

O subgrupo amarelo (P01, P02, P04, P07, P11, P12, P13, P14) apresenta menores concentrações da maioria dos parâmetros, indicando águas menos mineralizadas. O nitrato apresentou baixos valores, com aumento pontual de nitrito em P01 e P13. Fluoreto foi mais elevado em P01, P11 e P12; sulfato em P02; e cálcio em P04. Sódio, CE e STD foram os menores entre os grupos, e o pH foi predominantemente ácido, exceto no P12 (próximo à neutralidade).

No dendrograma de julho, observa-se a formação de dois grandes grupos principais. O primeiro grande grupo (P15, P16, P18, P19), localizado na porção sul do SEHRES, subdivide-se em dois subgrupos: o azul (P15, P16, P18) e o vermelho (P19). Essas águas apresentam alta salinidade e mineralização, com elevados teores de cloreto e sódio, possivelmente decorrentes de processos naturais (aerossóis marinhos e dissolução de halita). O poço P19 isolou-se por ser o único a registrar glifosato, indicando contaminação pontual por defensivos agrícolas.

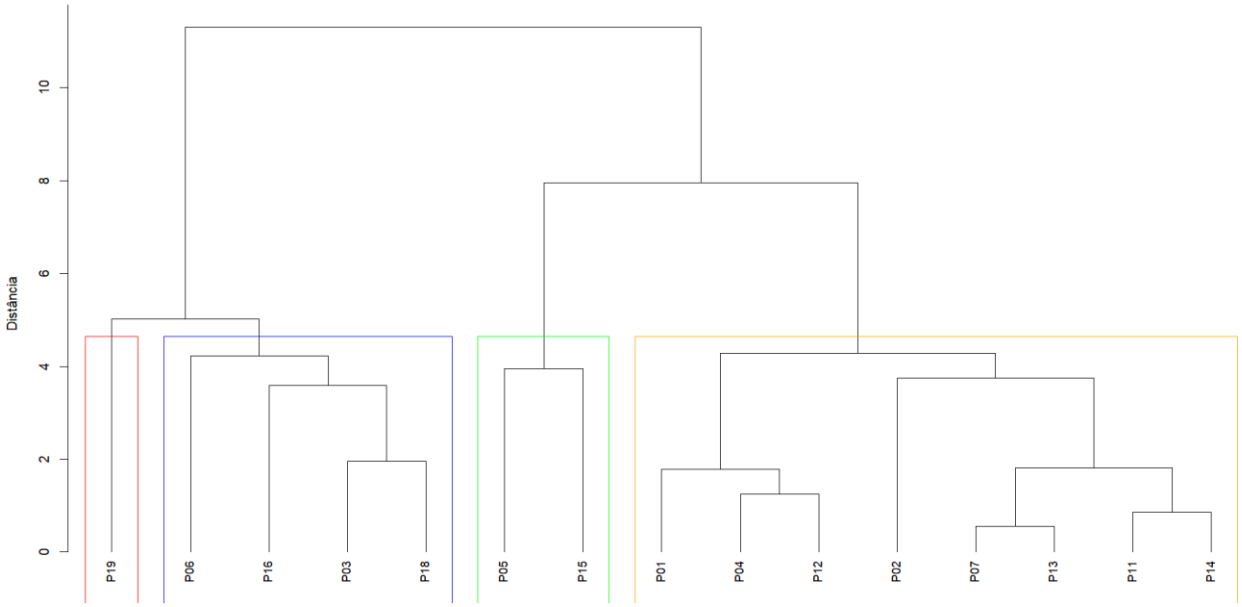


Figura 2 – Dendrograma do mês de março, período seco.

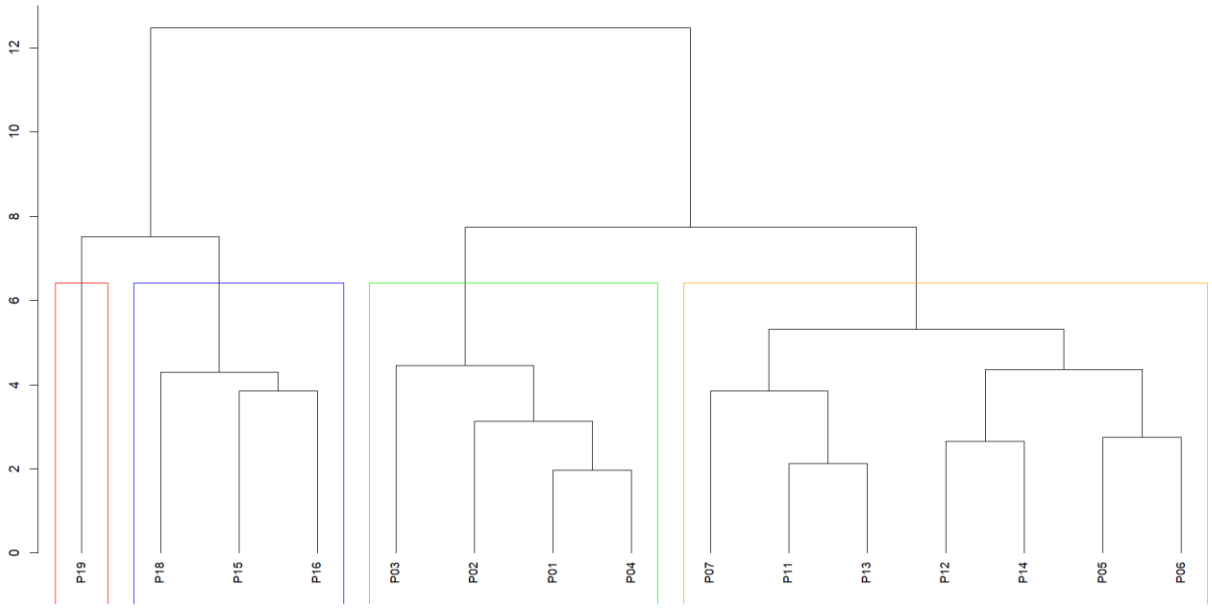


Figura 3 – Dendrograma do mês de julho, período chuvoso.

O segundo grande grupo subdivide-se em dois subgrupos. O subgrupo verde (P03, P02, P01, P04) apresenta os maiores valores de nitrato, situa-se a jusante e pode indicar contaminação antrópica. O poço P03 destaca-se pelo elevado cloreto, sugerindo possível origem natural.

O subgrupo amarelo (P05, P06, P07, P11, P12, P13, P14) apresenta valores predominantemente intermediários. Destacam-se P07, P11 e P13, localizados à jusante na porção sudeste, com baixos valores de CE, STD, cloreto, sulfato, cálcio, magnésio, sódio e potássio, indicando águas com reduzida mineralização.

A análise da variação sazonal dos parâmetros físico-químicos permitiu identificar as seguintes migrações de poços entre os subgrupos do período seco e chuvoso. O P03 migrou do subgrupo 2 no período seco para o subgrupo 3 no período chuvoso devido ao aumento do nitrato e do sulfato. O P06 migrou do subgrupo 2 (seco) para o subgrupo 4 (chuvoso) pela redução significativa nos valores de cloreto, nitrito, sulfato, magnésio, sódio, CE e sólidos totais dissolvidos. A saída do P05 do subgrupo 3 (seco) para o subgrupo 4 (chuvoso) é explicada pela queda generalizada dos parâmetros: amônia, nitrato, nitrito, fósforo, cloreto, fluoreto, sulfato, cálcio, magnésio e potássio. E por fim, o P15 migrou do subgrupo 3 (seco) para o subgrupo 2 (chuvoso) em função da elevação dos teores de sódio, potássio (com valores similares aos do período seco), magnésio, cálcio, sulfato, fluoreto, cloreto e nitrito.

Essas migrações evidenciam que o período chuvoso promove uma diluição generalizada dos íons na maioria dos poços (caso do P05 e P06), reduzindo a mineralização e homogeneizando a qualidade da água. Por outro lado, alguns poços (P03 e P15) respondem à recarga com elevação de certos parâmetros (nitrato, sulfato, sódio etc.), refletindo a lixiviação de sais do solo e a influência antrópica difusa (fertilizantes, efluentes). A sazonalidade, portanto, controla a dinâmica hidrogeoquímica do SAQ, ora diluindo contaminantes, ora mobilizando íons para o aquífero.

4 – CONCLUSÕES

A análise de agrupamento hierárquico pelo método de Ward permitiu identificar padrões hidrogeoquímicos distintos nas águas subterrâneas rasas do SEHRES, com diferenças entre as campanhas de março e julho de 2024. No período seco, observou-se maior contraste entre os poços, com destaque para o P19, associado a maiores teores de potássio, sulfato, nitrato e nitrito, e para o grupo formado por P03, P06, P16 e P18, caracterizado por maior mineralização. No período chuvoso, houve reorganização dos agrupamentos, com permanência de P15, P16, P18 e P19 entre as águas mais mineralizadas, enquanto P01, P02, P03 e P04 passaram a compor um grupo associado a maiores teores de nitrato, sugerindo possível influência antrópica difusa e mobilização de compostos nitrogenados pela recarga.

A comparação sazonal indica que a recarga pluviométrica não atua de forma uniforme no aquífero, promovendo diluição em alguns poços e mobilização de solutos em outros. O registro pontual de glifosato em P19 reforça a necessidade de monitoramento contínuo de possíveis fontes

antrópicas localizadas. Assim, os resultados demonstram a utilidade da análise de agrupamento como ferramenta de apoio à interpretação hidrogeoquímica, permitindo reconhecer áreas com maior mineralização, possíveis influências antrópicas e variações sazonais relevantes para a gestão das águas subterrâneas no Sistema Aquífero Quaternário.

REFERÊNCIAS

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION - APHA (2012). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 22. ed., APHA, Washington, DC.

BU, J.; LIU, W.; PAN, Z.; LING, K. (2020). "Comparative study of hydrochemical classification based on different hierarchical cluster analysis methods". *International Journal of Environmental Research and Public Health* 17(24), 9515.

CARDOSO, S. B.; TERAMOTO, E. H.; CRIONI, P. L. B.; KIANG, C. H. (2025). "Qualidade das águas subterrâneas de aquíferos rasos no município de Rio Claro (SP): influência de processos naturais e antrópicos". *Derbyana* 46, e872.

CARVALHO, F. I. M.; LEMOS, V. P.; DANTAS FILHO, H. A.; DANTAS, K. G. F. (2015). "Avaliação da qualidade das águas subterrâneas de Belém a partir de parâmetros físico-químicos e níveis de elementos traço usando análise multivariada". *Revista Virtual de Química* 7(6), pp. 2221-2241.

CARVALHO, L. L. S.; LACERDA, C. F.; LOPES, F. B.; ANDRADE, E. M.; CARVALHO, C. M.; SILVA, S. L. (2020). "Caracterização dos usos das águas subterrâneas no perímetro irrigado do baixo Acaraú - CE". *Revista em Agronegócio e Meio Ambiente* 13(2), pp. 601-620.

CHAI, Y.; XIAO, C.; LI, M.; LIANG, X. (2020). "Hydrogeochemical characteristics and groundwater quality evaluation based on multivariate statistical analysis". *Water* 12(10), 2792.

GADELHA, A. J. F.; ROCHA, C. O.; VERAS NETO, J. G.; GOMES, M. A. (2023). "Multivariate statistical analysis of physicochemical parameters of groundwater quality using PCA and HCA techniques". *Eclética Química* 48(4), pp. 37-47.

HIRATA, R.; CONICELLI, B. P. (2019). *Água subterrânea e sua importância*. Instituto de Energia e Ambiente da Universidade de São Paulo, São Paulo – SP.

MOITINHO, D. E. R.; BARBOSA, N. S.; GOMES, M. C. R.; BISPO-SILVA, S.; SANTOS, C. B.; GOMES, L. A. (2025). "Uso da análise estatística multivariada na caracterização de heterogeneidades hidrogeoquímicas dos sistemas aquíferos, uma revisão metodológica". *Revista de Geociências do Nordeste* 11(1), pp. 908-921.

ONWUKA, O. S.; EZUGWU, C. K.; IFEDIEGWU, S. I. (2019). "Assessment of the impact of onsite sanitary sewage system and agricultural wastes on groundwater quality in Ikem and its environs, south-eastern Nigeria". *Geology, Ecology, and Landscapes* 3(1), pp. 65-81.

SANTOS, C. S. M.; *et al.* (2024). “Distribuição espacial de parâmetros físico-químicos do Sistema Aquífero Quaternário em Sergipe: um estudo de caso no Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES) em São Cristóvão/SE”. *Scientia Plena* 20(8), 089908.

SANTOS, M. B.; *et al.* (2025). “Hidrodinâmica e recarga subterrânea em aquífero costeiro quaternário em Sergipe: análise sazonal (2023-2024) do SEHRES”. *Scientia Plena* 21(11), 119913.

SANTOS, M. I. dos; *et al.* (2025). “Avaliação de contaminantes antrópicos (microbiológico e glifosato) e hidroquímica de águas subterrâneas rasas em Sergipe, Brasil”. *Scientia Plena* 21(11), 119905.

SANTOS, M. I. dos (2026). *Caracterização iônica da água subterrânea em aquífero raso urbano na região do Sergipe Hydrogeological Research Site (SEHRES)*. Dissertação de Mestrado em Engenharia e Ciências Ambientais, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão – SE.

SILVEIRA, T. V. S.; *et al.* (2025). “Padrões hidrogeoquímicos na Bacia do Rio Piauí: uma abordagem estatística multivariada”. *Scientia Plena* 21(11), 119914.

WARD, J. H. (1963). “Hierarchical grouping to optimize an objective function”. *Journal of the American Statistical Association* 58(301), pp. 236-244.