XVIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE
XVIII ENCONTRO DE RECURSOS HÍDRICOS EM SERGIPE

AVALIAÇÃO DE VULNERABILIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS EM AQUÍFEROS FRATURADOS DO SEMIÁRIDO SERGIPANO

Cássio Filipe Vieira Martins [1]; Roger Dias Gonçalves [2]

RESUMO – As águas subterrâneas desempenham papel essencial em áreas semiáridas, onde aquíferos cristalinos fraturados enfrentam pressões decorrentes da escassez hídrica e de fontes antrópicas de contaminação. Este trabalho analisa a vulnerabilidade hidrogeológica na porção noroeste do Sistema Orogênico Sergipano (SOS), com área de 2.588 km², utilizando um novo índice chamado DRASTIF, uma adaptação do modelo DRASTIC voltada a meios fraturados, na qual a condutividade hidráulica é substituída pela densidade de lineamentos estruturais (Fr). A avaliação integrou os parâmetros profundidade do nível freático (D), recarga (R), características do aquífero (A), tipo de solo (S), relevo (T), zona vadosa (I) e densidade de fraturas (Fr), por meio de análise multicritério em ambiente SIG. Os resultados apontam predominância de baixa vulnerabilidade (74,32%), seguida de baixa a moderada (17,39%). A análise de sensibilidade confirmou a relevância do fraturamento (WFr = 5), reduzindo a classe muito baixa de 11% para 5,8% e elevando a baixa a moderada de 10% para 17,1%. Em comparação ao método GOD, houve concordância nas áreas menos vulneráveis, enquanto o DRASTIF apresentou maior capacidade de detalhamento espacial ao evidenciar riscos ligados às estruturas fraturadas, indicando que áreas mais produtivas podem coincidir com maior suscetibilidade natural.

ABSTRACT – Groundwater resources play a critical role in semi-arid regions, where fractured crystalline aquifers are increasingly subjected to water stress and anthropogenic contamination. This study assesses hydrogeological vulnerability in the northwestern sector of the Sergipano Orogenic System (SOS), covering an area of 2,588 km², using the DRASTIF index, an adaptation of the DRASTIC model for fractured media in which hydraulic conductivity is replaced by structural lineament density (Fr). The assessment incorporated the parameters depth to water table (D), recharge (R), aquifer media (A), soil type (S), topography (T), vadose zone impact (I), and fracture density (Fr), through a multicriteria analysis within a GIS environment. Results indicate a predominance of low vulnerability (74.32%), followed by low to moderate vulnerability (17.39%). Sensitivity analysis confirmed the significance of the fracturing parameter (WFr = 5), reducing the very low vulnerability class from 11% to 5.8% and increasing the low to moderate class from 10% to 17.1%. Comparison with the GOD method showed agreement in less vulnerable zones, while the DRASTIF approach provided enhanced spatial resolution by identifying risks associated with fractured structures, indicating that highly productive zones may coincide with greater intrinsic vulnerability.

Palavras-Chave – Vulnerabilidade hidrogeológica; aquíferos fraturados; DRASTIC.

[1]) Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 49107-230, SE, Brasil, (79) 98829-6190, filipe_geol@hotmail.com
[2]) Departamento de Geologia (DGEOL) e Programa de Pós-Graduação em Recursos Hídricos (PRORH), Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 49107-230, SE, Brasil, roger.dias@academico.ufs.br

1 – INTRODUÇÃO

A água subterrânea representa a principal reserva de água doce líquida do planeta e, em um contexto de crescimento populacional contínuo, expansão das atividades antrópicas e intensificação da poluição de aquíferos, sua conservação e gestão têm se tornado cada vez mais prioritárias (Muavhi e Mutoti, 2023). Esse cenário é ainda mais crítico diante dos efeitos das mudanças climáticas, que tendem a agravar o estresse hídrico em diversas regiões do mundo (Ali *et al*., 2021). Em áreas semiáridas ou em domínios geológicos controlados por embasamento cristalino fraturado, a dependência da água subterrânea é particularmente elevada, uma vez que este recurso frequentemente constitui a principal fonte de abastecimento (Tufail *et al*., 2025). Nesses ambientes, entretanto, a sustentabilidade hídrica é condicionada por uma combinação de baixa disponibilidade natural e elevada susceptibilidade à contaminação (Abdelkarim *et al*., 2025).

A avaliação da vulnerabilidade de aquíferos é um componente essencial para a gestão integrada dos recursos hídricos subterrâneos, pois permite estimar a suscetibilidade intrínseca dos sistemas aquíferos à introdução e propagação de contaminantes (Kumssa, 2025). Nesse contexto, diferentes abordagens metodológicas têm sido desenvolvidas para representar espacialmente essa vulnerabilidade (Fannakh *et al*., 2025), destacando-se o modelo DRASTIC como uma das ferramentas mais amplamente utilizadas em estudos internacionais (Aller *et al*., 1987). Apesar de sua robustez e ampla aplicação, sua formulação original foi concebida para meios porosos, o que limita sua representatividade em sistemas hidrogeológicos fraturados, nos quais a circulação da água é fortemente controlada por descontinuidades estruturais (Naranjo *et al*., 2025).

Em aquíferos cristalinos, fraturas e lineamentos desempenham papel fundamental como principais condutos de fluxo, reduzindo significativamente os processos naturais de atenuação entre a superfície e a zona saturada. Dessa forma, adaptações do modelo DRASTIC são necessárias para melhor representar a dinâmica desses sistemas (Abdelkarim *et al*., 2025). Entre essas adaptações, o DRASTIC-Fr incorpora a densidade de fraturamento como variável estrutural chave, permitindo uma representação mais realista da conectividade hidráulica em meios fraturados. Para assegurar a consistência dos resultados obtidos por abordagens modificadas, a análise de sensibilidade dos parâmetros e a comparação com métodos alternativos, como o modelo GOD, constituem etapas fundamentais na validação do mapeamento de vulnerabilidade (Laoufi *et al*., 2025).

Neste contexto, este estudo aplica e avalia uma nova metodologia (DRASTIF) em uma área inserida no Semiárido brasileiro, onde a dependência de águas subterrâneas é estratégica para o

abastecimento (Abdelkarim *et al*., 2025). O trabalho tem como objetivo mapear a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos fraturados da região do semiárido sergipano. Dessa forma, espera-se contribuir para o aprimoramento de ferramentas de avaliação de vulnerabilidade e para o suporte a estratégias de gestão e proteção de aquíferos cristalinos em ambientes semiáridos.

A área de estudo está inserida no domínio semiárido do estado de Sergipe, ocupando a porção noroeste do Sistema Orogênico Sergipano (SOS), com extensão aproximada de 2.588 km². Essa região compreende os municípios de Canindé de São Francisco, Poço Redondo e o setor noroeste de Porto da Folha, estando totalmente localizada a oeste da Zona de Cisalhamento Belo Monte–Jeremoabo (Figura 1). Trata-se de um setor geologicamente controlado por estruturas tectônicas regionais, que exercem forte influência na organização do substrato cristalino e, consequentemente, na circulação de águas subterrâneas.

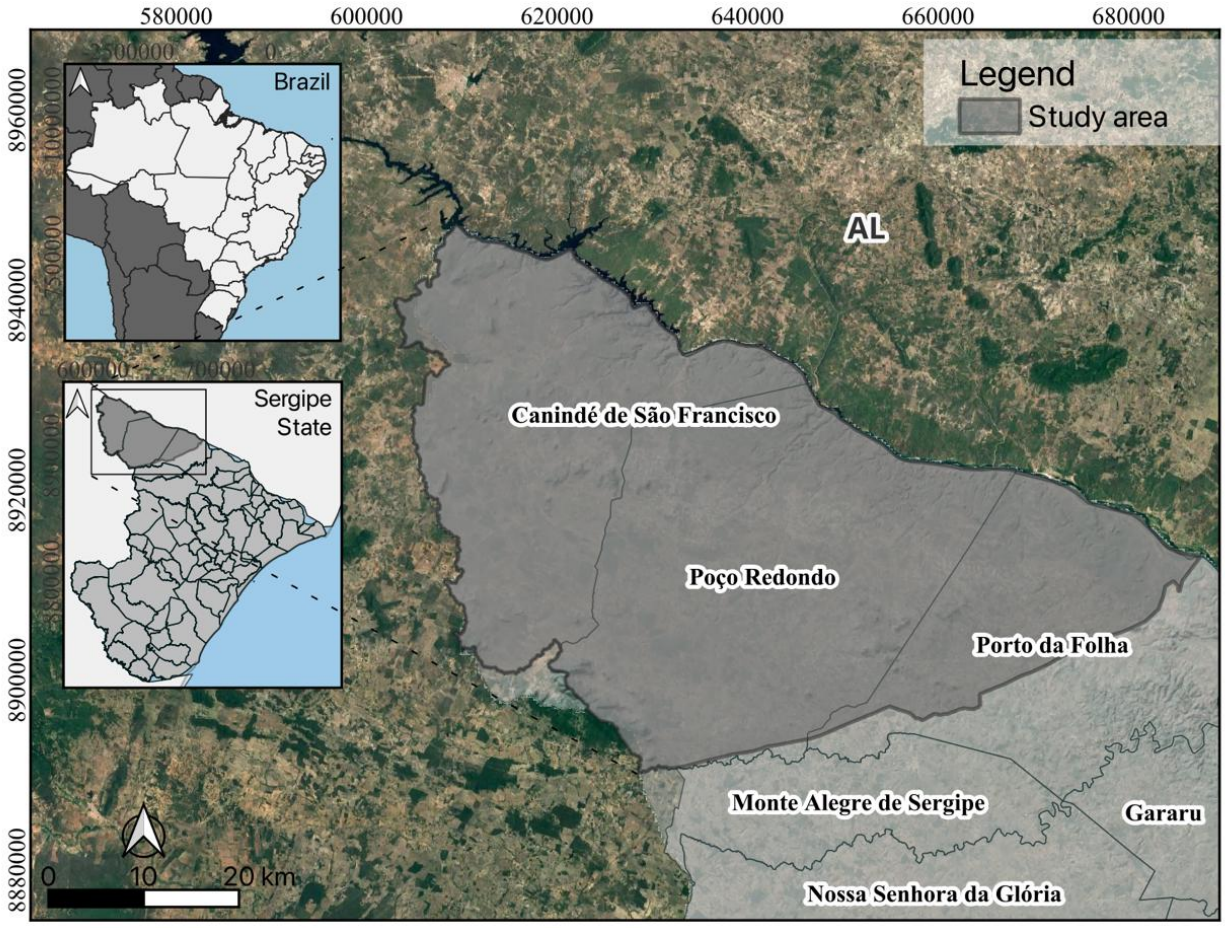


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo, evidenciando a intersecção entre o semiárido nordestino, o Sistema Orogênico Sergipano (SOS) e os domínios geológicos de Canindé, Poço Redondo e Marancó.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

A análise da vulnerabilidade das águas subterrâneas foi realizada mediante abordagem DRASTIC, proposta por Aller *et al*. (1987), amplamente utilizada em estudos de vulnerabilidade intrínseca por integrar sete fatores hidrogeológicos principais: profundidade do nível freático (D), recarga (R), litologia do aquífero (A), características do solo (S), declividade do terreno (T), influência da zona vadosa (I) e condutividade hidráulica (C). Neste trabalho, a profundidade do nível freático (D) foi obtida a partir de dados da Companhia de Desenvolvimento Regional de Sergipe (CODERSE) e do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS) (Peixinho e Castilho, 2025). A recarga (R) foi estimada com base na precipitação média anual fornecida pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET - Instituto Nacional de Meteorologia, 2025), adotando-se uma fração de 5% como aproximação da recarga efetiva. As informações referentes ao meio aquífero (A) e ao tipo de solo (S) foram derivadas de bases geológicas disponibilizadas pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB) (de Paula *et al*., 2024). A declividade (T) foi obtida a partir de Modelo Digital de Elevação (MDE), utilizando dados do Banco de Dados Geomorfométricos do Brasil, correspondentes às folhas 09S39, 09S375 e 10S39 (INPE, 2024). O parâmetro zona vadosa (I) também foi definido com base nas informações da (de Paula *et al*., 2024). Como adaptação ao contexto de aquíferos fraturados, a condutividade hidráulica (C) foi substituída pela densidade de lineamentos estruturais, extraída a partir do MDE utilizando o software PCI Geomatica e posteriormente processada no QGIS. Esse parâmetro foi adotado como um indicador da influência da fraturação na transmissividade relativa do meio.

No modelo DRASTIC, cada parâmetro recebe um peso (w), variando de 1 a 5, e uma taxa (r), variando de 1 a 10, conforme sua contribuição relativa à vulnerabilidade natural do aquífero. O índice de vulnerabilidade é obtido pela soma ponderada dos produtos entre taxas e pesos de cada fator, conforme a Equação 1.

$$DRASTIC = \mathrm{DrDw} + \mathrm{RrRw} + \mathrm{ArAw} + \mathrm{SrSw} + \mathrm{TrTw} + \mathrm{IrIw} + \mathrm{CrCw} \quad (1)$$

Onde:

- r é a taxa (rating) atribuída a cada parâmetro, variando de 1 a 10.
- w é o peso (weight) atribuído a cada parâmetro, variando de 1 a 5.

De forma adaptada, este estudo emprega um novo modelo chamado DRASTIF, no qual o termo referente à condutividade hidráulica é substituído pela densidade de lineamentos estruturais, incorporando a influência direta do fraturamento no comportamento hidrogeológico. Essa modificação permite uma representação mais adequada de sistemas aquíferos em meio cristalino fraturado, nos quais a conectividade estrutural exerce papel dominante na circulação da água subterrânea. O índice modificado é expresso pela Equação 2.

$$DRASTIF = \mathrm{DrDw} + \mathrm{RrRw} + \mathrm{ArAw} + \mathrm{SrSw} + \mathrm{TrTw} + \mathrm{IrIw} + \mathrm{FrrFw} \quad (2)$$

A incorporação desse parâmetro estrutural possibilitou o cálculo do índice de vulnerabilidade para a área de estudo, oferecendo uma representação mais compatível com as condições hidrogeológicas locais e com a dinâmica de fluxo em meios fraturados.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÃO

A avaliação da vulnerabilidade intrínseca do aquífero na área de estudo revelou a predominância de setores classificados como de baixa susceptibilidade. A área total analisada corresponde a 2.587,6 km², distribuída em quatro classes de vulnerabilidade distintas, conforme apresentado na Figura 02.

A espacialização do índice de vulnerabilidade, aplicando as mesmas faixas do índice DRASTIC, resultou da integração dos diferentes parâmetros hidrogeológicos por meio de processamento em ambiente SIG. Esse procedimento permitiu a geração de um mapa contínuo de vulnerabilidade, evidenciando a variabilidade espacial da sensibilidade do sistema aquífero à potencial contaminação ao longo da área estudada.

- Faixa de 0–80: Correspondente à classe de vulnerabilidade muito baixa, esta faixa abrange a menor parte da área de estudo, totalizando 192,49 km², o que representa aproximadamente 7,44%.
- Faixa de 80–100: Classificada como de baixa vulnerabilidade, ocupa 1.922,41 km², correspondendo a cerca de 74,32%.
- Faixa de 100–120: Indicativa de vulnerabilidade baixa a moderada, ocupa 449,80 km², o que equivale a 17,39%.

- Faixa de 120–140: Corresponde a uma classe de vulnerabilidade moderada, abrangendo uma área de 22,29 km², o que representa 0,86%.

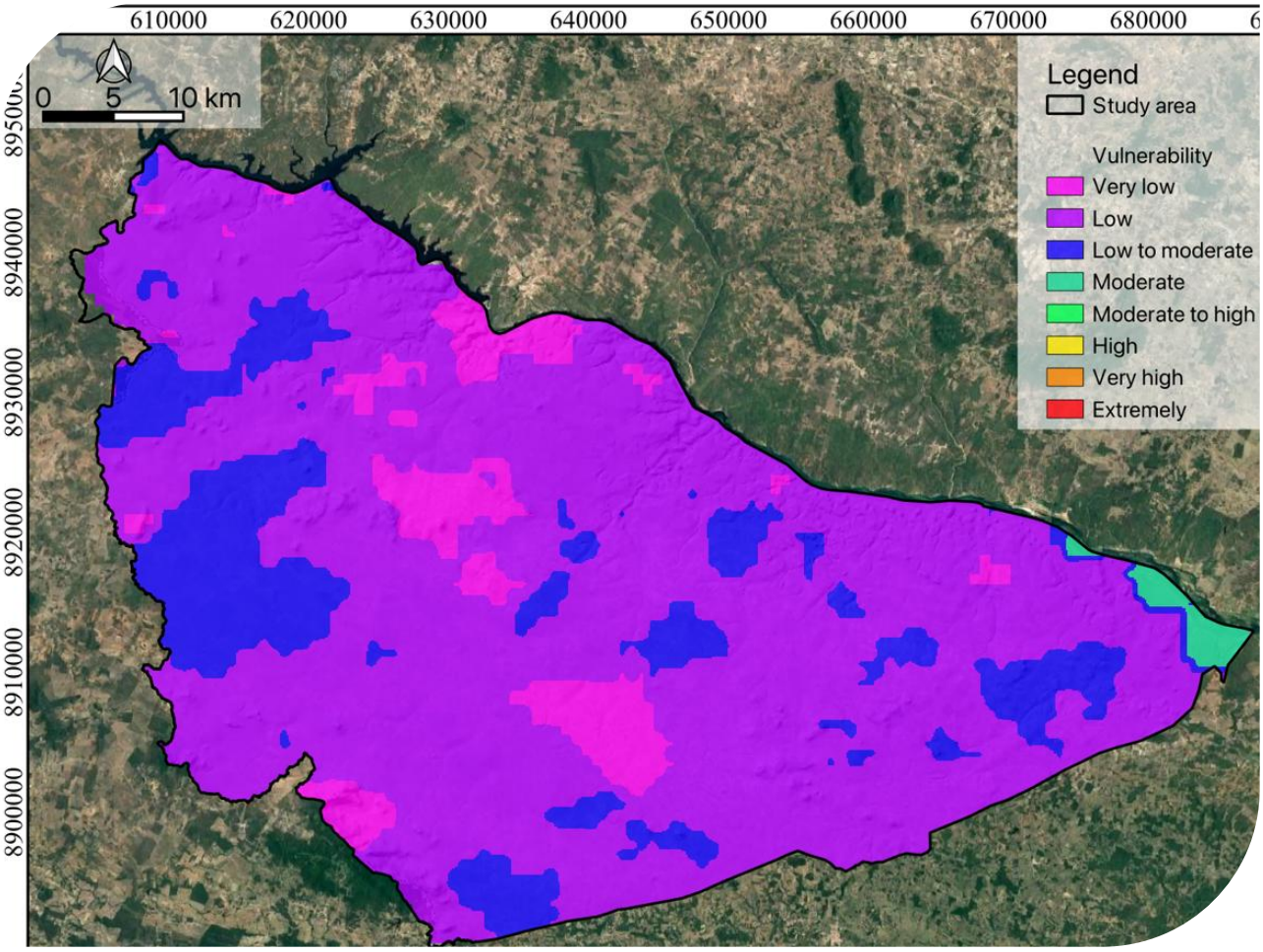


Figura 2 – Mapa de vulnerabilidade hidrogeológica da área de estudo.

4 – CONCLUSÕES

A análise da vulnerabilidade hidrogeológica no noroeste do Sistema Orogênico Sergipano evidencia que a incorporação de parâmetros estruturais por meio do modelo DRASTIF é essencial para representar adequadamente aquíferos em terrenos cristalinos. A substituição da condutividade hidráulica pela densidade de lineamentos mostrou-se eficaz ao capturar o papel das fraturas como vias preferenciais de fluxo e transporte de contaminantes. Os resultados apontam predominância de baixa vulnerabilidade (74,32%), associada à reduzida recarga, à capacidade de atenuação dos solos e à baixa porosidade primária das rochas, confirmando a relevância do parâmetro de fraturamento na identificação de áreas mais suscetíveis que tendem a ser subestimadas em abordagens convencionais, como o modelo GOD.

Observa-se, portanto, uma dualidade hidrogeológica, em que zonas mais favoráveis à explotação coincidem com maior susceptibilidade à contaminação. Esses achados reforçam a necessidade de estratégias de gestão que integrem uso e proteção, subsidiando a delimitação de áreas prioritárias para conservação da qualidade das águas subterrâneas em ambientes semiáridos.

REFERÊNCIAS

ABDELKARIM, B.; ANTUNES, I.M.H.R.; ABAAB, N.; TOUNEKTI, A.; AGOUBI, B. (2025). "*Assessment of groundwater vulnerability of fractured aquifers from arid regions Avaliação da vulnerabilidade da águas subterrânea em aquíferos fraturados de regiões áridas*". Comunicações Geológicas, Especial I 112, pp. 179 – 182. https://doi.org/10.34637/8khq-q414

ALI, S.; LIU, D.; FU, Q.; CHEEMA, M.J.M.; PHAM, Q.B.; RAHAMAN, M.M.; DANG, T.D.; ANH, D.T. (2021). "*Improving the resolution of GRACE data for spatio-temporal groundwater storage assessment*". Remote Sensing 13(17). https://doi.org/10.3390/rs13173513

ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J.H.; PETTY, R.J.; HACKETT, G. (1987). *DRASTIC: A standardized system for evaluating groundwater pollution potential using hydrogeologic settings*. U.S. Environmental Protection Agency, Robert S. Kerr Environmental Research Laboratory, Ada – OK.

FANNAKH, A.; KÁROLY, B.; FANNAKH, M.; FARSANG, A. (2025). "*Assessment and validation of shallow groundwater vulnerability to contamination based on fuzzy logic and DRASTIC method for sustainable groundwater management in southeast Hungary*". Water 17(5). https://doi.org/10.3390/w17050739

INMET - INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA (2025). *Banco de Dados Meteorológicos para Ensino e Pesquisa (BDMEP)*. Acesso em: 15 set. 2025.

INPE - INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS (2024). *Projeto TOPODATA*.

KUMSSA, G.M. (2025). "*The nexus between poverty and environmental degradation in Girar Jarso district, north-central Ethiopia*". GeoJournal 90(1). https://doi.org/10.1007/s10708-025-11294-9

LAOUFI, A.; BOUDJEMA, A.; GUETTAIA, S.; DERDOUR, A. (2025). "*Integrated GIS-based assessment of groundwater vulnerability in the Hennaya plain: a comparative study of DRASTIC, SIVI, and SSVI models*". Euro-Mediterranean Journal for Environmental Integration. https://doi.org/10.1007/s41207-025-00744-y

MUAVHI, N.; MUTOTI, M.I. (2023). "*Using geospatial techniques and analytic hierarchy process to map groundwater potential zones*". Groundwater 61(4), pp. 494 – 509. https://doi.org/10.1111/gwat.13257

NARANJO, E.; CONICELLI, B.; MOULATLET, G.M.; HIRATA, R. (2025). "*Comparative analysis of EPIK, DRASTIC, and DRASTIC-LUC methods for groundwater vulnerability assessment in karst aquifers of the Western Amazon Basin*". Environmental Earth Sciences 84(3). https://doi.org/10.1007/s12665-024-12048-5

PAULA, T.L.F. DE; REZENDE, H.J.A. DE; OLIVEIRA, L.T.; CARDOSO, A. DE C.; SILVA, P.S.; SILVA, C.N.; SANTOS, C.B. DOS; MACEDO, L.L. DE (2024). *Mapa hidrogeológico de Sergipe - Projeto de disponibilidade hídrica do Brasil - escala 1:250.000*.

PEIXINHO, F.; CASTILHO, A. (2025). *SIAGASWeb - Sistema de Informações de Águas Subterrâneas*. Serviço Geológico do Brasil. https://siagasweb.sgb.gov.br/layout/

TUFAIL, M.; NASIR, M.J.; TARIQ, A.; ALI, Z.; ASHFAQ, S. (2025). "*Geospatial assessment of groundwater vulnerability to pollution using the DRASTIC and AHP model in flood-affected area, Nowshera, Pakistan*". Solid Earth Sciences 10(2). https://doi.org/10.1016/j.sesci.2025.100239