PROCESSO ANALÍTICO HIERÁRQUICO APLICADO À CONTAMINAÇÃO DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO SAPUCAIA (SE)

Kaique Lima Pinto [1] ; Paulo Sérgio de Rezende Nascimento [2]

RESUMO – Este estudo mapeou a suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Sapucaia, no litoral sergipano, integrando o método Processo Analítico Hierárquico (AHP) e técnicas de geoprocessamento em ambiente SIG. A modelagem considerou quatro critérios físico-territoriais ligados ao escoamento superficial, à infiltração e à recarga direta: densidade de drenagem, declividade, forma do terreno e orientação da vertente, derivados de modelos digitais de elevação. Os critérios foram reclassificados com base na escala de Saaty e normalizados para integração multicritério, com pesos definidos por comparação pareada. A densidade de drenagem apresentou maior peso, seguida pela declividade, pela forma do terreno e pela orientação da vertente. A validação do julgamento foi considerada satisfatória, com razão de consistência igual a 0,014. O mapa final, dividido em cinco classes, indicou que as áreas mais suscetíveis estão associadas a condições favoráveis à infiltração, sobretudo em setores de baixa declividade e menor eficiência de drenagem superficial, com materiais inconsolidados e solos arenosos de alta permeabilidade. Os resultados subsidiam o monitoramento, a prevenção, o planejamento do uso do solo e a gestão dos recursos hídricos subterrâneos na bacia, em apoio a decisões ambientais e territoriais mais seguras, integradas e contextualizadas localmente.

ABSTRACT– This study mapped the susceptibility to groundwater contamination in the Sapucaia River Basin, on the coast of Sergipe, integrating the Analytic Hierarchy Process (AHP) method and geoprocessing techniques in a GIS environment. The modeling considered four physical-territorial criteria related to surface runoff, infiltration, and direct recharge: drainage density, slope, terrain shape, and slope orientation, derived from digital elevation models. The criteria were reclassified based on the Saaty scale and normalized for multi-criteria integration, with weights defined by pairwise comparison. Drainage density had the highest weight, followed by slope, terrain shape, and slope orientation. The validation of the judgment was considered satisfactory, with a consistency ratio of 0.014. The final map, divided into five classes, indicated that the most susceptible areas are associated with conditions favorable to infiltration, especially in sectors with low slopes and lower surface drainage efficiency, with unconsolidated materials and highly permeable sandy soils. The results support monitoring, prevention, land use planning, and groundwater resource management in the basin, contributing to safer, more integrated, and locally contextualized environmental and territorial decisions.

Palavras-Chave – Água subterrânea. Parâmetro geomorfométrico. Vulnerabilidade hidrogeológica.

[1]) Graduando do Departamento de Engenharia Ambiental – DEAM/UFS, São Cristóvão, Sergipe. E-mail –. E-mail: kaiquepinto@academico.ufs.br
[2]) Professor do Departamento de Engenharia Ambiental e Programa de Pós-graduação em Geociências e Análise de Bacia - UFS. E-mail: psrn.geologia@gmail.com

INTRODUÇÃO

A água subterrânea constitui um recurso estratégico essencial, contribuindo de forma decisiva para o abastecimento humano, a irrigação agrícola e a manutenção dos ecossistemas, além de exercer papel relevante na segurança hídrica e no desenvolvimento socioeconômico (Andrade e Nascimento, 2025). Sua importância é particularmente acentuada em regiões suscetíveis a restrições na disponibilidade hídrica, onde os aquíferos representam uma alternativa fundamental às fontes superficiais. Nesse contexto, torna-se imprescindível avaliar não apenas a disponibilidade quantitativa, mas também a suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas, considerando que a degradação da qualidade da água tende a ser persistente e de difícil reversão. Essa característica reforça a necessidade de ações preventivas, de monitoramento sistemático e de planejamento ambiental contínuo, especialmente em áreas ambientalmente sensíveis (Jang et al., 2017).

No Brasil, as águas subterrâneas representam uma parcela expressiva da oferta hídrica utilizada para diferentes finalidades, com destaque para o abastecimento urbano e rural, bem como para atividades produtivas. Essa relevância é intensificada em áreas onde a variabilidade climática e as características naturais do meio físico ampliam a dependência de fontes subterrâneas. Entretanto, o aumento da demanda, associado à ocupação inadequada do solo, à intensificação de atividades agrícolas e à ausência de planejamento territorial, pode elevar significativamente a suscetibilidade à contaminação dos aquíferos, sobretudo quando há limitações na sistematização de dados e na implementação de ações permanentes de gestão e controle (Nascimento et al., 2023).

No contexto sergipano, a gestão das águas subterrâneas assume relevância adicional em função da variabilidade climática regional, das características geomorfológicas e hidrogeológicas do território e dos desafios relacionados ao monitoramento ambiental. Estudos que consolidam e integram informações hidrogeológicas e hidroquímicas em bases georreferenciadas demonstram que a sistematização desses dados fortalece os diagnósticos ambientais e subsidia a tomada de decisão, especialmente em bacias hidrográficas costeiras e em áreas com elevada sensibilidade natural, mesmo quando essas áreas apresentam baixa ocupação antrópica (Resende et al., 2008).

Avaliações de vulnerabilidade natural em escala estadual evidenciam contrastes espaciais relevantes, com maior suscetibilidade no leste de Sergipe, associada a condições específicas de relevo, solos e dinâmica hídrica, o que reforça a necessidade de instrumentos técnicos que orientem estratégias preventivas de uso do solo e de proteção dos aquíferos (Resende et al., 2008). Diante desse cenário, a integração de técnicas de análise multicritério e ferramentas de geoprocessamento tem se mostrado uma abordagem eficiente para a avaliação espacial da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas. Esses métodos permitem sintetizar múltiplos condicionantes ambientais, reduzir

a subjetividade das análises e ampliar a transparência dos resultados, especialmente em áreas onde os processos de infiltração, escoamento superficial e recarga hídrica são fortemente condicionados por atributos geomorfométricos e geohidrológicos do terreno.

Nesse sentido, o presente trabalho tem como objetivo elaborar um mapa de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Sapucaia, no estado de Sergipe, por meio da integração do método do Processo Analítico Hierárquico (AHP) e de técnicas de geoprocessamento, incorporando critérios geomorfométricos e hidrológicos associados ao relevo e à drenagem, de modo a subsidiar análises ambientais e apoiar ações de planejamento e gestão dos recursos hídricos subterrâneos.

MATERIAIS E MÉTODOS

A área de estudo corresponde à Bacia Hidrográfica do Sapucaia (Figura 1), situada no litoral sergipano entre os municípios de Japaratuba e Pirambu, apresentando coordenadas geográficas de 10°36′19″ a 10°44′ 24″ de latitude Sul e de 36°54′8″ a 36° 44′ 10 de longitude Oeste.

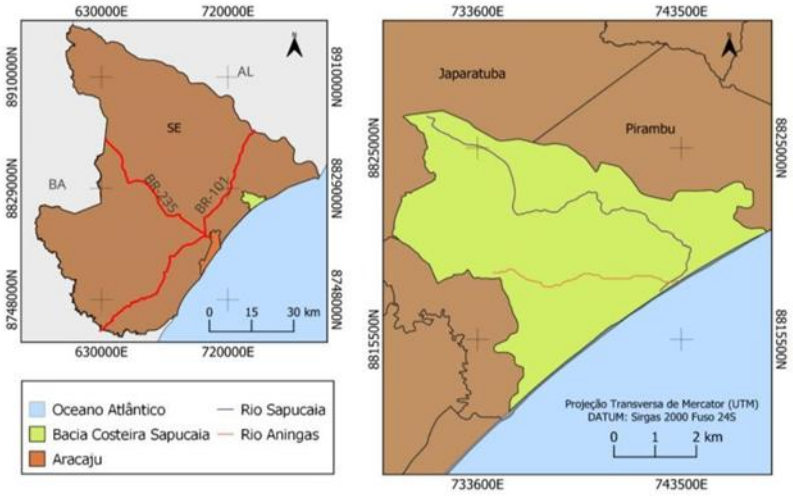


Figura 1 – Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autores, 2026.

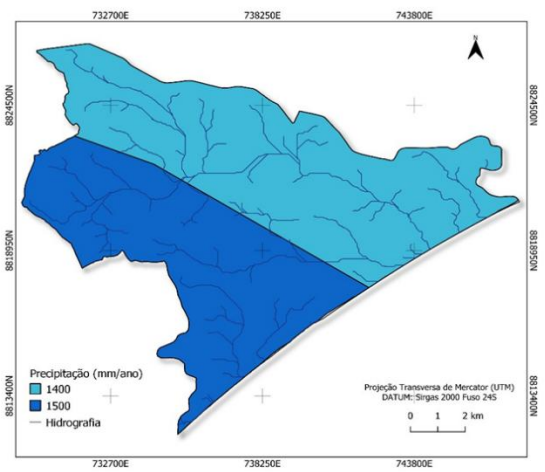
A avaliação da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas baseou-se na integração de quatro critérios físico-territoriais associados aos processos de escoamento superficial, infiltração e recarga. A declividade, calculada em percentual, foi considerada um fator fundamental, uma vez que áreas de menor inclinação favorecem um maior tempo de permanência da água na superfície e maior infiltração no solo. A densidade de drenagem foi utilizada como indicativo do grau de dissecação do relevo, sendo que valores mais baixos estão associados à menor eficiência de escoamento hídrico superficial e, consequentemente, ao maior potencial de infiltração. A forma do terreno foi analisada a partir das curvaturas horizontais e verticais do relevo, permitindo distinguir

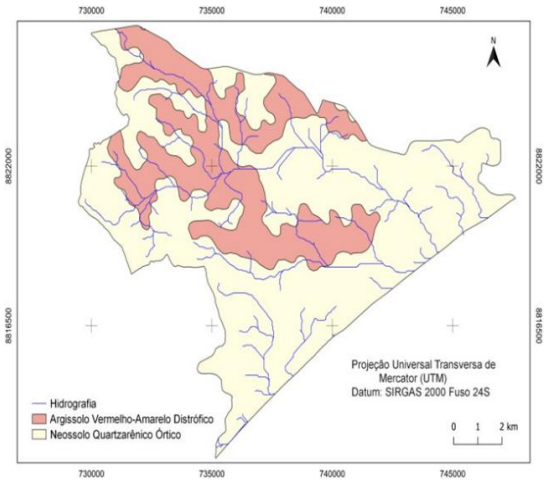
superfícies convergentes e côncavas, com maior tendência à concentração de fluxos (acumulação), e superfícies divergentes e convexas, com tendência à dispersão do escoamento superficial. A orientação do relevo foi incorporada como critério complementar, considerando a exposição das encostas à radiação solar, o que influencia a evapotranspiração e a umidade do solo.

Considerando que os critérios apresentam diferentes unidades e amplitudes numéricas, procedeu-se à padronização dos dados para viabilizar a integração multicritério. Inicialmente, os mapas temáticos foram reclassificados em classes de suscetibilidade, com valores atribuídos de acordo com a escala fundamental de Saaty, variando de 1 a 9. Em seguida, aplicou-se uma normalização linear para converter esses valores em uma escala contínua entre 0 e 1, assegurando a comparabilidade direta entre os fatores e evitando a predominância desproporcional de qualquer critério no modelo final.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

O enquadramento climático é predominantemente do tipo As (tropical com verão seco), segundo a classificação de Köppen, o que influencia os padrões de precipitação, escoamento e recarga subterrânea (Alvares et al., 2013). Do ponto de vista fisiográfico, predominam sedimentos inconsolidados e solos arenosos de alta permeabilidade, associados a feições típicas de ambientes costeiros e fluviomarinhos, com relevo planar a suavemente ondulado, em baixas altitudes (Figura 2). O argissolo e neossolo possuem taxas de infiltração de média a baixa e baixa a muito baixa, respectivamente, de acordo com Sartori, Lombardi Neto e Genovez (2005). Essas condições favorecem a recarga dos aquíferos, mas, simultaneamente, aumentam a suscetibilidade à infiltração de contaminantes e aos processos de salinização, sobretudo em áreas próximas ao litoral, em decorrência da intrusão salina.





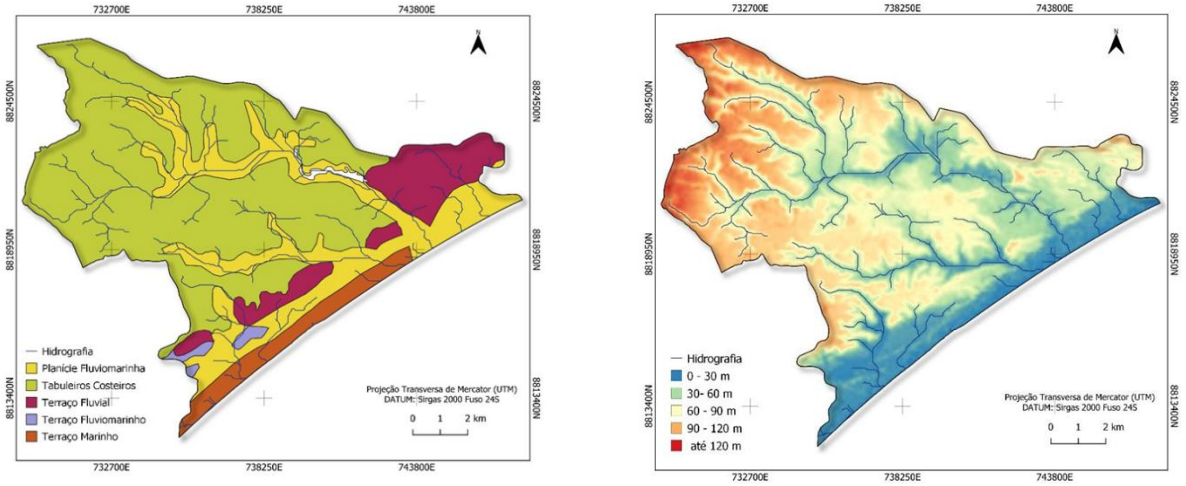


Figura 2 – Mapas simplificados de precipitação anual, pedologia, geomorfologia e hipsometria. Fonte: Autores, 2026.

Com base nesse contexto físico, a modelagem multicritério foi estruturada a partir de quatro critérios geomorfométricos e geohidrológicos: densidade de drenagem, classe de declividade, forma do terreno e orientação do relevo, nessa ordem hierárquica de importância. A hierarquização expressou a relevância relativa de cada variável para representar condições favoráveis à infiltração e, portanto, à maior suscetibilidade à contaminação do aquífero granular raso (suspenso ou livre), sobretudo em ambientes com solos arenosos e maior conectividade entre a superfície, a zona não saturada e o armazenamento subterrâneo.

A densidade de drenagem (Figura 3) apresentou um padrão espacial de variação gradual na concentração de drenagem, com áreas classificadas desde muito baixa até muito alta. Setores com menor densidade de canais fluviais indicam menor eficiência de drenagem superficial e maior permanência da água no terreno, aumentando o potencial de infiltração, especialmente quando associados a materiais permeáveis. Já as áreas com maior densidade de drenagem sugerem maior dissecação do relevo e maior conectividade do escoamento superficial, o que tende a reduzir a infiltração direta, embora possa intensificar o transporte superficial de contaminantes. Assim, a variável funciona como indicador de onde a água tende a permanecer e infiltrar, em comparação com áreas onde tende a ser rapidamente exportada por escoamento concentrado.

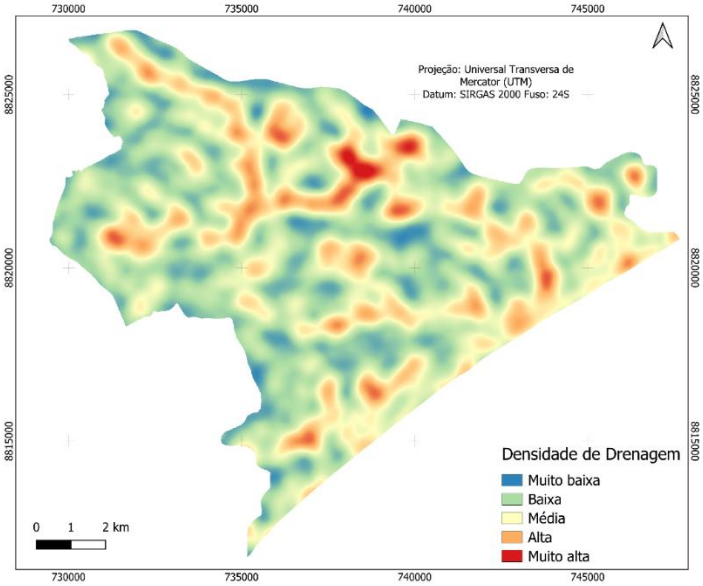


Figura 3. Mapas de classes de densidade de drenagem. Fonte: Autores, 2026.

As classes de declividade (Figura 4) exibiu predominância de classes baixas, com faixas pontuais de maior inclinação associadas a formas mais dissecadas do relevo. Do ponto de vista da suscetibilidade à contaminação de aquíferos, áreas menos inclinadas favorecem maior tempo de residência da água, menor velocidade de escoamento e maior potencialidade de infiltração, condição que pode ampliar a percolação de solutos para camadas subsuperficiais. Em contrapartida, declividades mais elevadas tendem a intensificar o escoamento superficial e reduzir o tempo de contato da água com o solo, diminuindo a infiltração efetiva local.

A forma do terreno (Figura 5) apresentou distribuição espacial heterogênea, com alternância de feições convergentes côncavas e divergentes convexas, passando por formas planares e transicionais. As formas convergentes, em especial as côncavas, tendem a concentrar fluxos superficiais e subsuperficiais, favorecendo maior acumulação hídrica e potencializando a infiltração em pontos específicos, o que pode elevar a suscetibilidade em locais onde a água se concentra. Em contraposição, as formas divergentes tendem a dispersar o fluxo, com menor concentração e, em muitos casos, menor infiltração localizada. Apesar de ser um critério importante para ajustes em escala local, sua influência depende mais da interação com os demais fatores, principalmente da declividade e da organização da drenagem.

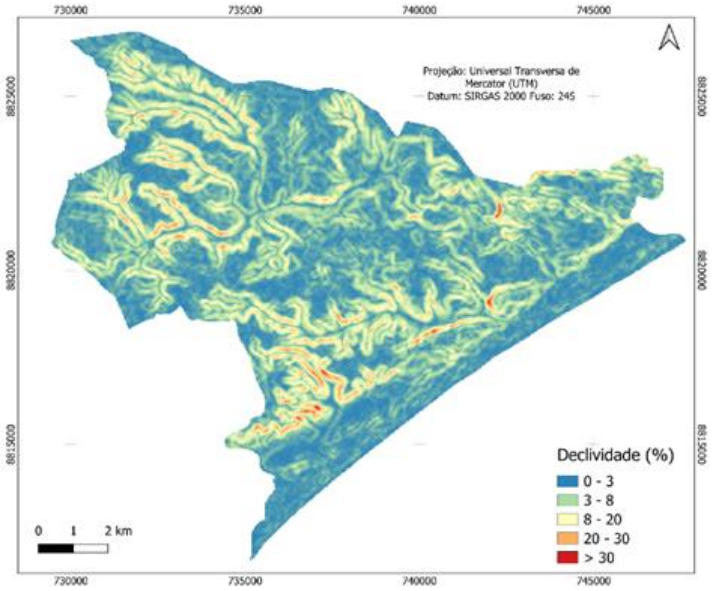


Figura 4 – Mapa de classe de declividade. Fonte: Autores, 2026.

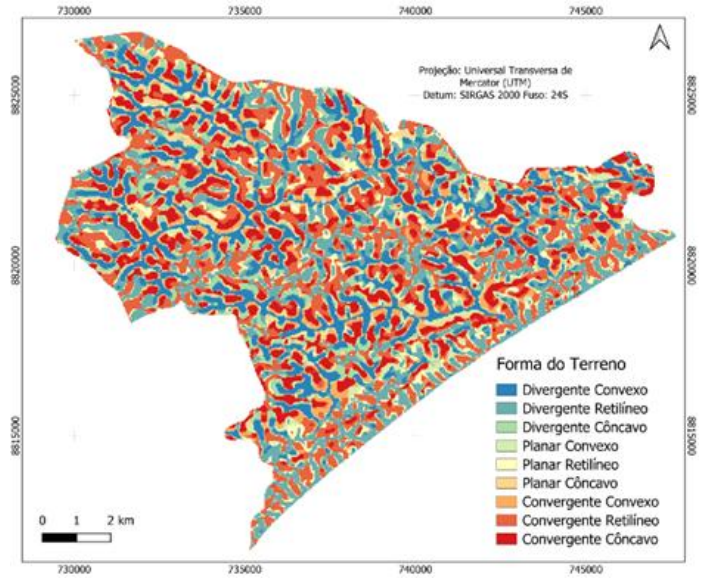


Figura 5 – Mapa de forma de terreno. Fonte: Autores, 2026.

A orientação do relevo (Figura 6) evidenciou a distribuição das vertentes segundo os principais quadrantes, com presença de múltiplas classes em mosaico, refletindo a variabilidade direcional das encostas. Sua contribuição para a suscetibilidade está associada a controles indiretos, como diferenças de insolação, evapotranspiração e umidade do solo, que podem alterar a persistência da umidade e o balanço hídrico local ao longo do ano. Contudo, em comparação com os critérios diretamente ligados à infiltração e ao escoamento, sua influência tende a ser secundária no modelo proposto, especialmente em bacias hidrográficas costeiras, onde o controle pedológico e a dinâmica do escoamento e da drenagem frequentemente predominam.

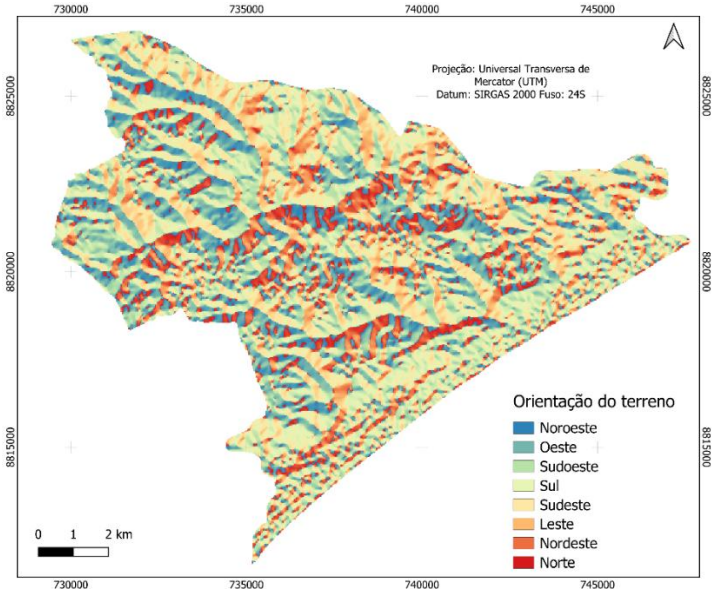


Figura 6 – Mapa de orientação do relevo. Fonte: Autores, 2026.

A ponderação dos critérios foi realizada por meio do método AHP, proposto por Saaty (1980), a partir da construção de uma matriz de comparação pareada. Os pesos obtidos refletem a influência relativa de cada variável na suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas, sendo atribuída maior relevância à densidade de drenagem (≈0,446), seguida pela declividade (≈0,290), pela forma do terreno (≈0,171) e pela orientação do relevo (≈0,093).

A matriz de comparação pareada apresentou autovalor máximo de $\lambda max = 4{,}039484392$ para uma matriz de ordem $n = 4$, resultando em Índice de Consistência (IC) de 0,013161464. Considerando o Índice Aleatório (IR) = 0,9, obteve-se Razão de Consistência (RC) de 0,014623849, valor inferior ao limite de 0,10 recomendado por Saaty (1980), indicando adequada coerência dos julgamentos.

Na etapa final, os critérios normalizados foram integrados por meio da combinação linear ponderada, resultando no mapa de suscetibilidade em formato matricial, posteriormente classificado em cinco classes, variando de muito baixa a muito alta suscetibilidade. Os pesos obtidos foram considerados confiáveis, conferindo maior robustez à hierarquização dos critérios e à representação espacial da suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas.

A integração dos critérios normalizados gerou o mapa final de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas (Figura 7), classificado em cinco níveis: muito baixo, baixo, médio, alto e muito alto. Observa-se que o padrão espacial da suscetibilidade reflete, principalmente, a influência dos dois critérios de maior peso, a densidade de drenagem e a declividade, os quais controlam diretamente a tendência de infiltração e permanência da água no terreno.

Com base na análise integrada dos critérios geomorfométricos e geohidrológicos, verificou-se que a suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Sapucaia é

fortemente condicionada pela dinâmica de infiltração e permanência da água no terreno, com destaque para a densidade de drenagem e a declividade. O mapa final evidenciou predominância de níveis intermediários de suscetibilidade, com ocorrência pontual de áreas de maior vulnerabilidade, associadas a condições favoráveis à infiltração, como baixa declividade, menor eficiência de drenagem e presença de materiais permeáveis.

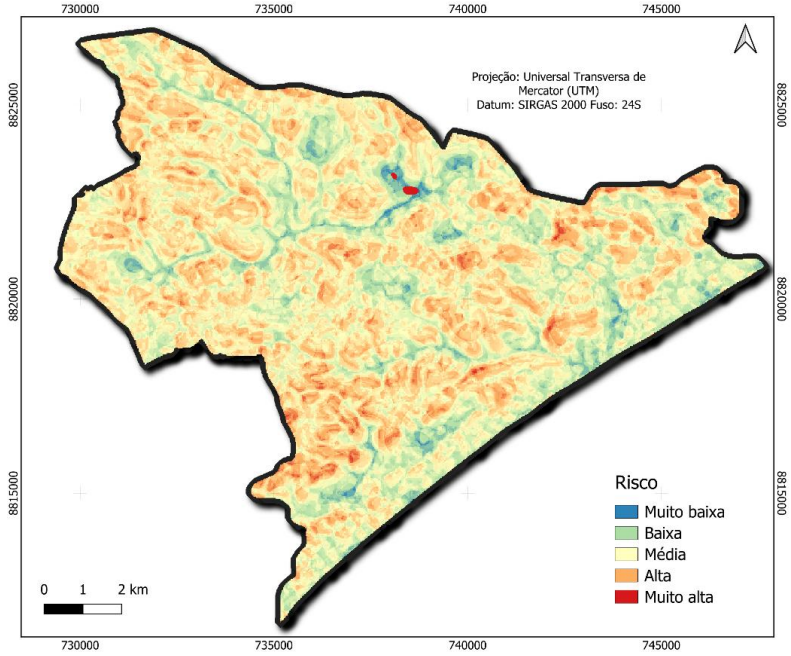


Figura 7 – Mapa de suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas obtido pelo AHP. Fonte: Autores, 2026.

A hierarquização obtida pelo método AHP corroborou o comportamento esperado para os critérios analisados, confirmando quantitativamente uma relação de importância já prevista sob o ponto de vista hidrológico e geomorfológico. A predominância da densidade de drenagem e da declividade reflete o papel determinante dessas variáveis no controle da infiltração, do escoamento e da permanência da água no terreno, enquanto a forma do terreno e a orientação do relevo exercem influência complementar sobre esses processos. Dessa forma, a aplicação do AHP não estabeleceu uma nova ordem de importância entre os critérios, mas atribuiu consistência quantitativa a uma hierarquia previamente fundamentada no conhecimento dos processos ambientais que condicionam a suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas.

CONCLUSÕES

A aplicação do método AHP permitiu integrar, de forma transparente e com consistência matemática, critérios geomorfométricos e geohidrológicos do terreno para estimar a suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas na Bacia Hidrográfica do Sapucaia, em Sergipe. A hierarquização atribuída aos critérios indicou maior relevância para a densidade de drenagem, seguida

pela declividade, pela forma do terreno e pela orientação do relevo, refletindo a importância dos controles diretos da dinâmica hídrica superficial e do potencial de infiltração na explicação da suscetibilidade ambiental em ambientes costeiros com materiais inconsolidados e solos arenosos.

O mapa final, resultante da combinação linear ponderada, apresentou predominância de classes intermediárias e ocorrência localizada de áreas com suscetibilidade elevada, indicando setores prioritários para ações preventivas, monitoramento e suporte ao planejamento territorial, sobretudo em razão da alta permeabilidade e do contexto costeiro, condições estas que favorecem a recarga, mas também ampliam a vulnerabilidade do aquífero à percolação de contaminantes.

Recomenda-se que o produto obtido seja utilizado como base preliminar para a definição de áreas prioritárias e que, em estudos futuros, a modelagem seja aprimorada com a incorporação de variáveis diretamente relacionadas às fontes potenciais de contaminação, como uso e ocupação do solo, proximidade de áreas antrópicas e dados hidrogeológicos disponíveis, além da validação direta por observações de campo ou por dados de qualidade da água, quando existentes. Ainda assim, o resultado apresentado demonstra que a integração entre SIG e AHP constitui uma abordagem consistente e aplicável para avaliações ambientais rápidas em escala de bacia hidrográfica, fornecendo um instrumento técnico útil para apoiar a gestão e a proteção das águas subterrâneas.

REFERÊNCIAS

ANDRADE, R. O.; NASCIMENTO, P. S. R. (2025). *"Estimativa da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (SE)".* Revista Internacional de Ciências 15(1), pp. 77–96.

ALVARES, C.A.; STAPE, J.L.; SENTELHAS, P.C.; GONÇALVES, J.L.M.; SPAROVEK, G. (2013). "*Köppen's climate classification map for Brazil*". Meteorologische Zeitschrift 22(6), pp. 711-728.

JANG, W.S.; ENGEL, B.; HARBOR, J.; THELLER, L. (2017). "*Aquifer vulnerability assessment for sustainable groundwater management using DRASTIC*". Water 9(10), pp. 1-20.

NASCIMENTO, E.A.; BARBOZA, E.G.; REGINATO, P.A.R.; ROSA, M.L.C.N.C.; BARILI, R.O. (2023). "*O fluxo da água subterrânea no sistema aquífero costeiro associado aos depósitos eólicos holocênicos na região do Cassino, RS*". Águas Subterrâneas 37(3), pp. 1-19.

RESENDE, R. S.; CRUZ, M.A.S, AMORIM, J.R.A. (2009). "Atlas de qualidade da água subterrânea no Estado de Sergipe." Embrapa Tabuleiro Costeiros Aracaju-SE, 86p.

SAATY, T.L. (1980). *The analytic hierarchy process: planning, priority setting, resource allocation*. McGraw-Hill, New York. 287p.

SARTORI, A.; LOMBARDI NETO, F.; GENOVEZ, A. M. (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), p. 5-18.