

Utilização do método GOD para a avaliação da vulnerabilidade à contaminação dos aquíferos da cidade de Maceió, AL

Application of the GOD method for assessing aquifer vulnerability to contamination in the city of Maceió, AL

Eduarda Pinheiro Barbosa da Silva¹, Erik Eduardo Honorio Pereira², Antonio Pedro de Oliveira Netto³, Wendell José Soares dos Santos⁴, Silmayko Gomes da Silva⁵

¹Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – Brasil, eduarda.pinheirob@gmail.com

²Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – Brasil, erik.pereira@arapiraca.ufal.br

³Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – Brasil, antonio.netto@delmiro.ufal.br

⁴Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – Brasil, wendell.santos@delmiro.ufal.br

⁵Universidade Federal de Alagoas, Alagoas – Brasil, silmayko.silva@delmiro.ufal.br

Recebido:

01 de junho de 2026

Recebido no formato de revisão:

10 de junho de 2026

Aceito:

01 de outubro de 2026

Disponível online:

22 de outubro de 2026

Seção:

Artigos

Palavras-chave:

Águas subterrâneas.
Proteção de aquíferos.
Poços tubulares.
Mapeamento temático.
Hidrogeologia urbana.

Keywords:

Groundwater.
GOD.
Tubular wells.
Vulnerability.
Contamination.

<https://doi.org/10.14295/ras.v40i2.30424>



RESUMO

As águas subterrâneas são um recurso importante para o abastecimento e o desenvolvimento urbano, o que exige a avaliação de sua vulnerabilidade à contaminação. Este estudo avaliou a vulnerabilidade intrínseca dos aquíferos em Maceió–AL pelo método GOD, com dados do Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS). Dos 1.173 poços registrados no município, 44 apresentavam as informações necessárias para os parâmetros G (grau de confinamento), O (ocorrência de estratos de cobertura) e D (distância até o lençol freático). Como predomina material argiloso na zona não saturada, o parâmetro O foi mantido constante em 0,4, de modo que a variabilidade espacial do índice foi determinada principalmente por G e D. Os índices foram espacializados por interpolação Inverse Distance Weighted (IDW) no QGIS e reclassificados segundo as classes de Foster et al. (2006). Predominaram as vulnerabilidades insignificante e baixa, correspondentes a 18,2% e 70,5% dos poços, respectivamente; 11,3% apresentaram vulnerabilidade média, e não foram identificadas as classes alta ou extrema. Os poços distribuíram-se de forma heterogênea, concentrados nas porções sul e sudoeste, o que afeta o suporte espacial da interpolação e limita a representatividade dos resultados em áreas com menos dados. O valor constante de O também restringiu a representação da variabilidade litológica. Além disso, a vulnerabilidade intrínseca não considera fontes específicas de contaminação, devendo ser interpretada junto às condições de uso e ocupação do solo. Conclui-se que predominou baixa vulnerabilidade, mas os resultados devem ser interpretados considerando as limitações da base de dados e da abordagem adotada.

ABSTRACT

Groundwater is an important resource for water supply and urban development, which requires assessing its vulnerability to contamination. This study evaluated the intrinsic vulnerability of aquifers in Maceió, Alagoas, using the GOD method, with data from the Groundwater Information System (SIAGAS). Of the 1,173 wells registered in the municipality, 44 had the information required for the parameters G (groundwater occurrence/degree of confinement), O (overlying strata), and D (depth to groundwater table). Because clayey material predominates in the unsaturated zone, parameter O was kept constant at 0.4, so that the spatial variability of the index was determined mainly by G and D. The indices were spatialized by Inverse Distance Weighted (IDW) interpolation in QGIS and reclassified according to the classes of Foster et al. (2006). Insignificant and low vulnerability predominated, corresponding to 18.2% and 70.5% of the wells, respectively; 11.3% showed medium vulnerability, and no high or extreme classes were identified. The wells were heterogeneously distributed, concentrated in the southern and southwestern portions, which affects the spatial support of the interpolation and limits the representativeness of the results in areas with less data. The constant value of O also restricted the representation of lithological variability. Furthermore, intrinsic vulnerability does not account for specific contamination sources and should be interpreted together with land use and occupation conditions. It is concluded that low vulnerability predominated, but the results should be interpreted considering the limitations of the database and the approach adopted.

1. INTRODUÇÃO

As águas subterrâneas constituem um recurso de extrema relevância para o bem-estar humano, representando aproximadamente 97% da água doce líquida disponível no planeta (Hirata *et al.*, 2019). Elas desempenham um papel essencial na conservação dos ecossistemas e no desenvolvimento sustentável, sendo uma fonte estratégica em regiões com baixa disponibilidade de águas superficiais e em áreas sujeitas a longos períodos de estiagem (Aslam; Shrestha; Pandey, 2018; Zhang *et al.*, 2025).

Apesar de sua importância, atividades antrópicas vêm contribuindo, ao longo das últimas décadas, para a intensificação da contaminação dos aquíferos, a qual, segundo Foster *et al.* (2013), apresenta difícil reversão, mesmo após a interrupção das fontes poluidoras. Diversas fontes potenciais de contaminação podem comprometer a qualidade da água subterrânea, incluindo transbordamentos de esgoto, fossas sépticas com funcionamento inadequado, escoamento de atividades agrícolas e fezes de animais silvestres. A contaminação microbiológica proveniente dessas fontes representa riscos significativos tanto ao meio ambiente quanto à saúde humana e à biota em geral (Natishah *et al.*, 2025).

A captação da água subterrânea pode ocorrer por meio de nascentes ou poços. No Brasil, essa extração é realizada majoritariamente por poços tubulares, cujo uso requer registro e/ou outorga. No entanto, estima-se que apenas cerca de 1% dos poços estejam devidamente cadastrados, o que dificulta o monitoramento da quantidade de água extraída e compromete a segurança hídrica (Hirata *et al.*, 2019).

Dada sua importância e ampla utilização em diversos setores, torna-se necessário adotar práticas como o monitoramento e a avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos, com vistas à gestão sustentável deste recurso (Bertrand *et al.*, 2016). Os métodos empregados para esse fim são variados e devem ser escolhidos conforme o grau de complexidade e os objetivos do estudo. Para garantir avaliações eficazes, é fundamental equilibrar a fundamentação científica e o nível de incerteza aceitável (Focazio *et al.*, 2002).

Ao longo dos anos, diferentes metodologias têm sido propostas para a avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação, incluindo o método DRASTIC (Aller *et al.*, 1987) e o Índice de Vulnerabilidade do Aquífero (AVI) (Van Stempvoort; Ewert; Wassenaar, 1992). Entre eles, destaca-se o modelo GOD (Foster e Hirata, 1988), amplamente utilizado em análises preliminares devido à sua simplicidade e facilidade de aplicação (Purnama; Primacintya, 2020; Sekar *et al.*, 2023; Taazzouzte *et al.*, 2020). Esse método baseia-se na atribuição de valores, definidos por tabelas classificatórias, a três fatores: tipo de ocorrência da água subterrânea (G), litologia do aquífero (O) e profundidade do nível freático (D) (Aladeboyeje; Adenoye; Agbasi, 2024).

Apesar da existência de estudos sobre a vulnerabilidade das águas subterrâneas em áreas específicas de Maceió, ainda são limitadas as avaliações que abrangem a distribuição da vulnerabilidade na área urbana a partir das características dos diferentes poços tubulares. Assim, a aplicação do método GOD aos poços com dados hidrogeológicos disponíveis pode contribuir para ampliar e atualizar o conhecimento sobre a vulnerabilidade intrínseca das águas subterrâneas do município, especialmente diante da intensa ocupação urbana e da presença de potenciais fontes de contaminação.

Diante dessa lacuna, o presente trabalho tem como objetivo aplicar o método GOD para avaliar a vulnerabilidade dos poços tubulares à contaminação no município de Maceió-AL, utilizando dados de poços outorgados disponíveis no sistema CPRM/SIAGAS, bem como espacializar os resultados por meio de mapeamento temático.

A aplicação do método busca identificar áreas mais suscetíveis à contaminação, contribuindo para o planejamento e a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente diante da crescente urbanização e do aumento da demanda por esse recurso. Além disso, a avaliação da vulnerabilidade pode subsidiar a tomada de decisões relacionadas ao uso e ocupação do solo e à segurança hídrica da população atendida por sistemas de captação subterrânea.

2. MATERIAIS E MÉTODOS

2.1. Área de estudo

O presente estudo foi realizado no município de Maceió, capital do estado de Alagoas, situado no leste da Região Nordeste do Brasil. Com área aproximada de 510 km², o município localiza-se entre as coordenadas geográficas 9°39'57" de latitude sul e 35°44'07" de longitude oeste (IBGE, 2025).

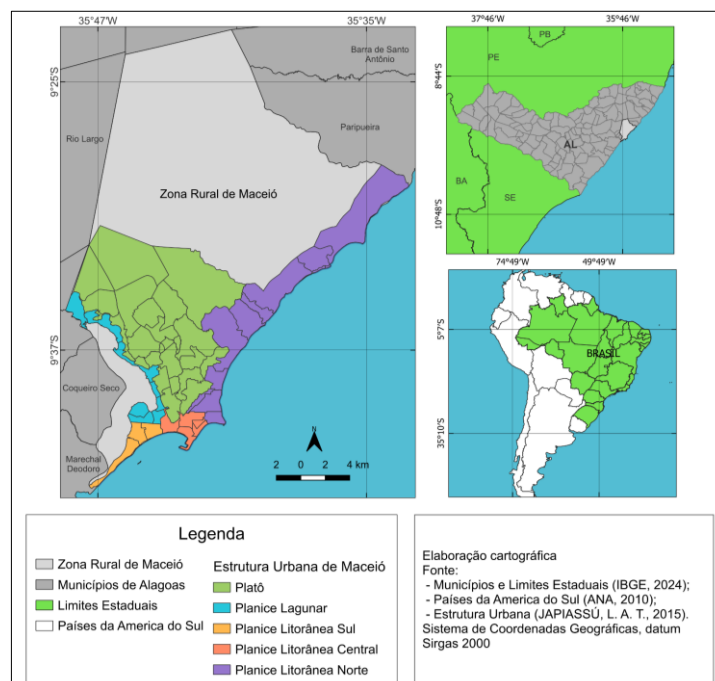


Figura 1 – Delimitação da área de estudo. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026 com base em dados do IBGE (2024), ANA (2010) e Japiassú (2015).

A área urbana da cidade está dividida em sete regiões administrativas, totalizando 48 bairros, conforme estabelecido pela Lei nº 4952/2000 (Maceió, 2000). O relevo municipal é composto por quatro unidades principais: tabuleiro costeiro (denominado parte alta da cidade), planície litorânea lagunar (parte baixa), além de encostas e grotas, que constituem áreas de transição entre os dois primeiros (Japiassú, 2015). A malha urbana concentra-se predominantemente no platô e nas planícies litorâneas e lagunar, conforme ilustrado na Figura 1.

O clima local é classificado como tropical chuvoso, com maior incidência de precipitações nos períodos de outono e inverno, apresentando temperaturas médias variando entre 24 °C e 29 °C (Alagoas, 2025). A topografia caracteriza-se por formas suavemente onduladas, abrangendo tabuleiros costeiros, planícies fluviais e áreas de baixada litorânea, com predominância de solos areno-argilosos (CPRM, 2014).

Do ponto de vista geológico, o município está inserido na Bacia Costeira de Alagoas-Sergipe. As formações Marituba e Barreiras destacam-se pelo potencial de exploração hídrica, sendo essenciais para os abastecimentos

público, privado e industrial da região. Essas unidades compõem o aquífero Terciário, que apresenta uma zona livre. Esse sistema aquífero apresenta vulnerabilidade, especialmente em razão de processos de salinização e da perfuração inadequada de poços (ANA, 2011).

2.2. Coleta de dados

Para a determinação do índice de vulnerabilidade das águas subterrâneas, foram utilizados dados secundários. Para isso, recorreu-se ao Sistema de Informações de Águas Subterrâneas, plataforma desenvolvida pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), que disponibiliza dados e informações georreferenciadas de pontos de água subterrânea em todo o território nacional (SIAGAS, 2025).

O município de Maceió conta com 1.173 poços registrados; contudo, ao considerar apenas aqueles em operação e que apresentam todas as informações exigidas para a aplicação do método GOD, incluindo a condição do meio aquífero (livre, confinado ou semiconfinado), litologia e nível estático, o número de poços elegíveis foi reduzido para 44, como demonstra a Figura 2 (Foster *et al.*, 2006). Esses poços encontram-se distribuídos de forma heterogênea no município, com maior concentração na porção centro-sul e sul, especialmente em áreas próximas ao litoral.

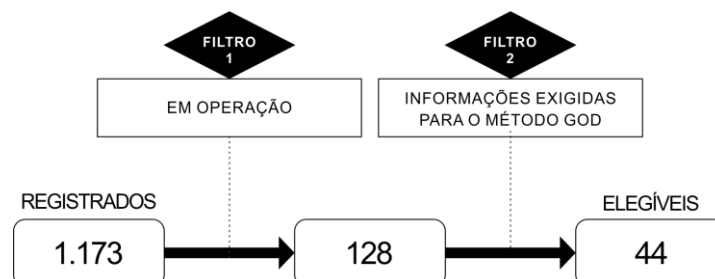


Figura 2 - Fluxograma dos critérios adotados para a seleção das informações. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026.

Essa distribuição espacial deve ser considerada na interpretação dos resultados, uma vez que as áreas com maior concentração de poços apresentam maior suporte de informações para a caracterização da vulnerabilidade, enquanto as regiões com menor densidade de pontos possuem menor disponibilidade de dados para representar as condições hidrogeológicas locais. Conforme observado na Figura 3, a distribuição das classes de vulnerabilidade abrange áreas com diferentes densidades de poços, de modo que a predominância da classe baixa deve ser interpretada considerando a distribuição espacial da base de dados utilizada.

Assim, embora os resultados permitam caracterizar a vulnerabilidade nas áreas avaliadas, a ausência de uma análise estatística específica da incerteza espacial associada à densidade e à distribuição dos poços constitui uma limitação da análise. Dessa forma, deve-se evitar a interpretação dos resultados como igualmente confiáveis em toda a extensão do município. A base de dados resultante foi processada no *software Microsoft Excel®*, utilizado para a tabulação e análise das informações.

2.3. Método GOD

O método GOD foi desenvolvido por Foster (1987) e posteriormente aperfeiçoado por Foster e Hirata (1988), com sua versão mais recente apresentada por Foster *et al.* (2006). Trata-se de um procedimento sistemático e de aplicação simplificada, voltado à análise da vulnerabilidade natural das águas subterrâneas à contaminação, especialmente indicado para áreas com disponibilidade limitada de dados hidrogeológicos (Kaddour *et al.*, 2018). A escolha deste método neste estudo se justifica por sua ampla aceitação e aplicação em diversos países da América Latina e do Caribe durante a década de 1990, conforme evidenciado por estudos regionais (Foster *et al.* 2006).

A Figura 3 apresenta, de forma esquemática, as etapas do procedimento metodológico adotado no sistema GOD.

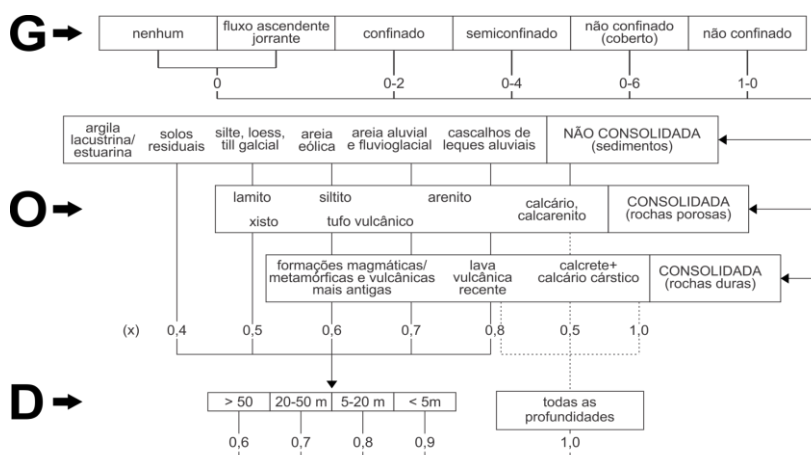


Figura 3 - Sistema GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação. **Fonte:** Adaptado - Foster *et al.* (2006).

O índice final de vulnerabilidade é calculado pelo produto dos três parâmetros, conforme expresso na equação 1 (Kirlas *et al.*, 2022):

$$GOD = G \times O \times D \quad (1)$$

Sendo:

G = Grau de confinamento da água subterrânea;

O = Ocorrência de extratos de cobertura;

D = Distância até o lençol freático ou teto do aquífero confinado.

O resultado obtido varia de 0 a 1, sendo classificado em diferentes níveis de vulnerabilidade, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1 - Índice de vulnerabilidade método GOD

Nível de vulnerabilidade	Valores
Insignificante	0 – <0,1
Baixa	0,1 – <0,3
Média	0,3 – <0,5
Alta	0,5 – <0,7
Extrema	0,7 – 1

Fonte: Foster e Hirata (1988).

De acordo com Foster *et al.* (2006), a classe de vulnerabilidade extrema indica que o aquífero está exposto à maioria dos contaminantes, com impacto rápido em vários cenários de contaminação. A classe alta representa suscetibilidade a diversos contaminantes, com exceção daqueles fortemente adsorvidos ou rapidamente degradados. A classe média sugere vulnerabilidade a certos contaminantes, especialmente sob condições de exposição contínua. A classe baixa aponta vulnerabilidade apenas a contaminantes conservadores em situações de lançamento prolongado e generalizado. Por fim, a classe insignificante caracteriza aquíferos confinados com barreiras geológicas efetivas, sem fluxo vertical expressivo de águas subterrâneas.

2. 4. Espacialização dos dados

Para a representação das áreas com poços de maior vulnerabilidade à contaminação, utilizou-se um Sistema de Informações Geográficas (SIG) por meio do software QGIS 2.14 (QGIS, 2019). Foram aplicadas duas ferramentas principais: o método de interpolação *Inverse Distance Weighted* (IDW) e o módulo *r.recode*.

A escolha do método IDW para a espacialização da vulnerabilidade foi baseada em sua aplicação em estudos de avaliação da vulnerabilidade das águas subterrâneas pelo método GOD, a exemplo de Andrade e Nascimento

(2025), que utilizaram dados de 123 poços cadastrados no SIAGAS para obtenção dos parâmetros do método GOD e posterior espacialização por meio do interpolador IDW. De forma semelhante, Jesús *et al.* (2023) aplicaram o método GOD para avaliar a vulnerabilidade das águas subterrâneas em Itabaiana (SE) e utilizaram a interpolação IDW, em ambiente QGIS, para produzir o mapa de vulnerabilidade.

Inicialmente, os pontos contendo os valores calculados do índice GOD foram importados para o ambiente do software, permitindo a visualização da localização de cada poço com base na delimitação municipal, obtida por meio da malha disponibilizada pelo IBGE (2024).

Em seguida, procedeu-se à interpolação dos dados por meio do método IDW, possibilitando a análise da influência espacial de cada poço no contexto da vulnerabilidade. Posteriormente, realizou-se a reclassificação do raster gerado, utilizando o algoritmo *r.recode*, com o objetivo de estruturar um mapa temático representativo dos graus de vulnerabilidade. Esse processo converteu os valores contínuos, resultantes da interpolação, em classes discretas. As classes foram definidas conforme os critérios propostos por Foster *et al.* (2006) e descritos na Tabela 1. Os intervalos foram inseridos no algoritmo *r.recode* por meio de um arquivo no formato *.txt*.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Grau de confinamento hidráulico (G)

Na área de estudo, o parâmetro G (grau de confinamento) apresentou três das seis classes propostas por Foster *et al.* (2006): confinado, semiconfinado e livre, conforme mostrado na Tabela 2 e espacializado na Figura 4. A classificação considerou a espessura e a composição das camadas situadas acima do nível estático.

Tabela 2 - Grau de confinamento dos aquíferos (G)

Grau de confinamento	Peso	Quantidade	Poços (%)
Confinado	0,2	8	18,2
Semiconfinado	0,4	19	43,2
Livre	1	17	38,6

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

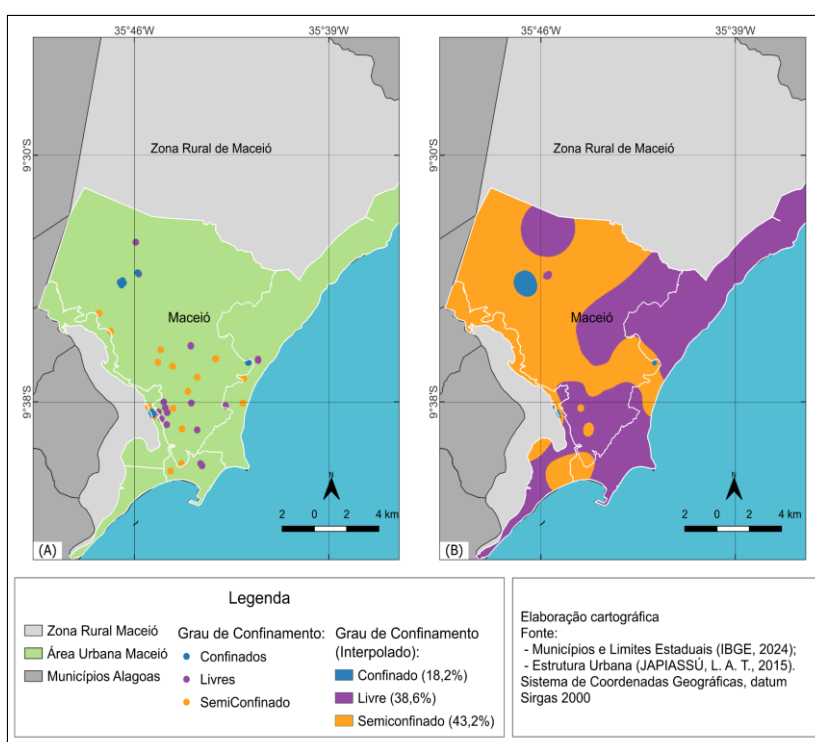


Figura 4 - Distribuição espacial do grau de confinamento socioespacial na área urbana de Maceió, Alagoas: (A) pontos amostrais classificados por grau de confinamento; (B) superfícies de confinamento por interpolação IDW.

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026) com base em dados do IBGE (2024), ANA (2010) e Japiassú (2015).

Verifica-se que, em Maceió, predominam áreas classificadas com pesos 0,4 e 1, correspondendo à presença majoritária de poços semiconfinados (19) e livres (17). Apenas 8 poços foram classificados como confinados. Essa distribuição indica maior vulnerabilidade à contaminação, uma vez que os aquíferos confinados, protegidos por camadas impermeáveis, tendem a ser menos suscetíveis à infiltração de poluentes provenientes da superfície – condição que, neste caso, não predomina na área estudada (Patel; Mehta; Sharma, 2023).

3.2. Ocorrência de estratos de cobertura (O)

Na área de estudo, a zona não saturada é predominantemente composta por material argiloso, apresentando características homogêneas em todo o setor analisado, conforme observado na Figura 5. Em função disso, adotou-se o valor de 0,4 para o parâmetro "O", correspondente a sedimentos não consolidados com predominância de argila (Foster *et al.*, 2006). Esse resultado é relevante do ponto de vista da vulnerabilidade, uma vez que camadas com materiais de granulometria mais fina — como é o caso da argila — tendem a oferecer maior proteção ao aquífero, reduzindo a infiltração de contaminantes (Kaddour *et al.*, 2018; Patel; Mehta; Sharma, 2023).

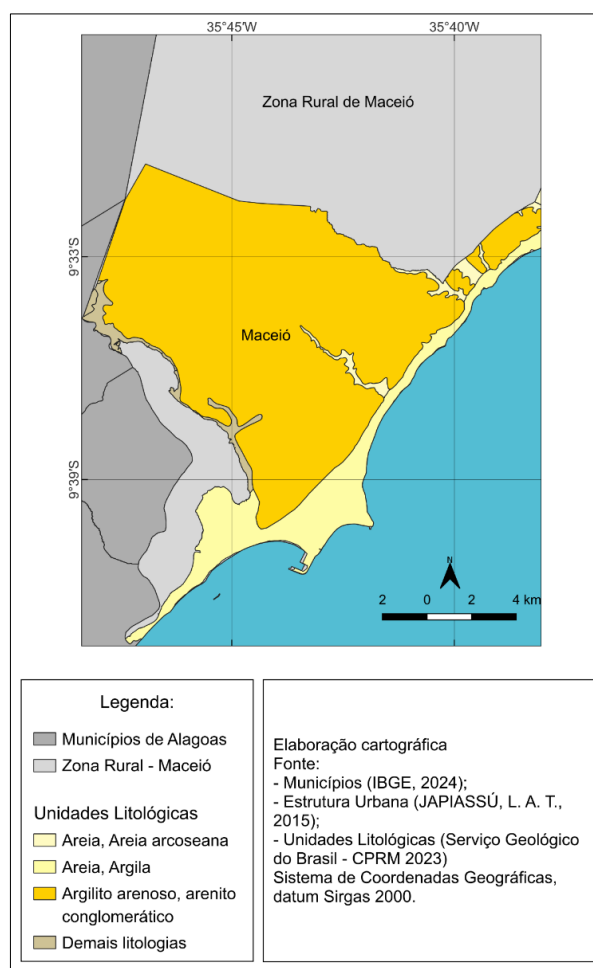


Figura 5 - Distribuição litológica no município de Maceió (AL). **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026 com base em dados do IBGE (2024), ANA (2010), Japiassú (2015) e CPRM (2023).

Cabe destacar, no entanto, que o valor constante atribuído ao parâmetro O em toda a área estudada implica que a variabilidade espacial do índice GOD resultou exclusivamente da combinação entre os parâmetros G e D. Essa característica representa uma limitação da aplicação do método nesta área, uma vez que reduz sua capacidade de discriminar a influência da litologia na vulnerabilidade entre os diferentes poços analisados. Ainda assim, os resultados obtidos permanecem representativos da condição hidrogeológica predominante do município, na qual a cobertura argilosa constitui um fator relevante — embora uniforme — de proteção do aquífero.

3.3 Distância até o lençol freático (D)

Os valores do parâmetro "D" variaram entre 3,77 e 60 metros, refletindo a heterogeneidade da profundidade do nível estático entre os poços analisados. A Tabela 3 e a Figura 6 apresentam a distribuição dos poços de acordo com essa profundidade, os respectivos pesos atribuídos e a porcentagem representada. Esse parâmetro exerce forte influência sobre o índice final de vulnerabilidade, uma vez que determina o grau de exposição do aquífero a contaminantes provenientes da superfície: quanto maior a profundidade, menor a vulnerabilidade (Sukmawati Rukmana; Bargawa; Cahyadi, 2020).

Tabela 3 - Profundidade do lençol freático (D)

Profundidade do nível estático (m)	Peso	Quantidade	Poços (%)
> 50	0,6	11	25
20 - 50	0,7	18	41
5 - <20	0,8	14	31
< 5	0,9	1	3

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

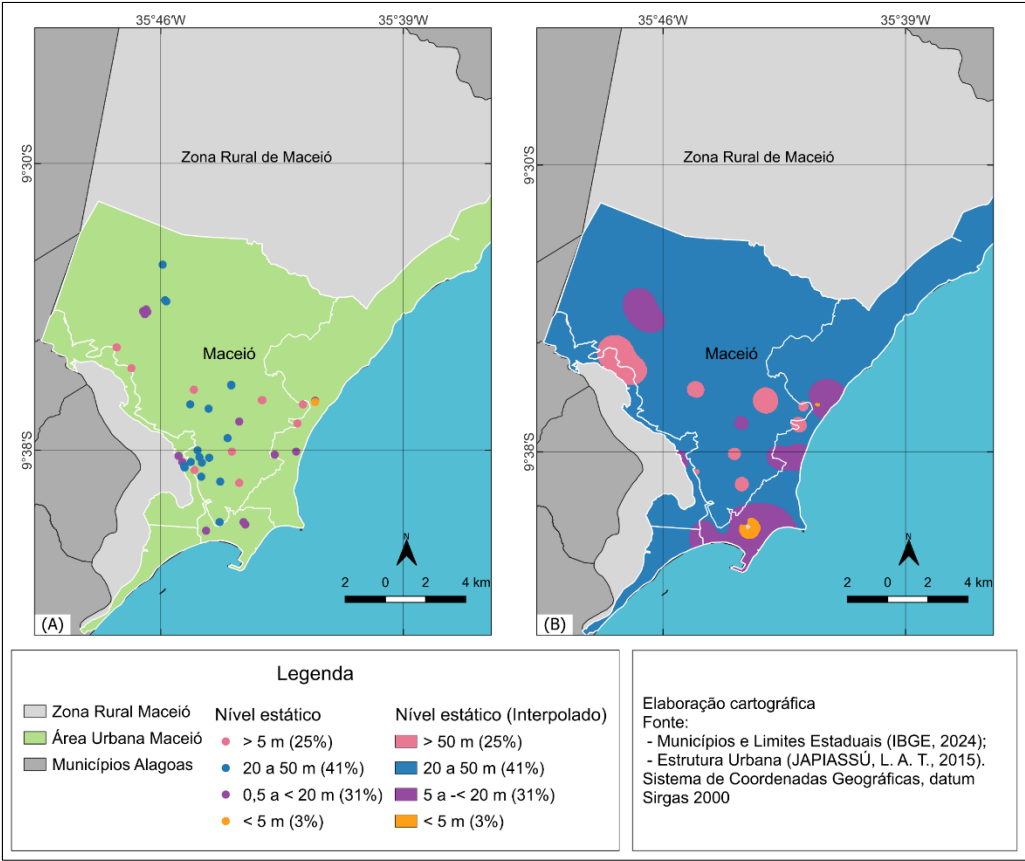


Figura 6 - Distribuição espacial do nível estático das águas subterrâneas na área urbana de Maceió, Alagoas: (A) pontos amostrais classificados por nível estático; (B) superfícies de nível estático por interpolação IDW. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026 com base em dados do IBGE (2024), ANA (2010) e Japiassú (2015).

A maior parte dos poços (41%) encontra-se na faixa de 20 a 50 metros de profundidade, seguida pela faixa de 5 a <20 metros, que representa 31% dos poços. Essas duas categorias somam 72% da amostra total, indicando que a maioria dos poços possui profundidade intermediária.

Ressalta-se, portanto, que os valores de profundidade do nível estático utilizados são provenientes de dados secundários do sistema SIAGAS, cadastrados em diferentes momentos ao longo do tempo, sem controle quanto ao período sazonal da medição. Dessa forma, não é possível descartar a influência de variações sazonais do nível freático sobre os valores utilizados.

3.4. Vulnerabilidade do aquífero à contaminação (GOD)

Os valores de vulnerabilidade obtidos por meio da aplicação do método GOD variaram entre 0,05 e 0,36. De acordo com a classificação proposta por Foster *et al.* (2006), a área de estudo apresentou três classes de vulnerabilidade: insignificante, baixa e média, conforme demonstrado na Tabela 4 e na Figura 7.

Tabela 4 - Classes de vulnerabilidade das águas subterrâneas de Maceió (AL) à contaminação

Índices (método GOD)	Índices (área de estudo)	Classes de vulnerabilidade	Quantidade	Poços (%)
0 - <0,1	0,05 - 0,06	Insignificante	8	18,2
0,1 - <0,3	0,1 - 0,28	Baixa	31	70,5
0,3 - <0,5	0,32 - 0,36	Média	5	11,3
0,5 - <0,7	-	Alta	-	-
0,7 - 1	-	Extrema	-	-

Fonte: Elaborado pelos autores, 2026.

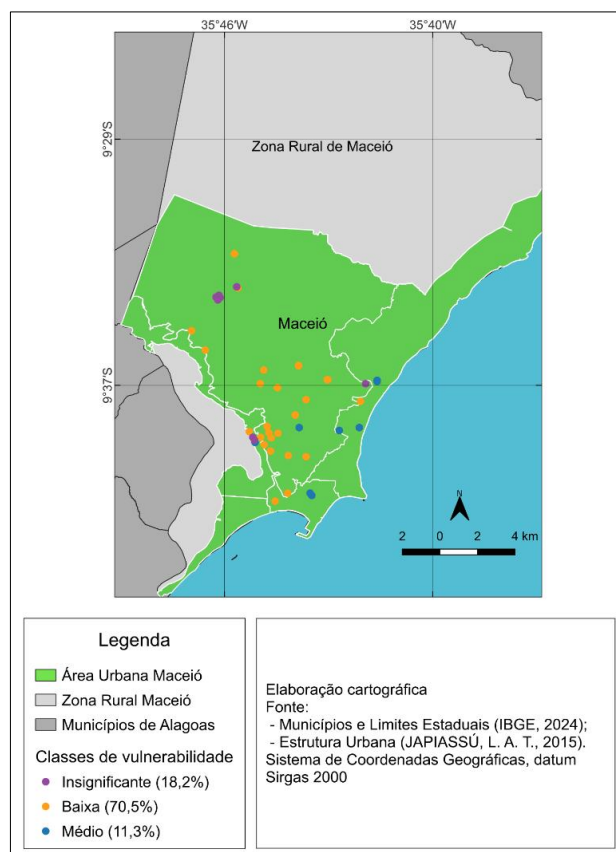


Figura 7 - Distribuição espacial e classificação dos poços avaliados no município de Maceió (AL). **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026 com base em dados do IBGE (2024), ANA (2010) e Japiassú (2015).

A Tabela 4 e a Figura 7 apresentam a distribuição espacial e a classificação da vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação no município de Maceió (AL), com base nos índices calculados. Os resultados mostram que a maioria dos poços (88,7%) se encontra nas categorias de vulnerabilidade insignificante ou baixa. A classe de vulnerabilidade média corresponde a 11,3% dos poços, com índices variando entre 0,32 e 0,36. Esses dados indicam, de forma geral, uma baixa suscetibilidade dos aquíferos da área estudada à contaminação, embora a presença de áreas classificadas como de vulnerabilidade média reforce a necessidade de atenção.

As classes de vulnerabilidade identificadas neste estudo corroboram os resultados apresentados pela Agência Nacional de Águas (ANA, 2011) no Projeto Aquíferos da Região Metropolitana de Maceió, bem como os estudos conduzidos por Lima e Ferreira Neto (2020), que analisaram a qualidade das águas subterrâneas na bacia endorreica do Tabuleiro do Martins, em Maceió (AL).

As áreas classificadas como de vulnerabilidade insignificante, sendo representadas por oito poços tubulares (Figura 7), apresentam aquíferos com grau de confinamento hidráulico confinado, profundidade do nível d'água geralmente superior a 16 metros e zona não saturada composta predominantemente por argilas. Essa condição resulta em baixa permeabilidade, o que, aliado à maior profundidade do nível freático, reduz significativamente a infiltração de contaminantes e o risco de poluição das águas subterrâneas.

Nas áreas de vulnerabilidade baixa, os aquíferos são majoritariamente semiconfinados (62,1%), com 37,9% sendo do tipo livre. A profundidade do nível estático nesses poços é, em sua maioria, superior a 30 metros, e a zona não saturada é constituída por argilas. Assim, a baixa vulnerabilidade está associada, sobretudo, à profundidade expressiva do nível d'água, que dificulta a chegada de poluentes à zona saturada. Essa condição é observada em 31 poços.

Por fim, nas áreas classificadas com vulnerabilidade média, verificou-se a predominância de aquíferos livres, enquanto apenas dois dos oito poços avaliados apresentaram condição de semi-confinamento. As profundidades do nível estático variam entre 3,77 e 23 metros, e a zona não saturada também é composta por argilas. A combinação entre aquíferos livres e profundidades relativamente rasas contribui para a elevação da vulnerabilidade, justificando a classificação intermediária dessas áreas.

Além dessas características hidrogeológicas, outros fatores relacionados à vulnerabilidade da área podem influenciar a qualidade da água subterrânea, como a possível ocorrência de intrusão salina em regiões costeiras, associada ao nível do lençol freático, aos estratos de cobertura dos poços e à proximidade com a região litorânea. Conforme destacado por Freeze e Cherry (2017), o bombeamento de água subterrânea em aquíferos localizados próximos ao mar pode gerar gradientes hidráulicos que favorecem o deslocamento de água salgada em direção aos poços. Nesse sentido, destaca-se que 11,3% dos poços analisados, classificados com índice médio de contaminação, estão situados nas proximidades da planície litorânea central e norte, correspondente à zona mais baixa da área de estudo.

A distribuição espacial dos índices de vulnerabilidade no município de Maceió - AL é mostrada na Figura 8.

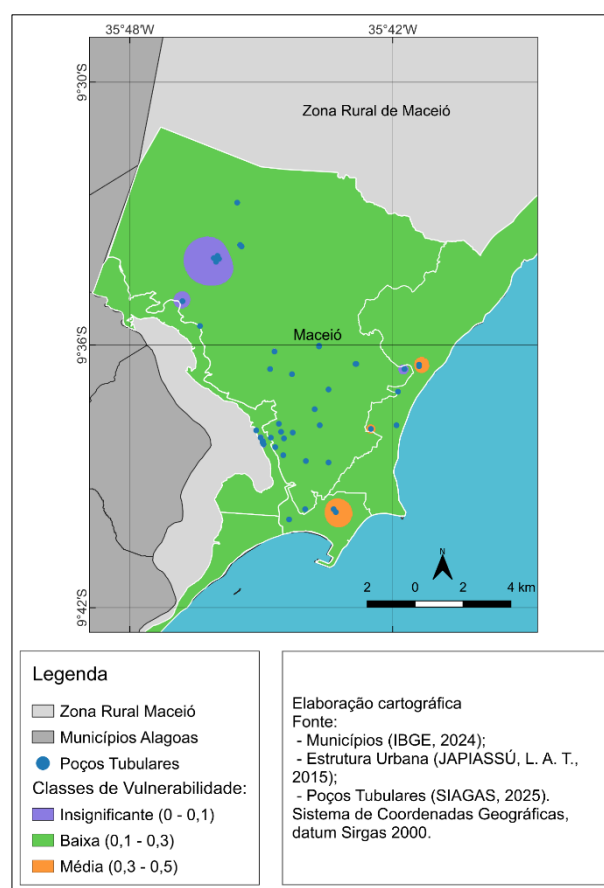


Figura 8 - Vulnerabilidade das águas subterrâneas de Maceió (AL) à contaminação. **Fonte:** Elaborado pelos autores, 2026.

A partir da análise do mapa, observa-se a distribuição espacial dos poços tubulares na Região Metropolitana de Maceió, assim como a espacialização dos resultados referentes às classes de vulnerabilidade obtidas pelo método GOD. Verifica-se, entre os poços com dados aptos à aplicação da metodologia GOD, uma tendência de concentração majoritariamente nas regiões sul, sudeste e sudoeste do município, áreas caracterizadas por maior urbanização e proximidade com o litoral.

Complementarmente, verifica-se que a classe de vulnerabilidade baixa abrange quase todo o território do município. As classes menos representativas correspondem à vulnerabilidade média, que se concentra principalmente na região sul, com ocorrências pontuais no sudoeste, e à vulnerabilidade insignificante, identificada de forma isolada nas regiões sul e sudoeste.

4. CONCLUSÃO

A aplicação do método GOD possibilitou avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação no município de Maceió, proporcionando um panorama inicial das condições de suscetibilidade das águas subterrâneas. Os resultados indicaram predominância de baixa vulnerabilidade, com 88,7% dos poços classificados nas categorias insignificante (18,2%) e baixa (70,5%). Esse comportamento está associado, principalmente, à presença de

material argiloso na zona não saturada, às maiores profundidades do nível estático e à ocorrência de aquíferos predominantemente semiconfinados.

A vulnerabilidade média foi identificada em 11,3% dos poços, estando associada, principalmente, à ocorrência de aquíferos livres e a menores profundidades do nível estático, que variaram entre 3,77 e 23 m. Embora a zona não saturada apresente predominância de material argiloso, a combinação desses fatores contribuiu para a obtenção de valores mais elevados do índice GOD.

A espacialização dos resultados evidenciou a predominância da classe de vulnerabilidade baixa no município, enquanto as classes insignificante e média apresentaram distribuição pontual. Esse padrão deve ser interpretado considerando a distribuição espacial dos poços utilizados na análise: dos 1.173 poços registrados no SIAGAS, apenas 44 possuíam as informações necessárias à aplicação do método, concentrando-se principalmente nas porções sul e sudoeste do município. Essa concentração e a distribuição irregular dos pontos amostrais podem influenciar a superfície obtida por interpolação pelo método IDW, de modo que a configuração espacial das classes de vulnerabilidade pode refletir tanto condições hidrogeológicas locais quanto a influência da distribuição dos pontos amostrais sobre a interpolação.

Destaca-se, também, a adoção de um valor constante para o parâmetro O, o que concentrou a variabilidade espacial do índice GOD nos parâmetros G e D. Ressalta-se, ainda, que os valores de profundidade do nível estático, provenientes de dados secundários do SIAGAS, não possuem controle quanto ao período sazonal de medição, não sendo possível descartar sua influência sobre os resultados.

Diante desse cenário, os resultados reforçam a importância do monitoramento contínuo das águas subterrâneas, do controle de atividades potencialmente poluidoras e do fortalecimento de estratégias de gestão e proteção dos recursos hídricos subterrâneos, especialmente nas áreas que apresentaram maior suscetibilidade à contaminação.

REFERÊNCIAS

- ANA. **Projeto Aquíferos da Região Metropolitana de Maceió**: estudos hidrogeológicos para subsidiar a gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos na região metropolitana de Maceió. Brasília, DF: ANA, 2011. Disponível em: <https://metadados.snirh.gov.br/geonetwork/srv/api/records/d446ae03-2998-483b-9e48-77f7713b7b84>.
- ALADEBOYEJE, A. I.; ADENOYE, T. T.; AGBASI, O. E. Assessment of groundwater vulnerability using GOD index and Dar Zarrouk parameters: a case study of OAUSTECH main campus, Okitipupa, Ondo State. **Results in Earth Sciences**, [s. l.], v. 2, p. 100036, 2024. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.rines.2024.10003>
- ALAGOAS. Secretaria de Estado do Planejamento, Gestão e Patrimônio (SEPLAG); Superintendência de Produção da Informação e Cenários (SINC). **Perfil Municipal de Maceió 2025**. 6. ed. Maceió: SEPLAG, 2025. Disponível em: <https://dados.al.gov.br/catalogo/dataset/d16255c1-39f6-42aa-92c8-eca419432ebf/resource/55c97105-aa0a-4725-a620-d3720bcac303/download/maceio.pdf>.
- ALLER, L.; BENNETT, T.; LEHR, J. H.; PETTY, R. J.; HACKETT, G. **DRASTIC**: a standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic setting. USEPA Report 600/02-87/035. Ada: United States Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, 1987.
- ANDRADE, R.; NASCIMENTO, P. Estimativa da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (SE). **Revista Internacional de Ciências**, Rio de Janeiro, v. 15, p. 77–96, 2025. DOI: <https://doi.org/10.12957/ric.2025.81210>.
- ASLAM, R. A.; SHRESTHA, S.; PANDEY, V. P. Groundwater vulnerability to climate change: a review of the assessment methodology. **Science of The Total Environment**, [s. l.], v. 612, p. 853–875, 2018. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.08.237>
- BERTRAND, G.; HIRATA, R.; PAUWELS, H.; CARY, L.; PETELET-GIRAUD, E.; CHATTON, E.; AQUILINA, L.; LABASQUE, T.; MARTINS, V. T. S.; MONTENEGRO, S.; BATISTA, J. C.; AUROUET, A.; PENOFF, J. G. S. M.; BERTOLO, R. A.; PICOT, G.; FRANZEN, M.; HOCHREUTENER, R.; BRAIBANT, G. Groundwater contamination in coastal urban areas: anthropogenic pressure and natural attenuation processes. Example of Recife (PE State, NE Brazil). **Journal of Contaminant Hydrology**, [s. l.], v. 192, p. 165–180, 2016. <http://doi.org/10.1016/j.jconhyd.2016.07.008>
- CPRM — Serviço Geológico do Brasil. **Mapa hidrogeológico do Estado de Alagoas**. Recife: CPRM, 2014.

- FOCAZIO, M. J.; REILLY, T. E.; RUPERT, M. G.; HELSEL, D. **Assessing ground-water vulnerability to contamination**: providing scientifically defensible information for decision makers. [S. l.]: U.S. Geological Survey, 2002.
- FOSTER, S. Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. In: VAN DUIJVENBOODEN, W.; VAN WAEGENINGH, H. G. (ed.). **Vulnerability of soil and groundwater to pollutants**. The Hague: TNO Committee on Hydrological Research, 1987. p. 69–86.
- FOSTER, S.; CHILTON, J.; NIJSTEN, G.; RICHTS, A. Groundwater — a global focus on the 'local resource'. **Current Opinion in Environmental Sustainability**, [s. l.], v. 5, n. 6, p. 685–695, 2013. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.cosust.2013.10.010>
- FOSTER, S.; HIRATA, R. C. A. **Groundwater pollution risk assessment**: a methodology using available data. Lima: Pan American Center for Sanitary Engineering and Environmental Sciences (CEPIS), 1988.
- FOSTER, S.; HIRATA, R.; GOMES, D.; D'ELIA, M.; PARIS, M. **Proteção da qualidade da água subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. São Paulo: Servmar, 2006.
- FREEZE, A. R.; CHERRY, J. A. **Águas subterrâneas**. Tradução de Everton de Oliveira *et al.*; coordenação de Everton de Oliveira. São Paulo: Everton de Oliveira, 2017.
- HIRATA, R.; SUHOGUSOFF, A. V.; MARCELLINI, S. S.; VILLAR, P. C.; MARCELLINI, L. **A revolução silenciosa das águas subterrâneas no Brasil**: uma análise da importância do recurso e os riscos pela falta de saneamento. São Paulo: Instituto Trata Brasil, 2019. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/directbitstream/e7d9e125-7b22-4706-915b-a397f8a91784/2928658.pdf>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Malhas territoriais**: 2024. Rio de Janeiro: IBGE, 2024. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/geociencias/organizacao-do-territorio/malhas-territoriais/15774-malhas.html>.
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Maceió (AL)**: Cidades e estados. Rio de Janeiro: IBGE, 2025. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/al/maceio.html>.
- JAPIASSÚ, L. A. T. **Expansão urbana de Maceió, Alagoas**: caracterização do processo de crescimento territorial urbano em face do plano de desenvolvimento - de 1980 a 2000. 2015. Dissertação (Mestrado em Dinâmicas do Espaço Habitado) – Universidade Federal de Alagoas, Maceió, 2015.
- JESÚS, T. S.; VEDANA, L. A.; GONÇALVES, R. D.; GUERRA, F. C. Vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas em aquífero fraturado, Itabaiana (SE): aplicação do método GOD. **Geociências**, São Paulo, v. 42, n. 4, p. 537–550, 2023. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v42i4.17758>
- KADDOUR, K.; EL HACEN, B.; HLIMA, D.; YASMINA, D. Groundwater vulnerability assessment using GOD method in Boulimat coastal District of Bejaia area North east Algeria. **Journal of Biodiversity and Environmental Sciences**, [Tuguegarao City], v. 13, n. 3, p. 109–116, 2018.
- KIRLAS, M. C.; KARPOUZOS, D. K.; GEORGIOU, P. E.; KATSIFARAKIS, K. L. A comparative study of groundwater vulnerability methods in a porous aquifer in Greece. **Applied Water Science**, [s. l.], v. 12, n. 6, p. 123, 15 jun. 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-022-01651-1>
- LIMA, R. B.; FERREIRA NETO, J. V. Qualidade das águas subterrâneas na bacia endorreica do Tabuleiro dos Martins, Maceió-AL. **Revista de Geografia**, Recife, v. 37, n. 3, p. 277–298, 2020. DOI: <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.246647>
- MACEIÓ. Lei nº 4.952, de 6 de janeiro de 2000. Altera a Lei nº 4.687/98, que dispõe sobre o perímetro urbano de Maceió, a divisão do Município em regiões administrativas e incluiu o abairramento da zona urbana, e dá outras providências. **Diário Oficial do Município**, Maceió, AL, 6 jan. 2000.
- NATISHAH, A. J.; SAMUEL, M. S.; VELMURUGAN, K.; SHOWPARNICKAA, S. R.; INDUMATHI, S. M.; KUMAR, M. Contamination of groundwater by microorganisms and risk management: conceptual model, existing data, and challenges. **Groundwater for Sustainable Development**, [s. l.], v. 29, p. 101408, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.gsd.2025.101408>
- PATEL, P.; MEHTA, D.; SHARMA, N. Assessment of groundwater vulnerability using the GIS approach-based GOD method in Surat district of Gujarat state, India. **Water Practice and Technology**, [s. l.], v. 18, n. 2, p. 285–294, 1 fev. 2023. DOI: <https://doi.org/10.2166/wpt.2023.004>
- PURNAMA, I. L. S.; PRIMACINTYA, V. A. Groundwater vulnerability assessment to pollution in Kasihan, Bantul Regency: a comparative method study (GOD, SINTACS and DRASTIC). **E3S Web of Conferences**, [s. l.], v. 200, p. 02012, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202020002012>

SEKAR, S.; KAMARAJ, J.; POOVALINGAM, S.; DURAISAMY, R.; SENAPATHI, V.; SANG YONG, C. Appraisal of groundwater vulnerability pollution mapping using GIS based GOD index in Tiruchendur, Thoothukudi District, India. **Water**, [s. l.], v. 15, n. 3, p. 520, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/w15030520>

SUKMAWATI RUKMANA, B. T.; BARGAWA, W. S.; CAHYADI, T. A. Assessment of groundwater vulnerability using GOD method. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, [s. l.], v. 477, p. 012020, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/477/1/012020>.

TAAZZOUZTE, M.; GHAFIRI, A.; LEMACHA, H.; MOUTAKI, S. Study of intrinsic vulnerability to pollution by the GOD-Foster method: application to Temara groundwater (Morocco). **Journal of Geoscience and Environment Protection**, [s. l.], v. 8, n. 8, p. 129–142, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4236/gep.2020.88010>

VAN STEMPOORT, D.; EWERT, L.; WASSENAAR, L. **AVI**: a method for groundwater protection mapping in the prairie provinces of Canada. Pilot Project, set. 1991 – mar. 1992. Groundwater and Contaminants Project. Environmental Sciences Division: National Hydrology Research Institute, 1992.

ZHANG, X.; WU, X.; MU, W. Unveiling the escalating impact of human activities on groundwater storage in ecologically fragile steppe, Northern China. **Journal of Hydrology**, [s. l.], v. 659, p. 133296, 2025. DOI: <http://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133296>.