
VULNERABILIDADE NATURAL À CONTAMINAÇÃO DOS AQUÍFEROS NA CIDADE DE TERESINA – PIAUÍ

Marco Aurélio da Silva **LIRA FILHO**
Centro de Geotecnologia Fundiária e Ambiental do Piauí
E-mail: marcolira.cgeo@gmail.com
Orcid: 0000-0001-5774-6469

Mauro César de Brito **SOUSA**
Instituto Federal do Piauí
E-mail: mauro.sousa@ifpi.edu.br
Orcid: 0000-0002-0650-6577

Recebido
Agosto/2025

Aceito
Junho/2026

Publicado
Junho/2026

Resumo: Esta pesquisa realizou um mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos na cidade de Teresina, Piauí, utilizando o método GOD, desenvolvido por Foster e Hirata (1993). Nesse contexto, elaborou-se um banco de dados geográfico com informações hidrogeológicas de 80 poços, incluindo dados sobre o confinamento dos aquíferos, estratos geológicos, características litológicas e o nível da água subterrânea em relação à superfície. Os resultados revelam que a maior parte do território de Teresina está classificada como de baixa vulnerabilidade, com a região central da cidade caracterizada por vulnerabilidade média. Assim, esta pesquisa fornece subsídios para um ordenamento territorial mais eficaz e uma gestão ambiental mais assertiva, voltados à prevenção de potenciais riscos de contaminação do aquífero.

Palavras-chave: aquíferos; vulnerabilidade; GOD.

NATURAL VULNERABILITY TO AQUIFER CONTAMINATION IN THE CITY OF TERESINA – PIAUÍ

Abstract: This research mapped the natural vulnerability to aquifer contamination in the city of Teresina, Piauí, using the GOD method developed by Foster and Hirata (1993). In this context, a geographic database was created from hydrogeological information from 80 wells, including data on aquifer confinement, geological strata, lithological characteristics, and groundwater levels relative to the surface. The results reveal that most of Teresina's territory is classified as having low vulnerability, while the city's central region is characterized by medium vulnerability. Thus, this study provides support for more effective territorial planning and more assertive environmental management, aimed at preventing potential risks of aquifer contamination.

Keywords: aquifers; vulnerability; GOD.

VULNERABILIDAD NATURAL A LA CONTAMINACIÓN DE ACUÍFEROS EN LA CIUDAD DE TERESINA – PIAUÍ

Resumen: Esta investigación realizó un levantamiento cartográfico de vulnerabilidad natural a la contaminación de acuíferos en la ciudad de Teresina, Piauí, utilizando el método GOD, desarrollado por Foster y Hirata (1993). En ese contexto, se elaboró un banco de datos geográfico con informaciones hidrogeológicas en 80 pozos, incluyendo datos sobre el confinamiento de acuíferos, estratos geológicos, características litológicas y el nivel de agua subterránea con relación a la superficie. Los resultados muestran que la mayor parte del territorio de Teresina está clasificada como de baja vulnerabilidad, con la región central de la ciudad caracterizada por vulnerabilidad media. Así, esta investigación ofrece subsidios para un ordenamiento territorial más eficaz y una gestión ambiental más asertiva, relacionadas a la prevención de potenciales riesgos de contaminación en el acuífero.

Palabras clave: acuíferos; vulnerabilidad; GOD.

INTRODUÇÃO

A água é fundamental para a manutenção da vida, pois contribui para o consumo humano, a dessedentação de animais, facilita atividades cotidianas, concorre para a produção de energia limpa e serve de base para a produção de alimentos. Em resumo, não existe civilização humana sem a água. De acordo com Gomes (2021) e Pereira (2022), os mananciais de águas subterrâneas são adotados como fonte de abastecimento exclusivo em países com menor disponibilidade hídrica superficial, como Arábia Saudita e Malta. Em contrapartida, esses mananciais são utilizados em sistemas de abastecimento híbridos, que também se servem de mananciais superficiais, como é o caso da Alemanha e da França.

Para a realidade brasileira, embora o uso dos mananciais superficiais para abastecimento seja preponderante, os mananciais subterrâneos são utilizados, exclusiva ou majoritariamente, por, aproximadamente, 15% da população urbana (ANA, 2021). Esse cenário é ainda mais evidente no Piauí, em que o potencial hídrico subterrâneo é bastante explorado no estado. Das sedes municipais,

174 são abastecidas exclusivamente por recursos hídricos subterrâneos e 13, incluindo Teresina, fazem uso misto de águas superficiais e subterrâneas para o abastecimento humano (ANA, 2021). A consequência direta da exploração excessiva da água subterrânea sem a devida regulação e proteção se dá pelo aumento dos riscos de escassez e pelo incremento da vulnerabilidade do manancial a aspectos relacionados à sua qualidade natural.

A vulnerabilidade à contaminação pode ser definida como um conjunto de propriedades correlacionadas às condições pedológicas e hidráulicas do manancial subterrâneo. Esses atributos controlam a sua resiliência aos contaminantes presentes na subsuperfície e à sua capacidade de restauração (Ribeiro *et al.*, 2011). Como metodologia possível para se avaliar a vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação, o método GOD desponta como uma técnica popular na América Latina, devido à sua simplicidade de conceitos e de implementação. Essa simplicidade se baseia no fato de que o método necessita de poucos dados provenientes de estudos hidrogeológicos (Melo *et al.*, 2022).

Desenvolvido por Foster e Hirata (1993), o método GOD leva em consideração o grau de confinamento das águas subterrâneas, a ocorrência de estratos geológicos e a distância do nível da água subterrânea. Para cada uma dessas variáveis, são atribuídas constantes, variando entre 0 e 1, sendo que o produto entre elas resulta no índice de vulnerabilidade do aquífero frente ao comportamento de um agente contaminante.

A vulnerabilidade natural, obtida a partir da aplicação do método GOD, constitui uma informação passível de ser espacializada. Nesse contexto, as técnicas de geoprocessamento assumem relevância, na medida em que possibilitam a elaboração de representações cartográficas pertinentes ao entendimento da distribuição espacial da vulnerabilidade.

Na seara de pesquisas brasileiras, ainda de forma pontual e localizada, alguns estudos têm avaliado a vulnerabilidade natural de aquíferos à contaminação utilizando o método GOD. Na Região Metropolitana de Aracaju (SE), por exemplo, o método foi utilizado para mapear a vulnerabilidade do aquífero associada à expansão urbana e ao impacto das pressões antrópicas, tendo como objetivo o planejamento ambiental e a gestão do uso do solo (Andrade; Nascimento, 2025).

Na região Norte do país, destaca-se a pesquisa desenvolvida em Belém, no distrito de Icoaraci, em que a aplicação do método GOD em áreas de expansão urbana assentadas sobre aquíferos porosos rasos evidenciou a relação entre crescimento urbano, saneamento e

suscetibilidade à contaminação das águas subterrâneas (Barros; Lima, 2023). Ademais, na perspectiva internacional, estudos indicam que a avaliação da vulnerabilidade de aquíferos tem sido empregada de forma consolidada no meio científico, utilizando, por exemplo, o método GOD em contextos com limitações de dados disponíveis (Goyal *et al.*, 2021).

Apesar da consolidação desses estudos em escala nacional e internacional, nota-se a ausência de uma política sistemática de avaliação da vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação na maioria das cidades brasileiras. Em recortes urbanos como o de Teresina, essa lacuna se reflete em uma atuação limitada da gestão pública frente aos impactos da urbanização sobre os aquíferos, resultando em um conhecimento disperso, fragmentado e pouco atualizado sobre a vulnerabilidade local.

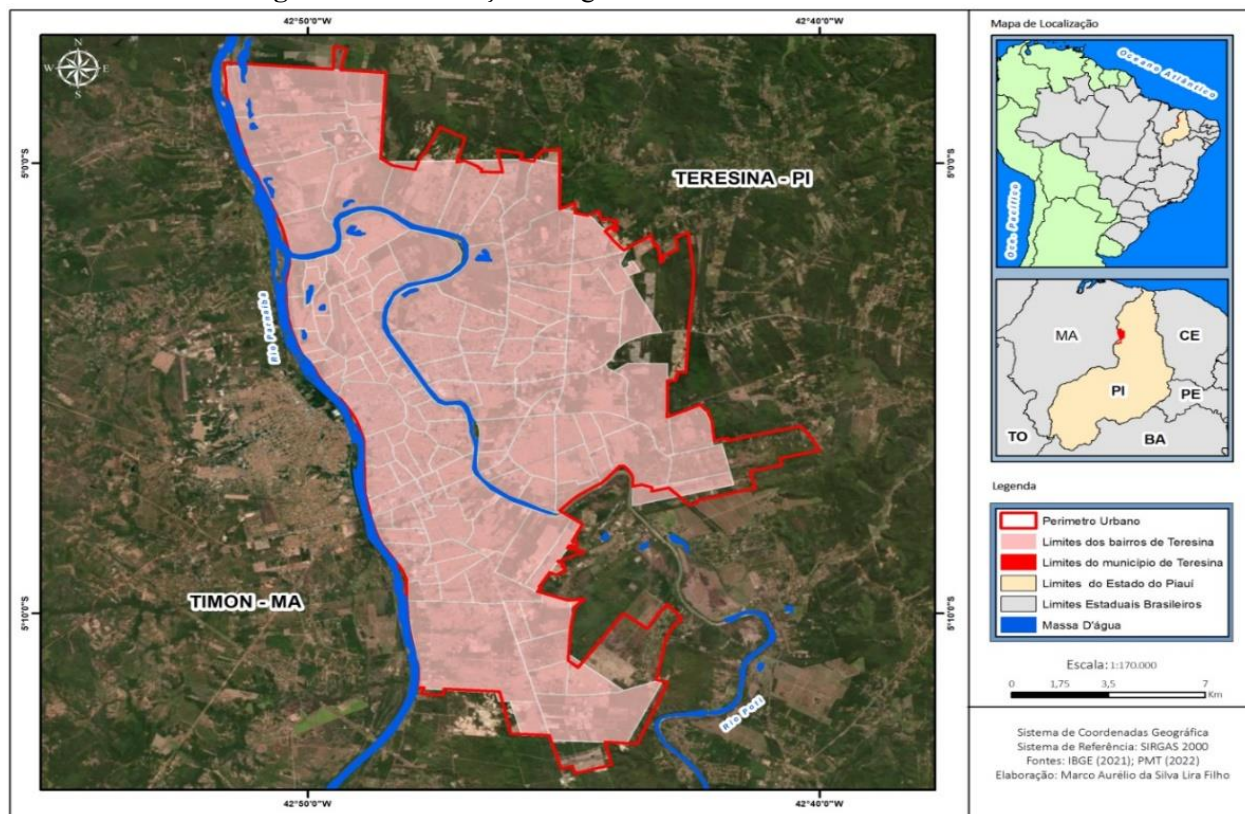
Destarte, a aplicação do método GOD, associado à análise espacial em ambiente SIG, permite identificar padrões de vulnerabilidade dos aquíferos urbanos da cidade, contribuindo para o planejamento territorial, a gestão ambiental e o ordenamento do uso do solo, em adequado alinhamento com estudos recentes. Nessa perspectiva, esta pesquisa desenvolveu um mapeamento da vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos na cidade de Teresina-PI, utilizando o método GOD, com o apoio de técnicas de análise espacial em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), tendo como base informações hidrogeológicas de poços cadastrados na área urbana do município.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo

Segundo dados do IBGE (2022), Teresina, situada na mesorregião centro-norte do Piauí e foco deste artigo, conforme mostrado na Figura 1, abriga uma população estimada em 871.126 habitantes. No que se refere à hidrografia, a cidade é drenada pelo Rio Parnaíba ao longo da sua extensão norte-sul, com um percurso de, aproximadamente, 26,31 km, criando o limite oeste com o município de Timon – MA. Na sua rede hidrográfica interna, o Rio Poti também se destaca, ao percorrer cerca de 24,48 km na área urbana.

Figura 1 – Localização Geográfica da Cidade de Teresina – Piauí

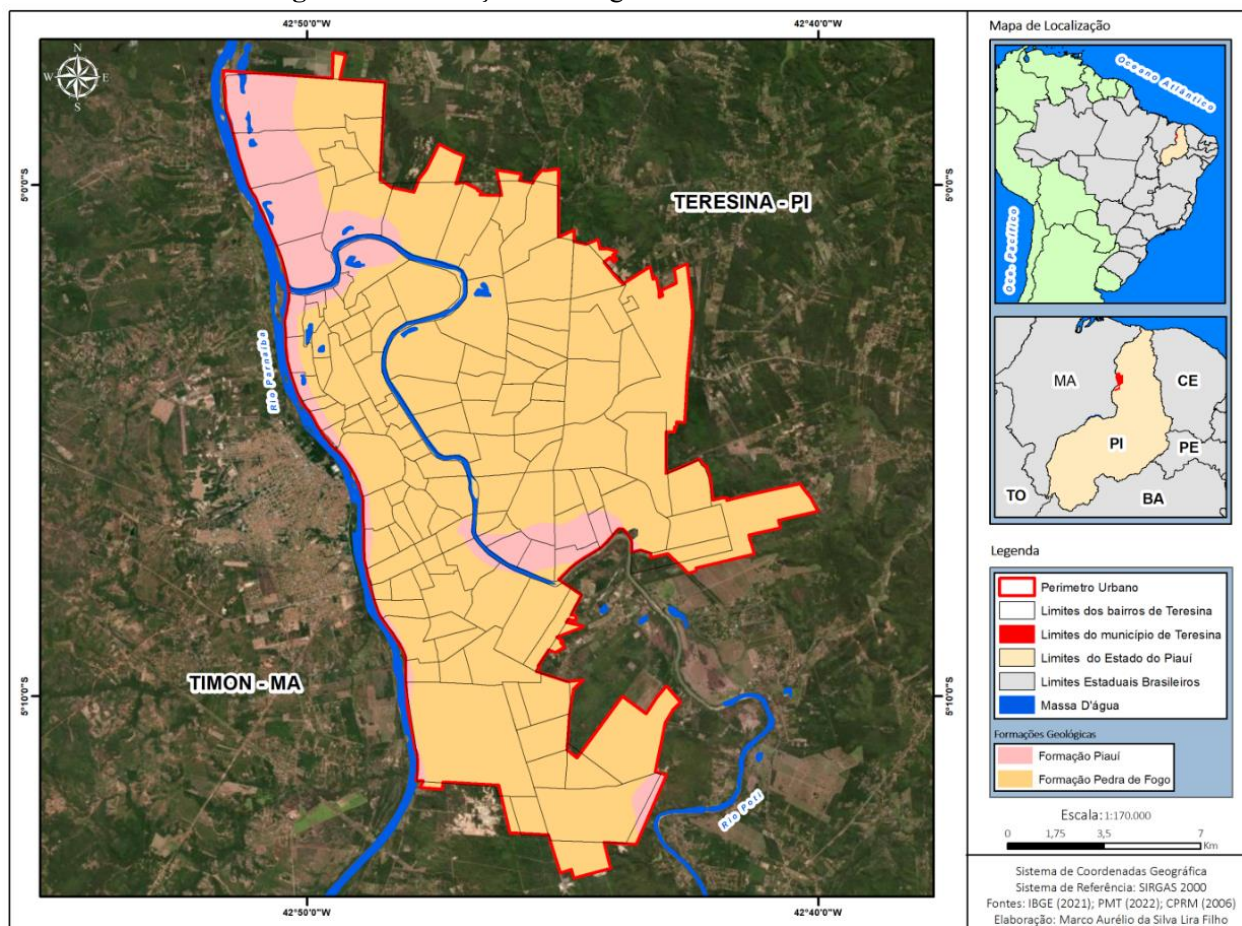


Fonte: IBGE (2021); PMT (2022). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Em relação às condições climáticas, a região de Teresina apresenta temperaturas médias com mínimas em torno de 20°C e máximas em torno de 34°C, caracterizando-se por um clima quente tropical. A precipitação pluviométrica média anual varia de 800 a 1200 mm, influenciada pelo regime da massa Equatorial Continental, com um período seco de 5 a 6 meses. Os meses de janeiro, fevereiro e março são os mais úmidos do ano (Andrade Júnior, 2004).

Segundo Aguiar (2004), Teresina, na sua porção urbana, tem nas formações sedimentares fanerozóicas Pedra de Fogo e Piauí o seu lastro hidrogeológico (Figura 2). No que concerne à formação Pedra de fogo, observa-se a predominância de camadas argilosas e leitos de sílex, o que confere potencial limitado para o desenvolvimento de aquíferos de maior extensão. Em contraste, a Formação Piauí é marcada por predominância de arenitos cinza-claros e amarelados, de granulação fina a muito fina, que afloram na superfície do solo com aspecto lajeado. Os estratos dessa formação apresentam variação de permeabilidade, uma condição que favorece a criação de aquíferos, segundo Aguiar (2004).

Figura 2 – Formações Geológicas da Cidade de Teresina – PI



Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Apesar das limitações de algumas regiões para a formação de aquíferos, o sistema Poti – Piauí registra uma demanda crescente por novas fontes de captação. O município de Teresina, com mais de 2.300 registros de poços junto ao SIAGAS, lidera as solicitações de novas outorgas, voltadas para uso agroindustrial e consumo humano (SIAGAS, 2022; SEMAR, 2022).

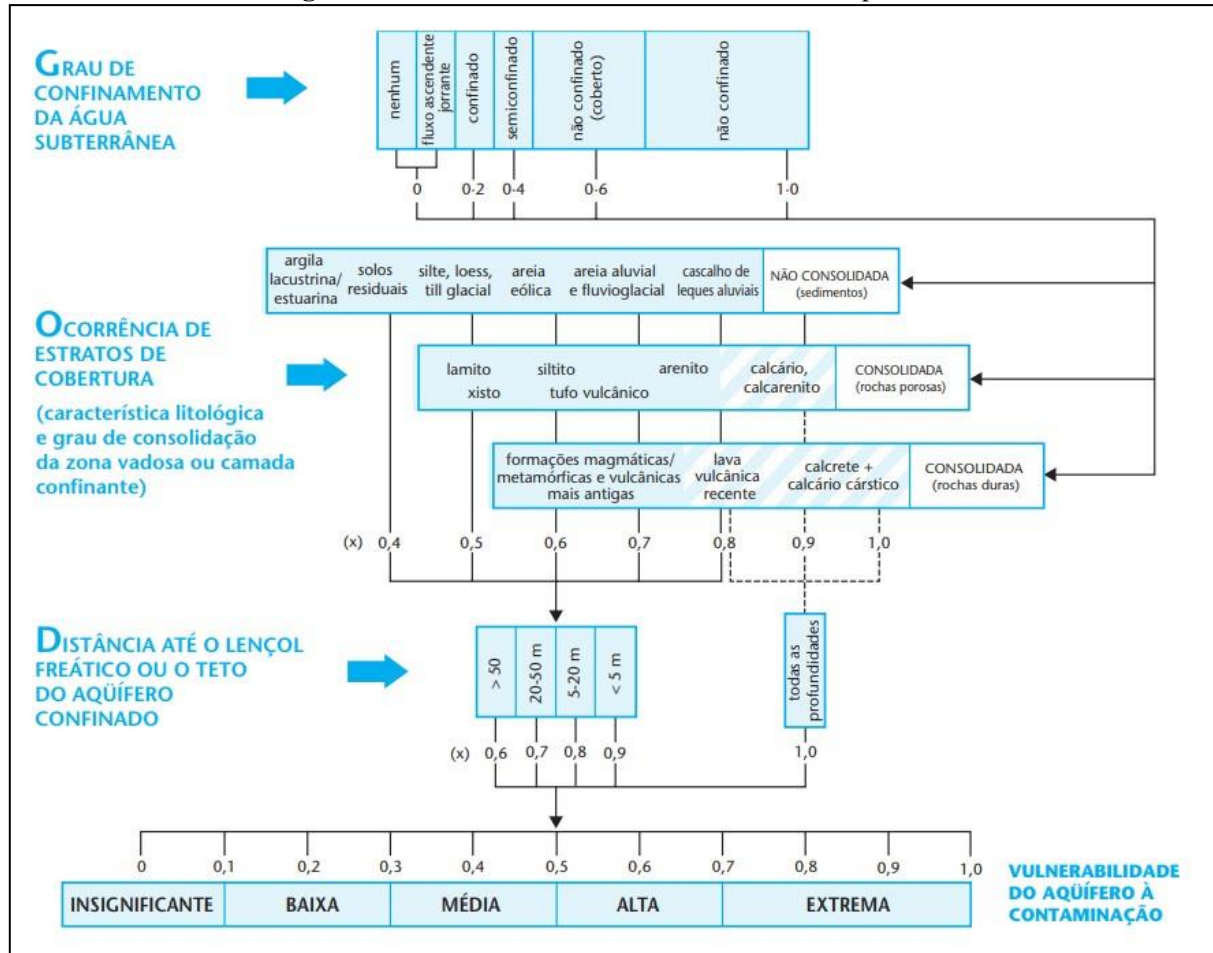
Procedimentos Metodológicos

Este estudo utiliza uma metodologia que integra técnicas quantitativas e qualitativas, com o objetivo de avaliar a vulnerabilidade à contaminação de aquíferos em Teresina, seguindo as diretrizes estabelecidas pelo método GOD, desenvolvido por Foster e Hirata (1993).

O método GOD é fundamentado na avaliação conjunta de parâmetros hidrogeológicos relacionados ao confinamento da água subterrânea (variável G), às características dos estratos

geológicos de cobertura do aquífero (variável O) e à distância até o nível da água subterrânea (variável D). A valoração desses parâmetros segue os critérios dispostos na Figura 3.

Figura 3 – Método GOD de vulnerabilidade de aquíferos



Fonte: Foster *et al.* (2006).

. O produto desses valores tabulados resulta em um índice numérico de vulnerabilidade, com interpretação baseada em classes definidas em função do comportamento potencial de agentes contaminantes, indicadas no Quadro 1.

Para a aplicação do método GOD na área de estudo deste trabalho, a primeira etapa envolve a estruturação de um banco de dados geográfico, contendo arquivos geoespaciais vetoriais com geometria do tipo ponto. Esses dados são baseados em informações do perfil hidrogeológico de poços de captação hídrica, cadastrados no Sistema de Informações de Águas Subterrâneas (SIAGAS), especificamente para a cidade de Teresina.

Quadro 1 – Definição prática das classes de vulnerabilidade em um aquífero

CLASSES	DEFINIÇÃO CORRESPONDENTE	ÍNDICE DE VULNERABILIDADE
Insignificante	Presença de camadas confinantes sem fluxo vertical significativo (Percolação e Infiltração)	0 a 0,1
Baixa	Vulnerável a contaminantes conservadores em longo prazo, quando contínua e amplamente lançados ou lixiviados	0,1 a 0,3
Média	Vulnerável a alguns contaminantes, mas somente quando continuamente lançados ou lixiviados	0,3 a 0,5
Alta	Vulnerável a muitos contaminantes, exceto os que são fortemente adsorvidos ou rapidamente transformados	0,5 a 0,7
Extrema	Vulnerável à maioria dos contaminantes, com impacto rápido em muitos cenários de contaminação	0,7 a 1,0

Fonte: Adaptado de Foster *et al.* (2006).

A segunda etapa se concentra na organização e no preenchimento de informações cadastrais e hidrogeológicas na tabela de atributos do arquivo shapefile, que representa os poços de captação hídrica. Na sequência, a interpretação dos perfis hidrogeológicos dos poços em análise foi realizada, adotando-se os valores numéricos preconizados pelo método GOD. As regras específicas aplicadas para a determinação dos parâmetros de vulnerabilidade podem ser conferidas a seguir:

- No parâmetro G, correspondente ao tipo de confinamento do aquífero, foi aplicado o valor de 0,2 para poços que estão inseridos em aquíferos confinados e o valor de 0,4 para poços inseridos em aquíferos semiconfinados. Para os aquíferos livres cobertos, aplica-se 0,6 como valor de referência e para os aquíferos livres não cobertos (aquíferos aflorantes ou rasos), aplica-se o valor de 1;
- No parâmetro O, referente ao tipo de litologia da zona vadosa, nas rochas não consolidadas, foram estabelecidos os valores de 0,5 para solos predominantemente argilosos; 0,6 para solos com predominância de siltitos; 0,7 para solos predominantemente arenosos e 0,8 para solos com predominância de cascalhos. Para as rochas consolidadas, foram definidos os valores de 0,8 para rochas de arenitos e 0,6 para rochas cristalinas (formações ígneas densas);
- Para o parâmetro D, referente à variação da distância da superfície do terreno ao nível estático, adotou-se os valores de referência da metodologia GOD, conforme consta na Figura 3.

A terceira etapa consiste na construção de superfícies interpoladas para cada um dos parâmetros da metodologia GOD, por técnicas de geoestatística e álgebra de mapas, em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG). Essa etapa se baseia nos limites dos bairros na cidade de Teresina – PI como referência espacial.

Para a obtenção das superfícies interpoladas, foi utilizado o Inverso do Quadrado da Distância (IDW), que é um modelo de inferência geoestatística e um dos mais adotados para elaborar o mapeamento da vulnerabilidade natural de aquíferos. Esse método pressupõe que os pontos amostrais mais próximos devem ter um maior peso do que os valores mais distantes. Portanto, cada ponto possui uma influência sobre a coordenada a ser interpolada dentro de um recorte espacial e esses valores diminuem, na medida em que a distância aumenta (Amorim *et al.*, 2019).

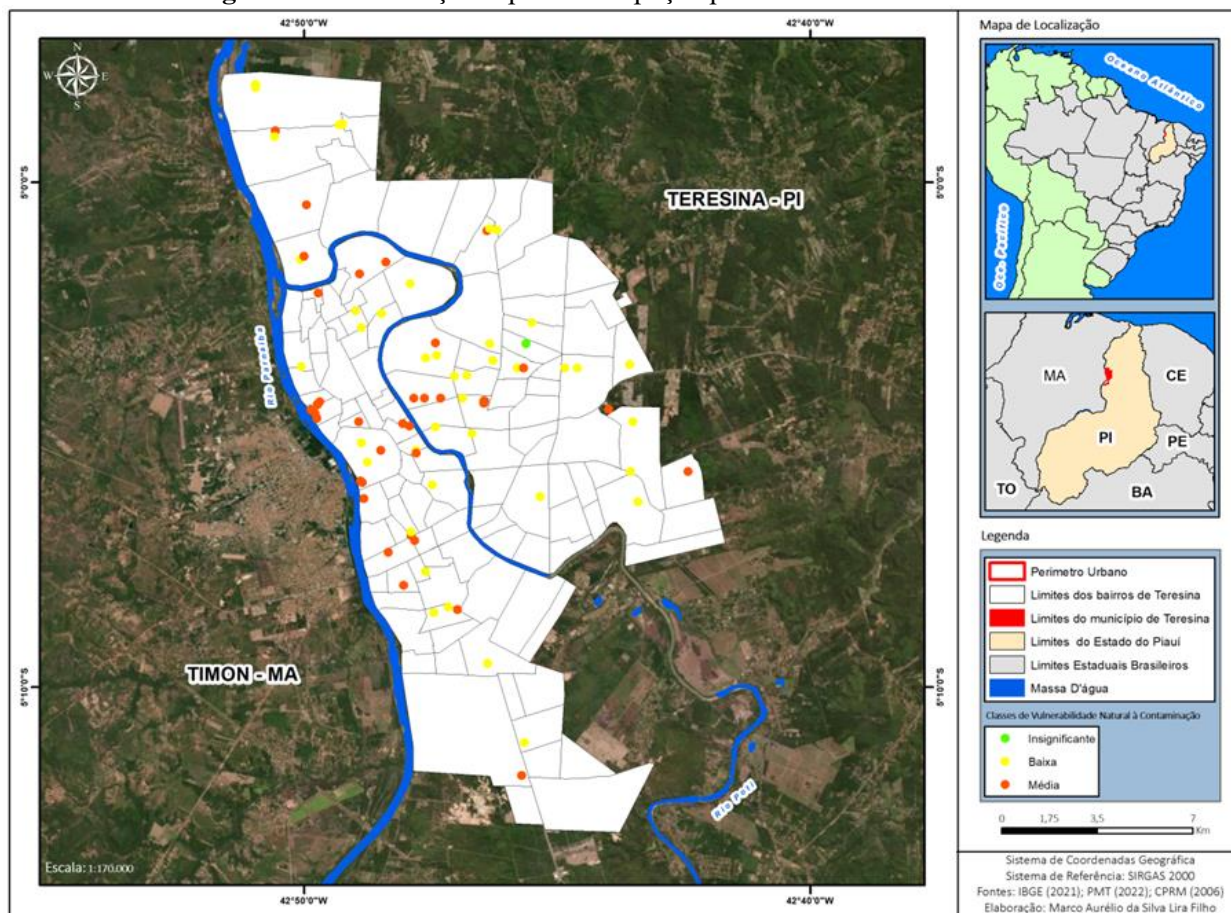
As três superfícies geoestatísticas, em formato raster, foram submetidas à ferramenta Raster Calculator, presente na extensão Spatial Analyst do ArcGis, versão 10.1 (Licenciado ao Centro de Geotecnologias Ambientais e Gestão Florestal do Piauí – CGEO/SEMARH).

O mapeamento final da vulnerabilidade é resultante da técnica de álgebra de mapas, em que o produto das superfícies geoestatísticas constrói uma estrutura raster e os valores de pixel representam o índice de vulnerabilidade ao qual o aquífero pertence.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A partir da verificação dos perfis geológicos de poços cadastrados no SIAGAS, foram obtidos registros de 80 poços de captação hídrica (Figura 4). Nesse universo amostral, a aplicação do método GOD resultou na classificação de 01 poço com vulnerabilidade insignificante, 41 poços com vulnerabilidade baixa e 38 poços com vulnerabilidade média.

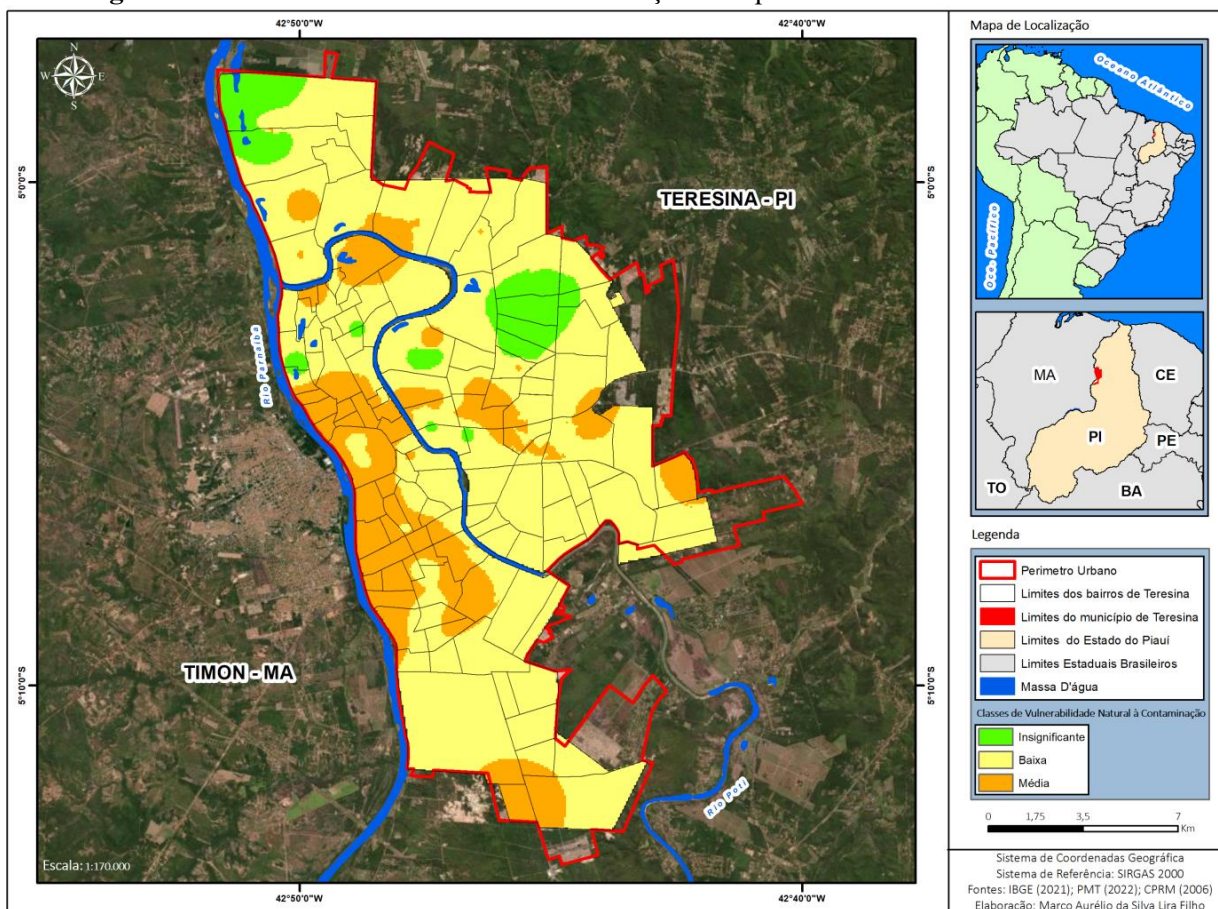
Figura 4 – Distribuição espacial dos poços por classes de vulnerabilidade



Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Não foram encontrados poços com valores de vulnerabilidade nas classes Alta e Extrema. Além disso, ao analisar o mapa final de vulnerabilidade natural à contaminação dos aquíferos na área de estudo (Figura 5), percebe-se o predomínio da classe de baixa vulnerabilidade, abrangendo a maior parte do território da cidade de Teresina, seguida por zonas de vulnerabilidade média.

Figura 5 – Vulnerabilidade Natural à contaminação de aquíferos na cidade de Teresina – PI



Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

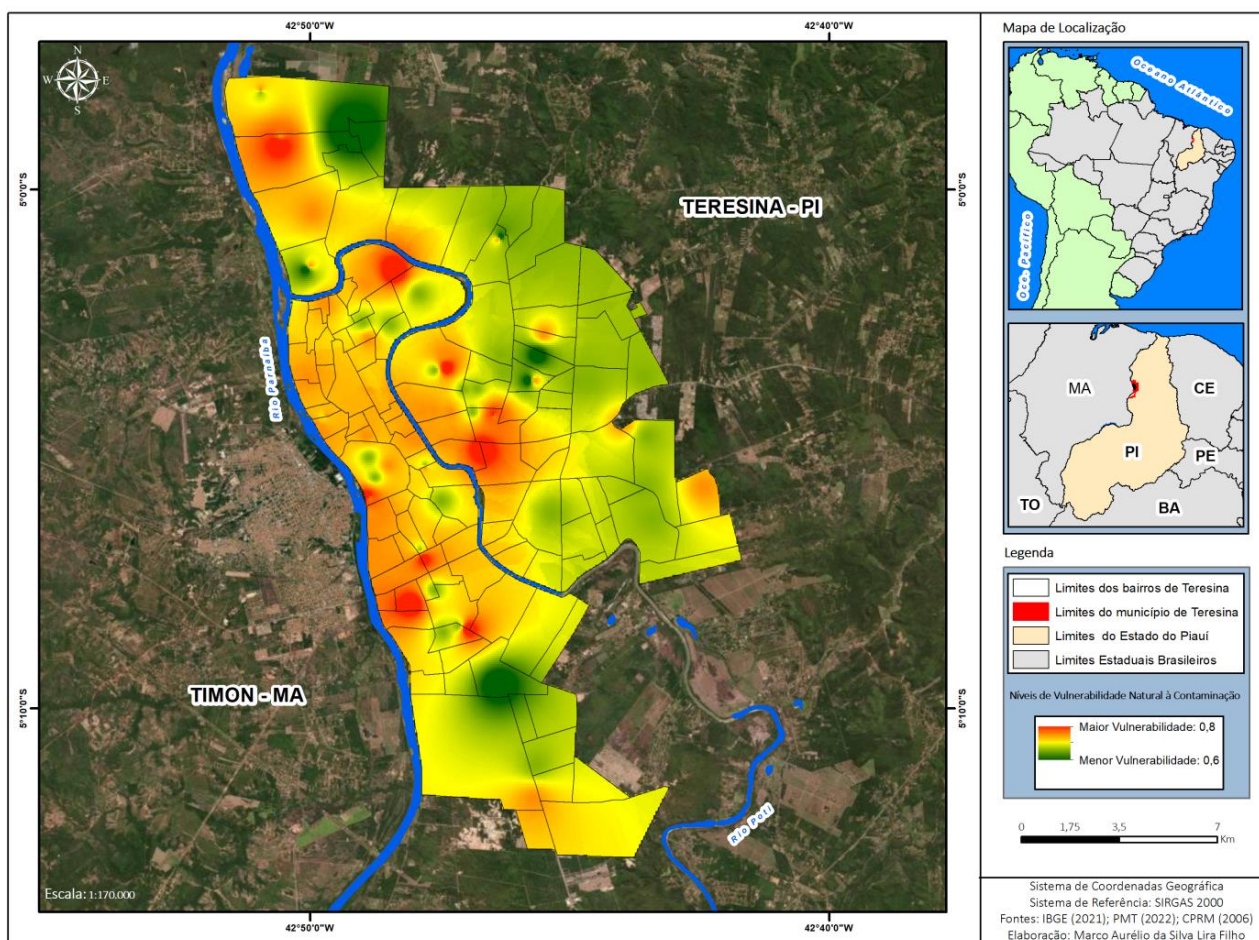
Classe de Média Vulnerabilidade

Conforme a interpretação do mapa de vulnerabilidade natural à contaminação de aquíferos (Figura 5), é possível verificar que, na região central da cidade e em bairros da região sul adjacentes ao centro, há um predomínio de valores mais altos (cor laranja na legenda), indicando uma maior propensão à contaminação.

A hipótese para esse predomínio é que estas áreas apresentam um nível freático mais próximo à superfície, o que eleva o grau de vulnerabilidade. Assim, como demonstrado no mapa da Figura 6, referente ao parâmetro D (Distância do nível freático até a superfície), valores menores desse parâmetro contribuem para a elevação do risco.

O nível médio, segundo o método GOD, sugere, portanto, que o aquífero é moderadamente suscetível a contaminantes móveis e persistentes, incluindo hidrocarbonetos halogenados, certos metais pesados e sais de solubilidade reduzida. Dessa forma, adaptar as atividades humanas nessa localidade à capacidade do ambiente de mitigar esses poluentes, significa colaborar com as propriedades do solo para garantir uma ocupação que seja ambientalmente sustentável (Hirata, 1994).

Figura 6 – Distribuição espacial por bairro do Parâmetro de vulnerabilidade D



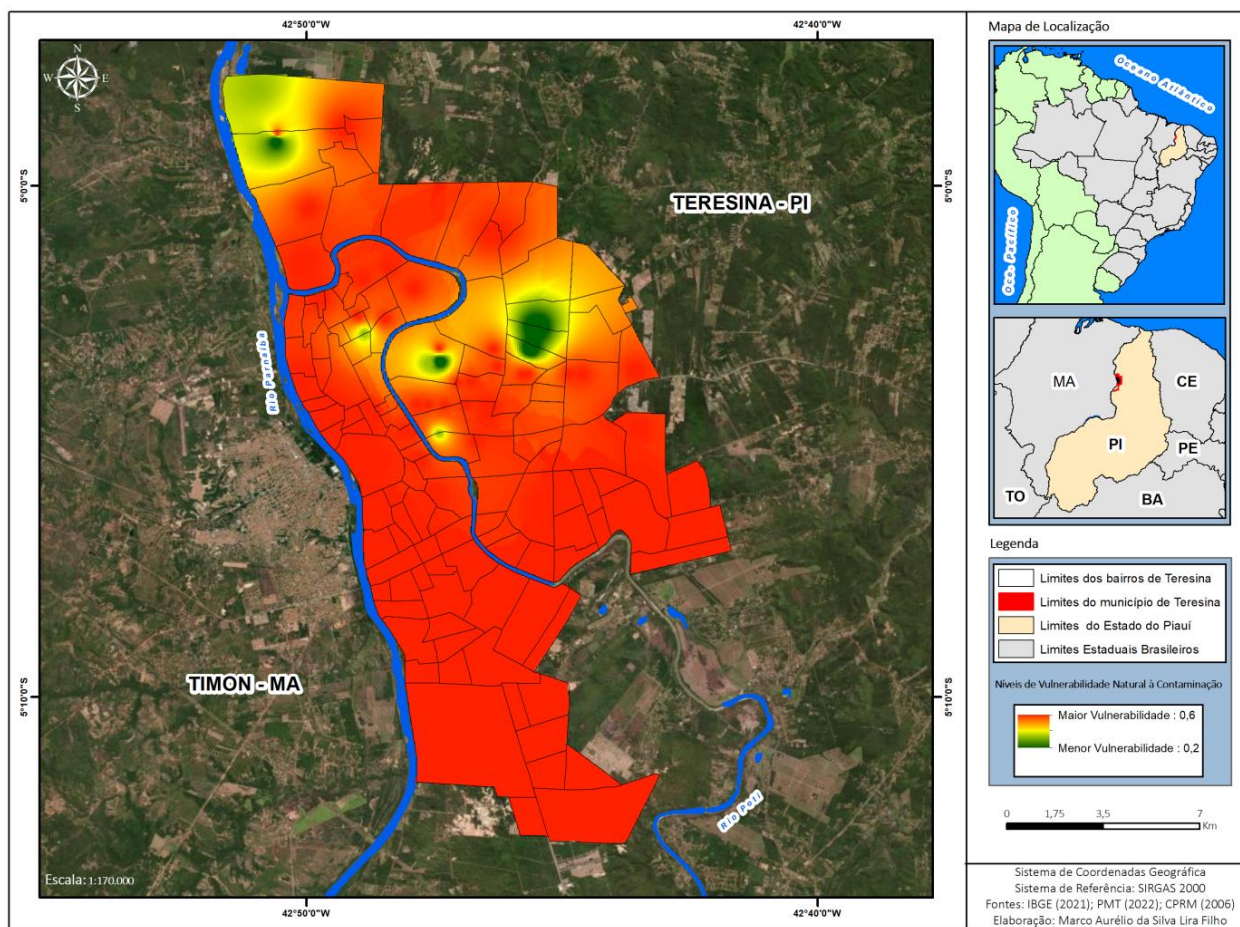
Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Classe de Vulnerabilidades Baixa e Insignificante

O extremo norte da cidade, com vulnerabilidade insignificante, de acordo com a análise do mapa de vulnerabilidade indicado na Figura 5, também se apresenta como área de destaque para a análise do risco de contaminação.

Os baixos valores encontrados nessa região podem ser, por hipótese, e conforme consta na Figura 7, consequência das características de aquíferos semiconfinado ou confinado (Parâmetro G) presentes naquela área, o que pode diminuir o grau de vulnerabilidade aos contaminantes.

Figura 7 – Distribuição espacial por bairro do Parâmetro de vulnerabilidade G



Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Na região leste, nos bairros Morros, Porto do Centro, Satélite e Samapi, também é representada uma área com vulnerabilidade de classe insignificante (vide Figura 5). Para essa zona da cidade, a hipótese é que os valores encontrados estão associados a espaços nos quais o nível freático está mais distante da superfície (Parâmetro D), diminuindo o índice de suscetibilidade à contaminação.

Adicionalmente, de maneira geral, a vulnerabilidade é insignificante em regiões do aquífero com características de semiconfinamento ou confinamento (Parâmetro G), devido ao seu

comportamento hidrológico característico, capaz de impedir a progressão de contaminantes oriundos das camadas de cobertura, para camadas saturadas da matriz de solo.

Em condições de baixa vulnerabilidade, segundo o método GOD, e considerando que a distância até o lençol freático é alta e o solo indica baixas condições de permeabilidade, estima-se que a capacidade de atenuação do aquífero à contaminação seja considerável. Esse cenário, conforme observado por Hirata (1994) e Sousa (2015), não traz maiores riscos à qualidade natural das águas subterrâneas.

Implicações, limitações e potencialidades dos resultados apresentados

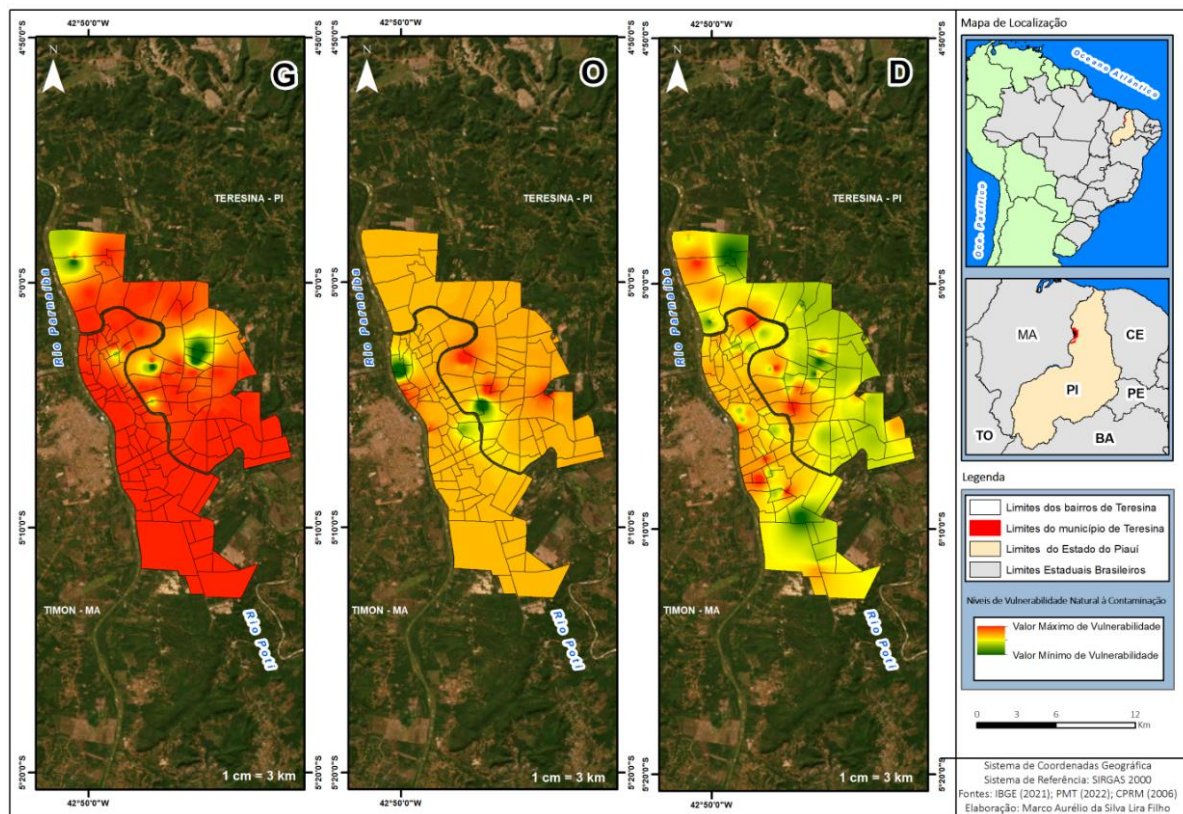
Comparativamente a outras metodologias frequentemente utilizadas no estudo de vulnerabilidade de aquíferos, o método GOD é, provavelmente, o mais simplificado dos métodos e o menos divulgado e adotado globalmente (Fannakh; Farsang, 2022). Essa particularidade levanta questões sobre a capacidade de comparação com resultados obtidos em outros estudos, comprometendo, portanto, a sua validação.

Entretanto, é importante perceber que embora o método GOD estabeleça um quadro de referência simplificado, o cenário simulado serve para orientar o desenvolvimento de políticas de preservação das águas subterrâneas. Isso é especialmente útil quando há poucos dados disponíveis sobre a situação do aquífero, conforme indicado por Goyal *et al.* (2021).

O estudo aqui apresentado também destaca como a simplificação excessiva na representação da vulnerabilidade do sistema aquífero modelado, decorrente da homogeneidade dos dados de entrada provenientes dos poços, pode limitar a percepção de risco à contaminação dos aquíferos localizados em áreas urbanas.

De acordo com os poços catalogados na região de Teresina, os parâmetros de grau de confinamento, origem dos solos e profundidade da lâmina de água sugerem uma certa homogeneidade nos valores de vulnerabilidade para grandes áreas analisadas na capital piauiense (Figura 8). Essa uniformidade observada em cada parâmetro de análise do método, no entanto, pode não refletir a real complexidade da matriz de solo do aquífero e a sua vulnerabilidade intrínseca.

Figura 8 – Mapa da distribuição espacial dos Parâmetros GOD por bairros



Fonte: IBGE (2021); PMT (2022); CPRM (2006). Organização: Os autores (2024). Elaboração: Marco Aurélio da S. L. Filho (2024).

Dessa forma, conforme sugerido por Dassargues e Gogu (2000), esse método se mostra mais adequado para áreas em que existe uma alta variabilidade espacial dos parâmetros de entrada. Isso permite uma distinção mais clara das zonas com maior suscetibilidade à contaminação do aquífero. Outrossim, as áreas de Teresina, nas quais o grau de confinamento do aquífero é o parâmetro com maior correlação com a baixa vulnerabilidade – conforme verificado na região norte da cidade (Figura 7) –, também evidenciam limitações do modelo final apresentado.

A heterogeneidade inerente dos sistemas subterrâneos talvez não tenha sido adequadamente captada, devido ao número limitado de poços catalogados nessas regiões da cidade (Figura 4). Essa particularidade leva o algoritmo de interpolação a extrapolar condições conhecidas dos poços existentes, simplificando a matriz dos parâmetros de entrada e introduzindo incertezas na determinação da suscetibilidade à contaminação nessa zona da cidade.

No estudo aqui proposto, considerando o número de poços catalogados para a área em análise, seria prudente aumentar a quantidade de pontos monitorados para aprimorar a amostragem

da área pesquisada. Alternativamente, em situação de incerteza da continuidade da camada de cobertura do aquífero, conforme proposto por Foster (1998), sugere-se classificar o aquífero como não confinado, para abordar de forma mais cautelosa a avaliação da vulnerabilidade.

Ao considerar a criticidade de zonas categorizadas como de baixa vulnerabilidade, é crucial também ressaltar, seguindo a análise de Hirata (1994), que essas áreas permanecem expostas a compostos bastante móveis e persistentes, incluindo sais, nitratos e solventes organo-sintéticos. Esse aspecto da discussão delimita a importância de um monitoramento contínuo das atividades com potencial de contaminação, mesmo em zonas indicadas como de vulnerabilidade baixa e insignificante. Essa premissa é particularmente relevante para atividades como postos de combustíveis, comuns na capital do Piauí, que representam fontes significativas de compostos organo-sintéticos e que podem estar situados nas áreas categorizadas como de baixa vulnerabilidade.

Outra limitação inerente às simplificações do método de vulnerabilidade GOD, identificada neste estudo, reside na suposição otimista a respeito da eficiência dos diferentes tipos de solo em reter contaminantes na camada de cobertura, representada pelo parâmetro O (tipo de litologia da zona vadosa). Ao se considerar que determinados tipos de solo podem conferir um maior ou menor poder de retenção da contaminação de contaminantes presentes na subsuperfície, exime-se a possibilidade de rotas preferenciais, que podem ser tomadas por parte dos contaminantes no topo do aquífero.

De acordo com Sousa *et al.* (2015), até os contaminantes mais biodegradáveis e menos móveis na subsuperfície podem encontrar caminhos preferenciais, aumentando o risco de contaminação dos pontos de captação hídrica. Destarte, é fundamental manter o cuidado com monitoramento preventivo de atividades antrópicas nas camadas de cobertura, aprimorar o entendimento sobre como os estratos de solo atuam na retenção de contaminantes em subsuperfície e ajustar, com base nos estudos de campo, os parâmetros que correlacionam as características do sistema aquífero aos cenários de vulnerabilidade gerados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos indicam o predomínio de baixa e média vulnerabilidade à contaminação do aquífero urbano da cidade de Teresina, sem indicações de vulnerabilidades altas e extremas. Esse cenário reflete a análise integrada das condições hidrogeológicas locais, da

profundidade do nível freático e do grau de confinamento do aquífero, conforme a aplicação do método GOD.

Ao confrontar esses achados com a realidade urbana de Teresina, torna-se necessário adotar cautela quanto à percepção das zonas classificadas como de baixa e média vulnerabilidade. Esse cuidado decorre da possibilidade ainda existente de contaminação por compostos bastante móveis e persistentes, associados a atividades antrópicas distribuídas pela cidade, como é o caso dos postos de combustíveis citados no estudo.

Nesse contexto, o mapeamento da vulnerabilidade natural apresentado neste trabalho constitui um importante subsídio técnico para a gestão ambiental territorial do município, podendo auxiliar na priorização de áreas para monitoramento da qualidade das águas subterrâneas, no ordenamento do uso do solo e nos processos de fiscalização de atividades potencialmente contaminantes.

REFERÊNCIAS

AGUIAR, Robério Bôto de; GOMES, José Roberto de Carvalho. **Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea, estado do Piauí**: diagnóstico do município de Picos. Fortaleza: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2004.

AMORIM, Jackson Freitas de; SILVA, Antonio Samuel Alves da; XIMENES, Patrícia de Souza Medeiros Pina; MENEZES, Rômulo Simões Cezar. Evaluation of inverse distance weighting to estimate precipitation in the Agreste Mesoregion of the State of Pernambuco, Brazil. **Sigmae**, Juiz de Fora, v. 8, n. 2, p. 340-347, jul. 2019. DOI: <https://doi.org/10.29327/2520355.8.2-38>

ANDRADE, Rayane; NASCIMENTO, Paulo Sérgio. Estimativa da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas na Região Metropolitana de Aracaju (SE). **Rev Int Cienc.**, Rio de Janeiro, v. 15, n. 1, p. 77-96. jan-abr., 2025.

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO - ANA. **Atlas águas**: segurança hídrica do abastecimento urbano. Brasília: ANA, 2021.

ANDRADE-JÚNIOR, Aderson Soares de; BASTOS, Edson Alves; SILVA, Paulo Roberto Teixeira; GOMES NETO, Agamenon Alves. **Atlas Climatológico do Estado do Piauí**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2004. (Embrapa Meio-Norte. Documentos, 101).

BARROS, Layla Maria Monteiro Gomes de; LIMA, Aline Maria Meiguins de. Uso potencial e vulnerabilidade das águas subterrâneas em áreas de expansão urbana: Distrito de Icoaraci, Belém, Pará. **Revista GeoUECE**, Fortaleza, v. 12, n. 22, p. e202302, jun. 2023. DOI: <https://doi.org/10.59040/GEOUECE.2317-028X.v12.n22.e202302>

DASSARGUES, Radu C.; GOGU, Alain. Current trends and future challenges in groundwater vulnerability assessment using overlay and index methods. **Environmental geology**, v. 39, p. 549-559, abr. 2000.

FANNAKH, Abdelouahed; FARSANG, Andrea. DRASTIC, GOD, and SI approaches for assessing groundwater vulnerability to pollution: a review. **Environmental Sciences Europe**, v. 34, n. 1, p. 77, ago. 2022.

FOSTER, Stephen S. D. Groundwater recharge and pollution vulnerability of British aquifers: a critical overview. **Geological Society**, London, v. 130, n. 1, p. 7-22, jan. 1998.

FOSTER, Stephen S. D.; HIRATA, Ricardo César Aoki; GOMES, Daniel; D'ELIA, Mônica; PARIS, Marta. **Proteção da Qualidade da Água Subterrânea**: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agencias ambientais. Washington: Groundwater Management Advisory GW, 2006.

FOSTER, Stephen S. D.; HIRATA, Ricardo César Aoki. **Determinação do risco de contaminação das águas subterrâneas**: um método baseado em dados existentes. São Paulo: Instituto Geológico, 1993.

GOMES, Manuela Gasparetto; VARGAS, Tiago de; BELLADONA, Rossano; DALBOSCO, Volnei; ARAÚJO, Bruna de; BORTOLIN, Taison Anderson. A vulnerabilidade natural de aquíferos fraturados: avaliando os modelos DRASTIC e GOD, originais e adaptados. **Geociências**, São Paulo, v. 40, n. 3, p. 735-749, out. 2021. DOI: <https://doi.org/10.5016/geociencias.v40i03.15735>.

GOYAL, Deepali; HARITASH, Anil Kumar; SINGH, Shailendra Kumar. A comprehensive review of groundwater vulnerability assessment using index-based, modelling, and coupling methods. **Journal of Environmental Management**, v. 296, p. 113161, oct. 2021. DOI:

HIRATA, Ricardo César Aoki. **Fundamentos e estratégias de proteção e controle da qualidade das águas subterrâneas**: estudo de casos no estado de São Paulo. Orientador: Robert William Cleary. 1994. 233 f. Tese (Doutorado em Recursos Minerais e Hidrogeologia) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 1994. DOI: 10.11606/T.44.1994.tde-23092013-162323

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA - IBGE. **Cidades do Piauí**. 2022. Disponível em: <http://www.ibge.gov.br/cidadesat/topwindow.htm?1>. Acesso em: 2 mar. 2022

MELO, Danilo Heitor Caires Tinoco Bisneto; GOMES, Maria da Conceição Rabelo; LEAL, Luiz Rogério Bastos. Cartografia da Vulnerabilidade à contaminação de aquíferos: revisão conceitual. **Geografia Ensino & Pesquisa**, Santa Maria, v. 26, p. e11-e11, jul. 2022.

PEREIRA, Daiane Fernandes; FONSECA, Letícia Rodrigues da; JUNQUEIRA, Bárbara Martinez. A água mineral como recurso hídrico. **Revista Augustus**, Rio de Janeiro, v. 29, n. 56, p. 155-173, mar. 2022.

PIAUÍ. Secretaria Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos - SEMAR . **Relatório de outorgas de uso de água subterrânea no Piauí entre os anos de 2016 e 2017**, 2018. Disponível em: http://www.semar.pi.gov.br/download/201801/SM23_c0cf4d0346.pdf. Acesso em: 2 jul. 2022.

RIBEIRO, Daniela Menezes; ROCHA, Washington Franca; GARCIA, Antonio Jorge Vasconcellos. Vulnerabilidade Natural à Contaminação de Aquíferos da Sub-bacia do rio Siriri, Sergipe. **Águas Subterrâneas**, São Paulo, v. 25, n. 1, p. 91-102, abr. 2011.

SIAGAS. **Sistema de Informações de Águas Subterrâneas**, 2022. Disponível em: <http://siagasweb.cprm.gov.br/layout/>. Acesso em: 13 jun. 2022.

SOUSA, Mauro César de Brito; CASTRO, Marco Aurélio Holanda de; MONTEIRO, Cleto Augusto Baratta; PESSOA, Germana de Paiva; SOUZA, Claudio Damasceno de. Estudo da contaminação do aquífero próximo ao cemitério Areias, Teresina/PI, Brasil. **Brazilian Geographical Journal: Geosciences and Humanities research medium**, Ituiutaba, v. 6, n. 1, p. 41-57, jan./jun. 2015. Disponível em: <https://seer.ufu.br/index.php/braziliangeojournal/article/view/27414>. Acesso em: 13 jun. 2022.