

Análise da Vulnerabilidade à Contaminação das Águas Subterrâneas do Sistema Aquífero de Nhartanda Localizado na Cidade de Tete

Analysis of groundwater contamination vulnerability in the Nhartanda Aquifer System, Tete City

Astorga Luís Chatocota

Ana Karina Ribeiro

Nelson Aniva Tondolo

Resumo

A água subterrânea é muito importante para o equilíbrio da dinâmica da infiltração e escoamento da água, bem como, há muitos anos vem servindo de reservatórios para futuras demandas e implicações por uma iminente falta de água (Franco et al., 2018). Silva et al., (2017) menciona que o manancial subterrâneo é uma das mais importantes reservas para o suprimento de água e na maioria das vezes não necessita de tratamento para o seu consumo, devido ao processo de filtragem natural do subsolo. A área de estudo está localizada na Cidade de Tete. Aplicou-se o Método G.O.D (Foster & Hirata, 1988), que consiste na caracterização, por meio de índices, do grau de confinamento da água subterrânea (G), ocorrência dos estratos de cobertura (O) e da profundidade do aquífero (D). O objectivo principal desta pesquisa consiste na análise de vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas do sistema aquífero de Nhartanda. Os resultados alcançados revelam que a área de estudo apresenta na sua maior extensão, vulnerabilidade alta, seguido de vulnerabilidade média e baixa.

Palavras-chave: Água subterrânea, vulnerabilidade, contaminação, Método GOD.

Abstract

Groundwater is very important for maintaining the balance of water infiltration and flow dynamics and, for many years, has served as a reservoir to meet water demands and mitigate the implications of imminent water shortages (Franco et al., 2018). Silva et al. (2017) mention that groundwater is one of the most important reserves for water supply and, most of the time, does not require treatment for consumption due to the natural filtration process of the subsoil. The study area is located in Tete City. The GOD method (Foster & Hirata, 1988) was applied, which consists of characterizing, through indices, the degree of groundwater confinement (G), the occurrence of cover strata (O), and aquifer depth (D). The main objective of this research is to analyze the vulnerability to contamination of the Nhartanda Aquifer System. The results obtained reveal that the study area has high, medium, and low vulnerability.

Keywords: groundwater, vulnerability, contamination, GOD method.

Introdução

A vulnerabilidade é entendida como a susceptibilidade dos aquíferos serem afetados por cargas contaminantes de origem antrópica (Feitosa et al., 2008). Ela ocorre em função da facilidade dos contaminantes transporem a zona não saturada do solo, cujas características de ordem física e química, associadas às características do contaminante, resultam na capacidade de atenuar, reter ou eliminar os contaminantes antes de atingirem os aquíferos. Há necessidade de protecção das águas subterrâneas face ao aumento de ameaças de contaminação que ocorre na superfície onde a qualidade das águas encontra-se, geralmente, sob um potencial considerável de contaminação. (Lake et al., 2003; Thapinta and Hudak 2003; Chae et al., 2004).

O conceito de vulnerabilidade das águas subterrâneas à contaminação baseia-se no pressuposto de que o ambiente físico pode providenciar um certo grau de protecção contra impactos naturais e humanos com respeito à entrada de contaminantes no ambiente da subsuperfície. Consequentemente, muitas áreas são mais vulneráveis à contaminação que outras. (Baalousha 2006; Napolitano and Fabbri 1996).

Assim, este trabalho teve como objetivo principal apresentar o mapa de vulnerabilidade à contaminação, com recurso ao método GOD (Foster e Hirata, 1988) do aquífero confinado de Nhartanda.

A procura de recursos naturais nas zonas urbanas aumenta à medida que ocorre o crescimento da população. Um dos recursos vitais de maior procura é a água subterrânea que muitas vezes é usada para o consumo. Conforme referido anteriormente, a contaminação da água subterrânea por microorganismos de origem humana ou animal e a ingestão de substâncias tóxicas gerar sérios problemas à saúde das populações. Deste modo, ao longo de Vale de Nhartanda assim como na superfície de sistema aquífero ocorrem actividades antrópicas que deixam a água subterrânea vulnerável à contaminação.

De acordo com Issar (1993), a poluição das águas subterrâneas se origina de substâncias introduzidas no meio natural como: o uso excessivo e inadequado de agrotóxicos na agricultura; efluentes domésticos e industriais; por lançamento direto de águas servidas ou residuais em fossas sanitárias; vazamentos no transporte de produtos perigosos; por necrochorume. Na área de estudo observa-se a prática de pastagem de gado deixando muitos excrementos de animais na superfícies e ocorre a extração de argila para fabrico de blocos, fecalismo a céu aberto e lançamento de efluentes domésticos nos corpos de águas superficiais.

Uma das principais utilidades da água subterrânea consiste na satisfação das necessidades da população, pois, o seu tratamento não acarrecta muitos custos comparativamente às águas superficiais.

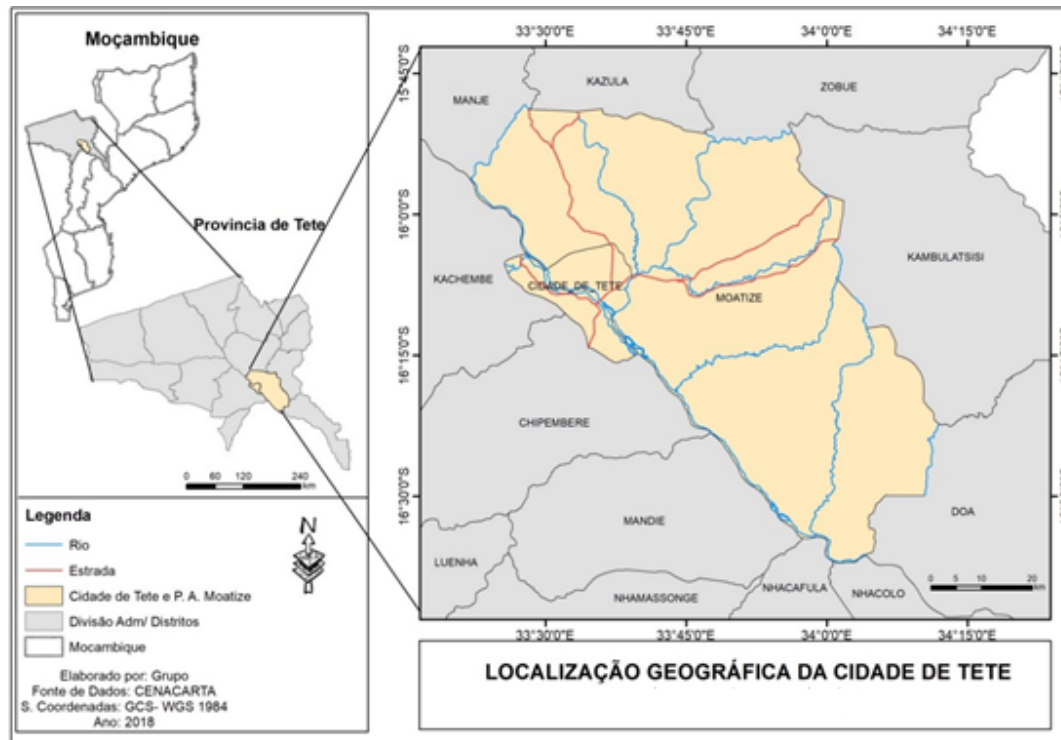
Neste contexto, esta pesquisa reitera seu contributo na sociedade em geral e no campo da ciência sobre a importância de aplicação de método GOD e de conhecimento da vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

Área de estudo

A cidade de Tete é a capital da província de Tete. Localiza-se na região central do País, num planalto situado a uma altitude mínima de 115 metros nas margens do rio Revúbue. Administrativamente, a

cidade de Tete é um município e ocupa uma superfície de cerca de 314 Km², e segundo o censo de 2007 possui 155 870 habitantes (INE, 2007). A Norte e Este é limitado pelo distrito de Moatize, a Sul e Oeste pelo distrito de Changara (Figura 1)

Figura 1: localização geográfica da área de estudo. (Fonte: os autores, 2026)

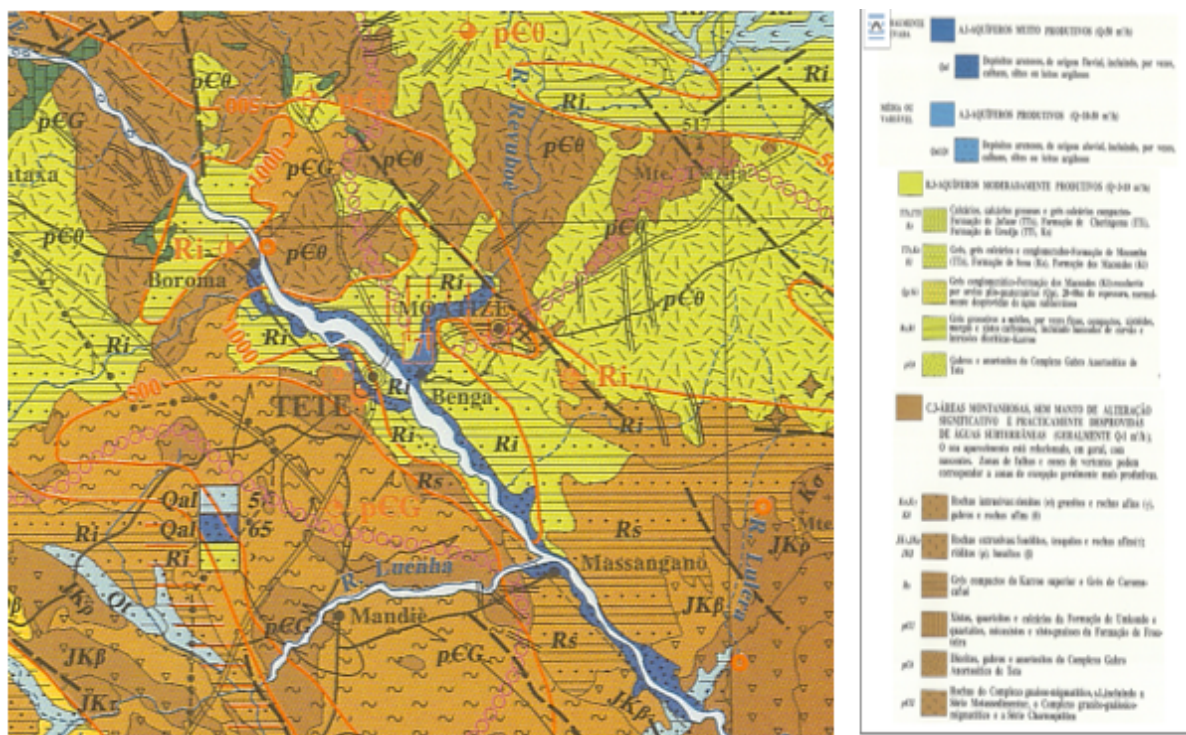


De acordo com o relatório da (ARA-Zambeze, 2015), a geologia da área do estudo está inserida na bacia do Zambeze, possui uma estrutura sinforme assimétrico, bordejada por falhas, a bacia apresenta camadas inclinadas com espessura que pode atingir 3000 metros. A bacia é interceptada por filões de doleritos.

O grès, na base do aquífero, também pode ser considerado como um aquífero mas com baixa permeabilidade. Isso explica-se pelo fluxo local de água salobra subterrânea que se origina das camadas de grès para o Vale de Nhartanda. Assume-se que o grès é parcialmente desgastado nos metros superiores ou até dezenas de metros e, como tal, pode até actuar como um aquífero permeável inferior a médio.

A hidrogeologia do Vale de Nhartanda é caracterizada por um sistema aquífero semi-confinado com a camada superior argilosa atuando como um aquitardo (camada confinante com alta resistência hidráulica) e os depósitos de areia e o areão abaixo formam um aquífero. A espessura da camada de argila varia ao longo do vale, com uma cota máxima de 10 m na zona central, enquanto quase ausente nas zonas de inundação nas extremidades noroeste e sudeste do vale. (We Consult, 2015).

Figura 2: Hidrogeologia na Cidade de Tete. (Fonte: O autor 2026)



Referencial Teórico

O Conceito de análise de vulnerabilidade pode ser formalizado como sendo o de características intrínsecas dos estratos entre a zona saturada e a superfície do solo, o que determina sua suscetibilidade a sofrer os efeitos adversos de uma carga contaminante que é, será ou pode ser aplicada na região acima do nível freático (Foster, 1987) é uma função da interação entre a vulnerabilidade do aquífero à contaminação e a carga contaminante.

TAVARES., et al (2009), refere que a determinação da vulnerabilidade está relacionada à capacidade de atenuação da zona vadosa, através da avaliação e integração de diferentes atributos litológicos e hidrogeológicos, tendo sido desenvolvidos diversos métodos de análise. A literatura especializada sinaliza três conjuntos de métodos que podem ser utilizados para avaliar a vulnerabilidade de uma formação aquífera: métodos que empregam modelos de simulação; métodos estatísticos ou de monitoramento e métodos de índices e superposição. Ainda de acordo com o mesmo autor, os métodos de simulação avaliam a vulnerabilidade por meio da solução de equações do escoamento em meio subterrâneo e transporte de soluto, quantificando a concentração do contaminante no tempo e no espaço.

A identificação de áreas vulneráveis, nas quais o uso do solo apresente perigo de contaminação ao recurso hídrico subterrâneo, é indispensável para o estabelecimento de ações prioritárias que visem à sustentabilidade. Dentre alguns desses usos destaca-se a atividade agrícola, cuja introdução de nutrientes, agrotóxicos, fertilizantes e pesticidas pode comprometer sua qualidade. Oliveira.,et al (2013).

Dentre os métodos para determinação de vulnerabilidade de aquífero pode-se mencionar o método DRASTIC, (D= Profundidade da zona não saturada, R= Recarga do aquífero, A= Material do aquífero, S= Tipo de solo, T= Topografia, I= Influência da zona vadosa e C= Condutividade hidráulica do aquífero); o método AVI (Aquifer Vulnerability Index) ; o método G.O.D (G = grau de confinamento hidráulico da água subterrânea; O = ocorrência de estratos litológicos; D = profundidade do nível de água subterrânea); entre outros (BOS, 2012; FOSTER & HIRATA, 1988; ROMEIRO, 2014).

A literatura especializada sinaliza três conjuntos de métodos que podem ser utilizados para avaliar a vulnerabilidade de uma formação aquífera: métodos que empregam modelos de simulação; métodos estatísticos ou de monitoramento e métodos de índices e superposição TAVARES., et al (2009). Os métodos de simulação avaliam a vulnerabilidade por meio da solução de equações do escoamento em meio subterrâneo e transporte de soluto, quantificando a concentração do contaminante no tempo e no espaço.

Os métodos estatísticos são usados para quantificar a vulnerabilidade pela determinação da relação estatística entre a poluição e as condições ambientais observadas, sendo expresso como uma probabilidade de contaminação (Lindström, 2005 citado em Tavares, et al 2009).

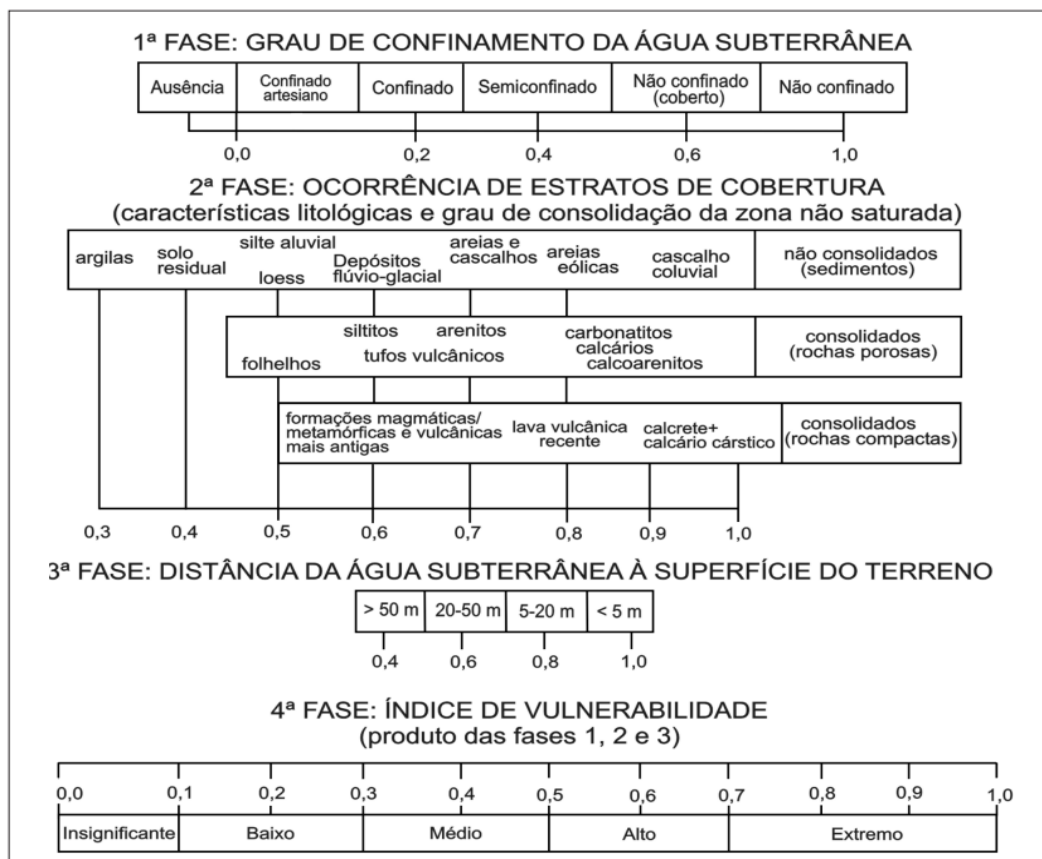
O método G.O.D proposto por Foster et al. (2002; 2006) é amplamente aplicado nos países da América Latina em virtude do seu bom desempenho, menor custo e maior facilidade de obtenção dos parâmetros hidrodinâmicos, o nível de inacessibilidade hidráulico da zona saturada do aquífero.

A capacidade de contaminação dos estratos sobrejacentes do aquífero saturado. Baseado nestas considerações, o índice de vulnerabilidade GOD (Foster, 1987; Foster and Hirata, 1988) caracteriza a vulnerabilidade de poluição do aquífero com base nos seguintes parâmetros:

- Confinamento do aquífero (G = Grau de confinamento hidráulico);
- Natureza composicional da zona não saturada e/ou seu grau de fraturamento (O = Ocorrência de estratos geológicos e grau de consolidação que determina a capacidade de atenuação do contaminante);
- Profundidade do nível de água ou base confinante do aquífero (D = Distância). Segundo Oliveira., et al (2013), este método refere que a vulnerabilidade do aquífero é obtida através da multiplicação dos valores de faixas dos três parâmetros referidos anteriormente ($GOD = G \times O \times D$). Os resultados obtidos irão mostrar as classes de vulnerabilidade do aquífero. Quanto mais próximo a 1, maior é a sua vulnerabilidade. As classes geradas são qualificadas como: insignificante, baixa, moderada, alta e extrema conforme mostra a figura 3.

No ambiente ArcGIS, extensão arcVIEW, utiliza-se o Método do Inverso Ponderado da Distância (Inverse Distance Weighted - IDW). É um procedimento de interpolação que consiste, basicamente, em atribuir um peso para cada ponto amostrado vizinho, em função da distância que ele se encontra do ponto que se quer calcular. Os pesos são calculados de maneira que a soma de todos os pesos dados aos pontos amostrados vizinhos seja igual a 1, ou seja, é atribuído um peso proporcional à contribuição de cada ponto vizinho (Menegol, 2004).

Figura 3: Método GOD para avaliação da vulnerabilidade do aquífero à contaminação (Fonte: Tavares, et al 2009. Adaptado de Foster et al., 2006)



Metodologia de estudo

Quanto à natureza trata-se de pesquisa prática porque pretende trazer informação sobre os locais vulneráveis à contaminação do aquífero.

Quanto ao tipo de pesquisa trata-se de pesquisa mista na medida em que, primeiramente recorreu-se a dados de níveis piezométricos dos furos, dados de cobertura dos estratos, e de grau de confinamento para determinação do índice G.O.D. E, de seguida, a partir de índice GOD gerado através de mapa procurou-se aferir os pontos de vulnerabilidade do aquífero à contaminação.

No que diz respeito ao objecto e fontes de pesquisa trata-se de pesquisa bibliográfica porque recorreu-se a manuais, artigos científicos, publicados na internet e relatórios de Instituições de Tutela sobre gestão de recursos hídricos, como ARA-Zambeze, Direcção Nacional de Águas (DNA).

Em relação aos objectivos trata-se de pesquisa descritiva e explicativa pois, procedeu-se a compilação e sistematização descrição e análise das diferentes informações para explicar a magnitude de vulnerabilidade dos aquíferos à contaminação.

Foram seleccionados dados 9 furos e computados em uma planilha excel sobre informação geológica (estratos de cobertura), profundidade da água e de níveis piezométricos todos no formato shap disponibilizados pela ARA CENTRO-Tete conforme a tabela 1. De seguida realizou-se a composição do

mapa a partir da interpolação dos valores, aplicando o Método do Inverso Ponderado da Distância. Após a elaboração dos mapas referentes aos índices G, O e D, procede-se a multiplicação dos valores, obtendo-se, como resultado, o mapa de vulnerabilidade (figura 8).

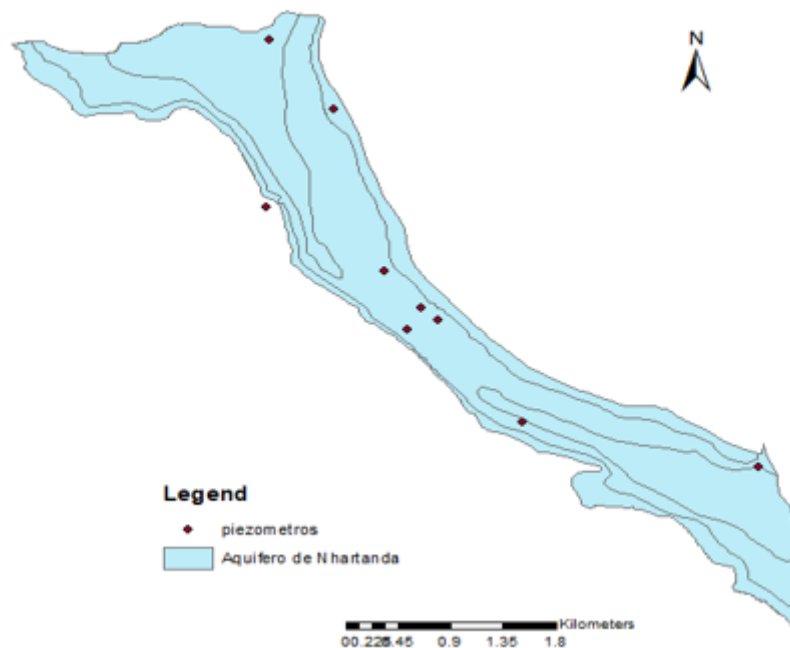
Resultados e Discussão

A tabela 1 ilustra os dados usados para avaliar a vulnerabilidade do aquífero à contaminação. E a espacialização dos furos é ilustrada na figura 4.

Tabela 1: valores de índice GOD usados para avaliar a vulnerabilidade de aquífero

ID	Código	Latitude	Longitude	Nível piezométrico (m)	Estratos de Cobertura	Índice G
1	PNH1	-16.16482	33.578776	4.46	Argilas (0.5)	0.2
2	PNH2	-16.163739	33.577585	4.53	Argilas (0.5)	0.2
3	PNH3	-16.16057	33.57472	3.28	Argilas (0.5)	0.2
4	PLC1	-16.173625	33.585331	7.41	Argilas (0.5)	0.2
5	PLC2	-17.568675	36.700048	13.48	Argilas (0.5)	0.2
6	EAT/036	-17.569202	36.69923	2.84	Argila (0.5)	0.2
7	AAP/001	-16.17758	33.60351	4.08	Areia grossa (0.8)	0.9
8	PPA/006	-16.14646	33.57077	3.42	Areia argilosa (0.7)	0.9
9	PPA/003	-16.14046	33.65686	3.47	Areia grossa (0.8)	0.9
10	AAB/014	-16.15501	33.56559	5.59	Areia grossa (0.8)	0.9

Figura 4: localização dos piezómetros de Nhartanda. (Fonte: O autor 2026)



De acordo com as características geológicas e hidrogeológicas observadas, tem-se que a maior parte da área é constituído por aquífero confinado e uma parte não confinada, apresentando valor de índice G que varia entre 0,8 a 0,9. Em relação a profundidade de nível freático observou-se que ela varia entre 5 a 20m, apresentando índice D entre 0,8 à 0,9. Quanto à geologia verificou-se que é constituído por argila, areia argilosa e areia grossa com valores de índice O, variando entre 0,5 a 0,8. Os resultados referentes ao índice G.O.D podem ser observados nos gráficos 5, 6 e 7.

A análise dos resultados permitiu perceber que aproximadamente 33% da área apresenta vulnerabilidade alta, 51% com vulnerabilidade negligenciável e observando-se a ocorrência de vulnerabilidade baixa perfazendo 16% de área.

A alta vulnerabilidade que se observa na área de estudo coincide com pontos de recarga e descarga respectivamente do aquífero através do rio Zambeze e em termos litológicos é constituído predominantemente por areia argilosa. Em contrapartida, a vulnerabilidade baixa e negligenciável é atribuída aos solos constituídos essencialmente por argilas que protegem o aquífero à contaminação por apresentar permeabilidade baixa.

Figura 5: profundidade da água. Fonte: (Os autores 2022)
2026)

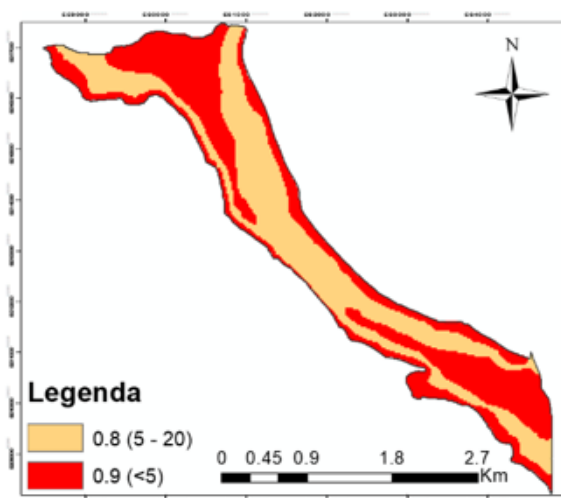


Figura 6: estratos de cobertura. Fonte: (Os autores,

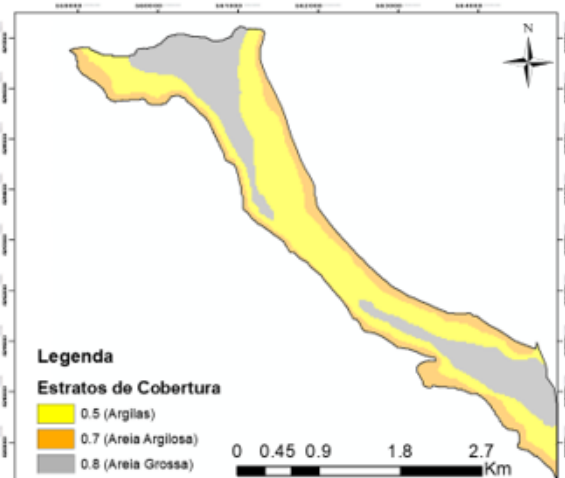


Figura 7: Grau de confinamento do aquífero. Fonte: (O autor 2026)

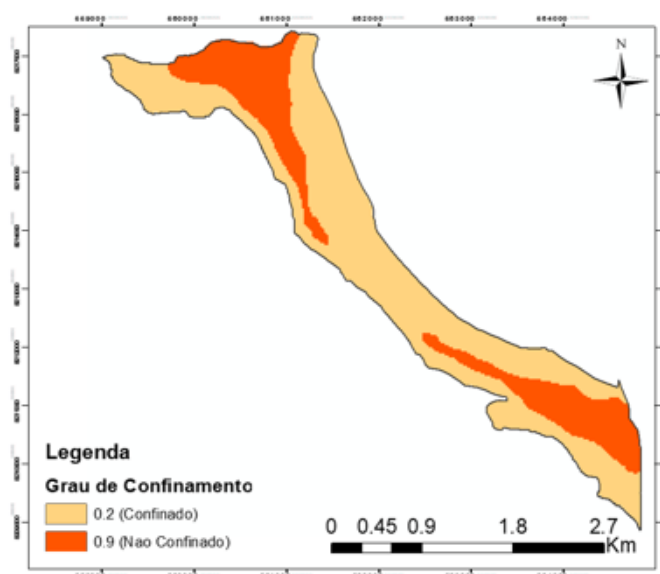
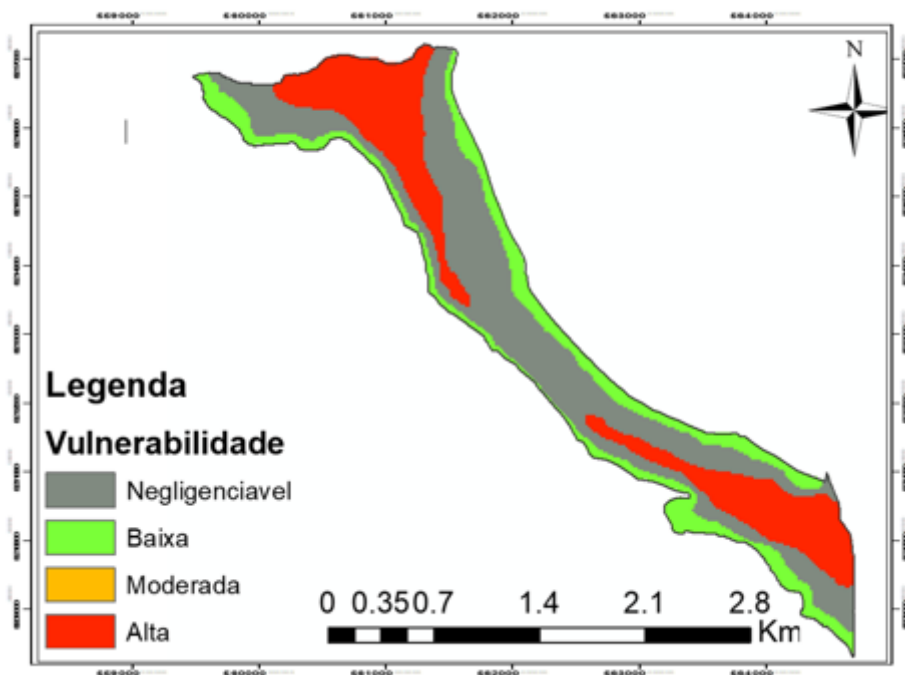


Figura 8: Classificação do aquífero quanto à vulnerabilidade. Fonte: (Os autores, 2026)



5. Conclusões

Face aos estudos apresentados neste relatório, foi possível concluir que:

Conclusões e Recomendações

O estudo das características geológicas e hidrogeológicas de uma determinada região são de fundamental importância para a realização de diagnósticos sobre a vulnerabilidade à contaminação, principalmente em área urbanas, onde se situam as principais fontes potenciais de poluição degradadoras dos recursos naturais, devido a diversidade de atividades antrópicas implantadas.

Nesta pesquisa, o método GOD mostrou ser útil na avaliação de vulnerabilidade a contaminação das águas subterrâneas do aquífero de Nhartanda face à limitada quantidade de dados disponíveis. Os resultados encontrados demonstram a fragilidade do manancial subterrâneo nos pontos de recarga e descarga e a necessidade de adoção de políticas de uso dos solos sem recurso a fertilizantes (adubos) pois, estes podem introduzir-se nos solos e contaminar os aquíferos.

Recomenda-se a delimitação espacial das fontes de contaminação, sistematizando-as em mapas a serem geradas a partir de Sistema de Informações Geográficas, confrontando a disposição das áreas vulneráveis às cargas contaminantes.

Referências

Foster, S. et al., (2002). Groundwater Quality Protection: a guide for water service companies, municipal authorities and environment agencies. Washington, D.C, The World Bank.

A Geologia de Moçambique (Notícia Explicativa da Carta Geológica de Moçambique), DNGM Maputo, Afonso, 1978.

Bós, S. M.; thomé, A. Métodos para Avaliar Vulnerabilidade das Águas Subterrâneas. 1ª edição. 82 p. ISBN 978-85-66146-02-8. Porto Alegre, RS, 2012.

Tavares, P. et al. 2009. Mapeamento da vulnerabilidade à contaminação das águas subterrâneas localizadas na Bacia Sedimentar do Araripe, Estado do Ceará, Brasil. Rem: Rev. Esc. Minas [online]. vol.62, n.2, pp.227-236. ISSN 0370-4467. <http://dx.doi.org/10.1590/S0370-44672009000200015>.

Baalousha, H. (2006) Vulnerability assessment for the Gaza Strip, Palestine using DRASTIC. Environ Geol 50:405–414, Springer Berlin/Heidelberg.

Carta Geológica de Moçambique. (Noticia Explicativa da Carta), escala 1:250.000, Direcção Nacional de Geologia – DNG 2008.

Lake IR, Lovett AA, Hiscock KM, Betson M, Foley A, Sunnenberg G, Evers S, Fletcher S (2003) Evaluating factors influencing groundwater vulnerability to nitrate pollution: developing the potential of GIS. J Environ Manage 68(3):315–328, Elsevier Science Ltd

DNA, (1989). Estudo Hidrogeológico no Vale de Nhartanda e na Área de Matundo, Relatório 18/89. Estudo Hidrogeológico detalhado para Monitorização do Sistema Aquífero do Vale de Nhartanda - Cidade de Tete – para ARA-Zambeze – WE-Consult, 2016.

Issar, A. S. (1993). Era uma vez na Suméria. O correio da Unesco. Rio de Janeiro: FGV, v. 21, n. 7, Jul. 1993.

Voigt, H. J. et al. Characterization of groundwater vulnerability in aquifer vulnerability and risc. In: INTERNATIONAL WORKSHOP ON AQUIFER VULNERABILITY AND RISK, 1, 2003, Salamanca Guanajuato, Mexico. Proceedings.2003.

Foster, S. D., Hirata, R., Gomes, D., D'elia, M., & PARIS, M (2006). Proteção da Qualidade da Água Subterrânea: um guia para empresas de abastecimento de água, órgãos municipais e agências ambientais. Tradução: Sônia Vieira. São Paulo: Banco Mundial, Servmar.

Brasil. (2003), Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução nº 335, de 3 de abril de 2003. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, Brasília.

ARA-Zambeze. (2015). Relatório de Fiscalização da Construção de dois Piezômetros no Campo de Furos de Revúbue Para Monitoramento de águas Subterrâneas. ARA-Zambeze, Tete.

Oliveira., at al (2013). Modelagem da vulnerabilidade à contaminação de aquíferos livres em região hidrográfica do Semiárido Baiano explorada pela agroindústria - Anais XVI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR, Foz do Iguaçu, PR, Brasil;