

Mapeamento de Zonas Potenciais de Águas Subterrâneas no Distrito de Mueda, Norte de Moçambique: Integração de Sensoriamento Remoto, AHP em SIG e Validação com Fontes de Água

Groundwater Potential Zone Mapping in Mueda District, Northern Mozambique: Integrating Remote Sensing, GIS-Based AHP and Water Point Validation

Jubílio Filiano Maússe^{1,2,*}

¹ Investigador Independente, Moçambique

² Oficial Sénior de Dados e GIS, REACH Initiative, Cabo Delgado, Moçambique

* Autor para correspondência: jubiliomausses@gmail.com

Nota de independência institucional: Este estudo foi desenvolvido de forma independente pelo autor. As opiniões, análises e conclusões apresentadas são da exclusiva responsabilidade do autor e não representam oficialmente a REACH Initiative, a Universidade Eduardo Mondlane ou qualquer outra instituição.

Resumo

As águas subterrâneas constituem uma fonte estratégica para o abastecimento de água em regiões com limitada disponibilidade de recursos hídricos superficiais. No distrito de Mueda, em Cabo Delgado, a escassez de informação hidrogeológica detalhada ao nível local limita a identificação de áreas prioritárias para perfuração, reabilitação de furos e gestão sustentável da água. Este artigo propõe uma metodologia integrada baseada em Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informação Geográfica e Análise Multicritério para mapear zonas de potencial de águas subterrâneas no distrito de Mueda. Foram considerados sete factores condicionantes: precipitação, geologia, índice topográfico de humidade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, uso e cobertura da terra e tipo de solo. Estes factores foram normalizados, ponderados por meio do Processo Analítico Hierárquico e integrados por sobreposição ponderada em ambiente SIG. A matriz AHP apresentou uma razão de consistência de 0,100, indicando consistência aceitável dos julgamentos utilizados na ponderação dos critérios. O mapa final indicou o predomínio das classes de baixo e moderado potencial, correspondendo a 53,70% e 42,30% da área analisada, respectivamente. A classe de alto potencial representou 3,99%, enquanto a classe de muito baixo potencial foi residual, com 0,002%. A classe de potencial muito alto não foi observada no distrito. A validação espacial foi realizada com 17 pontos de água obtidos

a partir do Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento. O estudo pretende contribuir para o planeamento hidrogeológico local e apoiar decisões técnicas sobre captação e gestão de águas subterrâneas em Mueda.

Palavras-chave: águas subterrâneas; potencial hidrogeológico; sensoriamento remoto; SIG; AHP; Mueda; Cabo Delgado; Moçambique; fontes de água.

Abstract

Groundwater is a strategic water supply source in regions with limited surface water availability. In Mueda District, Cabo Delgado Province, Mozambique, the lack of detailed local hydrogeological information constrains the identification of priority areas for borehole drilling, rehabilitation, and sustainable groundwater management. This paper proposes an integrated methodology based on Remote Sensing, Geographic Information Systems, and Multi-Criteria Decision Analysis to map groundwater potential zones in Mueda District. The seven conditioning factors considered were rainfall, geology, topographic wetness index, drainage density, lineament density, land use and land cover, and soil type. These factors were standardized, weighted using the Analytical Hierarchy Process, and integrated through GIS-based weighted overlay analysis. The AHP matrix produced a consistency ratio of 0.100, indicating acceptable consistency of the pairwise comparisons. The final map indicated a predominance of low and moderate groundwater potential classes, representing 53.70% and 42.30% of the analysed area, respectively. The high potential class accounted for 3.99%, while the very low potential class was residual, representing 0.002%. No very high potential class was observed within Mueda District. Spatial validation was conducted using 17 water points obtained from the National Water and Sanitation Information System. The study aims to support local hydrogeological planning and evidence-based decision-making for groundwater development in Mueda.

Keywords: groundwater potential; hydrogeological potential; remote sensing; GIS; AHP; Mueda; Cabo Delgado; Mozambique; water points.

I Introdução

As águas subterrâneas desempenham um papel fundamental no abastecimento doméstico, agrícola e institucional, particularmente em regiões onde os recursos hídricos superficiais são sazonais, escassos ou vulneráveis a variações climáticas. Em ambientes tropicais e semiáridos, a ocorrência de águas subterrâneas é controlada por uma combinação de factores geológicos, geomorfológicos, climáticos, hidrológicos e antrópicos (Allafta et al., 2021; El Sherbini et al., 2025).

O uso integrado de Sensoriamento Remoto e Sistemas de Informação Geográfica tem sido amplamente

aplicado à identificação de zonas potenciais de águas subterrâneas, sobretudo em contextos em que os dados de campo são limitados (Arabameri et al., 2019; Nainggolan et al., 2024). Esta abordagem permite combinar variáveis espaciais, como litologia, lineamentos, declividade, densidade de drenagem, precipitação, solos, uso e cobertura da terra, e índices derivados de imagens de satélite.

No caso de Cabo Delgado, existem produtos cartográficos regionais que indicam zonas gerais de potencial de águas subterrâneas. Contudo, tais produtos apresentam limitações para decisões distritais, pois a sua escala pode não capturar variações locais relevantes para perfuração, reabilitação de pontos de água e planeamento hídrico. Assim, torna-se necessário desenvolver uma análise mais detalhada para o distrito de Mueda.

1.1 Problema de pesquisa

Apesar da importância das águas subterrâneas para o abastecimento de água em Mueda, ainda há limitada disponibilidade de mapas hidrogeológicos detalhados ao nível distrital. Esta limitação dificulta a identificação de áreas favoráveis à perfuração de furos e à gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

1.2 Questão de pesquisa

Até que ponto a integração de Sensoriamento Remoto, SIG e Análise Multicritério permite identificar zonas favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas no distrito de Mueda?

1.3 Objectivo geral

Mapear e avaliar o potencial de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Cabo Delgado, por meio da integração de Sensoriamento Remoto, SIG, Análise Multicritério e validação com fontes de água existentes.

1.4 Objectivos específicos

1. Caracterizar o distrito de Mueda quanto aos factores geológicos, topográficos, hidrológicos e ambientais associados à ocorrência de águas subterrâneas.
2. Produzir e reclassificar as camadas temáticas de precipitação, geologia, índice topográfico de humidade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, uso e cobertura da terra e tipo de solo.
3. Aplicar o Processo Analítico Hierárquico para atribuição de pesos aos factores condicionantes e avaliação da consistência da matriz de comparação par-a-par.

4. Gerar um mapa de zonas potenciais de águas subterrâneas por sobreposição ponderada em ambiente SIG.
5. Validar o mapa produzido com dados independentes de fontes de água existentes.
6. Identificar áreas prioritárias para investigação hidrogeológica detalhada e possível perfuração.

1.5 Hipóteses

- H₁: As zonas de maior potencial de águas subterrâneas em Mueda estão associadas a maior disponibilidade de precipitação, litologias favoráveis, maior índice topográfico de humidade, densidade de drenagem adequada e presença de lineamentos estruturais que favorecem a infiltração e circulação subterrânea.
- H₂: A integração de Sensoriamento Remoto, SIG e AHP permite produzir um mapa mais detalhado e operacional do que mapas provinciais generalizados.
- H₃: O mapa gerado apresenta correspondência espacial significativa com a localização de fontes de água existentes.

2 Área de estudo

O presente estudo foi realizado no distrito de Mueda, localizado na província de Cabo Delgado, no norte de Moçambique. O distrito ocupa uma área de aproximadamente 14.150 km², correspondente a cerca de 17,1% da área total da província de Cabo Delgado, estimada em 82.625 km². A densidade populacional indicada para o distrito é de 14 habitantes por km², valor inferior à média provincial de 31 habitantes por km² (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

Do ponto de vista administrativo e geográfico, Mueda limita-se a norte com a República Unida da Tanzânia, a sul com os distritos de Montepuez, Muidumbe e Meluco, a este com o distrito de Mocímboa da Praia e a oeste com o distrito de Mecula, na província do Niassa. O distrito é constituído por vários postos administrativos, incluindo Mueda-Sede, Chapa, Negomano, N'gapa e Imbuho, o que permite uma abordagem espacialmente detalhada para o mapeamento do potencial de águas subterrâneas (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

Em termos climáticos, os dados disponíveis para a sede distrital indicam, para o ano de 2022, uma temperatura média de 21,1 °C, uma temperatura máxima absoluta de 28,5 °C e uma precipitação registada de 88,5 mm. Contudo, a série apresentada possui lacunas por vários anos, pelo que estes valores devem ser tratados como dados pontuais disponíveis e não como uma caracterização climática completa do distrito (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

A população do distrito apresenta crescimento contínuo no período recente. Segundo as projecções do Instituto Nacional de Estatística, Mueda tinha 174.036 habitantes em 2017, aumentando para 207.009

habitantes em 2023, com projecção de 212.932 habitantes em 2024. Este crescimento populacional reforça a relevância de estudos aplicados à identificação de zonas potenciais de águas subterrâneas, sobretudo para apoiar o planeamento do abastecimento de água e a expansão de infraestruturas hídricas (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

O abastecimento de água constitui uma dimensão importante para a justificação deste estudo. Entre 2019 e 2023, o número de fontes de água registadas no distrito variou de 25 fontes em 2019 para 29 em 2021, 18 em 2022 e 23 em 2023. A população servida por fontes de água aumentou de 4.000 pessoas em 2019 para 8.500 pessoas em 2023. No mesmo período, o número de furos operacionais variou de 12 em 2019 para 16 em 2021, 7 em 2022 e 9 em 2023, enquanto o número de nascentes de água aumentou de 10 entre 2019 e 2021 para 18 em 2022 e 19 em 2023 (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

As principais actividades económicas do distrito são a agricultura, a pecuária e o comércio, tendo como principais produtos o milho, o feijão e o gado suíno. A dependência de actividades agropecuárias torna a disponibilidade de água subterrânea um factor relevante para a segurança hídrica, a produção local e a resiliência das comunidades (Instituto Nacional de Estatística, 2024).

Deste modo, Mueda constitui uma área de estudo adequada para o mapeamento do potencial de águas subterrâneas, pois combina grande extensão territorial, crescimento populacional, dependência de fontes subterrâneas e necessidade de informação espacial detalhada para apoiar decisões sobre perfuração, reabilitação de furos, protecção de nascentes e gestão sustentável dos recursos hídricos.

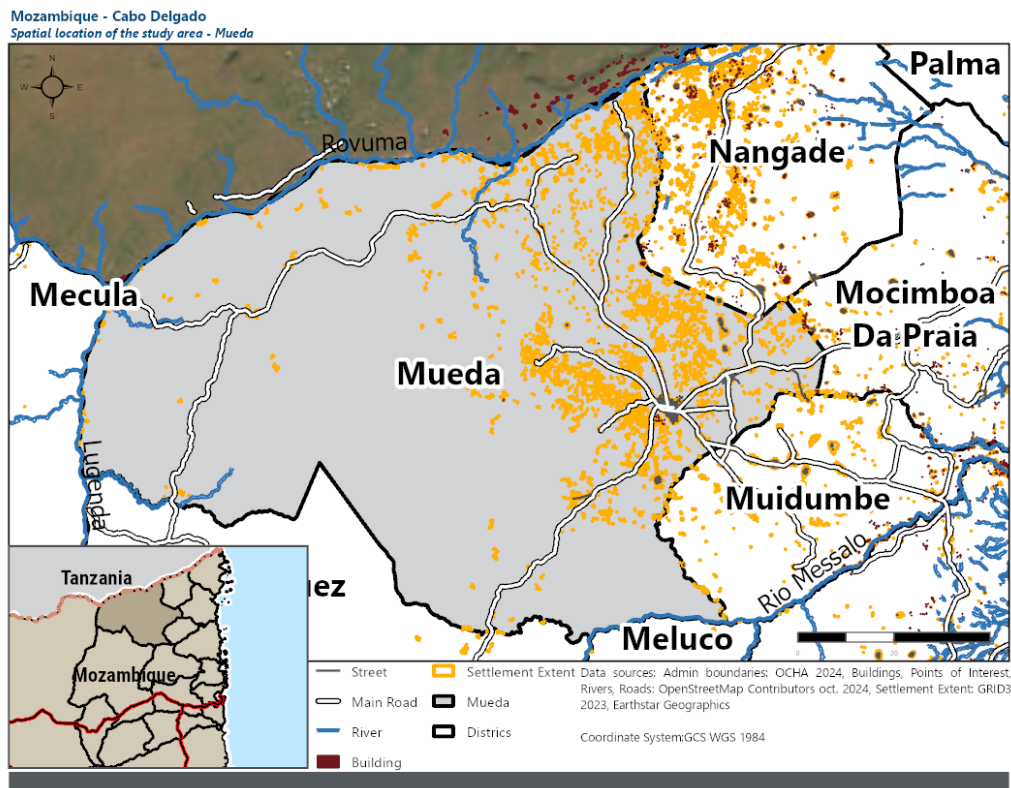


Figura 1: Localização do distrito de Mueda, Cabo Delgado, Moçambique.

3 Materiais e métodos

3.1 Abordagem metodológica geral

A metodologia adoptada neste estudo baseia-se na integração de dados de Sensoriamento Remoto, Sistemas de Informação Geográfica, mapas convencionais e dados de validação de fontes de água para a identificação de zonas de potencial de águas subterrâneas no distrito de Mueda. O procedimento metodológico está estruturado em cinco etapas principais: aquisição e pré-processamento dos dados, geração das camadas temáticas, reclassificação e ponderação dos factores condicionantes, integração das camadas por análise de sobreposição ponderada e validação do mapa final com dados independentes de fontes de água.

A abordagem metodológica segue o princípio de que a ocorrência e disponibilidade de águas subterrâneas são controladas por factores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos, climáticos e de uso da terra. Assim, foram consideradas sete camadas temáticas principais: precipitação, geologia, índice topográfico de humidade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, uso e cobertura da terra e tipo de solo. Estas variáveis foram seleccionadas por influenciarem directamente os processos de recarga, infiltração, armazenamento e circulação subterrânea da água (Allafta et al., 2021; Arabameri et al., 2019; El Sherbini et al., 2025; Nainggolan et al., 2024).

O procedimento metodológico adoptado neste estudo está sintetizado na Figura 2. Inicialmente, foram integrados dados de sensoriamento remoto, incluindo imagens Landsat 9, dados de precipitação CHIRPS e Modelo Digital de Elevação, juntamente com mapas convencionais e dados hidrogeológicos disponíveis. A partir destes dados, foram derivadas as principais camadas condicionantes do potencial de águas subterrâneas. As camadas foram posteriormente reclassificadas no ambiente ArcGIS Pro e ponderadas com recurso ao Processo Analítico Hierárquico. Em seguida, foi aplicada a análise de sobreposição ponderada em SIG para gerar o índice final de potencial de águas subterrâneas. O mapa resultante foi classificado em zonas de potencial muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto, e posteriormente validado com dados independentes de fontes de água.

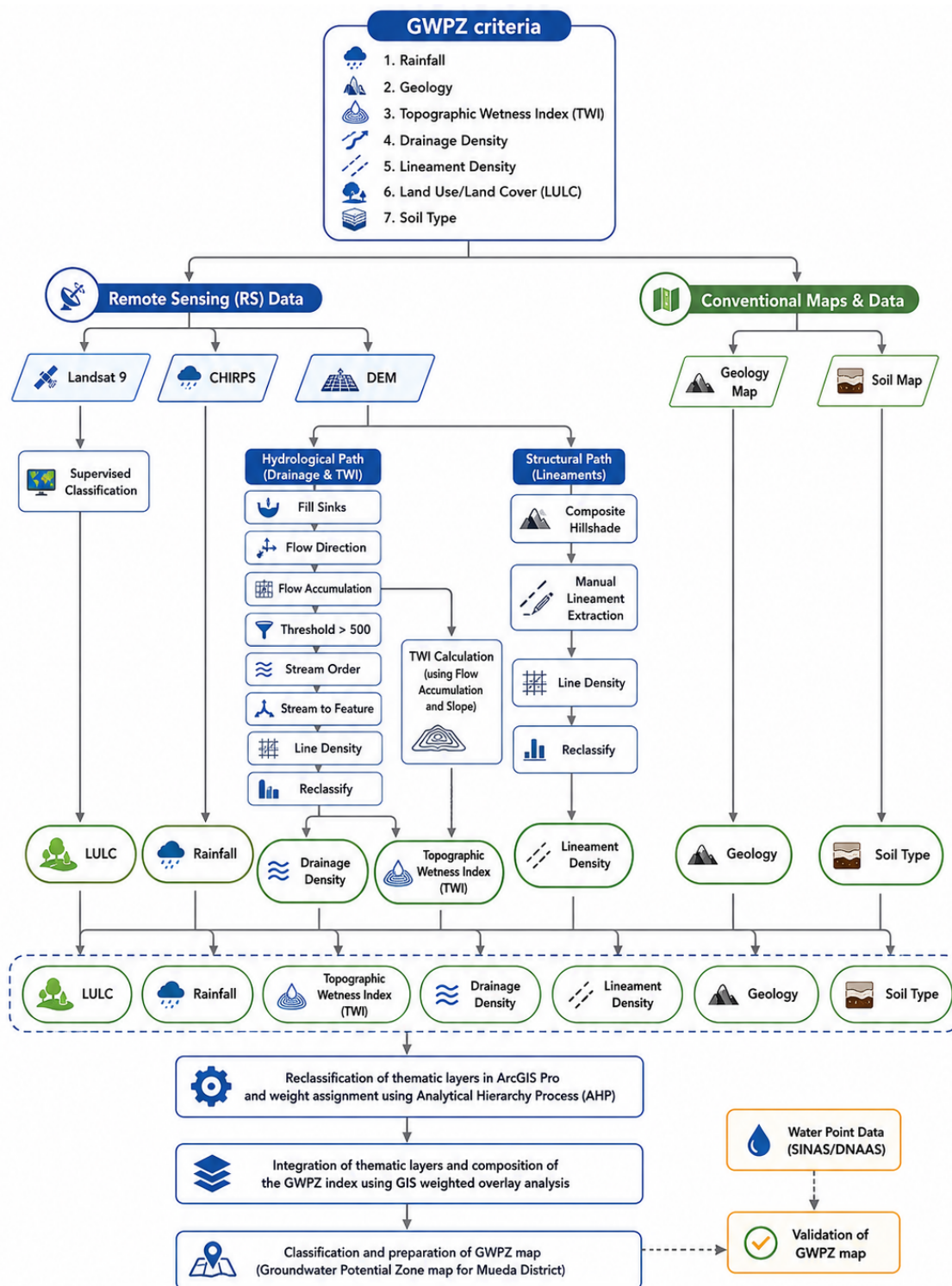


Figura 2: Fluxograma metodológico para o mapeamento de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Cabo Delgado, Moçambique. O processo integra dados de sensoriamento remoto, mapas convencionais, geração de camadas temáticas, ponderação por AHP, sobreposição ponderada em SIG e validação com fontes de água.

3.2 Dados utilizados

Foram utilizados dados provenientes de duas categorias principais: dados de Sensoriamento Remoto e dados convencionais. Os dados de sensoriamento remoto incluíram imagens Landsat 9, dados de precipitação CHIRPS e modelo digital de elevação. As imagens Landsat 9 foram utilizadas para a extracção do uso e cobertura da terra, enquanto os dados CHIRPS foram utilizados para representar a distribuição espacial da precipitação. O Modelo Digital de Elevação foi utilizado para derivar o índice topográfico de humidade, a rede de drenagem, a densidade de drenagem e apoiar a extracção visual ou manual de lineamentos por meio de composições de relevo sombreado. A declividade foi utilizada como variável auxiliar no processamento hidrológico do terreno e no cálculo do índice topográfico de humidade.

Os dados convencionais incluíram mapas geológicos, mapas de tipo de solo e dados espaciais de fontes de água. As camadas de geologia e de solos foram utilizadas como factores condicionantes do potencial de águas subterrâneas. Por sua vez, os dados de fontes de água, obtidos a partir da plataforma do Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento, foram utilizados apenas para validação independente do mapa final de potencial de águas subterrâneas (Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento, 2026; Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento, 2026).

Tabela 1: Principais dados espaciais utilizados no estudo.

Camada	Fonte provável	Relevância hidrogeológica
Precipitação	CHIRPS	Representa a disponibilidade climática de recarga subterrânea.
Geologia/Litologia	Mapas geológicos e bases cartográficas convencionais	Controla a porosidade, o fraturamento, o armazenamento e a circulação subterrânea.
Índice Topográfico de Humidade	Modelo Digital de Elevação	Indica áreas com maior tendência topográfica de acumulação de humidade.
Densidade de drenagem	Modelo Digital de Elevação hidrologicamente processado	Indica a relação entre escoamento superficial, infiltração e permeabilidade.
Densidade de lineamentos	Modelo Digital de Elevação e relevo sombreado	Indica falhas, fracturas e zonas de fraqueza estrutural favoráveis à circulação subterrânea.
Uso e cobertura da terra	Landsat 9	Afecta o escoamento superficial, a infiltração e a recarga.
Tipo de solo	Mapas de solos e bases públicas	Influencia a infiltração, a retenção e a percolação da água.
Fontes de água	SINAS/DNAAS	Utilizadas apenas para validação independente do mapa final.

3.3 Pré-processamento dos dados espaciais

Todas as camadas espaciais foram projectadas para o mesmo sistema de coordenadas, recortadas para o limite administrativo do distrito de Mueda e convertidas para formato raster com a mesma resolução espacial. As camadas foram harmonizadas no sistema de coordenadas UTM, datum WGS 84, adequado para a área de estudo. Esta padronização foi necessária para garantir a compatibilidade espacial entre as diferentes camadas durante a análise de sobreposição ponderada em ambiente SIG.

As imagens Landsat 9 foram submetidas a procedimentos de selecção, composição e correcção, com prioridade para cenas com menor cobertura de nuvens. A partir destas imagens, foi realizada a classificação supervisionada do uso e cobertura da terra. As classes resultantes foram posteriormente reclassificadas segundo a sua influência esperada na infiltração e recarga subterrânea.

3.4 Geração das camadas temáticas

A camada de uso e cobertura da terra foi derivada a partir de imagens Landsat 9 por classificação supervisionada. As classes com maior capacidade de favorecer a infiltração, como vegetação natural e áreas menos impermeabilizadas, receberam maior pontuação. Áreas construídas ou superfícies com menor capacidade de infiltração receberam menor pontuação.

A camada de precipitação foi obtida a partir dos dados CHIRPS. Os valores de precipitação foram interpolados ou agregados para representar a distribuição espacial da chuva na área de estudo. As zonas com maior precipitação foram consideradas mais favoráveis à recarga subterrânea, recebendo maior pontuação na reclassificação.

O índice topográfico de humidade foi derivado a partir do Modelo Digital de Elevação, combinando a contribuição da área de acumulação de fluxo e da declividade local. Este índice permite identificar zonas com maior tendência topográfica de concentração de humidade, sendo relevante para a análise de recarga potencial e acumulação superficial ou subsuperficial de água. Áreas com valores mais elevados de índice topográfico de humidade foram consideradas mais favoráveis ao potencial de águas subterrâneas. A declividade foi ainda utilizada como variável auxiliar no processamento hidrológico do terreno e na interpretação das condições de escoamento e infiltração.

A densidade de drenagem foi calculada a partir do Modelo Digital de Elevação, seguindo as etapas de preenchimento de depressões, direcção de fluxo, acumulação de fluxo, definição da rede de drenagem por limiar de acumulação, ordenamento dos cursos de água e conversão da drenagem para formato vectorial. Posteriormente, aplicou-se a ferramenta de densidade de linhas para obter a densidade de drenagem. Em termos hidrogeológicos, áreas com baixa a moderada densidade de drenagem podem indicar maior infiltração, enquanto densidades muito elevadas podem reflectir maior escoamento superficial.

A densidade de lineamentos foi obtida a partir da interpretação de composições de relevo sombreado derivadas do Modelo Digital de Elevação. Os lineamentos foram extraídos manualmente, considerando feições lineares associadas a fracturas, falhas ou descontinuidades estruturais. Posteriormente, foi calculada a densidade de lineamentos. Zonas com maior densidade de lineamentos foram consideradas mais favoráveis à ocorrência de águas subterrâneas, por indicarem maior possibilidade de porosidade secundária e circulação subterrânea.

As camadas de geologia e tipo de solo foram obtidos a partir de mapas convencionais. A geologia foi reclassificada de acordo com a capacidade esperada das unidades litológicas em armazenar e transmitir água. O tipo de solo foi reclassificado segundo a sua textura, permeabilidade e capacidade de favorecer a infiltração.

3.5 Reclassificação das camadas

As camadas temáticas foram reclassificadas numa escala comum de aptidão de 1 a 5, em que 1 representa muito baixo potencial e 5 representa muito alto potencial para ocorrência de águas subterrâneas. A reclassificação permitiu uniformizar variáveis com diferentes unidades de medida e torná-las comparáveis dentro do modelo de análise multicritério.

Tabela 2: Escala de reclassificação das camadas temáticas.

Valor	Classe de aptidão hidrogeológica
1	Muito baixa
2	Baixa
3	Moderada
4	Alta
5	Muito alta

3.6 Atribuição de pesos pelo Processo Analítico Hierárquico

Após a reclassificação, foi aplicado o Processo Analítico Hierárquico para atribuir pesos relativos aos factores condicionantes. O método AHP baseia-se na comparação par-a-par dos critérios, considerando a importância relativa de cada factor na ocorrência de águas subterrâneas. A matriz de comparação foi construída com base na escala de Saaty, variando de 1 a 9.

A consistência da matriz foi avaliada por meio do índice de consistência e da razão de consistência. A razão de consistência foi calculada pela Equação 2. Valores inferiores a 0,10 foram considerados aceitáveis para garantir coerência nos julgamentos utilizados na ponderação dos factores.

$$CI = \frac{\lambda_{max} - n}{n - 1} \quad (1)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (2)$$

Onde CI representa o índice de consistência, λ_{max} é o maior autovalor da matriz de comparação, n é o número de critérios, RI é o índice aleatório e CR é a razão de consistência.

Neste estudo, a matriz AHP foi composta por sete critérios. A razão de consistência obtida foi de 0,100, valor situado no limite convencionalmente aceite para aplicações do AHP. Assim, os julgamentos par-a-par foram considerados aceitáveis para a ponderação dos factores condicionantes.

Tabela 3: Pesos dos factores condicionantes obtidos pelo Processo Analítico Hierárquico.

Factor condicionante	Peso AHP (%)
Precipitação	34,3
Geologia	21,7
Índice Topográfico de Humidade	15,0
Densidade de drenagem	8,9
Densidade de lineamentos	8,1
Uso e cobertura da terra	6,8
Tipo de solo	5,2

3.7 Integração das camadas e geração do índice GWPZ

A integração das camadas temáticas foi realizada por análise de sobreposição ponderada em ambiente SIG. Cada camada reclassificada foi multiplicada pelo respectivo peso obtido pelo AHP, e os resultados foram somados para gerar o índice de potencial de águas subterrâneas.

$$GWPZ = \sum_{i=1}^n W_i \times R_i \quad (3)$$

Onde $GWPZ$ representa o índice de zonas de potencial de águas subterrâneas, W_i representa o peso atribuído ao factor i e R_i representa o valor reclassificado da camada temática correspondente.

Com base nos pesos finais obtidos pelo AHP, o índice aplicado ao presente estudo foi calculado pela Equação 4.

$$\begin{aligned} GWPZ = & (0.343 \times P) + (0.217 \times G) + (0.150 \times TWI) \\ & + (0.089 \times DD) + (0.081 \times LD) + (0.068 \times LULC) \\ & + (0.052 \times S) \end{aligned} \quad (4)$$

Onde P representa precipitação, G geologia, TWI índice topográfico de humidade, DD densidade de drenagem, LD densidade de lineamentos, $LULC$ uso e cobertura da terra e S tipo de solo.

O mapa final foi classificado em cinco classes de potencial: muito baixo, baixo, moderado, alto e muito alto. Esta classificação permite identificar espacialmente as áreas mais favoráveis para investigação hidrogeológica detalhada, perfuração de furos e gestão sustentável dos recursos hídricos subterrâneos.

3.8 Validação do mapa de potencial de águas subterrâneas

Para a validação do mapa de potencial de águas subterrâneas, foram utilizados dados espaciais de fontes de água obtidos a partir da plataforma pública do Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento. O SINAS disponibiliza, através de um visualizador cartográfico em ambiente Lizmap, camadas geográficas relacionadas com infraestruturas de água, incluindo a consulta de fontes de água, sistemas de abastecimento de água, infraestruturas gerais e estatísticas sectoriais (Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento, 2026).

No presente estudo, os pontos de fontes de água foram extraídos da camada *SINAS – Consulta de Fontes de Água* e posteriormente sobrepostos ao mapa final de zonas de potencial de águas subterrâneas. Esta sobreposição permitiu avaliar a correspondência espacial entre as classes de potencial modeladas e a localização das fontes de água existentes no distrito de Mueda.

Importa destacar que os dados de fontes de água foram utilizados apenas para validação independente do modelo, não tendo sido incorporados na etapa de geração dos pesos ou na construção do índice final de potencial de águas subterrâneas. Desta forma, evita-se circularidade metodológica e reforça-se a robustez da avaliação espacial do modelo.

A validação consistiu na extracção da classe de potencial correspondente a cada ponto de água e na análise da proporção de pontos localizados em áreas classificadas como moderado, alto e muito alto potencial. A análise de produtividade, caudal ou rendimento dos furos não foi realizada nesta fase devido à ausência de dados completos para os pontos de água disponíveis.

A plataforma SINAS está associada à Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento, entidade nacional vinculada ao Ministério das Obras Públicas, Habitação e Recursos Hídricos, responsável por informação sectorial relacionada com abastecimento de água e saneamento em Moçambique (Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento, 2026).

4 Resultados

4.1 Pesos dos factores condicionantes

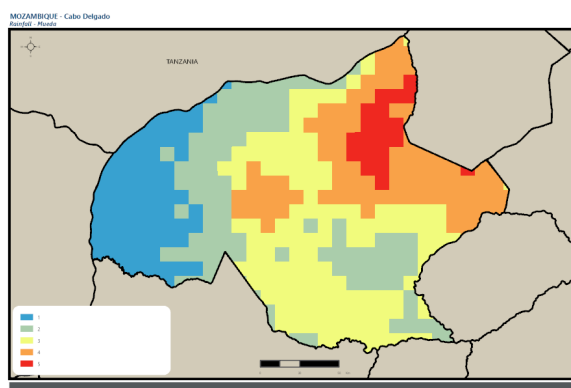
Os pesos obtidos pelo AHP indicam que a precipitação foi o factor com maior influência no modelo, representando 34,3% do peso total. Em seguida, destacam-se a geologia, com 21,7%, e o índice topográfico de humidade, com 15,0%. Estes três factores concentram 71,0% do peso total, indicando que o modelo é principalmente condicionado pela disponibilidade climática de recarga, pelas características litológicas e pela tendência topográfica de acumulação de humidade.

A densidade de drenagem e a densidade de lineamentos apresentaram pesos intermédios, com 8,9% e 8,1%, respectivamente. O uso e cobertura da terra e o tipo de solo apresentaram pesos mais baixos, com 6,8% e 5,2%, respectivamente. A razão de consistência da matriz foi de 0,100, indicando consistência

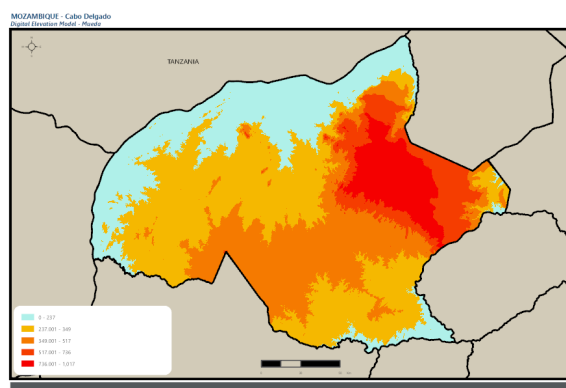
aceitável dos julgamentos par-a-par utilizados no modelo.

4.2 Mapas intermediários dos factores condicionantes

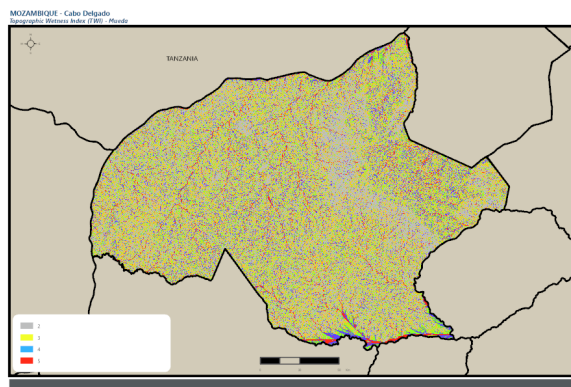
Para apoiar a interpretação do mapa final de zonas potenciais de águas subterrâneas, foram produzidos mapas intermediários dos factores condicionantes utilizados no modelo. Para melhorar a legibilidade cartográfica, estes mapas foram organizados em dois grupos: variáveis físico-hidrológicas, incluindo precipitação, Modelo Digital de Elevação, índice topográfico de humidade e densidade de drenagem; e variáveis geológicas, estruturais e de cobertura, incluindo geologia, tipo de solo, densidade de lineamentos e uso e cobertura da terra.



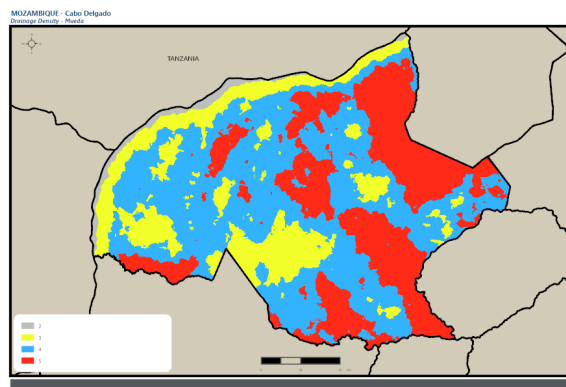
(a) Precipitação



(b) Modelo Digital de Elevação

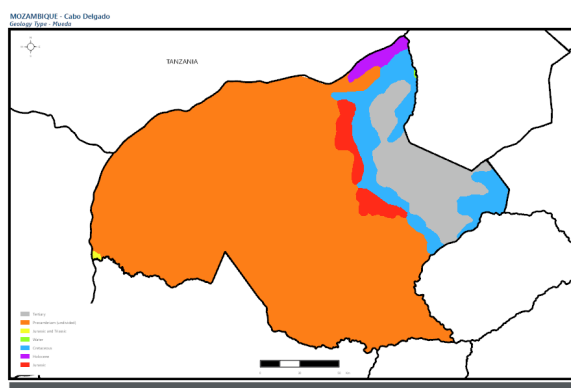


(c) Índice Topográfico de Humidade

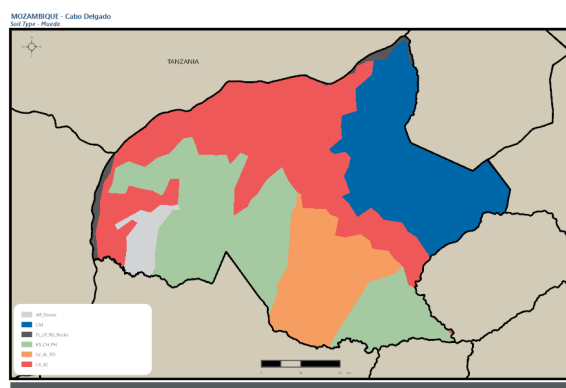


(d) Densidade de drenagem

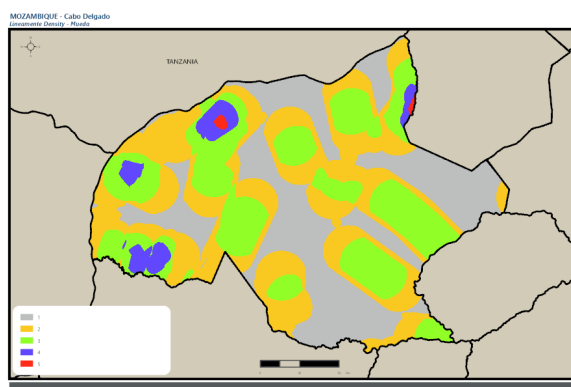
Figura 3: Mapas intermediários das variáveis físico-hidrológicas utilizadas no modelo de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda.



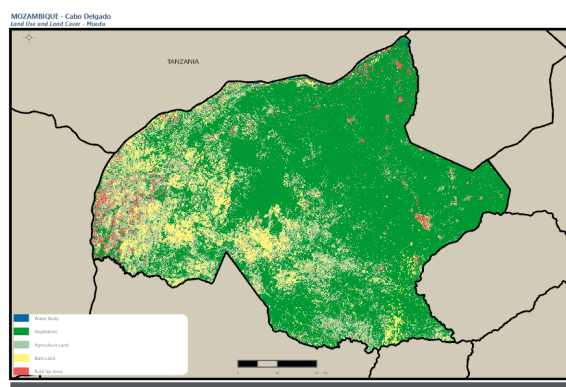
(a) Geologia



(b) Tipo de solo



(c) Densidade de lineamentos



(d) Uso e cobertura da terra

Figura 4: Mapas intermediários das variáveis geológicas, estruturais e de cobertura utilizadas no modelo de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda.

4.3 Mapa final de zonas potenciais de águas subterrâneas

O mapa final de zonas potenciais de águas subterrâneas do distrito de Mueda foi obtido a partir da integração ponderada dos sete factores condicionantes. A classificação final resultou em quatro classes observadas no distrito: muito baixo, baixo, moderado e alto potencial. A classe de potencial muito alto não foi observada dentro do limite administrativo de Mueda.

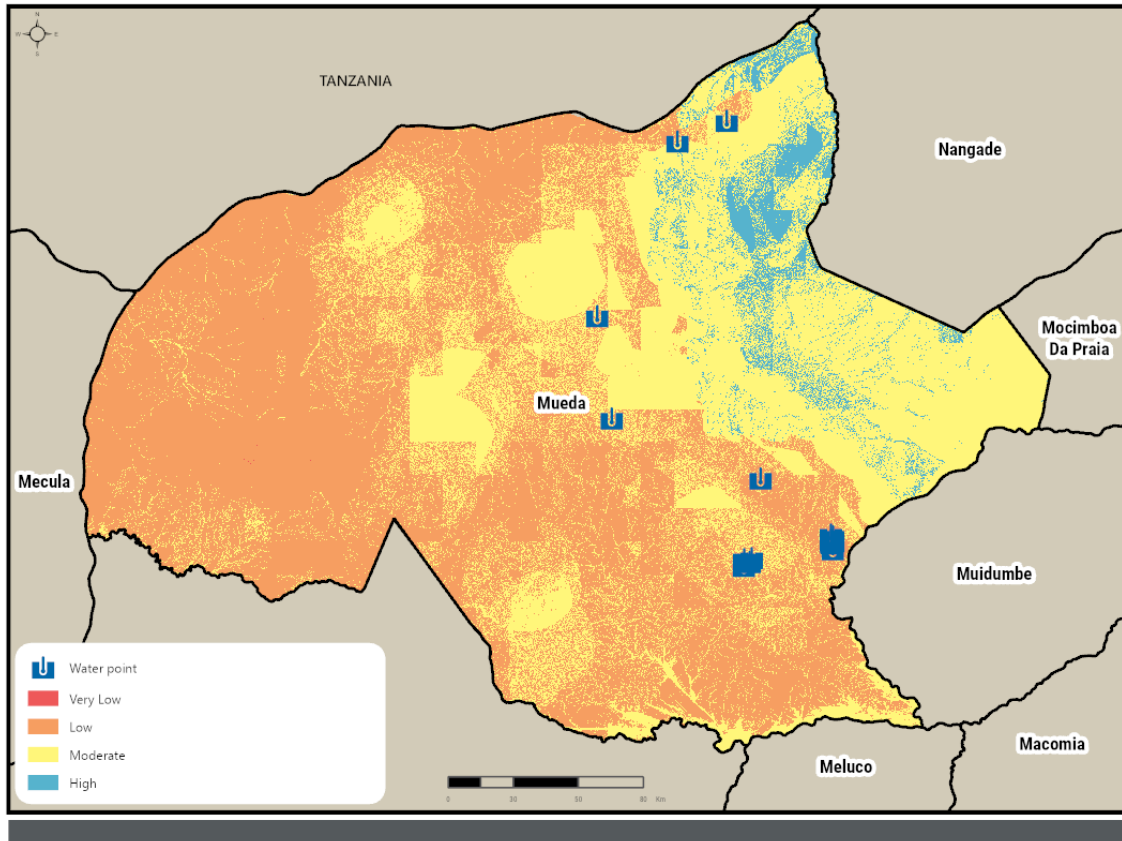


Figura 5: Mapa final de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Cabo Delgado, com sobreposição dos 17 pontos de água utilizados para validação espacial.

A distribuição espacial das classes mostra que Mueda é dominado pelas classes de baixo e moderado potencial. A classe de baixo potencial ocupa 53,70% da área analisada, constituindo a classe predominante. A classe de potencial moderado representa 42,30%, enquanto a classe de alto potencial corresponde a 3,99%. A classe de muito baixo potencial é residual, representando apenas 0,002% da área. A classe de potencial muito alto não foi observada no distrito de Mueda.

Estes resultados indicam que o distrito apresenta condições hidrogeológicas predominantemente baixas a moderadas, com ocorrência limitada de áreas de alto potencial. Esta distribuição pode estar associada às características fisiográficas de Mueda, incluindo relevo elevado, áreas de planalto e variações espaciais nos factores de recarga, acumulação topográfica de humidade, densidade de drenagem, lineamentos e geologia.

Tabela 4: Distribuição das classes de potencial de águas subterrâneas no distrito de Mueda.

Classe de potencial	Área (ha)	Percentagem (%)
Muito baixo	22,72	0,002
Baixo	601.833,01	53,70
Moderado	474.064,49	42,30
Alto	44.723,01	3,99

4.4 Validação com fontes de água

Foram observados 17 pontos de água distribuídos no distrito de Mueda, os quais foram utilizados para validação espacial do mapa final de zonas potenciais de águas subterrâneas. A sobreposição entre os pontos de água e o mapa final indica que estes se localizam predominantemente nas classes de potencial moderado e baixo. Este resultado sugere que as fontes de água actualmente existentes no distrito tendem a ocorrer em áreas de favorabilidade hidrogeológica intermédia e, em menor medida, em áreas classificadas como de baixo potencial.

Observou-se ainda que os pontos de água não abrangem a vila-sede de Mueda, concentrando-se sobretudo em outras áreas do distrito. A maior concentração foi registada em Nanhala, com 8 pontos de água, seguida de Chapa, com 4 pontos. Os restantes pontos distribuem-se de forma mais dispersa por outras áreas do distrito.

Esta distribuição espacial deve ser interpretada com cautela, uma vez que a localização dos pontos de água não depende apenas das condições hidrogeológicas naturais, mas também de factores como distribuição da população, acessibilidade, histórico de intervenções no sector de água, prioridades institucionais e decisões anteriores de implantação de infraestruturas hídricas. Ainda assim, a coincidência predominante dos pontos com áreas de potencial moderado e baixo oferece uma base preliminar para avaliar a coerência espacial do modelo.

Como os dados disponíveis correspondem principalmente à localização das fontes, e nem sempre incluem informação completa sobre caudal, produtividade, nível estático, profundidade ou qualidade da água, a validação deve ser considerada espacial e preliminar. A incorporação futura de dados de produtividade dos furos, medições hidrogeológicas de campo e levantamentos geofísicos poderá reforçar a avaliação da precisão do modelo.

5 Discussão

Os resultados indicam que Mueda é predominantemente caracterizado por potencial baixo e moderado de águas subterrâneas. A classe baixa representou 53,70% da área analisada, seguida pela classe moderada, com 42,30%. A classe alta correspondeu a 3,99%, enquanto a classe muito baixa foi residual, com 0,002%.

A classe de potencial muito alto não foi observada no distrito. Esta distribuição sugere que, apesar de existirem áreas favoráveis, o potencial hidrogeológico de Mueda é condicionado por limitações fisiográficas, incluindo relevo elevado, características de planalto e variabilidade espacial dos factores de recarga, armazenamento e circulação subterrânea.

A ausência de áreas classificadas como de potencial muito alto deve ser interpretada em função das características físicas do distrito e dos pesos atribuídos pelo AHP. Mueda situa-se numa região marcada por relevo elevado, áreas de planalto e sectores de maior dissecação topográfica. Em contextos de planalto ou relevo montanhoso, a água tende a escoar mais rapidamente em áreas inclinadas, reduzindo localmente o tempo de permanência da água no solo e a possibilidade de infiltração profunda. Nestas condições, a ocorrência de águas subterrâneas tende a depender fortemente de zonas estruturalmente favoráveis, como lineamentos, fracturas e contactos litológicos, bem como de áreas com maior acumulação topográfica de humidade.

Os pesos do AHP reforçam esta interpretação. A precipitação foi o factor mais influente, com 34,3%, indicando que a disponibilidade climática de recarga é determinante no modelo. A geologia, com 21,7%, representa o segundo factor mais importante, reflectindo o papel das unidades litológicas na capacidade de armazenamento e transmissão da água subterrânea. O índice topográfico de humidade, com 15,0%, também apresentou importância relevante, pois permite identificar zonas com maior tendência de concentração de humidade no terreno. Em conjunto, estes três factores representam 71,0% do peso total do modelo, o que mostra que a favorabilidade hidrogeológica em Mueda depende principalmente da interacção entre recarga climática, estrutura geológica e condições topográficas de acumulação de água.

A densidade de drenagem e a densidade de lineamentos apresentaram pesos intermédios, com 8,9% e 8,1%, respectivamente. A densidade de drenagem permite interpretar a relação entre escoamento superficial e infiltração, enquanto a densidade de lineamentos representa a influência de fracturas e descontinuidades estruturais na circulação subterrânea. Em áreas de planalto, estes factores são particularmente relevantes, pois a presença de estruturas lineares pode favorecer a infiltração e o armazenamento em profundidade, mesmo onde a superfície apresenta limitações topográficas.

A sobreposição dos 17 pontos de água com o mapa final mostrou que estas infraestruturas se encontram predominantemente em áreas classificadas como de potencial moderado e baixo. Este padrão pode indicar que, no distrito de Mueda, a implantação das fontes de água não está necessariamente concentrada nas zonas de maior favorabilidade hidrogeológica, mas sim em áreas onde as condições naturais permitem captação suficiente combinada com factores de acessibilidade, localização das comunidades, histórico de intervenções e necessidades locais de abastecimento. O facto de os pontos não cobrirem a vila-sede de Mueda e de se concentrarem sobretudo em Nanhala e Chapa reforça a importância de considerar a distribuição territorial das comunidades e das infraestruturas existentes ao interpretar a validação espacial do modelo.

Esta evidência também reforça uma limitação importante do estudo: a validação baseada apenas na localização dos pontos de água permite avaliar a coerência espacial geral do modelo, mas não permite

medir directamente a produtividade hidrogeológica das classes mapeadas. Assim, a presença de pontos em zonas de potencial moderado ou baixo não invalida o modelo, pois a localização de fontes de água resulta tanto de condições naturais como de decisões humanas e institucionais. Uma validação mais robusta exigiria dados de caudal, profundidade, nível estático, produtividade, sazonalidade e funcionalidade das fontes.

Do ponto de vista prático, as áreas classificadas como de alto potencial devem ser consideradas prioritárias para estudos hidrogeológicos complementares, levantamentos geofísicos e eventual selecção preliminar de locais para perfuração. As áreas de potencial moderado também são importantes, sobretudo quando coincidem com maior densidade de lineamentos, maior TWI ou proximidade a zonas de recarga. As áreas de baixo potencial não devem ser automaticamente excluídas, mas requerem maior cautela técnica, investigação de campo mais detalhada e, preferencialmente, confirmação geofísica antes de qualquer investimento em captação.

5.1 Implicações práticas

Os resultados podem apoiar:

- selecção preliminar de locais para perfuração;
- planificação de campanhas geofísicas;
- reabilitação e priorização de pontos de água;
- gestão comunitária de recursos hídricos;
- redução de custos em levantamentos hidrogeológicos;
- definição de zonas prioritárias para monitoria da água.

5.2 Limitações do estudo

As principais limitações previstas incluem:

- disponibilidade e qualidade dos dados de fontes de água;
- número reduzido de pontos de água observados no distrito;
- ausência de dados completos de produtividade, caudal ou nível estático para todos os pontos de água;
- resolução espacial das imagens e modelos digitais de elevação;

- subjectividade na atribuição de pesos pelo método AHP, ainda que controlada pela razão de consistência;
- ausência de dados hidrogeológicos contínuos;
- necessidade de validação complementar por métodos geofísicos e observações de campo.

6 Conclusão

O presente estudo demonstrou a utilidade da integração de Sensoriamento Remoto, SIG, Análise Multicritério e validação com fontes de água para o mapeamento de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Cabo Delgado. A aplicação do Processo Analítico Hierárquico permitiu atribuir pesos aos factores condicionantes e estruturar um modelo espacial coerente, com razão de consistência de 0,100.

Os resultados indicam que Mueda é predominantemente caracterizado por potencial baixo e moderado de águas subterrâneas. A classe baixa representou 53,70% da área analisada, seguida pela classe moderada, com 42,30%. A classe alta correspondeu a 3,99%, enquanto a classe muito baixa foi residual, com 0,002%. A classe de potencial muito alto não foi observada no distrito. Esta distribuição sugere que, apesar de existirem áreas favoráveis, o potencial hidrogeológico de Mueda é condicionado por limitações fisiográficas, incluindo relevo elevado, características de planalto e variabilidade espacial dos factores de recarga, armazenamento e circulação subterrânea.

A análise dos pesos AHP mostrou que a precipitação, a geologia e o índice topográfico de humidade foram os factores mais influentes no modelo, concentrando 71,0% do peso total. Isto indica que a favorabilidade hidrogeológica no distrito depende principalmente da disponibilidade climática de recarga, das características litológicas e da tendência topográfica de acumulação de humidade. A densidade de drenagem e a densidade de lineamentos também contribuíram para a interpretação espacial do potencial, especialmente em áreas onde fracturas e descontinuidades podem favorecer a circulação subterrânea.

A validação espacial com 17 pontos de água observados no distrito indicou que estas fontes se localizam predominantemente em áreas de potencial moderado e baixo, com maior concentração em Nanhala e Chapa, e sem cobertura observada na vila-sede de Mueda. Este padrão sugere uma coerência espacial preliminar entre o modelo e a distribuição das fontes existentes, mas também evidencia que a implantação de pontos de água é influenciada por factores sociais, territoriais e institucionais, e não apenas por condições hidrogeológicas naturais. A ausência de dados completos de produtividade, caudal, nível estático, profundidade e qualidade da água limita a validação quantitativa do modelo. Assim, recomenda-se que futuras investigações integrem levantamentos geofísicos, inventários hidrogeológicos detalhados e dados de produtividade dos furos para reforçar a precisão do mapeamento.

Conclui-se que o mapa produzido constitui uma ferramenta útil para apoio à decisão, podendo orientar

a identificação preliminar de áreas prioritárias para investigação hidrogeológica, perfuração, reabilitação de pontos de água e planeamento sustentável dos recursos hídricos subterrâneos no distrito de Mueda. No entanto, o mapa deve ser utilizado como instrumento de triagem espacial e não como substituto de estudos hidrogeológicos e geofísicos de campo.

Declaração de independência institucional

Este estudo foi desenvolvido de forma independente pelo autor e não representa oficialmente nenhuma instituição académica, profissional, governamental ou organização não governamental. A menção a instituições, plataformas ou bases de dados, tais como o Instituto Nacional de Estatística, o Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento e a Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento, refere-se apenas ao uso de dados públicos ou fontes de informação utilizadas para fins científicos.

Financiamento

Este estudo não recebeu financiamento específico de nenhuma agência pública, privada ou organização internacional.

Conflito de interesses

O autor declara não haver conflito de interesses.

Disponibilidade dos dados

Os dados utilizados neste estudo incluem produtos de sensoriamento remoto, modelos digitais de elevação, dados climáticos, mapas convencionais e dados públicos de fontes de água. As fontes específicas dos dados são devidamente citadas ao longo do artigo e nas referências bibliográficas.

Agradecimentos

O autor agradece às entidades que disponibilizam dados públicos relevantes para investigação científica, incluindo o Instituto Nacional de Estatística, o Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento e a Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento.

Como citar este artigo

A referência recomendada para citar este manuscrito é:

Maússe, J. F. (2026). *Mapeamento de zonas potenciais de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Norte de Moçambique: Integração de sensoriamento remoto, AHP em SIG e validação com fontes de água* [Manuscrito não publicado].

Sobre o autor

Jubílio Filiano Maússe é licenciado em Ciências de Informação Geográfica pela Universidade Eduardo Mondlane, tendo concluído a sua formação em 2023. Actualmente, actua como Oficial Sénior de Dados e GIS na REACH Initiative, em Cabo Delgado, Moçambique. Os seus interesses académicos e profissionais incluem Sistemas de Informação Geográfica, Sensoriamento Remoto, cartografia aplicada, análise espacial, gestão de dados geográficos e apoio à tomada de decisão territorial.

O presente estudo foi desenvolvido de forma independente, com foco na aplicação de métodos geoespaciais para o mapeamento do potencial de águas subterrâneas no distrito de Mueda, Cabo Delgado. As opiniões, análises e conclusões apresentadas neste artigo são da exclusiva responsabilidade do autor e não representam oficialmente a REACH Initiative, a Universidade Eduardo Mondlane ou qualquer outra instituição.

Referências

- Allafta, H., Opp, C., & Patra, S. (2021). Identification of Groundwater Potential Zones Using Remote Sensing and GIS Techniques: A Case Study of the Shatt Al-Arab Basin. *Remote Sensing*, 13(1), 112. <https://doi.org/10.3390/rs13010112>
- Arabameri, A., Roy, J., Saha, S., Blaschke, T., Ghorbanzadeh, O., & Bui, D. T. (2019). Application of Probabilistic and Machine Learning Models for Groundwater Potentiality Mapping in Damghan Sedimentary Plain, Iran. *Remote Sensing*, 11(24), 3015. <https://doi.org/10.3390/rs11243015>
- Direcção Nacional de Abastecimento de Água e Saneamento. (2026). SINAS [Acedido em 24 de junho de 2026]. <https://dnaas.gov.mz/projectos/sinas>
- El Sherbini, R. A., Ghazala, H. H., Ahmed, M. A., Ibraheem, I. M., Al Ajmi, H. F., & Genedi, M. A. (2025). Mapping Groundwater Potential Zones in the Widyan Basin, Al Qassim, KSA: Analytical Hierarchy Process-Based Analysis Using Sentinel-2, ASTER-DEM, and Conventional Data. *Remote Sensing*, 17(5), 766. <https://doi.org/10.3390/rs17050766>
- Instituto Nacional de Estatística. (2024, junho). *Estatísticas do Distrito de Mueda, 2019–2023* (rel. téc.). Instituto Nacional de Estatística, Delegação Provincial de Cabo Delgado. Maputo, Moçambique.

Nainggolan, L., Ni, C.-F., Darmawan, Y., Lo, W.-C., Lee, I.-H., Lin, C.-P., & Hiep, N. H. (2024). Cost-Effective Groundwater Potential Mapping by Integrating Multiple Remote Sensing Data and the Index–Overlay Method. *Remote Sensing*, 16(3), 502. <https://doi.org/10.3390/rs16030502>

Sistema Nacional de Informação de Água e Saneamento. (2026). SINAS – Consulta de Fontes de Água [Acedido em 24 de junho de 2026]. <https://www.sinasmz.com/lizmap/lizmap/www/index.php/view/>