



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciência de Informação Geográfica

**Mapeamento de Zonas com Potencial para o
Armazenamento de Águas Subterrâneas usando
Técnicas de Detecção Remota.**

Caso de Estudo Bacia Hidrográfica do Umbelúzi

Autora: Gílvia Lurdes Tsandzana

Maputo, Maio de 2024



UNIVERSIDADE
E D U A R D O
MONDLANE

FACULDADE DE CIÊNCIAS

Departamento de Matemática e Informática

Trabalho de Licenciatura em
Ciência de Informação Geográfica

**Mapeamento de Zonas com Potencial para o
Armazenamento de Águas Subterrâneas usando
Técnicas de Detecção Remota.**

Caso de Estudo Bacia Hidrográfica do Umbelúzi

Autora: Gílvia Lurdes Tsamdzana

Supervisor: Lic. Francesse Mauro Bacião, UEM

Maputo, Maio de 2024

Dedicatória

Primeiramente dedico este trabalho a minha mãe Deolinda Carlos Uasse por ser o meu alicerce, ao meu pai Jorge Alberto Tsandzana (em memória), aos familiares, amigos e colegas que também contribuem para o meu sucesso.

Declaração de Honra

Declaro por minha honra que o presente Trabalho de Licenciatura é resultado da minha investigação e que o processo foi concebido para ser submetido apenas para a obtenção do grau de Licenciada em Ciências de Informação Geográfica, na faculdade de Ciências da Universidade Eduardo Mondlane.

Maputo, Maio de 2024

(Gílvia Lurdes Tsandzana)

Agradecimentos

Agradeço a Deus por tudo que têm feito por mim, por me dar entendimento de todas matérias dadas pelos docentes, por ser o meu maior guia em diversos momentos e pelas bênçãos infinitas.

À Universidade Eduardo Mondlane, Faculdade de Ciências, Departamento de Matemática e Informática, curso de Licenciatura em Ciências de Informação Geográfica agradeço pela oportunidade de frequentar o ensino superior nesta instituição.

Ao meu supervisor doutor Francesse Mauro Bacião por ser meu guia na elaboração do trabalho e pela paciência que teve comigo, que Deus o abençoe.

Aos docentes endereço o meu agradecimento por terem feito de mim, uma pessoa com entendimento na área de Ciências de Informação Geográfica, pelo profissionalismo de cada um, para que eu consiga entender as matérias de cada cadeira.

Ao Dr. Isaías Raiva e Dr. Fernando Congolo pelo apoio incondicional.

Aos meus pais Jorge Tsandzana (em memória) e Deolinda Uasse, minha irmã Isalgina Uasse, que me ajudaram sempre em todas as áreas que tanto necessitei do apoio deles, aos meus primos, meu irmão, meus avôs e tios.

Aos meus colegas que acabei criando laços de amizade e irmandade, pela simplicidade, compreensão e com o espírito de ajuda mútua, por terem contribuído muito pelo meu sucesso académico e social.

Aos meus grandes amigos (Vânia de Glória, Fred Nhacudime e Jéssica Madepule) que mesmo não fazendo CIG me ajudaram na elaboração do trabalho.

Obrigada a todos vós.

Resumo

A utilização de técnicas de Detecção Remota (DR) e Sistema de Informação Geográfica (SIG), no mapeamento de zonas com potencial de armazenamento de águas subterrâneas, geram elementos para a análise e apoio ao processo de tomada de decisão com relação à exploração dos recursos hídricos da bacia. O objectivo do presente trabalho, consiste em mapear aquíferos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi, usando técnicas de DR. O mapeamento de aquíferos subterrâneos foi realizado com base na DR e no SIG, que são ferramentas de inovações e benefícios em comparação a outros métodos devido ao custo do estudo.

Para atingir o objectivo desta pesquisa, foi utilizado o método do relevo sombreado para extração dos lineamentos, os mesmos foram elaborados através dos dados do ASTER (DEM) e do Landsat 8 (OLI). Através destes dados, foi possível identificar estruturas que influenciam no armazenamento da água subterrânea, com base em aspectos do meio físico natural (solo, uso e ocupação do solo, declividade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, precipitação e geologia). Foram utilizados conhecimentos de geologia estrutural e hidrogeologia aliada ao processamento digital de imagens de satélite para confirmação da existência de fracturas, que foram processadas nos *softwares* Envi 5.3 e ArcGIS 10.4.1.

Foi também utilizado o Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP) no mapeamento, para auxiliar na definição dos pesos aos diferentes critérios, para cada mapa foram atribuídas cargas nas suas diferentes classes e pesos de acordo com sua influência. A integração desses mapas e a aplicação do Método de Análise Hierárquica no ambiente SIG, permitiram a elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas em 4 classes de potencial (baixo, médio, alto e muito alto). A partir deste processo, foram identificadas zonas com potencial de armazenamento da água subterrânea na área de estudo sendo que: a estação seca-fria tem baixo potencial (5.45 km²), médio potencial (266.40 km²), alto potencial (1716.32 km²) e potencialidade muito alto (55.79 km²), a estação húmida-quente tem baixo potencial (17.26 km²), médio potencial (280.16 km²), alto potencial (1713.64 km²) e potencialidade muito alto (20.28 km²) e o DEM tem baixo potencial (8.08 km²), médio potencial (272.06 km²), alto potencial (1692.64 km²) e potencialidade muito alto (74.25 km²)

Palavras-chave: DR, SIG, AHP e Aquíferos.

Abreviaturas

AHP- Análise Hierárquica de Processos

ARA-S- Administração Regional de Águas do Sul

ASTER- Radiómetro Avanzado de Emissão e Reflexão Espacial

CENACARTA- Centro Nacional de Cartografia e Teledeteção

CRU- Unidade de Pesquisa Climática

DEM- Modelo Digital de Elevação

DGBUM- Divisão de Gestão da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi

GTK – Pesquisa Geológica da Finlândia

MAE- Ministério de Administração Estatal

NWI- Índice Normalizado de Diferença de Água

OLI- Imageador Terrestre Operacional

REM- Radiação Electromagnética

SIG- Sistema de Informação Geográfica

SWIR- Infravermelho de ondas curtas

TIR- Infravermelho Termal

USGS- Serviços Geológicos dos Estados Unidos

VNIR- Infravermelho Próximo

Índice

Dedicatória.....	i
Declaração de Honra.....	ii
Agradecimentos.....	iii
Resumo.....	iv
Abreviaturas.....	v
Lista de Figuras.....	vii
Lista de Tabelas.....	viii
Lista de Gráficos.....	viii
Introdução.....	1
1.1. Contextualização.....	1
2.1. Problemática.....	2
3.1. Relevância.....	3
4.1. Justificativa.....	4
5.1. Objectivos.....	4
Revisão de Literatura.....	5
2.1 Detecção Remota.....	5
2.1.1 Radiação Electromagnética.....	5
2.1.2 Espectro Eletromagnético.....	6
2.1.3 Comportamento Espectral da Água.....	8
2.1.4 Características das Imagens Satélites.....	10
2.2 Hidrologia.....	11
2.2.1 Ciclo Hidrológico.....	12
2.2.2 Água Subterrânea.....	12
2.2.3 Aquífero.....	12
2.2.4 Geologia da Água Subterrânea.....	13
2.2.5 Aquífero Fracturado.....	13

2.2.6	Bacia Hidrográfica	14
2.2.7	Divisores da Bacia Hidrográfica	15
	Enquadramento da Área de Estudo.....	16
3.1	Localização Geográfica da Área de Estudo.....	16
3.2	Características Geoambientais	17
3.2.1.	Uso e Ocupação do Solo	17
3.2.2.	Clima e Precipitação	18
3.2.3.	Geologia	18
3.2.5.	Pedologia.....	20
	Material e Métodos	21
4.1	Materiais.....	21
4.2	Métodos	21
4.2.1.	Fluxograma Metodológico.....	22
4.2.2.	Procedimentos Metodológicos	23
	Resultados e Discussão	29
5.1	Zonas com Potencial para o Armazenamento de Água Subterrânea	29
	Conclusões e Recomendações	34
6.1	Conclusão	34
6.2	Recomendações	34
	Referências Bibliográficas	35

Lista de Figuras

Figura 1:	Direção de propagação da radiação eletromagnética.....	6
------------------	--	---

Figura 2: Espectro Electromagnético.....	6
Figura 3: Ciclo Hidrológico	12
Figura 4: Representação do Aquífero.....	13
Figura 5: Localização Área de Estudo.....	17
Figura 6: Fluxograma Metodológico	22
Figura 7: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Seca-Fria.....	30
Figura 8: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Húmida-Quente	32
Figura 9: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água a partir do DEM.....	33

Lista de Tabelas

Tabela 1: Zonas do espectro Electromagnético.....	6
Tabela 2: Características dos subsistemas do sensor ASTER.....	10
Tabela 3: Características dos subsistemas do satélite Landsat.....	11
Tabela 4: Características dos dados	21
Tabela 5: Descrição das Ferramentas	24
Tabela 6: Matriz de comparação entre os Critérios.....	25
Tabela 7: Escala Fundamental adaptada de Satty	26
Tabela 8: Classificação dos Factores ponderados que influenciam nas zonas com o potencial para o armazenamento de águas subterrâneas na área de Estudo	26

Lista de Gráficos

Gráfico 1: Representação Áreal das Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Seca-Fria.....	29
Gráfico 2: Representação Áreal das Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Húmida-Quente	31
Gráfico 3: Representação Áreal das Zonas com potencial para o Armazenamento de Água a partir do DEM.....	32

Introdução

O primeiro capítulo é referente a introdução do trabalho, onde serão abordados conteúdos referentes ao mapeamento de zonas com potencial para o armazenamento de águas subterrâneas usando técnicas de Detecção Remota, tendo como caso de estudo a Bacia Hidrográfica do Umbelúzi, o presente capítulo compreende ainda a problemática, relevância, justificativa bem como os objectivos de estudo.

1.1. Contextualização

A água é um recurso natural essencial à vida e por vezes, um factor determinante para o desenvolvimento socioeconómico e desenvolvimento de um país (Benjmel *et al.*, 2020). As águas subterrâneas representam, para muitos países, uma origem extremamente importante pela contribuição que tem para os diferentes usos. O peso relativo que as águas subterrâneas têm depende fundamentalmente das características hidrogeológicas e do clima das diferentes regiões (Silva, 2008). Em hidrogeologia existe uma dificuldade natural na exploração das águas subterrâneas em aquíferos fracturados, devido à imprevisibilidade dos sistemas de armazenamento de água, sistemas esses que são compostos principalmente por fracturas, sendo muitas vezes de difícil determinação o que se traduz por reservatórios aleatórios, descontínuos e de pequena extensão (Ribeiro *et al.*, 2011). Os aquíferos são formação geológica com porosidade e permeabilidade suficiente para armazenar e transmitir quantidade significativa de água (Teixeira *et al.*, 2000).

Como Moçambique está a jusante é afetado pela escassez de água mais do que a região a montante, o aumento da demanda da água para os setores de abastecimento doméstico, irrigação agrícola e indústria na bacia hidrográfica é cada vez mais preocupante, ganhando mais destaque com o crescimento populacional, numa altura de grandes incertezas de variáveis hidrológicas e climáticas na região da África Austral (Droogers *et al.*, 2014 citado por Notisso, 2020). A preocupação com a garantia da segurança hídrica para abastecimento doméstico é crescente no sul de Moçambique tendo em conta a situação atual, especialmente devido ao agravamento da escassez de água (Notisso, 2020). A Detecção Remota, tem sido usada para investigação de cursos de água e mapeamento de zonas com condições primárias e secundárias para o armazenamento de águas subterrâneas, a partir de técnicas como o relevo sombreado é possível identificar fracturas através de imagens satélites. O presente trabalho tem como objectivo mapear aquíferos subterrâneos da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi usando técnicas de Detecção Remota.

2.1. Problemática

O mapeamento de estruturas geológicas, contribui para o entendimento dos processos de migração e gênese das ocorrências de acumulação de águas subterrâneas, as pesquisas em aquíferos fracturados precisam de investigações contínuas e detalhadas, devido a alta variabilidade do sistema de fracturamento. Neste sentido, diversas pesquisas são feitas empregando técnicas de Detecção Remota, geoprocessamento e análise espacial de lineamentos nos estudos dos aquíferos fracturados (Nascimento, 2019).

De acordo com Jaime Timba, Director da Divisão de Gestão da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi (DGBUM) o mapeamento dos aquíferos subterrâneos realizado para a Bacia Hidrográfica do Umbelúzi até hoje, foram feitos com base no método batimétrico, método este que quando comparados com a DR e SIG, acarretam muitos custos o que de uma certa forma torna difícil realizar este tipo de estudos com frequência. Considerando a data da realização deste mapeamento e a dinâmica dos aquíferos verifica-se aqui uma necessidade de actualização, cartográfica dos mesmos.

Os dados de Detecção Remota tendem a ser mais abrangentes em cobertura geográfica, tendo como vantagem a eficácia no uso de imagens satélite entre outras tecnologias de DR, precisão, menor custo, velocidade para fornecer informações actualizadas, acessibilidade da disponibilidade de imagens satélites grátis ou de baixo custo. A Detecção Remota, quando aplicada para este tipo de mapeamento, pode fornecer várias soluções como: a identificação de áreas propensas a inundação, planeamento e gestão de recursos hídricos, redução da escassez da água, melhoria na eficiência do uso da água, redução dos impactos ambientais (Wang, *et al.*, 2023).

3.1. Relevância

O uso da Detecção Remota e Sistemas de Informação Geográfica no mapeamento de águas subterrâneas, possibilita o desenvolvimento eficiente e controlado dos recursos hídricos subterrâneos, gerando também elementos para a análise e apoio ao processo de tomada de decisão com relação à exploração desse recurso hídrico na bacia (Miguel *et al.*, e Ribeiro, 2011).

Moçambique é um país a jusante onde a maioria dos rios flui dos países vizinhos, como resultado, o mesmo enfrenta dois tipos de situações desafiadoras que são a inundações durante a estação chuvosa e secas durante a estiagem causadas pela acção da natureza e intervenção humana, esse cenário tem o seu impacto negativo na situação socioeconómica do desenvolvimento do País. Há uma impressão de que a principal fonte de água no País é a água superficial, contudo, a água subterrânea é utilizada em larga escala em várias cidades para o abastecimento de água potável, a cidade de Maputo é abastecida por águas superficiais e a região metropolitana de Maputo (por urbano) é abastecida por águas superficiais e subterrâneas (SADC, 2019). Tendo em consideração as condições hidrogeológicas regionais e locais, o uso e ocupação dos terrenos, as demandas hídricas atuais e futuras, e as necessidades específicas dos diversos usuários, a Detecção Remota em mapeamento de zonas com potencial para o armazenamento de águas subterrâneas, pode ajudar a sociedade assim como a economia na identificação de aquíferos fracturados em zonas cristalinas bem como aluvionares para a implementação (abertura) de poços para a exploração da água subterrânea, e também a monitorar a degradação dos aquíferos, e a identificar áreas onde medidas de preservação e conservação dos recursos hídricos são necessários (Gheyi *et al.*, 2012).

Rezende (2007) em seu estudo diz que o uso de dados obtidos a partir de sensores remotos para investigação hidrogeológica, constitui-se num elemento de inovação tecnológica, permitindo obter-se, com certa facilidade, informações, tanto no domínio espacial como temporal, cruciais para o êxito das pesquisas. Em (2019) Rezende, sustenta que o aprofundamento dos estudos em aquíferos fracturados é necessário para melhorar o entendimento sobre a disponibilidade hídrica dos aquíferos fracturados, gerando assim, conhecimentos para consolidar políticas confiáveis de gestão de recursos hídricos.

4.1. Justificativa

A escolha da bacia hidrográfica do Rio Umbelúzi como área de estudo, deve-se ao facto de que o rio Umbelúzi é um sistema de recursos hídricos que enfrenta alguns dos principais desafios dos rios transfronteiriços na África Austral, ou seja, alta variabilidade climática, escassos recursos hídricos, usuários à montante versus a jusante, crescimento populacional e expansão da irrigação (Sweco Associantes, 2005, citado por Notisso 2020).

Embora não se observe directamente a subsuperfície, as técnicas de Detecção Remota têm sido efectivamente usada na exploração de águas subterrâneas. A análise e interpretação das imagens de sensores remoto permitem mapear e estudar os factores da superfície que controlam a infiltração, como configurações geológicas, cobertura do solo, redes de drenagem e clima. Essas características reflectem indirectamente as características hidrogeológicas ocultas do subsolo, como a capacidade de recarregar, acumular e armazenar água subterrânea. Estudar as influências desses factores na capacidade de infiltração da água de uma maneira integrada usando o Sistema de Informação Geográfica (SIG) facilita um delineamento mais eficaz de zonas com diferentes potencialidades de armazenamento da água subterrânea.

5.1. Objectivos

Objectivos Gerais

Mapear aquíferos subterrâneos a Bacia Hidrográfica do Umbelúzi usando técnicas de Detecção Remota.

Objectivos Específicos

- Identificar as variáveis que influenciam na infiltração da água na superfície para a recarrega dos aquíferos;
- Mapear os lineamentos com recurso ao método do relevo sombreado;
- Integrar todas variáveis em um modelo SIG, usando método AHP para gerar o mapa de potencialidade do armazenamento de água subterrânea na bacia do Umbelúzi.

Revisão de Literatura

O segundo capítulo apresenta um enquadramento teórico sobre a temática. Este capítulo visa abordar conceitos fundamentais como Detecção Remota, Sistemas de Informação Geográfica, Hidrologia, Bacia Hidrográfica, entre outros.

2.1 Detecção Remota

Segundo Sampaio (2007), a Detecção Remota é o processo de aquisição de informação de objectos, áreas ou fenómenos, sobre ou próximos da superfície terrestre, por um sensor de radiação electromagnética colocado acima desta superfície. Entretanto Sousa e Sílvia (2011), definem a DR como uma técnica que nos permite obter informação sobre um objecto ou fenómeno pela análise de dados recolhidos por um dispositivo que não está em contacto com o objecto ou fenómeno, ou seja, sem contacto mecânico. Para Oliveira S. A. (1995), a aplicação da DR em pesquisa hidrogeológica deve-se levar em conta o tratamento e a interpretação dos dados orbitais, permitindo que se construa um modelo evolutivo tectónico-estrutural, a partir do qual se possa reconhecer as principais feições estruturais resultantes de deformações que ocorreram na área de estudo. Miguel *et al.* (2022) fala do principal objectivo da DR em mapeamentos de zonas com potencial para o armazenamento de águas subterrâneas, que é fornecer informações precisas e atualizadas sobre a localização, extensão e qualidade dos aquíferos subterrâneas, isso ajuda a identificar e avaliar o potencial de água em uma região, o que pode fundamentar para a gestão sustentável e eficiente dos recursos hídricos, também ajuda a monitorar a degradação dos aquíferos e a identificar áreas onde medidas de preservação e conservação dos recursos hídricos são necessários.

2.1.1 Radiação Electromagnética

Novo e Ponzoni (2001), definem a REM como o resultado da emissão de pequenos pulsos de energia, sob uma perspectiva ondulatória, a REM se propaga na forma de ondas formadas pela oscilação dos campos eléctrico e magnético. Para Fernandes, (2019) a REM consiste no campo eléctrico (E) que varia em magnitude numa direcção perpendicular à direcção de deslocamento da radiação. E o campo magnético (M) que é orientado perpendicularmente ao campo eléctrico. Ambos se deslocam à velocidade da luz (c), os campos (E) e (M) estão representados na figura 1 que segue:

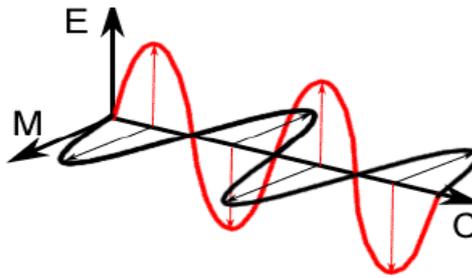


Figura 1: Direção de propagação da radiação eletromagnética na forma de uma onda, em função das oscilações ortogonais dos campos magnético (M) e elétrico (E), (Sousa e Silva, 2011).

2.1.2 Espectro Eletromagnético

É a distribuição da intensidade da radiação eletromagnética em todo o seu intervalo, com relação ao seu comprimento de onda ou frequência (Sousa e Silva, 2011). Por tanto, quanto ao Menesses e Almeida, (2012) o espectro eletromagnético é conhecido quando se estende os comprimentos de onda dos raios cósmicos aos comprimentos de corrente alternada emitidos pelas redes de alta tensão. Há estrelas que emitem radiações eletromagnéticas com máximo de irradiância em comprimentos de onda do raio-X e outras, como o Sol, que emitem seu máximo de radiação eletromagnética no visível. O homem já construiu fontes artificiais de REM que geram ondas com comprimentos de 10⁻¹⁵ a 10⁸m, como ilustra a figura 2, na tabela 1 são apresentadas as zonas do espectro e seus intervalos de comprimento de onda usados em DR.

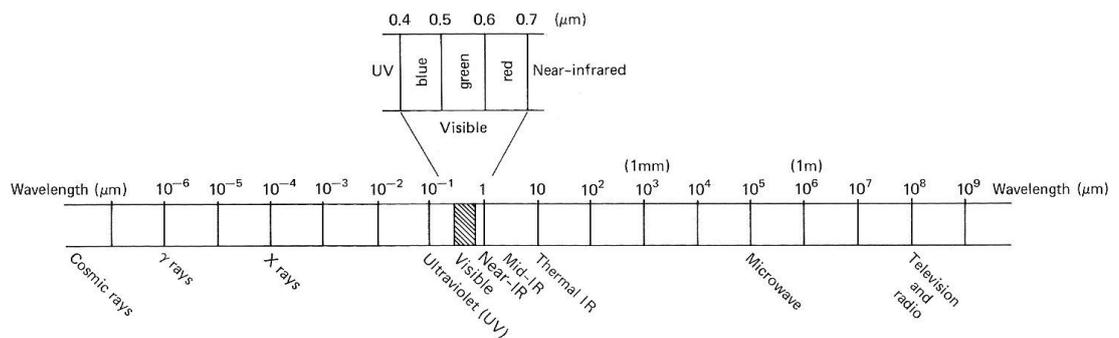


Figura 2: Espectro Electromagnético, (Lillesand & Kiefer, 1994 citados por Sousa e Silva, 2011).

Tabela 1: Zonas do espectro Electromagnético, (Sousa e Silva, 2011).

Zona do Espectro	Intervalo do Comprimento de Onda
Ultravioleta	0,30 – 0,38 μm

Visível	Azul	0,42 – 0,49 μm
	Verde	0,49 – 0,58 μm
	Vermelho	0,58 – 0,70 μm
Infravermelho	IV Próximo	0,70 – 1,30 μm
	IV Médio	1,30 – 3 μm
	IV Térmico	> 3 μm
Micro-onda		1mm – 1m

A Detecção Remota compreende quatro parâmetros diferentes em sua resolução que são espaciais, espectral, radiométricas e temporal.

A **resolução espacial** corresponde à área do terreno representada por um pixel na imagem, o tamanho do pixel está directamente relacionado à informação contida na imagem, quanto menor o pixel mais detalhes podem ser extraídos da imagem, logo melhor será a sua resolução (Novo e Ponzoni, 2001). Segundo Sousa e Silva (2011) a resolução espacial refere-se à área do terreno observado por um radiómetro em cada instante, e define a distância mínima entre dois objectos que um sensor consegue registar distintamente, a distância entre o alvo e o sensor tem um papel importante na determinação do detalhe da informação obtida. Por outro lado, Menesses e Almeida (2012) destacam a importância do parâmetro do sensor, pois ela determina o tamanho do menor objecto que pode ser identificado em uma imagem. Por definição, um objecto somente pode ser resolvido (detectado), quando o tamanho deste é, no mínimo, igual ou maior do que o tamanho do elemento de resolução no terreno, ou seja, da resolução espacial.

A **resolução espectral** refere-se a um intervalo específico de comprimento de onda do espectro-electromagnético armazenado pelo sensor, que indica a quantidade de regiões do espectro electromagnético e pelo intervalo de comprimento de onda, estas imagens denominam-se bandas espectrais e representam a energia registrada pelos detectores do sensor numa determinada região do espectro electromagnético (Atunes, 2004). Por outro lado, Iwai (2003) define a resolução espectral como a quantidade e largura dos intervalos de comprimento de onda do espectro electromagnético medido pelo sistema sensor, que são sensíveis a determinados intervalos de comprimento de onda ou bandas, quanto maior o número de canais e mais estreitos os intervalos de comprimento de onda melhor será a resolução espectral e mais precisas e completas serão as informações obtidas. Zou, (2013) sustenta que a resolução apresenta um número de bandas que nos sensores existentes nos satélites conseguem discretizar, quando a energia solar é emitida pela superfície através de ondas atingem a superfície terrestre parte desta é absorvida e reflectida.

A **resolução temporal** de um sistema de Detecção Remota, consiste no período de tempo decorrido entre duas observações consecutivas do mesmo local, ou seja, o tempo que um satélite leva a completar um ciclo orbital completo (Sousa e Sílvia, 2011). Entretanto Cunha, (2021) justifica que a resolução temporal de um sistema, refere-se ao mínimo intervalo de tempo entre a aquisição de duas imagens consecutivas de uma mesma área. Este ciclo está relacionado às características orbitais da plataforma (altura, velocidade, inclinação) e ao ângulo total de abertura do sensor, quanto maior for o intervalo de tempo, menor é a resolução temporal.

A **resolução radiométrica** corresponde a capacidade de distinguir alvos com radiâncias diferentes, a mesma define o intervalo e o número discernível de valores discretos de brilho, dados com 8 bits de resolução radiométrica tem 256 níveis de brilho, assim quanto mais alto a quantidade de níveis de cinza maior a resolução radiométrica (Wagner, 2004). A energia radiante que atinge o sensor é registrada e transformada em valores digitais, que dependem do número de bites por meio de registro utilizado para armazenar informações e depois transforma-las em sinal gráfico (Iwai, 2003)

2.1.3 Comportamento Espectral da Água

De um modo geral, a reflectância da água limpa diminui com o aumento dos comprimentos de onda, ou seja, na faixa mais utilizada em Detecção Remota verificam-se as maiores reflectância na região do visível, mais especificamente nos comprimentos de onda do azul e verde, decrescendo gradualmente na direção do infravermelho (Novo & Ponzoni , 2001). Como destacam Sousa e Sílvia, (2011) ao afirmarem que os comprimentos de onda mais curtos da região do visível são reflectidos em maior quantidade comparativamente com os restantes, facto que confere a água a sua cor azul ou esverdeada. Para os comprimentos de onda maiores do visível e do infravermelho próximo há uma maior absorção, sendo praticamente nula a reflectividade a partir do infravermelho próximo. Para comprimentos de onda no vermelho ou infravermelho, a água surgirá com a cor negra. Existem factores importantes na definição das varias tonalidades da água, que podem aparecer quando observadas por meio da Detecção Remota, tais como a presença de sedimentos nas camadas superiores da água contribuem para uma reflectância mais elevada, a existência de algas cuja a clorofila absorve mais azul e reflecte o verde, fazendo com que a aparência da água seja mais verde, alguns rios cujas bacias hidrográficas são cobertas predominantemente por florestas, apresentam uma cor castanho-amarelada devido a concentração de taninos (substância adstringente que existe na casca de algumas espécies florestais) libertados por decomposição vegetal.

O **processamento digital de imagens** consiste na execução de operações matemáticas dos dados, de modo a transformar as imagens de melhor qualidade espectrais, que são apropriadas em determinadas aplicações (Menesses e Almeida, 2012).

O formato matricial das imagens, facilita operações matemáticas e estatísticas para se analisar o grande volume de dados, que possuem as imagens de Detecção Remota. Praticamente, todos os *softwares* especializados em processamento de imagens de Detecção Remota dividem as técnicas de processamento digital em dois tipos básicos: **realce** e **classificação**, às quais antecede uma fase de pré-processamento, cujo objectivo é corrigir preliminarmente os erros que os dados originais possam apresentar. As **técnicas do pré-processamento**, são essencialmente funções operacionais para remover ou corrigir os erros e as distorções introduzidos nas imagens pelos sistemas sensores devido a erros instrumentais (ruídos espúrios), às interferências da atmosfera (erros radiométricos) e à geometria de imageamento (distorções geométricas), (Menesses e Almeida, 2012). Rosa (2013) descreve as principais técnicas de processamento digital de imagens são: correção de imagens, realce de imagens, classificação de imagens e transformação de imagens. A **correção** diz respeito ao ajuste das imagens, de forma a obter uma representação da superfície da Terra, o mais fiel possível à realidade. O **realce** está predominantemente voltado à modificação das imagens, para otimizar sua aparência para o sistema visual. A classificação refere-se à interpretação de imagens auxiliada por computador. E a **transformação** refere-se à derivação de novas imagens, através de algum tratamento matemático das bandas das imagens brutas.

Composição Colorida de Imagens multiespectrais são aquelas que possuem diversas bandas que podem ser combinadas entre si de maneira a melhorar a interpretação da imagem. Como foi dito anteriormente as características de reflectância dos objectos podem ser representados por tons de cinza ou DN (Número Digital). O sistema de cores geralmente utilizado é o RGB (vermelho, verde, azul) baseado nas cores primárias, esta técnica é comumente utilizada em imagens que já estejam realçadas por ampliação de contraste (Atunes, 2004).

Relevo Sombreado é uma técnica para visualizar o terreno determinado por uma fonte de luz, declividade e aspecto da superfície de elevação. É um método qualitativo para visualizar a topografia e não fornece valores de elevação absolutos, o relevo sombreado tem a função de produzir uma representação 3D da superfície do terreno em escala de cinza, levando em conta a posição relativa do Sol para sombrear imagens (Sig Rio Preto, 2019).

Método de Análise Hierárquica (AHP) é o mais popular e foi aplicado para resolver vários problemas complexos de decisão (Jaganathan *et al.*, 2007 citado por Sílvia 2019). A vantagem principal do AHP é a habilidade inerente ao método de manipular factores intangíveis, factores esses determinantes no

processo de decisões. Os cálculos matemáticos desse método são mais simplificados e compreensíveis, fazendo dessa técnica ideal para ser empregada no processo de avaliação parâmetros (Silva, 2019). Segundo Forman citado por Castro *et al.*, (2005), o método AHP leva em conta dados, experiências, percepções e intuições de uma maneira lógica e completa, permitindo que sejam feitas escalas de prioridades ou de pesos. Razandi *et al.*, 2015 citado por Silva, 2019 acrescentam em sua dissertação que o método AHP possui aplicabilidade em diversas áreas, incluindo na prospeção de águas subterrâneas, onde o método é aplicado levando em consideração tanto parâmetros da superfície como também dados de subsuperfície, que são extraídos de poços de água.

2.1.4 Características das Imagens Satélites

Sensor ASTER (Radiômetro Avançado de Emissão e Reflexão Espacial) é um imagiador multiespectral a bordo do satélite Terra, lançado em dezembro 1999, este sensor gera imagens de média resolução espacial e espectral, apresentando três subsistemas de diferentes telescópios: VNIR, SWIR e TIR, os quais fornecem um total de 14 bandas espectrais desde a região do visível ao infravermelho termal do espectro eletromagnético, demonstradas na tabela 2. O subsistema VNIR tem ainda um telescópio adicional na banda do infravermelho próximo que fornece visão estereoscópica, já que apresenta diferentes ângulos de visada (backward) em resolução a uma imagem em “Nadir”, a resolução espacial varia com o comprimento de onda e corresponde aos diferentes subsistemas, cada cena ASTER tem dimensão de 60x60 km (Wagner, 2004).

Tabela 2: Características dos subsistemas do sensor ASTER, (Wagner, 2004)

Subsistema	Banda N°	Alcance Espectral (μm)	Comprimento de onda medio (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica (bits)
VNIR	1	0.52-0.60	0.5560	15	8
	2	0.63-0.69	0.6610		
	3N	0.78-0.86	0.8070		
	3B	0.78-0.86	0.8040		
SWIR	4	1.60-1.70	1.6560	30	8
	5	2.145-2.185	2.1670		
	6	2.185-2.225	2.2090		
	7	2.235-2.285	2.2620		
	8	2.295-2.365	2.3360		
	9	2.360-2.430	2.4000		
TIR	10	8.125-8.475	8.2910	90	12
	11	8.475-8.825	8.6340		
	12	8.925-9.275	9.0750		
	13	10.25-10.95	10.6570		
	14	10.95-11.65	11.3180		

O **Landsat 8** foi lançado em 11 de fevereiro de 2013 como provedora de imagens para a continuidade da missão Landsat através de uma cooperação entre o U.S Geological Survey (USGS) e a National Aeronautics and Space Administration (NASA). A tabela 3 apresenta as principais características que diferenciam o Landsat 8 das missões anteriores são a quantização em 12 bits e a adição de duas novas bandas, uma para aplicação em estudos de águas costeiras e aerossóis e outra para detecção de nuvens do tipo cirrus (Almeida e Oliveira, 2010).

Tabela 3: Características dos subsistemas do satélite Landsat, (USGS, 2015)

Subsistemas	Banda N°	Alcance Espectral (μm)	Resolução Espacial (m)	Resolução Radiométrica (bits)
OLI	1 Azul Costeiro	0.43 - 0.45	30	16
	2 Azul	0.45 - 0.51		
	3 Verde	0.53 - 0.59		
	4 Vermelho	0.64 - 0.67		
	5 Infravermelho Próximo	0.85 - 0.88		
	6 Infravermelho Medio	1.57 - 1.65		
	7 Infravermelho Medio	2.11 - 2.29		
	8 Pancromática	0.50 - 0.68	15	
	9 Cirrus	1.36 - 1.38	30	
TIR	10 Infravermelho Termal	10.60 - 11.19	100	
	11 Infravermelho Termal	11.50 - 12.51		

2.2 Hidrologia

A hidrologia é uma ciência interdisciplinar e tem evoluído expressivamente devido aos problemas crescentes observados nas bacias hidrográficas, como a ocupação inadequada, o aumento significativo da utilização da água para diversos fins e principalmente em face aos resultados dos impactos sobre o meio ambiente. O estudo da água era uma ciência basicamente descritiva e qualitativa, porém se transformou em uma área de conhecimento onde o método quantitativo tem sido explorado através de metodologias matemáticas e estatísticas, melhorando de um lado os resultados e do outro explorando melhor as informações existentes (Tucci, 1993 citado por Zenetti 2007). dependendo do ambiente de estudo da água e de sua circulação, algumas ciências relacionadas com a hidrologia são a hidrometeorologia (água na atmosfera), potamologia (água nos rios), limnologia (água nos lagos), criologia (geleiras), oceanologia (oceanos), pedohidrologia (água do solo), hidrogeologia (água subterrânea), (Lima, 2008).

2.2.1 Ciclo Hidrológico

O ciclo hidrológico tem uma aplicação prática no estudo de recursos hídricos que visa avaliar e monitorar a quantidade de água disponível na superfície da terra. A unidade geográfica para esses estudos é a bacia hidrográfica, definida como uma área de captação da água precipitada, demarcada por divisores topográficos, onde toda água captada converge para um único ponto de saída, o exutório (Teixeira *et al.*, 2000). Lima (2008), acrescenta dizendo que o ciclo da água envolve vários e complicados processos hidrológicos: evaporação, precipitação, interceptação, transpiração, infiltração, percolação, escoamento superficial (Figura 3). Entretanto Carneiro e Campos (2012) citado por Soares, (2021) sustenta afirmando que o vapor d'água move-se na atmosfera até ser resfriado, retornando a superfície em forma de chuva ou neve, superficialmente a água pode originar rios, lagos e permear regiões subterrâneas, ou evaporar, retornando a atmosfera e recomeçando o ciclo.



Figura 3: Ciclo Hidrológico, (AmbienteBrasil, 2021)

2.2.2 Água Subterrânea

Segundo Press *et al.*, (2008) e Brás (2020) definem a água subterrânea como aquelas que ocorrem abaixo da superfície na zona de saturação, onde todos os poros estão preenchidos por água, a água subterrânea pode ocorrer em rochas cristalinas onde não existe porosidade primária, a água se acumula nos espaços vazios da rocha, sua qualidade esta associada ao clima apresentando-se em geral com alta salinidade, bem como, em rochas sedimentares que apresentam porosidades primárias, a água preenche os poros em toda a extensão de ocorrência da rocha, formando os grandes aquíferos.

2.2.3 Aquífero

Aquífero é a formação geológica que tem a capacidade de armazenar água em profundidades e permite a circulação que pode ser rentável para o homem extraíndo-as de modo económico ou sustentável, (Silva

et al., 2006). A figura 4 apresenta dois tipos de aquíferos, o **aquífero confinado**, segundo Soares (2021) esta classe ocorre quando a água subterrânea está armazenada sob uma pressão maior do que a pressão atmosférica, devido à existência de uma camada confinante impermeável acima do aquífero. E o **Aquífero livre** que é caracterizado pela permeabilidade em uma formação geológica de característica permeável, parcialmente saturada de água. A base deste aquífero é limitada por uma camada impermeável ou semipermeável existindo uma superfície livre sob pressão atmosférica.

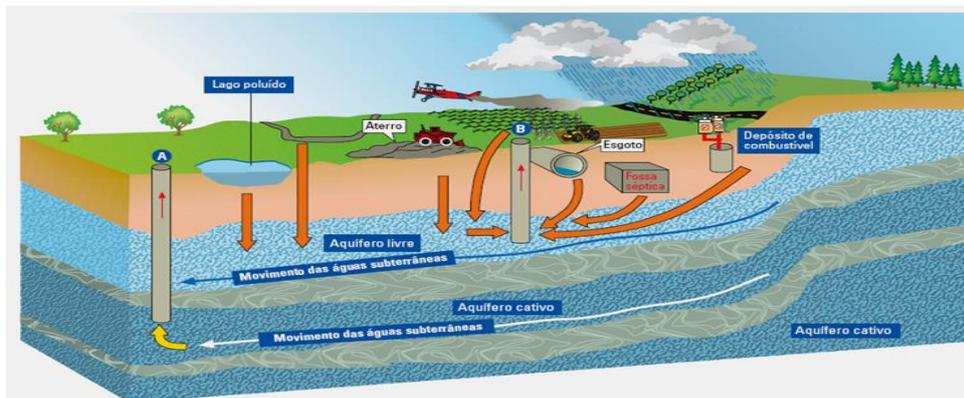


Figura 4: Representação do Aquífero (Gessulli Agribuseness, 2016)

2.2.4 Geologia da Água Subterrânea

A natureza e distribuição de aquíferos em um sistema geológico são controladas pela litologia, estratigrafia e estrutura dos depósitos geológicos e suas formações (Figura 4). A **litologia** é a composição física, incluindo a composição mineralógica, tamanho e empacotamento dos grãos, dos sedimentos ou das rochas que compõem o sistema geológico. A **estratigrafia** descreve as relações geométrica e temporal entre as diversas lentes, camadas e formações nos sistemas geológicos de origem sedimentar. E **Feições estruturais** tais como clivagens, fracturas, dobras e falhas são as propriedades geométricas dos sistemas geológicos produzidas por deformação após deposição ou cristalização. Em depósitos inconsolidados, a litologia e estratigrafia constituem os controles estruturais mais importantes. Na maioria das regiões, o conhecimento da litologia, estratigrafia e estrutura conduz directamente à compreensão da distribuição dos aquíferos (Freeze e Cherry, 2017).

2.2.5 Aquífero Fracturado

O **aquífero fracturado** é assim denominado para definir as discontinuidades litológicas ou estruturais das rochas cristalinas capazes de armazenar água. Mesmo constituindo um meio impermeável, heterogêneo, de porosidade primária muito baixa, o armazenamento da água neste meio se dá através de sua porosidade secundária representada principalmente pelas fracturas. Os factores que controlam o armazenamento e a produção de água em terrenos cristalinos, são em linhas gerais, o arranjo estrutural, o número de fracturas, as dimensões das fracturas, o número de interconexões, o clima (contribuinte da

formação dos solos), o tipo de rocha e a proximidade com as áreas de recarga (Pfaltzgraff, Arrares, & Miranda, 2002). Segundo Soares (2021) o seu armazenamento é directamente proporcional ao número de fracturas das rochas armazenadoras, suas aberturas e interconexões, estando associados às rochas ígneas e metamórficas, os poços perfurados neste tipo, tem baixa vazão, gerando poço produtivo apenas quando intercepta fracturas condutoras de água.

A maior capacidade de captação de águas subterrâneas em aquíferos fracturados está condicionada a maior densidade do fracturamento nas rochas cristalinas. As feições geológicas lineares e curvilíneas do relevo e drenagem representam sistemas de fracturamentos e são facilmente identificadas nas imagens de satélites de sensores ópticos e de radares (Landsat, ASTER, SPOT, STRM entre outros). Após a identificação e extração das feições geológicas nos dados de Detecção Remota, por interpretação visual ou processos automáticos são interpretadas como lineamentos estruturais, (Nascimento, 2019)

Os **lineamentos estruturais** são alinhamentos geológicos unidimensionais e são avaliados com relação à sua densidade e comprimento e interpretados como áreas de infiltração, percolação e armazenamento de água subterrânea em rochas cristalinas (O'leary et all., 1976; Sander, 1997; citado por Nascimento 2019). Estes representam as respostas das rochas aos processos endogénicos e exogénicos a que foram submetidas, a análise dessa geodinâmica reflecte a maior ou menor probabilidade de infiltração e escoamentos da água precipitada e seu provável acumulo no interior do sistema de fracturamento, formando os aquíferos fracturados. Parte-se do pressuposto que a partir do final do jurássico os processos tectónicos de magnitude apreciáveis resultaram em falhas e fracturas de abertura da crosta, originando fracturas apropriadas para infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea em terrenos geológicos cristalinos (Nascimento et all., 2008; Campos, 2004; citado por Nascimento 2019).

O **fluxo e o armazenamento de águas subterrâneas por porosidade fracturada** são resultantes das estruturas planares que representam sistemas de fracturamento verticais que se estendem por até centenas de km e representam linhas de fraqueza da crosta reativadas por processos distensivos. Dessa forma, as condições de infiltração, percolação e acumulação de água subterrânea são inferidas segundo prioridades da densidade de lineamentos estruturais geológicos (Feijó, Campos 2016; Madrucci et all., 2003; Veneziani, Rocio 1991; citado por Nascimento 2019).

2.2.6 Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é um sistema físico onde podemos quantificar o ciclo da água, esta análise quantitativa é feita pela equação geral do balanço hídrico, expressão básica de Hidrologia (Teixeira et all., 2000). Por outro lado, Paz (2004) diz que a bacia hidrográfica pode ser considerada como um sistema

físico, cuja entrada é o volume de água precipitada e saída é o volume de água escoado pelo exutório, portanto esse é um sistema aberto, porem nem toda a precipitação se torna escoamento no exutório, mais pode ficar armazenada na própria bacia. Entretanto Oliveira (2014) acrescenta dizendo que a bacia hidrográfica é uma unidade delimitada pela sua topografia, constituindo um divisor de águas na qual sua rede de drenagem converge para um rio principal, e este, para um tributário.

2.2.7 Divisores da Bacia Hidrográfica

Os divisores da água são superficiais (topográfico) e freáticos (subterrâneo). O divisor subterrâneo é mais difícil de ser localizado e varia com o tempo, a mediada que o lençol freático sobe, ele tende ao divisor superficial, o subterrâneo só é utilizado em estudos mais complexos de hidrologia subterrânea e estabelece, portanto, os limites de reservatórios de água subterrâneo e de onde é derivado o deflúvio básico da bacia. Na prática, assume-se por facilidade que o superficial também é subterrâneo (Carvalho e Silva, 2006).

Enquadramento da Área de Estudo

O terceiro capítulo é referente ao enquadramento da área, apresentando deste modo sua localização e as características geoambientais da área em estudo.

3.1 Localização Geográfica da Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Umbelúzi, localiza-se aproximadamente entre os paralelos 25° 45' 0" e 26° 15' 0" Sul e meridianos 32° 00' 00" e 32° 45' 0" Este. Situada na região denominada Libombos, próximo as capitais da Suazilândia e Moçambique, tem uma área de 5,600.00 km² dividida em três países, a parte Moçambicana tem uma área de 2,166.84 km² calculados a partir do programa ArcGis. É considerada como bacia estratégica, pois é responsável pelo abastecimento de água na capital Mbabane em Suazilândia, na capital Maputo em Moçambique, e ainda nas cidades da Matola e Boane. A parte Moçambicana da bacia está localizada inteiramente na província de Maputo com os afluentes o rio Calichane e o rio Movene, respectivamente a montante e a jusante do Reservatório dos Pequenos Libombos (RPL), (Notisso, 2020).

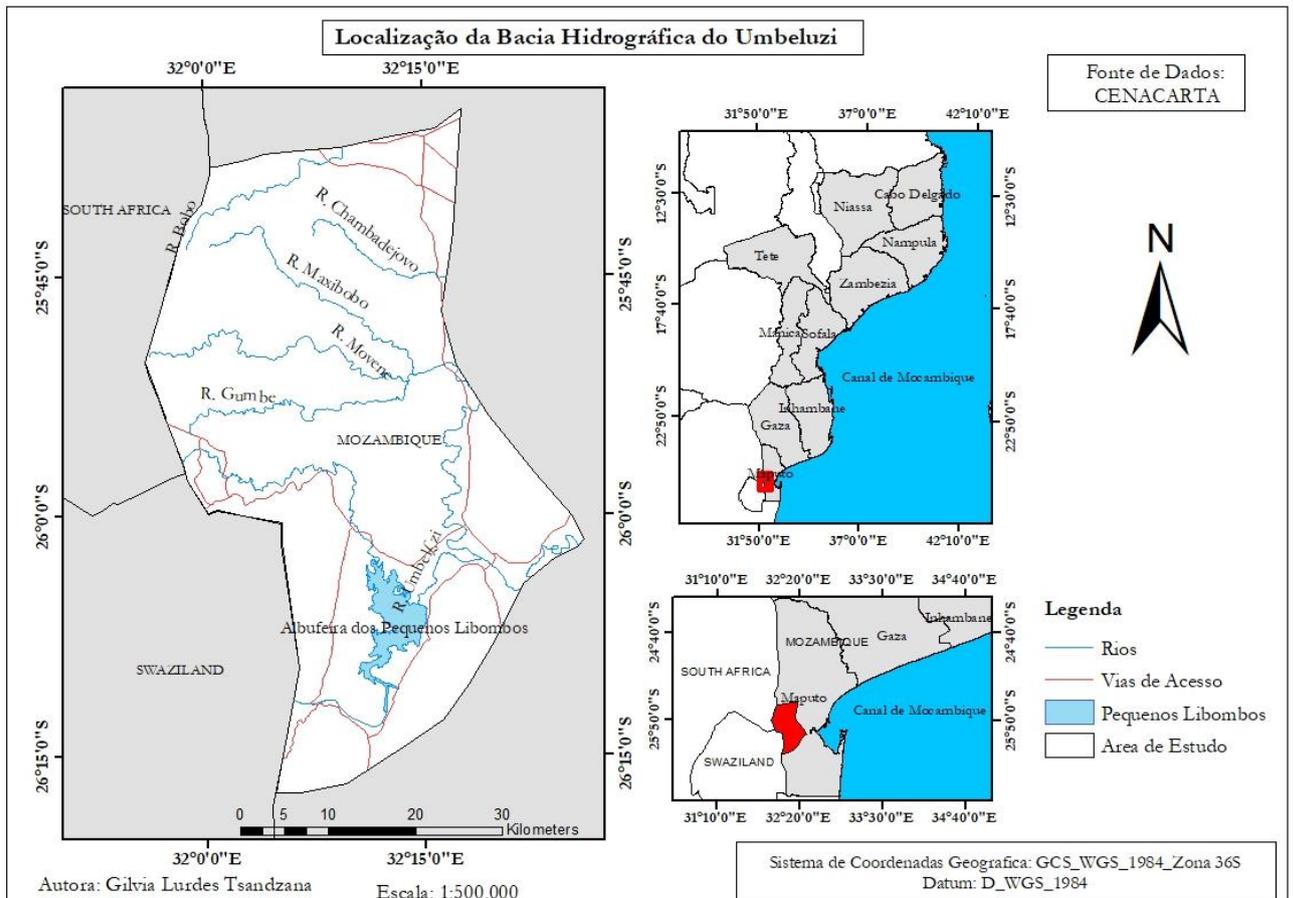


Figura 5: Localização Área de Estudo

3.2 Características Geoambientais

Referem-se aos elementos e processos naturais que compõem o ambiente geográfico da área de estudo, essas características incluem aspectos físicos e biológicos tais como segue abaixo:

3.2.1. Uso e Ocupação do Solo

Segundo Muchango (1999) citado por Albino 2021, na área de estudo, a vegetação original era formada por floresta densa ou aberta, existindo dominância das espécies da família das sapotáceas. Essas florestas localizavam-se na cordilheira dos Libombos, porém, devido à ação dos derrubes das queimadas para o fabrico do carvão, grande parte das encostas passou a ser amplamente recoberta por savanas, encontrando-se florestas reduzidas em pequenas manchas, em solos argilosos mais ou menos pedregosos de origem basáltica ou riolítica, menos propensos a agricultura.

Na planície do Umbeluzi, formada logo após a transposição da cordilheira dos Pequenos Libombos, predominava a floresta aberta com savana de Albizia, Afzeli, Sclerocarva, Strychnos. Essa vegetação hoje se encontra pouco preservada, dando lugar às áreas de pastagem e agricultura, apresentando manchas de savana secundária e árvores de fruto espontâneas ou subespontâneas (Muchangos,1999).

A savana arbórea também floresce nas altitudes médias dos vales inferiores dos rios sendo caracterizada por vários subtipos que correspondem com as variações edáficas. É uma vegetação de caráter xerofílica que aumenta com a salinidade, ocorrendo em solos salinos, argilosos ou arenosos e em áreas restritas. Esta forma de vegetação integra, em geral, as pastagens e tipos de *Themeda-turbina* (Muchangos, 1999 citado por Albino 2021).

3.2.2. Clima e Precipitação

Lopes (2011) citado por Notisso (2020) classificou o clima da bacia como subúmido, com intensa variação do regime pluvial ao longo do ano. Esta bacia é caracterizada por duas estações distintas: a estação seca e fria, entre abril e setembro e a estação úmida e quente, entre outubro e março. Na área de estudo, segundo a classificação climática de Köppen, na parte sul do rio Umbelúzi, predomina o tipo seco de estepe (BS).

A precipitação média na bacia é de 840 mm/ano, variando de 600 mm/ano na zona costeira a 1500 mm/ano na região mais ocidental da bacia. O regime das chuvas na Bacia do Umbelúzi segue o comportamento das duas estações do ano. A estação úmida e quente, é a época de muitas chuvas, que chegam a representar cerca de 86,0% do total da precipitação anual. E a estação seca e fria, com cerca de 14,0% da precipitação média anual, as chuvas com maior intensidade, são registradas na cordilheira dos Libombos e na região montanhosa entre Suazilândia e África do Sul, no extremo ocidental e, as de baixa intensidade, ao longo do rio e no flanco ocidental da cordilheira dos Libombos. A umidade relativa média anual é de 80,5%, variando de 74,0%, em novembro a 86,0% em julho (Lopes, 2011). Segundo ARA-Sul (2010) o escoamento é de 11,24 m³/s medida a partir da estação de Goba.

3.2.3. Geologia

A Bacia do Umbelúzi apresenta formações geológicas do Cretáceo (riólitos e basaltos) com representações de eras mais modernas na área costeira ou planície litorânea, onde formações pós-cretácicas estão cobertas por formações quaternárias representadas por dunas interiores e aluviões. Também são distribuídas, da foz para as nascentes, as aluvionares, arenitos, basalto, riólitos, novamente basaltos, calcários, xistos, rochas básicas e granito (Lopes 2011, citado por Notisso 2020).

Segundo a interpretação da carta geológica e da nota explicativa de Afonso 1976, citado por Lopes, 2011, a geologia regional da Bacia do Rio Umbelúzi pertence ao complexo vulcânico dos Libombos-Karro Superior que se alongam na direção Norte-Sul. O mesmo complexo vulcânico é formado por riólitos, brecha tufa e cinzas vulcânicas geralmente de grão fino e médio, cuja coloração varia de vermelho a castanho. A sua estrutura é de bandas, lâminas, fenocristais de ortoclásio e oligoclásio, minerais maciços e uma criptocristalina. Encontra-se também, nas duas margens do rio Umbelúzi, coberturas quaternárias

de materiais arenosos constituídas por depósitos aluvionares ou por aluviões com cascalho, quartzo, riólitos, alguns minerais e rochas. Estes depósitos são raramente eólicos e tem utilidade particular em obras de engenharia civil (Lopes, 2011 citado por Albino, 2021 e Notisso 2020).

A Bacia Hidrográfica do Umbelúzi apresenta uma grande predominância da unidade geológica do Karoo Superior na maior extensão da área de estudo. Ela obedece a um agrupamento formado por várias formações, dispostas em diferentes unidades geológicas, e se destacam as seguintes: a formação de rochas intrusivas do Karoo Superior, ainda pode se encontrar no grupo do Karoo Superior às formações de Movene e Umbelúzi. A geologia da bacia ainda se comporta formações com origem a partir das rochas sedimentares do quaternário, que se caracteriza pelos depósitos aluvionares e do Paleoceno-plioceno, representado pelas formações de Boane, formação de Maputo e a Formação de Tembe (GTK, 2006).

3.2.4. Geomorfologia

Segundo o MAE 2014, citado por Jalane 2020, A área da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi, pode ser dividida de acordo com as seguintes unidades geomorfológicas:

Complexo da Cadeia dos Libombos é marcado pela cordilheira dos Libombos, que se estende no sentido Norte-Sul, tendo o seu ponto mais alto com cerca de 800 m, o monte Mponduíne, que se inclina ligeiramente em direção a leste.

Planaltos médios que são adjacentes as terras altas da serra da Namaacha, geralmente com altitudes entre 200 e 400 metros, que constituem um alongamento da cadeia dos Libombos, que se estende até as terras do distrito de Moamaba, designadas de superfícies pediplánicas.

Planícies com cerca de 100 – 200 m junto aos vales aluvionares ao longo dos rios, isso na parte mais elevada da bacia. Nas terras baixas possui extensas planícies situadas maioritariamente a cotas inferiores a 100m, sendo o monte Corumana com 275 m o único destaque do relevo. Podem-se observar três zonas distintas: Vales e planos ligeiros com altitudes médias de 60 a 80 metros.

As planícies constituem a unidade geomorfológica mais representativa da bacia, distribuído nos três distritos drenados pela mesma, sendo nos distritos de Boane e Moamba onde a unidade ganha maior expressividade. Em Boane ela intercala em pequenas unidades os icebergs, onde se encontram instaladas as pedreiras em Movene e a colina formada pelo grés vermelhos, justamente onde está localizada a vila sede de Boane.

O relevo da Bacia do Rio Umbelúzi é caracterizado, em geral, por uma Paisagem levemente ondulada e sem grandes diferenças de altitude. Na parte norte, este e sudoeste apresenta uma Paisagem com pequenas diferenças de nível, formando-se uma verdadeira planície. Em contraste, as regiões sul e oeste são

marcados por uma variação gradual de altitudes cerca de 1.900m que se estende até a cadeia dos Pequenos Libombos e o Distrito de Namaacha (Lopes 2011 citado por Albino, 2021 e Notisso, 2020).

3.2.5. Pedologia

São destacados os solos formados com a influência da cadeia vulcânica dos Libombos que contribuiu na formação dos solos basálticos (Bv), basálticos pretos (Bp), basálticos líticos e solos riolíticos líticos. A que destacar os solos formados por deposições coluvionares, onde se destacam os agrupamentos dos (coluviões) junto aos sopés da cuesta riolítica (Cs), os agrupamentos dos solos coluvionares sobre os basaltos (Cc, Ccf) e os agrupamentos dos solos coluvionares derivados das rochas sedimentares do Cretáceo e Terciário (Cw). A medida que se afastam da cadeia rochosa dos Libombos em direção a bacia sedimentar, desponta um pediplano com solos caraterísticos da região austral de África, o manto com mais de 20 m formando largas áreas de ligeira inclinação denominadas de plataforma de “Mananga”. Os solos de mananga variam a sua classificação deferindo do tamanho superficial da areia que os cobre, podendo ser agrupados em 4 grupos (M1, M2, M3 e M4) e outros 4 agrupamentos da transição dos manangas conhecidos por post mananga (P1, P2, P3 e P4), encontrados invariavelmente sobre os basaltos (Jalane, 2020).

Material e Métodos

O quarto capítulo destaca os materiais e métodos usados durante a realização do trabalho, apresentando de forma detalhada os procedimentos usados para a concepção do trabalho e a descrição dos materiais.

4.1 Materiais

A modelagem espacial de águas subterrâneas, inclui fases de investigação que permitem uma aproximação adequada do ambiente real em sub-superfície, a partir da investigação de factores físicos naturais que contribuem no processo de infiltração da água precipitada. Essas fases consistem no levantamento de dados e informações, geração de novos dados, interpretação e modelagem (Ribeiro *et al.*, 2011). A tabela 4 abaixo ilustra as características detalhadas dos dados usados nesse estudo.

Tabela 4: Características dos dados

Nº	Dados	Formato	Fonte	Ano
1	Landsat 8	Raster	EarthExplora (https://earthexplora.usgs.gov)	2022
2	ASTER (DEM)		EarhData (https://urs.earthdata.nasa.gov)	2013
3	Precipitação		CRU Data (https://crudata.uea.ac.uk)	2022
4	Geologia	Vectoriais	GTK	2006
5	Uso e Ocupação do solo			
6	Solo			
7	Divisão Administrativa			
			CENACARTA	1999

4.2 Métodos

Para a identificação e extração de lineamentos estruturais, foram utilizadas técnicas de processamento digital, como a combinação de bandas em imagens do satélite Landsat 8 (OLI) e o relevo sombreado a partir do Modelo Digital de Elevação (DEM) do satélite ASTER recomendado por Barreiro (2020). A definição dos critérios adoptados na análise do potencial hídrico das águas subterrâneas, consiste na seleção de dados do meio físico natural, representativos dos fenômenos ou evidências que permitem os processos de armazenamento e circulação da água no meio aquífero. O método utilizado no processo decisório de pesos aos critérios, corresponde ao Método de Análise Hierárquica de Processos (AHP),

(Satty, 1990 citado por Ribeiro *et al.*, 2011). Os critérios utilizados na modelagem são: uso e ocupação do solo, tipo de solo, declividade, densidade de drenagem, densidade de lineamentos, precipitação e geologia (permeabilidade das rochas), recomendados por Ribeiro *et al.*, (2011). No desenvolvimento do mapa de zonas com potencialidade para o armazenamento da água subterrânea, foram realizados procedimentos de processamento digital de imagens no Envi Classic 5.3, os pesos normalizados foram obtidos através da calculadora do AHP disponível no site <http://www.bpmsg.com> e de álgebra de mapas no ArcGis 10.4.1.

4.2.1. Fluxograma Metodológico

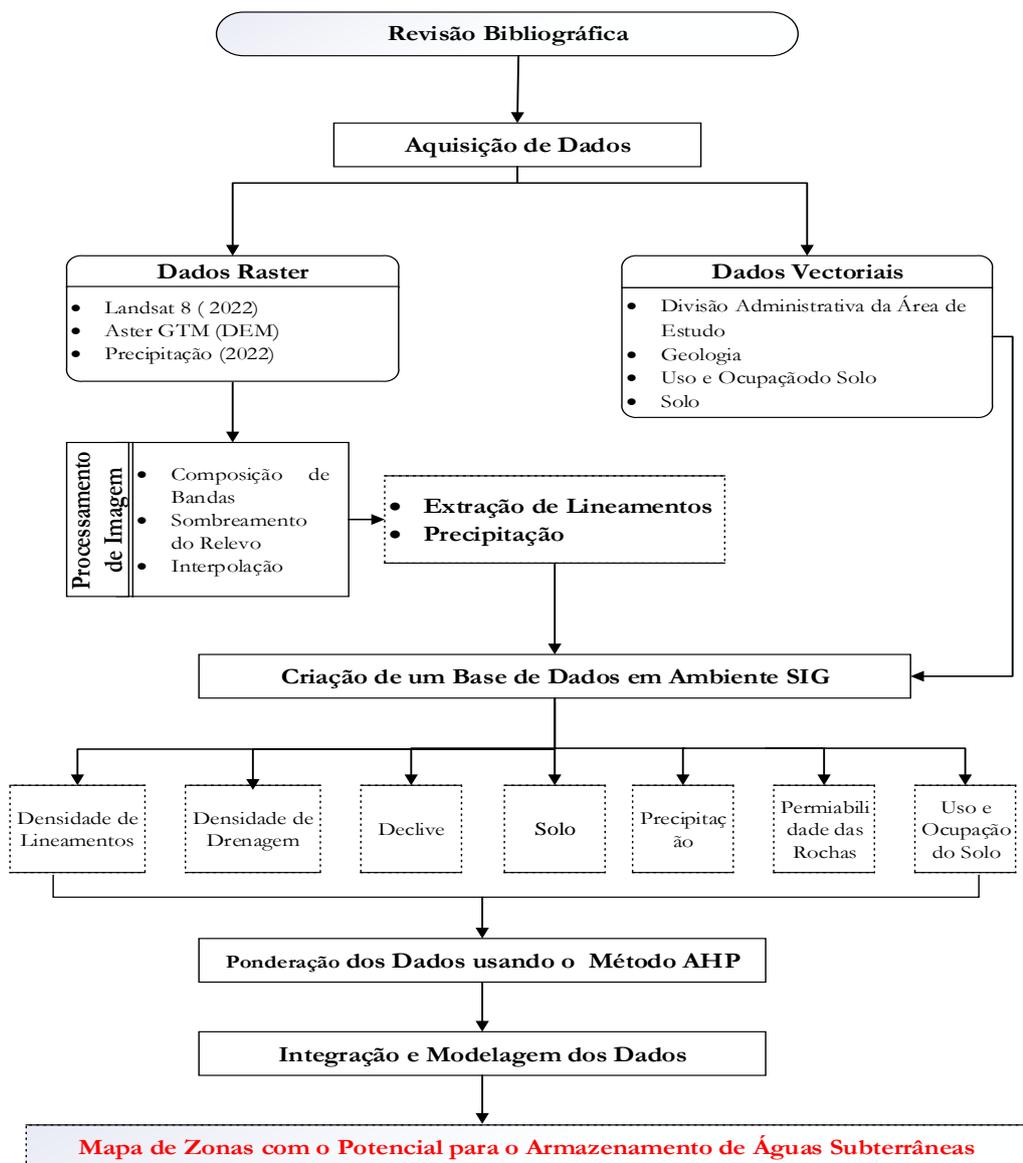


Figura 6: Fluxograma Metodológico

4.2.2. Procedimentos Metodológicos

São etapas ou procedimentos que foram seguidos no presente estudo (figura 6), para obter, analisar e interpretar dados obtidos a partir de instrumentos remotos (satélites). Esses procedimentos incluem:

4.2.2.1. Pré-Processamento

O pré-processamento das imagens de satélite, inclui operações aplicadas sobre as imagens antes da sua análise e extração de informação. Para o presente estudo, esta fase consistiu em fazer-se a correção geométrica, com o objectivo de corrigir as distorções geométricas devido as variações na geometria do sensor ou da Terra e a conversão das coordenadas terrestres para coordenadas verdadeiras. A correção geométrica envolve a modelagem da relação entre a imagem e o sistema de coordenadas da superfície da terra. As imagens foram re-projectadas de acordo com a precisão desejada no trabalho, a re-projecção foi feita no programa ArcGis, todas as imagens foram re-projetada para o sistema de referência *Universal Transverse Mercator* (UTM), DATUM WGS 1984, 36 zona sul.

4.2.2.2. Processamento de Imagens

O processamento é uma fase que sucede o pré-processamento onde nesta fase são feitas manipulações incluindo operações aritméticas, objectivando transformar dados brutos em imagens claras e detalhadas mediante ao objectivo do estudo (Menesses e Almeida 2012). Para o presente trabalho o processamento consistiu em:

- **Extração de lineamentos** – Os lineamentos foram mapeados a partir da ferramenta *Convulsions and Morphology* do *software* Envi Classic 5.3 e *Hilshade* do *software* ArcGis 10.4.1 com iluminações de azimutes 315° e 45°, os mapas de densidade de lineamentos foram criados a partir da ferramenta *LineDensity* do programa ArcGis 10.4.1;
- **Densidade de Drenagem** – As extrações dos dados da densidade de drenagem foram obtidas a partir das ferramentas do *Hydrology* e *LineDensity* do *software* ArcGis 10.4.1.;
- **Extração da Declividade** – para a extração dos valores de declividade foi usada a ferramenta *Slope* do programa ArcGis 10.4.1;
- **Determinação da Precipitação Anual** – Os dados foram extraídos a partir da ferramenta *NetCDF file* e *Interpolation* do programa ArcGis 10.4.1.
- **Geologia, Solo e Uso e Ocupação do Solo** – foram convertidos para raster a partir da ferramenta *feature to raster* do programa ArcGis 10.4.1.

Para a análise das variáveis usadas no presente estudo, foram usadas ferramentas listadas na tabela 5, onde cada variável teve o seu tratamento para a obtenção dos resultados, cada ferramenta contém a descrição da sua função e do programa que foi usado.

Tabela 5: Descrição das Ferramentas

Descrição das Ferramentas		
Ferramentas	Função	Programa
Convolutions and Morphology	São úteis para realçar e identificar características lineares em imagens, permitindo uma análise mais precisa de lineamentos estruturais. Essa técnica de processamento de imagem foi usada para melhorar a visualização e análise de dados relacionados a presença e distribuição da água subterrânea.	Envi Classic
Hillshade	É usado para criar relevos sombreados em um DEM, a partir de um conjunto de dados de elevação. O hillshade é usado para realçar características do terreno, como planaltos, vales, declives em um mapa, criando sombras e destacando as diferentes altitudes.	ArcGis
Hydrology	Ela fornece uma série de recursos e análises hidrológicas, que permitem aos usuários avaliar e compreender o fluxo de água em uma determinada área, uma de suas funções principais, incluem a delimitação de uma bacia hidrográfica, criação de rede de drenagem, definição de áreas de recarga e descarga da água e a modelagem do fluxo de água nos rios.	
LineDensity	É usada para avaliar a densidade de linhas em uma área de estudo, ela calcula um mapa de densidade de linhas, para mostrar áreas com maior concentração de linhas e áreas com menor concentração de linhas. Em estudos de zonas com potencial para armazenamento de água, a ferramenta permite identificar possíveis rotas do fluxo de água com base na densidade das características lineares, auxiliando na modelagem e caracterização dos aquíferos e sistemas hidrológicos subterrâneos.	
Slope	É utilizada para calcular a inclinação do terreno em uma determinada área, em estudos sobre potencial de armazenamento da água, essa ferramenta pode ser utilizada para identificar áreas com maior ou menor declividade, que geralmente indicam a capacidade de armazenamento da água na área.	

Overlay Weight	É usada para integrar dados e atribuir pesos a diferentes factores que influenciam na identificação de zonas potenciais para o armazenamento de águas subterrâneas, permitindo uma avaliação mais precisa e detalhada dos critérios.	
-----------------------	--	--

A construção da Matriz de decisões para o estudo em causa, foi estabelecida através de uma ordem de importância das variáveis para hierarquizá-las na tabela, de maior para menor potencialidade (Silva, 2019). Para definição do grau de importância e dos pesos a serem julgados, foi necessário um conhecimento prévio da área e uma abordagem sobre trabalhos realizados em contextos semelhantes por (Albino 2012 e Notisso 2020) Através da escala de comparadores de (Saaty 2006, citado por Silva 2019) para a construção da matriz, o cálculo dos pesos normalizados, foram elaborados através da calculadora AHP disponível no site <http://www.bpmsg.com>, A matriz foi construída como segue a Tabela 6:

Tabela 6: Matriz de comparação entre os Critérios

Matriz de Decisões							
Variáveis	Precipitação	Geologia	Declive	Densidade de Drenagem	Uso e Ocupação do Solo	Densidade de Lineamentos	Solo
Precipitação	1	3	3	5	5	5	7
Geologia	0.33	1	3	3	5	5	5
Declividade	0.33	0.33	1	1	3	3	5
Densidade de Drenagem	0.20	0.33	1	1	1	2	3
Uso e Ocupação do solo	0.20	0.20	0.33	1	1	1	3
Densidade de Lineamento	0.20	0.20	0.33	0.50	1	1	1
Solo	0.14	0.20	0.20	0.33	0.33	1	1

A tabela 7, apresenta valores de 1 a 9 referentes ao grau de importância dos critérios ao julgamento, onde 1 significa importância igual de um critério em comparação ao seu correspondente na matriz, e 9 significando a máxima importância de um critério sobre outro, havendo também estágios intermediários entre 1 e 9.

Tabela 7: Escala Fundamental adaptada de (Satty 2006 citado por Silva 2011)

Grau de Importância	Definição	Explicação
1	Importância Igual	As duas atividades contribuem igualmente para o objectivo
3	Média Importância	O julgamento favorece levemente uma atividade em relação à outra
5	Importante	O julgamento favorece fortemente uma atividade em relação à outra
7	Muito Importante	Uma atividade é muito fortemente favorecida em relação a outra
9	Máxima Importância	A evidência favorece uma atividade em relação a outra
2,4,6 e 8	Números Inteiros	Quando há uma condição de compromisso entre as duas definições

Durante a análise das variáveis ponderadas, as classificações foram feitas com base nos parâmetros das variáveis definidas para o presente estudo, apresentadas na tabela 8. Os pesos foram atribuídos de acordo com a sua influência nas variáveis, seguidamente foram classificadas todas subvariáveis de cada variável, num intervalo de 1 a 5 em função do seu grau de importância. O menor valor dado as subvariáveis significa mínima potencialidade e os valores máximos dados as subvariáveis significa máxima potencialidade.

Tabela 8: Classificação dos Factores ponderados que influenciam nas zonas com o potencial para o armazenamento de águas subterrâneas na área de Estudo

Classificação das Variáveis ponderadas, que influenciam nas zonas com o potencial para o armazenamento de águas subterrâneas na área de Estudo										
Variáveis	Landsat 02/2022 Km ²	Avaliação	Landsat 05/2022 Km ²	Avaliação	ASTER 2013 Km ²	Avaliação	CRU 2022	Avaliação	Classe	Peso (AHP)
Precipitação							55mm/an	5	1	33%
							49mm/an	4	2	
							61mm/an	5	3	

							69mm/an	5	4	
							31mm/an	4	5	
Densidade de Drenagem	7,997	5	5,628	5	7,478	5			1	8%
	18,902	3	15,529	3	15,715	3			2	
	17,881	1	17,148	1	15,116	1			3	
	8,192	4	10,905	4	11,532	4			4	
	4,30	5	4,192	5	3,561	5			5	
Densidade de Lineamentos	12,348	1	684,196	1	23,910	1			1	8%
	14,164	2	611,666	2	11,804	2			2	
	12,804	3	531,682	3	8,718	3			3	
	9,061	4	418,869	4	6,067	4			4	
	4,245	5	161,194	5	2,903	5			5	
Declividade	60,302	5	63,738	5	855,114	1			1	14%
	123,104	4	111,679	4	890,516	2			2	
	290,448	3	282,886	3	484,786	3			3	
	689,971	2	661,327	2	206,210	4			4	
	1243,782	1	1287,904	1	61,000	5			5	
Dados Vectoriais										
Variáveis	Classe								Av.	Peso
Geologia	Aluvião, areia, silte, cascalho, Dique gabróico, Membro de dacito e traquidacito, Membro de quartzo-latito, quartzo-latito								1	28%
	Brecha riolítica, Areia eólica, Duna interior; areia eólica vermelha,								2	
	Areia e cascalho de terraço fluvial, Escorrência argilo-arenosa fluvial,								3	
	Dolerito com estrutura colunar								4	
	Riólito, Argilo-marga, grés, calcário com fósseis, Siltito, conglomerado, Membro dos Pequenos Libombos, riólito, Membro de tufo, localmente siltito, Basalto.								5	
Solo	Solos basálticos líticos, Solos de coluviões argilosos castanhos								1	3%
	Solos arenosos alaranjados, Solos de mananga com cobertura arenosa de esp vari,								2	
	Solos basálticos vermelhos, Solos de aluviões estratificados de textura grossa, Solos basálticos pretos								3	

	Lagos,lagoas ou rios, solos riolíticos líticos, Solos de Post_managa com textura média, Solos derivados de Gres vermelho	4	
		5	
Uso e Ocupação do Solo	Moita (arbustos baixos), Cultivado Irrigado, Mangais (localmente degradados), Salinas, Zona de Produção e Transporte.	1	6%
	Área Habitacional Semi Urbanizada, Área Habitacional não urbanizada, Área Habitacional Urbanizada.	2	
	Matagal Medio.	3	
	Cultivo de Sequeiro, Plantações .	4	
	Formação Herbácea Com Arvo Anas Emergentes Formação Herbácea Arborizada, Formação Herbácea, Matagal Aberto, Matagal Alto, Floresta de Baixa Altitude Aberta, Albufeira.	5	

4.2.2.3. Desenvolvimento dos Mapas de Zonas com potencial para armazenamento de Água Subterrânea

Cada mapa temático foi quantificado em 5 classes nomeadamente: baixa, média, alta e muito alta de acordo com sua potencialidade para o armazenamento de água subterrânea, a integração dos critérios foram feitas através da ferramenta Overlay Weight, que permitiu a elaboração do mapa de potencialidade hídrica das águas subterrâneas. Os resultados das classificações permitiram analisar áreas onde a recarga acontece de forma mais acentuada, podendo ser analisadas as incidências e percentuais de recarga pontualmente, que são apresentados nos mapas das Figuras 7, 8 e 9 e sua quantificação nos gráficos 1,2 e 3. No processamento das imagens das estações seca-fria e quente-húmida foram empregues a técnica de composição de bandas, para este estudo foram usadas as bandas 4, 6 e 7, usadas para realçar características da água, posteriormente foi empregue a técnica do relevo sombreado, a mesma técnica foi aplicada para o processamento do DEM, que objectivou realçar características do terreno.

Resultados e Discussão

O quinto capítulo apresenta os resultados do mapeamento feito para identificação de zonas com potencial para o armazenamento de água subterrânea nas estações secas e húmidas no ano de 2022 e a quantificação das diferentes zonas potenciais para o armazenamento de água.

5.1 Zonas com Potencial para o Armazenamento de Água Subterrânea

Refere-se ao processo que determina áreas geológicas com condições favoráveis para a retenção da água subterrânea, essa identificação envolveu estudos das características geológicas e físicas naturais determinantes na potencialidade de ocorrência de água subterrânea.

A figura 7 apresenta o mapa da estação seca-fria, onde mostra a distribuição do nível de potencialidade em forma de áreas e, o gráfico 1 apresenta zonas com potencialidade em função de suas respectivas percentagens, onde 55.79 km² correspondentes à 2.7% da Bacia do Umbelúzi tem um potencial para o armazenamento de águas subterrâneas muito alto, 1716.32 km² correspondentes à 84.0% tem um alto potencial, 266.40 km² correspondentes à 13.0% tem uma média potencialidade para o armazenamento e 5.45 km² correspondente à 0.3% da bacia tem um baixo potencial para o armazenamento de água.

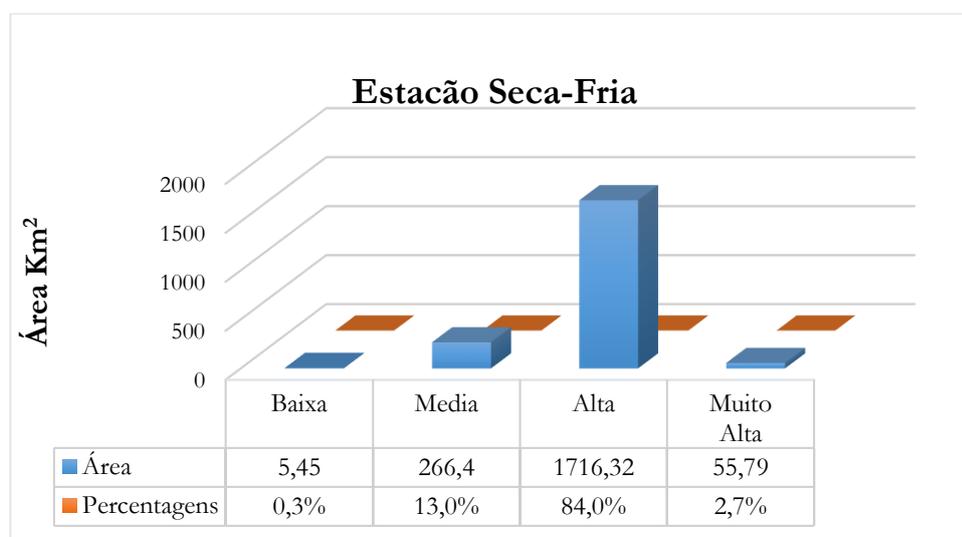


Gráfico 1: Representação de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Seca-Fria, da bacia do Umbelúzi

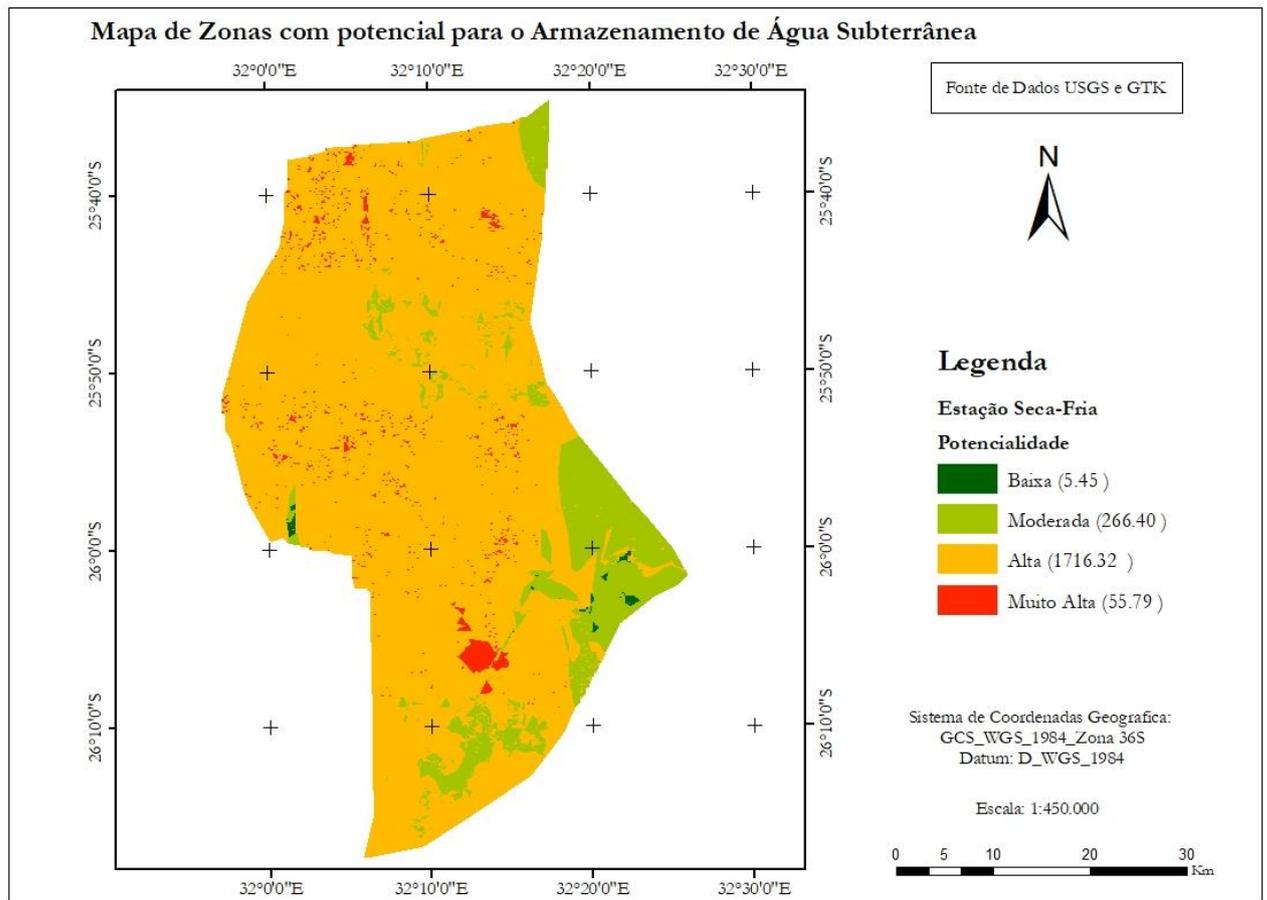


Figura 7: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Seca-Fria, da bacia do Umbelúzi

A figura 8 apresenta o mapa da estação húmida-quente, onde mostra a distribuição do nível de potencialidade em forma de áreas e o gráfico 2 apresenta zonas de potencialidade em função de suas respectivas percentagens, onde 20.28 km² correspondentes à 1.0% da Bacia tem um potencial muito alto para o armazenamento de águas subterrâneas, 1713.64 km² correspondentes à 84.4% tem um alto potencial, 280.16 km² correspondentes à 13.8% tem uma média potencialidade de armazenamento e 17.26 km² correspondente à 0.8% da bacia tem um baixo potencial para o armazenamento de água.

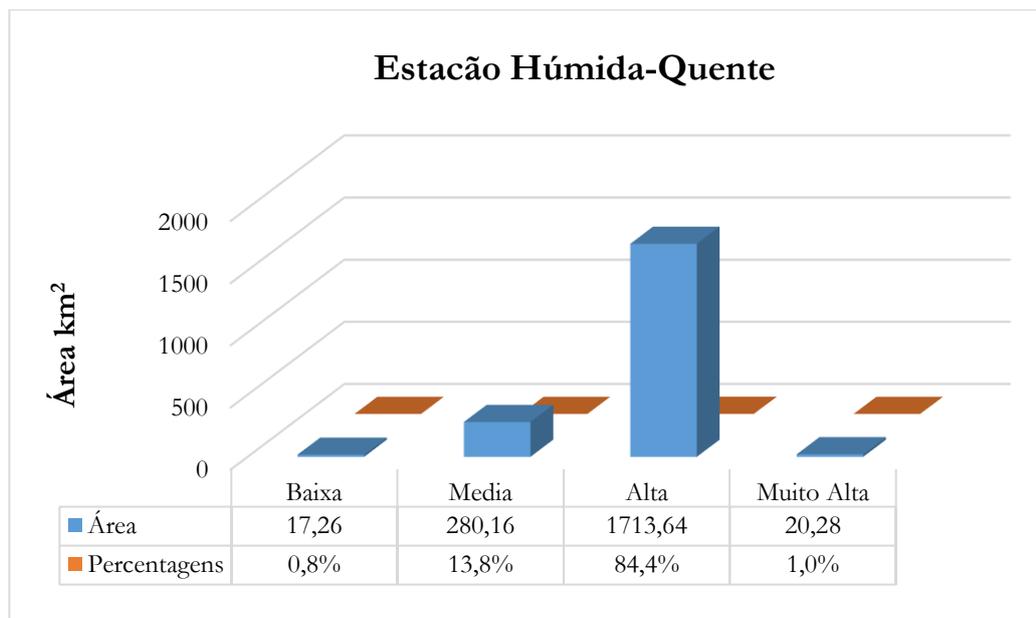


Gráfico 2: Representação de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Húmida-Quente, da bacia do Umbelúzi

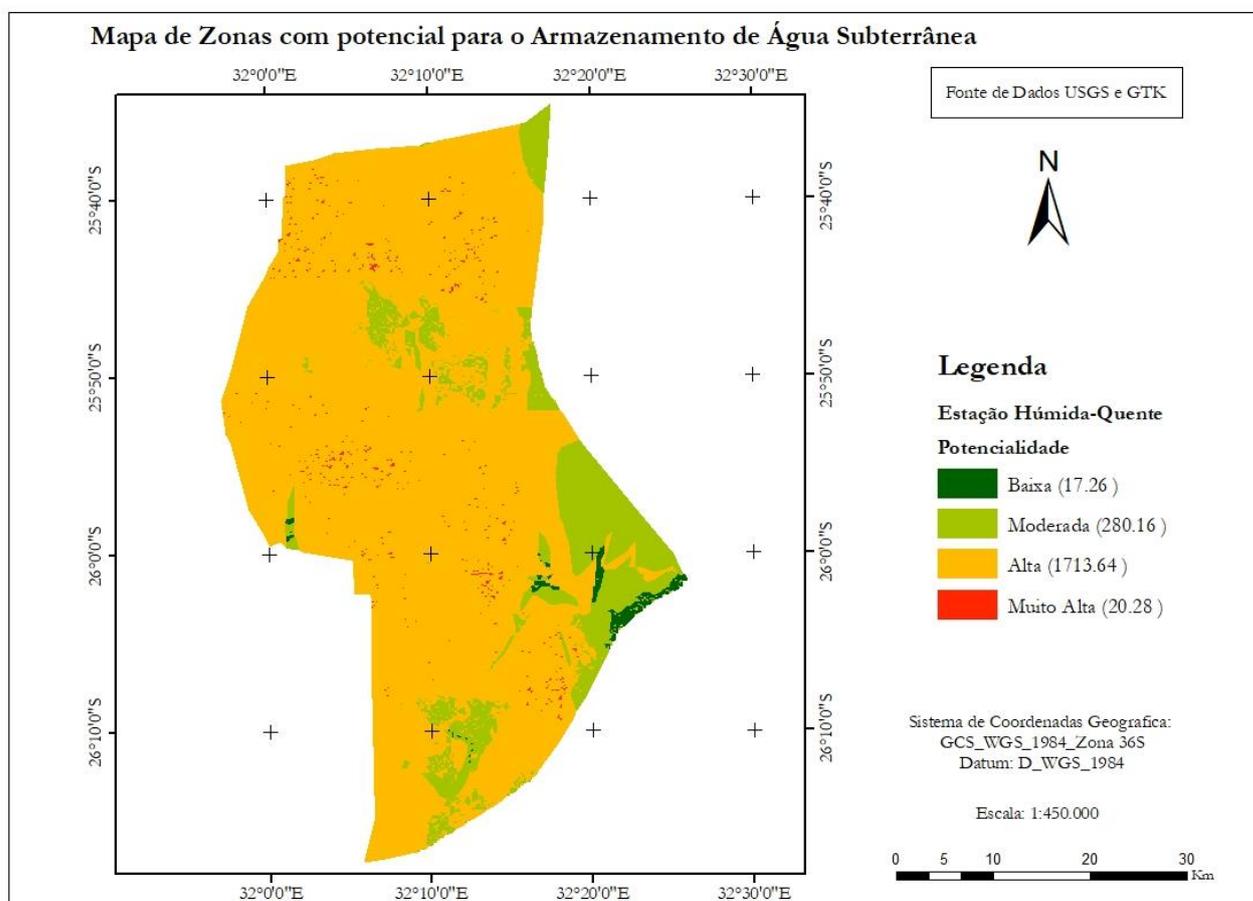


Figura 8: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água na Estação Húmida-Quente, da bacia do Umbelúzi

A figura 9 apresenta o mapa do DEM, onde mostra que numa zona com cerca de 74.25 km² correspondentes à 3.6% apresentados no gráfico 3, da Bacia Hidrográfica do Umbelúzi tem um potencial para o armazenamento de águas subterrâneas muito alto, numa zona com cerca de 1692.61 km² correspondentes à 82.7% tem alto potencial de armazenamento, numa zona com cerca de 272.02 km² correspondentes à 13.3% tem uma média potencialidade e numa zona de 8.08 km² correspondente à 0.4% da bacia tem um baixo potencial para o armazenamento de água.

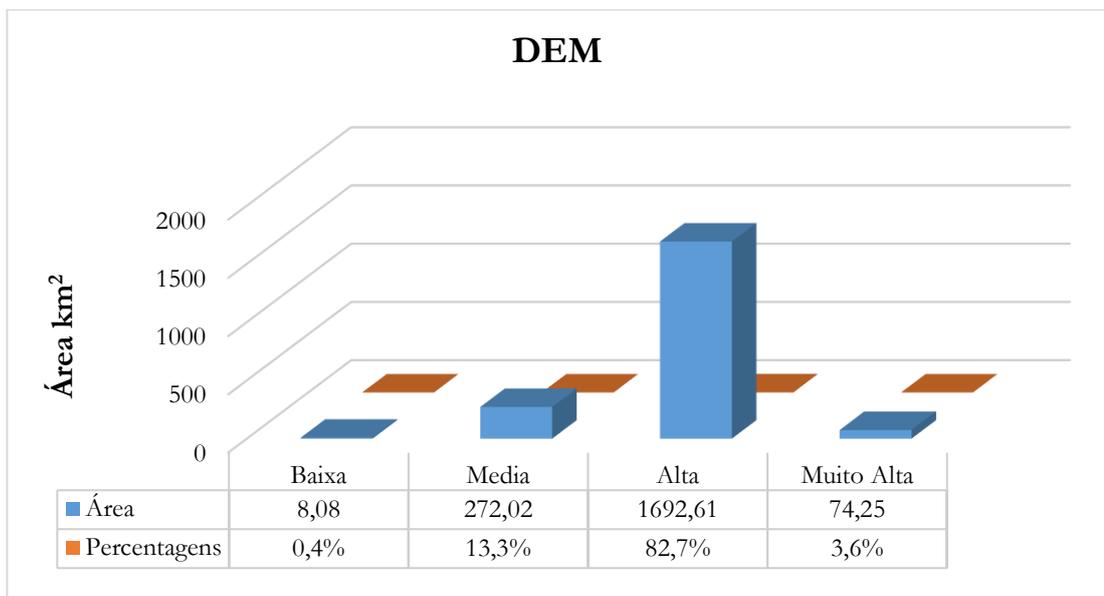


Gráfico 3: Representação de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água a partir do DEM, da bacia do Umbelúzi

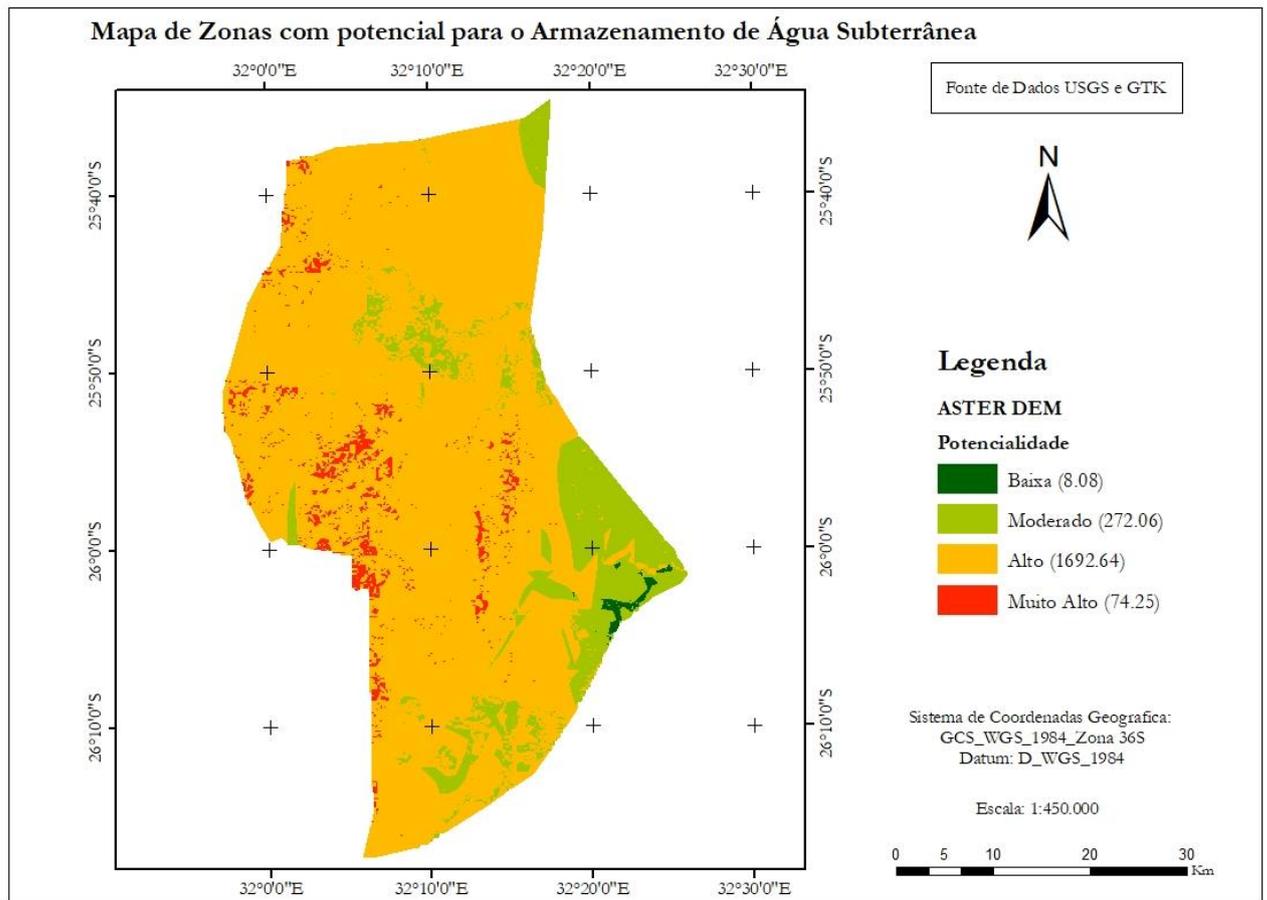


Figura 9: Mapa de Zonas com potencial para o Armazenamento de Água a partir do DEM, da bacia do Umbelúzi

Os dados do Landsat 8 (OLI) e do ASTER (DEM), são eficazes na identificação de lineamentos estruturais e características da superfície, sendo de grande importância na identificação de zonas potenciais para armazenar água subterrânea.

Com base nos resultados obtidos, nota-se que na Bacia Hidrográfica do Umbelúzi para a Estação seca-fria, o potencial de armazenamento muito alto corresponde uma área com 55.79 km², em comparação com a Estação húmida-quente, que tem capacidade de retenção da água muito alto correspondente a uma área com 20.28 km² e os dados do DEM mostram o potencial de armazenamento muito alto de 74.25 km². O que ressalta compreender, que durante a estação seca-fria, quando a precipitação é baixa a demanda da água aumenta, as reservas de água subterrâneas tornam-se essenciais para suprir as necessidades de abastecimento da água e na estação húmida-quente, quando há maior precipitação, as zonas de recarga de água tornam-se importantes, pois a água que infiltra no solo é recarregada para os aquíferos, aumentando o armazenamento da água subterrânea.

Conclusões e Recomendações

O sexto capítulo é direccionado a conclusão e recomendações obtidas durante o desenvolvimento desta pesquisa.

6.1 Conclusão

O uso das técnicas de Detecção Remota, Sistema de Informação Geográfica e do Método de Análise Hierárquica foram fundamentais para o alcance do objectivo geral do presente estudo, dando ênfase ao facto de poder fazer a análise do ambiente natural sem que haja medição directa no campo. A partir das técnicas da Detecção Remota foi possível identificar factores físicos e geológicos da bacia hidrográfica do Umbelúzi, que contribuem para o armazenamento da água, essas informações foram obtidas através das análises feitas nas imagens satélites e vectoriais, com base nesses dados foi possível mapear a distribuição da água subterrânea, avaliar e quantificar em função das zonas com potencial para recarga da água na área de estudo. Sua ocorrência e distribuição dependem especificamente das variáveis que permitem a infiltração da água precipitada nos reservatórios mais profundos. foram identificadas zonas com potencial de armazenamento da água subterrânea na área de estudo sendo que: a estação seca-fria tem baixo potencial (5.45 km²), médio potencial (266.40 km²), alto potencial (1716.32 km²) e potencialidade muito alto (55.79 km²) e a estação húmida-quente tem baixo potencial (17.26 km²), médio potencial (280.16 km²), alto potencial (1713.64 km²) e potencialidade muito alto (20.28 km²).

6.2 Recomendações

Para melhor apreciar a precisão do método e trabalhar para melhorá-lo, recomenda-se pesquisas específicas necessárias nas áreas mais seguras e produtivas, para o caso das fracturas seria necessário recurso para a exploração de dados aeromagnéticos para mapear lineamentos geofísicos em acidentes profundos e graves de extensão quilométrica, e para melhorar a extração de lineamentos geológicos pelo uso de imagens de radar de alta resolução para cobrir áreas de prospecção maiores.

Recomenda-se as entidades públicas e privadas, a aplicação das técnicas de Detecção Remota no estudo das bacias hidrográficas, particularmente na bacia do Umbelúzi. Pois o método auxilia na elaboração de políticas públicas de conservação e gestão sustentável dos aquíferos, gestão dos recursos hídricos e tomada de decisões em relação à sua exploração e protecção.

Referências Bibliográficas

(7 de Janeiro de 2019). Obtido de Sig Rio Preto:

<https://sig.riopreto.sp.gov.br/portal/home/item.html?id=7484d8f57ae1409596fb2bb99d4b7f7a>

(2021). Obtido de AmbienteBrasil:

https://ambientes.ambientebrasil.com.br/saneamento/abastecimento_de_agua/o_ciclo_hidrologico.html

Administração Regional da Água do Sul, Unidade e Gestão da Bacia do Umbeluzi. (s.d.).

Albino, A. J. (2012). *Bases Geoambientais para Gestão da Bacia Hidrográfica do Rio Umbeluzi*. Rio de Janeiro.

Almeida, J. P., & Oliveira, P. J. (2010). *Sensoramento Remoto I*. São Cristóvão.

Atunes, A. F. (2004). *Fundamentos de Sensoramento Remoto em Ambiente de Geoprocessamento*. Universidade Federal do Paraná, Geoprocessamento.

Barreiro, H. S. (2020). *Extração Automática de Lineamentos na exploração de águas subterrâneas: caso do aquífero metassedimentares da chapada diamantina centro setentrional*. Brasil.

Benjmel, K., Amraoui, F., Boutaleb, S., Ouchchen, M., Tahiri, A., & Touab, A. (10 Fevereiro de 2020). *Mapping of Groundwater Potential Zones in Crystalline Terrain Using Remote Sensing, GIS Techniques, and Multicriteria Data Analysis (Case of the Igbrem Region, Western Anti-Atlas, Morocco)*.

Bras, F. P. (2020). *Características das águas subterrâneas e dos seus percursos na Colina do Castelo: contributo para a valorização do património hidrogeológico*. Lisboa.

Carvalho, D., & Silva, L. D. (2006). Hidrologia.

Conselho de Ministros. (2007). *Estratégia Nacional de Gestão dos Recursos Hídricos de Moçambique*.

Cunha, R. M. (2021). *Comportamento Espectral*. Obtido em Junho de 2023

Feitosa, F. A., Filho, J. M., Feitosa, E. C., & Demétrio, J. A. (2008). *Hidrogeologia Conceitos e Aplicação*. Em 3 (Ed.). Brasil.

Fernandes, J. C. (2019). *Deteção Remota e Processamento de Imagens*. Portugal.

Figueiredo, D. (2005). *Conceito Básico de Sensoramento Remoto*.

Filho, C., & Fonseca, L. (2009). *Lineamentos estruturais a partir de imagem Landsat TM e dados SRTM, 2009*. São Paulo.

Freeze, R., & Cherry, J. (2017). *Água Subterrânea*. SP.

Gessulli Agribusiness. (9 de Junho de 2016). Obtido de <https://www.suinoindustria.com.br>

- Gheyi, H. R., Paz, V. P., Medeiros, S. d., & Galvao, C. d. (2012). *Recursos Hidricos em Regioes Semiaridas, Estudos e Aplicacoes*. Instituto Nacional do Semiárido, Bahia.
- Grohmann, C. H., Riccomini, C., & Steiner, S. S. (2008). *Aplicacao dos Modelos de Elevacao SRTM em Geomorfologia* (Vol. 2). Sao Paulo.
- GTK. (2006). *The Karoo Volcanic Rocks and Related Intrusions in Southern and Central Mozambique*. Direcao Nacional de Geologia, Mocambique.
- Hirata, R., Suhogusoff, A., Marcellini, S. S., Villar, P. C., & Marcellini, L. (2019). *As águas subterrâneas e sua importância ambiental e socioeconomica para o Brasil*. Sao Paulo.
- Iwai, O. K. (2003). *Mapeamento do uso do solo urbano do Municipio de sao Bernardo do Campo atraves de Imagens de Satelite*. Universidade Sao Paulo, Sao Paulo.
- Jalane, O. I. (2020). *Carbono no Solo e Correlacoes com a Dinamica da Paisagem: Contribuicao para o Planeamento e Gestao da Bacia Hidrografica do Umbeluzi-Mocambique*. Fortaleza.
- Kabeto, J., Adeba, D., Regasa, M. S., & Leta, M. K. (2022). *Groundwater Potential Assessment Using GIS and Remote Sensing Techniques: Case Study of West Arsi Zone, Ethiopia*.
- Lima, W. d. (2008). *Hidrologia florestal aplicada ao manejo de bacias hidrográficas*, Piracicaba. Brasil.
- Marchezepe, B. K. (2023). *Previsao de Vazoes em Bacias nao Monitoradas usando o Metodo Grunsky*. Sao Paulo.
- Mariano, T. B. (s.d.). *Resolucao Espacial, Espectral, Radiometrica e Temporal*. Agronomia, Geociencia.
- Martinhago, D., Marcolin, J. F., Ramallo, P., Araujo, E. C., Sandmann, A., Tonin, P., & Schutz, F. C. (2020). *Balanco Hidrico em uma Bacia hidrografica localizada no oeste do estado do Parana* (Vol. 26). Brasil.
- Menesses, P. R., & Almeida, T. (2012). *Introducao ao Processamento de Imagens de Sensoramento Remoto*. Brasilia.
- Miguel, I., Chambel, A., & Vekerdy, Z. (2022). *Integracao de Deteccao Remota e SIG na identificacao de areas da recarga e descarga de aguas subterraneas em aquiferos fracturados e detriticos no Wako Kungo, Angola*. Luanda.
- Namikawa, L. M. (2015). *Imagens Landsat 8 para o Monitoramento de Volume de Aguas em Reservatorios: Caso de Estudo nas Barragens Jaguari e Jacarei do Sistema Cantarina*. Brasil.
- Nascimento, P. R. (2019). *Aplicacao do Sensoramentos Remoti e Analise espacial em aalinhamentos geologicos como indicador da potencialidade de acumulacao de agua subterranea*. Brasilia.

- Notisso, P. F. (2020). *Aplicação do modelo Weap na avaliação de alocação da Água no Reservatório dos Pequenos Libombos, Mocambique*. Goiana.
- Nouayti, A., Khattach, D., Hilali, M., & Nouayti, N. (2019). *Mapping potential areas for groundwater storage in the High Guir Basin (Morocco): Contribution of remote sensing and geographic information system*. Marrocos.
- Novo, E. M., & Ponzoni, F. J. (2001). *Introducao ao Sensoramento Remoto*. São José dos Campos.
- Oliveira, M. F. (2014). *Geoprocessamento Aplicado ao Estudo das Aguas Subterrâneas na Micro-Bacia Hidrográfica do Corrego das Palmeras em Ribeirao Preto*. S.P.
- Oliveira, S. A. (1995). *Uso e Aplicacao de sensoramento remoto no estudo do potencial e exploracao de agua subterranea: uma abordagem metodologica*. Sao Jose dos Campos.
- Paz, A. R. (2004). *Hidrologia Aplicada*.
- Pfaltzgraff, P. A., Arrares, C. E., & Miranda, J. L. (s.d.). *Sensoramento Remoto e Geoprocessamento na Pesquisa de Agua Subterranea na Quadricula de Salgueiro-PE*.
- Press, Siever, Grotzinger, & Jordan. (2008). *Para Entender a Terra*. Porto Alegre: Bookman.
- Reis, C. M. (s.d.). *Fundamentos de Geologia*. Paraiba.
- Rezende, S. M. (2007). *Mapeamento e Avaliação do Potencial Hídrico Subterrâneo dos Aluviões em Zonas Semi-Áridas Utilizando Técnicas de Sensoriamento Remoto e SIG*. Brasil.
- Ribeiro, D. M., Sant'Anna da Franca Rocha, W., & Vasconcellos Garcia, A. (2011). *Modelagem da potencialidade hídrica das águas subterrâneas da sub-bacia do rio Siriri, Sergipe, Brasil, com base em Sistema de Informações Geográficas e técnicas de Sensoriamento Remoto Ambiente & Água - An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, (Vol. 6). Universidade de Taubate, Brasil.
- Ribeiro, S. B. (2018). *Gestao de Inundacao: Como Aminorizar seus Efeitos em Mocambique*. Brasilia.
- Rosa, R. (2013). *Introducao ao Geoprocessamento*. Universidade Federal de Umuarama, Laboratorio de Geoprocessamento.
- SADC. (2019). *Desenvolvimento de Políticas, Quadro Jurídico e Institucional para a Gestão das Águas Subterrâneas nos Estados Membros da SADC (GMI-PLI), Análise de Lacuna e Plano de Acção—Relatório de Estudo*. Mocambique.
- Sampaio, E. (2007). *Nocoes Basicas de Deteccao Remota Fotogrametria e Foto-Interpretacao*.

- Sener, E., Davraz, A., & Ozcelik, M. (2004). *An integration of GIS and remote sensing in groundwater investigations*.: Turquia.
- Silva, Almacks Luiz Carneiro;. (13 de Maio de 2016). Obtido em Fevereiro de 2023, de CBHSF: https://cbhsaofrancisco.org.br/noticias/sustentabilidade_blog/o-que-e-vazao-de-um-rio/
- Silva, J. M., & Silveira, C. T. (2015). *Uso das Imagens SRTM (SHUTTLE RADAR TOPOGRAPHY MISSION) nos Estudos e Mapeamentos Geomorfológicos, 2006, Goiana*.: Brasil.
- Silva, M. O. (27 de Fevereiro de 2018). *Importância da água subterrâneas na gestão dos recursos hídricos à escala Planeta*. Lisboa.
- Soares, I. A. (2021). *Aplicacao do Sensoramento Remoto e SIG na Analise da Vulnerabilidade e Disponibilidade Hidrica das Sub-Bacias do Rio Riachao e Rio Viera- Minas Gerais*. Universidade Federal de Ouro Preto, Geologia, Ouro Preto.
- Sousa, A. M., & Silva, J. R. (2011). *Fundamentos Teoricos de Deteccao Remota*.
- Texeira, W., Toletto, M. C., Fairchild, T. R., & Taioli, F. (2000). *Decifrando a Terra*. Santa Catarina.
- Vanessa Madrucci et all. (2005). *análise integrada de dados de sensoramento remoto, geologico e geofísico no estudo de aquíferos fracturados*. Lindoia SP.
- Wagner, A. P. (2004). *Aplicacao de imagens ASTER para estudos territoriais no Nordeste do Rio Grande do Sul*. Porto Alegre.
- Wang, Q., Zheng, W., Yin, W., Kang, G., Huang, Q., & Shen, Y. (2023). *Improving the Resolution of GRACE/InSAR Groundwater Storage Esrimations Using a New Subsidence Feature Weighted Combination Scheme*. China.
- Zenetii, S. S. (2007). *Modelagem hidrográfica em microbacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul*.
- Zou, H. (2013). *Lithologic and Mineral Mapping in the Chocolate Mountains, California, Using ASTER Data and Image Processing Techniques*.