



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane

Monografia para obtenção de grau de licenciatura em Geologia
Marinha

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCEPTÍVEIS À INUNDACAO NA
BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELÚZI-MOÇAMBIQUE
APLICANDO O MODELO HAND**

Autor:

Mário Adriano Muimela Júnior

Quelimane, Junho de 2025



UNIVERSIDADE EDUARDO MONDLANE

Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras, Quelimane

Monografia para obtenção de grau de licenciatura em Geologia Marinha

**MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS À INUNDAÇÃO NA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELÚZI-MOÇAMBIQUE APLICANDO O MODELO
HAND**

Autor

Mário Adriano Muimela

(Mário Adriano Muimela Júnior)

Supervisor

Hélter Machaieie

(Prof. Doutor Hélder Arlindo Machaieie)

Avaliador

Banito Bene Magestade

(Mestre Banito Bene Magestade)

Presidente

Carlota Alves Emílio

(Mestre Carlota Alves Emílio)

Quelimane, Junho de 2025

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus por ter me concedido a vida com saúde e por ter estado comigo por toda minha trajetória de vida nos momentos felizes e tristes, nos fracassos e vitórias e na realização dos meus sonhos.

Aos meus pais, Mário Adriano Muimela e Maria Da Conceição Hilário, pelo suporte, confiança e apoio durante a formação e também pelo amor que me tem oferecido. Aos meus irmãos, Morreira Cubúla Mário, Valdimiro Da Conceição Hilário e Berlinda Da Conceição Hilário muito obrigado, eu amo-vos. Aos meus sobrinhos Edvaldo Héber, Inocência Da Conceição, Marlon, Eloisa e Fharid. Aos meus primos: Gilícia, Messias, Hilário, Abdul, Hortêncio, Quique, Lico e Rosalina. Agradeço a minha família pela ajuda e assistência que prestaram em mim.

Ao meu supervisor Professor Hélder Arlindo Machaieie que sempre esteve disponível para a realização do trabalho, muito obrigado; MSc. Stélio Manguê e MSc. Carlota Alves por terem-me apoiado e colaborado no trabalho; aos meus grandes amigos Lic. João Pedro Pacule e João Rodrigues

Aos meus tios Válter, Elsa, Elizete, Flora, Raimundo, Orlando, Jeremias, Zinha, Felizardo, Fernando; aos meus avós Hilário Quarenta, Verónica Taipo, Maria Mucopa, ao meu cunhado Inok Eugénio, que me apoiou bastante, muito obrigado.

À UEM-ESCMC pela oportunidade de realização do curso. Agradeço também à todos aqueles aqui não citados que contribuíram para a efetivação deste sonho e todos colegas da ESCMC. O meu muito obrigado.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais e em memória do meu falecido Irmão (Adriano Bacu Mário)

“Mário Adriano Muimela e Maria Da Conceição Hilário”

por me terem colocado no mundo e por me terem dado o amor incondicional, pela educação, toda atenção e preocupação para realização dos meus sonhos e formação académica. Minha imensa gratidão. Que Allah vos abençoe.

DECLARAÇÃO DE HONRA

Eu, Mário Adriano Muimela Júnior, declaro por minha honra que esta monografia resulta do meu próprio trabalho e está submetida para obtenção do grau de Licenciatura na Universidade Eduardo Mondlane, Escola Superior de Ciências Marinhas e Costeiras Quelimane (ESCMCQ). Este trabalho nunca foi submetido para obtenção de algum grau académico na Universidade Eduardo Mondlane.

O autor:

Mário Adriano Muimela Júnior

(Mário Adriano Muimela Júnior)

Data 24/10/2025

RESUMO

Os desastres naturais estão se intensificando devido às mudanças climáticas, resultando em perdas humanas, econômicas e ambientais globais (IPCC, 2021). Moçambique é um dos países africanos mais afetados, com inundações frequentes que destroem infraestruturas, disseminam doenças e deslocam espécies. A bacia do Umbeluzi é especialmente vulnerável a inundações causadas por precipitações excessivas e ciclones tropicais, com eventos de cheias catastróficas registrados em 1972 e 1974, ciclone Claude em 1966, ciclone Demoína em 1984 e ciclone Glória em 2000 (ARA-Sul, 2016).

Este trabalho objectiva-se mapear áreas susceptíveis às inundações na parte Moçambicana da Bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi aplicando o modelo HAND. A aquisição de dados (imagens) foi através do portal oficial do Serviço Geológico dos Estados Unidos (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), de onde se baixou uma imagem Landsat 8 (30/07/2023), para gerar o mapa de cobertura e uso do solo da região e outros dados (imagens) do SRTM DEM (2014), para gerar altimetria, declividade, a rede de drenagem e o mapa do modelo HAND.

A zona ocupada na faixa de Boane na bacia do rio Umbelúzi é uma zona de risco de inundação indicando um sinal claro da influência da ocupação desordenada o que é reflexão de ocupação urbana de baixo padrão nas áreas ribeirinhas e o mau uso de terra.

A classificação da susceptibilidade à inundação com base no modelo HAND distingue zonas com baixa, média e alta susceptibilidade. As áreas mais susceptíveis à inundação estão próximas aos corpos hídricos, como em Boane e partes de Namaacha, com uma distância de susceptibilidade de até 3,02 km a partir do rio principal. A “zona ocupada” (Boane, Moamba e partes de Namaacha) representa áreas de média a alta susceptibilidade à inundação, alinhando-se com as áreas identificadas pelo modelo HAND. Essas áreas susceptíveis frequentemente coincidem com as proximidades das redes de drenagem, que seguem um padrão dendrítico, caracterizado por baixa densidade de drenagem e ramificação.

Palavras-chave: Áreas de risco, Bacia do rio Umbelúzi, Modelo HAND, Inundações, Modelo Digital de Elevação.

ABSTRACT

Natural disasters are intensifying due to climate change, resulting in global human, economic, and environmental losses (IPCC, 2021). Mozambique is one of the most affected African countries, frequently experiencing floods that destroy infrastructure, spread diseases, and displace species. The Umbeluzi basin is particularly vulnerable to floods caused by excessive rainfall and tropical cyclones, with catastrophic events recorded in 1972, 1974, 1966 (Cyclone Claude), 1984 (Cyclone Demoína), and 2000 (Cyclone Glória), (ARA-Sul,2016)

This work aims to map areas susceptible to flooding in the Mozambique part of the Umbeluzi river basin applying the HAND model. The images were acquired through the official portal of the United States Geological Survey (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), from where a Landsat 8 image (30/07/2023), to generate the land cover and use map of the region and SRTM DEM (2014), to generate altimetry, slope, drainage network and the HAND model map.

The occupied area in the Boane strip in the Umbeluzi river basin is a flood risk zone indicating a clear sign of the influence of disorderly occupation of low-standard urban occupation in riverside areas and the misuse of land.

Flood susceptibility classification based on the HAND model distinguishes zones with low, medium, and high susceptibility. The most flood-prone areas are near water bodies, such as in Boane and parts of Namaacha, with a susceptibility distance of up to 3.02 km from the main river. The “occupied zone” (Boane, Moamba, and parts of Namaacha) represents areas of medium to high flood susceptibility, aligning with the areas identified by the HAND model. These susceptible areas often coincide with the proximity to drainage networks, which follow a dendritic pattern characterized by low drainage density and branching.

Keywords: Susceptible areas, HAND model, Flood mapping, Umbeluzi basin, Digital Elevation Models.

Tabela de Abreviaturas

LANDSAT	Satélites de Observação da Terra
ARA	Administração Regional de Águas
TM	Thematic Mapper
OLI	Operational Land imager
NDVI	Índice da Diferença Normalizada da Vegetação
NDWI	Índice de Diferença de Normalizada de Água
Km ²	Quilometro quadrado
INE	Instituto Nacional de Estatística
INGC	Instituto Nacional de Gestão de Calamidades
HAND	Height Above The Nearest Drainage
DEM	Modelo de Elevação Digital
DINAGECA	Direção Nacional de Geografia e Cadastro
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
BHRU	Bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi
USGS	Serviço Geológico dos Estados Unidos
UTM	Universal Transversa da Terra
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SIG	Sistema de Informações Geográficas

Lista de Equações

Equação 1. Equação de Fator Forma.....	8
Equação 2. Equação de Compacidade.....	9
Equação 3. Equação de densidade de Drenagem.....	9
Equação 4. Equação de densidade de Confluências.....	9
Equação 5. Equação de Kirpich.....	10
Equação 6. Equação de Kirpich 2.....	10
Equação 7. Equação de calculo de NDWI.....	13

Lista de Figuras

Figura 1. Bacia Hidrográfica (Fonte: http://mundolecogeo.blogspot.com.br/2010/10/um-pequeno-texto-sobre-bacia.htm).....	Erro! Marcador não definido. 5
Figura 2. Exutório (Fonte: Sperling, 2007).....	5
Figura 3. Ordem dos cursos de água.	11
Figura 4. Localização da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi	17
Figura 5. Fluxograma para geração da suscetibilidade a inundação segundo modelo HAND	27
Figura 6. Mapa de Uso e Cobertura de Solo (30 de Julho de 2023).	37
Figura 7. Mapa de Hipsometria a bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.....	39
Figura 8. Mapa de Índice de Humidade Topografica da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.	40
Figura 9. Mapa de Redes de Drenagem da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.	25
Figura 10. Mapa de Declividade da bacia Hidrográfica da Bacia do Rio Umbelúzi.....	42
Figura 11. Mapa de susceptibilidade a inundação da bacia hidrográfica do rio Umbeluzi.....	43

Índice

AGRADECIMENTOS	I
DEDICATÓRIA	II
DECLARAÇÃO DE HONRA	III
RESUMO	IV
ABSTRACT	V
Tabela de Abreviaturas	VI
Lista de Equações	VII
Lista de Figuras	VIII
CAPÍTULO I	1
1.Introdução.....	1
1.1. Problematização e Justificativa.....	3
Geral.....	4
Específicos	4
CAPÍTULO II	5
2. REVISÃO DE LITERATURA	5
2.1. Bacia Hidrográfica.....	5
2.1.Bacias Representativas, Elementares e Experimentais.....	6
2.1.1. Bacias representativas	6
2.1.2. Bacias Elementares	6
2.2.Caracterização Fisiográfica ou Fluviomorfológica de Bacias Hidrográficas	7
2.2.1. Área da Bacia	7
2.2.2. Comprimento do Rio Principal (L)	7
2.2.3. Perfil Longitudinal	7
2.2.4. Declividades	7
2.2.5. Índices de Forma	8
2.2.6. Fator de Forma K_f	8

2.2.7. Coeficiente de Forma ou Compacidade (Índice de Gravelius) – kc	8
2.2.8. Densidades	9
2.2.9. Tempo de Concentração	10
2.2.10. Hierarquização Fluvial	10
2.3. Inundação	11
2.3.1. Tipos de Inundações	12
2.3.2. Causas das Inundações	12
2.3.3. Impacto das inundações	12
2.4. NDWI	13
2.5. Modelos Digitais de Elevação (MDE)	14
CAPÍTULO III	17
3. METODOLOGIA	17
3.1. Localização e Descrição Área de Estudo	17
3.1.1. Geomorfologia	18
3.1.2. Solos	18
3.1.3. Cobertura Vegetal	18
3.1.4. Clima	20
3.1.5. Precipitação	20
3.2. Materiais e Softwares	20
3.2. Processamento de dados	21
3.2.3. Mapa de Declividade	22
CAPÍTULO IV	25
4. RESULTADOS	25
4.1. Uso e Cobertura da Terra	25
4.2. Hipsometria	27
4.4. Redes de Drenagem	28

4.6. Áreas Susceptíveis a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi	30
5. Discussão	32
CAPÍTULO VI	33
6.1. Conclusão	33
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	35

CAPÍTULO I

1. Introdução

Os desastres naturais relacionados com fenómenos naturais estão se intensificando devido às mudanças climáticas, afectando nações globalmente e resultando em várias perdas, incluindo impactos económicos e ambientais (IPCC, 2021). Moçambique é um dos países africanos mais afectados por desastres naturais e é particularmente vulnerável às mudanças climáticas, conforme apontado em um estudo divulgado pelo Instituto Nacional de Estatística (INE) em 2014. As inundações em Moçambique exemplificam o impacto negativo desses eventos, causando destruição de infra-estruturas, disseminação de doenças, perda de bens e deslocamento de espécies.

As chuvas intensas e prolongadas durante a estação chuvosa em Moçambique podem ter consequências prejudiciais, especialmente em áreas com infra-estrutura inadequada e falta de planeamento urbano. Nessas áreas, a elevação dos níveis dos rios resulta frequentemente em inundações, caracterizadas como desastres naturais devido aos transtornos que causam à população (Marcelino *et al.*, 2004).

A bacia de Umbelúzi localizada na região sul da província de Maputo em Moçambique é particularmente vulnerável a inundações, resultantes de precipitações excessivas e da influência de ciclones tropicais. Destacam-se cinco eventos de cheias catastróficas na bacia do Umbeluzi, incluindo as cheias de 1972 e 1974 associadas a precipitações intensas e a impactos de ciclones tropicais, como Claude em 1966, Demoína em 1984 e Glória em 2000 (ARA-Sul, 2016).

Como alternativa de resolução de problemas relacionados com inundações o mapeamento e zoneamento dessas áreas têm vindo a reduzir os danos causados pelas inundações pois os mapas fornecem informações das zonas com a probabilidade de ser afectadas pela inundação. Modelos computacionais hidrodinâmicos se destacam na elaboração de mapas de inundação. No entanto, necessitam de um grande volume de dados de entrada que nem sempre são encontrados com facilidade em determinadas regiões. Além disso, as suas complexidades matemáticas, a falta de dados históricos de inundação e a dependência por calibração normalmente dificultam a sua utilização. Como alternativa, os modelos descritores de terreno vêm se sobressaindo devido a uma maior praticidade de aplicação, pois demandam poucos dados (i.e. apenas o Modelo Digital de Elevação) Rennó *et al.* (2008).

O modelo Height Above The Nearest Drainage (HAND) é um modelo descritor de terreno desenvolvido pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), cujo produto final consiste em um

Modelo Digital de Elevação (DEM) normalizado em relação aos canais de drenagem. A sua principal aplicação consiste na identificação de áreas propensas à inundação, podendo ser empregado como ferramenta de auxílio ao planejamento em diferentes escalas, seja em análises municipais ou em bacias hidrográficas de grande abrangência. O modelo HAND foi inicialmente proposto por Rennó *et al.* (2008) e já alcançou visibilidade internacional.

Em Moçambique, existem trabalhos feitos na mesma área de estudo relacionados com análise, impacto, e gestão das inundações na bacia do rio Umbelúzi. O mapeamento de áreas susceptíveis aplicando o modelo HAND em Moçambique é um tema novo, a precipitação é um dos factores relacionados a inundações e seria um factor muito importante para o estudo deste trabalho.

1.1. Problematização e Justificativa

Moçambique enfrenta frequentes desastres naturais, como secas, ciclones e inundações, devido à falta de monitoramento e conhecimento insuficiente das áreas susceptíveis a esses eventos. As inundações, como as que devastaram o Distrito de Boane em Fevereiro de 2023, causam sérios prejuízos humanos, económicos e ambientais. A falta de informações precisas sobre as áreas vulneráveis e a ausência de estratégias eficazes de prevenção e gestão tornam o país susceptível a repetidos cenários de desastres. Como resultado, comunidades são impactadas negativamente, a vida selvagem e os ecossistemas são afectados, e os prejuízos económico persistem e o conhecimento do mapeamento de áreas susceptíveis à inundação na bacia hidrográfica, pode vir a ser uma das formas de reduzir os prejuízos que as cheias causam pois ajudam na prevenção, preparação e respostas a eventos de inundação por meio de localização ou identificação de áreas susceptíveis a inundação, alertas, planeamento e zoneamento urbano estratégico. Daí que surge a seguinte pergunta de pesquisa:

" Como o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações na bacia do rio Umbelúzi pode ajudar a prevenir desastres e melhorar a resiliência das comunidades em Moçambique?"

1.2. Objectivos

Geral

Mapear áreas susceptíveis às inundações na parte moçambicana da Bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi aplicando o modelo HAND.

Específicos

- Analisar o uso e cobertura do solo na região;
- Fazer a caracterização Geomorfológica; e
- Classificar o grau de susceptibilidade à inundação usando o modelo HAND.

CAPÍTULO II

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica é uma área de captação natural da água de precipitação da chuva que converge os escoamentos para um único ponto de saída. Este ponto de saída é denominado exutório. Uma bacia hidrográfica é composta por um conjunto de superfícies vertentes constituídas pela superfície do solo e de uma rede de drenagem formada pelos cursos da água que confluem até chegar a um leito único no ponto de saída (Tucci, 1997). O exutório do curso principal coincide com o ponto mais inferior para onde converge toda a descarga hídrica desta bacia, como pode ser observado na figura 2. A figura 1 abaixo é possível observar imagem de uma bacia hidrográfica.



Figura 1: Bacia Hidrográfica (Fonte: <http://mundolecogeo.blogspot.com.br/2010/10/um-pequeno-texto-sobre-bacia.htm>)

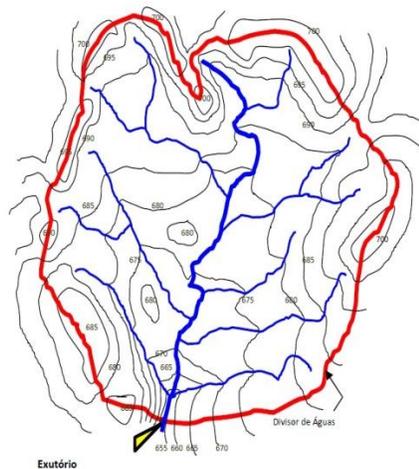


Figura 2. Exutório (Fonte: Sperling, 2007).

2.1. Bacias Representativas, Elementares e Experimentais

2.1.1. Bacias representativas

São bacias instrumentadas com aparelhos de observação e registo de fenômenos hidrológicos que representam bacias situadas em uma mesma região homogênea (Paiva, 2001). Apresentam extensões de 1 a 250 Km². Em geral essas bacias são instrumentadas para obtenção de dados típicos de uma região homogênea a que pertencem, permitindo a fundamentação de estudos que resultam em um melhor conhecimento dos processos hidrológicos atuantes. A observação dessas bacias deve ser realizada por longos períodos de tempo, preferencialmente superiores a 30 anos, que posteriormente devem ser avaliados em conjunto com estudos climáticos, pedológicos, geológicos e hidrogeológicos (Paiva, 2001).

2.1.2. Bacias Elementares

São bacias de pequena ordem, que constituem a menor unidade geomorfológica onde podem ocorrer todos os processos elementares do ciclo hidrológico. Paiva (2001) diz que em geral as bacias elementares, apresentam tamanho de até 5 km² permitindo as seguintes considerações:

- uniformidade em toda área dos eventos pluviométricos;
- características de vegetação e pedologia semelhantes em toda a bacia;
- controle sobre a entrada de sedimentos provenientes de outras áreas;
- identificação rápida e precisa de mudanças no horizonte superficial dos solos que constituem as bacias;
- não haja efeitos significativos da concentração de água e sedimentos nas calhas dos cursos de água, quando comparada à produção destes nas vertentes

2.1.3. Bacias experimentais

São bacias relativamente homogêneas no que se refere à cobertura do solo. Possuem características físicas relativamente uniformes, com área menor do que 4 Km², onde são realizados estudos detalhados do ciclo hidrológico (Paiva, 2001). Em alguns casos são selecionadas bacias com algumas condições naturais alteradas para estudar seu efeito sobre o comportamento hidrológico, inferindo leis e demais relações. Os principais objetivos das bacias experimentais são:

- avaliar a influência de manejos como desmatamento e influência de diferentes usos do solo na produção de erosão e no ciclo hidrológico;
- testar, validar e calibrar modelos de previsão hidrológica; e
- treinamento de técnicos e estudantes com os aparelhos de medição hidrológica (medidores de vazão, linígrafos, molinetes, etc) e climática.

2.2. Caracterização Fisiográfica ou Fluviomorfológica de Bacias Hidrográficas

Os dados fisiográficos são todos aqueles dados que podem ser extraídos de mapas, fotografias aéreas e imagens de satélite. Basicamente são áreas, comprimentos, declividades e coberturas do solo obtidos directamente ou expressos por índices (Tucci, 2004).

2.2.1. Área da Bacia

Fundamental para definir o potencial de geração de escoamento da bacia hidrográfica, uma vez que o seu valor multiplicado pela lâmina da chuva precipitada define o volume de água recebido pela bacia. É obtida através da projeção vertical da linha do divisor de águas sobre o plano horizontal (Tucci, 2004).

A área da bacia é expressa em hectares (ha) ou quilômetros quadrados (km²) e pode ser obtida por planimetragem de mapas ou por cálculos a partir de mapas digitalizados, utilizando ferramentas computacionais de SIG (Sistemas de Informações Geográficas) (Tucci, 2004).

2.2.2. Comprimento do Rio Principal (L)

É determinado a partir do perfil longitudinal do curso d'água medindo-se o comprimento do trecho entre a nascente mais distante e o ponto de interesse ou exutório (Tucci, 2004).

2.2.3. Perfil Longitudinal

Os perfis longitudinais são obtidos em mapas planialtimétricos e representam a variação de cotas ao longo do comprimento do rio principal (Tucci, 2004).

2.2.4. Declividades

A declividade é muito importante para a modelagem do escoamento, uma vez que a velocidade de fluxo depende desta variável. Pode ser determinada por vários métodos.

Em geral consiste na razão entre a diferença das altitudes dos pontos extremos de um curso de água e o comprimento desse curso d'água, pode ser expressa em % ou m/m (Paiva, 2001).

A diferença entre a elevação máxima e a elevação mínima resulta na amplitude altimétrica da bacia. Esta é a maneira mais simples de se calcular a declividade, entretanto, para rios que percorrem relevos muito diferenciados é necessário fazer algumas correções.

2.2.5. Índices de Forma

A forma de uma bacia hidrográfica também tem um papel importante no seu comportamento hidrológico.

Villela e Mattos (1975) afirmam que a partir do comparativo de bacias com características semelhantes, identificamos que as bacias com forma mais circular apresentam uma tendência de gerar picos de enchente mais elevados em relação às bacias alongadas.

Se as bacias circulares apresentarem diversas drenagens com comprimentos semelhantes, o percurso dos escoamentos é mais curto, gerando respostas mais rápidas e concentradas a eventos de chuva.

Já as bacias mais alongadas, em geral apresentam um rio principal com diversos tributários menores, onde a água tem que percorrer um caminho mais longo até o exutório.

Villela e Mattos (1975) afirmam que assim, tendem a apresentar cheias mais distribuídas com menor vazão de pico.

A avaliação da forma de uma bacia é efetuada a partir do cálculo de índices que procuram relações com formas geométricas conhecidas. Dentre os métodos destaca-se *factor de forma o índice de compacidade*:

2.2.6. Fator de Forma K_f

Villela e Mattos (1975) afirmam que corresponde à razão entre a área de bacia e o quadrado de seu comprimento axial medido ao longo do curso d'água principal do exutório à cabeceira mais distante.

$$K_f = \frac{A}{L^2}$$

Equação 1. Equação de Fator Forma.

2.2.7. Coeficiente de Forma ou Compacidade (Índice de Gravelius) – k_c

Villela e Mattos (1975) afirmam que é a relação entre o perímetro da bacia hidrográfica e a circunferência de um círculo com a mesma área da bacia. É um número adimensional que varia de acordo com a forma da bacia; quanto maior o coeficiente, mais longa é a bacia. Quanto mais próximo

de 1, mais circular é a bacia e maior é a sua tendência a gerar enchentes rápidas e acentuadas. É definido pela seguinte equação:

$$Kc = 0,28.P.\frac{A1}{2}$$

Equação 2. Equação de Compacidade.

Onde: **P** é o perímetro da bacia em km e **A** é área da bacia em km².

2.2.8. Densidades

A densidade de drenagem é um indicador do relevo superficial e das características geológicas da bacia. Este índice permite avaliar a eficácia de drenagem de uma bacia, ou seja, a eficiência na concentração do escoamento superficial no exutório da bacia (Tucci, 2004).

Quanto maior a densidade de drenagem, maior a capacidade da bacia de fazer escoamentos rápidos no exutório, bem como deflúvios de estiagem baixos. É um parâmetro utilizado para pré-avaliação em estudos de regionalização ou transposição de dados hidrológicos entre bacias de uma região, pois permite avaliar a semelhanças de escoamento entre bacias hidrográficas de tamanhos diferentes (Tucci,2004).

Este parâmetro pode ser calculado em função do comprimento de todos os canais pela área da bacia ou a partir do número de confluências pela área da bacia (Tucci, 2004,).

DD: Densidade de drenagem (Tucci, 2004):

$$DD = \frac{(\sum L)}{A}$$

Equação 3. Equação de densidade de Drenagem.

Onde: **L** é o Comprimento de cada curso da água da bacia e **A** é a área da bacia.

Dc: Densidade de confluências (Tucci, 2004):

$$Dc = \frac{Nc}{A}$$

Equação 4. Equação de densidade de Confluências.

Onde: **Nc** é o número total de confluências e **A** área da bacia.

A densidade de drenagem varia de acordo com a escala do mapa no qual é levantada, portanto deve-se utilizar sempre a mesma escala para o comparativo entre bacias.

2.2.9. Tempo de Concentração

É o tempo que a água leva para percorrer desde o ponto mais distante da bacia até o exutório. Quando se conhece bem a relação precipitação vazão é mais fácil de calcular o tempo de concentração. Na ausência destes dados podem ser aplicadas fórmulas empíricas respeitando-se suas limitações. Dentre estas se destacam:

Kirpich: é uma das equações mais utilizadas, desenvolvida a partir de estudos em bacias rurais com áreas inferiores a $0,5 \text{ km}^2$. Para comprimentos superiores a 10 km, a fórmula parece subestimar o valor de T_c (Tucci, 1995). É definido pela seguinte equação:

$$T_c = 57 \times L^{0,77} \times S - 0,385$$

Equação 5. Equação de Kirpich.

Onde: **L** é comprimento do talvegue (Km) (comprimento do rio acrescido da distância da nascente principal ao divisor de águas) e **S** é Declividade do talvegue.

$$T_c = 3504 \times (n \cdot L)^{0,6} \cdot S - 0,3 \cdot I - 0,4$$

Equação 6. Equação de Kirpich 2.

Onde: **L** é comprimento do talvegue (Km) (comprimento do rio acrescido da distância da nascente principal ao divisor de águas), **n** é coeficiente de rugosidade de Maning, **I** é Intensidade da Chuva em mm/h e **S** é declividade do talvegue m/km.

2.2.10. Hierarquização Fluvial

a rede fluvial de drenagem de uma bacia hidrográfica pode ser classificada segundo uma hierarquia, sendo a mais utilizada a de Horton modificada por (Strahler Tucci, 2004).

A hierarquização de Horton apresenta uma lógica bem definida, o que possibilita o ordenamento automatizado a partir de programas computacionais de GIS. Este sistema de ordenamento tem o seguinte princípio (Tucci, 2004):

1. Canais de primeira ordem são os menores identificáveis caracterizados por drenagens intermitentes.
2. Canais de segunda ordem são formados pela confluência de dois canais de primeira ordem, esta lógica é aplicada para as demais, onde a confluência de dois canais de ordem i resulta em um canal de ordem $i+1$ a jusante.

3. Onde um canal de ordem menor encontrar um de ordem maior, o canal a jusante mantém a maior das duas ordens.
4. A ordem da bacia hidrográfica é designada como a ordem do rio que passa pelo exutório.

A figura 3, demonstra a ordem dos cursos de água.

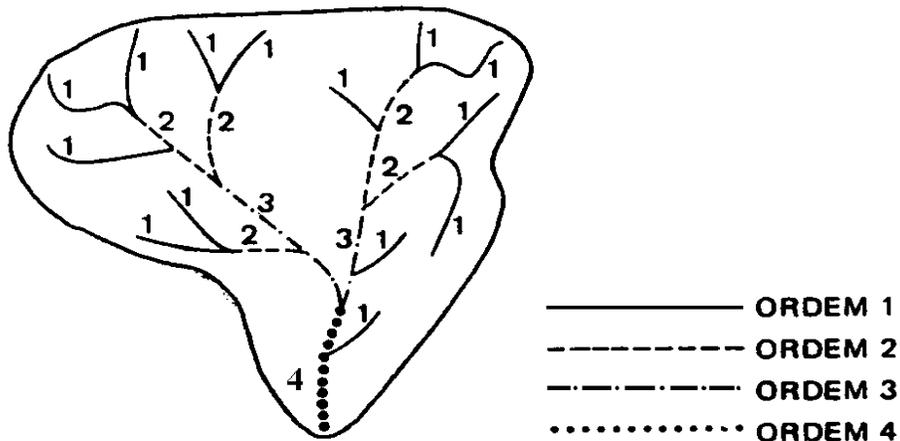


Figura 1. Ordem dos cursos de água.

2.3. Inundação

A inundação é o transbordamento das águas sobre as áreas próximas ao seu fluxo principal. Estas áreas planas próximas aos rios, sobre as quais as águas extravasam são chamadas de planície de inundação. Desta forma, quando não ocorre o transbordamento das águas de seu canal principal, apesar do rio ficar praticamente cheio, tem-se uma enchente e não uma inundação.

Por esta razão, no mundo científico, os conceitos de “inundação” e “enchente” devem ser usados com diferenciação (Kobiyama *et al.*, 2006). As inundações são fenômenos naturais extremos e temporários provocados por precipitações moderadas por longos períodos ou por precipitações curtas, mas de elevada intensidade (INGC, 2016)

2.3.1. Tipos de Inundações

Existem três tipos de inundações nomeadamente:

Inundação fluvial: quando ocorrem fortes chuvas que causam transbordamento da água dos rios e lagos.

Inundação marítima: originada de grandes ondas e ressacas;

Inundação artificial: causadas por falhas humanas, como rompimento de barragens, acidentes na operação de comportas.

2.3.2. Causas das Inundações

A principal causa das inundações são as chuvas fortes em um curto período de tempo. Nestes casos, o factor escoamento supera a infiltração, a evaporação e a interceptação da água pela vegetação ou por depressões, aumentando a probabilidade de ocorrência (Nelson, 2012).

A ocorrência de um evento de grande precipitação ao longo de um curto período de tempo dentro de uma pequena área decorre na inundação de córregos locais e gera poucos efeitos em áreas a jusante. Essa situação é descrita pelo autor como inundação a montante.

No caso de ocorrência de grandes quantidades de chuva ao longo de um longo período de tempo, alcançando uma grande área da bacia, cheias a jusante (também chamado cheias regionais) podem ocorrer, pois as inundações se estendem por um maior período de tempo e afetam os fluxos maiores, os afluentes e riachos (Nelson, 2012).

Ayala e Goudie (2010) descrevem que fatores como o regime climático, morfometria da rede de drenagem, as condições de infiltração do solo nas encostas e divisores, os aspectos geológicos referentes à estrutura, tectônica e erodibilidade da superfície e a cobertura vegetal e práticas de uso e ocupação da terra, como sendo importantes elementos que condicionam um evento de inundação.

2.3.3. Impacto das inundações

As consequências das inundações são diversas, desde a perda de vidas humanas à destruição de bens materiais e pessoais.

Apesar de existirem meios tecnológicos que podem minimizar os efeitos das inundações, as consequências destas são ainda, em alguns casos, bastante prejudiciais para o Homem e, diversas vezes, para a Natureza (Banco Mundial, 2007).

As principais consequências das inundações são a evacuação e desalojamento de pessoas, danificação de propriedades, interrupção de fornecimento de bens às populações perda de produção e de produtividade, ocorrência de movimentos e deslizamentos de terrenos, destruição de habitações e infraestruturas, poluição de rios, mares, propagação de doenças, destruição de culturas, áreas de cultivo e materiais agrícolas (Banco Mundial, 2017).

2.4. NDWI

O Índice da Diferença Normalizada da Água (NDWI) é um método desenvolvido por McFeeters (1996) com o intuito de delinear feições na água apresenta no ambiente e realçar a presença das mesmas na imagem digital tratada por sensoriamento remoto.

Este método deriva do Índice da Diferença Normalizada de Vegetação (NDVI – Normalized Difference Vegetation Index), o qual se baseia na assinatura espectral característica de uma vegetação sadia mostrando um contraste evidente entre uma combinação das bandas do vermelho e do infravermelho próximo. Quanto maior for o contraste, maior será o vigor da vegetação na área imageada (McFeeters, 1996)

McFeeters (1996) modificou a fórmula do NDVI invertendo as variáveis e usando a banda verde ao invés da banda vermelha, a fim de obter melhores resultados voltados à água.

Gao (1996) também notou que o NDWI baseado nas bandas do infravermelho próximo e do infravermelho médio das imagens Landsat foi altamente correlacionado com o conteúdo de água no vegetal e conseguiu acompanhar melhor as mudanças na biomassa e nos estresses de humidade das plantas do que com o NDVI (descrito acima).

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Equação 7. Equação de calculo de NDWI.

onde 'verde' corresponde a faixa espectral da banda 3 (faixa verde do espectro visível) e IVP, a faixa espectral da banda 5, região do infravermelho próximo.

A seleção destas bandas tem intenção de: (1) maximizar a refletância típica de feições na água nos comprimentos de onda relativo ao canal verde; (2) minimizar a baixa refletância no infravermelho

próximo de feições na água; e (3) utilizar a alta refletância no infravermelho próximo por feições de vegetação terrestre e solo.

Assim, o NDWI foi desenvolvido para delinear características da água e acentuar sua presença em imagens digitais do sensoriamento remoto, simultaneamente elimina características do solo e da vegetação terrestre (McFeeters, 1996).

2.5. Modelos Digitais de Elevação (MDE)

Mikhail, Bethel e McGlone (2001), afirmam que o Modelo de Elevação Digital (DEM é definido como uma representação digital da superfície terrestre por meio de um conjunto de pontos e linhas com coordenadas geográficas e de elevação conhecidas. De acordo com (Paparoditis e Polidori, 2002), o DEM refere-se a um tipo específico de Modelo Digital de Elevação (DEM), o qual representa a superfície física do terreno, não incluindo objetos acima do mesmo, tais como vegetação e feições antrópicas. Os Modelos Digitais de Elevação (DEM) permitem descrever, compreender e prever o armazenamento e os movimentos da água na superfície terrestre (Moore *et al.*, 1992).

Tais modelos, quando inseridos em modelos hidrológicos permitem estimar a previsão do fluxo e da direção de escoamento da água e podem ser empregues como parâmetros para as políticas públicas para estabelecer planos de utilização para áreas com alta susceptibilidade a inundações.

2.6. Modelo HAND

O modelo HAND (Height Above The Nearest Drainage) que em português é Altura Acima da Drenagem Mais Próxima, foi desenvolvido por Rennó *et al.* (2008) e é um dos modelos hidrológicos empregados na simulação de áreas mais suscetíveis à inundação. Esse modelo utiliza a diferença entre a altitude extraída do DEM e a rede de drenagem de referência para calcular alturas relativas, que possuem relação com a profundidade do lençol freático e com a topografia do terreno (Rennó *et al.*, 2008; Nobre *et al.*, 2011).

O modelo Height Above Nearest Drainage (HAND) é um modelo hidrológico que representa um terreno susceptível à inundação de acordo com a distância vertical e horizontal do canal de drenagem mais próximo. De forma geral, o modelo normaliza a altitude de uma bacia baseando-se na altura relativa ao longo da rede de drenagem, determinando assim o potencial gravitacional ou relativo da drenagem de uma área. O HAND é, portanto, um Modelo de Elevação Digital (DEM) com altimetria normalizada em relação à rede de drenagem mais próxima. Uma descrição detalhada sobre o modelo

HAND, foi apresentada em (Renno *et al.*, 2008 e Nobre *et al.*, 2011), estes que introduziram o modelo, bem como as suas bases físicas e hidrológicas.

No modelo HAND, a partir de um DEM, o valor de um pixel é dado pela diferença altimétrica entre seu valor de elevação e a elevação de um pixel pertencente à rede de drenagem mais próxima. Desse modo, quão mais próxima é uma área representada por um pixel do nível de elevação de outro pixel que representa um canal de drenagem mais próximo, mais suscetível é à inundação. O HAND também representa o potencial de drenagem local, que se correlaciona fortemente com a profundidade do lençol freático, uma vez que também considera a distância de um pixel no plano horizontal (Rahmati *et al.*, 2018). O HAND é, portanto, um índice que apresenta a realidade geométrica da superfície com altimetria normalizada em relação à rede de drenagem mais próxima (Renno *et al.*, 2008, Nobre *et al.*, 2011, Momo *et al.*, 2016, Milanesi, *et al.*, 2017).

Devido à lógica de processamento do modelo HAND, em que se determina as condições hidrológicas do terreno e, conseqüentemente, áreas de maior potencial de drenagem são destacadas, é possível estabelecer uma relação espacial e/ou temporal acerca da distribuição de áreas com solos úmidos (Nobre *et al.*, 2016). Ademais, o modelo HAND tem sido amplamente utilizado em diversos estudos, tais quais, análises hidrogeomorfológicas, em avaliação da suscetibilidade a inundações e movimentos de massa, em mapeamento de solos e recursos hídricos, estudos de ecologia vegetal e ribeirinha, entre outros (Rahmati *et al.*, 2018).

As curvas de nível que podem ser extraídas pelo modelo HAND foram abordadas por (Nobre *et al.*, 2015) como “HAND contour”, apresentando um novo conceito de curvas de nível normalizada de acordo à distância vertical em relação a uma rede de definida. Desse modo, é possível utilizar a premissa da obtenção de valores altimétricos de referência por critérios analíticos para o HAND contour a fim de delimitar uma superfície potencial de inundação em uma determinada área valendo-se apenas de parâmetros topográficos.

Nesse sentido (Speckhann, 2018) analisou a superfície potencial de inundação a partir de seis diferentes descritores de terreno, tendo o índice HAND obtido o melhor resultado de acurácia (91%). (Momo *et al.*, 2016) compararam a acurácia obtida no mapeamento de áreas suscetíveis a inundação com HAND a de modelos de inundação consagrados na literatura internacional, tal qual HEC-RAS 1D, LISFLOOD-FP 1D e TELEMAC 2D. Os resultados mostraram que a acurácia obtida pelo índice HAND em diferentes cotas de inundação é equiparável à dos modelos citados, apesar de que estes dependem do esforço de muitos dados físicos de parâmetro e alta capacidade computacional para

processar os modelos matemáticos adotados. O HAND, no entanto, tem seu desempenho mais condicionado à resolução espacial e à qualidade geométrica do modelo digital de elevação ou de terreno de origem.

O mapeamento de áreas suscetíveis de inundação representa um grande avanço para gestão e controle de cheias visando redução dos danos gerados pelo evento natural enchente. O mapeamento das áreas suscetíveis à inundação é uma parte fundamental das medidas não estruturais de prevenção e/ou mitigação de desastres.

Tucci e Bertoni (2003), afirmam que os mapas de inundação podem ser de dois tipos:

a) **Mapeamento de planejamento:** tem como objetivo definir as áreas atingidas por cheias, considerando um período de tempo de retorno;

b) **Mapeamento de alerta:** descreve para cada esquina ou ponto de grade da área, o nível da régua para o qual inicia a inundação do ponto. Este mapa possibilita o monitoramento de uma possível ocorrência da enchente. Este acompanhamento é baseado nas observações das réguas de referência.

Para desenvolver o zoneamento de áreas de inundação, se deve considerar uma delimitação da cheia com determinado período de retorno (Tucci e Bertoni, 2003). Baseado nisso, se define as áreas de acordo com o risco e a capacidade hidráulica de interferir nas cotas de cheias.

O enquadramento da área depende das características de escoamento, da topografia e do tipo de ocupação e uso do solo dessas faixas. Uma vez identificada uma área suscetível à inundação para uma área já ocupada, o mapeamento facilita o estabelecimento de um programa de transferência da população ou desenvolvimento de uma capacidade de convivência com a frequência de ocorrência de eventos de cheias. Os elementos fundamentais do processo de mapeamento são a base cartográfica, localização precisa dos elementos do sistema e as características hidráulicas da superfície da bacia.

CAPÍTULO III

3. METODOLOGIA

3.1. Localização e Descrição Área de Estudo

A bacia do rio Umbelúzi localiza-se entre os paralelos $25^{\circ} 40' 22''$ e $26^{\circ} 16' 47''$ de latitude Sul e meridianos $31^{\circ} 55' 43''$ e $32^{\circ} 29' 01''$ de longitude Este (Figura 3). É uma bacia transfronteiriça com uma área total de 5600Km^2 compartilhada por três países (Moçambique, Essuatíni e Africa de Sul).

Nasce em Essuatíni com 56% (3140Km^2) de área onde tem dois principais afluentes, os rios M'buluzi Negro e M'buuzi Branco, e entra em Moçambique pelo distrito de Namaacha na fronteira Goba e desagua a oeste da baía de Maputo (norte de Boane), na parte Moçambicana com 42,5% (2380Km^2) de área, localiza-se inteiramente na província de Maputo e os seus afluentes são os rios Calichane e rio Movene, a montante e pequena porção da Africa de Sul com 1,5% (80Km^2) de área (Figura3).

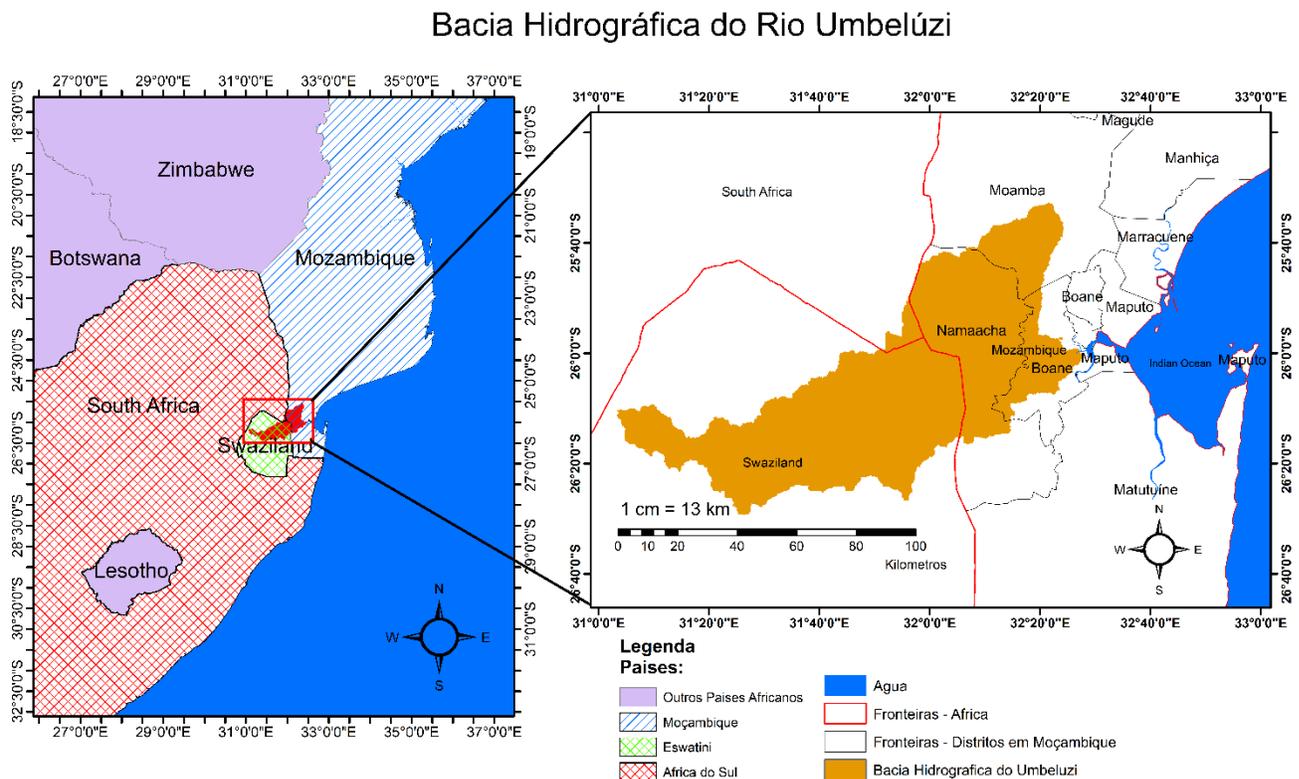


Figura 2. Localização da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi, através do DEM.

3.1.1. Geomorfologia

A bacia do rio Umbeluzi apresenta, segundo Muchangos (1999) e Lopes (2011) formações geológicas do Cretáceo com representações de eras mais moderna na planície litorânea, onde formações pós-cretáceas estão cobertas por formações quaternárias representadas por dunas interiores e aluviões.

O relevo da bacia é caracterizado, em geral, por uma paisagem levemente ondulada e sem grandes diferenças de altitude. Na parte norte, leste e sudoeste apresenta uma paisagem com pequenas diferenças de nível, formando-se uma verdadeira planície. Segundo Lopes (2011), as regiões sul e oeste são marcados por uma variação gradual de altitudes atingindo cerca de 1.900 metros.

3.1.2. Solos

São escassas as informações sobre os solos na área da bacia do rio Umbeluzi, havendo disponível a descrição do DINAGECA (Direção Nacional de Geografia e Cadastro) de 1997, que individualiza na área do baixo curso da bacia do Rio Umbeluzi três grandes grupos de solos:

- Solos fluviais de alta fertilidade, que abundam principalmente ao longo das margens dos rios Tembe e Umbeluzi, mais precisamente nos bairros de Belo Horizonte, Campoane, 25 de Setembro e Jossias Tongogara;
- Solos arenosos de fertilidade muito baixa e baixa retenção de água que ocupam grande parte da proximidade da Vila de Boane;
- Solos argilosos vermelhos que ocupam uma proporção espacial intermédia entre os bairros de Belo Horizonte, Campoane, 25 de Setembro e Jossias Tongogara.

A ocupação do solo é predominantemente constituída pela cana-de-açúcar, na Suazilândia que é responsável por 70% de consumo dos recursos hídricos na bacia (Juízo; Líden, 2010). Em Moçambique, predominam as culturas de banana e citrinos, cujo consumo de água é de cerca de 17,5% dos recursos hídricos do baixo Umbeluzi.

3.1.3. Cobertura Vegetal

Ao descrever as características da flora moçambicana e sua distribuição regional, (Muchangos, 1999) considera que Moçambique está situada na região sudano-zambezíaca, da qual também fazem parte a Tanzânia, o Malawi, a Zâmbia, o Zimbabwe, o Botswana e a Swazilândia.

Em função do meio geográfico em que se desenvolve e do grau de intervenção humana, a flora moçambicana pode subdividir-se em: terrestre, aquática e cultural.

A composição e distribuição de sua flora terrestre estão relacionadas com sua posição geográfica na zona subequatorial, tropical do Hemisfério Sul e também na área da costa oriental e austral do continente africano. Além disso, as condições regionais e locais do clima, relevo, rios, lagos, rochas, solos e a distância em relação ao Oceano Índico exercem influência sobre a composição e distribuição da flora terrestre (Muchangos, 1999).

A localização de Moçambique na região florística sudano-zambezíaca e as condições climáticas condicionam o desenvolvimento de variedades de associações vegetais hidrófilas, mesófilas e xerófilas de floresta e de savanas arbóreas e arbustivas. As diferenças na distribuição, composição, densidade e variedade de espécies se devem aos factores de: latitude, alternância entre as terras altas e as depressões, continentalidade, natureza pedológica, condições de água, de solo e o grau de intervenção humana. Estes factores provocam diferenças espaciais na distribuição da vegetação.

A área de dispersão da floresta está relacionada com o clima, continentalidade, altitude e as condições edáficas. Ela apresenta características mesófilas- subequatoriais com grande diversidade e tamanho de árvores que atingem até 35 m de altura. Para esta floresta, o clima subequatorial do norte do país e de todo o litoral oferece as melhores condições para o seu desenvolvimento devido às características de umidade e pluviosidade. Ela se desenvolve preferencialmente em áreas onde a pluviosidade é superior a 1000 mm³ por mais de cinco meses e tem o carácter de floresta sempre verde, (Muchangos, 1999).

Trata-se de uma floresta que possui grande densidade de estrato arbóreo, árvores de tronco grosso com amplas copas que se elevam até a uma altura de 10 a 20 m. Em geral, suas folhas são pequenas e caducas, raramente largas e perenes. O estrato herbáceo é pobre e constituído por gramíneas curtas. Segundo (Muchangos, 1999), na área de estudo, a vegetação original era formada por floresta densa ou aberta, existindo dominância das espécies da família das sapotaceae.

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 carácter xerofílicos 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 *thameda-turbina* (Muchangos, 1999).

3.1.4. Clima

Os tipos de clima em Moçambique são determinados pela localização da zona de baixas pressões equatoriais, das células anticiclónicas tropicais e das frentes polares do Antártico (Muchangos, 1999). O litoral moçambicano sofre influências da corrente quente denominada Moçambique - Agulhas e dos correspondentes ventos dominantes marítimos do quadrante este. Caracteristicamente o clima de Moçambique apresenta duas estações bem marcadas: uma chuvosa (meses de outubro a março) e seca (meses de abril a setembro).

O carácter predominantemente tropical do clima moçambicano se define, sobretudo, pela coincidência entre o período de chuvas e o período quente, e pela amplitude térmica anual muito baixa, sendo, em todo País, inferior à amplitude térmica diária (Muchangos, 1999).

Lopes (2011) 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 Umbeluzi, predomina o tipo seco de estepe.

3.1.5. Precipitação

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. No território moçambicano, a sua média anual é de 800 mm, variando de 600 mm na zona costeira a 1.000 mm na Cordilheira dos Libombos (ARA-Sul, 2014).

O regime das chuvas na BRU 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 registadas 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. Materiais e Softwares

Para a realização desta pesquisa foram utilizados os seguintes materiais e métodos:

Softwares:

- ✓ ArcGis 10.5 - foi à ferramenta para criação, recortes dos mapas e dos Modelos Digitais de Elevação;
- ✓ Model Hand - foi à ferramenta usada na criação das redes de drenagem da bacia e mapa de susceptibilidade de inundação da bacia;
- ✓ Imagem Landsat 8 (30/07/2023) - Os dados (imagens) foram adquiridos no USGS através do portal oficial (<https://earthexplorer.usgs.gov/>);
- ✓ SRTM DEM (2014) - Os dados (imagens) foram adquiridos no USGS através do portal oficial (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

3.2. Processamento de dados

3.2.1. Uso e cobertura de Terra

A imagem orbital utilizada neste estudo foi a cena 168/78 (órbita-ponto) do satélite/sensor Landsat 8 OLI (Operador de imagem terrestre) de 30 de julho de 2023, acomodado no sítio do Levantamento Geológico dos Estados Unidos - USGS. As bandas 3 (verde do visível) e 5 (infravermelho próximo) foram selecionados, de acordo com a metodologia para a obtenção do NDWI (McFeeters, 1996).

Além disso, foi utilizado o arquivo de dados de forma a se obter como informações destas bandas. A imagem foi projetada para o sistema de coordenadas Universal Transversa de Mercator – UTM, WGS84, fuso 23S, através do aplicativo ArcGis, após o cálculo de NDWI a imagem foi reclassificada em nove classes (classificação supervisionada) com recurso a um algoritmo de classificação criado de acordo com a cobertura e o uso do solo da região.

3.2.2. Caracterização Geomorfológica

3.2.3. Modelo de Elevação Digital e Mapa Hipsométrico

Foram utilizadas quatro imagens do DEM as quais foram unificadas pela ferramenta de Mosaico disponível no ArcMap, usou se quatro imagens para cobrirem toda a bacia do Umbelúzi, as imagens do DEM são de 2014 (s26_e031_1arc_v3, s26_e032_1arc_v3, s27_e031_1arc_v3 e s27_e032_1arc_v3).

O processamento do DEM, contou com a fase da reprojeção do modelo para o hemisfério Sul como parte integrante necessária para a caracterização da área de estudo. A fase seguinte foi gerar a topografia local através da ferramenta “Slope” do Data Analysis no ArcMap, seguido da definição de Intervalos da altimetria da bacia, gerou-se também a declividade.

3.2.4. Mapa de Declividade

Essa metodologia foi desenvolvida no SIG ArcMap no qual foi gerada um mapa de declividade desenvolvida com base em um DEM.

Inicialmente, utilizou-se a ferramenta Slope, obtendo-se o mapa de declividade. Contudo, por se tratar de um arquivo raster não foi possível calcular as áreas correspondentes de cada classe de declividade. Deste modo, foi necessária a conversão dos dados de imagem em dados gráficos, ou seja, vetoriais, permitindo a determinação das áreas de cada intervalo dos quais foram formados polígonos. Para isso, no mesmo programa computacional, foi necessário o reconhecimento do mapa como uma imagem unificada, para então, delimitar os polígonos a partir da diferença entre as cores de cada classe, fez-se uso da ferramenta Raster to Polygon.

A declividade pode ser expressa em graus (0 a 90°) ou em porcentagem (0 a infinito) e é definida como sendo a relação entre desníveis e suas correspondentes distâncias horizontais, ou seja, é a variação da altitude entre dois pontos do terreno, em relação as suas distâncias. Para o presente trabalho, adotou-se a classificação da Empresa Brasileira de Produção Agropecuária – EMBRAPA (1999), conforme tabela 1.

TABELA 1- Classificação do relevo, conforme a EMBRAPA.

Fonte: EMBRAPA, (1999).

Intervalo %	Tipo de declividade no relevo
0 – 3	Relevo Plano
3 - 8	Relevo Suavemente Ondulado
8 – 20	Relevo Ondulado
20 - 45	Relevo Forte Ondulado
45 - 75	Relevo Montanhoso
>75	Relevo Escarpado

3.2.5. Mapa da Rede de Drenagem e o Mapa do Modelo HAND

Para a elaboração do mapeamento das áreas suscetíveis a inundação da BHRU foi utilizada como referência básica o documento “Nota Técnica para Elaboração de Modelagens de Inundação do CPRM” (Conceição e Simões, 2021). Tal metodologia visa estimar o grau de suscetibilidade de inundação em classes, por meio de dados essencialmente topográficos, uma vez que, a suscetibilidade está associada à condição natural do terreno (Bitar, 2014). Diante disso, os aspectos hidrológicos – relativos a períodos de retorno de chuva e volume hídrico – não foram abordados nesse trabalho, pois são fatores que possuem maior relação com os temas Perigo e Risco. Portanto, as variáveis utilizadas no presente trabalho foram definidas a partir do proposto pela Nota Técnica para elaboração de modelagem de inundação (Conceição e Simões, 2021; Bitar, 2014), que considera quatro mapas temáticos: Hipsometria/Altitude, Declividade/Padrões de relevo, Altura HAND.

O primeiro passo foi plotar a rede de drenagem no DEM utilizando o método AGREE. Tal procedimento inclui: (1) gerando um novo arquivo com o DEM, na qual os valores de altitude das células de drenagem receberam um decremento arbitrário na elevação. O novo DEM foi exportado para o software TerraHidro, em formato com 8 bits. Na sequência, foram calculados parâmetros para análise hidrológica. Tais parâmetros são exigidos para o emprego do Algoritmo HAND. Os parâmetros calculados foram: Fill (Preenchimento de Depressões); Flow Direction (Direção de Fluxo); Flow Accumulation (área Acumulada); e Stream Definition (Definição da Rede de Drenagem Raster). De posse das imagens rasters geradas para cada parâmetro, gerou-se o modelo HAND, que posteriormente foi classificado com objetivo de representar por graduação de cores os intervalos indicam o potencial de inundação de cada ponto deste modelo raster nas proximidades dos canais fluviais.

O raster do modelo HAND, após a classificação foi exportado para o formato tif, para que o mesmo fosse compatível com o software Arc GIS 10.5.1. Já no Arc GIS, a imagem raster foi reclassificada, agrupando os pixels de forma a identificar as áreas com altíssimo, alto, médio, baixo, muito baixo e sem risco a suscetibilidade a inundações. Após o comando Reclass (reclassificação) da ferramenta Spatial Analyst Tools (Análise Espacial), a imagem raster foi convertida para o formato vetorial.

Para determinar a hierarquia fluvial da rede de drenagem da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi, utilizou-se a metodologia de Strahler (1952), a identificação inicia-se com os canais de primeira ordem, são os canais que não possuem nenhum afluente, podendo ser considerado como as nascentes, os canais de segunda ordem surgem a partir da confluência de dois canais de primeira ordem, para a formação dos canais de terceira ordem é necessário que haja confluência com dois canais de segunda ordem, que

pode receber contribuições de canais de primeira ordem. Quando dois canais de terceira ordem se encontram, surge canal de quarta ordem que poderá receber canais de ordem inferior, e assim por diante. A hierarquia fluvial é uma classificação que representa o grau de ramificação de uma bacia (Vilela e Matos, 1975).



Figura 5. Fluxograma para geração da suscetibilidade a inundações segundo modelo HAND. (Fonte: Bitar, 2014).

CAPÍTULO IV

4. RESULTADOS

4.1. Uso e Cobertura da Terra

O mapa de uso e cobertura do solo obtido a partir da classificação do NDWI (figura 6), apresenta 9 classes: Campo de cultivo Abandonado, Campo de cultivo activo, Solo Exposto: Zonas Baixas, Solo Exposto: Zona de pastagem, Vegetação Arbustiva, Vegetação Densa, Zona Ocupada, Corpo Hídrico e Zona Baixa Humida. É possível ver a predominância da classe de zona ocupada na região norte de Namaacha e na região de Moamba, e maior parte da área da bacia no distrito de Boane é ocupada pela mesma classe. A classe de zona baixa húmida está infiltrada na classe de zona ocupada sobre tudo nas zonas de Moamba, Namaacha e Boane, ocupando regiões próximas aos rios, e nas redondezas desta cobertura (Zona ocupada) observa-se a classe campo de cultivo activo, ao todo o solo exposto (zonas baixas) acompanha a classe da vegetação arbustiva e a vegetação densa na região moçambicana na bacia de Umbelúzi.

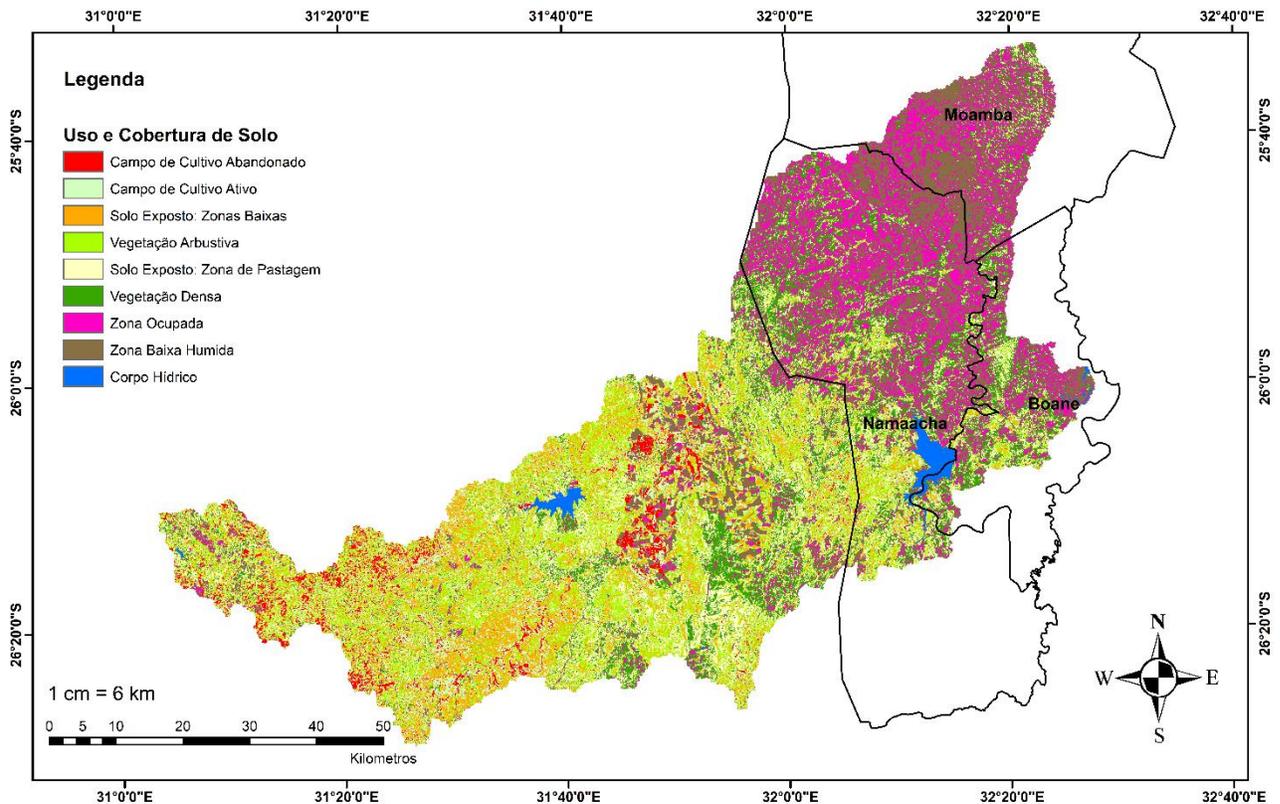


Figura 6. Mapa de Uso e Cobertura de Solo (30 de Julho de 2023).

A tabela 2, apresenta a percentagem de cada classe de uso e cobertura do solo, e é possível que a classe de vegetação densa tem maior percentagem correspondente a 18%, sendo possível observar zonas ocupas e pastagem com percentagens iguais a 17%, seguido de vegetação arbustiva com 15% , zonas baixas e humidas com 12% a 10%, áreas inseridas nas zonas ocupadas, cultivo activo e abandonado com 7% e 3% e corpo hídrico com 1%.

Tabela 2: Tabela da descrição das classes do mapa de Uso e Cobertura do solo

Classes	Áreas das Classes em Km²	Percentagem
Campo de Cultivo Abandonado	169	3%
Campo de Cultivo Activo	390	7%
Solo Exposto: Zonas Baixas	648	12%
Vegetação Arbustiva	830	15%
Solo Exposto: Zonas de pastagem	924	17%
Vegetação Densa	961	18%
Zona Ocupada	913	17%
Zona Baixa Húmida	551	10%
Corpo Hídrico	60	1%

4.2. Hipsometria

O mapa hipsométrico mostra a existência de altitudes que variam de planaltos a planície: planaltos altos (600 à 800 metros), planaltos médios (200 à 400 metros), planaltos baixos (100 à 200 metros), e planícies (0 à 100 metros) ao longo da área moçambicana da bacia hidrográfica do rio Umbeluze, tendo o seu ponto mais alto com cerca de 800 m, o monte Mponduíne, que se inclina ligeiramente em direcção a leste, de acordo com a figura 7.

Os planaltos altos (600 à 800 metros) correspondem a terceira unidade das mais representativas dentro da área da bacia na parte oeste do distrito de Namaacha, que caracteriza o ponto mais alto, planaltos médios, geralmente com altitudes entre 200 e 400 metros, que constituem um alongamento na parte noroeste do distrito de Namaacha, que se estende até as terras do distrito de Moamba. Planaltos baixos na parte norte do distrito de Moamba e Namaacha (figura 7), correspondente a segunda unidade mais representativas da bacia.

Na região noroeste do distrito de Namaacha, que se estende até as terras do distrito de Moamba, o rio cortou uma profunda garganta, desaguando, mais abaixo, numa vasta planície, em altitudes entre 100 a 0 metros, indo desaguar no Oceano Índico. A planície que corresponde as áreas abaixo dos 100 m de altitude ocupa a maior parte da bacia no território moçambicano (primeira unidade mais representativa da bacia), concretamente no distrito de Boane e na região sul do distrito de Namaacha (figura 7).

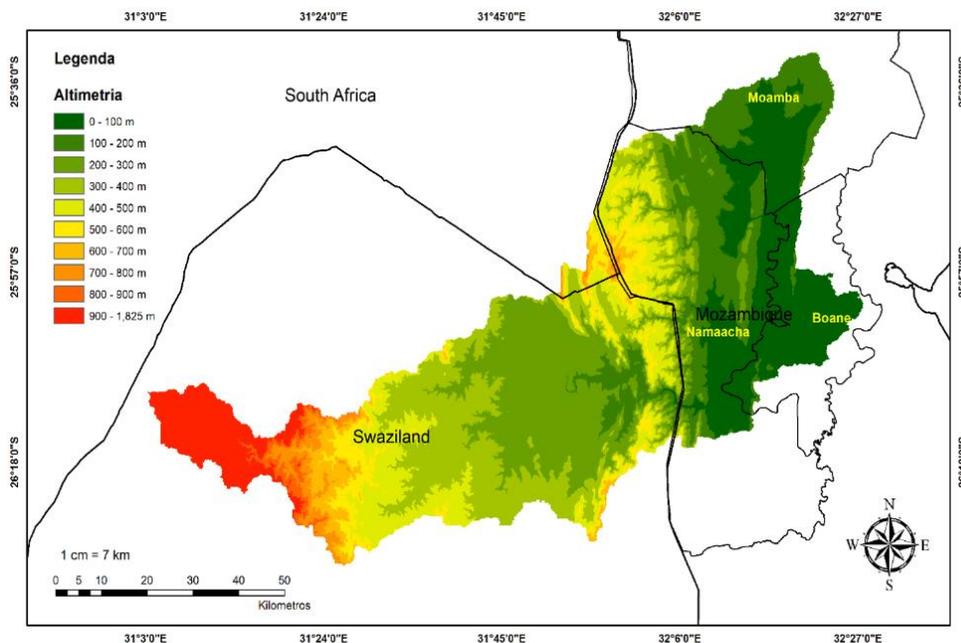


Figura 7. Hipsometria da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi.

4.4. Redes de Drenagem

De acordo com a figura 8, a bacia hidrográfica do rio Umbelúzi é de quinta ordem, na hierarquia de Strahler (1952), ou seja, apresenta baixo grau de ramificação e possui um padrão de drenagem dendrítica (Padrão no formato de uma árvore), segundo Chistofolletti (1974).

A baixa ordenação dos canais fluviais na bacia do rio hidrográfica do rio Umbelúzi indica um relevo pouco dissecado, relativamente plano, de baixa densidade de drenagem. Os canais distribuem-se em todas as direções sobre a superfície e se unem formando ângulos agudos de graduações variadas, mas sem chegar ao ângulo recto.

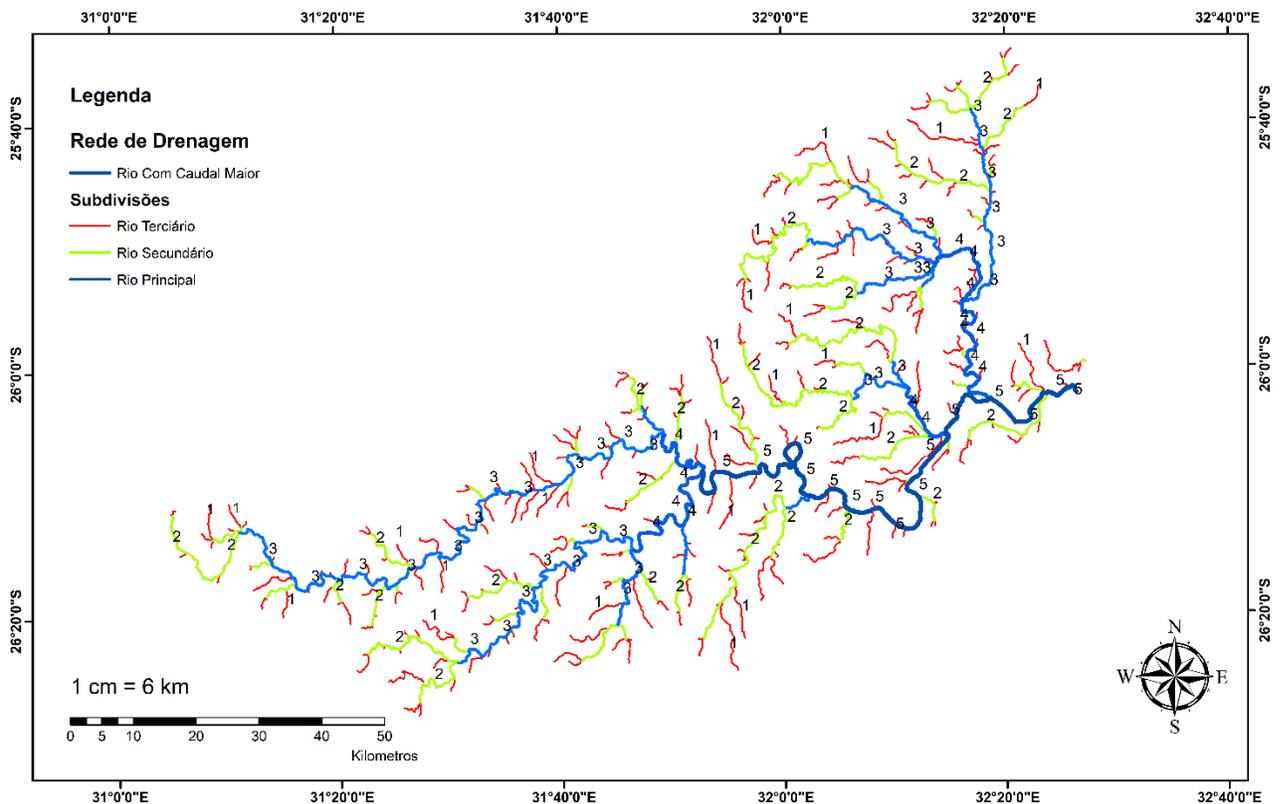


Figura 8. Mapa de Redes de Drenagem da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi.

4.5. Declividade

O mapa de declividade, foram geradas seis (6) classes: plano (0-3%), suave ondulado (3-8%), ondulado (8-20%), forte ondulado (20-45%), montanhoso (45-75%) e escarpado (75-235%). Nota-se que as maiores inclinações estão presentes nas proximidades dos córregos (cursos de água) que compõem a rede de drenagem, ademais nas imediações da foz concentra-se porção significativa de superfície com declividade acentuada (figura 9).

A região de Boane foi classificada como plana com declividade a variara de 0 a 3%, com ondulação suave até 8%, as mesmas características são observadas em Moamba. Noroeste do distrito de Namaacha com intervalo de 8 a 20% de declividade correspondendo a uma região ondulada e nas cordilheiras com declividade de 20-45% (forte ondulado) à 45-75% de declividade correspondendo a montanhosa, de acordo com a figura 9.

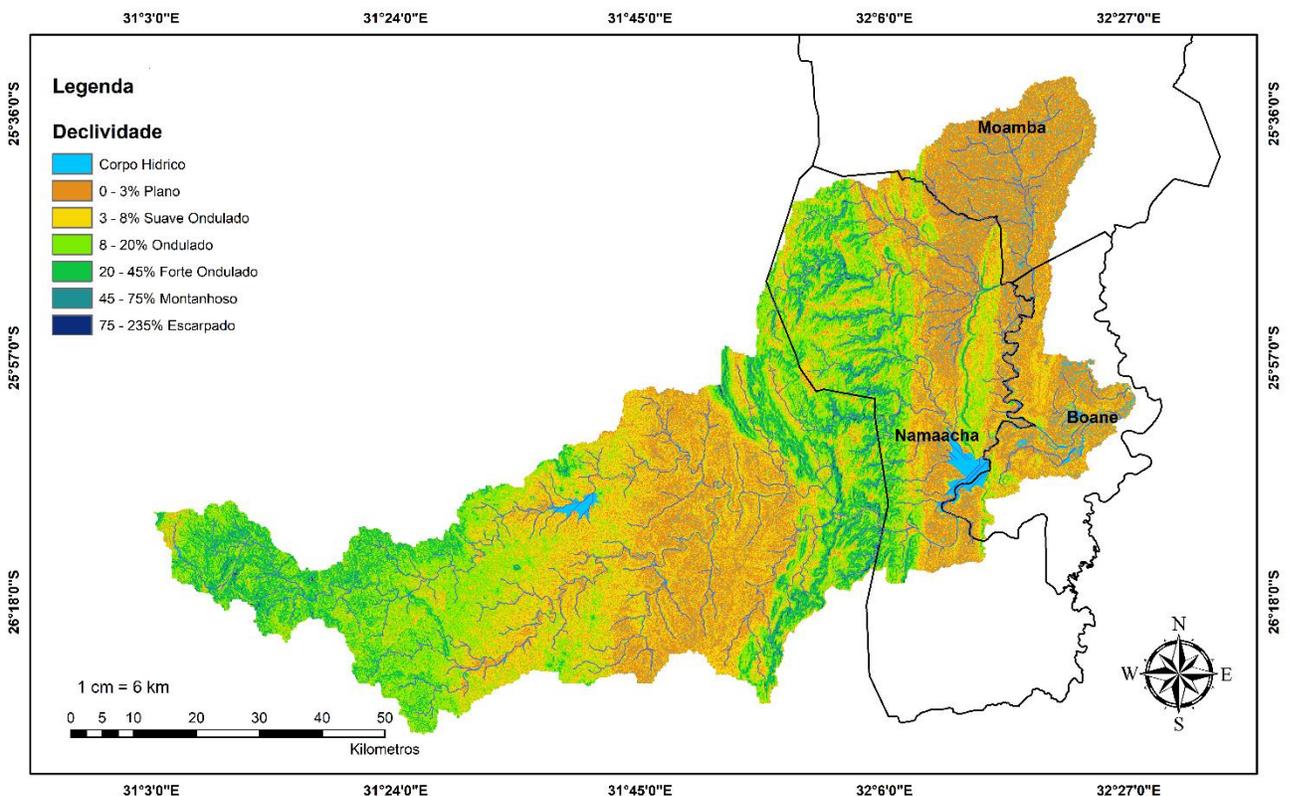


Figura 9. Mapa da Declividade da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi.

4.6. Áreas Susceptíveis a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi

Para a elaboração do mapa HAND, utilizou-se a imagem do DEM (2014). Considerando a metodologia de (Nobre *et al.*,2011), o mapa HAND foi classificado conforme a susceptibilidade à inundação: baixa, média e alta (tabela 3). Para este estudo foram utilizadas como referência as alturas de inundação do nível da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi do Boletim N° 76/2023-ARA Sul, IP/DPTO. RECURSOS HIDRICOS (12/02/2023), considerando a cotas de alerta observadas em 2023.

Na figura 10, as regiões próximas aos corpos hídricos são mais susceptíveis a inundação, e regiões distantes apresentam baixa susceptibilidade a inundações. Partindo do rio principal a distância de susceptibilidade atinge um raio de 3.02km, regiões localizadas depois desse raio (3.02km) são consideradas regiões não susceptíveis a inundações.

Tabela 3. Critérios de classificação da susceptibilidade de inundação de acordo com a altura HAND.

Classes de Susceptibilidade	Altura do HAND
Alta	2m
Média	4m
Baixa	6m
Sem Risco	>6m

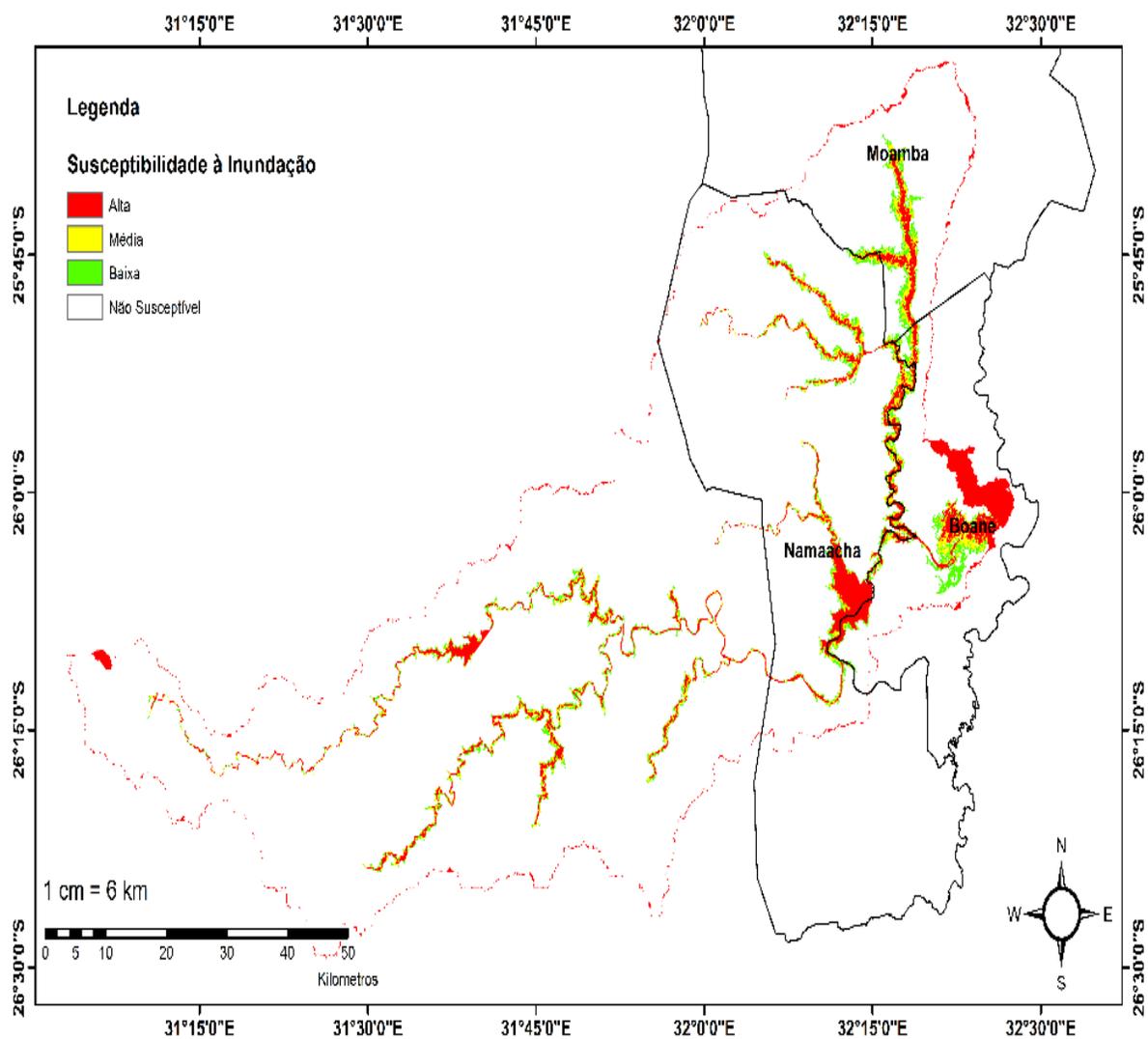


Figura 10. Mapa de susceptibilidade a inundação da bacia hidrográfica do rio Umbelúzi.

CAPÍTULO V

5. Discussão

A ocupação do solo tem a capacidade de influenciar directamente na ocorrência de inundações, uma vez áreas ocupadas tende a apresentar um solo impermeável, que dificulta a infiltração da água das chuvas. O mapa de uso e cobertura de solo, na zona ocupada (figura 6) é uma zona de médio à alto risco de inundação pois coincide com a região mapeada pelo modelo Hand (Hassane, 2022).

Nesse sentido, as áreas mais planas e com altimetria muito baixa, apresentam maiores probabilidades de sofrer inundações em comparação com as áreas fortemente onduladas, montanhosas, escarpadas e com altimetria alta (Campos *et al.*, 2015; Campioli; Vieira, 2019; Rodrigo, 2019).

A área de susceptibilidade a inundação na bacia Hidrográfica do rio Umbelúzi na região de Moçambique é praticamente planície observando o mapa de declividade na figura (9), pois esse mapa coincide com a região mapeada pelo modelo Hand como sendo Susceptível (média à alta) e (Albino, 2012) sustenta que a declividade, considerando a planície correspondendo a uma zona baixa é susceptível a inundação. A declividade influencia no escoamento superficial, pois quanto maior o declive do terreno, maior será a predisposição da água escoar, facto que a água escoar mais rápido da região com altimetria elevada na bacia do rio Umbelúzi em direção as zonas (Prochmann, 2014).

As redes de drenagem na bacia hidrográfica do rio Umbelúzi têm um Padrão dendrítico, também chamada de arborescente (devido a sua configuração ser parecida a de uma árvore), pois apresenta baixa densidade de drenagem e grau de ramificação (Christofolletti, 1980).

O modelo Hand mostra que as regiões susceptíveis a inundação estão nas proximidades dos rios, porque o modelo Hand identifica as alturas de cada ponto da área em relação a drenagem mais próxima. Por sua vez Fonseca, Silva e Garcias (2022) defendem que as zonas próximas aos rios estão sujeitas a inundações condicionadas pelo transborde dos rios. Tal foi o que sucedeu nas cheias ocorridas em Fevereiro de 2023 quando as chuvas intensas causaram aumento do caudal dos rios e consequente transborde dos mesmos. Isso fez com que grande parte de Boane ficasse inundada principalmente no curso do rio Umbelúzi (Jornal: *Observador*) evidenciando que regiões próximas aos rios estão sujeitas a inundações.

CAPÍTULO VI

6. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

6.1. Conclusão

O estudo fala de mapeamento de zonas susceptíveis à inundações na bacia do rio Umbelúzi em Moçambique usando o modelo HAND e concluiu-se que:

A zona ocupada na faixa de Boane na bacia do rio Umbelúzi é uma zona de alto risco de inundação, indicando um sinal claro da influência no processo de infiltração do solo, que é reflexão de ocupação urbana de baixo padrão nas áreas ribeirinhas;

A hipsometria desempenha um papel significativo na susceptibilidade a inundações, onde a inclinação do terreno influencia o escoamento superficial, acelerando-o. Essa relação entre topografia e inundações é evidenciada pelo modelo HAND, que identifica as áreas próximas aos rios como particularmente susceptíveis a inundações, baseado na análise das alturas em relação à drenagem mais próxima. A área susceptível a inundação da bacia Hidrográfica do Rio Umbelúzi é praticamente uma Planície (0 à 100 m) segundo o mapa de Hipsométrico, a altimetria foi o factor de maior importância, em função de influenciar na direcção, velocidade da água e no acúmulo de água nos terrenos de baixa altitude, tornando-se áreas de alto risco de inundação.

O mapeamento de declividade é um factor com maior importância atribuída, por revelar a gênese das formas do relevo e considerar as complexidades que não seguem um padrão altimétrico de fácil delimitação, o que permite identificar quais feições são mais susceptíveis ao processo de inundações. Regiões planas tem maior probabilidade de ocorrência de alto risco de inundação, em contraste com áreas montanhosas. O mapa de declividade revela que as áreas castanhas (Boane, Moamba e uma parte de Namaacha) representam declividades menores (0-3% plano), enquanto as áreas roxas indicam declividades mais acentuadas (76-235% escarpado). Notavelmente, as maiores inclinações são encontradas nas proximidades de córregos e fozes. Essa característica do terreno favorece o aumento do escoamento superficial, criando uma correlação directa com a susceptibilidade a inundações.

A classificação da susceptibilidade à inundação, com base no modelo HAND, distingue zonas com baixa, média e alta susceptibilidade. É importante notar que as áreas mais susceptíveis à inundação estão próximas aos corpos hídricos (Boane e uma parte de Namaacha), com uma distância de susceptibilidade de até 3,02km a partir do rio principal. Essas áreas susceptíveis frequentemente coincidem com as proximidades das redes de drenagem, que seguem um padrão dendrítico, caracterizado por baixa densidade de drenagem e ramificação.

6.2. Recomendações

Olhando os resultados nesta pesquisa recomenda-se:

- Uma Análise de Impacto de Inundações na região moçambicana na Bacia do Umbelúzi;
- Monitoramento Contínuo e Pesquisas a Longo Prazo na Bacia do Umbelúzi;
- Planejamento Urbano Sustentável e Gestão de Drenagem; e
- Estudos utilizando dados de precipitações e dados de solos para melhor compreensão.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Albino, A. J. (2012). *ANÁLISE HIDROCLÍMATICA DAS BACIAS HIDROGRÁFICAS E SEU ENTORNO- ESTUDO DO CASO DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO UMBELUZI-MOÇAMBIQUE*.
- Costa, F. d., Lourenço, L., & Ferreira, C. (2015). Medidas preventivas na gestão integrada do risco de inundação em Portugal:.
- Fonseca, M. N., Silva, L. P., & Garcias, C. M. (2022). COMUNICAÇÃO DE RISCO DE INUNDAÇÃO.
- Gao, BC NDWI - Um Índice de Água de Diferença Normalizada parasensoriamento remoto de líquido vegetal do espaço. *Ambiente de Sensoriamento Remoto*, v.58, n.3, p. 257-266, 1996.
- Hassane, A. L. (26 de Maio de 2022). Planejamento ambiental urbano e risco de inundação em Beira (Moçambique).
- Instituto Nacional de Estatística, 2014. Guião de orientações das estatísticas sociais, demográficas e económicas de Moçambique, Maputo. Disponível em: www.ine.gov.mz. Acesso em 17 de set. 2007.
- McFeeters; SK O uso da Água de Diferença Normalizada Índice (NDWI) no delineamento de águas abertas características. *Jornal Internacional de Sensoriamento Remoto*, v.17,n.7, p. 1425-1432, 1996.
- Moore, I., Grayson, R. & Ladson, A. 1992. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, 5(1): 3-30.
- Muchangos, Aniceto dos. (1999). Moçambique: paisagens e regiões naturais. A. dos Muchangos.
- Nobre, A., Cuartas, L.A., Hodnett, M., Rennó, C.D., Rodrigues, G., Silveira, A., Waterloo, M. & Saleska, S. 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, 404: 13-29.
- Paiva, P.C. (2001). Spatial and temporal variation of a nearshore benthic community in Southern Brazil: Implications for the design of monitoring programs. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*.
- Prates, V., Sugamoto, M., & Sirtoli, E. (2012). Indices representing landscape as a support for pedological survey in GIS environment. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*.

Rennó, C., Nobre, A.D., Cuartas, L.A., Soares, J.V., Hodnett, M.G. & Tomasella, J., Waterloo, M. 2008. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112: 3469-3481.

Siefert, C. A. C., & Santos, I. D. (2012). Identificação de áreas hidrologicamente sensíveis por meio de modelagem hidrológica e da distribuição espacial de solos e vegetação em ambientes hidromórficos. *Sociedade & Natureza*, 27(1), 141-155.

Tucci, M. P. (2004). *The rational expectation hypothesis, time-varying parameters and adaptive control: A promising combination?.* Dordrecht: Springer.

Queiroga, A. A., Oliveira, R. G., Filgueira, H. J., & Cunico, C. (16 de Maio de 2022). Mapeamento de áreas suscetíveis à inundação aplicando diferentes modelos digitais de elevação no modelo Height Above the Nearest Drainage (HAND).

Walter, H-J et al. (2000): Reduced scavenging of ²³⁰Th in the Weddell Sea: implications for paleoceanographic reconstructions in the South Atlantic.

ARA-Sul. Informação para a operação da barragem dos Pequenos Libombos. 2016.

BANCO MUNDIAL, 4^a, 2007, MOÇAMBIQUE. Estratégia Nacional de Assistência para Recursos Hídricos em Moçambique. [S.l.: s.n.], 2007. 107 p. Acesso em: 04 nov. 2017.

BITAR O. Y. (Coord.). Cartas de suscetibilidade a movimentos gravitacionais de massa e inundações: 1:25.000. São Paulo: IPT- Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo; Brasília: CPRM - Serviço Geológico do Brasil, 2014. Livro eletrônico. (Moçambique).

BRESSIANI, J. X.; SCHMIDT, M. A. R. Proposta de uso das áreas variáveis de afluência como área de preservação permanente. *Revista Monografias Ambientais*, v. 15, 198-208, 2016

BRIGUENTI, Ederson Costa. O uso de geoindicadores na avaliação da qualidade ambiental da bacia do ribeirão Anhumas, Campinas/SP. 2005. 129 p. Dissertação de Mestrado. Universidade de Campinas/Unicamp, Campinas.

CHRISTOFOLETTI, Antonio. *Geomorfologia*. 2. Ed. São Paulo:Edgard Blucher, 1980.

CONCEIÇÃO, R.A.C.; SIMÕES, P.M.L. Nota Técnica para Elaboração de Modelagens de Inundação. CPRM, 2021

DAHLKE, H. E.; EASTON, Z. M.; FUKA, D. R.; WALTER, M. T.; STEENHUIS, T. S. Real-Time Forecast of Hydrologically Sensitive Areas in the Salmon Creek Watershed, New York State, Using an Online Prediction Tool. *Water*, v. 5, n. 3, p. 917-944, 2013.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. Brasília. 412p, 1999.

IPCC, 2021: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Masson-Delmotte, V., P. Zhai, A. Pirani, S.L. Connors, C. Péan, S. Berger, N. Caud, Y. Chen, L. Goldfarb, M.I. Gomis, M. Huang, K. Leitzell, E. Lonnoy, J.B.R. Matthews, T.K. Maycock, T. Waterfield, O. Yelekçi, R. Yu, and B. Zhou (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.

JUIZO, D.; R. Liden. Modelling for transboundary water resources planning and allocation: the case of Southern Africa. *Hydrology and Earth Systems Sciences*. n.14, p. 2343–2354, nov. 2010.

MARCELINO, E. V.; GOERL, R. F.; RUDDORF, F. M. (2004). “Distribuição espaço-temporal de inundações bruscas em Santa Catarina (Período 1980-2003)”. In: Simpósio Brasileiro De Desastres Naturais, 1, Florianópolis. Anais... Florianópolis: GEDN/UFSC, 2004. pp. 554-564. Acesso em: 04 nov. 2017.

MILANESI, J.; QUADROS, E. L. L.; LAHNM, R. A. Utilização do modelo HAND no reconhecimento dos terrenos sujeitos a inundação - Porto Alegre/RS. *Revista Brasileira de Cartografia*, n. 69/4, p. 675-686, Abr/2017.

MINELLA, J.P.G.; MERTEN, G.H., 2009. Índices topográficos aplicados à modelagem agrícola e ambiental. *Revista Ciência Rural*, v.42, n.9. SABZEVARI, T. et al. A steady-state saturation model to determine the subsurface travel time (STT) in complex hillslopes. *Hydrology and Earth System Sciences*, Gottingen, v.14, n.6, p.891- 900. 2010

MOMO, M. R. (2014). AVALIAÇÃO DA APLICAÇÃO DO MODELO HAND NO MAPEAMENTO DE ÁREAS SUSCETÍVEIS A INUNDAÇÃO NO MUNICÍPIO DE BLUMENAU. BLUMENAU.

OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A.; SALDANHA, D. L. Influência de variáveis morfométricas e da distribuição das chuvas na previsão de enchentes em São Sebastião do Caí, RS, 2010. In: VIII SINAGEO, 2010, Recife. Anais [...]. Pernambuco, 2010, n. 3, p. 140-155.

PAIVA, J.B.D.; PAIVA E.M.C.D. Hidrologia aplicada à gestão de pequenas bacias hidrográficas. PROCHMANN, J. R. Análise especial da suscetibilidade à inundações na bacia hidrográfica do Córrego grande, Florianópolis – SC. Trabalho de Conclusão de Curso (Monografia). Florianópolis: Universidade Federal de Santa Catarina, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; 2014645p. ABRH, 2001.

RAHMATI, O.; KORNEJADY, A.; SAMADI, M.; NOBRE, A. D.; MELESSE, A. M. Development of an automated GIS tool for reproducing the HAND terrain model. Environmental Modelling & Software, v. 102, p. 1-12, Abr. 2018.

RODRIGUES, P.R.S. Análise espacial de suscetibilidade à inundação da bacia hidrográfica do Tucunduba-BELÉM-PA: Impactos Ambientais. 2019. Monografia (Trabalho de Conclusão de Curso em Engenharia Ambiental e Energia Renováveis), Universidade Federal Rural da Amazônia, Belém, 2019.

SPECKHANN, Gustavo Andrei. Uma proposta de mapeamento de risco de inundação na bacia do Rio Itajaí utilizando descritores de terreno. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental). Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis – SC, 2018

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) – analysis of erosion al topography. Geological Society of America Bulletin, v.63, n.10, p.1117-1142, 1952.

TUCCI, C. E. M. 1997. Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/Editora da UFRGS, 1997.

www.nationalgeographic.com/environment/article/floods

<https://observador.pt/2023/02/12/numero-de-mortes-sobe-para-seis-nas-cheias-no-sul-mocambique/>