



Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal

Departamento de Engenharia Rural

Licenciatura em Engenharia Agronómica

Eloide Iva Muchine

**Mapeamento de Áreas Agrícolas em Risco de Inundações na Bacia
Hidrográfica do Rio Búzi, Usando a Ferramenta GIS *Flood Tool***



Supervisores

Prof. Doutor Sebastião Famba, Eng.º

Mestre Artur Pedro Madal, Eng.º

Maputo, Março de 2026

Eloide Iva Muchine

**Mapeamento de áreas agrícolas em risco de Inundações na Bacia
Hidrográfica do Rio Búzi, Usando a ferramenta GIS *Flood Tool***

Projecto Final apresentado ao Departamento de Engenharia Rural da Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, como parte dos requisitos para a obtenção do grau de Licenciatura em Engenharia Agronómica.

Maputo, Março de 2026

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho em especial à todos aqueles que, em algum momento da vida, se deixaram paralisar pelo medo de não serem capazes, de falhar ou de não estarem prontos o suficiente para enfrentar os desafios que os cercam.

Durante este percurso, reconheci em mim essas inseguranças. Por vezes duvidei, recuei e pensei em desistir. Esta caminhada, foi acima de tudo, um exercício de resiliência. Cada obstáculo superado, cada momento de queda, procrastinação, seguido de aprendizado, faz com que este trabalho não represente apenas uma conquista acadêmica, mas, também uma prova de superação e amadurecimento pessoal.

Por isso, dedico este trabalho àqueles que carregam dentro de si uma força silenciosa mas, que ainda não encontraram coragem para trazê-la à luz. Que este trabalho sirva de lembrete de que é possível, eu duvidei, mas é possível, e que cada passo dado com coragem é uma vitória sobre si mesmo.

Filipenses 4:13
“Posso todas as coisas, naquele que me fortalece”
de Apóstolo Paulo, servo de Jesus Cristo

AGRADECIMENTOS

Quero primeiro agradecer à Deus, minha fonte inesgotável de sabedoria e força. Agradecer por me sustentar em momentos de incertezas, renovar minha fé diante dos desafios, me encher de saúde e acima de tudo, por conceder a graça de concluir esta etapa da minha vida com dignidade e perseverança.

Aos meus pais, Lolinda e Januário, endereço total agradecimento, que com amor incondicional, sacrifícios silenciosos e palavras encorajadoras, me ensinaram o valor da educação, da perseverança e da humildade. Sem o apoio de vocês não teria sido possível.

Aos meus queridos irmãos, Euclídia, Cláudia e Igor, que sempre estiveram presentes, oferecendo apoio sincero, celebrando cada conquista e me lembrando do quanto sou capaz. Obrigada por fazerem parte do meu alicerce emocional durante esta caminhada.

Aos colegas que se tornaram amigos para toda a vida, Jennifer, Chantel, Amanda, Nelsa, Shelcia, Pedro e Jorge, minha eterna gratidão por cada momento e conhecimento compartilhado, por todas as conversas profundas, cada trabalho em grupo, pelas madrugadas de estudo e sem esquecer dos estudos de última hora, pelos desabafos, incentivos e por dividirem comigo a intensidade dessa jornada acadêmica. Obrigada por tornarem a carga da faculdade muito mais leve, com certeza foram os melhores, noutra vida certamente que escolheria vocês denovo para embarcarmos comigo nessa jornada.

Aos meus supervisores Prof. Doutor Sebastião Famba Eng. e Mestre Artur Pedro Madal Eng., agradeço profundamente pela orientação firme e dedicada, pelas críticas construtivas e pelo incentivo constante à excelência. Gratidão pela atenção aos detalhes, pela paciência e pelo comprometimento em cada fase do trabalho. Ambos foram fundamentais para o amadurecimento e qualidade deste projecto.

À Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal da Universidade Eduardo Mondlane, agradeço pelo ambiente de aprendizado enriquecedor, pelo corpo docente comprometido e pelas oportunidades académicas que contribuíram de forma decisiva para a minha formação.

Agradeço também, com enorme carinho, àqueles que me ajudaram indirectamente, Faruke Pedro, Naira, Benedita e Adelino que me ouviram vezes sem conta, acolheram minhas queixas e angústias mesmo sem entender do que eu falava mas, ainda assim, me ofereceram apoio, conselhos e palavras de conforto no momento certo. A presença de vocês fez toda a diferença.

Em especial, agradeço ao meu colega Yazalde Figueiredo, com o qual tive a oportunidade de trocar diversas experiências sobre o trabalho de conclusão de curso, pois estivemos a trabalhar no mesmo ramo de Engenharia rural, e durante o processo, destacou a verdadeira importância de ter alguém na jornada com quem seja possível dividir a dor dos desafios e partilhar a alegria de cada momento de superação em todas as etapas do trabalho. Eu verdadeiramente sou grata a ele, porque foram várias as vezes que um simples “ você consegue, estamos no final ” me fez superar o medo de encerrar as minhas dificuldades. Tudo isto, só me fez perceber que a ajuda e o verdadeiro apoio, vêm de onde menos esperamos.

E não poderia deixar de mencionar o Kelven Sozinho, meu amigo, que desde o início acreditou profundamente em mim e me incentivou a escrever este projecto de Engenharia Rural. Mesmo não tendo acompanhado cada etapa do processo, a sua confiança foi a semente que germinou este trabalho, serei sempre grata por isso.

A todos que, de alguma forma, fizeram parte desta jornada: o mais sincero e profundo agradecimento.

RESUMO

Inundações são fenómenos que ocorrem em todo o mundo e têm aumentado em frequência e intensidade nas Bacias hidrográficas de Moçambique, causando perdas significativas de áreas agrícolas e danos em infra-estruturas que sustentam a economia local. Neste contexto, o presente estudo teve como objectivo geral, mapear áreas agrícolas em risco de inundações na Bacia do rio Búzi. Para o alcance deste objectivo baseou-se em técnicas de geoprocessamento utilizando *softwares* do Sistema de Informação Geográfica (ArcGIS e QGIS). Foram integrados os dados do Modelo Digital de Elevação (MDE) com resolução espacial de 12,5 m e dados de Uso e Cobertura 10 m de resolução no *software* ArcGIS 10.8. Com recurso a ferramenta GIS *Flood Tool* foram gerados três cenários de manchas de inundação: Nível 1 (5.5 – 6 m), 2 (6 – 12 m) e 3 (12 – 18 m). A análise espacial revelou que para o Nível 1 a área inundada é de cerca de 10%, para o Nível 2 aumenta para 16% e para o Nível 3 atinge cerca de 22% do território total da Bacia. Estes mapas de inundação foram validados, com dados históricos de inundações da *Dartmouth Flood Observatory* (DFO). A validação indicou desempenhos de índice *Kappa* de 66%, 78% e 82% respectivamente, expressando boa concordância com o Mapa de inundação de referência. À partir do Mapa de Uso e Cobertura foi extraída a classe agrícola e sobreposta aos três Níveis de inundação. A análise espacial permitiu concluir que cerca de 19% da área agrícola encontra-se em zonas de risco à inundações do Nível 1, 23% do Nível 2 e 26% do Nível 3. Infra-estruturas de apoio ao sector agrícola como, estradas, assentamentos, fontes de água e mercados também foram identificadas em zonas risco à inundações dos Níveis 1, 2 e 3, o que evidenciou uma fragilidade a nível do funcionamento do sistema agrícola. Portanto, o presente estudo, fornece resultados como base sólida para a tomada de decisões aquando do desenvolvimento de planos de resposta e adaptação, promovendo uma gestão de risco mais eficaz e focada na resiliência das comunidades vulneráveis na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Palavras – chave: Cheias. Vulnerabilidade. Análise de Frequência. Geoprocessamento. Índice *Kappa*.

ABSTRACT

Floods are phenomena that occur worldwide and have been increasing in frequency and intensity in Mozambique's river basins, causing significant losses of agricultural areas and damage to infrastructure that supports the local economy. In this context, the present study aimed, as its general objective, to map agricultural areas at risk of flooding in the Búzi River Basin. To achieve this objective, geoprocessing techniques were employed using Geographic Information System (GIS) software (ArcGIS and QGIS). Data from a Digital Elevation Model (DEM) with a spatial resolution of 12.5 m and Land Use and Land Cover data with 10 m resolution were integrated in ArcGIS 10.8. Using the GIS Flood Tool, three flood extent scenarios were generated: Level 1 (5.5 – 6 m), Level 2 (6–12 m), and Level 3 (12–18 m). Spatial analysis revealed that for Level 1, the flooded area is approximately 10%; for Level 2, it increases to 16%; and for Level 3, it reaches about 22% of the basin's total territory. These flood maps were validated using historical flood data from the Dartmouth Flood Observatory (DFO). Validation indicated Kappa index performances of 66%, 78%, and 82%, respectively, demonstrating good agreement with the reference flood map. From the Land Use and Land Cover map, the agricultural class was extracted and overlaid onto the three flood levels. Spatial analysis allowed the conclusion that approximately 19% of the agricultural area lies in Level 1 flood risk zones, 23% in Level 2, and 26% in Level 3. Supporting agricultural infrastructures such as roads, settlements, water sources, and markets were also identified in Level 1, 2, and 3 flood risk zones, highlighting vulnerabilities in the functioning of the agricultural system. Therefore, the present study provides results that serve as a solid basis for decision-making when developing response and adaptation plans, promoting more effective risk management focused on the resilience of vulnerable communities in the Búzi River Basin.

Keywords: Food insecurity. Vulnerability. Frequency Analysis. Geoprocessing. Kappa Index.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Perfil transversal do processo de cheias e inundações.	18
Figura 2: Exemplo de risco no contexto ameaça, exposição e vulnerabilidade.	20
Figura 3: Cenário do impacto das inundações após a passagem do Ciclone Idai, no distrito de Búzi dentro Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	21
Figura 4: Variação temporal do número de pessoas afectadas pelas inundações em Moçambique, desde o ano 2000 à 2026	22
Figura 5: Representação esquemática dos principais elementos e das interacções que ocorrem dentro de uma Bacia Hidrográfica.	26
Figura 6: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	27
Figura 7: Trecho do rio principal da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	28
Figura 8: Apresentação da barragem de Chicamba como fonte de armazenamento e abastecimento de água , associados à produção agrícola e ao uso doméstico.	29
Figura 9: Mapa de distribuição espacial da temperatura média anual na Bacia Hidrográfica de Búzi.	30
Figura 10: Mapa de distribuição espacial da precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	31
Figura 11: Variação temporal da precipitação nas estações de Goonda e Dombe na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	32
Figura 12: Representação temática do relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	33
Figura 13: Tipologia de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	35
Figura 14: Distribuição espacial da ocupação do Uso e Cobertura da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	36
Figura 15: Barragem de Chicamba (a) e Barragem de Mavuzi (b).	38
Figura 16: Características do Satélite ALOS.....	44
Figura 17: Fluxograma dos procedimentos para mapear áreas agrícolas em risco de inundações.	56
Figura 18: Representação dos diferentes níveis de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. O Nível 1 corresponde a lâmina de água de (5.5 – 6 metros), Nível 2 (6 – 12 metros) e Nível 3 (12 – 18 metros).	57
Figura 19: Comparação entre a mancha de inundações do modelo hidrológico GIS <i>Flood Tool</i> e a de referência, utilizadas para a validação com o Índice <i>Kappa</i>	60
Figura 20: Curva de frequência de Gumbel baseada em caudais máximos anuais da Estação de Dombe.....	61
Figura 21: Curva de frequência de Gumbel baseada em caudais máximos anuais da Estação de Goonda.....	62
Figura 22: Apresentação visual do ajuste entre os caudais estimados e o Gráfico de dispersão 1:1	64
Figura 23: Representação do Uso e Cobertura (a esquerda) e distribuição espacial das áreas agrícolas (a direita) da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	69
Figura 24: Distribuição percentual do Uso e Cobertura da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	70
Figura 25: Capacidade produtiva agrícola por distrito Hidrográfica do Rio Búzi expressa em percentagem.	71
Figura 26: Representação temática de áreas agrícolas em risco de inundações, Mapa (a): Sobreposição das áreas agrícolas com o Nível 1 de inundações; Mapa b: Sobreposição das áreas	

agrícolas com o Nível 2 de inundação; Mapa c: Sobreposição das áreas agrícolas com o Nível 3 de inundação.	73
Figura 27: Impacto das inundações sobre as infra-estruturas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	76

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Classificação das inundações em função da sua gênese	19
Tabela 2: Escala de classificação do desempenho do modelo de Gumbel com base no erro quadrático médio normalizado.....	47
Tabela 3: Escala de avaliação da concordância entre os caudais observados e simulados com base no índice de Willmott (d).	48
Tabela 4: Exemplo dos níveis hidrométricos nas estações de referência da Bacia de Búzi e seus níveis de alerta.	48
Tabela 5: Representação da matriz confusão e aplicação do índice Kappa em mapeamentos de inundações.....	49
Tabela 6: Descrição da fonte de aquisição dos dados.....	51
Tabela 7: Apresentação das métricas de validação.....	60
Tabela 8: Avaliação quantitativa do ajuste do modelo de Gumbel entre as estações.....	65
Tabela 9: Proposta de severidade das inundações nas estações Goonda e Dombe, dentro Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	66
Tabela 10: Resumo de impacto das inundações sobre as infra-estruturas em risco na Bacia do Rio Búzi.	77

ANEXOS

Anexo 1: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 1 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.	86
Anexo 2: Resultado das métricas de acurácia para o cálculo do índice Kappa.....	86
Anexo 3: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 2 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.	86
Anexo 4: Resultado das métricas de acurácia para o cálculo do Índice Kappa	87
Anexo 5: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 3 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.	87
Anexo 6: Resultado das métricas de acurácia para o cálculo do Índice Kappa.	87
Anexo 7: Série histórica de caudais máximos anuais das estações de referência da Bacia de Búzi.	88
Anexo 8: Parâmetros estatísticos necessários para estimar os caudais extremos.....	89
Anexo 9: Caudais estimados utilizados para construir a curva de frequência referente as estações de Dombe e Goonda.....	89
Anexo 10: Cálculo de parâmetros estatísticos para obtenção de RMSE e (d) para validação do Ajuste entre os caudais na Estação de Goonda.	90
Anexo 11: Cálculo de parâmetros estatísticos para obtenção de RMSE e d para validação do Ajuste entre os caudais na Estação de Dombe.....	91
Anexo 12: Classificação da severidade de eventos de inundações baseada nos critérios de observação da DFO.....	92

Anexo 13: Sistema de classificação do Uso e Cobertura do Solo da FAO.	92
Anexo 14: Análise espacial das inundações na Bacia de Búzi.....	93
Anexo 15: Levantamento do potencial agrícola na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.	93

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AFC	Análise de Frequência de Cheias
ARA	Administração Regional de Águas
BNH	Banco Nacional de Habitação
CEAGRE	Centro de Estudos de Agricultura e Gestão de Recursos Naturais
DINAS-MASA	Direcção Nacional de Sanidade Vegetal-Ministério da Agricultura e Segurança Alimentar
DNGRH	Direcção Nacional de Gestão de Recursos Hídricos
ESA	<i>European Space Agency</i>
ESRI	<i>Environment Systems Research Institute</i>
FAEF	Faculdade de Agronomia e Engenharia Florestal
FAO	<i>Food and Agriculture Organization</i>
GFT	<i>GIS Flood Tool</i>
IFRC	<i>International Federation of Red Cross</i>
INGC	Instituto Nacional de Gestão de Calamidades
IPCC	<i>Intergovernmental Panel on Climate Change</i>
MAE	Ministério da Administração Estatal
MDE	Modelo Digital de Elevação
MINAG	Ministério da Agricultura
NDVI	<i>Normalized Difference Vegetation Index</i>
OCHA	<i>United Nations office for the Coordination of Humanitarian Affairs</i>
PNUD	Programa das Nações Unidas Para o Desenvolvimento
RS	<i>Remote Sensing</i>
SIG	Sistemas de Informação Geográfica
SNS	Serviço Nacional de Saúde
TR	Tempo de Retorno
UEM	Universidade Eduardo Mondlane
UNDRR	<i>United Nations Office for Disaster Risk Reduction</i>
UNHCR	<i>United Nations High Commissioner for Refugees</i>
UNICEF	<i>United Nations International Children's Emergency Fund</i>
UNISDR	<i>United Nations International Strategy for Disaster Reduction</i>
WMO	<i>World Meteorological Organization</i>

ÍNDICE

DEDICATÓRIA	2
AGRADECIMENTOS	3
RESUMO	5
ABSTRACT	6
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE TABELAS	8
ANEXOS	8
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	10
I. INTRODUÇÃO.....	13
1.1 Antecedentes	13
1.2 Problema de estudo e Justificação.....	15
1.3 Objectivos.....	16
1.3.1 Objectivo Geral.....	16
1.3.2 Objectivos Específicos	16
II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	17
2.1 Cheias e Inundações.....	17
2.2 Risco.....	20
2.3 Impacto das inundações	21
2.4 Gestão de Inundações.....	23
2.5 Bacias Hidrográficas	24
2.6 Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	27
2.6.1 Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	27
2.6.2 Hidrografia.....	28
2.6.3 Recursos Hídricos.....	29
2.6.4 Clima	29
2.6.5 Precipitação	30
2.6.6 Hipsometria	33
2.6.7 Solos	34
2.6.8 Uso e Cobertura do Terreno	35
2.6.9 Economia Local & Serviços Essenciais da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	37
2.6.10 População.....	37
2.6.11 Principais Infra-estruturas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	38
2.7 Historial de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi e sua Importância	39

2.8 Sistemas de informação Geográfica (SIG).....	41
2.9 Modelo hidrológico GIS <i>Flood Tool</i>	42
2.9.1 Modelo Digital de Elevação	43
2.9.2 Imagens ALOS PALSAR.....	44
2.9.3 Análises de frequência de inundações.....	45
2.9.4 Níveis Hidrométricos	48
2.9.5 Índice <i>Kappa</i>	49
III. MATERIAIS E MÉTODOS	51
3.1 Aquisição de Dados.....	51
3.2 Determinação de áreas inundadas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.....	51
3.3 Validação dos modelos.....	52
3.4 Análise de frequência das inundações da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	52
3.5 Determinação das Áreas agrícolas em risco de inundações.....	54
3.6 Identificação de outras Infra-estruturas em Risco de Inundações.....	54
3.7 Ferramentas de Geoprocessamento e Análise	55
IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1 Representação das manchas de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	57
4.1.1 Validação do Modelo Hidrológico GIS <i>Flood Tool</i>	59
4.1.2 Determinação da frequência de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	61
4.2 Representação de Áreas Agrícolas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	69
4.3 Representação de Áreas Agrícolas em Risco de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	73
4.4 Identificação de Infra-estruturas em Risco de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi	76
V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	80
5.1 Conclusões	80
5.2 Recomendações.....	81
VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	82

I. INTRODUÇÃO

1.1 Antecedentes

As inundações são Desastres Naturais de origem hidrometeorológica que têm se intensificado a nível global, tanto em frequência como em magnitude, principalmente devido às mudanças climáticas (IPCC, 2021). Em várias regiões do mundo as inundações representam uma das principais causas de perdas de colheitas e danos às infra-estruturas agrícolas (Rahman et al., 2017).

Moçambique é um dos países africanos altamente vulnerável às variações climáticas e eventos meteorológicos extremos, posicionando-se em décimo primeiro lugar no mundo e na nona posição em África (United Nations University & UNU-EHS, 2025). Moçambique encontra-se numa situação de elevada exposição aos riscos hidroclimáticos, ocupando a oitava posição entre os mais afectados por inundações e com baixa capacidade de resposta no mundo, atingindo especialmente na região centro (Lasse, 2023).

Segundo Recha & Chiulele (2017), a elevada exposição aos riscos hidroclimáticos do País deve-se à sua longa linha costeira (cerca de 2.700 km), à existência de zonas com altitudes abaixo do nível médio das águas do mar, a posição do país na ZCIT e a jusante de nove bacias hidrográficas partilhadas. Além disso, a queda acentuada de altitude do interior para a costa, resulta em altos níveis de escoamento que causam inundações quando ocorrem maiores precipitações nas bacias hidrográficas internacionais partilhadas.

Nas últimas quatro décadas, Moçambique registou cerca de 13 secas, 27 ciclones e 36 cheias, acompanhadas de 29 epidemias diversas (EM-DAT9, 2024; Lasse, 2023). A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, é considerada uma das mais vulneráveis à eventos extremos como inundações devido a sua posição geográfica na planície do corredor de Moçambique, uma região de intensa actividade de ciclones tropicais e das características geomorfológicas de baixa altitude na faixa litoral (Bié, 2022; Mavume et al., 2021).

Ao longo das últimas duas décadas a Bacia Hidrográfica do Rio Búzi foi palco de Desastres Naturais de grande magnitude, jamais vistos a nível da região. Entre os mais marcantes destacam-se o ciclone Eline em 2000 e o ciclone Idai em 2019, ambos responsáveis por inundações devastadoras que resultaram em perdas sócio-económicas significativas e comprometeram vastas

extensões de áreas destinadas à prática de agricultura, de onde sai o sustento da maior parte das famílias (INGC, 2020).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG), são ferramentas essenciais que podem auxiliar as autoridades locais na tomada de decisões, criação de planos mais eficazes de preparação e resposta aos impactos negativos das inundações, em especial para as áreas agrícolas ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

A Ferramenta GIS *Flood Tool*, já foi antes utilizada em estudos similares na Bacia do Zambeze, com o propósito de elaborar um atlas de áreas em risco de inundação, tendo destacado a sua importância na redução de custos de campo e obtenção de respostas rápidas sobre eventos extremos, ao permitir organizar grande quantidade de informação espacial de forma concisa e rigorosa, e gerar informação visual útil para a tomada de decisão atempada para a gestão de cheias e inundações (DNGRH & UEM-FAEF, 2023).

1.2 Problema de estudo e Justificação

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, é caracterizada pela forte dependência da agricultura para o sustento da maioria das famílias. É neste contexto que emerge a problemática da insegurança alimentar e instabilidade social agravada pela recorrência de inundações que têm devastado extensas áreas agrícolas nos últimos anos (FAO, 2023; INGD, 2023;). Dados nacionais do INGD (2021) relataram perdas expressivas a nível do sector, das quais, cerca de 198 868 ha de áreas agrícolas foram afectadas por inundações em 2019 e cerca 242 000 ha submersas em 2021, abrangendo cinco distritos da Bacia e outras áreas ao longo do país (DINAS-MASA, 2019; INGD, 2021).

Entretanto, a problemática agrava-se pelo facto de grande parte das áreas agrícolas se localizar junto aos cursos de água, e em alguns casos, as famílias fixarem suas residências próximo aos campos de cultivo para reduzir a distância, havendo exposição de culturas e, também das famílias à eventos hidrometeorológicos extremos e danos frequentes, visto que resistem em permanecer nos locais de risco mesmo depois da emissão de alertas, o que mais tarde resulta no deslocamento de famílias por terem suas residências tomadas pela água (Rosa, 2018).

Entre 2019 e 2025 quatro eventos relevantes de inundações foram registados na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Esses eventos, estão associados ao ciclone Idai, em Março de 2019, tempestade tropical Chalane, em Dezembro de 2020, ciclone Eloise, em Janeiro de 2021 e ciclone Freddy, em 2023, agravados por factores como mudanças climáticas, desmatamento, ocupação desordenada do solo e variabilidade climática regional ou imprevisibilidade dos padrões climáticos (IFRC, 2023 & UNDRR, 2023 & UN OCHA, 2022, 2021). Essa sequência de eventos e a periodicidade curta entre os impactos, justifica a necessidade da adopção de metodologias de mapeamento de áreas (em especial agrícolas) em risco de inundação, com recurso à ferramentas do SIG.

Portanto, é evidente que a Bacia Hidrográfica do Rio Búzi é altamente vulnerável às inundações. Contudo, até o momento, poucos os estudos foram conduzidos que discriminam de forma clara e precisa, quais áreas agrícolas se encontram efectivamente em risco dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Por essa razão, foi seleccionada como a área de estudo para trazer uma abordagem inédita de mapas de risco agrícola, através da aplicação exclusiva da ferramenta *GIS Flood Tool* que permite gerar padrões de inundações.

Esta ferramenta GIS *Flood Tool*, foi até então usada como recurso para produção de mapas de risco de inundação nas Bacias Hidrográficas do Rio Zambeze e Limpopo, e se demonstrou eficaz na identificação de zonas vulneráveis à inundações e na definição de medidas de mitigação (ARA-Centro & UEM-CEAGRA, 2022).

Neste contexto, o presente estudo pretende, não apenas preencher uma lacuna técnica e científica, mas também, fornecer uma base pública de suporte operacional na tomada de decisão, a medida que os mapas estarão disponíveis para as autoridades locais para fins de implementação de medidas de gestão de riscos (estruturais e não estruturais), assim como poderá servir de modelo para a continuidade de estudos.

1.3 Objectivos

1.3.1 Objectivo Geral

- Mapear as áreas agrícolas em risco de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi utilizando a Ferramenta GIS *Flood Tool*.

1.3.2 Objectivos Específicos

- Representar as áreas inundadas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi em função dos níveis de caudal e alturas hidrométricas;
- Determinar a extensão das áreas agrícolas em risco de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi;
- Identificar outras infra-estruturas importantes para o sector agrário em risco na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

II. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Cheias e Inundações

A cheia é um fenômeno hidrológico que resulta do aumento do nível da água de um rio, atingindo o seu leito maior, porém, sem transbordar (Chow et al., 1988). Dentro do mesmo raciocínio, Paiva (2019), refere que o conceito de cheia, geralmente aparece associado as dinâmicas naturais, tais como chuvas intensas, que causam o incremento do caudal, podendo ou não causar o transbordo do rio.

Castro et al. (2003), definem inundação como sendo a cobertura temporária por água, de uma área normalmente seca, resultante do transbordo da água além dos seus limites. Ao passo que, Tavares et al (2011), descreve a inunda o como o transbordo efectivo da água de um curso, ou seja, consiste na submersão total ou parcial de uma determinada área, quando uma grande quantidade de água não infiltra no solo por causa da impermeabiliza o ou ocupa o de áreas que formam várzeas dos rios, atingindo infra-estruturas desenvolvidas pelo homem ( reas agrícolas, avenidas marginais, residências e edifica es).

Cunha & Pinto (2011) afirmam que falar de cheia não   sin nimo de falar de inunda o. No entanto, a ocorrência de uma inunda o, nem sempre implica a existência de cheias, isso porque existem outras causas que podem dar origem a um determinado tipo de inunda o, mas todas as cheias podem resultar em inunda es. A Figura 1 que segue, apresenta a diferença visual existente entre cheias e inunda es.

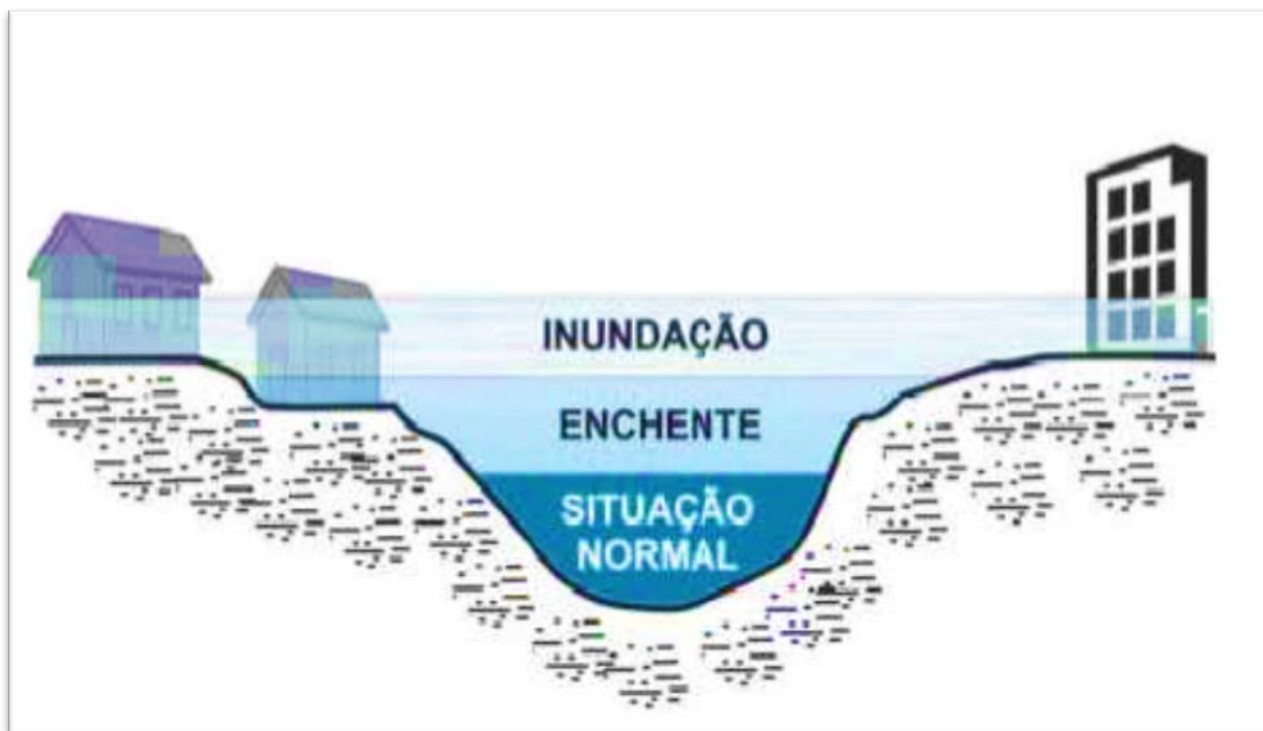


Figura 1: Perfil transversal do processo de cheias e inundações.

Fonte: IPT (2007).

Existem vários critérios de classificação das inundações. De acordo com Castro *et al.* (2017) podem ser tipificadas em função (i) da sua evolução, (ii) do regime dos leitos e (iii) com base nas suas causas, sendo este último o critério mais usual.

- (i) Em função da evolução, as inundações podem ser (a) lentas, quando têm origem em chuvas de longa duração, resultando no aumento gradual da água no canal, ou podem ser (b) rápidas, ou súbitas, quando têm origem em chuvas de grande magnitude que contribuem para o aumento rápido da água no canal.
- (ii) Em função do regime dos leitos, as inundações podem ser (a) torrenciais, quando derivam do aumento do caudal nos cursos de água, como consequência da ocorrência de chuvas intensas, ciclones, marés altas, ou do colapso de represas, ou podem constituir alagamentos, quando resultam do excesso de água no solo.

(iii) Com base nas suas causas, as inundações podem ser classificadas como, (a) inundações fluviais ou cheias, (b) de depressões topográficas, (c) costeiras e (d) urbanas, segundo Ramos (2013), conforme apresentado na Tabela 1 a seguir.

Tabela 1: Classificação das inundações em função da sua génese

Tipo	Causa
Inundação fluvial	De origem climática, marítima, geológica e geomorfológica, hidrogeomorfológica e antrópica.
Inundações de depressões topográficas	Resulta da subida do lençol freático, retenção da água da precipitação e cheias
Inundação costeira	Consequência da subida eustática do nível do mar, tsunami ou maremotos.
Inundação urbana	Resulta da ocorrência de chuvas intensas com sobrecarga dos sistemas de drenagem artificiais, subida do lençol freático e cheias.

Fonte: Ramos (2013).

Vários factores estão associados à ocorrência das inundações. Em geral, estas resultam: (i) do excesso de precipitação concentrada em períodos curtos, em combinação com (ii) os factores humanos, (iii) institucionais (má gestão de bacias hidrográficas internacionais) e (iv) a incapacidade técnica de assegurar a realização regular e controlo de algumas actividades como (a) a conservação de diques de defesa, (b) desmatamento descontrolado das margens para fazer machambas, (c) campos agrícolas que não dispõem de infra-estruturas adequadas de drenagem e (d) o aumento de áreas construída sem ordenamento urbano, muita das vezes sem um sistema de drenagem (Bensal et al., 2015).

Por outro lado, verifica-se a ineficiência dos sistemas de aviso prévio devido ao aviso tardio dos fenómenos, que de certa forma limita a capacidade de resposta por parte do grupo-alvo nas zonas em risco. Deste modo influencia no processo de tomada de medidas práticas, que tem por objectivo minimizar os efeitos na vida das pessoas, nos bens e infra-estruturas importantes (Lasse & Mosca, 2023).

2.2 Risco

Segundo o UNDP (2019), risco é a probabilidade de consequências prejudiciais ou perdas resultantes da interação entre os perigos naturais e os sistemas humanos. Stephenson (2002), descreve o risco como sendo a probabilidade da ocorrência de um perigo em função do seu tempo de retorno, ou seja, sua intensidade. Na perspectiva do UNISDR (2017), o risco é a combinação da ameaça, exposição e vulnerabilidade, ou seja, é a interação entre a possibilidade de ocorrência e a gravidade de um evento físico danoso (ameaça) associado a fragilidade das pessoas (vulnerabilidade) ou activos expostos.

Num contexto geral, Pimentel (2021), afirma que o risco significa a probabilidade de um evento ocorrer e causar danos. Está associado à incerteza, contrariamente quando se fala de impacto, que é uma consequência real de um evento que já ocorreu, e seus danos são mensuráveis.



Figura 2: Exemplo de risco no contexto ameaça, exposição e vulnerabilidade.

Fonte: Pimentel (2021).

De acordo com Lourenço (2015), fazem parte dos tipos de riscos naturais hidrológicos :

- (i) **Cheia:** quando ocorre um aumento brusco do caudal ou da altura de água num curso de água, com capacidade para transbordar;
- (ii) **Inundação:** quando ocorre o transbordo de águas para fora do canal;
- (iii) **Alagamento:** quando ocorre o acúmulo de água em planícies da superfície terrestre resultante da precipitação.

2.3 Impacto das inundações

As inundações constituem um dos desastres naturais com maior expressão em Moçambique, produzindo impactos multidimensionais que variam desde a perda de vidas humanas à destruição de bens materiais, infra-estruturas e meios de subsistência (INGC, 2009). Estes impactos manifestam-se tanto à escala espacial, visível através da extensão das áreas inundadas, assim como à escala social, evidenciada pela aglomeração em pontos de escape e pela deslocação forçada das famílias que perdem casas, áreas agrícolas e acesso a mobilidade. O exemplo deste cenário pode ser observado na Figura 3 a seguir, que ilustra de forma clara essa realidade.



Figura 3: Cenário do impacto das inundações após a passagem do Ciclone Idai, no distrito de Búzi dentro Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Fonte: RFI (2019).

Para além dos efeitos imediatos visíveis no terreno, as inundações paralisam as actividades económicas e limitam o acesso aos serviços básicos (escolas, hospitais, farmácias, mercados e ou centros comerciais, etc.) devido ao comprometimento das vias de circulação, e agravam a vulnerabilidade social e económica das comunidades local (USAID, 2002; Bensal et al., 2015). A

perda das áreas agrícolas por imersão, resulta na escassez de alimentos a medida em que têm-se a produção reduzida e, conseqüentemente, o agravamento da insegurança alimentar, sobretudo em contextos de agricultura de subsistência (Ramskrishna et al, 2014; FAO, 2015).

A análise temporal apresentada na Figura 4, permite compreender a dimensão cumulativa destes impactos, ao evidenciar a relação entre a ocorrência de inundações e o número de pessoas afectadas ao longo dos diferentes intervalos de anos.

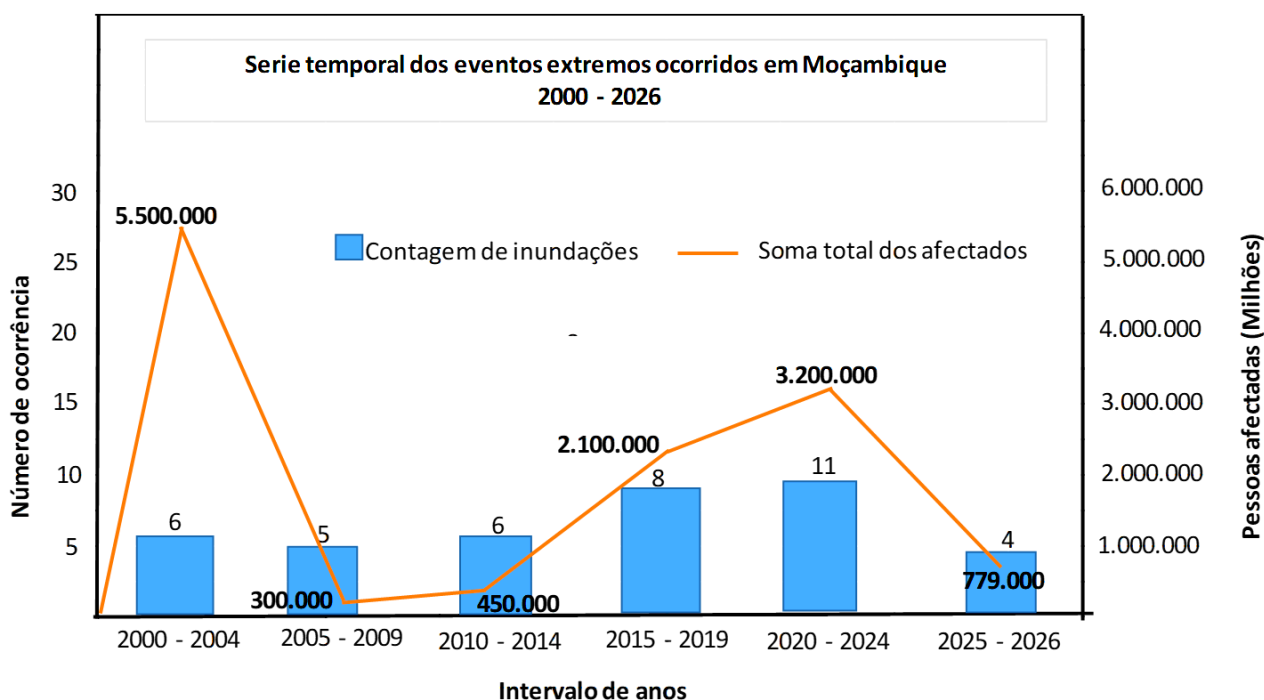


Figura 4: Variação temporal do número de pessoas afectadas pelas inundações em Moçambique, desde o ano 2000 à 2026

Fonte: EM-DAT (2024) e INGD (2026)

Observa-se que a frequência dos eventos não apresenta uma relação linear directa com o número de pessoas afectadas. O intervalo de 2000-2004 destaca-se pelo número elevado de pessoas afectadas, apesar do número moderado de ocorrências, o que sugere a presença de um evento extremo de grade magnitude. De acordo com os dados observados, fornecidos pela EM-DAT (2024), a maior contribuição do número de afectados nesse período é relativo ao evento ocorrido no ano de 2000 (Cheias de 2000), relatado como o primeiro evento e o mais devastador no início

da década 2000. Este facto, explica a razão de um número elevado de afectados estar associado à um número de ocorrência de eventos ligeiramente baixo.

O contraste observado nos períodos 2005-2019, confirma esta constatação, pois, verifica-se, para além de um mesmo número de ocorrência até superiores, um crescimento gradual na evolução do número dos afectados, acompanhando o aumento no número de ocorrências. Este cenário, sugere a ocorrência de eventos extremos, como é o caso do ciclone Idai (2019), porém os seus impactos não se comparam ao do ano de 2000.

Por outro lado, verifica-se uma redução simultânea na frequência e no impacto no intervalo de 2025-2026, possivelmente associada a curta duração do intervalo. Contudo, OCHA & INGC (2026), prevê uma evolução do impacto ainda para o presente ano, apoiado no aumento crescente da incidência de eventos extremos consecutivos dentro do mesmo ano ou em anos consecutivos, que resulta no acumulo de impactos. Facto que pode ser considerado pois, se num intervalo curto como esse, foram registados 4 eventos com impactos significativos em relação aos intervalos (2005-2009 & 2010-2014), é legítimo que se espere por um número cumulativo de impactos no presente ano e nos próximos anos, atendendo ao padrão de recorrência.

2.4 Gestão de Inundações

As medidas de gestão e controle de inundações podem ser classificadas em (i) estruturais, quando envolve a participação do homem na modificação das características naturais do rio ou da planície de inundação e em (ii) não-estruturais quando o homem tem relação directa ou convive com o rio buscando reduzir a vulnerabilidade das populações expostas (INGC, 2016).

As medidas estruturais compreendem obras hidráulicas como barragens, diques e canalização, entre outras, concebidas para controlar o caudal e reduzir a magnitude das inundações. A escolha desta deve ser bem analisada por forma a não comprometer o aproveitamento das áreas vulneráveis. (Barbosa, 2006).

Estas medidas podem actuar de forma extensiva quando incidem sobre a Bacia hidrográfica, no seu todo, promovendo a gestão da cobertura vegetal, conservação do solo e a regulação do escoamento superficial. Em linhas gerais, os diques e reservatórios são os mais apropriados em planícies de inundação. Podem também, actuar de forma intensiva quando agem directamente no

rio, podendo ser do tipo que (i) aceleram o escoamento, (ii) retardam o escoamento e que (iii) desviam o escoamento (ARA-Centro, 2014; INGC, 2017).

As medidas não-estruturais podem ser preventivas, tais como zoneamento de áreas de inundação, plano de evacuação, rede de monitoria, previsão e alerta. Estas permitem melhor convivência da população com as inundações. A articulação entre as entidades públicas e a comunidade local, é fundamental para a eficácia destas medidas, na prevenção de perdas materiais e humanas (Banco Mundial, 2007; UNDP, 2019).

Segundo a DNAAS (2017), não se pode esperar que as medidas controlem totalmente as inundações, visto que as medidas sempre visam minimizar as suas consequências. Para garantir o controle de inundação de forma eficiente, há uma necessidade de associar as medidas estruturais e não-estruturais, por forma que a população tenha o mínimo de prejuízo para além de possibilitar um convivência harmoniosa com o meio ambiente e desenvolver a capacidade de preparação e resposta.

2.5 Bacias Hidrográficas

Na perspectiva de Barrella (2001), Bacia hidrográfica pode ser definida como um conjunto de áreas da superfície terrestre delimitada por divisores de água nas regiões mais altas do relevo, drenadas por um rio e seus afluentes, onde as águas pluvias escoam superficialmente formando rios ou infiltram no solo para a formação de nascentes e do lençol freático de tal maneira que o caudal efluente possa ser descarregado por uma simples saída designado exutório ou foz.

Por outro lado, de acordo com Vaz & Hipolito (2003), Bacia Hidrográfica é uma região definida topograficamente, drenada por um curso de água ou por um sistema interligado de cursos de água, tal que única entrada de água na região seja a precipitação e todos os caudais efluentes sejam descarregados através de uma única saída (secção de referência da Bacia)

Ainda neste contexto, segundo Vaz (2003), as Bacias Hidrográficas desempenham um papel privilegiado na gestão dos recursos hídricos pois, é a nível das bacias que se verificam as relações entre os recursos hídricos a montante e a jusante, as modificações na ocupação do solo (obras hidráulicas no rio e nas margens) e modificações morfológicas ou características do escoamento.

São também verificadas as relações entre o consumo e disponibilidade da água em termos de qualidade e quantidade

Não obstante, Dourejeanni (2002) define a Bacia Hidrográfica como um espaço tridimensional que integra as interações entre a cobertura do solo, as profundidades do solo e o entorno das linhas divisórias das águas. No mesmo encontram-se os recursos naturais e as infra-estruturas criadas pelo Homem que por sua vez desenvolve as suas actividades económicas e sociais que ocasionam efeitos favoráveis e desfavoráveis.

A Word Vision (2004), complementa a definição de Dourejeanni (2002), e afirma que as interações decorrentes no espaço tridimensional de uma Bacia Hidrográfica, resultam na formação de um sistema com 4 divisões, sendo (i) Biológico (constituído pela flora e pela fauna), (ii) Físico (que integra o solo, a geologia, recursos hídricos e o clima), -(iii) Económico (composto por todas as actividades produtivas realizadas pelo homem, envolvendo, a prática da agricultura e a pecuária, a exploração dos recursos naturais, a indústria e agro indústrias, e a infra-estrutura de apoio e serviços como, estradas, energia, assentamentos, cidades e outros) e por fim o subsistema (iv) Social (composto pelos elementos demográficos, instituições, propriedades de terra, saúde, educação, habitação, e outros).



Figura 5: Representação esquemática dos principais elementos e das interações que ocorrem dentro de uma Bacia Hidrográfica.

Nota. Elaboração própria, baseado na ilustração didática da Word Vision (2004).

2.6 Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

2.6.1 Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, localiza-se no centro de Moçambique entre as coordenadas geográficas 32° - 35° E e 19° - 21° S. Têm uma área total de 29.720 Km², dos quais 25.860 Km² (87%) são em território moçambicano, cobrindo as Províncias de Manica e Sofala conforme ilustrado na Figura 6 a baixo. (Sweco, 2011).

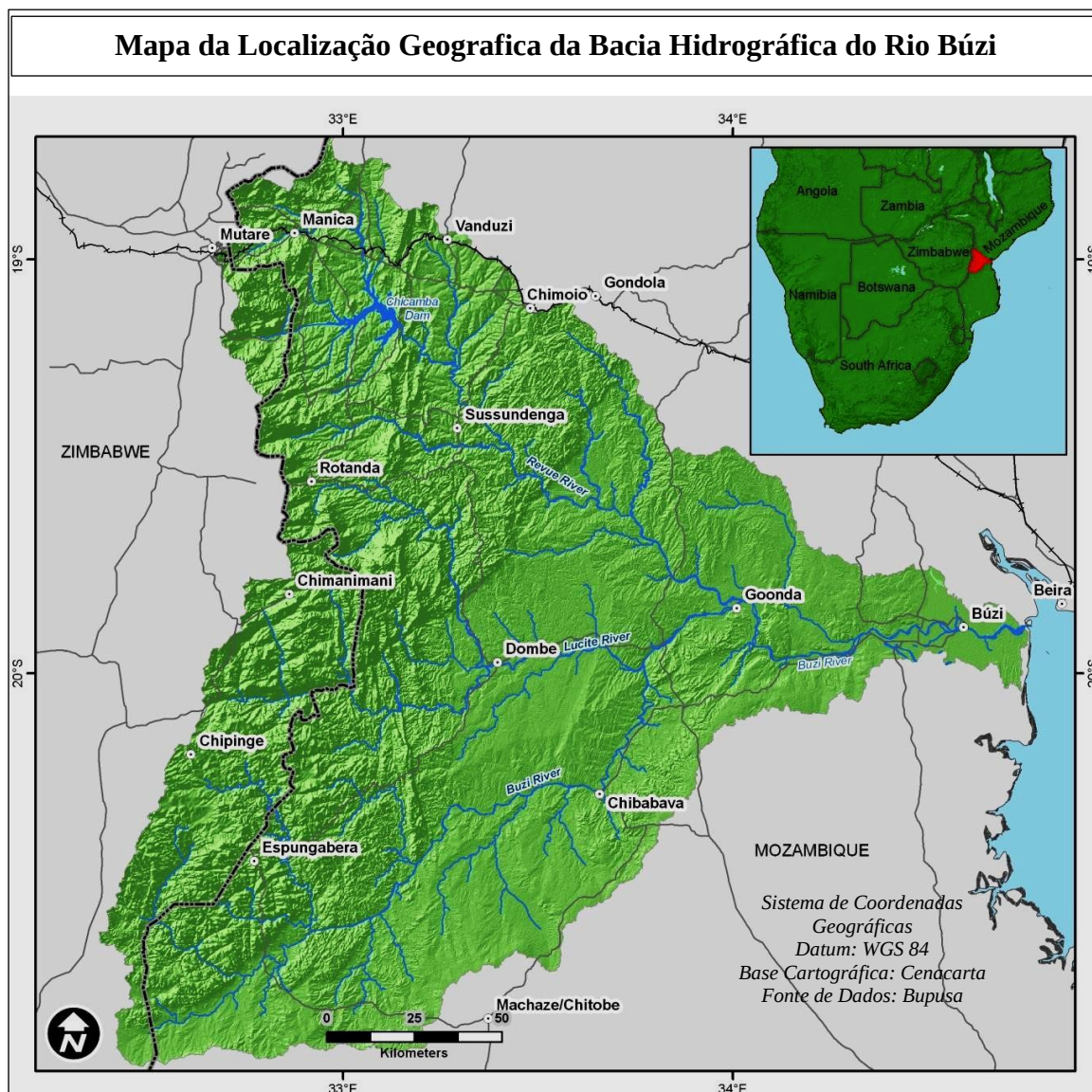


Figura 6: Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Fonte: BUPUSA (2013).

2.6.2 Hidrografia

O curso principal da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, nasce nas terras altas orientais da fronteira de Moçambique e Zimbabué a uma altitude superior a 3.000 m, e flui para leste até à costa moçambicana através das Províncias de Manica e Sofala terminando no Oceano Índico, na região da Cidade da Beira. O rio Búzi apresenta uma extensão fluvial em Moçambique de 374 km e cerca de 20 km de extensão fluvial no Zimbabué, e os seus principais afluentes são o rio Revué, que desagua na barragem hidroeléctrica de Chicamba e o rio Lucite/Rusitu/Lusitu que se junta ao Búzi antes de se juntar ao rio Revué. Outros afluentes incluem os rios Mussapa, Mossurize, e Chinhica (BUPUSA, 2023; Lázaro, 1997).



Figura 7: Trecho do rio principal da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Fonte: Sweco (2013).

Segundo a ACOWI et al. (2013) maior parte do escoamento superficial é gerado nas sub-bacias montanhosas, com tendência à decrescer à jusante, em direcção à costa. A maior parte da água é gerada no alto Lucite (20%) correspondente a uma média anual de $1967 \text{ m}^3/\text{ano}$, alto Búzi (16%) média $1778 \text{ m}^3/\text{ano}$ e baixo Revué (12%) média de $1751 \text{ m}^3/\text{ano}$.

De acordo com a Consultec (1998) O regime de caudais apresenta valores mínimos em Setembro-Outubro, um lento crescimento em Novembro-Dezembro, valores máximos entre Janeiro e Abril e um decréscimo até Setembro. As magnitudes específicas de cheias na Bacia variam de $9.000 \text{ m}^3/\text{s}$ na foz do rio até $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$ nas áreas montanhosas durante um período de retorno de 100 anos, sendo as áreas mais propensas à inundações a cidade e distrito de Búzi (o estuário), as zonas de Estaquinha e Goonda, próximo a confluência dos rios Búzi e Revué e distrito de Sussundega (ARA-Centro, 2025).

2.6.3 Recursos Hídricos

Segundo a BUPUSA (2023) & SWECO et al. (2013), a Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, possui um potencial hídrico significativo, estimado à aproximadamente 5.700.000 m³/ano de recursos superficiais ao nível da foz. Estes recursos têm um papel importante no desenvolvimento socio-económico da Bacia, devido a sua contribuição no abastecimento de água à população, áreas agrícolas de irrigação e gado, geração de electricidade (Na barragem de chicamba, em Revué).



Figura 8: Apresentação da barragem de Chicamba como fonte de armazenamento e abastecimento de água , associados à produção agrícola e ao uso doméstico.

Fonte: Consultec (2013).

2.6.4 Clima

De acordo com a Consultec (2013), a Bacia Hidrográfica de Búzi é caracterizada por apresentar dois tipos de clima: um clima montanhoso húmido no Oeste (interior da bacia), devido a cordilheira que forma fronteira entre Moçambique e Zimbabué, e um clima tropical húmido na costa Leste (faixa litoral). (Ver na Figura 9).

A estação húmida vai de Novembro até Março com a humidade relativa a variar de 75% na zona litoral para 65% no interior. A temperatura média anual varia de 25.1°C a 26.3°C com máximas que variam de 33.2°C a 34,5°C e mínimas que variam de 17.9°C a 18.9°C (INE, 2024).

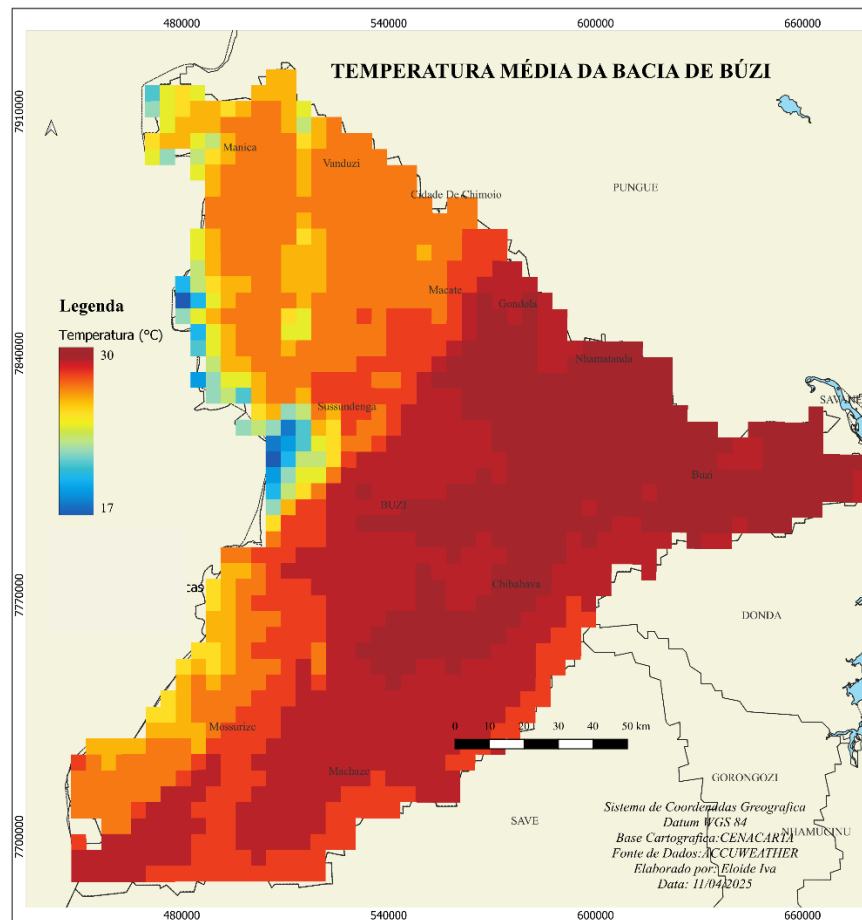


Figura 9: Mapa de distribuição espacial da tempertura média anual na Bacia Hidrográfica de Búzi.

2.6.5 Precipitação

Segundo Consultec (1998), A precipitação decresce de 1.200 mm para 900 mm junto à costa e a evapotranspiração potencial média anual, desce de 1.600 mm até 1.200 mm junto à foz do rio até à fronteira. Dentro do mesmo contexto, a Consultec (2013) Reafirmou que a quantidade de precipitação, varia de ano para ano, porém, pode atingir uma média de mais de 1.500 mm/ano.

A Figura 10, apresenta a precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi e pode-se observar que os valores decrescem do interior em direcção à costa e do Norte da Bacia em direcção a Sul.

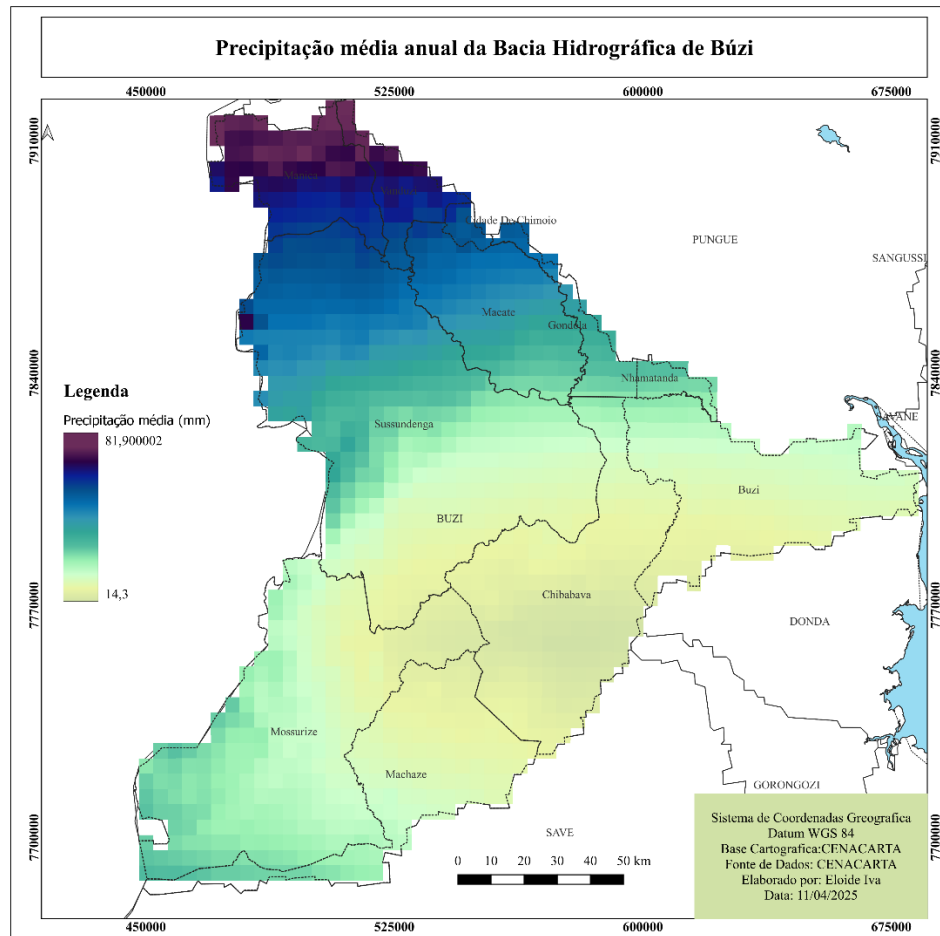


Figura 10: Mapa de distribuição espacial da precipitação média anual da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

A Figura 11, apresenta a variação da precipitação anual registrada nas estações de Goonda e Dombe entre os anos de 2015 a 2023, incluindo as respectivas médias.

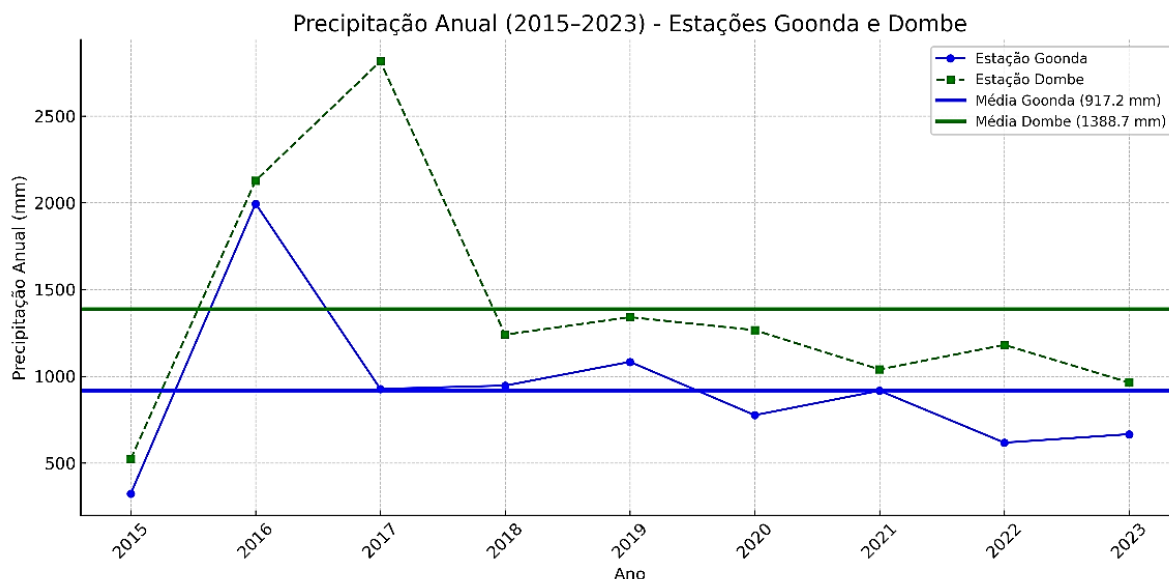


Figura 11: Variação temporal da precipitação nas estações de Goonda e Dombe na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Fonte: ARA-Centro (2023).

Observa-se uma média elevada de precipitação na estação de Dombe (1388,7 mm), comparada com a estação de Goonda (917,2 mm), o que, em termos gerais, significa que Dombe recebe mais chuva anualmente. O ano de 2016 foi extremamente chuvoso em ambas as estações, com valores aproximados de 2000 mm para Goonda e 2100 mm para Dombe, destacando-se como um possível ano atípico de eventos extremos. No ano de 2017, a diferença entre as estações é significativa, tendo Dombe apresentado quase o triplo da precipitação ocorrida em Goonda.

Nos anos de 2022 e 2023, para ambas as estações, os valores estão abaixo da média, indicando uma possível tendência para seca ou redução da precipitação. Essa variabilidade interanual observada, principalmente na estação de Dombe, pode estar associada a padrões climáticos regionais, como o *El Niño* (WMO, 2020).

2.6.6 Hipsometria

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi subdivide-se em duas zonas principais: a zona litoral, composta pela planícies aluvionares dos principais cursos de água, frequentemente sujeitas às inundações até uma aos 200 m de altitude, e a vertente montanhosa dos 200 até aos 2500 m de altitude na escarpa de Manica, conforme ilustra o mapa da Figura 12. Uma parte considerável da bacia hidrográfica que situa-se na zona montanhosa é responsável por drenar as elevadas precipitações que ali ocorrem (Lázaro, 1997).

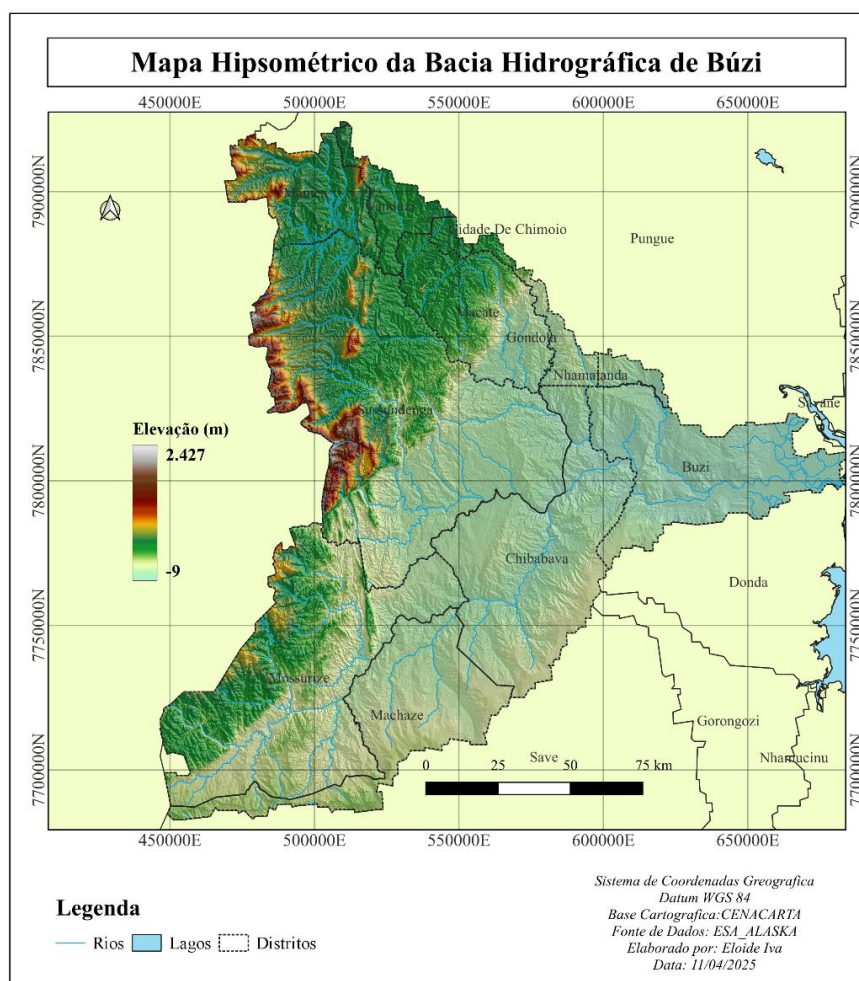


Figura 12: Representação temática do relevo da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

2.6.7 Solos

Os solos predominantes da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi são os aluviais, arenosos, lateríticos e argilosos. (FAO et al., 2012).

Os solos aluviais concentram-se mais nos vales fluviais e planícies de inundação do rio Búzi. Caracterizados por apresentar uma textura variável, considerados férteis para a produção de arroz, hortícolas e culturas de várzea. Os arenossolos concentram-se mais na zona costeira e nas planícies do interior da Bacia. Apresentam uma textura grosseira, baixa retenção de água, fertilidade baixa à moderada, e geralmente pratica-se a agricultura de irrigação e florestação (Banco Mundial, 2012).

Os solos lateríticos (incluem lixissolos), concentram-se nas zonas de planalto e áreas montanhosas da Bacia, principalmente em Manica. Caracterizados por serem profundos, ricos em matéria orgânica, com boa capacidade de retenção de água e nutrientes (aptos para agricultura à sequeiro e florestas naturais). Porém, apesar das suas boas características, são propensos a índices elevados de erosão devido as chuvas intensas e se não houver protecção vegetal pode-se desenvolver uma crosta resultando numa baixa capacidade de infiltração da água, podendo ocasionar uma inundação (Jones et al., 2013).

Os solos coluviais localizam-se nas encostas e áreas de transição entre planaltos e vales, caracterizados por apresentar boa retenção de água, mas, susceptíveis à erosão (MICOA, 2019).

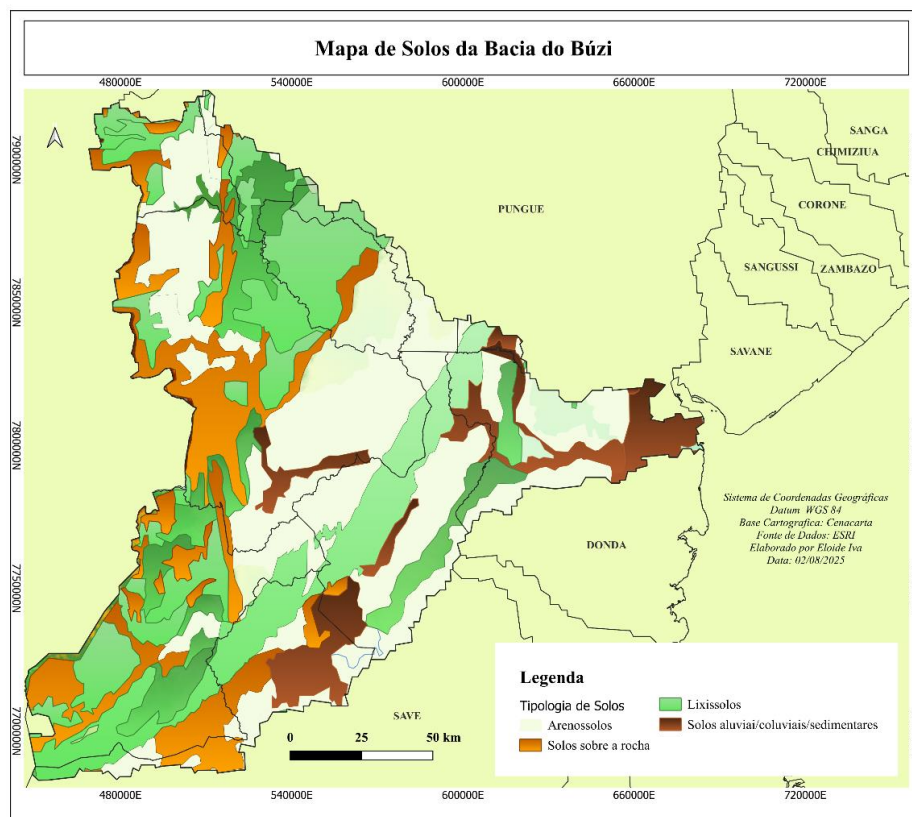


Figura 13: Tipologia de solos na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

2.6.8 Uso e Cobertura do Terreno

A maior parte da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi é ocupada por habitats naturais (florestas decíduas, bosques, pastagens naturais, arbustos decíduos, vegetal de herbácea inundável, mangais localmente degradados e outras espécies florestais existentes), cobrindo cerca de 85% da área total e a área restante que corresponde a 15%, é ocupada por áreas de cultivo, assentamentos populacionais e infra-estruturas como escolas, hospitais, igrejas, etc. (Biofund, 2021).

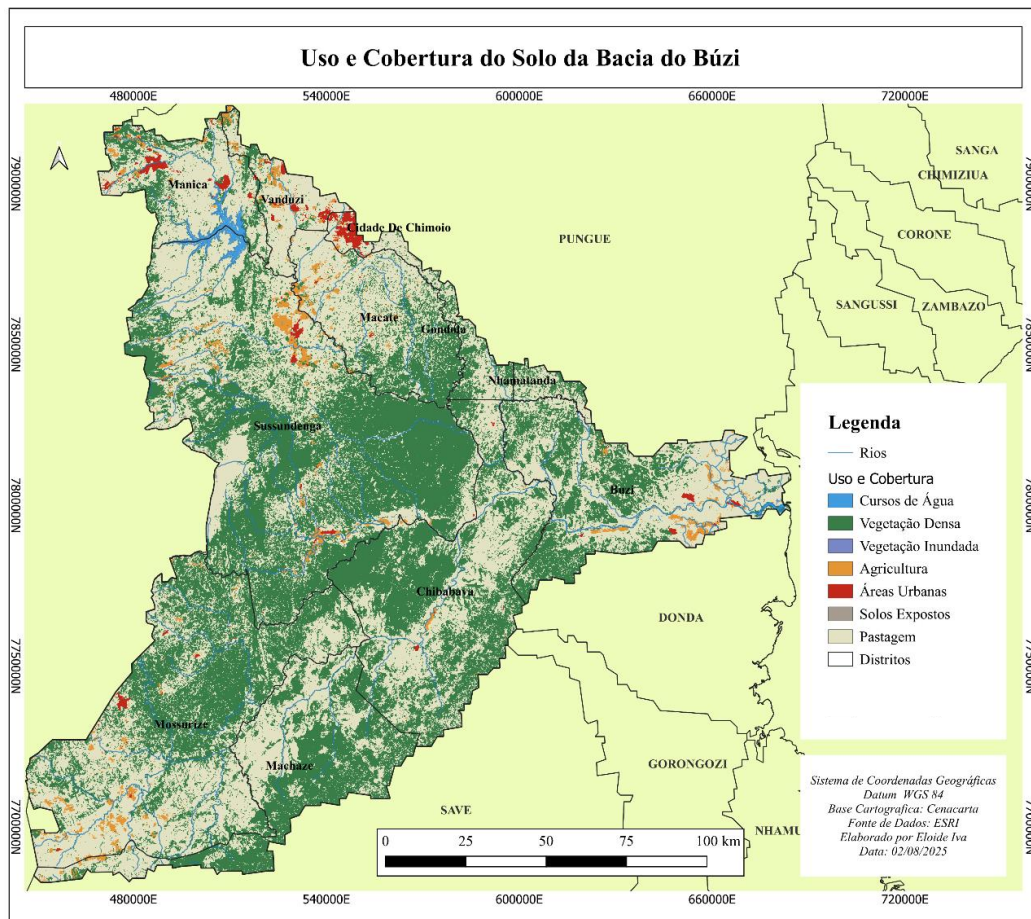


Figura 14: Distribuição espacial da ocupação do Uso e Cobertura da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi têm se verificado diferentes formas de uso e ocupação da terra, que suprimem a vegetação e mudam as feições do rio para construção de habitações ao longo do canal, assim como a intensificação da prática da agricultura à sequeiro, o que tem, na maioria das vezes contribuído para o aumento da susceptibilidade a ocorrência de eventos de inundação, devido a declividade do relevo (planície aluvial) ao longo da região (Gouveia, 1955).

A principal actividade económica na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi é a agricultura familiar, caracterizada por utilizar técnicas tradicionais, dependência quase total da chuva (sequeiro), fraca mecanização e produção voltada prioritariamente para o consumo próprio ou venda local para obtenção de renda. Dependem principalmente de produtos como arroz, milho, mapira e cana de

açúcar para o sustento e comércio, e de actividades complementares como a pecuária e pesca, praticada maioritariamente em sistema de pequena escala (Micoa, 2002).

A dependência directa dos recursos naturais torna, o sistema agrícola altamente vulnerável a eventos climáticos extremos, especialmente às inundações cíclicas que têm sido registadas ao longo da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, pois a população tende a ocupar zonas ribeirinhas pela fertilidade natural dos solos aluviais que garante melhor rendimento agrícola e facilidade de irrigação, mesmo sob o risco elevado, tornando-se reféns de um paradoxo entre a produtividade e vulnerabilidade (Anyuolo *et al.*, 2023; World bank, 2021).

2.6.9 Economia Local & Serviços Essenciais da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi conta com cerca de 231 mercados formais e informais que tem desempenhado um papel importante na criação de emprego, trocas comerciais entre produtores e consumidores, na geração de rendimentos e no desenvolvimento económico e social das comunidades que compõem a bacia (PDE-MTC, 2021).

É sabido que a educação é indispensável nas comunidades, e tem sido um dos sectores sociais prioritários na agenda do desenvolvimento do Governo Moçambicano. Entretanto, a Bacia de Búzi conta com cerca de 505 escolas, das quais, 490 são escolas primárias e 24 escolas secundárias.

O Serviço Nacional de Saúde (SNS) constitui o principal prestador de serviços de saúde à escala nacional, e esta Bacia conta com 77 Unidades sanitárias, sendo que 2 são Centros de saúde, 2 Hospitais Distritais, 1 Hospital Rural, 1 Hospital provincial, 3 Centros de Saúde Urbano A, 3 Centros de Saúde Urbano B, 1 Centros de Saúde Urbano C, 55 Centros e Saúde Rural II e 5 Centros de Saúde Rural I. No que diz respeito ao acesso a água potável contínua a ser um dos maiores desafios a nível do País, não obstante, de modo geral, a Bacia conta com 480 fontes de abastecimento de água sendo 45 fontenário, 222 furos, 88 poços com bomba manual e 125 bombas (PDE-MTC, 2021).

2.6.10 População

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi apresenta uma densidade populacional de cerca de 1.2 milhões de habitantes, dos quais a maior parte vive em áreas rurais e encontra-se concentrada no extremo

Noroeste da Bacia nos distritos de Manica (sendo o Norte desta região a mais populosa), Vanduzi, Sussundenga, Gondola, Macate e cidade de Chimoio, seguindo – se o distrito de Mossurize ao sul da Bacia e Distrito de Búzi a jusante da Bacia (INE, 2024).

Segundo o estudo de análise de risco conduzido pela PDE-MTC (2021), cerca de 23% desta população reside em áreas de risco de inundações, sendo que a maior parte localiza-se no distrito de Búzi e na zona limite entre este distrito e os distritos de Sussunenga e Chibabava.

2.6.11 Principais Infra-estruturas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

As barragens de Chicamba Real, Açude de Mavúzi e alguns perímetros irrigados são as principais estruturas hidráulicas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Ambas estão localizadas no Rio Revué e são operadas pela EDM. A Barragem de Chicamba tem uma área de cerca de 115 km² com uma capacidade total de armazenamento de água de 2.020 mm³ e uma produção eléctrica de 34 MW para uma descarga de 60 m³/s, sendo que o objectivo principal desta barragem é o armazenamento de água e a regulação de descargas em vez de produção de eletricidade. Enquanto a Barragem de Chicamba gera energia nas horas de ponta (cerca d três horas por dia), a Barragem de Mavuzi gera energia 24 horas (Chingore, 2013).

A água libertada da barragem de Chicamba é usada a jusante no açude de Mavúzi, também para a produção de energia eléctrica (48 MW), a mesma água é também usada a jusante para irrigação (Consultec, 1998).

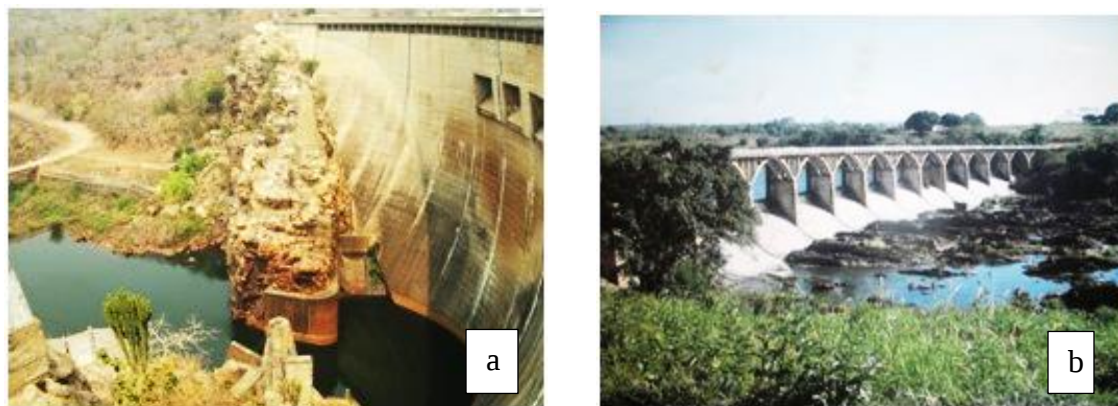


Figura 15: Barragem de Chicamba (a) e Barragem de Mavuzi (b).

Fonte: Consultec (1998).

2.7 Historial de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi e sua Importância

A Bacia Hidrográfica do Rio Búzi têm registado impactos recorrentes de sistemas tropicais desde 2000, com perdas humanas, agrícolas e infra-estruturas que reforçam a necessidade de planificação baseada em risco. No ano de 2000, o ciclone Eline desencadeou cheias históricas no centro de Moçambique, incluindo no rio Búzi, resultando em cortes de estradas e evacuações em massa. A passagem deste ciclone teve um impacto devastador, a avaliação pós-desastre estimou cerca de 700 mortes, aproximadamente cinco mil pessoas deslocadas, cerca de 12% da área cultivada destruída e as perdas económicas foram estimadas num total de US\$ 600 milhões influenciando na queda do PIB de 7,5% em 1999 para 1,6% no ano de 2000 (Manjoro *et al.*, 2020).

Pouco tempo depois, no começo de 2007, o ciclone Fávio e as chuvas torrenciais causaram graves inundações na costa do centro de Moçambique. O ciclone afectou a província de Sofala abrangendo toda zona baixa da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, impactando cerca de 12 mil pessoas e cortando o acesso entre os distritos (Foley & MunichRe, 2007).

Em 2008, Moçambique foi afectado pelo ciclone Jokwe, e embora a zona Norte tenha sofrido o impacto mais severo, as chuvas também causaram inundações, especialmente na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Mais de 200 mil pessoas foram afectadas, incluindo casas, estradas e pontes (UNICEF, 2009). Segundo o INGC (2008), dados despecíficos sobre perdas agrícolas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi durante a passagem dos ciclones Fávio e Jokwe não foram quantificados, os registos existentes mencionam principalmente impactos humanos e em infra-estruturas, mas não detalham perdas agrícolas em hectares.

Em Janeiro de 2009, chuvas torrenciais e cheias deram origem a inundações nas províncias de Manica, Sofala e outras, danificando pontes (Irin, 2009). Em Fevereiro de 2010, devido as chuvas persistentes, a região centro foi afectada por inundações, que comprometeram directamente a comunicação e circulação. A Bacia ficou isolada devido aos cortes no transporte fluvial e rodoviário, e a ponte sobre o rio Metuchira foi danificada (Sweco, 2011). Durante o período de 2009-2010, a Bacia de Búzi, registou uma redução de aproximadamente 12% na área colhida de milho, comparado ao ano anterior, reflectindo perdas produtivas significativas em função das condições de chuvas intensas e localizadas (FAO, 2018).

Embora não existam estimativas agrícolas detalhadas para eventos de 2007 à 2010, referentes à Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, os dados gerais para a região centro demonstram um padrão claro de vulnerabilidade à agricultura durante eventos extremos (Governo de Moçambique, 2019).

Quase duas décadas depois, em Março de 2019, o ciclone Idai afectou gravemente Sofala, incluindo os distritos de Búzi, Nhamatanda, Dondo, entre outros, dando origem a inundações extensas que ocasionaram a morte de mais de 600 pessoas e 1000 gravemente feridas, perdas económicas e agrícolas expressivas (Devi, 2019).

Os danos somaram cerca de 3.2 mil milhões de dólares, sendo estes impactos socioeconómicos considerados os mais elevados e alguma vez registados no sudoeste do Oceano Índico. Foram quantificados 715.378 ha de culturas danificados a nível nacional, dos quais aproximadamente 198.868 ha de terras agrícolas cobrindo cinco distritos, nomeadamente, Búzi, Dondo, Nhamatanda, Gorongosa e Muanza, foram inundados e do total da área agrícola inundada, 16.371 ha foram destruídos (DINAS-MASA, 2019).

Os danos se estenderam às estradas, pontes e serviços básicos como escolas, hospitais e outros (OCHA, 2019). Ainda no mesmo ano, em Dezembro, cerca de quarenta mil pessoas foram afectadas na provincia de Sofala pelo ciclone Chalane, coincidentemente as mesmas áreas que já tinham sido afectadas por inundações ocasionadas pelo ciclone Idai e os deslocados que já tinham sido reassentados foram novamente afectados (OIKOS, 2021).

Em janeiro de 2021, os distritos de Búzi, Dondo e Nhamatanda, foram novamente afectados, pelo ciclone Eloise. Os dados indicam que 29.310 casas foram afectadas, das quais 17.738 foram destruídas, 8565 danificadas e 3007 inundadas. Também houve registo de mais de 500 salas de aulas e mais de 70 unidades de saúde danificadas. As perdas económicas foram estimadas em cerca de USD 90 milhões (ACAPS, 2021; OCHA, 2021).

Mais recentemente, em 2023, o ciclone Freddy provocou uma sequência de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Dados iniciais reportaram mais de 90 mil hectares de culturas afectadas e mais de 8mil casas inundadas, 35 unidades de saúde e 684 escolas danificadas (OCHA, 2023; UNHCR, 2023).

As chuvas intensas ocorridas recentemente, de Dezembro de 2025 à Janeiro de 2026, causaram graves inundações nas províncias de Maputo, Gaza e Sofala, afectando aproximadamente 800.000 pessoas, das quais cerca de 306.000 são crianças (INGD e UNICEF, 2026). Segundo o INGD (2026), cerca de 1.603 casas foram destruídas, 4.439 parcialmente destruídas e 72.456 inundadas. Os impactos nas infra-estruturas sociais incluem 61 escolas, 108 salas de aulas, 310 unidades de saúde e 22 edifícios administrativos educativos.

Os meios de subsistência também foram gravemente perturbados, com mais de 165.000 ha de áreas agrícolas afectadas, dos quais cerca de 50.000 ha foram afectados em toda a província de Sofala incluindo cerca de 14.000 hectares completamente perdidos. Os impactos mais graves foram registados nos distritos de Búzi e Nhamatanda com acima de 34.000 ha e aproximadamente 3.200 ha inundados, respectivamente (INGD e OCHA, 2026).

2.8 Sistemas de informação Geográfica (SIG)

Os SIG são ferramentas utilizadas para a recolha, armazenamento análise e visualização de dados espaciais e geográficos em tempo real. A sua especificidade reside na capacidade de integrar dados e transformar em informação representável e fácil interpretável, permitindo analisar a relação entre os fenómenos naturais, o terreno topográfico e humanos em diferentes escalas espaciais (Clark, 2024).

A aplicabilidade do SIG em situações de riscos naturais envolve a análise de vulnerabilidade, simulação de cenários de inundações, previsão de eventos extremos de inundação e tomada de decisões. O SIG permite modelar diversos cenários de inundação com base em diferentes condições climáticas e mudanças no terreno, auxiliando no desenvolvimento de planos de resposta a inundações e estratégias de evacuação (Jonathan et al., 2020).

Portanto, o mapeamento de áreas de risco constitui uma ferramenta crucial para o controlo, prevenção e mitigação de desastres naturais, permitindo compreender a distribuição espacial das zonas vulneráveis e tomar decisões em situações críticas, voltadas para perdas de vidas humanas e infra-estruturas importantes (Akallouch et al., 2024).

Marcelino *et al.* (2006), reforça a ideia do mapeamento de áreas de risco ser um dos instrumentos de análise de risco mais eficiente, pois é apartir dos mapas gerados que é possível elaborar medidas

preventivas, planificar as situações de emergência e estabelecer acções conjuntas entre a comunidade e o poder público, em resposta aos desastres naturais.

2.9 Modelo hidrológico GIS *Flood Tool*

Os modelos hidrológicos buscam representar os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica por meio de um modelo chuva-caudal, que tem como objectivo simular a descarga fluvial oriunda da chuva, considerando a sua interação com os diversos aspectos do ciclo hidrológico (Lopes, 2017). A simulação hidrológica representa o escoamento da água na superfície e fornece informações importantes para a compreensão do sistema rio-planície, como a extensão de área inundada, o nível da água, a velocidade e a direção da água (Andrade, 2020).

Esse modelo de risco de inundações compreende três etapas:

- (i) Medição por estação fluviométrica ou estimativa por simulação hidrológica de séries históricas de caudal;
- (ii) Análise estatística de frequência de cheias que estima a variação da probabilidade (ou tempo de retorno) de eventos extremos conforme a magnitude de caudal;
- (iii) e mapeamento de extensões de áreas alagadas conforme variações em magnitude de caudal/probabilidade.

O GIS *Flood Tool* (GFT), é uma ferramenta de modelação hidrológica do ArcGIS, baseada em mapas, tendo sido desenvolvido para operar com dados de MDE e gerar padrões de inundações que correspondem a um caudal ou estágio específico de um rio (ESRI, 2014).

O GFT envolve uma implementação da equação de Manning para fluxo constante em um canal aberto (Manning, 1891), em combinação com um "MDE Relativo". O MDE Relativo é uma versão do MDE de entrada que foi processado pelo GFT para fornecer valores de elevação expressos como altura acima do rio. Portanto, este remove a complicação da encosta do canal para mapear a extensão inundada, simplificando o mapeamento de inundações (Nobre et al., 2011; De Roo et al., 2007).

Apesar de existirem várias outras ferramentas de modelagem hidrológica como o HEC-RAS, que oferecem maior detalhamento hidráulico, o GFT é mais adequado quando trata-se de estudos cujo objectivo é de analisar áreas em risco de inundação através de dados espaciais, não só, mas também por ser mais prático para o uso em regiões com poucos dados primários, como a Bacia Hidrográfica do Rio Búzi (Jonkaman et al., 2013).

2.9.1 Modelo Digital de Elevação

Segundo Faber, (2010) o MDE é um raster usado para representar a topografia do terreno, em que cada célula contém valores de elevação relacionado a um datum de referência.

Neste contexto, a metodologia baseada no Modelo Digital de Elevação (MDE), destaca-se como uma das mais comuns e eficazes para o mapeamento de áreas susceptíveis a inundações, pois permite representar a morfologia do terreno e identificar zonas de acumulação de água e declives acentuados, evidenciando sua praticidade e redução do custo do trabalho de campo (Kwak et al., 2012). No entanto, este método de mapeamento, tira proveito da representação em 3D da topografia, conforme oferecido pelo DEM, e usa cálculos de fluxo em estado estacionário simples (Jones et al., 1998).

A expressão matemática envolvida nos cálculos supracitados é a equação do Manning, que permite calcular a relação entre os caudais e as alturas (Q-h). Esta relaciona as características do canal do fluxo de velocidade e é frequentemente usada para um regime de caudais específico e para prever o intervalo da inundações. A equação de Manning é expressa por meio da seguinte equação (Verdin, et al., 2016):

$$V = \frac{1}{n} R^{2/3} \sqrt{S} \quad \text{Equação 1}$$

Onde:

V = velocidade em metros por segundo;

R = raio hidráulico em metros;

S = declive da linha de energia;

n = coeficiente de rugosidade.

O MDE, neste processo, simplifica, grande parte do processo de mapear áreas inundadas, pois permite identificar as diferenças de altitude entre o rio e a sua área.

2.9.2 Imagens ALOS PALSAR

Uma imagem de satélite ALOS PALSAR é um produto de radar de abertura sintética (SAR), adquirido pelo sensor Palsar que opera na banda L, desenvolvido para observação da terra à partir do satélite ALOS. Para além desse sensor, o ALOS conta com mais 2 sensores a bordo, nomeadamente PRISM e AVNIR-2, conforme apresentado na Figura 16, e caracteriza-se por apresentar uma grande velocidade, boa capacidade no tratamento dos dados e precisão avançada do seu posicionamento espacial (Jaxa, 2010).

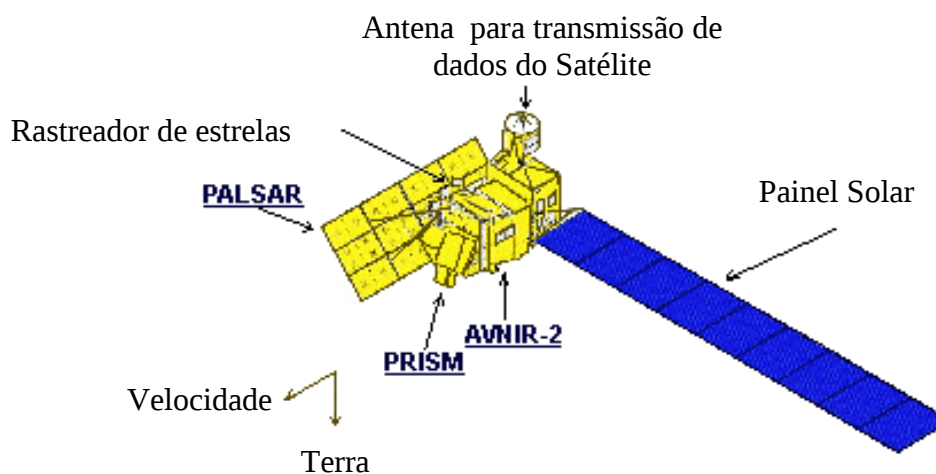


Figura 16: Características do Satelite ALOS.

Fonte: Jaxa (2010).

O ALOS PALSAR Têm como uma das principais aplicações, fornecer MDEs com resolução de 12.5 metros, que permitem realizar análises mais detalhadas da morfologia do terreno, sendo cruciais para simulações hidrológicas que exigem sensibilidade a pequenas variações altimétricas (Shimada et al., 2014).

Ao contrário de outros sensores como Landsat e Sentinel, o Alos Palsar opera na banda micro-ondas e não é afectada pela presença das nuvens, nem pela ausência de luz solar. Esta particularidade, garante uma observação contínua e dados consistentes durante o dia ou à noite e em quaisquer condições atmosféricas (Jaxa, 2007,).

2.9.3 Análises de frequência de inundações

A análise de frequência de cheias (AFC) é uma técnica usada para prever o número de vezes que um evento específico representado por valores de caudais máximos, ocorrerá dentro de um determinado período ao longo de um rio (Saksena, 2016).

Para compreender como funciona a AFC, é crucial ter noção do conceito de período de retorno. No entanto, Período de retorno (PR), também designado intervalo de recorrência ou tempo de recorrência (TR), é o intervalo estimado (em anos) entre ocorrências de igual magnitude de um fenómeno natural, ou por outras, o TR fornece uma estimativa da probabilidade de qualquer evento ocorrer ou ser excedido em um determinado ano (Saksena, 2016; Gamala & Kumar, 2017).

Portanto, o tempo de retorno, não só auxilia no dimensionamento de infra-estruturas hidráulicas, mas também na identificação de zonas de risco, sobretudo em contexto agrícolas situados nas margens de rios ou em planícies aluviais., Estas zonas podem ser classificadas como zonas de risco alto, médio ou baixo, com base na frequência de eventos de inundação, ou seja, zonas que inundam em Tr de 2 à 5 anos, são de risco muito alto, pois de tempos em tempos serão afectados diminuindo a capacidade de recuperação. As zonas que inundam em Tr de 50 à 100 anos são de risco menor, porém com um potencial destrutivo maior (Kundzewicz et al., 2014).

O método probalístico de Gumbel é uma distribuição de valores extremos, introduzida por Gumbel (1941). É comumente conhecida como distribuição de Gumbel (máximos) e é uma das funções de distribuição de probabilidade mais utilizadas na análise de frequência de variáveis hidrológicas, com inúmeras aplicações na determinação de relações intensidade-duração-frequência de precipitações intensas e estudos de caudais de inundações (Gumbel, 1941; Pereira & Caldeira, 2018; Naghettini & Pinto, 2007). No entanto, requer uma base de dados de longos períodos, cerca de 30 anos de dados históricos para a viabilidade de sua aplicação (Tomaz, 2016). A Função Acumulada de Probabilidade (FAP) da distribuição de Gumbel é dada pela relação (Gumbel, 1941):

Função Densidade de Probabilidade Acumulada

$$P(Q \leq q) = e^{-e^{-y}}$$

Equação 2

Passando para a Probabilidade de Excedência, tem-se:

$$P(Q \geq q) = 1 - e^{-e^{-y}} \quad \text{Equação 3}$$

Onde:

$$y = \frac{q - \mu}{\alpha}$$

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi} S$$

$$\mu = \bar{x} - 0,577\alpha$$

S: desvio padrão da série de valores máximos

$\bar{x}$: média da série de valores máximos

α : parâmetro de escala

μ : parâmetro de posição

$$\text{Sendo } P(Q \geq q) = \frac{1}{TR}$$

$$\Leftrightarrow \frac{1}{TR} = 1 - e^{-e^{-y}}$$

$$\rightarrow e^{-e^{-y}} = 1 - \frac{1}{TR}$$

Equação 4

Passando o logaritmo natural 2 vezes, têm-se:

$$y = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \rightarrow \frac{q - \mu}{\alpha} = -\ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right]$$

E, portanto, a fórmula para o cálculo do caudal máximo (q) para o tempo de retorno TR:

$$q(TR) = \mu - \ln \left[-\ln \left(1 - \frac{1}{TR} \right) \right] \alpha \quad \text{Equação 5.}$$

A literatura, recomenda vários métodos para a validação do ajuste da distribuição de Gumbel, dos quais fazem parte, o Coeficiente de determinação (R^2), a estimação por L-moments, testes de Bondade-de-Ajuste (Anderson-Darling e Kolmogorov-Smirnov), Análise gráfica (QQ/PP e bandas de confiança bootstrap) e avaliação de erros (Root Mean Square Error (RMSE), índice de concordância (d) e viés por classes de retorno).

No caso específico do RMSE e (d), de acordo com as abordagens de Lougue & Green (1991) e Willmott et al (1985), são critérios estatísticos que medem o tamanho médio do erro e o grau de concordância global entre os valores observados e estimados respectivamente. E são dados pelas seguintes fórmulas:

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|S_i - \bar{O}_i| + |O_i - \bar{O}_i|)^2} \right]$$

Equação 6.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (S_i - O_i)^2}{n}} \rightarrow \text{NRMSE} = \frac{\bar{O}_i}{\text{RMSE}} \quad \text{Equação 7.}$$

Onde:

O_i – Valores observados

S_i – Valores estimados

$\bar{O}_i$ – Média dos valores observados

n - número de observações .

Apesar da sua utilidade, o RMSE apresenta uma limitação, a medida que depende da escala dos dados, ou seja, mantém a mesma unidade da variável analisada (por exemplo, m³/s no caso de caudais). Assim sendo, os resultados obtidos para diferentes estações hidrométricas não são directamente comparáveis. É neste contexto que ocorre a transição metodológica do RMSE para o NRMSE, que reduz a escala tornando o erro adimensional e permitindo a comparação do desempenho entre diferentes contextos hidrológicos (Legates e McCabe, 1999).

Segundo Willmott et al. (1985), espera-se que para um bom desempenho do modelo, os valores de NRMSE e (d), resultem o mais próximo possível de 0 e 1, respectivamente. O contrário, indica que o desempenho do modelo é baixo.

Tabela 2: Escala de classificação do desempenho do modelo de Gumbel com base no erro quadrático médio normalizado

NMSE	Qualidade do desempenho
< 0,5	Muito Bom
0,5 -0,7	Bom
0,7-1	Aceitável
> 1	Muito baixo

Fonte: Moriasi et al. (2007).

Tabela 3: Escala de avaliação da concordância entre os caudais observados e simulados com base no índice de Willmott (d).

d	Qualidade de concordância
> 0,9	Excelente
0,8 - 0,9	Muito boa
0,7 - 0,8	Boa
0,6 - 0,7	Moderada
< 0,6	Fraca

Fonte: Willmott (1981,1985).

2.9.4 Níveis Hidrométricos

Nível hidrométrico é o nível superficial da água em curso, rio, lago ou albufeira, em relação a uma determinada referência. As réguas são refenciadas perfeitamente a um Marco de referência suficientemente protegido contra eventuais danos naturais como cheias e deslizamentos de terreno. Estes são usados para diversos fins, desde a estimativa do caudal, aviso de cheias, delimitação de áreas inundadas, projectos de infra-estruturas hidráulicas, captação de água, etc. (BHN, 2021).

As leituras hidrométricas são feitas diariamente das 06:00horas, 12:00horas e 18:00horas através de um leitor e transmitidas à ARA-Centro, IPA (BHN, 2021) e podem ser observadas de forma exemplar na tabela 4 a seguir.

Tabela 4: Exemplo dos níveis hidrométricos nas estações de referência da Bacia de Búzi e seus níveis de alerta.

	Bacia hidrográfica do Búzi					
	Data	Horas	Nível (m)	Prec.(mm)	Níveis de alerta	Obs
Rio Búzi (Dombe)	08/02/2021	07:00	4.34	31.9	5.5	-
	09/02/2021	07:00	4.27	1.1		-
	10/02/2021	07:00	4.88	0		-
Rio Búzi (Goonda)	08/02/2021	07:00	4.06	27.4	5.5	-
	09/02/2021	07:00	4.27	4.1		-
	10/02/2021	07:00	4.16	0		-

Fonte: BHN (2021).

2.9.5 Índice *Kappa*

A avaliação da precisão de mapas de inundação, é uma etapa fundamental na verificação da confiabilidade dos resultados produzidos. O teste *Kappa* é um dos indicadores estatísticos mais utilizados para esse fim. Este índice avalia o grau de concordância entre o mapa classificado (modelo) e os dados de referência (realidade), considerando também a concordância que poderia ocorrer ao acaso (Mendes et al., 2015).

Segundo Congalton (1991), o índice *Kappa* é superior à uma simples acurácia global porque a acurácia por si só pode ser enganadora a medida em que não considera os acertos que poderiam ocorrer ao acaso, enquanto que o índice *kappa*, corrige essa limitação ao incorporar uma estimativa de concordância esperada aleatoriamente, fornecendo uma avaliação mais robusta e confiável da qualidade da classificação.

Em contextos de mapeamento de inundações, o *Kappa* permite verificar o quão bem os dados processados representam a realidade observada em campo ou por outros métodos confiáveis. Para efeitos do cálculo do índice *Kappa* e das acurácias específicas é necessário construir uma tabela, designada matriz confusão, a qual representa a distribuição de percentagem dos pixels criados, os correctos e não correctos (Congalton, 1991), podendo ser observada na Tabela 5 que segue.

Tabela 5: Representação da matriz confusão e aplicação do índice *Kappa* em mapeamentos de inundações

Mapa real	Classe de referência	Classificado		
		Inundado	Não inundado	Total referência
	inundado	a	B	a + b
	Não inundado	c	D	b + d
	Ttoal classificado	a + b	b + d	N (=a + b + b + d)

Fonte: Adaptado de Congalton (1991).

Fórmulas de Avaliação da Acurácia:

Acurácia Global (AG):

$$AG = \frac{(a+b)}{(a+b+c+d)} \quad \text{Equação 8}$$

Acurácia do Produtor (AP):

$$AP = \frac{a}{(a+c)} \quad \text{Equação 9}$$

Acurácia do Utilizador (AU):

$$AU = \frac{a}{(a+b)} \quad \text{Equação 10}$$

Índice *Kappa* (K):

$$K = \frac{[N(a+d) - ((a+b)(a+c) + (c+d)(b+d))]}{[N^2 - ((a+b)(a+c) + (c+d)(b+d))]} \quad \text{Equação 11}$$

Onde:

- a:** representa o número de pixéis corretamente classificados como inundado;
- b:** representa o número de pixéis classificados como inundado, mas que não são;
- c:** representa o número de pixéis classificados como não inundado, mas que são;
- d:** representa o número de pixéis corretamente classificados como não inundado.

Segundo Landis e Koch (1977), valores de *kappa* acima de 0,80 indicam excelente concordância, entre 0,60 – 0,80 indicam boa qualidade, entre 0,40 – 0,60 indicam uma qualidade moderada e abaixo de 0,40 são considerados fracos.

III. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 Aquisição de Dados

Tabela 6: Descrição da fonte de aquisição dos dados

Tipo de dados		Formato	Resolução espacial (m)	Fonte
MDE	Alos Palsar	Raster	12,5	ASF (https://search.asf.alaska.edu/#)
Mapa de referência	Modis	Raster	250	DFO (Dartmouth Flood Observatory)
Uso e Cobertura do Solo	Sentinel 2	Raster	10	ESRI Land Cover (https://livingatlas.arcgis.com/landcover/)
Limites da Bacia, estradas, rios, infra-estruturas diversas	Polígonos, linhas e pontos	Vector	-	ANE, INE, CENACARTA, PDE-MTC
Série histórica de Caudais	-	Alfa numéricos	-	Administração Regional de Águas do Centro (ARA-Centro)

Nota. Elaboração própria.

3.2 Determinação de áreas inundadas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Para determinação de áreas inundadas foi utilizado o MDE como base para representar a topografia e delimitar a Bacia, identificar zonas de menor altitude e gerar modelos de direcção e acumulação de fluxo de água.

As diferentes imagens do MDE foram integradas no ambiente ArcMap 10.8 e posteriormente unidas com o auxílio da ferramenta *Mosaic to New Raster* resultando em uma única imagem do modelo. De seguida com o auxílio da ferramenta *Extract by Mask* realizou-se o recorte da área de

interesse usando a camada do limite Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, precedido do preenchimento de depressões no terreno com recurso a ferramenta *Fill*.

A posterior gerou-se o mapa de direcção de fluxo e o de acumulação de fluxo. Feito isso, foi integrado à ferramenta *Flood Tool do ArcMap* o MDE bruto, sem depressões, e com a direcção e acúmulo do fluxo calculado simultaneamente. De seguida delimitou-se a área de estudo e foram geradas as linhas de drenagem (*streams*) e as secções transversais ao longo do curso principal e seus afluentes, e na sequência atribuídos os valores de caudais estimados a cada secção. Após a inserção dos valores, foram geradas as manchas de inundação categorizadas em três níveis de profundidade, Nível 1 (5.5 – 6 metros), Nível 2 (6–12 metros) e Nível 3 (12–18 metros), sendo definidos com base em limiares hidrológicos associados ao nível de alerta de 5.5 metros, fornecido pela ARA-Centro (BNH, 2021).

3.3 Validação dos modelos

Para validar o resultado das inundações, foram utilizadas imagens de satélites do sensor MODIS como a base de referência para comparar com os modelos de inundação gerados.

Inicialmente aplicou-se o método de reamostragem à imagem MODIS, adequando a sua resolução espacial de 250 m à das manchas modeladas (12,5 m) com o auxílio da ferramenta *resample*. De seguida foi aplicado o método estratificado com o auxílio do *extract by attribute* para separar as classes Inundado e não-Inundado do modelo e posteriormente lançados/criados 500 pontos aleatórios em cada uma das camadas com recurso a ferramenta *create random points* e depois foi feita a sobreposição da camada de inundação de referência, da qual resultou a tabela de classificação que permitiu construir a matriz de confusão e calcular as métricas de acurácia e o Índice *Kappa* (cf. Anexo 1 à 6). Por último interpretou-se o grau de concordância segundo a escala de Landis e Koch (1977).

3.4 Análise de frequência das inundações da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Para analisar a frequência de inundações na Bacia de Búzi foram utilizados dados da série histórica de caudais das estações hidrométricas de Goonda e Dombe fornecidos pela Administração Regional de Águas do Centro (ARA–Centro), correspondentes à série de 21 anos.

A partir dos dados da série anual de caudais, foram inicialmente extraídos os caudais máximos anuais dentre os máximos mensais, formando uma sequência de picos anuais, conforme apresentado no Anexo 7.

Com base nesses valores, foram calculados a média, o desvio padrão e parâmetros de escala e posição dados pelas fórmulas descritas na Equação 3 (cf. Anexo 8). De seguida, os seus resultados foram aplicados na Equação 5 do modelo estatístico de Gumbel que permitiu estimar o caudal máximo esperado para os períodos de retorno de 2, 5, 10, 20, 25 e 50 anos como se pode observar no Anexo 9, e por fim, foi gerada a curva de frequência para ambas as estações, evidenciando os caudais observados e teóricos.

Posteriormente, construiu-se o gráfico linha 1:1 para avaliar o desempenho do modelo de Gumbel em reproduzir a magnitude e variabilidade da série de dados, tendo a recta como referência de concordância perfeita. De seguida fez-se o cálculo complementar das métricas estatísticas de desempenho (ver Anexo 10 e 11), nomeadamente o índice de concordância (d) e o erro quadrático médio normalizado (NRMSE) através das fórmulas apresentadas nas Equações 6 e 7, que permitiram quantificar o grau de desempenho do modelo de Gumbel entre os caudais de cada uma das estações.

No final, propôs-se uma escala de severidade das inundações, com base na correspondência entre o tempo de retorno, caudais estimados e consequentemente níveis de inundação simulados. Para tal, foram identificadas datas de observações de caudais de inundações na base de dados da EM - DAT, realizadas pela DFO, nomeadamente Fevereiro de 2000, Março de 2014 e Março de 2019. Para cada uma destas datas, foi extraído o caudal máximo diário registado na estação hidrométrica correspondente. Em seguida, estes valores de caudal observados, foram comparados com os caudais estimados pelo método de Gumbel, de modo a identificar o intervalo do tempo de retorno mais próximo.

Feito isso, com base na escala de severidade adoptada pela DFO(cf. Anexo 12), construiu-se uma escala adaptada, considerando o limite inferior da escala da DFO para definir a primeira classe com vista a abranger eventos com $TR < 10$ anos, visto que classificação de referência foi elaborada para

abrangir eventos de grande magnitude, situados entre os tempos de retorno de 10 – 20 anos, servindo de indicador para classificar eventos de baixa magnitude.

Por fim, completou-se a escala de severidade obedecendo o padrão da escala metodológica da DFO, atendendo ao limite do tempo de retorno analisado no presente estudo, que vai até 50 anos, associando caudais < 10 anos ao Nível 1, caudais entre 10 -20 anos e 20 – 50 anos ao Nível 2 (subdivido em escala grande e muito grande) e caudais > 50 anos ao Nível 3 (ver Tabela 9).

3.5 Determinação das Áreas agrícolas em risco de inundações

Para determinar a extensão das áreas agrícolas em risco foram utilizados os dados referentes ao Uso e Cobertura do Solo, organizados em diferentes classes, definidas de acordo com o sistema de classificação da FAO (Food and Agriculture Organization), conforme apresentado no anexo 13.

Inicialmente inseriu-se o mapa de Uso e Cobertura do solo no ArcMap 10.8 e de seguida procedeu-se com a reclassificação para eliminar as classes sem informação, mantendo as classes de interesse, como corpos de água, vegetação arbórea, vegetação inundada, áreas agrícolas, áreas urbanas, solos expostos e pastagens. Feito isso, com o auxílio da ferramenta *Raster to Polygon* converteu-se a camada de Uso e Cobertura para o formato, vectorial e a classe de Áreas Agrícolas foi extraída com recurso a ferramenta *Extract/Selection by Attributes* e de seguida foi elaborado o mapa de Áreas Agrícolas.

A camada vectorial das Áreas Agrícolas foi sobreposta aos três cenários de inundação também convertidos em polígono e com recurso as ferramentas *Intersect* e *Statistics*, determinou-se a extensão total das áreas agrícolas afectadas (em hectares e percentagem) por cada nível. E no final, elaboraram-se os mapas de áreas agrícolas inundadas.

3.6 Identificação de outras Infra-estruturas em Risco de Inundações

Para identificar as infra-estruturas em risco foram utilizados dados de camadas vectoriais que representam estradas, fontes de água, assentamentos, mercados locais e diques. A selecção destas infra-estruturas foi inspirada no relatório da Análise de Risco de Inundações na Bacia do Búzi desenvolvidos pelo Programa de Desenvolvimento Estratégico do Ministério dos Transportes e Comunicações (PDE-MTC,) no ano de 2021.

As camadas vectoriais de infra-estruturas foram sobrepostas às áreas inundadas previamente simuladas e convertidas em polígono com o auxílio da ferramenta *Raster to Polygon* e, em seguida, foi utilizada a ferramenta *Intersect* para identificar as entidades efectivamente afectadas em cada nível de inundação. Este procedimento permitiu quantificar as infra-estruturas expostas por tipo em nível de risco, resultando em tabelas de síntese e mapas interpretativos.

3.7 Ferramentas de Geoprocessamento e Análise

Usou-se o *software* ArcGIS versão 10.8 e a ferramenta GIS *Flood Tool* para o geoprocessamento e a geração dos três níveis de manchas de inundação, respectivamente. Além disso, empregou-se o Microsoft Excel para análise estatística de caudais e cálculo da frequência. A elaboração dos mapas temáticos foi com recurso ao *software* QGIS.

A Figura 17 apresenta o fluxograma metodológico que sintetiza de forma esquemática os procedimentos técnicos adoptados no presente estudo, realizados no ambiente de Sistemas de Informação Geográfica(SIG) com recurso ao *software* ArcGIS 10.8 da ESRI.

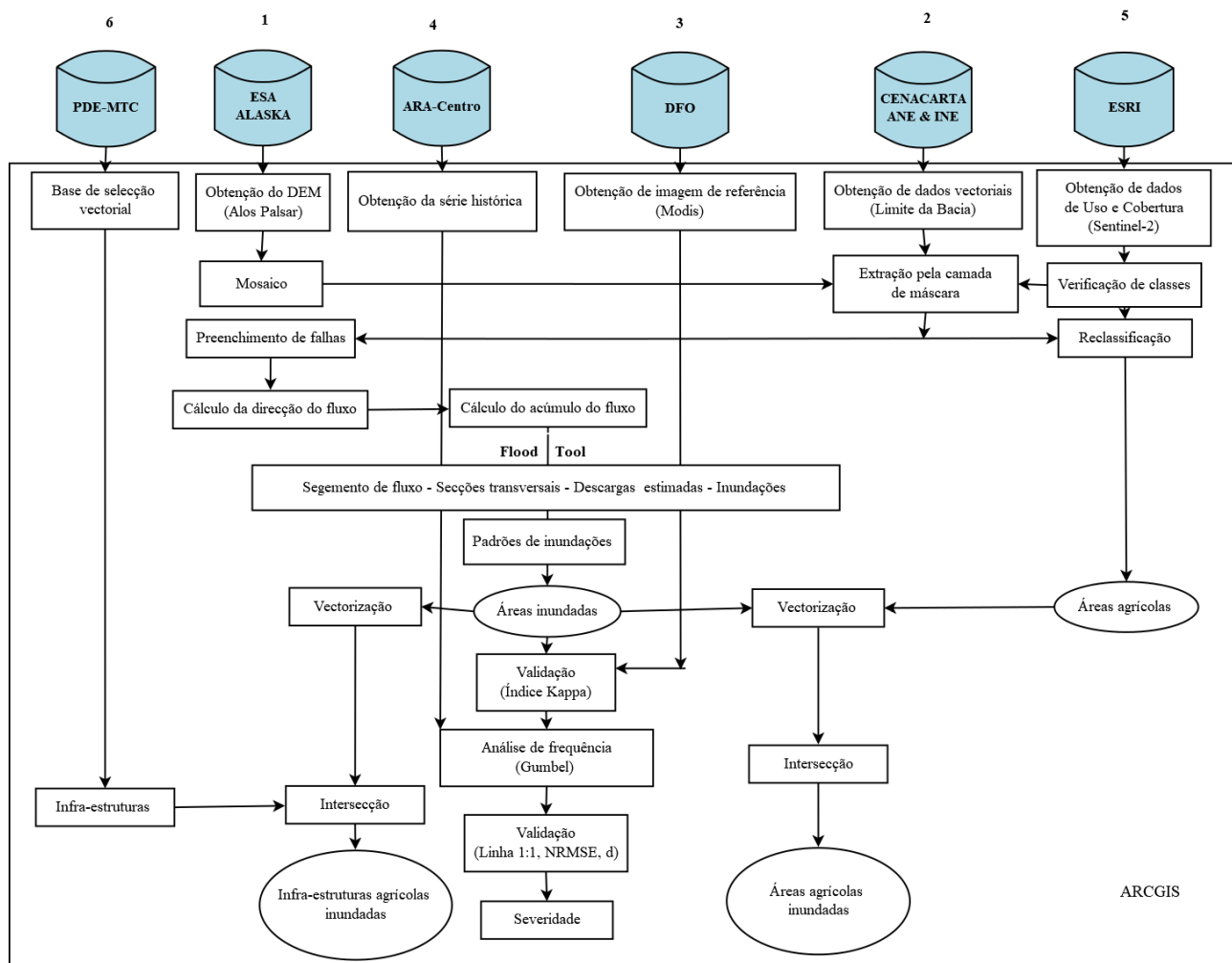


Figura 17: Fluxograma dos procedimentos para mapear áreas agrícolas em risco de inundações.

Fonte: Adaptado de Longley et al. (2015).

IV. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 Representação das manchas de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

A Figura 18 apresenta o cenário de risco de inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. Os padrões de inundações foram gerados com recurso à ferramenta *GIS Flood Tool* no ambiente Arcmap, o que permitiu permitindo a classificação em três níveis de risco (Nível 1, 2 e 3).

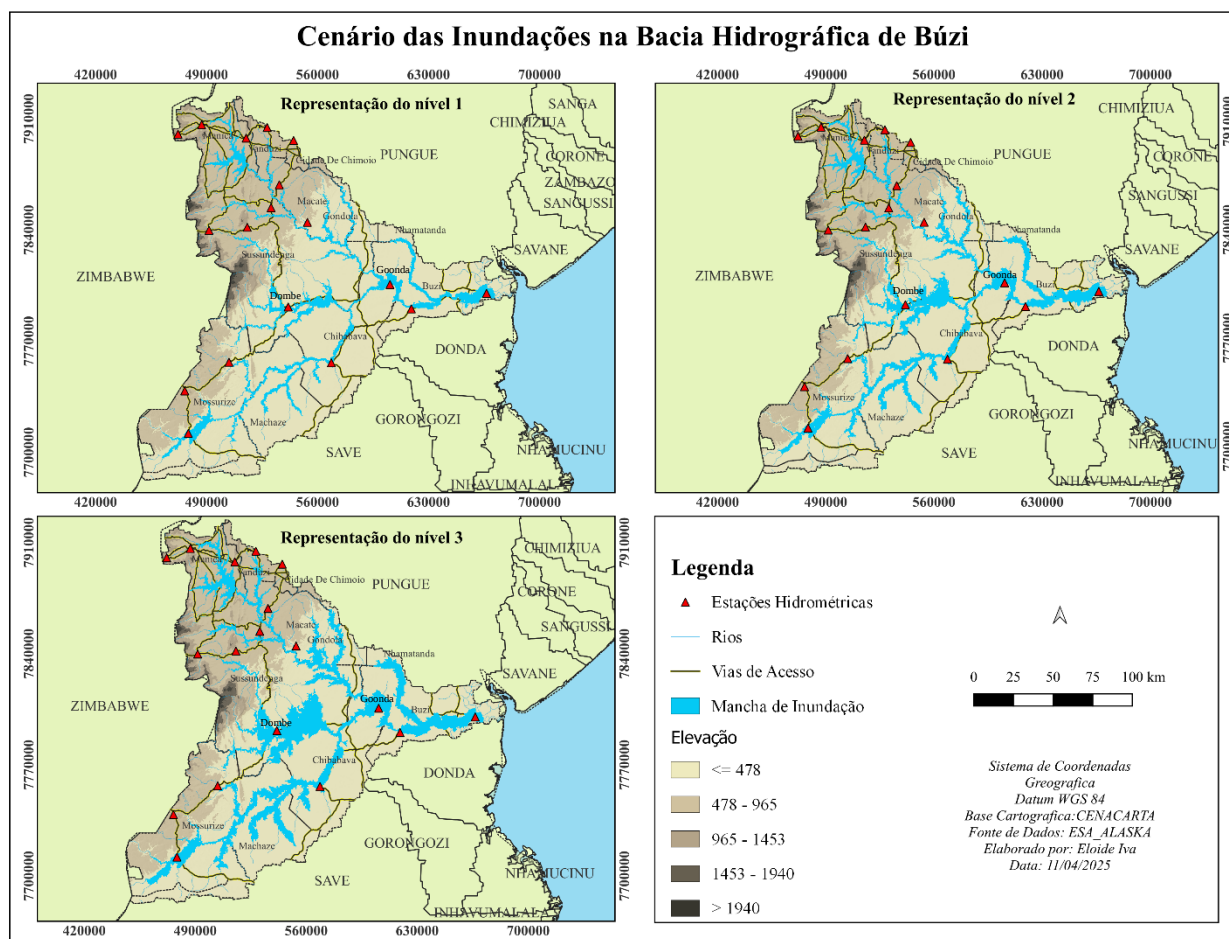


Figura 18: Representação dos diferentes níveis de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. O Nível 1 corresponde a lâmina de água de (5.5 – 6 metros), Nível 2 (6 – 12 metros) e Nível 3 (12 – 18 metros).

Nota. Resultado obtido através do modelo hidrológico *Flood Tool*.

Observa-se através dos mapas, uma progressão de risco de inundação a medida que se avança de um cenário para o outro e também que as áreas de maior exposição concentram-se ao longo dos principais cursos de água, evidenciando a vulnerabilidade das zonas ribeirinhas a eventos de inundações. É notório que as estações de Dombe e Goonda, encontram-se localizadas no raio de regiões de maior acúmulo de água, podendo assumir o papel central no monitoramento e previsão do comportamento hidrológico local.

Para o Nível 1 encontram-se expostas cerca de 10% da área total, no Nível 2 cerca de 16% e o Nível 3 cerca de 22%. A Figura 19 apresenta a distribuição espacial das áreas afectadas por distrito, permitindo visualizar os distritos mais susceptíveis à inundações dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, (cf. Anexo 14).

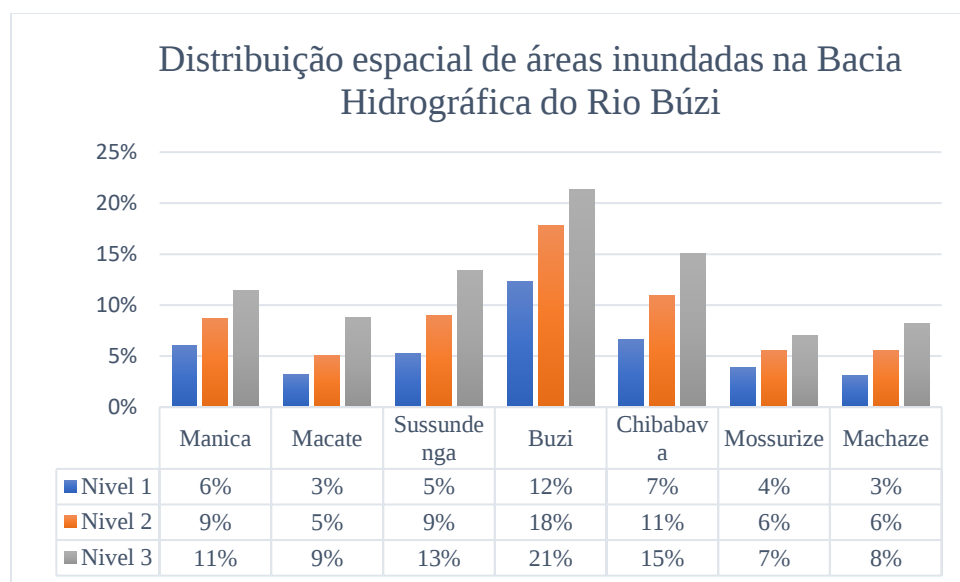


Figura 19: Apresentação de Áreas inundadas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Nota. Elaboração própria.

Na Figura 19 é possível observar que dentre todos os níveis, o Nível 1 alcança menor área em todos os distritos, e o distrito mais afectado em todos os níveis foi o distrito de Búzi, e o menos afectado foi o distrito de Machaze. Esta análise revela uma correspondência entre as áreas de maior extensão inundadas e os distritos historicamente mais vulneráveis ao longo da Bacia.

Entre os eventos mais marcantes, destacam-se as inundações resultantes da passagem do ciclone Idai recentemente, que causaram perdas materiais avultadas na província de Sofala, concretamente nos distritos de Búzi, Dondo, Nhamatanda, Marromeu, Muanza e Caia (DINAS-MASA, 2019 & OCHA, 2021) o que confirma o risco a nível do distrito de Búzi.

4.1.1 Validação do Modelo Hidrológico GIS *Flood Tool*

A Figura 20 apresenta a comparação entre a mancha de inundação de referência e a gerada pelo modelo, sobrepostas para validar a performance do modelo de simulação hidrológica GIS *Flood Tool* na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi. As manchas do modelo foram obtidas através do MDE do satélite ALOS PALSAR com 12,5 m de resolução, enquanto que a mancha de referência deriva de imagens do sensor MODIS, com resolução espacial de 250m. Para quantificar a acurácia da classificação e avaliar o grau de concordância entre o modelo e a referência, foi aplicado o teste de índice *Kappa*.

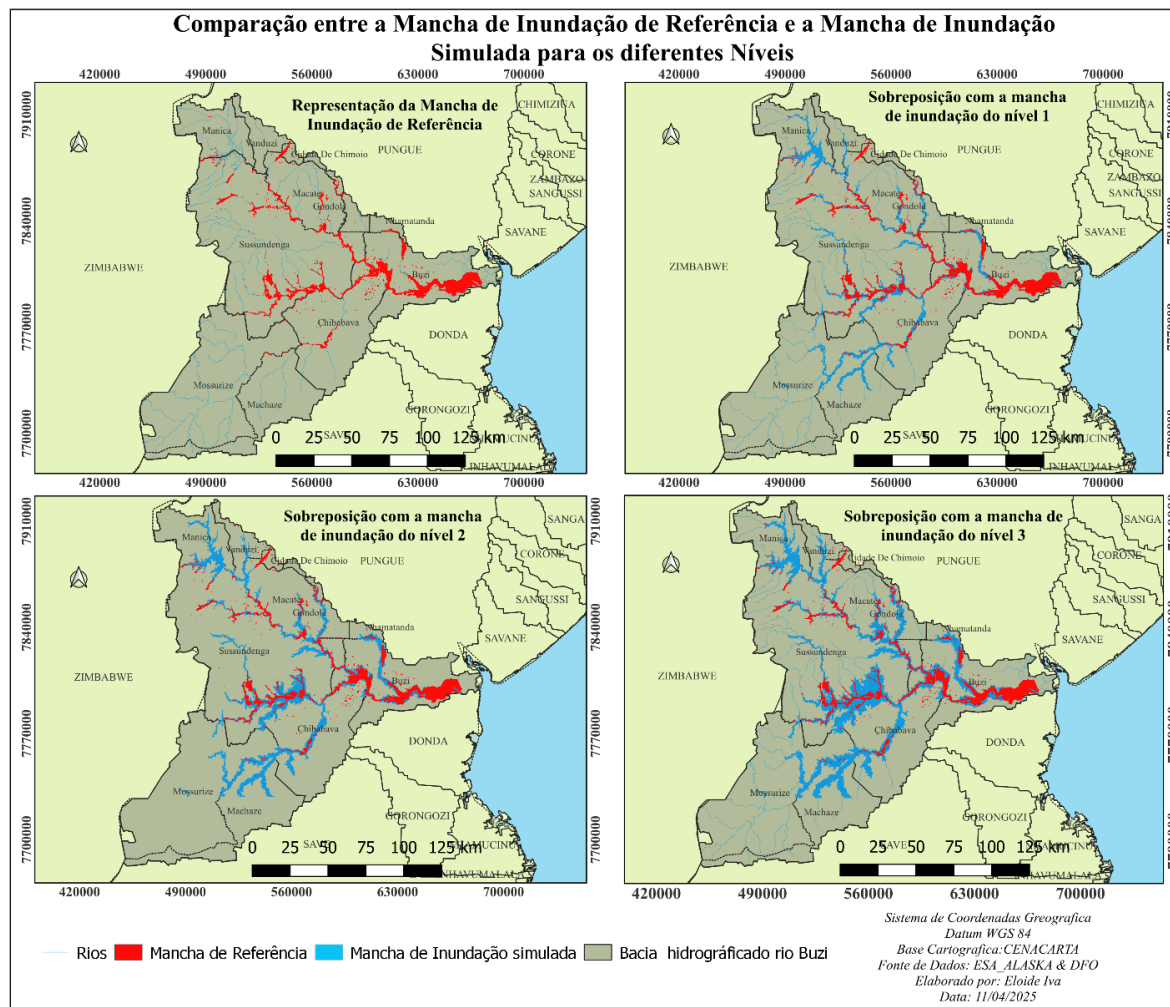


Figura 19: Comparação entre a mancha de inundação do modelo hidrológico GIS *Flood Tool* e a de referência, utilizadas para a validação com o Índice *Kappa*.

A Tabela 7 apresenta os principais indicadores obtidos da matriz confusão que permitem tomar decisões sobre a fiabilidade dos resultados.

Tabela 7: Apresentação das métricas de validação.

Nível de inundação	Acurácia Global	Índice <i>Kappa</i>	Qualidade
Nível 1	76%	66%	Boa
Nível 2	89%	78%	Boa
Nível 3	91%	82%	Excelente

Ao analisar os resultados dos três níveis, observa-se que a Acurácia Global variou entre 76% e 91%, ao passo que o Índice Kappa evoluiu de 66% à 82%,. De acordo com Landis e Koch (1977), valores de Kappa entre 60 – 80% são indicativos de boa performance e valores acima de 80% representam concordância quase que perfeita. Há uma evolução positiva do desempenho em modelos hidrológicos. No entanto, verifica-se uma performance crescente e positiva do modelo hidrológico GIS *Flood Tool*, à medida que avança na representação de níveis superiores relativamente ao ocorrido no terreno.

4.1.2 Determinação da frequência de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

As Figuras 21 e 22 que seguem, apresentam o ajuste da distribuição de Gumbel aos dados de caudais máximos anuais medidos à partir das estações de Dombe e Goonda, colocando em evidência o grau de alinhamento entre os valores teóricos e observado. Para efeitos, determinou-se o Tempo de Retorno de inundações para os períodos de 2, 5, 10, 20, 25 e 50 anos.

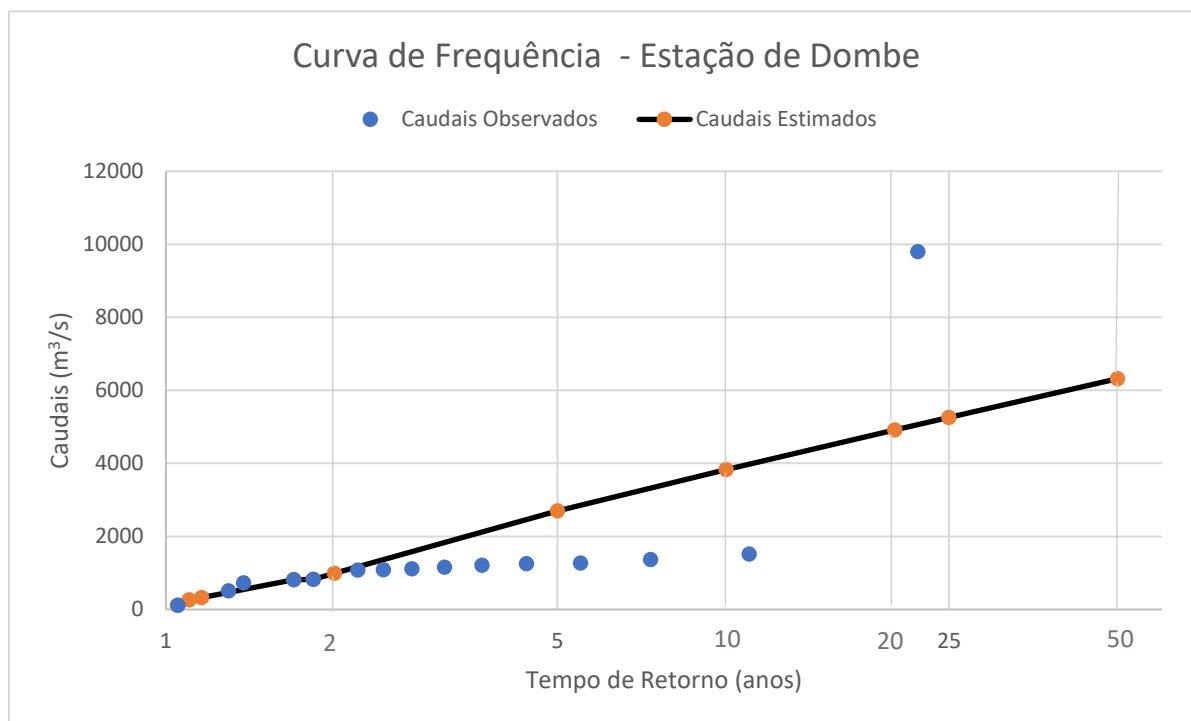


Figura 20: Curva de frequência de Gumbel baseada em caudais máximos anuais da Estação de Dombe.

Nota. Resultado obtido à partir do processamento dos dados da série histórica de caudais.

Observa-se que os caudais observados tendem a ser inferiores aos caudais estimados pela distribuição de Gumbel, situando-se abaixo de $2.000 \text{ m}^3/\text{s}$, a medida que ocorre o crescimento progressivo. No entanto, verifica-se a ocorrência de um pico abrupto correspondente à um evento isolado, com valor próximo à $10.000 \text{ m}^3/\text{s}$, que se destaca significativamente na tendência geral da série. Conforme discutido por Johnson (1970), a ocorrência de um único evento extremo isolado contribui para o aumento da variabilidade na série, influencia os parâmetros de Gumbel e reduz a robustez das estimativas para grandes tempos de retorno, devido à sensibilidade do modelo a esse valor, aumentando incerteza na extrapolação.

Por outro lado, nota-se que os caudais estimados apresentam um comportamento crescente consistente com o aumento do Tempo de Retorno. Contudo, verifica-se que para tempos de retorno maiores que 2, existe um afastamento significativo entre os valores observados e estimados. Segundo descrito por Maidment (1993) a incerteza dos valores estimados cresce à medida que o tempo de retorno aumenta, principalmente quando a amostra de dados é limitada.

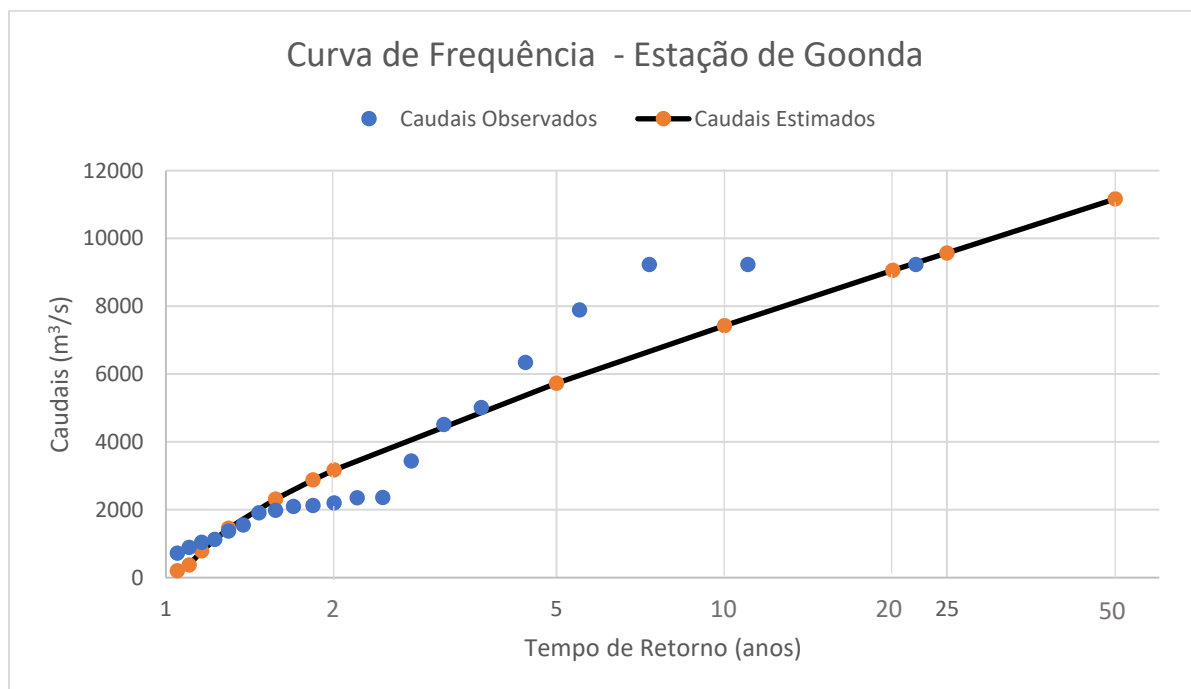


Figura 21: Curva de frequência de Gumbel baseada em caudais máximos anuais da Estação de Goonda.

Nota. Resultado obtido à partir do processamento dos dados da série histórica de caudais.

Observa-se que tanto os caudais observados assim como os estimados apresentam uma tendência crescente com o aumento do Tempo de Retorno e verifica-se, que para os tempos de retorno abaixo de 2 anos, os pontos estão muito próximos da curva estimada e alguns que praticamente coincidem com a recta. Tal é consistente com a formulação da distribuição de extremos proposta por Gumbel (1958), construída para representar o comportamento crescente dos valores máximos anuais em função do Tempo de Retorno.

De forma complementar, Chow (1988) afirma que, quando os dados acompanham o crescimento da recta teórica e encontram-se próximos ou pontualmente ajustados a mesma, indica adequação do modelo ao comportamento geral da série.

O gráfico também demonstra pontos que distribuem-se tanto acima como abaixo da recta teórica, colocando em evidência a existência de eventos cujo os caudais reais são superiores e inferiores aos previstos pelo modelo, respectivamente. Maidment (1993), afirma que a presença de pontos distribuídos em torno da curva teórica é indicação da variabilidade natural esperada da série de dados, e em função do comportamento médio estatístico descrito pela distribuição de valores extremos, não se espera um ajuste exacto ponto a ponto mas, uma representação adequada do comportamento global da distribuição. No entanto, com base nessa abordagem pode-se inferir que a dispersão observada no gráfico da Figura 22 é estatisticamente esperada.

Estes resultados permitem compreender o comportamento hidrológico das Estações de referência da Bacia, a medida que se têm a visualização da forma como os caudais estimados aumentam progressivamente com o aumento do tempo de retorno, dando a entender que as inundações moderadas acontecem com mais frequência que as inundações extremas. Ainda nesta linha de análise, pode se observar na estação de Goonda que, o caudal estimado para o Tempo de Retorno de 2 anos, já atinge magnitudes significativas de aproximadamente $3.800 \text{ m}^3/\text{s}$ que podem ocasionar ciclos de perdas e recuperação constante.

Os autores Kundzewicz et al. (2014) defendem de igual modo, que eventos de período curto devem ser tratados como ameaças recorrentes, devido aos seus prejuízos cumulativos e intervalos curtos entre os impactos.

A Figura 23 apresenta a qualidade do ajuste entre os caudais observados e os caudais estimados pelo modelo de Gumbel, avaliada através do gráfico linha 1:1. Cada ponto faz correspondência entre um valor observado e o respectivo valor estimado para cada uma das estações. A proximidade dos pontos em relação a recta 1:1 indica a capacidade do modelo de Gumbel em reproduzir adequadamente os valores observados, o que permite identificar eventuais desvios ou tendências sistemáticas.

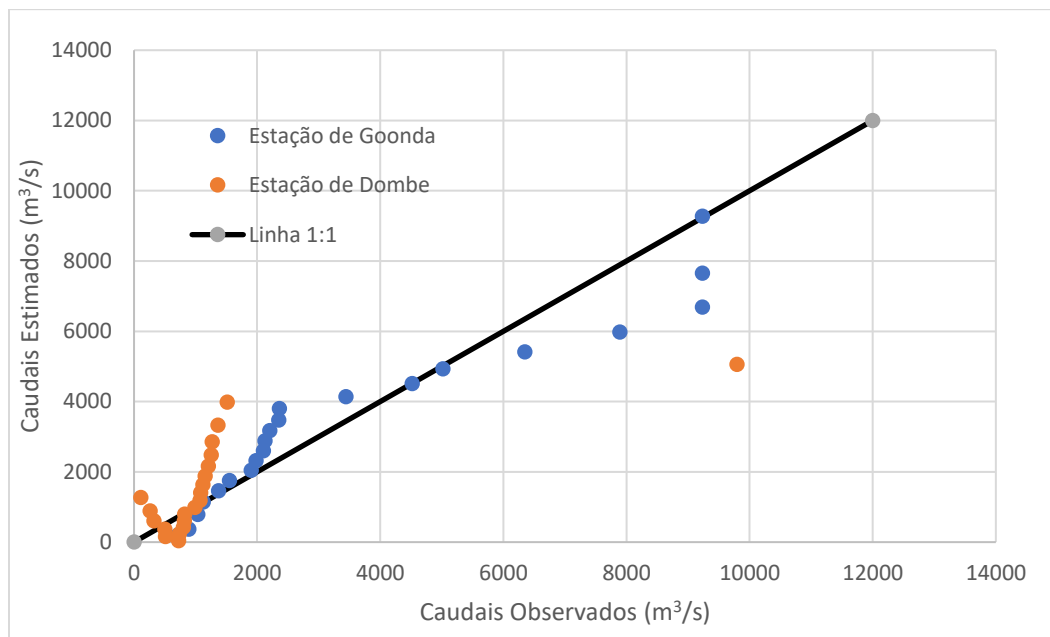


Figura 22: Apresentação visual do ajuste entre os caudais estimados e o Gráfico de dispersão 1:1

Em geral, observa-se uma concentração de pontos próximo a recta na parte inferior, contudo, a dispersão dos pontos aumenta à medida que há incrementos nos valores de caudais, com a excepção de alguns caudais elevados na estação de Goonda. Moriasi et al. (2007) associa esse comportamento a incerteza por parte do modelo em estimar eventos extremos, evidenciando dificuldades do modelo de Gumbel em representar picos de inundação.

Legates (1999) afirma que a proximidade dos pontos a recta, indica maior concordância entre os valores observados e estimados, tal como pode-se observar no gráfico, os caudais relativamente mais baixos, apresentam menor afastamento da recta, o que sugerem boa capacidade do modelo em simular as condições hidrológicas consideradas normais.

Em ambas estações verificam-se pontos situados acima e abaixo da recta. De acordo com Willmott (1982), essa dispersão dos pontos em torno da recta indica um erro aleatório e incapacidade do modelo em captar a variabilidade total.

A avaliação qualitativa do ajuste apresentada na Figura 23, é complementada pelas métricas estatísticas NRMSE e o Índice de concordância (d), correspondente para cada estação hidrométrica, pois por si só, não permite fazer uma avaliação mais objectiva em torno do grau de concordância entre os caudais. A Tabela 8 apresenta a avaliação quantitativa e comparável entre as estações.

Tabela 8: Avaliação quantitativa do ajuste do modelo de Gumbel entre as estações

Caudais observados vs Caudais estimados		
Métricas	Estação de Goonda	Estação de Dombe
NRMSE	0,26	0,97
d	0,97	0,79
Qualidade do desempenho	muito bom & excelente concordância	Muito baixo & boa concordância

Observa-se que a estação de Goonda apresenta um desempenho global superior em torno do modelo de Gumbel, evidenciado por um valor baixo de NRMSE (0,26), classificado como muito bom, e por um índice de concordância elevado ($d=0,97$). Wellmot (1985) afirma que quando o valor de (d) apresenta valores elevados (próximo de 1) e o NRMSE valores baixos (próximo de 0), indicam uma concordância excelente entre os valores observados e estimados, e um bom desempenho na reprodução do comportamento global da série de dados. Portanto, estes resultados sugerem que o modelo de Gumbel reproduziu de forma excelente a magnitude bem como a variabilidade dos caudais na estação de Goonda.

Em contraste, a estação de Dombe apresenta a um desempenho inferior, com um NRMSE elevado ($= 1$), que reflete um baixo desempenho e um índice de concordância (0,79) que indica uma boa concordância entre os caudais observados e estimados. Contudo, observa-se uma contradição na qualidade do desempenho do modelo para a estação em causa.

Moriasi et al. (2007), aponta que valores altos do (d) e NRMSE simultaneamente, indicam que o modelo acompanha bem o padrão geral mas, erra na intensidade exacta dos valores, ou seja, reproduz adequadamente o comportamento geral da série dos valores observados, mas o erro existente entre a magnitude dos valores observados e estimados é grande. O modelo consegue prever o comportamento extremo porém, erra ao estimar a intensidade de tal evento podendo ser muito maior ou muito menor que o observado.

A Tabela 9, apresenta a proposta de severidade hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, elaborada com base no critério de classificação por Tempo de Retorno adoptada pela *Dartmouth Flood Observatory* (DFO), que utiliza os limiares temporais como um dos critérios de hierarquização da magnitude dos eventos de inundação. Essa escala é essencial para interpretar os cenários de inundação simulados, a medida que associa os caudais estimados a cada Nível (1, 2 e 3), e à sua probabilidade de ocorrência, tornando possível classificar a magnitude das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi e distinguir eventos frequentes de episódios raros ou extremos.

Tabela 9: Proposta de severidade das inundações nas estações Goonda e Dombe, dentro Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Escala de severidade				
Tempo de Retorno	Caudal estimado em Goonda (m^3/s)	Caudal estimado em Dombe (m^3/s)	Classe Severidade	Nível de inundação (m)
Tr < 10 anos = nível 1	< 7431	< 3829	Magnitude baixa	5.5 – 6
Tr 10-20 anos = nível 2A	7431 - 9058	3829 - 4914	Magnitude grande	6 – 12
Tr 20-50 anos = nível 2B	9058 - 11163	4914 - 6319	Magnitude muito grande	
Tr > 50 anos = nível 3	> 11163	> 6319	Severo	12 – 18

Fonte: Adaptado da escala de severidade da DFO (2019).

Observa-se que a Estação de Goonda apresenta valores de caudal sistematicamente superiores aos da Estação de Dombe, para as mesmas classes de severidade, o que indica maior susceptibilidade à eventos extremos de inundações neste ponto, para além de evidenciar a variabilidade no comportamento hidrológico dentro da Bacia. Verifica-se também que caudais inferiores à $7431m^3/s$

na Estação de Goonda foram classificados como de magnitude baixa enquanto que valores superiores à $6319\text{m}^3/\text{s}$ na Estação de Dombe foram classificados como severos.

Essa inconsistência aparente é explicada pelo facto da classificação severidade não se basear no valor absoluto do caudal, mas sim no seu tempo de retorno dentro da série histórica de cada estação. Tal abordagem entra em conformidade com os princípios de análise de frequência hidrológica descritos por Chow et al. (1988) e Mays (2011), segundo os quais, a magnitude de um evento deve ser interpretada de forma relativa ao regime hidrológico local, ou seja, a severidade das inundações não pedende exclusivamente do valor absoluto do caudal, mas da capacidade hidráulica do canal, da morfologia do leito e da extensão da planície de inundação associada a cada estação.

Merz et al., (2007) complementam e referem que as inundações e seus impactos variam espacialmente, pois um determinado caudal, pode ser acomodado de forma eficiente no troço de um canal correspondente à um determinado ponto e ser classificado como evento de baixa severidade, enquanto que num outro ponto o mesmo valor de caudal ultrapassar os limiares locais de escoamento, e ser classificado como severo. Estas abordagens revelam a diferença espacial existente entre as estações de Goonda e Dombe.

Por outro lado, ao associar os dados reportados pelo DFO (2019) e INGC (2019), sobre as inundações ocorridas após a passagem do ciclone Idai (Março de 2019) à serie histórica, é observado um caudal da ordem de $9.000\text{m}^3/\text{s}$. Esse valor aproxima-se de caudais estimados para o intervalo de tempo de retorno entre 10 -20 anos na curva de frequência de Gumbel, em específico para a Estação de Goonda, o que, pressupõe uma baixa probabilidade anual de recorrência e característica de um evento de grande magnitude, ou seja, o retorno de um evento desta magnitude têm tendência a ser rara. Portanto, o evento semelhante ou superior ao ciclone Idai pode sim recorrer mas, com uma certa raridade.

Em termos práticos, esta associação entre os valores de caudais simulados pelo método de Gumbel e os modelos de inundação simulados pelo *Flood Tool* para os níveis 1, 2 e 3, quando analisada observando os valores de NRMSE obtidos, principalmente na Estação de Dombe, implica que os mapas resultantes, podem ser utilizados para identificar áreas de risco de forma geral (a nível das Bacias, Provincias, Distritos) e para tomar decisões sobre o planeamento territorial, identificação

de zonas de risco, políticas públicas e mais, mas, não devem ser utilizados para tomar decisões muito específicas no terreno.

Um exemplo prático do referido no parágrafo anterior, tomar decisões em escalas muito detalhadas sobre a construção de casa num ponto específico (considerado seguro), a definição concreta de uma parcela agrícola segura, etc., por uma razão simples, o valor elevado de NRMSE transmite uma percepção de erros do tipo, os mapas não mostrarem inundações onde houve e vice versa, e por sua vez se recomendar à um produtor cultivar naquela área ou edificar uma casa e ser surpreendido, resultando em perdas totais de produção, materiais e risco à vida

4.2 Representação de Áreas Agrícolas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

A Figura 24 apresenta o mapa de Uso e Cobertura da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, obtido de forma gratuita no geoportal da ESRI (Land Use/ Land Cover Atlas), com resolução espacial de 10 m, e a respectiva delimitação das áreas destinadas à prática agrícola. Este resultado possibilita a identificação de forma clara as zonas ocupadas por actividades agrícolas no contexto geral da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

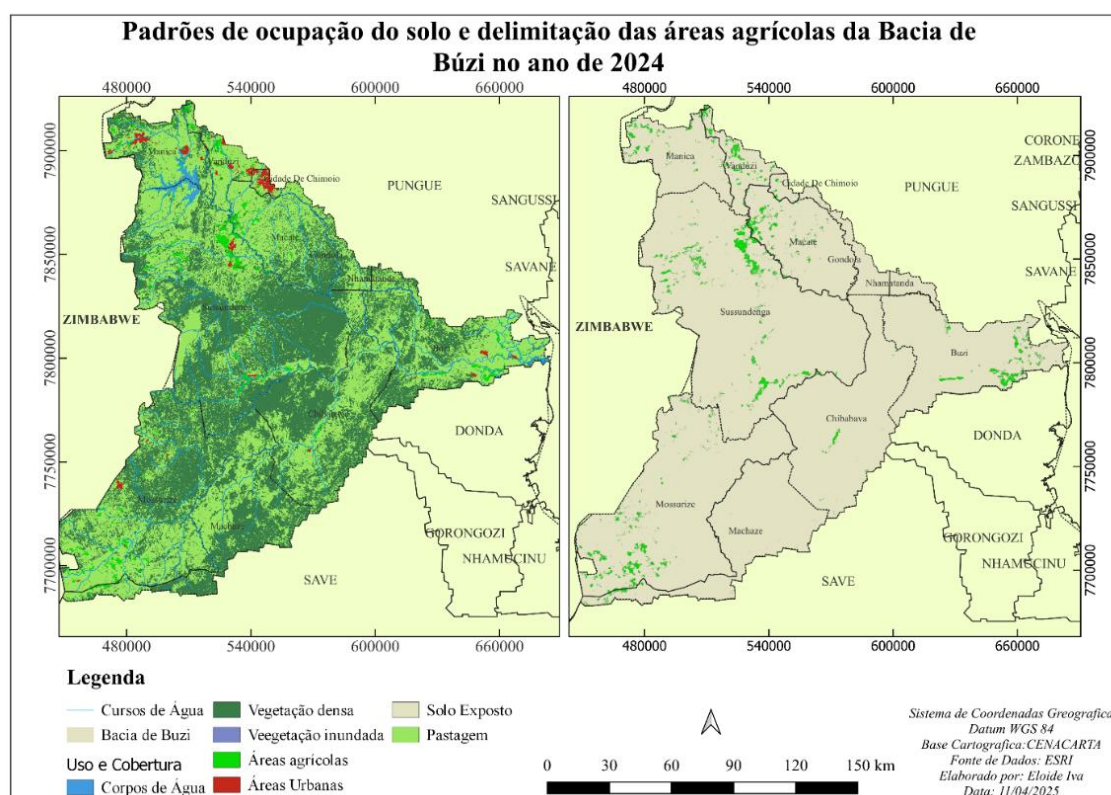


Figura 23: Representação do Uso e Cobertura (a esquerda) e distribuição espacial das áreas agrícolas (a direita) da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Fonte: ESRI (2024).

No geral, ao analisar visualmente a paisagem da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi é possível observar a sua heterogeneidade e forte predominância da cobertura natural, intercalada áreas urbanas e áreas destinadas à prática da agricultura. Na parte central da bacia é possível observar maior cobertura por vegetação arbórea que vai reduzindo a sua expressão nas regiões limitantes

da bacia. Outrora, a pastagem distribui-se de forma ampla em toda a bacia, assumindo maior relevância na parte Sul abrangendo os distritos de Mossurize e Machaze, a parte Norte cobrindo os distritos de Vanduzi, Manica e cidade de Chimoio, e a parte Oeste da bacia cobrindo o distrito de Búzi.

No Norte da bacia, particularmente nos distritos de Sussundenga, Macate, Vanduzi e Manica verifica-se maior concentração de áreas agrícolas, que também se destacam na zona Sul no distrito de Mossurize e no Oeste em direcção à zona costeira do Búzi. Em contrapartida, verifica-se uma baixa expressão nos distritos de Chibabava, Cidade de Chimoio e Gondola.

A Figura 25 apresenta o resumo em termos percentuais da distribuição do Uso e Cobertura de toda a região da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, baseando-se nos dados de Uso e Cobertura do solo da ESRI.

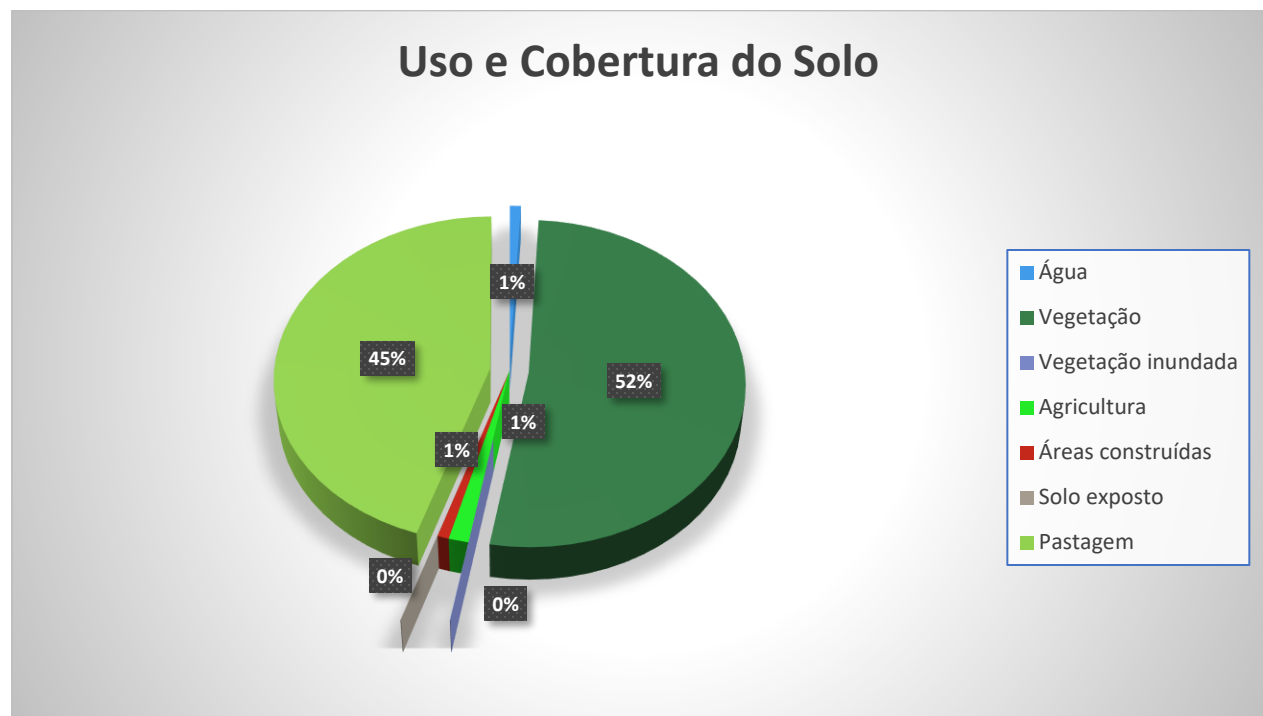


Figura 24: Distribuição percentual do Uso e Cobertura da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

Nota. Elaboração própria.

De acordo com Figura 25 acima apresentada, observa-se que a Bacia é maioritariamente ocupada por vegetação arbórea que corresponde a 52% da área total, seguida das pastagens, com 45%. Estes dois tipos de cobertura dominam amplamente a paisagem, representando juntos quase toda a superfície da bacia de Búzi. As demais classes ocupam proporções bastante reduzidas, onde a área destinada a agricultura ocupa cerca de 1,40% enquanto que as áreas construídas cerca de 0,8%. Já o solo exposto e a vegetação inundada tem uma participação pouco significativa apresentando valores residuais de 0,04% e 0,03% respectivamente.

Esta distribuição evidencia que a bacia possui um carácter predominantemente natural e rural, sendo as classes minoritárias em extensão mais vulneráveis aos impactos das inundações.

A Figura 26 apresenta a distribuição da capacidade produtiva a Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, obtidos através dos dados de Uso e Cobertura que possibilitou a extração de áreas agrícolas. Constantou-se que a agricultura na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi representa cerca de 1% da área total e para compreender melhor a sua expressão espacial, procedeu-se com este levantamento de modo a identificar a contribuição na produção agrícola a nível dos distritos e analisar o seu potencial, podendo conferir com mais detalhes no Anexo 15.

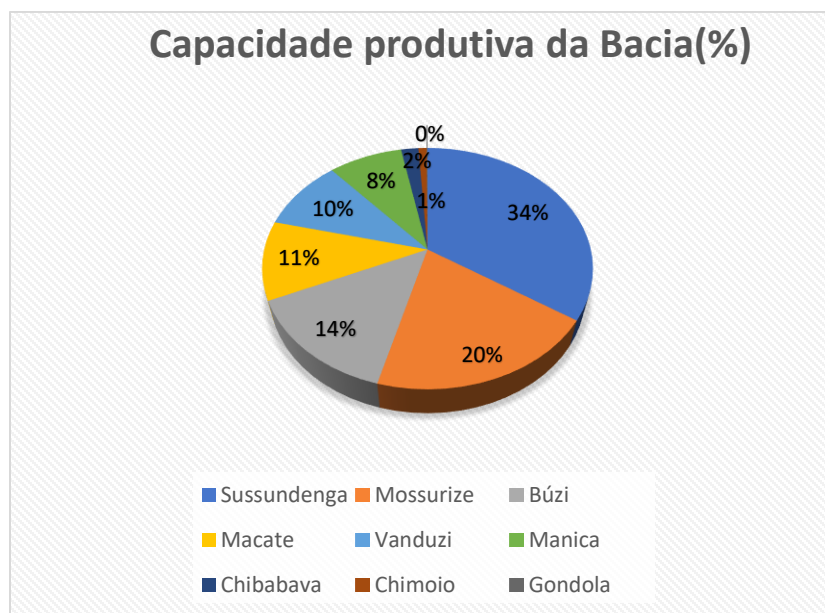


Figura 25: Capacidade produtiva agrícola por distrito Hidrográfica do Rio Búzi expressa em percentagem.

Nota. Resultado obtido através do processamento dos dados do Uso e Cobertura do solo.

Observa-se na figura acima que a capacidade produtiva agrícola da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi está fortemente concentrada nos distritos de Sussundenga (34%), seguido de Mossurize (20%) e Búzi (14%), que em conjunto representam mais de dois terços da produção potencial. Em contraste, distritos como Chibabava (2%), Chimoio (1%) e Gondola (0,10%) apresentam uma baixa representatividade agrícola, mostrando menor peso no contributo agrícola da Bacia.

4.3 Representação de Áreas Agrícolas em Risco de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

A Figura 27, apresenta a sobreposição das áreas agrícolas com a mancha de inundação do Nível 1 (> 0 – 6 metros), possibilitando a identificação e quantificação das zonas agrícolas localizadas em áreas de risco.

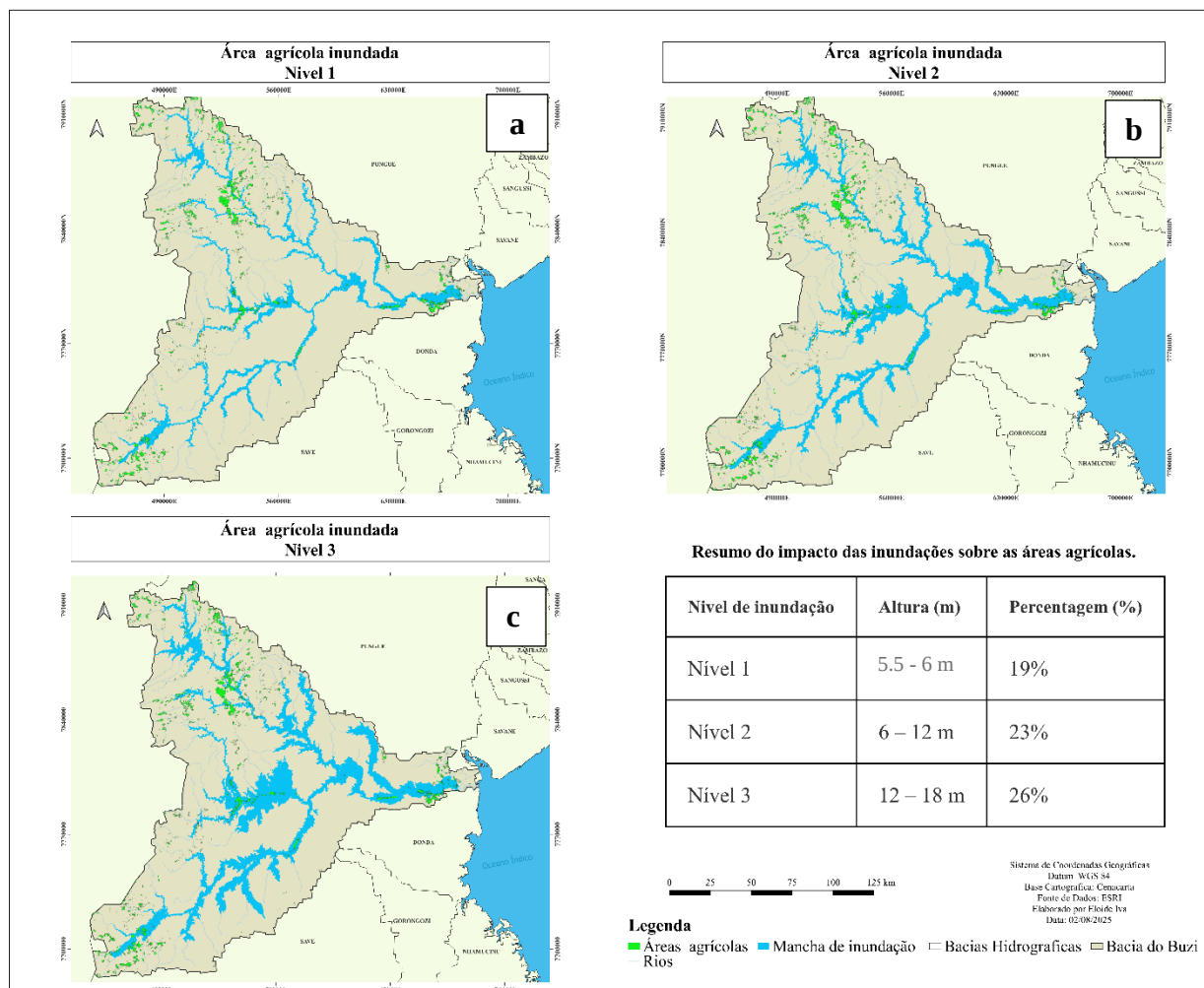


Figura 26: Representação temática de áreas agrícolas em risco de inundações, **Mapa (a):** Sobreposição das áreas agrícolas com o Nível 1 de inundação; **Mapa b:** Sobreposição das áreas agrícolas com o Nível 2 de inundação; **Mapa c:** Sobreposição das áreas agrícolas com o Nível 3 de inundação.

Na Figura 20, verifica-se no Nível 1, que as áreas agrícolas mais afectadas localizam-se nos distritos de Sussundenga, Mossurize e Búzi, cujo concentram parte significativa da capacidade produtiva da bacia. Em contrapartida, os distritos de Macate, Vanduzi e Chibabava apresentam menor expressão agrícola em risco, embora, no caso específico de chibabava, as áreas agrícolas atingidas tenham sido afectadas quase na sua totalidade. Verificou-se também que, as áreas agrícolas impactadas encontram-se essencialmente ao longo dos principais cursos de água, o que reflecte a dependência pela disponibilidade hídrica e vulnerabilidade à eventos de baixa intensidade espacial.

Observa-se a abrangência de novas explorações agrícolas com o aumento do nível de inundação para o Nível 2, entrando para a lista, as do distrito de Manica. Esta progressão pressupõe uma relação de proporcionalidade entre o grau de severidade de inundação e a extensão do impacto sobre o uso agrícola e pode-se associar ao facto de estas estarem próximas umas das outras, o que torna fácil o seu alcance quando há um incremento no nível da água.

No último cenário, do Nível 3 não foram abrangidos novos distritos mas, é possível observar o alcance de novas áreas no distrito de Sussundenga com o incremento dos níveis de água. Conduzir esta análise, baseando-se nas capacidades produtivas dos distritos, o mais afectado é o de Chibabava, pois da sua capacidade total, até ao Nível 3, 100% das suas áreas agrícolas foram afectadas. Por outro lado, Os distritos de Chimoio e Gondola não tiveram áreas agrícolas afectadas, podendo estar relacionado com o seu ligeiro afastamento dos principais cursos de água ou com o facto das áreas destinadas à prática de agricultura, encontrarem-se numa zona alta.

Com base nos resultados sumarizados na tabela, observa-se que no Nível 1, cerca de 19% das áreas agrícolas foram afectadas, no Nível 2 foram afectadas mais 4%, totalizando 23% e no Nível 3 são cobertas mais 3% alcançando um total de 26% de área agrícola comprometida em casos extremos. Entretanto, verifica-se uma maior abrangência a nível das áreas agrícolas por parte do Nível 3, podendo ser categorizado como o nível mais severo. Em termos práticos, se está a dizer que um quarto das áreas agrícolas da Bacia pode ser atingido por inundações graves.

Moura et al. (2018) conduziram um estudo similar, no qual analisavam áreas agrícolas em risco de inundações, e dos seus resultados cerca de 20% do total da área agrícola foi afectada no cenário mais severo, valor percentual ultrapassado no presente estudo, tendo se registado 6% a mais no

caso mais severo. Esta discrepância é aparentemente pequena mas, traduz-se em diferenças substanciais, podendo significar centenas de hectares comprometidos.

Estes mesmos autores, ao longo das suas análises constataram que as áreas agrícolas da sua região de estudo, estavam maioritariamente sujeitas a inundações frequentes porque encontravam-se situadas em regiões de planícies onde se inserem as baixas aluvionares. O mesmo observa-se nos mapas de risco apresentados acima, nos quais, boa parte das áreas agrícolas encontra-se nas proximidades das margens dos rios o que explica o índice de risco elevado principalmente com a deficiência de infra-estruturas de drenagem na região.

Em suma, os resultados aqui apresentados não apenas confirmam a susceptibilidade das áreas agrícolas ao risco de inundação na bacia do Búzi, como também demonstram a urgência em implementar medidas estruturais e não estruturais, tais como requalificação de sistemas de drenagem, estabelecimento de zonas de uso condicionado e educação ambiental voltada à agricultura sustentável em zonas ribeirinhas

.

4.4 Identificação de Infra-estruturas em Risco de Inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi

Para além das áreas agrícolas existem outras infra-estruturas que directa ou indirectamente podem comprometer o funcionamento normal do sector agrícola se forem afectadas pelas inundações. A Figura 28 apresenta o cenário de risco destas infra-estruturas aos 3 níveis de inundações.

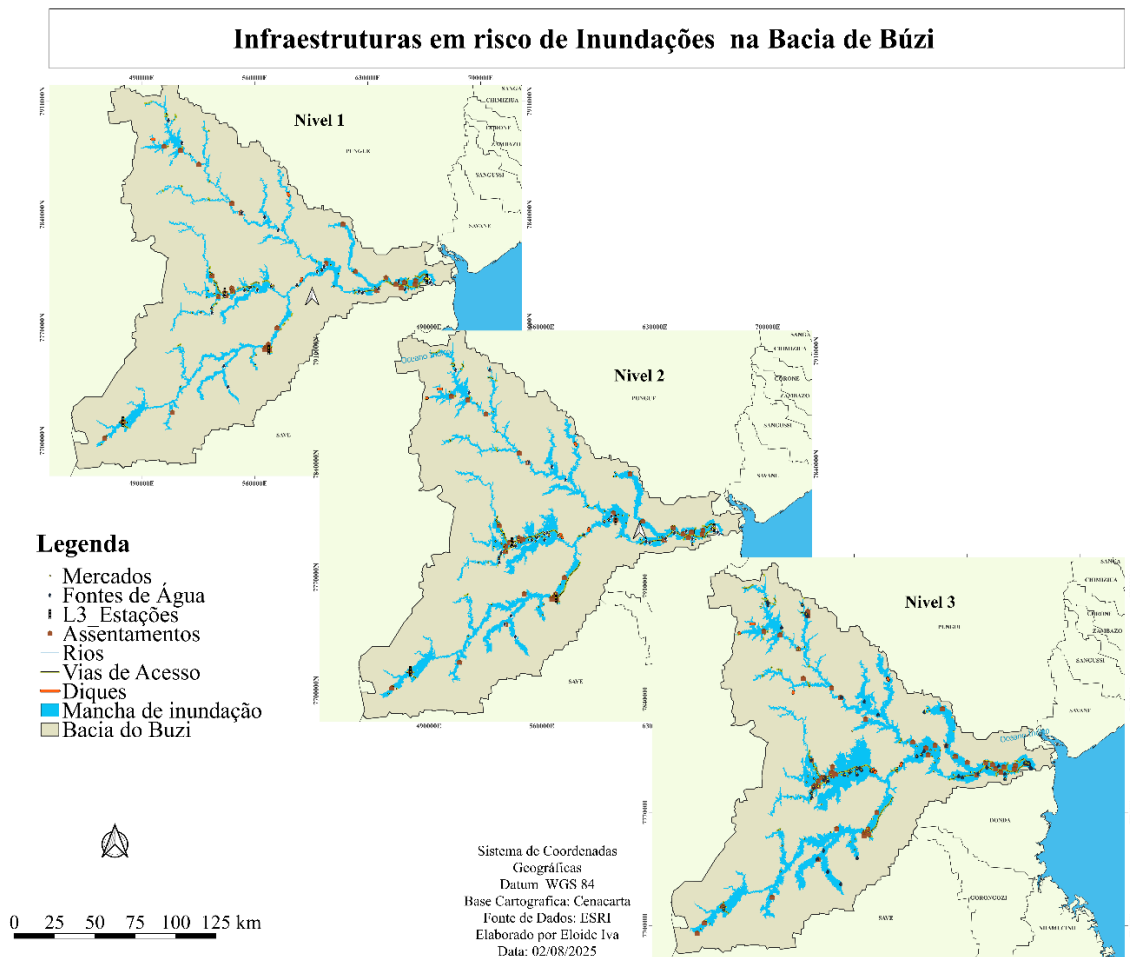


Figura 27: Impacto das inundações sobre as infra-estruturas na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.

À partir do Nível 2, observa-se que o número de infra-estruturas em risco aumentou consideravelmente, e mantendo sua concentração nos distritos de Sussundenga e Búzi. No último cenário do nível 3, observa-se a continuidade da exposição aos impactos das inundações sobre todos os tipos de infra-estruturas analisados, com os distritos de Búzi e Sussundenga a destacarem-

se como as áreas de maior risco, confirmando a elevada fragilidade estrutural e social destes territórios face à inundações.

Em suma, a análise espacial mostra que à medida que se avança do Nível 1 ao Nível 3 de inundação, verifica-se um aumento progressivo do número e da diversidade de infra-estruturas em risco. Observa-se não apenas a expansão das áreas afectadas, mas também o alastramento do impacto sobre infra-estruturas que desempenham um papel crucial na criação de emprego, nas trocas comerciais entre produtores e consumidores, na geração de rendimentos e no desenvolvimento económico e social das comunidades. Esta observação evidencia que a intensificação das inundações compromete de forma crescente tanto a acessibilidade assim como os serviços de apoio à agricultura, criando uma situação de maior vulnerabilidade para as comunidades locais.

A Tabela 10 apresenta, de forma resumida, a quantificação em termos de extensão das infra-estruturas localizadas em zonas de risco e os respectivos distritos afectados.

Tabela 10: Resumo de impacto das inundações sobre as infra-estruturas em risco na Bacia do Rio Búzi.

Infra-estrutura	Nível de Inundação 1	Nível de Inundação 2	Nível de Inundação 3	Distritos afectados
	Para as alturas de 5.5 – 6 m	Para as alturas de 6 – 12 m	Para as alturas de 12 – 18 m	
Assentamentos	27 assentamentos (15305 agregados familiares = 52.618 pessoas afectadas sendo a maioria pertencente ao distrito de Búzi com 23946 pessoas afectadas)	36 assentamentos (47366 agregados familiares =224.052mil pessoas afectadas sendo a maioria pertencente ao distrito de Mossurize com 154224 pessoas afectadas).	58 assentamentos (86580 agregados familiares =416.188mil pessoas afectadas sendo a maioria pertencente ao distrito de Mossurize com 250163 pessoas afectadas).	Chibabava, Gondola, Búzi, Mossurize, Sussundenga, Machaze,Manica
Fontes de água	42:2 bombas manuais, 10 furos de água, 15 furos com bomba manual, 2 poços	56:5 bombas manuais, 11 furos de água, 25 furos com bomba manual, 2 pocos	74: 46 furos com bomba manual publico, 11 poços, 10 fontenário, 6 bombas manuais,	Chibabava, Gondola, Búzi, Mossurize, Sussundenga,

	sem bomba, 6 poços com bomba manual, 7 fontenário	sem bomba, 6 poços com bomba manual, 7 fontenários		Machaze, Manica
Actividades económicas	70: 19 mercados, 40 moageiras, 10 lojas comerciais, 1 comércio geral	103: 29 mercados, 57 moageiras, 15 lojas comerciais, 2 comércios gerais (Supermercados e conjunto de bancas)	137: 36 mercados, 80 moageiras, 19 Lojas, 2 Comercios gerais	Chibabava, Gondola, Búzi, Mossurize, Sussundenga, Machaze, Manica
Estradas (troços)	36 troços (125 km)	39 troços (198 km)	45 troços (236 km)	Manica, Vanduzi, Mossurize, Sussundenga, Búzi, Chibabava,

Nota. Elaboração própria.

A exposição de infra-estruturas importantes à diferentes níveis de inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi levanta preocupações sérias quanto ao funcionamento do sector agrícolas especialmente para os pequenos produtores que dependem fortemente da estabilidade destas estruturas para manter a sua actividade produtiva e a subsistência familiar.

As vias de acesso, por exemplo, são elementos estratégicos para o escoamento da produção agrícolas e para a mobilização dos insumos e a da mão de obra. Observa-se grandes extensões de estrada (236 km) em risco de ser afectadas pelas inundações no cenário do Nível 3, e como consequência ocorre a interrupção na ligação entre zonas de produção e comercialização, o que compromete a renda dos produtores e gera aumento das perdas pós colheita, devido ao excedente da produção não escoado. Em contextos mais prolongados pode agravar a insegurança alimentar nas comunidades afectadas.

Os assentamentos também se destacam entre as infra-estruturas vulneráveis, podendo se observar na tabela acima, que cerca de 15 mil agragados encontram-se em risco de ser afectados ainda no Nível mais baixo de risco. Um aumento significativo em número é verificado entre o Nível 1 e 3, evoluindo para cerca de 86 mil comprometidos. Estes números são preocupantes principalmente a

nível do distrito de Mossurize que destaca-se com o maior número de pessoas afectadas nos dois últimos cenários.

Baseando-se na perspectiva de impacto de Ramakrishna et al. (2014) esta vulnerabilidade representa dupla ameaça visto que a maioria das habitações localizam-se próximo das áreas de cultivo, a sua destruição pode vir acompanhada da perda simultânea destas áreas e igualmente de toda produção, submentendo as comunidades a escassez de alimentos e a deslocação forçada. No entanto, a perda desta infra-estrutura, enfraquece não só a estabilidade mas também a capacidade de resposta por parte dos produtores durante e após eventos externos.

De igual modo, do Nível 1 ao Nível 3 observa-se o aumento de quase o dobro de mercados em risco de inundações, evoluindo de 70 para cerca de 137 no cenário mais grave. Este cenário evidencia uma elevada vulnerabilidade por parte das actividades económicas ao longo da bacia, visto que paralisação destes mercados, afecta a economia local e a oportunidade de comércio para os pequenos produtores e de forma indirecta o acesso ao alimento básico. Baseado no raciocínio de Bansal (2015), devido aos cortes as vias de acesso e consequentemente isolamento entre os bairros é comum que as actividades económicas exercidas nos mercados locais paralise, dado que maior parte dos pontos de ligação ficam inundados.

Em relação aos diques de defesa, embora parte deles já se encontram destruídos segundo Charas (2019), importa destacar a sua função estrutural na protecção das áreas agrícolas contra inundações. Nesta senda, foram identificados um total de 7 instalados em pontos estratégicos de escoamento da água. Portanto, a inexistência ou destruição destes sistemas de protecção expõe as explorações agrícolas a inundações recorrentes, fragilizando todo sistema produtivo e comprometendo a continuidade dos ciclos agrícolas essenciais para a subsistência local.

V. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

5.1 Conclusões

À luz dos objectivos específicos definidos e dos resultados obtidos do modelo hidrológico GIS *Flood Tool* e imagens de Uso e Cobertura da ESRI no presente estudo, concluiu-se que:

Em função do Nível 1 (alturas 5.5 - 6 m), a área inundada é de cerca de 10% correspondente à 258.600 ha, para o Nível 2 (alturas entre 6 – 12 m) a área inundada aumenta para 16% correspondente à 413.760 ha e para o Nível 3 (alturas entre 12 – 18 m) a área inundada atinge 22% correspondente à 568.920 ha, do total de 2.586.000 ha. As áreas inundadas da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi apresentam uma relação directa com o incremento nos Níveis de inundação simulados, a medida que verifica-se uma expansão das manchas de inundação entre os diferentes cenários analisados.

Cerca de 19% da área agrícola, localiza-se em zonas susceptíveis a inundação do Nível 1 (altura < 6 m), 23% do Nível 2 (alturas entre 6 – 12 m) e 26% do Nível 3 (alturas entre 12 – 18 m), correspondentes à 10.321 ha, 12.497 ha e 14.125 ha respectivamente, do total de 54.326 ha. Esta vulnerabilidade crescente ao risco, encontra-se particularmente associada à proximidade ao curso principal do rio Búzi e aos seus afluentes.

Diversas infra-estruturas de apoio ao sector agrícola na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi, tais como estradas, fontes e sistemas de captação de água, assentamentos, e mercados, encontram-se igualmente inseridas em áreas de risco à inundações. No entanto, há uma necessidade de considerar o risco não só sobre as áreas agrícolas, mas também sobre os elementos estruturais que sustentam o funcionamento do sistema agrícola.

A ferramenta hidrológica GIS *Flood Tool* tem capacidade para reproduzir a dinâmica espacial das inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi e com base nisso fazer análises de exposição ao risco no terreno ao combinar com dados de Uso e Cobertura do Solo. Portanto, o presente estudo, contribuiu não apenas com Mapas actualizados do risco no sector agrário, mas também fornece subsídios relevantes que permitem tomar decisões direccionadas, destacando a importância de incorporar este tipo de análises no planeamento territorial, na gestão de Bacias Hidrográficas e na definição de medidas de mitigação e adaptação.

5.2 Recomendações

Recomenda-se:

- i. Utilizar os mapas de áreas susceptíveis à inundações no planeamento do uso do solo na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi;
- ii. Utilizar em estudos futuros, imagens de referência com resolução espacial igual ou superior à do modelo (por exemplo, Sentinel 1 com 10 metros de resolução), afim de garantir uma boa precisão da validação
- iii. Implementar medidas práticas de mitigação (Uso de culturas tolerantes como Arroz, Batata-doce, milho de ciclo curto, sorgo e mapira; Ajuste do calendário agrícola; Sistemas de cultivo adaptados como drenagem simples; Agricultura de recessão, etc.) nas áreas agrícolas em risco, dentro da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi
- iv. Aplicar adaptações resilientes às infra-estruturas identificadas nas áreas de risco à inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi como suporte para minimização dos impactos.
- v. Aprofundar estudos com ferramenta SIG e modelos hidrológicos para a actualização contínua de mapas de risco de inundações voltados para o sector agrícola.

De grosso modo, apesar da obtenção de resultados satisfatórios no presente estudo, foram identificadas algumas limitações a nível da série histórica de dados fornecida, e, para efeitos, recomenda-se a aplicação de métodos de correção e tratamento de séries históricas de caudais (Preenchimento de falhas ou curva de dupla massa), considerando que no presente estudo, foram utilizados dados brutos com presença de valores atípicos e lacunas (N/A). Recomenda-se igualmente, a utilização de séries mais robustas, integrando dados de múltiplas estações hidrométricas, contribuindo para o aumento da precisão das análises de frequência de inundações e para melhor compreensão do comportamento hidrológico da Bacia Hidrográfica em estudo.

VI. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Akallouch, A., Al Mashoudi, A., Ziani, M., & Elhani, R. (2024). GIS application in urban flood risk analysis: Midar as a case study. *Open Journal of Ecology*, 14(2), 148–164.

Almeida, R. T. O. (2019). Mapeamento de perigo de inundação incorporando o indicador tempo (Dissertação de Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental). Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, Brasil.

Andrade, M. M. N., & Szlafsztein, C. F. (2018). Vulnerability assessment including tangible and intangible components in the index composition: An Amazon case study of flooding and flash flooding. *Science of the Total Environment*, 630, 903–912. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.271>

Bansal, N., Mukherjee, M., & Gairola, A. (2015). Causes and impact of urban flooding in Dehradun. *International Journal of Current Research*, 7(2), 12615–12627.

Bié, A. J. (2022). Ciclones tropicais no Sudoeste do Oceano Índico: Representação em reanálises atmosféricas e experimentos de sensibilidade com modelo regional acoplado (Tese de Doutorado em Ciências, Programa de Pós-Graduação em Meteorologia). Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil.

Bouras, E. H., et al. (2020). Agricultural land use mapping using Sentinel-2 data in semi-arid regions of Morocco. *Remote Sensing*, 12(8), 1234. <https://doi.org/10.3390/rs12081234>

Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied hydrology*. McGraw-Hill

Congalton, R. G. (1991). A review of assessing the accuracy of classifications of remotely sensed data. *Remote Sensing of Environment*, 37(1), 35–46. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90048-B](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90048-B)

Congalton, R. G., & Green, K. (2008). Assessing the accuracy of remotely sensed data: Principles and practices (2nd ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781420055139>

Consultec. (1998). Country situation report—Water resources (Final draft, Vol. 3).

Drusch, M., Del Bello, U., Carlier, S., Colin, O., Fernandez, V., Gascon, F., et al. (2012). Sentinel-2: ESA's optical high-resolution mission for GMES operational services. *Remote Sensing of Environment*, 120, 25–36. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.11.026>

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), IIASA, ISRIC, ISS-CAS, & CCI. (2012). *Harmonized World Soil Database (Version 1.2)*. FAO & IIASA.

Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). (2020). *Mozambique: Seed security assessment*.

Fassoni-Andrade, A. (2020). *Mapeamento e caracterização do sistema rio-planície da Amazônia central via sensoriamento remoto e modelagem hidráulica (Tese de Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental)*. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Foody, G. M. (2002). Status of land cover classification accuracy assessment. *Remote Sensing of Environment*, 80(1), 185–201. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00295-4](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00295-4)

International Federation of Red Cross and Red Crescent Societies (IFRC). (2016). *World disasters report 2016: Resilience—Saving lives today, investing for tomorrow*.

Instituto Nacional de Gestão de Calamidades (INGC). (2009). *Relatório nacional de avaliação integrada da vulnerabilidade às mudanças climáticas*.

Instituto Nacional de Gestão de Calamidades (INGC). (2017). *Plano director para a redução do risco de desastres 2017–2030*. Conselho de Ministros.

Instituto Nacional de Gestão de Calamidades (INGC). (2020). *Relatório de avaliação pós-ciclone Idai: Bacia do Búzi*.

Jonathan, S. C., & Lee, H. S. (2020). Flood risk assessment for Davao Oriental, Philippines, using GIS-based multi-criteria analysis and maximum entropy model. *Journal of Flood Risk Management*, 13(4), e12607. <https://doi.org/10.1111/jfr3.12607>

Jones, A., Breuning-Madsen, H., Brossard, M., Dampha, A., Deckers, J., Dewitte, O., et al. (Eds.). (2013). Soil atlas of Africa. European Commission, Publications Office of the European Union.

Lasse, N. H. (2023). Vulnerabilidade da agricultura familiar à intrusão salina na bacia hidrográfica do Limpopo (Dissertação de Mestrado). Universidade Eduardo Mondlane, Maputo, Moçambique.

Lempérière, F. (2017). Dams and floods. *Engineering*, 3(1), 144–149. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2017.01.025>

Lopes, V. A. R. (2017). Modelagem hidrológica e hidrodinâmica integrada de bacias e sistemas lagunares com influência do vento (Dissertação de Mestrado). Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Brasil.

Ministério da Agricultura (MINAG). (2015). Plano Estratégico para o Desenvolvimento do Sector Agrário (PEDSA 2011–2020). Governo de Moçambique, Maputo, Moçambique.

Ministério para a Coordenação da Ação Ambiental (MICOA). (2013). Estratégia nacional de adaptação e mitigação de mudanças climáticas. Governo de Moçambique.

Paiva, I. (2019). Risco de inundação em Coimbra: Fatores físicos e ação antrópica (Dissertação de Mestrado). Universidade de Coimbra, Portugal.

Rajib, A., Liu, Z., Merwade, V., Tavakoly, A. A., & Follum, M. L. (2020). Towards a large-scale locally relevant flood inundation modeling framework using SWAT and LISFLOOD-FP. *Journal of Hydrology*, 581, 124406. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124406>

Recha, J. W., & Chiulele, R. M. (2017). Mozambique climate smart agriculture guideline. Vuna. Guideline. Pretoria: Vuna.Online: <http://vuna-africa.com/>.

Rudorff, C. M., Melack, J. M., & Bates, P. D. (2014). Flooding dynamics on the lower Amazon floodplain: Hydraulic controls on water elevation, inundation extent, and river-floodplain discharge. *Water Resources Research*, 50(1), 619–634. <https://doi.org/10.1002/2013WR014091>

Ramakrishna, G., Solomon, R. G., & Daisy, I. (2014). Impact of floods on food security and livelihoods of IDP tribal communities. *International Journal of Development and Economics Sustainability*, 2(1), 11–24.

Tucci, C. E. M., & Bertoni, J. C. (Orgs.). (2003). Inundações urbanas na América Latina. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

United Nations Development Programme (UNDP). (2019). Human development report 2019: Inequalities in human development in the 21st century.

United Nations Office for Disaster Risk Reduction (UNDRR). (2017). National disaster risk assessment: Governance system, methodologies and use of results. UNISDR.

USAID. (2002). Cheias 1999–2000: Avaliação de impacto – Actividade de doação para reassentamento da população (p. 58).
https://sarpn.org/documents/d0000811/P907Mozambique_floods_1999_2000_USAID_072002_P.pdf

Tucci, C. E. M., & Bertoni, J. C. (Orgs.). (2003). Apostila de inundações urbanas da América Latina. Associação Brasileira de Recursos Hídricos.

UNDP. (2019). Human development report 2019: Inequalities in human development in the 21st century Jordan. Visitado em 15 de março de 2025, de <http://hdr.undp.org/en/data>

UNDRR. (2017). National disaster risk assessment: Governance system, methodologies, and use of results. Geneva: UNISDR. Visitado em 21 de agosto de 2024, de

World Bank. (2021). Mozambique climate risk and resilience assessment. Visitado em 10 de março de 2025, de <https://www.worldbank.org>

VII. ANEXO

Mapa Real	Classe de Referência (DFO)	Classificado_Nível 1		
		Inundado	Não inundado	Total Referência
	Inundado	358	142	500
	Não inundado	29	471	500
	Total Classificado	387	613	1000

Anexo 1: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 1 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.

Acurácias	Classes_Nível 1	
	Inundado	Não Inundado
Acurácia do Produtor (%)	0,72	0,94
Acurácia do Utilizador (%)	0,92	0,77

Anexo 2: Resultado das métricas de acurácia para o cálculo do índice *Kappa*.

Acurácia Observada = 0,83

Acurácia Esperada = 0,50

Global (%) 0,82

Índice *Kappa* (%) 0,66

Mapa Real	Classe de Referência	Classificado_Nível 2		
		Inundado	Não inundado	Total Referência
	Inundado	423	77	500
	Não inundado	31	469	500
	Total Classificado	454	546	1000

Anexo 3: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 2 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.

Acurácias	Classes_Nível 2
-----------	-----------------

	Inundado	Não Inundado
Acurácia do Produtor (%)	0,85	0,94
Acurácia do Utilizador (%)	0,93	0,85

Anexo 4: Resultado das métricas de acuracia para o cálculo do Índice *Kappa*

Acurácia Observada = 0,89

Acurácia Esperada = 0,50

Global (%) 0,82

Índice *Kappa* (%) 0,66

Mapa Real	Classe de Referência	Classificado_Nível 3		
		Inundado	Não inundado	Total Referência
	Inundado	437	63	500
	Não inundado	40	460	500
	Total Classificado	477	523	1000

Anexo 5: Comparação entre as classes do mapa de inundação do Nível 3 utilizando como referência imagem satélite Modis, para análise da precisão dos resultados obtidos.

Acurácias	Classes_Nível 3	
	Inundado	Não Inundado
Acurácia do Produtor (%)	0,87	0,92
Acurácia do Utilizador (%)	0,92	0,88

Anexo 6: Resultado das métricas de acurácia para o cálculo do Índice *Kappa*.

Acurácia Observada (%) = 0,91

Acurácia Esperada (%) = 0,51

Global (%)	0,82
Índice <i>Kappa</i> (%)	0,66

Dados hidrológicos brutos			
Estação de Dombe		Estação de Goonda	
Ano	caudal anual máximo (m³/s)	Ano	caudal anual maximo (m³/s)
1975	1003,3	1999	7890,1
1976	914,8	2000	3442,7
1977	415,15	2001	1038,3
2002	803,97	2002	1982,4
2003	821,96	2003	2352,6
2004	818,25	2004	891,57
2005	736,7	2005	2127,9
2006	885,67	2006	4518,2
2007	1267,4	2007	9233,7
2008	1254	2008	1906
2009	1205,2	2009	2206,3
2010	1082,3	2010	2103
2011	261	2011	1145,2
2012	1156,9	2012	2362,5
2013	1363,8	2013	6347,5
2014	724,07	2014	1511,2
2015	509,38	2015	720,21
2016	1073,3	2016	9233,7
2017	1116,6	2017	9233,7
2018	393,1	2018	9233,7
2019	1511,6	2019	5016,9

Anexo 7: Série histórica de caudais máximos anuais das estações de referência da Bacia de Búzi.

Fonte: ARA-Centro.

Estação de Dombe		Estação Goonda	
Coeficientes de Gumbel		Coeficientes de Gumbel	
Média	919,93	Média	4023,68
Desvio padrão	327,62	Desvio padrão	3082,35
Coeficiente α	255,45	Coeficiente α	2403,3
Coeficiente μ	772,48	Coeficiente μ	2636,5
Coeficiente de assimetria	-0,3	Coeficiente de assimetria	0,7

Anexo 8: Parâmetros estatísticos necessários para estimar os caudais extremos.

Estimativa de caudais extremos			
Dombe		Goonda	
TR (anos)	q(Tr) (m ³ /s)	TR(anos)	q(TR) (m ³ /s)
2	866	2	3517
5	1156	5	6241
10	1347	10	8045
20	4914	20	9058
25	1590	25	10324
50	1769	50	12014

Anexo 9: Caudais estimados utilizados para construir a curva de frequência referente as estações de Dombe e Goonda.

Estação de Goonda					
Caudal		Parâmetros			
Observado	Simulado	$(Si-Oi)^2$	$ Si- Omean $	$ Oi- Omean $	$(X+Y)^2$
9234	9279	2013	5628	5583	125705258
9234	7658	2483673	4008	5583	91987399
9234	6685	6497466	3034	5583	74269243
7890	5975	3666578	2325	4240	43098467
6348	5409	880973	1759	2697	19855686
5017	4932	7262	1281	1367	7012715
4518	4515	12	864	868	3001350
3443	4140	486745	490	208	486745
2363	3797	2058573	147	1288	2058573
2353	3477	1264794	173	1298	2162653
2206	3174	936654	476	1444	3686468
2128	2883	570129	767	1522	5242074
2103	2600	246552	1051	1547	6749014
1982	2320	113845	1330	1668	8989308
1906	2040	17857	1611	1744	11254666
1549	1754	42287	1896	2102	15980720
1376	1457	6626	2193	2274	19952542
1123	1140	323	2510	2528	25375942
1038	788	62605	2862	2612	29965085
892	369	272559	3281	2759	36473857
720	204	266167	3446	2930	40652358
		19883693			573960122

Anexo 10: Cálculo de parâmetros estatísticos para obtenção de RMSE e (d) para validação do Ajuste entre os caudais na Estação de Goonda.

Estação de Dombe					
Caudal		Parâmetros			
Observado	Simulado	$(Si-Oi)^2$	$ Si-Omean $	$ Oi-Omean $	$(X+Y)^2$
9794	5061	22402365	3755	8488	149912237
1512	3980	6092640	2674	206	8291591
1364	3331	3868649	2025	58	4336694
1267	2857	2527933	1551	39	2527885
1254	2479	1501732	1173	52	1501695
1205	2161	913630,1	855	101	913601
1157	1883	526929,7	577	149	526908
1117	1633	266731	327	189	266715
1082	1404	103578,8	98	224	103569
1073	1191	13758,57	115	233	121186
990	988	2,259429	318	316	401726
822	794	776,6534	512	484	991943
818	605	45483,65	701	488	1413208
804	418	148712,2	888	502	1931286
737	231	255333,1	1075	569	2702473
724	41	466619	1265	582	3411299
509	157	124160,8	1149	797	3785436
499	369	16940,72	937	807	3044228
325	604	77379,73	702	981	2832028
261	883	386829,7	423	1045	2155196
111	1266	1332768	40	1195	1524878
Soma		41072952			192695783

Anexo 11: Cálculo de parâmetros estatísticos para obtenção de RMSE e d para validação do Ajuste entre os caudais na Estação de Dombe.

Classe de severidade	Critério
Classe 1	Evento de grande escala: danos significativos em infra-estruturas ou agricultura, fatalidades registadas, com tempo de retorno de 10 - 20 anos
Classe 1,5	Evento de escala muito grande: tempo de retorno > 20 e < 100 anos, afectou extensas áreas (> 5000km ²), evento intermedio mas nao classificado cmo extremo.

classe 2	Evento extremo: tempo de retorno > 100, raro e associado a impacto excepcional
----------	--

Anexo 12: Classificação da severidade de eventos de inundações baseada nos critérios de observacao da DFO.

Fonte: DFO (2018).

Valores do raster	Classe	Descrição
1	Corpos de Água	Rios, lagoas, lagos, oceanos, planícies de sal inundadas.
2	Vegetação densa	Vegetação arborizada, aglomerados densos em savanas, plantações densas, pântanos ou manguezais.
4	Vegetação inundada	Áreas de vegetação com presença clara de água durante boa parte do ano, geralmente zonas sazonalmente inundadas. Exemplo: Arrozais, outras culturas irrigada.
5	Culturas/áreas agrícolas	Culturas agrícolas cultivadas pelo ser humano. Exemplo: Milho, trigo, soja, terrenos em pousio.
7	Áreas urbanas	Áreas com estruturas feitas pelo homem. Exemplo: Casa, cidades, vilas densas, estradas pavimentadas, parques de estacionamento, edifícios.
8	Solo exposto	Áreas com rocha ou solo exposto, vegetação muito esparsa ou inexistente. Exemplo: desertos, dunas de areia, leitos de lago secos, minas, planícies salinas.
11	Pastagem	Áreas cobertas por gramíneas com pouca ou nenhuma vegetação alta, sem uso agrícola evidente. Exemplos: prados, savanas abertas, campos naturais, gramados, parques, pastagens.

Anexo 13:Sistema de classificação do Uso e Cobertura do Solo da FAO.

Fonte: (ESRI, 2024).

Distritos	Área total (ha)	Cobertura espacial da inundações a nível dos distritos da Bacia de Búzi		
		Nível 1 (ha)	Nível 2 (ha)	Nível 3 (ha)
Manica	135776	8152	11745	15469
Macate	177895	5742	9075	15656
Sussundenga	706926	37499	63591	94442
Búzi	273393	33740	48632	58345
Chibabava	351535	23190	38532	52961
Mossurize	494922	19110	27547	34600
Machaze	236271	7302	13164	19356
total		134735	212286	290829

Anexo 14: Análise espacial das inundações na Bacia de Búzi

Capacidade Produtiva da Bacia Hidrográfica do Rio Búzi		
Distritos	Área (ha)	Percentagem
Machaze	1 489	2,7%
Búzi	7 392	13,6%
Mossurize	10 823	19,2%
Sussundenga	17 969	33,1%
Chibabava	1 038	1,9%
vanduzi	5 126	9,4%
Manica	4 400	8,1%
Macate	5 536	10,2%
Chimoio	495	0,9%
Gondola	58	0,1%
Total	54.326,00	100%

Anexo 15: Levantamento do potencial agrícola na Bacia Hidrográfica do Rio Búzi.