UNIVERSIDADE COMPLUTENSE DE MADRID
UNIVERSIDADE POLITÉCNICA DE MADRID





MESTRADO UNIVERSITÁRIO EM GESTÃO DE DESASTRES

TRABALHO FINAL DE MESTRADO
ANO LETIVO 2025–2026

Gestão da informação e otimização do pré-posicionamento de ajuda humanitária em situações de desastre em Moçambique

Antonio Sevilla Sastre

Fevereiro de 2026

Orientadora: Begoña Vitoriano Villanueva, Faculdade de Ciências Matemáticas da Universidade Complutense

Entidade colaboradora: Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres de Moçambique

Orientador da entidade: Gilberto Augusto De Castro Miguel, Delegado Provincial de Inhambane

A todos aqueles que tornaram possível este trabalho sobre logística humanitária com o seu apoio logístico e a sua humanidade.

Ao povo moçambicano, que está a construir um futuro melhor. A luta continua.

Resumo

Moçambique sofre todos os anos inúmeras catástrofes naturais, como ciclones e inundações, cujos impactos são agravados pela vulnerabilidade social e pela fragilidade das suas infraestruturas. A eficácia da tomada de decisões na gestão destas emergências depende da qualidade da informação disponível, destacando-se o papel dos dados históricos e das fontes secundárias. Em particular, os impactos das catástrofes podem ser mitigados através de políticas fundamentadas no posicionamento estratégico prévio da ajuda humanitária para uma resposta imediata.

Para abordar esta problemática, no presente trabalho é criada uma base de dados completa e fiável a nível nacional, consolidando informação proveniente de diferentes fontes. É ainda analisada a geografia e as capacidades logísticas da província de Inhambane. Por fim, é utilizado um modelo de otimização para a localização eficiente de armazéns humanitários.

Palavras-chave: *Gestão de dados, Logística humanitária, Sistemas de apoio à tomada de decisões. Problema de localização de instalações.*

Abstract

Mozambique experiences numerous natural disasters each year, including cyclones and floods, whose impacts are exacerbated by social vulnerability and fragile infrastructure. Effective decision-making in emergency management relies on the quality of available information, highlighting the role of historical data and secondary sources. In particular, the effects of disasters can be mitigated through informed policies for the strategic prepositioning of humanitarian aid, enabling an immediate response.

To address this challenge, this study develops a comprehensive and reliable nationwide database by consolidating information from multiple sources. The geography and logistical capacities of Inhambane province are also examined. Finally, an optimization model is applied to determine the most efficient locations for humanitarian warehouses.

Keywords: *Data Management, Humanitarian Logistics, Decision Support Systems, Facility Location Problem.*

Conteúdo

1 Introdução 1
1.1 Vulnerabilidade em Moçambique 1
1.2 Gestão de desastres em Moçambique 3
1.3 Gestão da informação em Moçambique 5
1.4 Objetivos do estágio e do trabalho 7

2 Construção de uma base de dados nacional de catástrofes históricas 8
2.1 Cruzamento de dados 9
2.2 Agregação de eventos 11

3 Metodologia para a otimização do pré-posicionamento da ajuda humanitária 14
3.1 Características e importância do pré-posicionamento informado 14
3.2 Especificações do problema de localização e pré-posicionamento 15
3.3 Modelo de localização e pré-posicionamento 17
3.4 Metodologia de geração de cenários a partir de informação histórica 20

4 Pré-posicionamento de ajuda humanitária em Inhambane, Moçambique 23
4.1 Informação logística 23
4.2 Geração de cenários de catástrofe 32
4.3 Resultados da otimização 36

5 Conclusões 43
5.1 Sobre a gestão da informação 43
5.2 Sobre o pré-posicionamento da ajuda humanitária 43
5.3 Implementação e trabalhos futuros 44

Bibliografia 45

A1 Extratos visuais da base de dados nacional de catástrofes históricas 50

A2 Formulação do modelo de localização e pré-posicionamento 53

A3 Formulação do modelo de geração de cenários de procura global .. 56

Lista de Figuras

1.1 Localização de Moçambique na África Austral. Fonte: TUBS, 2011. 2
1.2 Inundação na província de Gaza, 19 de janeiro de 2026. Afetados nos telhados e em canoas. Fonte: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Coordenação de Assuntos Humanitários (OCHA), 2026. . 3
1.3 Ciclo de gestão de desastres. Fonte: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), s.d. .. 4
1.4 Exemplos de atividades do INGD. Fonte: elaboração própria..... 5

3.1 Árvore de cenários independente por etapas. Fonte: Rodríguez-Martínez, 2021. 16
3.2 Diagrama de fluxo do processamento da informação recolhida para a otimização do pré-posicionamento. Fonte: elaboração própria. 19
3.3 Representação dos *clusters* formados pelo algoritmo da terceira fase e do representante de cada um deles. Fonte: Rodríguez-Martínez, 2021. . 22

4.1 Localização de Inhambane em Moçambique. Fonte: NordNordWest, 2018. 24
4.2 Mapa de estradas, sedes e limites distritais da província de Inhambane, processado no QGIS (QGIS Development Team, 2025) para gerar o grafo de ligações. Fontes: Humanitarian Data Exchange, 2025b, elaboração própria. 25
4.3 Destruição de um troço da estrada nacional N-1 na zona de Manhiça, a 20 de janeiro de 2026. Isso implicou o corte das ligações entre as províncias de Gaza e Inhambane com Maputo até 28 de janeiro de 2026. Fonte: *Administração Nacional de Estradas*. 27
4.4 Secção de mapa de estradas e cursos de água, processada no QGIS (QGIS Development Team, 2025) para estudar as intersecções entre ambos. Fontes: Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.d. Humanitarian Data Exchange, 2025a, elaboração própria. 28
4.5 Tipos de armazéns de primeira resposta na província de Inhambane. Fonte: elaboração própria. 31

4.6 Alguns dos bens armazenados na cidade de Inhambane. Fonte: elaboração própria. 32
4.7 Comparação entre a função de distribuição empírica e a função de distribuição dos cenários de procura global. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 33
4.8 Atribuição difusa dos casos aos cenários. Os registos históricos são representados pelas barras verticais e o grau de pertença a cada conjunto difuso pelo eixo y. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 34
4.9 Dendrograma da geração de cenários geográficos, para a segunda classe de magnitude das inundações. Casos no eixo x e distância entre eles no eixo y. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 35
4.10 Evolução do número de cenários obtidos (eixo x) em função da distância mínima entre eles (eixo y). Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021. 35
4.11 Aproximação da fronteira de Pareto com os dados estimados e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas e Florios, 2013, elaboração própria. 38
4.12 Política de planeamento sugerida pelo modelo com os dados estimados e 30 cenários de emergência, para qualquer ponto da Fronteira de Pareto. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria. 39
4.13 Política de planeamento sugerida pelo modelo com os dados estimados, orçamento anual de 80 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria. 40
4.14 Aproximação da fronteira de Pareto com os dados estimados, orçamento anual de 70 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas e Florios, 2013, elaboração própria. 41
4.15 Políticas de planeamento sugeridas pelo modelo com os dados estimados, orçamento anual de 70 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência, ao longo da fronteira de Pareto. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria. 42

A1.1 Primeiras variáveis de algumas entradas do cruzamento de dados *Cruzamento_simplificado*, incluindo vários tipos de eventos e todas as fontes. Fontes: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboração própria. 51
A1.2 Todas as variáveis das primeiras entradas da agregação de dados. Fontes: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboração própria. 52

1. Introdução

No presente capítulo, descrevem-se as características dos riscos hidrometeorológicos e a vulnerabilidade específica do território, bem como as atividades de gestão e resposta a catástrofes. Justifica-se a importância da gestão da informação nestas tarefas e apresentam-se os objetivos do estudo.

1.1. Vulnerabilidade em Moçambique

Um desastre é uma grave perturbação do funcionamento de uma comunidade ou sociedade que causa perdas humanas, materiais, económicas ou ambientais que excedem a capacidade da comunidade afetada para as enfrentar com os seus próprios recursos (Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2015).

De acordo com o *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* (entrevista pessoal, 3 de setembro de 2025), a República de Moçambique e, em particular, a província de Inhambane, apresentam um perfil de risco de catástrofes com múltiplas ameaças. A sua localização na faixa costeira do Oceano Índico e a sua topografia predominantemente baixa tornam o território propenso a ciclones tropicais, precipitações extremas e às consequentes inundações fluviais, especialmente nos distritos costeiros e em áreas próximas de bacias hidrográficas. As secas constituem, além disso, um perigo de evolução lenta que, devido à capacidade limitada de armazenamento de água e à elevada dependência da agricultura, compromete frequentemente a segurança alimentar.

É importante salientar que as alterações climáticas modificam a frequência e a intensidade dos fenómenos e, consequentemente, os riscos hidrometeorológicos existentes. O aumento observado na variabilidade das precipitações aumenta enormemente a probabilidade de inundações e de períodos prolongados de seca (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2022, Firmino, 2025).

Alguns desastres naturais, ocorridos especialmente nos últimos anos, marcaram profundamente o desenvolvimento social e económico do território. Entre eles destacam-



Figura 1.1: Localização de Moçambique na África Austral. Fonte: TUBS, 2011.

se os ciclones *Eline* (2000), *Funso* (2012), *Dineo* (2017), *Idai* (2019) ou *Kenneth* (2019), que afetaram milhões de pessoas, provocaram enormes perdas materiais e fizeram colapsar as infraestruturas em várias províncias. As últimas inundações, à data de redação deste trabalho, ocorridas em janeiro de 2026, deixaram pelo menos uma centena de mortos e mais de meio milhão de pessoas afetadas (Nações Unidas. Notícias ONU, 2026, Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Coordenação de Assuntos Humanitários (OCHA), 2026).

Do ponto de vista da exposição, uma percentagem enorme da população reside em assentamentos informais dispersos, por vezes localizados em zonas sujeitas a inundações. Segundo a *Administração Nacional de Estradas* (entrevista pessoal, 24 de setembro de 2025), a rede de transportes é pouco densa e é constituída principalmente por vias secundárias não pavimentadas, cuja funcionalidade pode ficar gravemente comprometida durante episódios de chuva intensa. Esta situação pode gerar estrangulamentos logísticos e o isolamento temporário de algumas comunidades. A fragilidade das ligações condiciona tanto a evacuação preventiva como a distribuição de ajuda humanitária durante a resposta a catástrofes.

Em termos de vulnerabilidade estrutural, o território apresenta défices significativos em infraestruturas críticas, tais como sistemas de abastecimento de água, centros de saúde ou armazéns logísticos resistentes a eventos extremos. Grande parte da população moçambicana depende diretamente da agricultura de subsistência e do acesso aos recursos naturais locais para a sua subsistência. Esta dependência faz com que



Figura 1.2: Inundação na província de Gaza, 19 de janeiro de 2026. Afetados nos telhados e em canoas. Fonte: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Coordenação de Assuntos Humanitários (OCHA), 2026.

as perdas causadas por catástrofes tenham um efeito imediato sobre a segurança alimentar e a estabilidade económica dos cidadãos.

A capacidade operacional da resposta revela-se muito heterogénea e limitada por restrições orçamentais e pela dependência do apoio externo. Embora existam mecanismos de alerta precoce a nível nacional (Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2022), o desempenho da resposta é condicionado pela disponibilidade de recursos e pela acessibilidade a determinadas populações. Consequentemente, os tempos de resposta tendem a aumentar nas zonas rurais, com consequências humanitárias significativas.

A redução dos tempos de entrega nas primeiras fases da emergência é fundamental para mitigar as perdas humanas e evitar a deterioração das condições de vida da população afetada. Este contexto justifica o uso de estratégias de preparação baseadas no pré-posicionamento de bens.

1.2. Gestão de desastres em Moçambique

Os nossos gritos de «Porquê agora?» ou «Porquê nós?» talvez nunca obtenham uma resposta satisfatória. Mas se olharmos para além do significado, descobriremos uma pergunta que tem profundas implicações morais: como, perante a catástrofe, podemos ajudar-nos a nós próprios e ajudar aqueles que nos rodeiam a sobreviver e a viver melhor? [...] A prevenção é possível porque as catástrofes não são inevitáveis: não

podemos evitar os terramotos ou as tempestades, mas podemos evitar que se transformem em catástrofes. [...] O risco não reside no fenómeno natural, mas nas decisões humanas que antecedem o evento; por isso, a prevenção é uma questão de planeamento e de política pública (Jones, 2021).

O ciclo dos desastres estrutura-se habitualmente em quatro fases inter-relacionadas: prevenção/atenuação, preparação, resposta e recuperação. A prevenção e a atenuação abrangem as medidas destinadas a reduzir a exposição e a vulnerabilidade face às ameaças, reduzindo a probabilidade de danos graves. A preparação abrange todas as ações desenvolvidas antes do impacto do fenómeno, destinadas a facilitar uma resposta rápida, coordenada e eficaz. Em contextos de elevada vulnerabilidade, como é o caso de Moçambique, a preparação assume um papel especialmente relevante. A resposta é ativada imediatamente após o impacto e tem como objetivo principal salvar vidas e atender às necessidades básicas da população afetada em condições de elevada incerteza. Por fim, a recuperação inclui os processos de reabilitação e reconstrução, orientados para restabelecer as condições de vida e, na medida do possível, reduzir a vulnerabilidade futura através de uma abordagem de reconstrução resiliente.



Figura 1.3: Ciclo de gestão de desastres. Fonte: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), s.d.

Em Moçambique, a responsabilidade institucional pela gestão do risco de catástrofes recai sobre o *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres*, organismo encarregado de coordenar as atividades de prevenção, preparação e resposta a nível nacional, provincial e distrital (Comissão Interministerial da Reforma da Administração Pública, 2021).

O INGD desenvolve ações de preparação adaptadas ao seu contexto, num ambiente marcado por ameaças meteorológicas e hídricas recorrentes, uma elevada dispersão populacional e limitações estruturais nas infraestruturas, em particular nos transportes. Estas atividades incluem a formação comunitária em redução de riscos, a adaptação de infraestruturas críticas, a elaboração de planos de evacuação ou a coordenação com autoridades locais e organizações humanitárias. Estas ações visam reforçar as capacidades locais e reduzir a dependência da ajuda externa durante as primeiras horas após um desastre.



(a) Formação comunitária numa escola da província de Inhambane (1 de outubro de 2025).



(b) Simulação de acidente aéreo no Aeroporto de Inhambane (16 de outubro de 2025).

Figura 1.4: Exemplos de atividades do INGD. Fonte: elaboração própria.

Um elemento central da preparação na província é o Plano Provincial de Contingência para a época das chuvas e dos ciclones (Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2024), que é atualizado periodicamente e define os cenários de risco mais prováveis associados a ciclones tropicais, inundações e secas. Esse plano estabelece as funções e responsabilidades das diferentes instituições envolvidas, os mecanismos de ativação da resposta e as necessidades estimadas de abastecimento para diferentes níveis de impacto.

1.3. Gestão da informação em Moçambique

O que não se mede, não se pode gerir (Drucker, 1954).

A gestão da informação constitui um elemento transversal a todas as fases do ciclo de gestão de desastres. A capacidade de antecipar cenários, planear intervenções e coordenar a resposta depende, em grande medida, da disponibilidade de informação fiável, atualizada e acessível, tanto sobre os riscos existentes como sobre os impactos de eventos passados. Isto revela-se especialmente relevante em contextos de elevada vulnerabilidade e limitação de recursos, como é o caso de Moçambique.

Nas fases de prevenção e preparação, a informação histórica relativa à ocorrência de catástrofes naturais, à sua localização e às suas consequências permite identificar padrões recorrentes de risco e áreas especialmente expostas. Esta informação é fundamental para a elaboração de planos de contingência, a priorização territorial de recursos e a conceção de estratégias orientadas para a redução da vulnerabilidade. Durante a resposta, a informação operacional é essencial para estimar as necessidades, atribuir recursos e reduzir os prazos de entrega da ajuda humanitária em condições de elevada incerteza. Por fim, na fase de recuperação, os dados recolhidos facilitam a avaliação dos danos e das perdas, bem como a conceção de estratégias de reconstrução resilientes.

Em Moçambique, a informação relacionada com catástrofes naturais é gerada e gerida a partir de múltiplas fontes, tanto nacionais como internacionais. O *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* atua como organismo coordenador, recolhendo dados provenientes de administrações locais, serviços meteorológicos e organizações humanitárias. Paralelamente, organismos internacionais, agências das Nações Unidas e organizações não governamentais geram e mantêm bases de dados que recolhem registos históricos de eventos, impactos e necessidades humanitárias, constituindo uma fonte relevante de informação secundária.

No entanto, a gestão destes dados apresenta desafios importantes. A dispersão das fontes, a heterogeneidade dos formatos, a falta de padronização das variáveis e a existência de lacunas temporais ou geográficas dificultam a consolidação de uma visão integral do risco. Em muitos casos, os registos históricos estão incompletos, apresentam inconsistências ou não permitem uma comparação direta entre eventos, o que limita a sua utilidade para a análise quantitativa e a tomada de decisões informadas.

Estas limitações são agravadas por restrições técnicas e institucionais, tais como a escassez de recursos humanos especializados, a digitalização limitada dos sistemas de informação e as dificuldades de acesso aos dados em zonas rurais ou afetadas por emergências. Consequentemente, as decisões estratégicas tendem a basear-se em informação parcial, aumentando a incerteza e reduzindo a eficácia das intervenções humanitárias.

Neste cenário, o reforço da gestão da informação é um fator-chave para melhorar o planeamento e a eficácia da resposta a catástrofes.

1.4. Objetivos do estágio e do trabalho

O presente trabalho pretende contribuir para a redução do impacto humanitário das catástrofes naturais em Moçambique através da gestão da informação e da utilização de ferramentas matemáticas de apoio à tomada de decisões.

O primeiro objetivo do trabalho é a consolidação de uma base de dados completa e fiável sobre desastres históricos a nível nacional, construída a partir de fontes secundárias comprovadas. Isto permitirá reduzir a incerteza na gestão, facilitar a análise de cenários e conceber políticas fundamentadas para o pré-posicionamento estratégico da ajuda humanitária.

O segundo objetivo é apoiar a tomada de decisões sobre a localização estratégica de infraestruturas de armazenamento de ajuda humanitária em Inhambane, utilizando um modelo de otimização. Isto facilitará uma primeira resposta rápida, eficaz e economicamente sustentável perante diferentes situações de catástrofe.

O trabalho desenvolvido insere-se na abordagem internacional de redução do risco de catástrofes promovida pelas Nações Unidas, em particular no Quadro de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015–2030 (Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2015). Além disso, está alinhado com a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável, especialmente com as metas orientadas para a construção de comunidades resilientes e para o reforço da ação face às alterações climáticas (Nações Unidas. Departamento de Assuntos Económicos e Sociais (DESA), 2015).

Para a obtenção de informação fiável, realizou-se um estágio de três meses no *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres*, no âmbito do Programa de Voluntariado Internacional das Universidades Públicas da Comunidade de Madrid. O trabalho no terreno permitiu aceder a fontes primárias não disponíveis através de repositórios públicos e verificar a consistência dos dados secundários existentes. Além disso, o contacto direto com o pessoal técnico do INGD e de outras instituições facilitou enormemente a compreensão do contexto operacional e das limitações práticas da gestão da informação, o que se revelou essencial para a correta interpretação e validação dos dados recolhidos.

No capítulo [2] é descrito o processamento e a unificação dos dados históricos de catástrofes a nível nacional. O capítulo [3] expõe a metodologia utilizada para a otimização do pré-posicionamento de bens humanitários, enquanto no [4] se detalha a aplicação dessa metodologia à província de Inhambane. No capítulo [5] apresentam-se as conclusões do projeto.

2. Construção de uma base de dados nacional de catástrofes históricas

Neste capítulo, serão detalhados os esforços realizados para melhorar a acessibilidade e a qualidade da informação histórica sobre catástrofes em Moçambique.

Conforme referido anteriormente, a informação disponível encontra-se dispersa por diferentes repositórios, com critérios de registo heterogéneos e níveis de pormenor variáveis. Isto dificulta a sua utilização sistemática para fins analíticos e operacionais à escala nacional.

Trabalhos anteriores destacaram esta problemática e deram contributos relevantes no tratamento de dados históricos sobre catástrofes. Em particular, os esforços desenvolvidos por Salgado Lora, 2017 e por Rodríguez-Martínez, 2021 evidenciaram a complexidade inerente à consolidação de dados provenientes de fontes diversas, bem como as limitações existentes em termos de coerência, exaustividade e comparabilidade dos registos. O presente trabalho baseia-se nessas contribuições, reconhecendo o seu valor como ponto de partida, e procura avançar na integração e atualização da informação disponível.

A construção de uma base de dados nacional de catástrofes históricas exigiu um processo exaustivo de recolha, revisão e tratamento de informação proveniente de diversas fontes secundárias. Mais concretamente, foram utilizadas como fontes a base de dados utilizada no estudo de caso desenvolvido por Rodríguez-Martínez, 2021 — que, por sua vez, se baseia no trabalho de Salgado Lora, 2017 —, bem como registos do Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, da base de dados *DesInventar* (Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2025) e da *Emergency Events Database* (The International Disaster Database, 2025), tendo-se considerado, em todos os casos, as suas versões mais recentes. A base de dados resultante deste trabalho encontra-se publicada no repositório UCM-HUMLOG Research Group, 2026.

2.1. Cruzamento de dados

Optou-se por gerar um primeiro cruzamento de dados, registado como *Cruzamento*. Este incluirá, em cada entrada, todas as variáveis próprias de cada uma das fontes. Após testar outras metodologias, optou-se por esta, uma vez que permite conservar toda a informação possível e facilitar a rastreabilidade, a depuração e a deteção de inconsistências entre fontes.

A base de dados *DesInventar* é a mais completa em termos de número de registos, contando com 9 083 à data de publicação deste trabalho. A maioria dos eventos encontra-se desagregada em diferentes registos, em função da data e da localização. Devido a estas características, foi utilizada como ponto de partida para o *Cruzamento*.

Por seu lado, a *Emergency Events Database* contava com 164 registos de eventos, com os seus impactos agregados. Para cruzar os dados e incorporá-los no *Cruzamento*, se um evento da *Emergency Events Database* estiver associado a um registo do *DesInventar*, é copiado para esse registo, respeitando o valor de todas as suas variáveis próprias. Note-se que um evento da *Emergency Events Database* pode estar associado a várias entradas detalhadas do *DesInventar* e ser copiado para todas elas. Se não estiver associado a nenhuma entrada existente, é adicionado como uma nova entrada. O mesmo procedimento é seguido com as outras duas fontes.

A base de dados desenvolvida por Rodríguez-Martínez, 2021 e Salgado Lora, 2017 consistia num cruzamento de informações entre o *DesInventar* e a *Emergency Events Database*. Foi utilizada como referência metodológica e mantida no resultado final, mas, uma vez que os registos de ambas as bases de dados foram substancialmente atualizados, esse trabalho foi realizado novamente.

A base de dados do INGD é uma fonte fundamental para obter registos dos próprios técnicos que elaboram e utilizam informação sobre emergências. Conta com 3 680 registos, com diferentes níveis de agregação em termos temporais e geográficos. É a mais rica em termos de variáveis por cada registo, seguindo as normas internacionais ao detalhar os tipos de impactos e os perfis de vulnerabilidade das pessoas afetadas. Apenas dispõe de dados a partir de 2016, mas, a partir dessa data, é, de longe, a mais exaustiva e completa.

Dado o caráter heterogéneo das fontes, a construção do *Cruzamento* não se limitou a uma simples agregação de registos. Foi necessário realizar um trabalho sistemático de cruzamento, comparação e filtragem da informação, abordando inconsistências na

denominação dos eventos, diferenças nas escalas espaciais e temporais, e a ausência ou duplicação de determinados campos.

Um dos principais desafios durante o processo foi a identificação e a correspondência dos eventos registados nas diferentes fontes. A imprecisão nas datas de ocorrência, a heterogeneidade nas denominações geográficas e a frequente ausência de nomes ou identificadores únicos dos eventos dificultam determinar de se certos registos provenientes de fontes distintas se referem a um mesmo desastre ou a eventos diferentes.

Para dar resposta a esta problemática, foi levado a cabo um processo cuidadoso de comparação e verificação, combinando evidências temporais, espaciais e descritivas, tendo-se procurado atribuir um identificador único a cada evento consolidado, com o objetivo de melhorar a rastreabilidade, a coerência e a reutilização futura da base de dados. Este processo implicou a definição de um conjunto comum de variáveis, a harmonização de critérios e a validação cruzada dos dados sempre que possível.

Utilizou-se o Excel por ser o formato mais adequado para o trabalho e a partilha de informação num contexto interdisciplinar. As metodologias empregues incluem o uso de filtros por campos, funções de pesquisa e correspondência, tabelas dinâmicas, formatação condicional, transformação e concatenação de valores, bem como o Power Query.

As ferramentas descritas revelam-se muito úteis, mas não suficientes. Assim, a validação da informação baseou-se no cruzamento com fontes adicionais e na comunicação direta com pessoal especializado, o que permitiu contextualizar e refinar os dados disponíveis. Inevitavelmente, parte do processo exigiu uma revisão manual, utilizando previamente filtros para delimitar a informação relevante e procedendo, posteriormente, a uma análise detalhada dos casos específicos. Neste trabalho, aplicaram-se de forma transversal os conhecimentos adquiridos ao longo do curso, integrando competências analíticas e técnicas, o que permitiu uma abordagem coerente.

Entre os campos que foram criados para homogeneizar a informação encontram-se `Antsev_índice` e `Antsev_índice_completo`. O primeiro é um número inteiro e o segundo um texto que contém informação de todas as fontes registadas para cada entrada. A criação de índices únicos é fundamental num processo de cruzamento de dados, uma vez que permite identificar de forma inequívoca cada registo e garantir a correspondência correta entre conjuntos de informação provenientes de diferentes fontes. Estes índices reduzem ambiguidades, evitam duplicações e erros de emparelhamento e facilitam tanto a automatização das operações de cruzamento como a rastreabilidade e a validação posterior dos resultados.

Foi também introduzido o `Antsev_data`, que inclui a data mais precisa de cada entrada, comparando todas as fontes, a fim de garantir a exatidão temporal dos registos e facilitar a análise cronológica dos dados.

São incorporadas duas colunas adicionais, `Antsev_incongruências-Des-y-Emdat` e `Antsev_incongruências-Des-y-Ingd`, destinadas a registar possíveis incongruências entre fontes e a documentar o processo de cruzamento de dados.

O resultado deste fluxo de trabalho é o *Cruzamento*, um conjunto de 13 124 registos de eventos com identificador único, com o máximo nível de desagregação temporal e espacial que o cruzamento de fontes permitiu e que conserva a informação de todos os registos originais sem alterações. Além disso, as datas são atualizadas com a maior precisão possível e são assinaladas as possíveis inconsistências entre registos.

Posteriormente, é efetuada uma seleção das variáveis mais relevantes do *Cruzamento*, dando origem ao *Cruzamento_simplificado*. Este reduz a complexidade do conjunto de dados original, tornando mais acessível a interpretação dos resultados sem perder a essência da informação obtida no *Cruzamento*.

Exemplos de alguns registos e de alguns campos do *Cruzamento_simplificado* encontram-se no apêndice [A1].

2.2. Agregação de eventos

Foi realizado um segundo nível de tratamento dos dados, centrado exclusivamente nos eventos de maior relevância para Moçambique: inundações e ciclones.

A decisão de se centrar exclusivamente em ciclones e inundações baseia-se, em primeiro lugar, na maior disponibilidade de dados históricos associados a este tipo de eventos. Em segundo lugar, trata-se dos riscos naturais que causam maior impacto humanitário e perturbação dos sistemas críticos. Por fim, ambos os fenómenos evoluem rapidamente, o que exige respostas imediatas e coordenadas, ao contrário de outros riscos, como as secas, cujo desenvolvimento é progressivo e cuja gestão envolve dinâmicas operacionais distintas. Isto será especialmente relevante para o capítulo [4], no qual se estuda o pré-posicionamento da ajuda humanitária como ferramenta para fazer face a este tipo de eventos repentinos.

Este processamento analítico de dados, cujo resultado se encontra na folha chamada *Cheias_e_ciclones*, consiste em consolidar múltiplos registos associados a um mesmo evento numa única entrada, de modo a que cada linha represente um evento individual com os seus impactos agregados.

Para realizar esta agregação, seguiu-se uma metodologia semelhante à do cruzamento de dados. Foram definidos critérios de correspondência com base na proximidade temporal e espacial dos registos, bem como na semelhança das suas descrições e características. Utilizaram-se as datas mais precisas disponíveis (`Antsev_data`) e a localização geográfica mais detalhada de cada evento, cruzando sempre a informação entre as diferentes fontes para garantir a coerência e reduzir duplicações.

Em primeiro lugar, os eventos foram agrupados de forma preliminar através da utilização de filtros, funções de pesquisa, restrições condicionais e estratégias de análise adaptadas às características dos registos. Esta fase exigiu um grau significativo de engenho e critério analítico, dada a complexidade e a dispersão da informação.

Uma vez realizados estos agrupamentos iniciais, procedeu-se a uma verificação manual para as corroborar, com base em conhecimentos técnicos sobre catástrofes e padrões históricos de ocorrência. Esta análise permitiu validar a correspondência entre os registos e garantir que cada grupo refletisse adequadamente um evento individual.

Além disso, estes eventos foram estudados para incluir outras informações relevantes:

- Foi realizada uma verificação exaustiva de todas as fontes utilizadas, com o objetivo de atribuir a cada evento a categoria correspondente de ciclone ou inundação. Dada a natureza difusa de alguns registos e a heterogeneidade na classificação dos desastres, este passo revelou-se fundamental para garantir a coerência do conjunto de dados.
- Unificaram-se os nomes das localizações ao nível dos distritos, homogeneizando a informação geográfica e facilitando a análise espacial dos eventos.
- Foi estabelecida uma associação temporal dos registos a nível trimestral, o que permitiu definir um quadro de referência comum para todos os eventos.
- Foi realizada uma agregação cuidadosa do número de pessoas afetadas, considerando os dados provenientes de todas as fontes e resolvendo as inconsistências existentes para garantir que os valores finais reflitam a verdadeira magnitude dos impactos.

Grande parte destes procedimentos encontra-se documentada de forma preliminar nas folhas de Excel denominadas `Tratamento`, `Listas` e `Map`, que recolhem os passos e ajustes realizados durante o processo de consolidação e validação dos dados.

O resultado final deste procedimento é *Cheias_e_ciclones*, um conjunto de 1 330 entradas, correspondentes a um único evento de cheia ou ciclone, incluindo as variáveis mais relevantes previamente selecionadas em *Cruzamento_simplificado*. Esta agregação integra informação anteriormente fragmentada ou contraditória proveniente de diferentes fontes. Revela-se especialmente valiosa, uma vez que permite dispor de uma visão unificada e coerente de cada catástrofe, evitando duplicações e reduzindo a dispersão de informação que caracteriza as fontes originais.

As primeiras entradas de *Cheias_e_ciclones* encontram-se no apêndice [A1].

Dispor dos eventos agregados facilita a realização de análises estatísticas mais precisas e comparáveis, o cálculo de indicadores de risco e vulnerabilidade, a identificação de tendências temporais e espaciais, ou a avaliação dos impactos sobre a população e dos danos materiais.

Outro exemplo destas aplicações é a informação relativa às políticas de pré-posicionamento da ajuda humanitária. Uma adaptação formal de *Cheias_e_ciclones*, destinada a aplicar os algoritmos de geração de cenários descritos na secção [3.4], encontra-se em *Para_o_modelo*.

Em termos gerais, a realização do estágio *in situ* permitiu complementar este trabalho através do acesso a informação adicional e do contacto direto com o pessoal técnico envolvido na geração e utilização dos dados. Este contacto contribuiu para melhorar a compreensão dos processos de registo e para identificar limitações práticas que nem sempre são evidentes a partir dos repositórios públicos, reforçando a consistência da base de dados resultante.

Como resultado, obteve-se uma base de dados nacional mais completa e coerente do que qualquer uma das fontes consideradas individualmente, adequada para a análise histórica de catástrofes e para a sua utilização como apoio no desenvolvimento do modelo de pré-posicionamento estratégico da ajuda humanitária. Embora a base de dados não esteja isenta de limitações, constitui uma ferramenta útil para reduzir a incerteza no planeamento e apoiar a tomada de decisões, aspetos que serão desenvolvidos com maior detalhe no Capítulo [4].

3. Metodologia para a otimização do pré-posicionamento da ajuda humanitária

Nas páginas seguintes, justifica-se a relevância do pré-posicionamento de bens de emergência e a utilização de modelos matemáticos de otimização como ferramenta de apoio à tomada de decisões na logística humanitária. Em seguida, apresenta-se a estrutura e as características do problema de localização de armazéns e descreve-se o modelo de otimização utilizado. Por fim, é apresentada uma metodologia para a geração de cenários de catástrofes a partir de dados históricos, necessária para a aplicação do modelo.

3.1. Características e importância do pré-posicionamento informado

O pré-posicionamento estratégico de bens destaca-se como uma ferramenta fundamental da logística humanitária. Consiste no armazenamento antecipado de bens essenciais, tais como alimentos, kits de abrigo, material sanitário ou equipamentos de água e saneamento, em locais estratégicos próximos das zonas de risco, com o objetivo de minimizar os tempos de entrega durante a fase de resposta.

A experiência operacional é extremamente valiosa para avaliar a pertinência de qualquer política de gestão. No entanto, a complexidade e a importância destas tarefas fazem com que o planeamento baseado exclusivamente na experiência não esteja isento de limitações. A modelação matemática permite uma avaliação sistemática das diferentes alternativas de decisão, incorporando de forma estruturada variáveis geográficas, de infraestruturas e de procura em diferentes cenários de emergência, facilitando a tomada de decisões informadas sobre a localização estratégica de armazéns e a atribuição de bens.

A eficácia desta prática depende da disponibilidade de dados precisos sobre a

frequência, intensidade e localização de eventos passados, bem como de informação detalhada sobre a infraestrutura logística, a acessibilidade das vias e a distribuição da população vulnerável.

A disponibilidade de dados precisos e coerentes facilita a antecipação de necessidades, a priorização de recursos e a determinação de localizações estratégicas de forma objetiva e reproduzível, tornando o pré-posicionamento numa aplicação concreta e tangível da gestão da informação.

3.2. Especificações do problema de localização e pré-posicionamento

O principal objetivo é localizar de forma eficiente armazéns permanentes de ajuda humanitária, bem como dimensionar adequadamente as suas capacidades ao longo de um determinado horizonte temporal. São tidos em conta simultaneamente a localização dos armazéns, a atribuição de bens e a utilização eficiente do orçamento disponível, considerando tanto a probabilidade como as consequências de diferentes cenários de catástrofe.

Enquanto na logística empresarial o critério de desempenho é a eficiência económica, na logística humanitária primam a rapidez e a fiabilidade na prestação de assistência aos beneficiários. No entanto, o custo das operações reveste-se de grande importância devido às fortes limitações orçamentais. Assim, procurar-se-á minimizar simultaneamente e tendo em conta todos os cenários:

- A procura não satisfeita de bens humanitários.
- Os custos de abastecimento e transporte dos bens, medidos através dos desvios entre o orçamento planeado e as despesas necessárias.

Esta estrutura equilibrará a eficiência económica com a eficácia humanitária, garantindo que a rede logística possa responder de forma rápida e fiável a catástrofes de diversa magnitude, maximizando a resiliência do território.

O horizonte temporal de planeamento é considerado dividido em etapas (por exemplo, anos), cada uma composta por vários períodos consecutivos (por exemplo, estações do ano), o que permite captar a variabilidade sazonal dos riscos.

Consideram-se decisões estratégicas a localização permanente dos armazéns e a determinação da sua capacidade. Estas decisões são tomadas no primeiro período de cada etapa e mantêm-se ao longo de todo o horizonte de planeamento.

Por seu lado, as decisões táticas dizem respeito aos níveis de stock de bens nos armazéns e são definidas para cada período. Presume-se que o nível de *stock* definido para o período seguinte se repõe independentemente do cenário ocorrido, o que evita um crescimento exponencial da árvore de cenários. Esta aquisição de bens é realizada em qualquer período do horizonte temporal, e de forma conjunta para todos os armazéns, a fim de aumentar a eficiência.

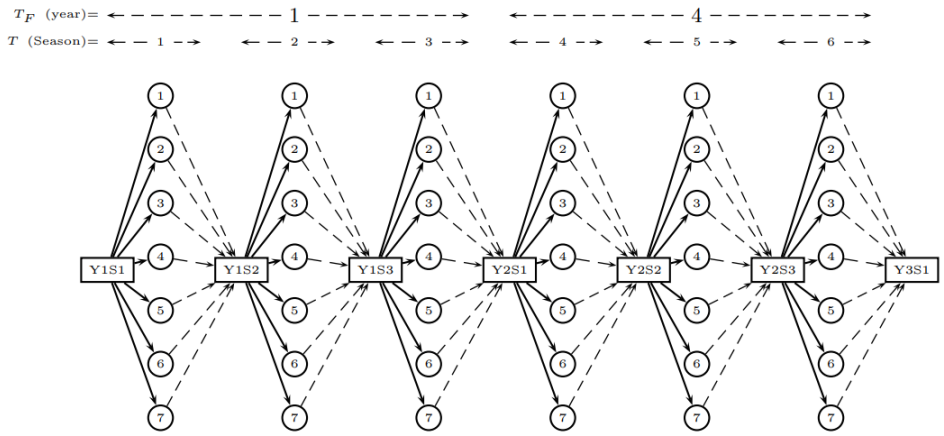


Figura 3.1: Árvore de cenários independente por etapas. Fonte: Rodríguez-Martínez, 2021.

Em cada período, as decisões estratégicas são únicas, enquanto as táticas são ajustadas em função do cenário considerado.

São considerados dois orçamentos distintos, um associado às decisões estratégicas e outro às táticas. A alocação de recursos entre estas categorias constitui, por sua vez, uma decisão que deve otimizar a eficiência da despesa e minimizar os desvios orçamentais, garantindo a disponibilidade de recursos suficientes para responder a eventos de elevada gravidade.

O território é discretizado num conjunto finito de nós que funcionam como localizações candidatas para os armazéns e como pontos de procura em situações de catástrofe.

A rede de transporte, através da qual os bens são distribuídos nos diversos cenários de catástrofe, é representada pelas ligações ou arcos entre esses nós.

Esta simplificação do território como um grafo permite refletir com realismo a logística de distribuição após a ocorrência de uma calamidade.

Além disso, certos nós podem receber recursos diretamente dos fornecedores na fase de resposta. Esta aquisição de emergência é limitada pela capacidade dos armazéns de cada nó, uma vez que toda a ajuda humanitária deve ser recebida e gerida antes de ser entregue aos beneficiários.

Supõe-se um conjunto finito de cenários de catástrofe para cada período, definidos pela sua probabilidade e pelo número de pessoas afetadas. Cada cenário pode afetar de forma diferente os nós de procura e a capacidade dos arcos que os ligam.

Por fim, assume-se que a ocorrência de catástrofes numa etapa não altera a probabilidade dos cenários em etapas posteriores, o que, em termos matemáticos, é conhecido como independência das variáveis aleatórias associadas.

3.3. Modelo de localização e pré-posicionamento

Neste trabalho, adota-se diretamente a modelação proposta por Rodríguez-Martínez, 2021, utilizando a sua abordagem para tratar o problema da localização de infraestruturas destinadas à preparação para catástrofes naturais como um problema de otimização linear estocástica em múltiplas etapas, que integra decisões estratégicas e táticas em condições de incerteza. Esta formulação foi validada e aplicada à província de Nampula, em Moçambique.

A seguir, são apresentados os principais elementos do modelo de otimização, ligeiramente adaptados às necessidades do projeto. Estas adaptações incluem não considerar a distinção entre pessoas afetadas e deslocadas, nem a inflação, bem como eliminar a limitação do número de armazéns que podem ser ativados em cada etapa e da probabilidade de escassez de procura.

Estes elementos principais oferecem uma visão geral da informação necessária para a aplicação do modelo, bem como das decisões que se pretende obter a partir dele.

Conjuntos

- T: períodos consecutivos (por exemplo, estações) ao longo do horizonte temporal.
- E: fases (por exemplo, anos) em que o conjunto de períodos é dividido, de modo que T^e é o conjunto de períodos consecutivos da etapa e (por exemplo, estações de um ano), onde $T^e \cap T^{e'} = \emptyset$ para $e \neq e'$ e $T = \bigcup_{e \in E} T^e$.
- Ω: cenários de emergência considerados.
- $\Omega^t \subseteq \Omega$: cenários que podem ocorrer no período $t \in T$.

- I: nós da rede de transportes.
- $I^\omega \subseteq I$: nós afetados pelo cenário $\omega \in \Omega$.
- $\tilde{I} \subseteq I$: nós capazes de receber ajuda de emergência diretamente dos fornecedores.
- A: ligações de transporte existentes (i, j) na rede de catástrofe, com $i, j \in I$.
- $A^\omega \subseteq A$: ligações de transporte disponíveis, possivelmente com capacidade reduzida, no cenário $\omega \in \Omega$.
- $\Gamma_i^{+\omega}$: conjunto de nós j tais que $(i, j) \in A^\omega$.
- $\Gamma_i^{-\omega}$: conjunto de nós j tais que $(j, i) \in A^\omega$.

Parâmetros

Parâmetros determinísticos

- t^e: primeiro período da etapa $e \in E$.
- G: consumo unitário de capacidade de armazenamento por pacote de ajuda, tanto nos armazéns como no transporte.
- B_i^e: custo fixo de abertura da instalação no nó i no período t^e.
- F_i^e: custo linear associado à dimensão da instalação no nó i em t^e.
- λ_i^m: dimensão mínima permitida para a instalação no nó i.
- λ_i^M: dimensão máxima permitida para a instalação no nó i.
- P: lucro unitário por pacote de ajuda em *stock* no final do horizonte temporal.
- $\bar{C}^e$: orçamento anual disponível na etapa e.
- τ_i: custo de manutenção de uma instalação, como percentagem do valor de construção.
- γ: fração do *stock* reutilizável no período seguinte.
- Q_i^t: custo unitário (por pacote de ajuda) do abastecimento não urgente ao nó i no período t.
- C_i^t: custo unitário (por pacote de ajuda) do abastecimento de emergência ao nó i no período t, com $i \in \tilde{I}$.
- ϕ: proporção da capacidade disponível para gerir o abastecimento de emergência.

Parâmetros estocásticos dependentes do cenário

- W^{ω}: peso ou probabilidade do cenário ω no período t.
- N_a^{ω}: capacidade do elo $a \in A^{\omega}$ no cenário ω.
- C_a^{ω}: custo unitário (por pacote de ajuda) do transporte através do elo a.
- D_i^{ω}: procura de pacotes de ajuda no nó i no cenário ω.

Para a aplicação do modelo à situação da província de Inhambane, os parâmetros descritos serão estimados no capítulo [4]; na secção [4.1] os determinísticos e na secção [4.2] os que dependem dos cenários de catástrofe.

Principais variáveis de decisão

- $\alpha_i^e \in \{0, 1\}$: decisão estratégica, vale 1 se a instalação no nó i estiver operacional em t^e.
- f_i^e: decisão estratégica, capacidade da instalação no nó i disponível em t^e.
- $\hat{s}_i^t$: decisão tática, nível de *stock* no nó i no período t.

As restantes variáveis de decisão, as funções-objetivo, as restrições do modelo e a sua descrição são detalhadas no apêndice [A2].

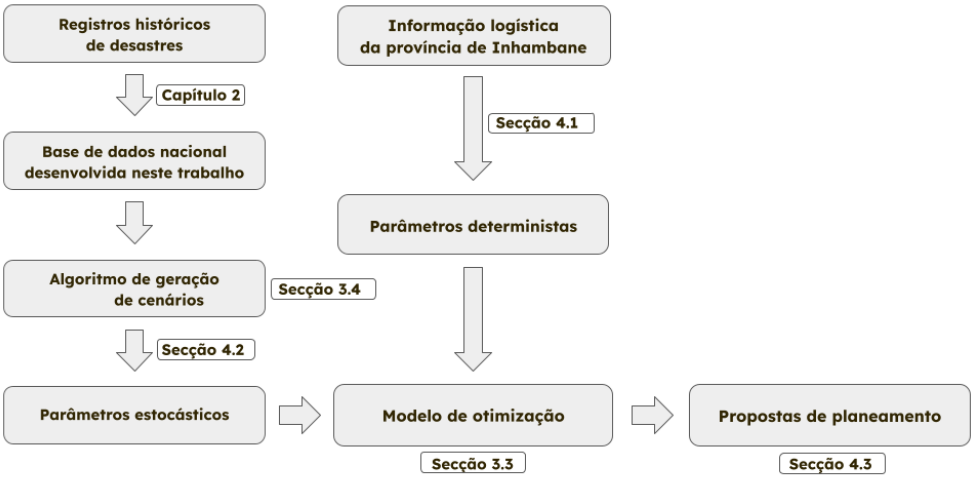


Figura 3.2: Diagrama de fluxo do processamento da informação recolhida para a otimização do pré-posicionamento. Fonte: elaboração própria.

3.4. Metodologia de geração de cenários a partir de informação histórica

Uma das hipóteses da modelação é a consideração de um conjunto finito de cenários de catástrofe. Devido à natureza da programação linear, esta é uma simplificação fundamental para permitir a resolução do problema em termos de tempo de computação e eficiência das soluções.

Partindo de dados históricos sobre catástrofes, é interessante realizar uma transformação desses dados para gerar os cenários considerados pelo modelo da forma mais representativa possível. Reunir o máximo de informação nos cenários facilita a obtenção de soluções mais fiéis à realidade. A brilhante metodologia utilizada para esse efeito foi originalmente desenvolvida em Rodríguez-Martínez, 2021 e encontra-se detalhada nesse trabalho.

Dado que os registos históricos disponíveis são necessariamente escassos, uma vez que a ocorrência de catástrofes é pouco frequente, esta informação tende a apresentar enviesamentos e imprecisões. A metodologia foi desenvolvida tendo em conta estas limitações e concebida para ser aplicada em países em desenvolvimento, como Moçambique (Rodríguez-Martínez, 2021).

Os cenários de catástrofe são caracterizados com base no número de pessoas afetadas e na sua distribuição geográfica em diferentes nós. Cada cenário tem associada uma probabilidade de ocorrência para cada estação.

A geração divide-se em cinco fases consecutivas, sendo as três primeiras dedicadas a obter representantes dos desastres e as duas últimas a combinar esses representantes e a reduzir o número de casos sem perder informação.

Fase 1

Existem catástrofes de magnitudes muito diversas e é desejável que todas estejam representadas no conjunto de cenários. Por isso, o primeiro passo consiste em discretizar essas magnitudes. Constrói-se um conjunto finito de classes, divididas em função da gravidade em termos de número de afetados, com uma probabilidade associada a cada uma.

Para tal, utiliza-se um modelo de programação linear baseado nos trabalhos de Vitoriano et al., 2000 e Høyland et al., 2003, que se revela eficaz neste contexto. Tem a capacidade de representar os desastres particularmente perturbadores, evitar cenários com probabilidades demasiado baixas e obter cenários diversos, respeitando

a natureza exponencial das magnitudes dos desastres.

Esse modelo baseia-se na maximização da dispersão do número de afetados entre classes de magnitude, para obter cenários tão variados quanto possível. Como restrições, garante que os momentos estatísticos até à terceira ordem da distribuição obtida sejam razoavelmente semelhantes aos da distribuição histórica, fixa uma probabilidade mínima para cada cenário e uma magnitude máxima permitida. A sua formulação é explicada no Apêndice [A3].

Fase 2

É realizada uma associação difusa dos registos às classes de magnitude obtidas na primeira fase, considerando conjuntos trapezoidais difusos. Cada catástrofe pode ser associada a uma ou mais dessas classes com diferentes graus de atribuição.

Esta fase é especialmente relevante, tendo em conta a quantidade reduzida de registos para algumas classes de magnitude.

Fase 3

Para a construção de cenários com atribuição geográfica, utiliza-se um algoritmo hierárquico aglomerativo, que é executado para cada classe de magnitude e tipo de catástrofe. Este tipo de algoritmos mede a proximidade entre *clusters* de objetos e, a partir de um estado inicial em que cada objeto constitui o seu próprio *cluster*, une iterativamente aqueles que se encontram a menor distância.

Os objetos de desastre são definidos em função do número de afetados em cada nó e da localização geográfica destes. É construída uma função com as propriedades de medida que permita calcular a distância entre objetos. Para escolher o representante de um *cluster*, utiliza-se um modelo de otimização que seleciona o objeto que minimiza a distância em relação aos restantes membros. Será necessário recorrer a uma heurística para fornecer a esse modelo de otimização uma solução inicial viável.

Fase 4

São gerados novos cenários de catástrofe a partir das combinações dos cenários obtidos anteriormente.

Estima-se a probabilidade de cada cenário para cada estação e, assumindo independência na probabilidade de ocorrência dos eventos, calcula-se a probabilidade de cada combinação.

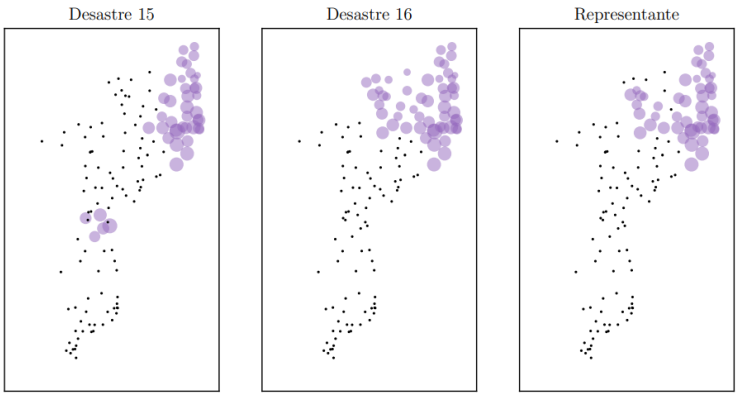


Figura 3.3: Representação dos *clusters* formados pelo algoritmo da terceira fase e do representante de cada um deles. Fonte: Rodríguez-Martínez, 2021.

Se não tivesse sido realizado o agrupamento de cenários da fase 2, obter-se-iam muito mais combinações nesta fase.

Fase 5

Quando o número de cenários se revela excessivo, pode-se recorrer a esta fase para o reduzir, sacrificando o mínimo de informação possível.

Em Rodríguez-Martínez, 2021, aplica-se outro algoritmo hierárquico aglomerativo semelhante ao da terceira fase ao conjunto obtido anteriormente. Este utiliza outra definição de objeto de catástrofe, uma nova função de distância, um modelo específico para a escolha de representantes e a sua própria heurística para o alimentar com soluções iniciais.

Em seguida, obtém-se, para cada estação, um conjunto reduzido de cenários de catástrofe representativos. Estes apresentam diferentes magnitudes e probabilidades de ocorrência em cada estação, representando adequadamente os casos extremos e agrupando toda a informação geográfica possível sem comprometer a capacidade do modelo de localização de armazéns.

4. Pré-posicionamento de ajuda humanitária em Inhambane, Moçambique

Neste capítulo, descrevem-se as características geográficas da província de Inhambane, bem como a informação disponível sobre as suas capacidades logísticas. Também se detalha a aplicação que foi feita da metodologia de geração de cenários de emergência. Tudo isto serve para atribuir valores aos parâmetros do modelo de otimização descritos na secção [3.3].

O modelo de otimização aplica-se exclusivamente à província de Inhambane e não ao conjunto do território de Moçambique. Esta decisão deve-se, por um lado, a limitações computacionais e metodológicas, uma vez que a extensão do modelo à escala nacional daria origem a dimensões do problema excessivamente grandes, dificultando a sua resolução prática. Por outro lado, a aplicação do modelo requer informação detalhada, cuja recolha só foi possível com o nível de precisão necessário na província específica onde se realizou o estágio (Rodríguez-Martínez, 2021).

Considera-se um horizonte de planeamento de 5 anos, um período útil a nível administrativo, uma vez que é para esse período que são aprovados os orçamentos do INGD. As subdivisões temporais são trimestres que começam no período de dezembro-janeiro-fevereiro. Isto deve-se às características climáticas do território, que determinam a ocorrência de fenómenos extremos. Historicamente, o planeamento logístico da resposta a emergências tem vindo a ser feito em torno destas divisões temporais.

4.1. Informação logística

Apresenta-se a seguir uma compilação de informações logísticas da província de Inhambane, que constitui uma extensão prática do processo de gestão da informação descrito no Capítulo [2].

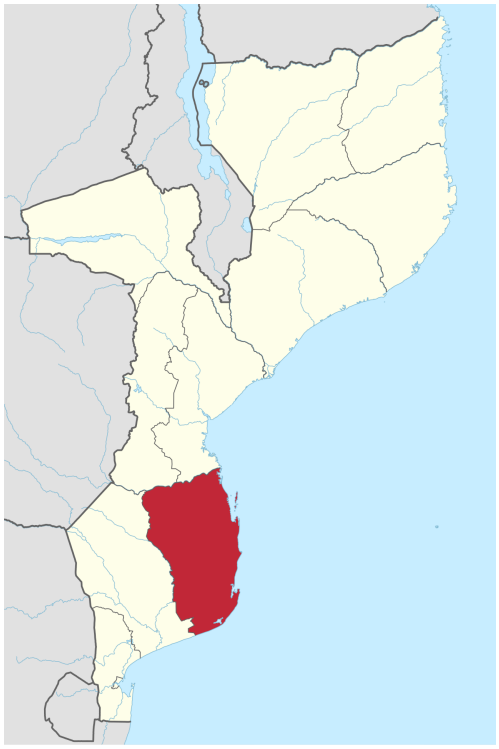


Figura 4.1: Localização de Inhambane em Moçambique. Fonte: NordNordWest, 2018.

A partir do tratamento sistemático e no terreno de diversas fontes, foi gerado um conjunto de dados estruturados que permite caracterizar de forma global as divisões temporais, a distribuição dos aglomerados populacionais, a conectividade rodoviária, a capacidade de transporte, os custos de mobilização de bens, a disponibilidade de armazéns, os produtos a distribuir e os recursos orçamentais associados.

Grande parte da informação apresentada nesta secção foi obtida através de entrevistas pessoais realizadas presencialmente com os intervenientes relevantes.

Este conjunto de dados reflete a realidade operacional da província e serve de base para o planeamento antecipado de operações de pré-posicionamento de ajuda humanitária. Isto garante que as decisões logísticas possam basear-se em dados precisos, consistentes e atualizados.

Assentamentos

Embora existam outras divisões territoriais da província de Inhambane, como os *postos*, para o caso em estudo, considera-se apenas a divisão em distritos. Por razões de manutenção, fornecimento de eletricidade, segurança e outras questões operacionais, parte-se do princípio de que a instalação dos armazéns de ajuda humanitária

só pode ocorrer na sede de cada distrito. Todos os povoados dentro dos distritos estão relativamente bem ligados às respetivas sedes, podendo estas funcionar como centros logísticos. Consideram-se, portanto, os 14 distritos como os nós da rede de transportes.

Ligações entre povoações

Foram processados através do Sistema de Informação Geográfica QGIS (QGIS Development Team, 2025) dados georreferenciados relativos à localização das sedes dos distritos, aos seus limites políticos e às camadas de estradas provenientes de Moçambique, de Humanitarian Data Exchange, 2025b, que classificam os tipos de vias em função da composição do seu pavimento.

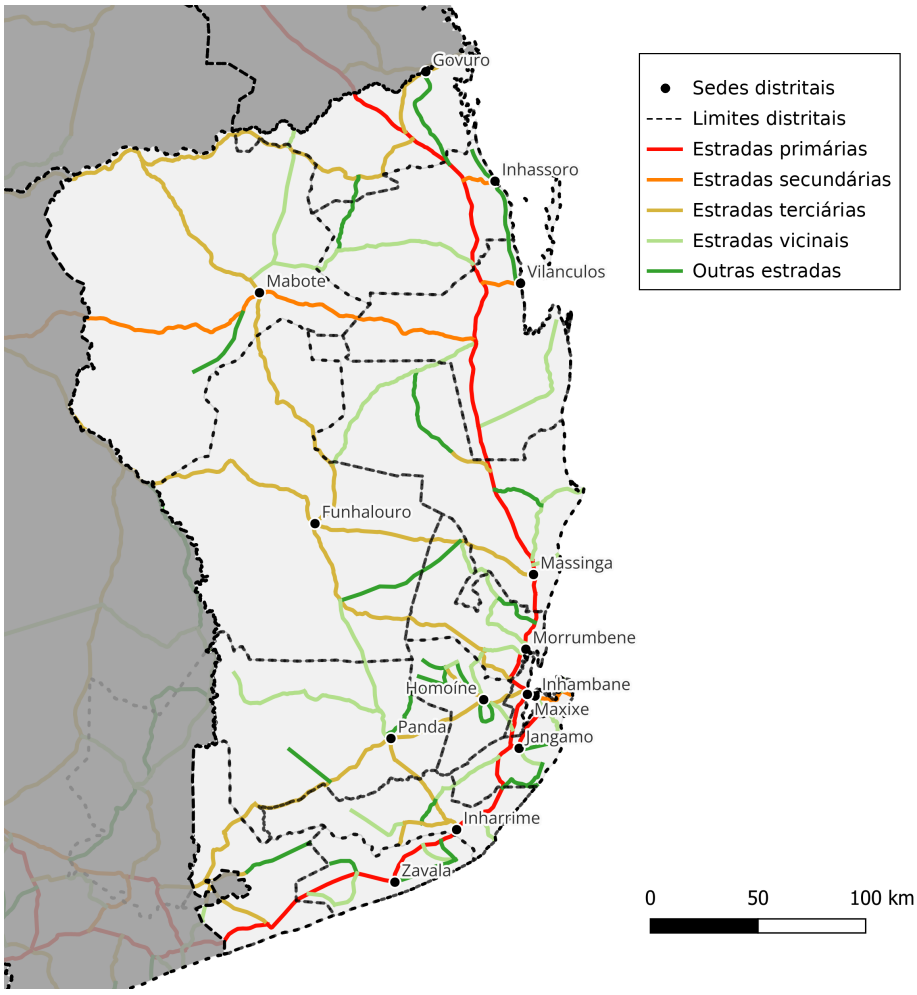


Figura 4.2: Mapa de estradas, sedes e limites distritais da província de Inhambane, processado no QGIS (QGIS Development Team, 2025) para gerar o grafo de ligações. Fontes: Humanitarian Data Exchange, 2025b, elaboração própria.

Em operações de primeira resposta a uma catástrofe, as vias marítimas revelam-se demasiado lentas para o transporte ou não estão ativas para o efeito, como é o caso da ligação Inhambane-Maxixe.

Com a informação recolhida, foi construído um grafo com os 14 nós de procura e os 49 arcos que representam as rotas existentes.

Capacidade das ligações

A capacidade das ligações entre distritos depende do tipo de pavimento da estrada que os liga.

Consideram-se as operações habituais do INGD, nas quais são utilizados, no máximo, 8 camiões com capacidade de carga de 30 toneladas, que demoram 3 horas a carregar e a descarregar e circulam durante o dia nas primeiras 72 horas após a emergência. A capacidade da via é, portanto, dada por

$$\text{capacidade(troço) t} = 8\,\text{camiões} \cdot 30\,\text{t} \cdot \left\lfloor \frac{3\,\text{dias} \cdot 10\,\text{h}}{6\text{h} + 2 \cdot \text{tempo de percurso(troço) h}} \right\rfloor$$

e o tempo de percurso foi calculado como

$$\text{tempo de percurso (troço) h} = \sum_{\text{subtroços}} \frac{\text{distância(subtroço) km}}{\text{velocidade máxima permitida(subtroço) km/h}}$$

considerando-se uma velocidade de 60 km/h para as estradas de betão, 40 km/h para as de cascalho, 25 km/h para as estradas terciárias de terra batida e 20 km/h para os caminhos de terra batida.

Em situações de catástrofe, a capacidade de um troço pode ser drasticamente afetada se este atravessar um rio cheio. Para estudar esses casos, foram utilizadas as bases de dados de rios e ribeiros de Moçambique fornecidas pelo Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, pelo Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.d. e pelo Humanitarian Data Exchange, 2025a. Segundo o Delegado Provincial do *Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação* (entrevista pessoal, 29 de setembro de 2025), os cursos de água sofreram grandes alterações nos últimos anos devido às alterações climáticas e à erosão do solo provocada por chuvas mais intensas, pelo que se deve considerar apenas os dados geográficos mais recentes.

A capacidade considerada nessas situações é dada por

$$\text{capacidade_reduzida(via, cenário) t} =$$
$$= \text{capacidade_habitual(via)} \cdot \text{fator_magnitude(cenário)} \cdot \text{fator_pavimento(via) t}$$

sendo

$$\text{fator_magnitude(cenário)} = \begin{cases} 0,9 & \text{se número_de_afetados(cenário)} < 50\,000 \\ 0,75 & \text{se } 50\,000 < \text{número_de_afetados(cenário)} \leq 500\,000 \\ 0,5 & \text{se } 500\,000 < \text{número_de_afetados(cenário)} \leq 1\,000\,000 \\ 0,25 & \text{se } 1\,000\,000 < \text{número_de_afetados(cenário)} \leq 2\,000\,000 \\ 0 & \text{se } 2\,000\,000 < \text{número_de_afetados(cenário)} \end{cases}$$

$$\text{fator_pavimento(via)} = \begin{cases} 0{,}9 & \text{se for uma estrada principal, asfaltada} \\ 0{,}8 & \text{se for uma estrada secundária, de cascalho} \\ 0{,}65 & \text{se for uma estrada terciária, de terra} \\ 0{,}5 & \text{se for um caminho, de terra} \\ 0{,}4 & \text{para outras vias} \end{cases}$$



Figura 4.3: Destruição de um troço da estrada nacional N-1 na zona de Manhiça, a 20 de janeiro de 2026. Isso implicou o corte das ligações entre as províncias de Gaza e Inhambane com Maputo até 28 de janeiro de 2026. Fonte: *Administração Nacional de Estradas*.

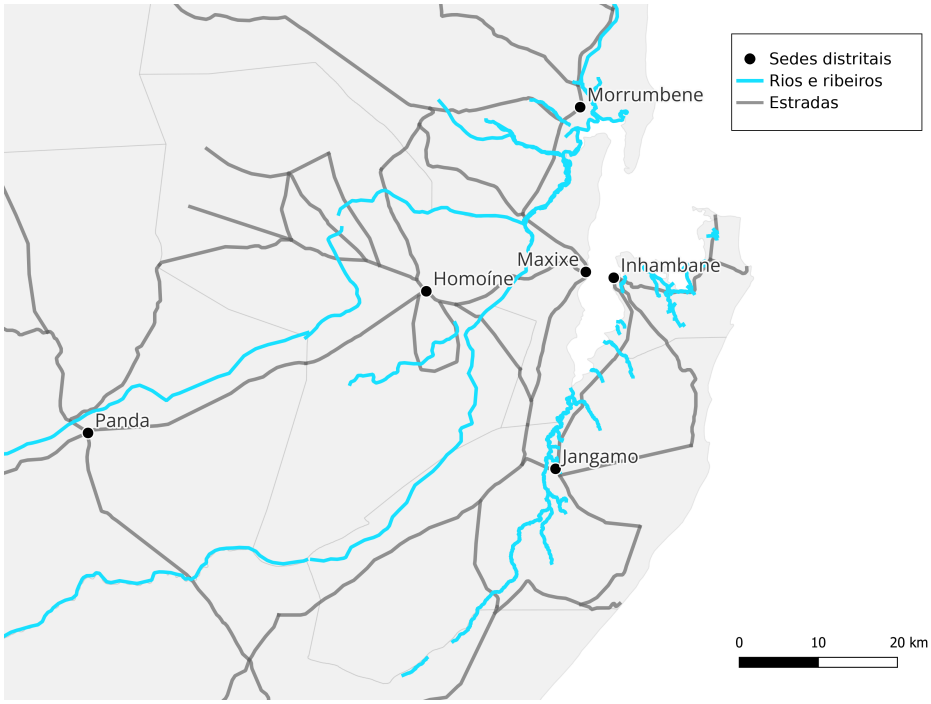


Figura 4.4: Secção de mapa de estradas e cursos de água, processada no QGIS (QGIS Development Team, 2025) para estudar as intersecções entre ambos. Fontes: Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação, 2025, Regional Centre for Mapping of Resources for Development, s.d. Humanitarian Data Exchange, 2025a, elaboração própria.

Custos de transporte

No que diz respeito às restrições geográficas para o pré-posicionamento e o abastecimento na fase de preparação, parte-se do princípio de que todo o material destinado aos armazéns é transportado a partir da capital do país, Maputo, que se situa 500 km a sul. Considera-se a opção de abastecimento mais rentável para cada armazém. Esta pode ser a rota mais curta por estrada ou por barco a partir de Maputo.

De acordo com o Delegado Provincial do *Instituto de Transporte Marítimo* (entrevista pessoal, 9 de outubro de 2025), a província de Inhambane dispõe de quatro portos que, historicamente, têm recebido carga durante operações relacionadas com ajuda humanitária e catástrofes, situados nas cidades de Inhambane, Maxixe, Vilanculos e Inhassoro.

Foi considerada uma primeira estimativa do custo do transporte terrestre por tonelada e quilómetro para a província de Nampula em 2021 (Rodríguez-Martínez, 2021). Desde então, verificou-se um aumento no preço do combustível (Global Petrol Prices, s.d.), embora este seja mais barato em Inhambane do que em Nampula. Numa operação de grande dimensão, os custos associados ao transporte representam cerca de

um terço do total. A variação do IPC desde 2021, especialmente no que diz respeito aos transportes, é insignificante (The Global Economy, s.d.). Assim, considera-se um custo unitário de $0,17801 \cdot (1 + (0,35 \cdot 0,3)) \approx 0,19670$ USD/km-t. Esse custo unitário é multiplicado por diferentes fatores, consoante o tipo de pavimento da via utilizada.

No que diz respeito ao transporte por navio, este pode ser enquadrado no conjunto de operações *Short Sea Shipping*, nas quais Moçambique está a apostar como uma opção economicamente rentável, ecológica e sustentável (Santos e Santos, 2025, Alcalde, 2019). A maioria dos estudos realizados sobre os custos unitários do transporte marítimo considera longas distâncias (Sander van der Meulen et al., 2023), uma vez que os dados fornecidos pela Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento a este respeito (Nações Unidas. Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD), s.d.) não estão discriminados em função da dimensão das operações. No entanto, os preços operacionais para o *Short Sea Shipping* são significativamente superiores aos do transporte marítimo de longa distância. Tendo em conta dados de rotas semelhantes (Xue-Bin Zheng, Yul-Seong Kim and Young-Ran Shin, 2021), considera-se uma média de 0,05 USD/km-t.

Para a estimativa do preço de aquisição de bens e do respetivo transporte numa situação de emergência — que pode ser efetuada a partir de diversos locais, tanto internos como externos à província —, assume-se que este é três vezes superior ao que seria se a aquisição tivesse sido feita antecipadamente (Rodríguez-Martínez, 2021).

Ajuda externa durante a fase de resposta

São consideradas todas as vias de abastecimento externas à província no seu conjunto durante uma situação de resposta a uma emergência. Presume-se que os distritos que estejam ligados por alguma destas vias e disponham de armazéns possam operar a 500% da capacidade destes (Rodríguez-Martínez, 2021).

O transporte marítimo, muito eficiente e rentável durante a fase de preparação, não é considerado para a fase de resposta devido à sua lentidão.

No que diz respeito ao transporte aéreo de grandes quantidades, são considerados os aeroportos de Inhambane e Vilanculos. De acordo com a Direção de Segurança do Aeroporto de Inhambane (entrevista pessoal, 7 de outubro de 2025), este não dispõe de iluminação nas pistas, nem de armazéns ou cais de carga, e existe apenas uma plataforma de estacionamento, pelo que poderia operar aproximadamente 8 voos diários, se necessário. As pistas aceitam aviões com peso não superior a 30 toneladas, que poderiam transportar, no máximo, 10 toneladas de carga. O aeroporto de Vilanculos, por sua vez, dispõe de 4 *aprons* e iluminação nas pistas, o que lhe permite operar 24 horas por dia, e dispõe de cais de carga. Considera-se que o primeiro pode receber

um total de $3 \cdot 8 \cdot 10 = 240\,\text{t}$ e o segundo cerca de 8 vezes mais (Logistics Cluster, s.d. a).

Embora todos os distritos disponham de pequenos aeródromos, o estado das suas pistas de terra é incerto e variável. Distribuir ajuda diretamente com aviões de carga não costuma ser viável nesses locais. Fá-lo com helicópteros é mais viável, mas depende da quantidade disponível dos mesmos. Não é invulgar que, na resposta a uma emergência, o trabalho de resgate seja combinado com o transporte de mercadorias. Cada uma destas aeronaves transporta normalmente entre 0,3 t e 0,5 t e pode efetuar de 2 a 4 viagens dentro da província durante um dia, dependendo da distância percorrida. Tendo em conta a sua capacidade logística limitada, não são consideradas na modelação.

Armazéns

Existem dois armazéns fixos no distrito de Inhambane-cidade. De acordo com o pessoal responsável pela sua manutenção (entrevista pessoal, 13 de outubro de 2025), têm uma estrutura revestida a chapa metálica com 45 m × 13 m × 4 m e podem armazenar cerca de 2 500 toneladas, uma vez que não dispõem da maquinaria adequada para movimentar carga armazenada em altura. Um deles encontra-se inoperacional devido aos danos sofridos durante uma tempestade. Os custos da sua reparação são contabilizados como custos de adaptação na cidade de Inhambane.

Segundo Mohamed Razak, *Responsável pela Cadeia de Abastecimento* do Programa Alimentar Mundial em Moçambique (entrevista pessoal, 18 de setembro de 2025), existem ainda duas unidades de armazenamento móvel (MSU) em Vilanculos e outras duas em Funhalouro. Estas apresentam uma estrutura de alumínio coberta por lonas com 32 m × 10 m × 5,5 m e têm uma capacidade de 250 toneladas cada, uma vez que também não permitem a movimentação em altura (Nações Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP), 2020), (Logistics Cluster, s.d. b). Presume-se que seja possível instalar até vinte destes armazéns em cada distrito, com exceção da cidade de Inhambane.

De acordo com as necessidades do INGD, não é imposta qualquer limitação em termos de quantidade de armazéns que podem ser ativados em cada período.

Dispõe-se de informação segundo a qual os custos de instalação rondaram os 180 000 USD para o armazém de Inhambane e estima-se em 60 000 USD os custos de reparação do mesmo. Para cada MSU, consideram-se

$$15000 + 2 \cdot \text{custo_de_abastecimento_e_transporte(distrito)} + 100\,\text{USD}$$

, tendo em conta o preço dos materiais, o seu transporte e a mão-de-obra (Nações Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP), 2020). Estabelecem-se custos de



(a) Armazém fixo na cidade de Inhambane.



(b) MSU em Vilanculos.

Figura 4.5: Tipos de armazéns de primeira resposta na província de Inhambane. Fonte: elaboração própria.

manutenção anuais, que incluem gestão, reposição e segurança, de 8% do custo de instalação de cada armazém (Rodríguez-Martínez, 2021).

Produtos de emergência

Adaptando o modelo às necessidades do INGD, serão considerados pacotes de ajuda que tenham em conta uma média das necessidades habituais em situações de resposta. Segundo informações do próprio instituto, 60% dos bens distribuídos nestas operações são alimentares e, do restante, a grande maioria são de socorro. Aproximadamente 30% das catástrofes provocam a perda de habitações, o que requer uma atenção específica e significativamente dispendiosa em termos económicos, de dimensão e peso.

Tendo em conta estas proporções, estimativas prévias para a província de Nampula (Rodríguez-Martínez, 2021) e as especificações da Sphere Association, 2018, parte-se do princípio de que, por cada 1 000 pessoas afetadas, são necessárias 80 toneladas de ajuda humanitária, com um preço médio de 600 USD por tonelada (excluindo transporte e manuseamento) e uma percentagem de expiração de 0,82%.

Orçamento

De acordo com responsáveis do INGD (entrevista pessoal, 10 de outubro de 2025), em 2024 foram investidos na província de Inhambane cerca de 20 000 USD em operações de pré-posicionamento e distribuição de ajuda humanitária em situações de catástrofe, sem contar com o apoio internacional. Durante esse período, não foi criada qualquer infraestrutura de armazenamento. Para simplificar o problema, parte-se do princípio de que o orçamento anual é ajustado à inflação.



(a) Sacos de arroz.



(b) Tendas, latrinas móveis, utensílios domésticos, coletes salva-vidas, baldes, variedade de ferramentas.

Figura 4.6: Alguns dos bens armazenados na cidade de Inhambane. Fonte: elaboração própria.

4.2. Geração de cenários de catástrofe

O processo de geração de cenários de emergência destinado a alimentar o modelo para o estudo do pré-posicionamento na província de Inhambane segue a metodologia descrita na secção [3.4] deste trabalho.

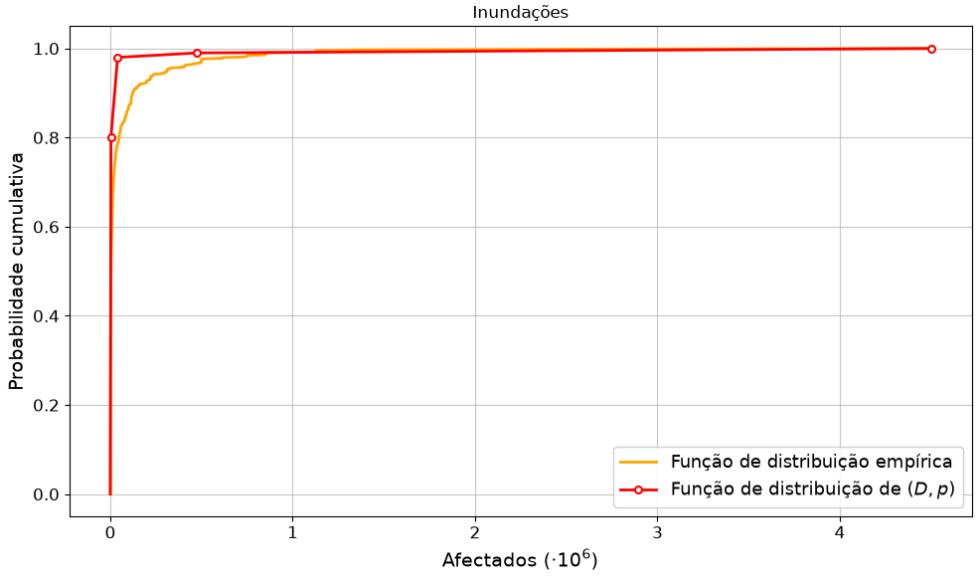
Parte-se da base de dados cuja elaboração é detalhada na secção [2.2], preparada para aplicar os algoritmos desenvolvidos em Rodríguez-Martínez, 2021.

Para a primeira fase, as magnitudes das inundações e dos ciclones são discretizadas em quatro categorias.

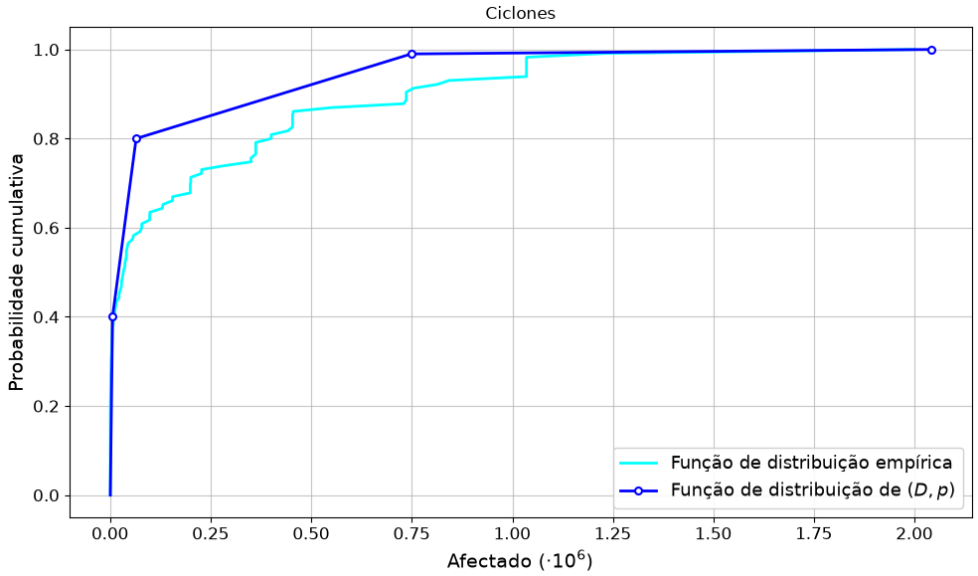
São considerados apenas os eventos com um mínimo de 50 afetados registados, uma vez que, a partir deste limiar, se pode supor que são suscetíveis de intervenção institucional. Um total de 753 registos cumpre esta condição.

Além disso, impõe-se que a categoria de maior magnitude represente, pelo menos, as dimensões do pior desastre registado. Esta decisão responde a uma abordagem baseada em períodos de retorno, na qual as classes de magnitude devem abranger eventos extremos de probabilidade muito baixa, mas de elevado impacto. Da mesma forma, num contexto de alterações climáticas, a não estacionariedade dos processos naturais aumenta a probabilidade de ocorrência de eventos extremos e altera os períodos de retorno históricos.

Apresenta-se a seguir a representação das distribuições dos cenários de procura considerados.



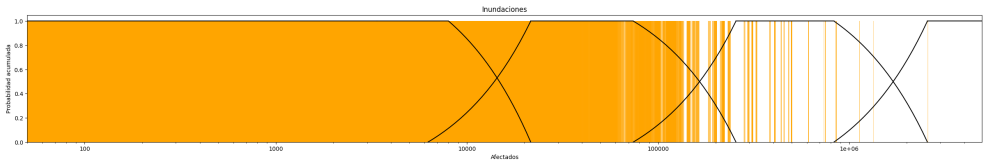
(a) Inundações.



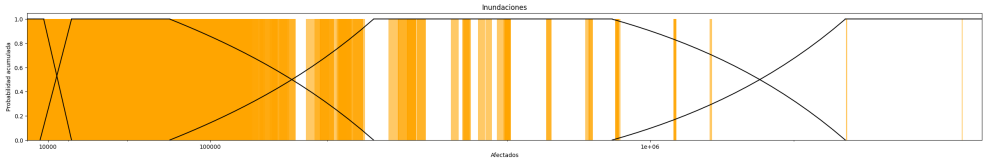
(b) Ciclones.

Figura 4.7: Comparação entre a função de distribuição empírica e a função de distribuição dos cenários de procura global. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

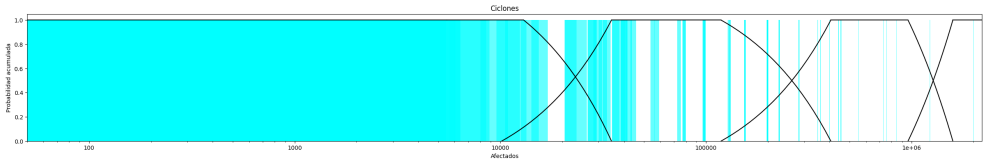
Aplica-se a metodologia descrita para a atribuição difusa dos eventos históricos aos cenários obtidos. Essa atribuição é representada a seguir.



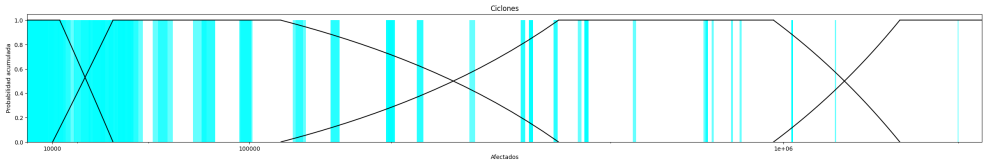
(a) Inundações com o eixo x em escala logarítmica.



(b) Inundações com o eixo x numa escala seno-hiperbolica.



(c) Ciclones com o eixo x numa escala logarítmica.



(d) Ciclones com o eixo x numa escala seno-hiperbólica.

Figura 4.8: Atribuição difusa dos casos aos cenários. Os registos históricos são representados pelas barras verticais e o grau de pertença a cada conjunto difuso pelo eixo y. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

Para a geração de cenários localizados, parte-se dos registos para os quais se dispõe de informação geográfica precisa, que são 688 dos 753 utilizados anteriormente. Através da aplicação do algoritmo hierárquico aglomerativo da fase 3 e das combinações frequentistas da fase 4, obtêm-se dois casos de estudo. O primeiro apresenta um conjunto de 115 cenários, dos quais 30 afetam total ou parcialmente a província de Inhambane. Este conjunto é obtido considerando como distância mínima entre cenários $\Psi = 1{,}1$. O segundo é composto por 227 cenários, com uma distância mínima entre eles de $\Psi = 1{,}15$, dos quais 56 afetam a província.

A quantidade de cenários em ambos os casos de estudo resulta em dimensões razoáveis do problema e do modelo de otimização, pelo que não é necessário aplicar a fase 5 para a redução de cenários.

Ao gerar cenários a nível nacional e, posteriormente, selecionar apenas aqueles que afetam uma província, é necessário normalizar as probabilidades associadas a cada um. Outra metodologia que poderia ser aplicada para estudar a sensibilidade do modelo seria realizar primeiro uma seleção dos eventos que envolvem Inhambane

e, posteriormente, aplicar o processo de geração de cenários a partir dos selecionados.

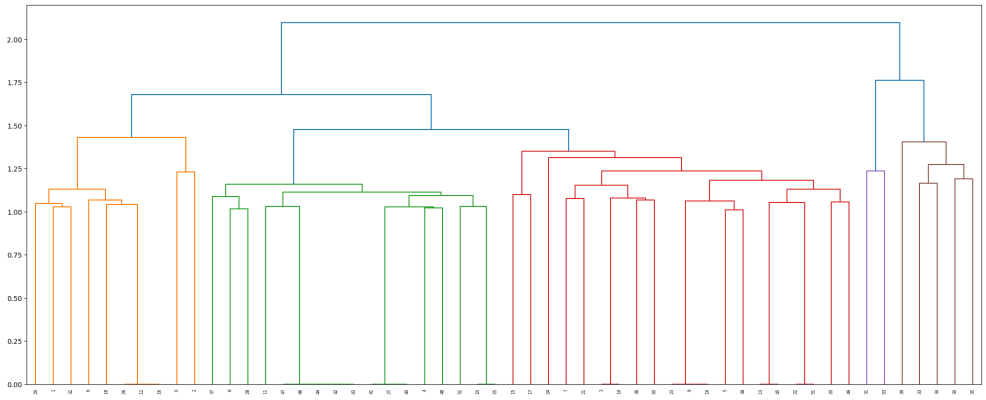


Figura 4.9: Dendrograma da geração de cenários geográficos, para a segunda classe de magnitude das inundações. Casos no eixo x e distância entre eles no eixo y. Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

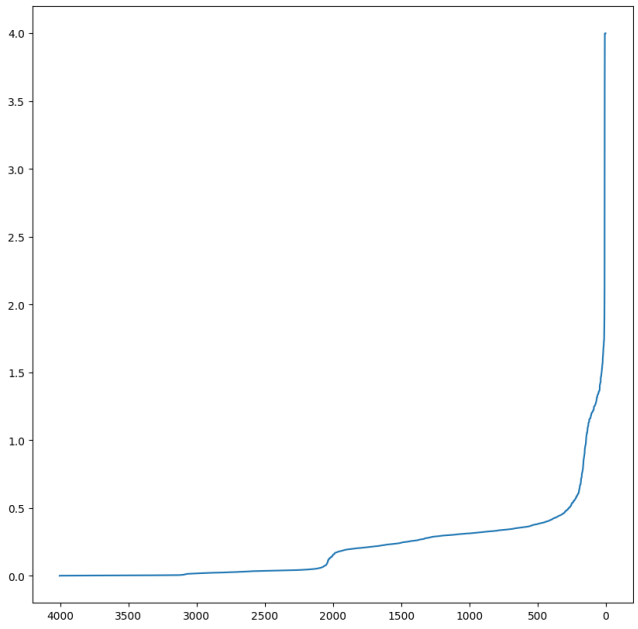


Figura 4.10: Evolução do número de cenários obtidos (eixo x) em função da distância mínima entre eles (eixo y). Fonte: elaboração própria. Código adaptado de Rodríguez-Martínez, 2021.

Desta forma, obtém-se o conjunto finito de cenários necessário para a aplicação do modelo. Cada cenário é caracterizado pela sua probabilidade de ocorrência em cada estação, pela procura de ajuda humanitária em cada distrito e pelas vias de transporte afetadas.

4.3. Resultados da otimização

Dimensões e tempos de cálculo

As dimensões do problema, antes das simplificações realizadas pelo algoritmo de otimização, são 67 590 restrições, 68 280 variáveis, cerca de 251 000 valores não nulos e 75 variáveis binárias, para o caso de estudo com 30 cenários de emergência. Para o caso com 56 cenários, estas ascendem a 125 570 restrições, 127 040 variáveis, cerca de 467 000 valores não nulos e as mesmas 75 variáveis binárias.

A programação do modelo de otimização foi realizada com o GAMS e o CPLEX na versão 49.6.1 (GAMS Development Corporation, 2025), para ser executado num computador com um processador de 2,3 GHz, 16 GB de RAM e sistema operativo Windows 11.

Foi utilizado como critério de paragem do algoritmo a obtenção de soluções com uma distância relativa do ótimo inferior a 1%.

Nestas condições, o tempo de cálculo mantém-se na ordem dos minutos para todas as instâncias analisadas.

No entanto, ao comparar as execuções com o caso de estudo de 30 cenários e as realizadas com o de 56, observa-se um aumento nos tempos de resolução neste último, devido à maior dimensão do modelo.

Verificou-se que um aumento do orçamento em determinados intervalos alarga o conjunto de soluções viáveis, o que se traduz num aumento dos tempos de resolução. Quando o orçamento é muito restritivo ou, pelo contrário, muito generoso, o modelo converge rapidamente para a solução ótima. No entanto, em intervalos orçamentais intermédios, o tempo de resolução aumenta devido à maior complexidade do espaço de decisão e ao maior número de alternativas a avaliar.

Comportamento geral do modelo

A programação do modelo é verificada através da realização de várias execuções e da análise dos valores das variáveis de saída. O seu comportamento é coerente em relação à sua formulação. O modelo procura corretamente a otimização da função-objetivo definida, sem violar as restrições de capacidade, orçamento ou equilíbrio de fluxos.

As soluções apresentadas envolvem o armazenamento de *stock* nos nós onde se decide a construção de armazéns e antecipam a reposição de fornecimentos antes dos períodos de maior procura. Além disso, a ajuda é transportada através das ro-

tas mais eficientes, desde os nós com capacidade de armazenamento até aos pontos de procura, e a ajuda externa é incorporada apenas quando as condições do cenário assim o exigem. Tudo isto é realizado utilizando a totalidade do orçamento disponível.

Além disso, apresenta um comportamento estável e consistente face às alterações nas condições iniciais do problema, observando-se padrões repetidos entre execuções semelhantes.

Resultados

A seguir, são apresentados os resultados da aplicação do modelo com os dados obtidos na secção [4.1] e os conjuntos de cenários gerados na secção [4.2] e justifica-se a sua validade e pertinência para o problema que representa.

A incorporação de uma abordagem multicritério é fundamental neste trabalho, uma vez que os objetivos analisados apresentam uma relação de compromisso que não pode ser resolvida adequadamente através de uma única função-objetivo. Exigir um maior nível de ajuda prestada implica, evidentemente, um aumento dos custos e, por conseguinte, dos desvios orçamentais associados. Otimizar exclusivamente um destes critérios conduz inevitavelmente a deteriorações significativas no outro, ocultando soluções intermédias potencialmente mais equilibradas e operacionais num contexto humanitário.

A fronteira de Pareto permite caracterizar o conjunto de soluções eficientes de um problema multicritério. Uma solução é considerada Pareto-óptima quando não é possível melhorar um dos objetivos sem piorar o outro. A fronteira de Pareto reúne, portanto, todas as alternativas não dominadas, proporcionando uma visão estruturada dos compromissos existentes entre o nível de ajuda prestada e o custo. Na prática, cada ponto do conjunto representa uma política operacional plausível, em função da importância relativa atribuída a cada critério.

Um dos métodos mais robustos para obter essa fronteira é o método das ε - restrições, que consiste em otimizar um dos objetivos enquanto o outro é incorporado ao modelo como restrições delimitadas por valores ε, que variam de forma sistemática. Em particular, aplica-se o método AUGMECON2 (Mavrotas e Florios, 2013) para a obtenção sistemática e computacionalmente eficiente da fronteira de Pareto.

Quando se dá pouca importância aos desvios orçamentais, o modelo tende a satisfazer a procura, dando prioridade à aquisição intensiva de ajuda de emergência e à utilização de transportes intraprovinciais em percursos de longa distância, independentemente do seu elevado custo. Em contrapartida, ao incorporar explicitamente os desvios orçamentais como critério de decisão, estas políticas restringem-se aos casos

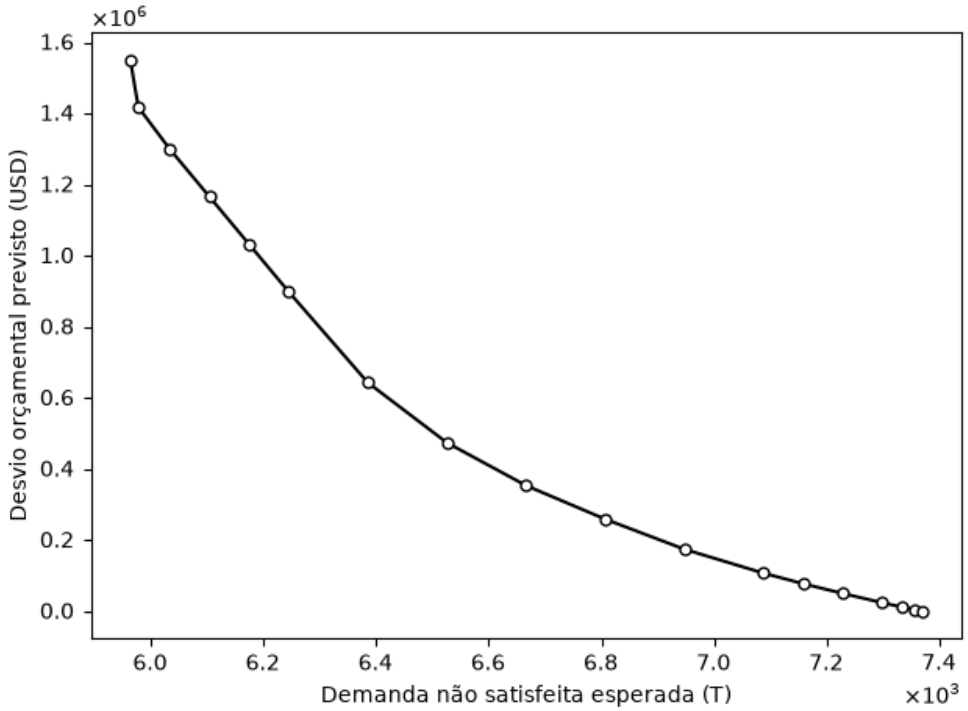


Figura 4.11: Aproximação da fronteira de Pareto com os dados estimados e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas e Florios, 2013, elaboração própria.

em que são estritamente necessárias. Isto favorece soluções logisticamente mais eficientes e coerentes com as limitações orçamentais.

Além disso, observa-se que, para qualquer ponderação das funções-objetivo, o orçamento disponível é investido na criação de mais 11 MSUs em Vilanculos no primeiro período do planeamento.

Esta localização revela-se pertinente devido à capacidade de receber e gerir ajuda externa através do seu aeroporto internacional. Além disso, a sua localização a norte da província é estrategicamente interessante, devido à proximidade dos distritos mais isolados da província. A cidade de Inhambane dispõe de 2 500 toneladas de capacidade de armazenamento para abastecer o sul da província.

A decisão de habilitar os armazéns no início do planeamento deve-se ao facto de que dispor de capacidade logística e *stock* desde as primeiras fases da resposta reduz a dependência de envios de emergência mais dispendiosos e aumenta a flexibilidade do sistema para absorver picos de procura nos períodos iniciais.

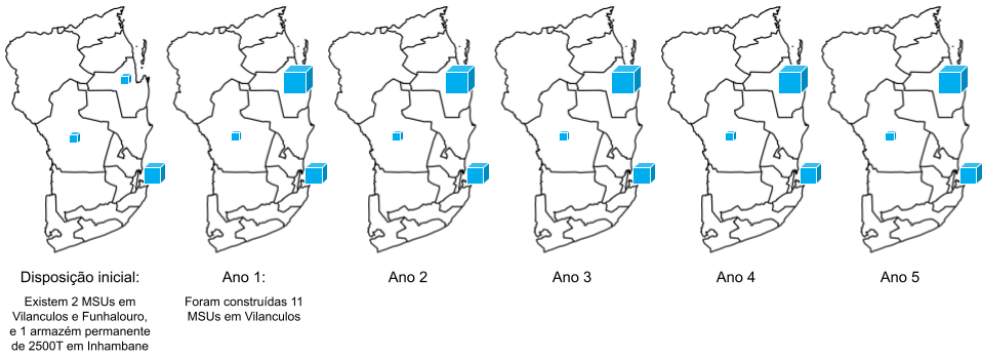


Figura 4.12: Política de planeamento sugerida pelo modelo com os dados estimados e 30 cenários de emergência, para qualquer ponto da Fronteira de Pareto. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria.

A invariância face a diferentes ponderações dos objetivos sugere que aumentar a capacidade deste nó estratégico é uma decisão robusta face à incerteza.

Análise de sensibilidade

A seguir, descreve-se como se comporta a distribuição dos recursos à medida que variam os diferentes parâmetros do modelo.

1. Se se assumir que não existe qualquer armazém operacional, estes são criados em Inhambane e Vilanculos, devido à sua proximidade dos aeroportos; e em algumas zonas mais inacessíveis, como Funhalouro, precisamente devido ao seu isolamento da rede de transportes. Neste sentido, os resultados do modelo mostram uma boa concordância com a experiência prática, validando-se mutuamente.

2. Quando as restrições de transporte são totalmente eliminadas, o modelo tende a atribuir todos os recursos a Inhambane. Quando, pelo contrário, a capacidade das vias é limitada em situações de catástrofe, o modelo tende a criar um maior número de armazéns e a pré-posicionar mais *stock* nos distritos mais isolados. Se esta capacidade for reduzida para 50%, o modelo propõe aumentar a quantidade de armazéns em Funhalouro e não apenas a de Vilanculos. Isto reflete a influência crucial da conectividade na distribuição eficiente.

3. Em geral, um aumento do orçamento aumenta significativamente a capacidade dos armazéns em Vilanculos e, em menor medida, em Funhalouro, enquanto em Inhambane as alterações são mais limitadas. Se for permitido um orçamento ainda mais elevado, o modelo tende a distribuir os recursos de forma mais ampla por todos os nós.

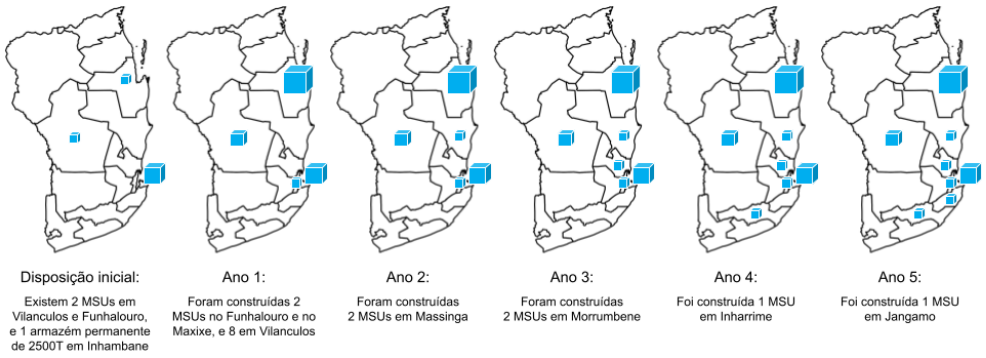


Figura 4.13: Política de planeamento sugerida pelo modelo com os dados estimados, orçamento anual de 80 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria.

4. Outro fator-chave estudado é a distribuição do orçamento. Se se partir do princípio de que, em vez de ser distribuído uniformemente ao longo dos 5 anos de planeamento, é possível dispor de 60 000 USD no primeiro ano e investir 15 000 USD nos restantes, o modelo recomenda a criação de duas MSUs em Maxixe, com capacidades distintas consoante a importância atribuída à cobertura da procura em detrimento da poupança. Se o orçamento for aumentado para 80 000 USD no primeiro ano e 20 000 USD nos restantes, é ainda criado outro armazém em Massinga.

   Estas localizações são particularmente estratégicas, uma vez que se situam no cruzamento entre a estrada nacional N-1 e as vias que ligam os distritos mais isolados.

   Este estudo reforça a hipótese de que uma alocação eficiente do orçamento ao longo do horizonte de planeamento, com um investimento concentrado nas primeiras fases, é fundamental para dispor de capacidade de armazenamento e de existências desde o início.

5. Em geral, observou-se que os resultados e as políticas de localização apresentam diferenças mínimas entre o caso dos 30 cenários e o dos 56.

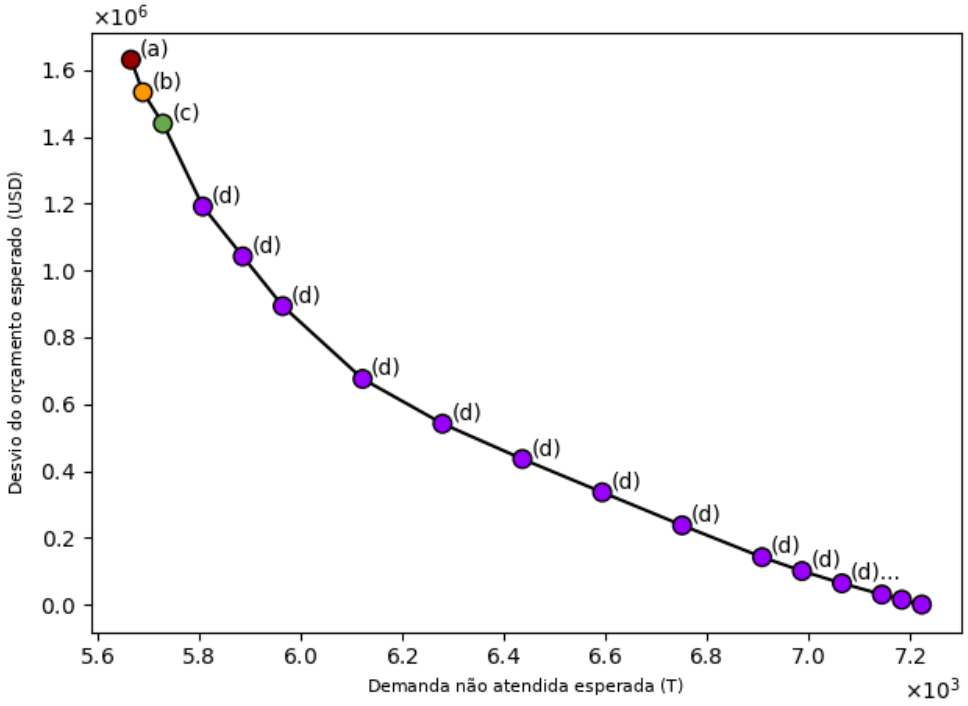
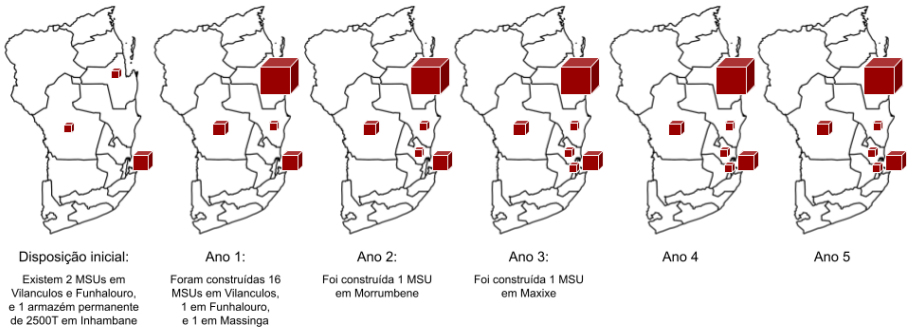
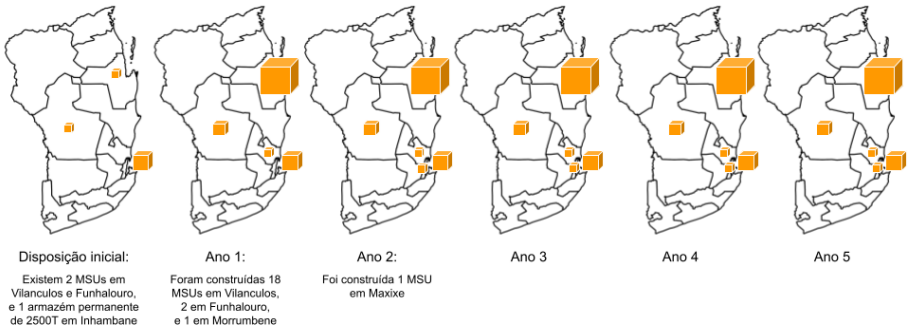


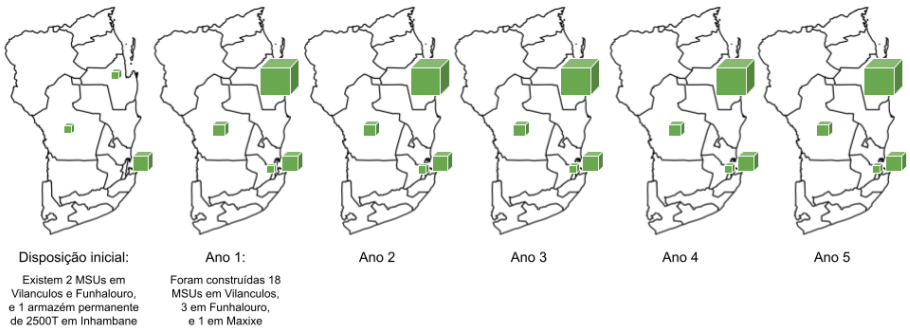
Figura 4.14: Aproximação da fronteira de Pareto com os dados estimados, orçamento anual de 70 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, Mavrotas e Florios, 2013, elaboração própria.



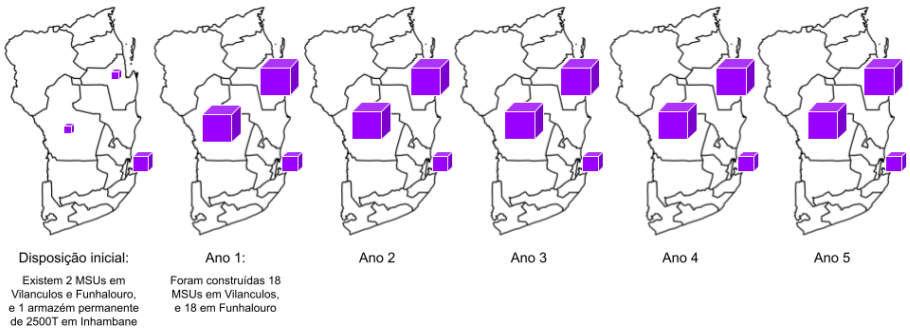
(a) Impõe-se como restrição ε uma cobertura da procura de 1% do ótimo.



(b) É imposta como restrição ε uma cobertura da procura de 2,5% do ótimo.



(c) Impõe-se como restrição ε uma cobertura da procura de 5% do ótimo.



(d) São impostas como restrições ε outros valores de cobertura da procura inferiores.

Figura 4.15: Políticas de planeamento sugeridas pelo modelo com os dados estimados, orçamento anual de 70 000 USD, capacidade das vias reduzida em 50% em relação ao estimado em situações de catástrofe e 30 cenários de emergência, ao longo da fronteira de Pareto. Fontes: Rodríguez-Martínez, 2021, elaboração própria.

5. Conclusões

A seguir, apresenta-se o cumprimento dos objetivos e as conclusões do projeto.

5.1. Sobre a gestão da informação

O processo de harmonização, cruzamento e consolidação dos registos permitiu abordar os problemas habituais de dispersão, heterogeneidade e falta de padronização dos dados existentes. A definição de um conjunto comum de variáveis e a validação cruzada de eventos reduziram as duplicações, melhoraram a rastreabilidade dos registos e aumentaram a comparabilidade entre eventos e períodos temporais. Esse trabalho combinou ferramentas avançadas de tratamento de dados com revisão manual e contextual, garantindo que a base de dados resultante seja operacional e fiável.

No seu conjunto, o trabalho realizado constitui um avanço significativo na gestão da informação sobre catástrofes em Moçambique. Estabelece as bases para futuras atualizações, incorporação de novas fontes e reforço da padronização institucional, contribuindo assim para melhorar o planeamento e a eficácia da resposta humanitária.

5.2. Sobre o pré-posicionamento da ajuda humanitária

Os resultados obtidos a partir das execuções do modelo sugerem que a qualidade e o nível de desagregação dos dados utilizados são suficientes para alimentar um modelo de apoio à decisão com estas características. O processo de recolha, comparação e unificação da informação histórica sobre catástrofes permitiu reduzir significativamente a incerteza associada à procura e aos cenários considerados.

Os resultados, além disso, são consistentes com as expectativas decorrentes da formulação do modelo. Em particular, confirma-se a importância crítica do investimento precoce em capacidade logística, bem como o papel determinante da conectividade e do acesso a infraestruturas de transporte na localização ótima dos armazéns. Além disso, os resultados mostram que a concentração de recursos em nós estratégicos com

boa acessibilidade aérea e terrestre constitui uma política robusta face à incerteza.

De uma perspetiva operacional, as soluções obtidas oferecem conclusões aplicáveis ao contexto real da gestão humanitária. O modelo identifica localizações prioritárias para o pré-posicionamento da ajuda que coincidem, em grande medida, com a experiência prática dos intervenientes locais, o que reforça a validade externa dos resultados. Além disso, a análise de cenários revela como as restrições de transporte e a distribuição temporal do orçamento influenciam de forma decisiva a eficácia do sistema logístico, proporcionando critérios claros para o planeamento estratégico.

A incorporação de uma abordagem multicritério revelou-se especialmente adequada para o problema analisado, facilitando a comparação entre políticas alternativas e reforçando o caráter do modelo como ferramenta de apoio à tomada de decisões.

Este trabalho constitui mais uma prova de que o modelo desenvolvido em Rodríguez-Martínez, 2021 é funcional, estável e computacionalmente eficiente, mesmo ao considerar um elevado número de cenários. Isto torna-o uma ferramenta potencialmente útil para apoiar o planeamento logístico humanitário.

Em conjunto, este trabalho demonstra que a combinação de dados de qualidade, conhecimento do contexto operacional e ferramentas matemáticas de otimização pode contribuir para melhorar a tomada de decisões na gestão do pré-posicionamento de ajuda em caso de catástrofes naturais.

5.3. Implementação e trabalhos futuros

A base de dados de catástrofes construída neste trabalho e a aplicação do modelo de otimização para o pré-posicionamento de ajuda humanitária foram desenvolvidas com uma abordagem prática, com o objetivo de criar ferramentas úteis para a gestão do risco de catástrofes em Moçambique. Graças ao estágio realizado no *Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres*, tanto a estrutura da base de dados como os critérios do modelo foram alinhados com as necessidades operacionais e os fluxos de informação utilizados pelo INGD, facilitando a sua eventual adoção e utilização direta no planeamento para situações de emergência.

A base de dados histórica de catástrofes a nível nacional pode ser utilizada para uma ampla variedade de fins. Entre estes incluem-se a identificação de padrões temporais e espaciais de ocorrência de eventos extremos, a avaliação da exposição e vulnerabilidade da população e das infraestruturas críticas, a elaboração e priorização de planos de contingência e estratégias de mitigação, a análise da eficácia de intervenções passadas, a estimativa de perdas económicas e sociais associadas a diferentes tipos de

catástrofes, a geração de cenários simulados para testes de resposta e formação, ou mesmo a investigação científica sobre tendências climáticas e ambientais.

O modelo de pré-posicionamento pode ser utilizado como suporte para o planeamento da localização estratégica de infraestruturas de armazenamento e abastecimento. Além disso, com informações mais precisas e atualizadas, é possível melhorar a qualidade dos parâmetros do modelo, tendo em conta as alterações demográficas, de infraestruturas e climáticas. Isto poderia ajudar a conceber políticas de pré-posicionamento mais eficientes e fiéis à realidade.

Outra possível linha de trabalho é a integração destas ferramentas nos seus sistemas internos. Propõe-se reforçar a normalização institucional e a formação do pessoal do INGD na utilização destas ferramentas, de modo a que o conhecimento gerado permaneça dentro da instituição e contribua para uma gestão mais eficiente e resiliente do risco de catástrofes. Os formatos da base de dados podem ser adaptados com base no feedback dos utilizadores finais, aumentando a sua operacionalidade, incorporando novas fontes de informação ou automatizando a atualização e validação dos registos. O trabalho futuro também pode orientar-se para a acessibilidade do modelo de otimização, através da criação de uma infraestrutura de software adequada ou de uma interface.

Em suma, o estágio e o projeto resultam em recursos complementares que podem ajudar a reduzir a incerteza no planeamento, melhorar a rapidez e a eficácia da resposta humanitária e reforçar a resiliência das comunidades face às catástrofes em Moçambique.

As ferramentas analíticas e matemáticas constituem um recurso fundamental para a promoção do bem-estar social e do desenvolvimento sustentável. É nossa responsabilidade ética e profissional utilizá-las em prol do interesse público e para reforçar a colaboração global na redução do impacto das calamidades. O conhecimento só tem valor se for partilhado e colocado ao serviço da comunidade.

É importante salientar que apenas uma cooperação internacional baseada na justiça e na equidade, apoiada por um investimento adequado, permitirá abordar de forma sustentável os impactos das catástrofes. A redução do risco não é apenas um objetivo técnico, mas sim um compromisso com a justiça social.

Bibliografia

Alcalde, E. M. (2019). Gestão do transporte multimodal. https://openaccess.uoc.edu/bitstream/10609/147450/2/GestionDelTransporteMultimodal.pdf

Comissão Interministerial da Reforma da Administração Pública. (2021). *Estatuto Orgânico do Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres* [Resolução n.º 3/2021]. https://disasterlaw.ifrc.org/sites/default/files/media/disaster_law/2021-06/EstatutoOrganico-do-INGD-Aprovado.pdf

Drucker, P. F. (1954). *The Practice of Management*. Harper & Row.

Firmino, H. (2025). *Cheias e seca ameaçam mais de 170 mil pessoas em Inhambane*. https://opais.co.mz/cheias-e-seca-ameacam-mais-de-170-mil-pessoas-em-inhambane/

GAMS Development Corporation. (2025). *The General Algebraic Modeling System* [Version 49.6.1]. https://www.gams.com

Global Petrol Prices. (s.d.). *Mozambique diesel prices* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://es.globalpetrolprices.com/Mozambique/diesel_prices/

Høyland, K., Kaut, M., & Wallace, S. W. (2003). A heuristic for moment-matching scenario generation. *Computational optimization and applications*, *24*(2), 169–185. https://link.springer.com/article/10.1023/A:1021853807313

Humanitarian Data Exchange. (2025a). *Mozambique Waterways (OpenStreetMap Export)* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://data.humdata.org/dataset/hotosm_moz_waterways

Humanitarian Data Exchange. (2025b). *Mozambique: Roads* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://data.humdata.org/dataset/mozambique-roads

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2022). *Estratégia nacional para o estabelecimento de um sistema integrado do fluxo de informação de aviso prévio de cheias e ciclones em Moçambique*.

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2024). *Proposta do plano de contingência provincial para época chuvosa e ciclónica 2024-2025*.

Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres. (2025). *Centro de Integração de Dados na Nuvem* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025].

Instituto Nacional de Hidrografia e Navegação. (2025). *Bases de dados de rios e ribeiros* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025].

Intergovernmental Panel on Climate Change. (2022). Mudança Climática 2022: Impactos, Adaptação e Vulnerabilidade. Contribuição do Grupo de Trabalho II para o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC. https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/

Jones, L. (2021). *Desastres: Como as grandes catástrofes moldam nossa história* (M. P. Sánchez, Trad.) [Tradução de *The Big Ones: How Natural Disasters Have Shaped Us (and What We Can Do About Them)*, 2018]. Capitán Swing Libros.

Logistics Cluster. (s.d. a). *Mozambique aviation logistics capacity assessment* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://lca.logcluster.org/22-mozambique-aviation

Logistics Cluster. (s.d. b). *Mozambique storage assessment* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://lca.logcluster.org/26-mozambique-storage-assessment

Mavrotas, G., & Florios, K. (2013). A novel version of the ϵ-constraint method for finding the exact Pareto set in Multi-Objective Integer Programming problems. *Applied Mathematics and Computation*, *219*(18), 9652–9669. https://doi.org/10.1016/j.amc.2013.03.002

Nações Unidas. Conferência das Nações Unidas sobre Comércio e Desenvolvimento (UNCTAD). (s.d.). *UNCTADstat database* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://unctadstat.unctad.org/EN/

Nações Unidas. Departamento de Assuntos Econômicos e Sociais (DESA). (2015). *Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável*. https://sdgs.un.org/2030agenda

Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Coordenação de Assuntos Humanitários (OCHA). (2026). *Moçambique: Inundações - dezembro de 2025*. https://reliefweb.int/disaster/fl-2025-000227-moz

Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR). (s.d.). *Riscos e desastres* [Acessado em 31 de janeiro de 2026]. https://www.un-spider.org/es/riesgos-y-desastres

Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR). (2015). *Marco de Sendai para a Redução do Risco de Desastres 2015-2030*. https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030

Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR). (2025). *DesInventar* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://www.desinventar.net/

Nações Unidas. Notícias ONU. (2026). *As inundações deixam mais de meio milhão de afetados em Moçambique*. https://news.un.org/es/story/2026/01/1541038

Nações Unidas. Programa Mundial de Alimentos (WFP). (2020). *Overview of Mobile Storage Units*. https://docs.wfp.org/api/documents/WFP-0000117433/download/

NordNordWest. (2018). Inhambane Province in Mozambique 2018.svg [SVG locator map showing Inhambane Province in Mozambique (2018)]. *Wikimedia Commons*. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Inhambane_Province_in_Mozambique_2018.svg

QGIS Development Team. (2025). *QGIS Geographic Information System* (Versão 3.40.10) [Software]. https://qgis.org

Regional Centre for Mapping of Resources for Development. (s.d.). *RCOE Geoportal* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://rcoe-geoportal.rcmrd.org

Rodríguez-Martínez, A. (2021). *Modelização estocástica e geração de cenários para gestão de desastres* [tese de doutoramento, Universidad Complutense de Madrid]. https://docta.ucm.es/entities/publication/3dae6345-5fce-45ee-bebd-69fbb3b22d6f

Salgado Lora, E. (2017). *Formulação de projetos: gestão e análise de informação para identificação de necessidades.* [Dissertação de Mestrado]. ERICAM, Universidad Complutense de Madrid, Universidad Pedagógica de Mozambique.

Sander van der Meulen et al. (2023). Cost figures for freight transport. https://www.kimnet.nl/site/binaries/site-content/collections/documents/2023/03/30/kostenkengetallen-voor-het-goederenvervoer/Cost%2Bfigures%2Bfor%2Bfreight%2Btransport_def.pdf

Santos, P. B., & Santos, T. (2025). Evaluating the economic feasibility of short sea shipping in Southern Africa: A case study of regional freight transports. *Case Studies on Transport Policy*, *21*, 101538. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.cstp.2025.101538

Sphere Association. (2018). *O Manual Esfera: Carta Humanitária e normas mínimas para a resposta humanitária* (4ª ed.). https://spherestandards.org/es/manual-2018/

The Global Economy. (s.d.). *Mozambique: Inflation* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://www.theglobaleconomy.com/Mozambique/Inflation/

The International Disaster Database. (2025). *Base de dados de desastres históricos em Moçambique* [Consultado pela última vez em 1 de dezembro de 2025]. https://www.emdat.be/

TUBS. (2011, maio). *Mozambique_in_its_region.svg* [SVG locator map showing the location of Mozambique in its region]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Mozambique_in_its_region.svg

UCM-HUMLOG Research Group. (2026). *Case Studies – Decision Aid Models for Logistics and Disaster Management (Humanitarian Logistics)*. https://blogs.mat.ucm.es/humlog/case-studies/

Vitoriano, B., Cerisola, S., & Ramos, A. (2000). Generating scenario trees for hydro inflows. *Proceedings of the 6th International Conference Probabilistic Methods Applied to Power Systems PMAPS*, *2*. https://www.researchgate.net/profile/Begona-Vitoriano/publication/268031759_Generating_Scenario_Trees_for_Hydro_Inflows/links/546bcbc40cf2f5eb180925cd/Generating-Scenario-Trees-for-Hydro-Inflows.pdf

Xue-Bin Zheng, Yul-Seong Kim and Young-Ran Shin. (2021). Sustainability of maritime transport in developing countries. *Journal of Marine Science and Engineering*, *9*(12), 1340. https://www.mdpi.com/2077-1312/9/12/1340

A1. Extratos visuais da base de dados nacional de catástrofes históricas

A base de dados completa em formato `.xlsx` pode ser consultada em UCM-HUMLOG Research Group, 2026.

AntSev_indice_complexo	AntSev_inconsistências-gruências-Des-y-Emdat	AntSev_inconsistências-gruências-Des-y-Ingd	AntSev_data	Des_name0	Des_name1	Des_lugar	Emdat_Location	Ingd_Provincia	Ingd_Distrito	Des_evento	Emdat_Disaster Type	Emdat_Disaster Subtype	Adan_Evento	Ingd_Ocorrência
índice único do cruzamento	Inconsistências entre Desinventariar Emdat	Inconsistências entre com a maior Desinventariar precisão IngD	Data final registrada em Desinventariar possível	Província registrada em Desinventariar	Distrito registrado em Desinventariar	Outras informações geográficas registradas em Desinventariar	Outras informações geográficas registadas em Emdat	Província registrada em IngD	Distrito registrado em IngD2	Tipo de evento consoante Desinventariar	Tipo de evento consoante Emdat	Subtipo de evento consoante Emdat	Tipo de evento consoante Adan	Tipo de evento consoante IngD
604_Des108669_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	SOFALA	BUZI		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		INUNDAÇÃO	Storm	Tropical cyclone		
605_Des108670_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	SOFALA	CAIA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	
606_Des108932_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	ZAMBEZIA	INHASSUNGE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		
607_Des108933_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	ZAMBEZIA	CHINDE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
608_Des108935_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/01/1996	ZAMBEZIA	PEBANE		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
609_Des108936_Emdat1996-0852-MOZ_Adan_Ingd7			13/01/1996	ZAMBEZIA	CIDADE DE QUELIMANE		Zambezia, Gaza, MaputZambezia		Quelimane	CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	Ciclone Bonita
610_Des108938_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		
611_Des74921_Emdat1996-0852-MOZ			13/01/1996	SOFALA	NHAMATANDA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone		
612_Des108141_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			14/01/1996	NAMPULA	CIDADE DE NACALA-PORTO		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone	Cyclone	
613_Des53095			15/01/1996	TETE	CHIUTA					INUNDAÇÃO				
614_Des81689_Adan			15/01/1996	INHAMBANE	MORRUMBENE					SECA			Drought	
615_Des108176			16/01/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA					DEPRESSÃO				
616_Des108911			16/01/1996	ZAMBEZIA	MILANGE					DESLIZAMENTO				
617_Des108705			19/01/1996	SOFALA	BUZI					CHEIAS				
618_Des74482_Adan			19/01/1996	SOFALA	BUZI					CHEIAS			Flood	
619_Des108441_Adan			29/01/1996	MAPUTO	NAMAACHA					CHEIAS			Flood	
620_Des108354			1/02/1996	SOFALA	BUZI					SECA				
621_Des36121_Emdat1996-0852-MOZ			1/02/1996	NAMPULA	MOMA		Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		Bonita
622_Des52989			1/02/1996	TETE	MAGOE					INUNDAÇÃO				
623_Des74920			1/02/1996	SOFALA	NHAMATANDA	Pungue-Linha ferea				CHEIAS				
624_Des108926			5/02/1996	ZAMBEZIA	NICOADALA					CHUVAS				
625_Des108927			5/02/1996	ZAMBEZIA	PEBANE					CHUVAS				
626_Des108928			5/02/1996	ZAMBEZIA	MAGANJA DA COSTA					CHUVAS				
627_Des108929			5/02/1996	ZAMBEZIA	NAMACURRA					CHUVAS				
628_Des108930			5/02/1996	ZAMBEZIA	MOPEIA					CHUVAS				
629_Des108931			5/02/1996	ZAMBEZIA	CHINDE					CHUVAS				
630_Des108950			5/02/1996	NAMPULA	ANGOCHE					PESTE				
631_Des108951			5/02/1996	NAMPULA	MOMA					PESTE				
632_Des53305			12/02/1996	TETE	CHANGARA					INUNDAÇÃO				
633_Des108174_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	ZAMBEZIA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
634_Des108491_Emdat1996-0852-MOZ			13/02/1996	SOFALA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CICLONE	Storm	Tropical cyclone		Bonita
635_Des108491_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	SOFALA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
636_Des108611_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	MAPUTO			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita
637_Des108640_Emdat1996-0852-MOZ_Adan			13/02/1996	GAZA			Zambezia, Gaza, Maputo,	Inhambane provinces		CHEIAS	Storm	Tropical cyclone	Flood	Bonita

Figura A1.1: Primeiras variáveis de algumas entradas do cruzamento de dados *Cruzamento_simplificado*, incluindo vários tipos de eventos e todas as fontes. Fontes: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboração própria.

índice	data	trimestre	tipo de calamidade	número de afectados	regiões afetadas	calamidades associadas
1	1/04/1956 MAM	Flood	0			4_Emdat1956-0035-MOZ
2	1/02/1967 DJF	Flood	50000			5_Emdat1967-0016-MOZ
3	29/01/1971 DJF	Flood	500000			6_Emdat1971-0011-MOZ
4	25/01/1975 DJF	Flood	75000			8_Emdat1975-0016-MOZ
5	1/02/1977 DJF	Flood	440000			9_Emdat1977-0040-MOZ
6	22/10/1977 SON	Flood	51			11_Emdat1977-0126-MOZ
7	1/03/1978 MAM	Flood	200000			12_Emdat1978-0040-MOZ
8	23/12/1978 DJF	Flood	105000			13_Emdat1978-0144-MOZ
9	21/01/1980 DJF	Flood	0			31_Des1-391
10	1/02/1980 DJF	Flood	5000	Macomia		32_Des100377_Adan
11	23/11/1980 SON	Cyclone	0	Guija		34_Des100961
12	4/01/1981 DJF	Flood	1	Moamba, Mutarara		56_Des1-392, 57_Des100229
13	1/02/1981 DJF	Flood	500000			58_Emdat1981-0126-MOZ
14	16/02/1981 DJF	Flood	0	Cidade de Quelimane		59_Des100042
15	17/12/1981 DJF	Cyclone	0	Inhassunque		60_Des100909
16	24/12/1981 DJF	Cyclone	0	Malema		61_Ingd4
17	31/01/1982 DJF	Cyclone	0	Chiburo		65_Des100946
18	1/12/1983 DJF	Flood	0	Magoe		80_Des81888
19	10/01/1984 DJF	Cyclone	350000	Namaacha		100_Des100462, 101_Des100609_Emdat1984-0018-MOZ
20	23/01/1984 DJF	Flood	0	Massangena, Manhiça, Matutuine, Mutarara		109_Des100024_Adan, 110_Des100025_Adan, 111_Des
21	28/01/1984 DJF	Cyclone	350000	Panda		113_Des93536_Emdat1984-0018-MOZ
22	2/02/1984 DJF	Flood	0			114_Des45781
23	1/02/1985 DJF	Flood	500000			135_Emdat1985-0028-MOZ
24	24/02/1985 DJF	Flood	1495	Massingir, Boane, Memba, Buzi, Chemba, Marromeu		136_Des100569, 137_Des100570, 138_Des100571, 1
25	26/03/1985 MAM	Flood	0			143_Emdat1985-0047-MOZ
26	31/03/1986 MAM	Cyclone	0			146_Emdat1986-0306-MOZ
27	19/10/1986 SON	Cyclone	0			151_Emdat1986-0314-MOZ
28	1/02/1988 DJF	Flood	0	Manjacaze-Dingane, Namaacha, Cuamba, Changara, Chinde		173_Des100420_Adan, 174_Des100421, 175_Des1004
29	23/02/1988 DJF	Cyclone	4000			179_Des100694_Emdat1988-0102-MOZ
30	1/03/1988 MAM	Cyclone	4000	Macomia		180_Des100488_Emdat1988-0102-MOZ

Figura A1.2: Todas as variáveis das primeiras entradas da agregação de dados. Fontes: Nações Unidas. Escritório das Nações Unidas para a Redução do Risco de Desastres (UNDRR), 2025, The International Disaster Database, 2025, Salgado Lora, 2017, Rodríguez-Martínez, 2021, Instituto Nacional de Gestão e Redução do Risco de Desastres, 2025, elaboração própria.

A2. Formulação do modelo de localização e pré-posicionamento

Variáveis de decisão complementares

Variáveis táticas

- β_F^e: orçamento atribuído às decisões estratégicas na etapa e.
- β_T^t: orçamento atribuído às decisões táticas e operacionais no período t.
- v_T^ω: desvio do orçamento tático no cenário ω.

Variáveis operacionais dependentes do cenário

- x_i^ω: abastecimento de emergência ao nó i.
- r_i^ω: abastecimento para repor o *stock* do período seguinte.
- $\tilde{r}_i^\omega$: excesso de abastecimento.
- s_i^ω: *stock* remanescente.
- y_a^ω: fluxo pelo elo a.
- v_i^ω: procura não satisfeita no nó i.

Funções-objetivo

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega^t} W^\omega v_T^\omega \tag{A2.1}$$

$$\min \sum_{t \in T} \sum_{\omega \in \Omega^t} \sum_{i \in I} W^\omega v_i^\omega \tag{A2.2}$$

A função-objetivo (A2.1) visa minimizar o desvio esperado do custo, e a função-objetivo (A2.2) visa minimizar a procura insatisfeita estimada.

Restrições lineares

$$\bar{C}^e \geq \beta_F^e + \sum_{t \in T^e} \beta_T^t \qquad \forall e \in E \qquad \text{(A2.3)}$$

$$\alpha_i^{e-1} \leq \alpha_i^e, \quad \alpha_i^e \in \{0,1\} \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.4)}$$

$$f_i^e \leq \lambda_i^M \alpha_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.5)}$$

$$\lambda_i^m \alpha_i^e \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.6)}$$

$$f_i^{e-1} \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.7)}$$

$$f_i^e - f_i^{e-1} \leq \lambda_i^M \left(\alpha_i^e - \alpha_i^{e-1}\right) \qquad \forall i \in I,\ e \in E \qquad \text{(A2.8)}$$

$$\sum_{i \in I} B_i^e \left(\alpha_i^e - \alpha_i^{e-1}\right) + \sum_{i \in I} F_i^e \left(f_i^e - f_i^{e-1}\right) + \sum_{i \in I} \tau_i \left(B_i^e \alpha_i^e + F_i^e f_i^e\right) = \beta_F^e \qquad \forall e \in E \qquad \text{(A2.9)}$$

$$\sum_{i \in I} \left(Q_i^t \left(r_i^\omega - \tilde{r}_i^\omega\right) + C_i^t x_i^\omega\right) + \sum_{a \in A^\omega} GC_a^\omega y_a^\omega - v_T^\omega = \beta_T^t + \left(\sum_{i \in I} P \gamma s_i^\omega\right)_{t=|T|} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.10)}$$

$$G\hat{s}_i^t \leq f_i^e \qquad \forall i \in I,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.11)}$$

$$Gx_i^\omega \leq \phi f_i^e \qquad \forall i \in \tilde{I},\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.12)}$$

$$x_i^\omega = 0 \qquad \forall i \notin \tilde{I},\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T^e,\ e \in E \qquad \text{(A2.13)}$$

$$\gamma s_i^\omega + r_i^\omega - \tilde{r}_i^\omega = \hat{s}_i^{t+1} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \setminus \{t = |T|\},\ i \in I \qquad \text{(A2.14)}$$

$$\hat{s}_i^t + x_i^\omega + \sum_{a \in \Gamma_i^{-\omega}} y_a^\omega = D_i^\omega - v_i^\omega + \sum_{a \in \Gamma_i^{+\omega}} y_a^\omega + s_i^\omega \qquad \forall i \in I,\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.15)}$$

$$s_i^\omega \leq \hat{s}_i^t \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.16)}$$

$$\tilde{r}_i^\omega \leq \hat{s}_i^t \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.17)}$$

$$r_i^\omega \leq \hat{s}_i^{t+1} \qquad \forall \omega \in \Omega^t,\ t \in T \setminus \{t = |T|\} \qquad \text{(A2.18)}$$

$$Gy_a^\omega \leq N_a^\omega \qquad \forall a \in A^\omega,\ \omega \in \Omega^t,\ t \in T \qquad \text{(A2.19)}$$

$$\hat{s}_i^t,\ x_i^\omega,\ r_i^\omega,\ \tilde{r}_i^\omega,\ s_i^\omega,\ y_a^\omega,\ v_i^\omega \in \mathbb{R}^+ \qquad \forall i \in I,\ \omega \in \Omega^t,\ a \in A^\omega,\ t \in T \qquad \text{(A2.20)}$$

A restrição (A2.3) divide o orçamento anual entre a parte dedicada a decisões estratégicas e a parte dedicada a decisões táticas e operacionais.

A restrição (A2.4) define o caráter escalonado das variáveis α. Quando um armazém é ativado, permanece ativado durante o resto do horizonte de planeamento.

As equações (A2.5) e (A2.6) impõem que as dimensões dos armazéns f_i^e se situem entre o mínimo e o máximo permitidos, para cada nó i. Por seu lado, (A2.7) e (A2.8) garantem que esta capacidade se mantenha, pelo menos, igual durante todas as etapas a partir da ativação do armazém.

Por outro lado, (A2.9) associa o custo de construção e manutenção ao parâmetro β_F^e e (A2.10) faz o mesmo para o orçamento tático e operacional, incluindo a possi-

bilidade de exceder o orçamento através de v_T^{ω} e adicionando a venda do excedente como receita no final do horizonte de planeamento.

Utiliza-se (A2.11) para definir o volume máximo de mercadorias que pode ser armazenado em função da capacidade disponível das instalações e, de forma semelhante, a equação (A2.12) limita o volume que pode ser entregue numa situação de emergência. O termo (A2.13) limita ainda quais os nós que podem receber ajuda de emergência diretamente dos fornecedores.

A restrição (A2.14) faz com que as mercadorias que permanecem em *stock* no final de um período — e, portanto, disponíveis para o período seguinte — sejam consistentes entre períodos, após considerar as quantidades utilizadas e repostas.

A equação (A2.15) define o fluxo de mercadorias entre os nós através das ligações da rede de transporte, bem como a procura não satisfeita, caso exista.

O sistema de restrições (A2.16), (A2.17), (A2.18) impede operações de armazenamento ou venda em nós que não dispõem de armazém.

A equação (A2.19) limita a capacidade de transporte através dos arcos em cada cenário de catástrofe.

Por fim, as equações (A2.20) impõem a não negatividade natural de certas variáveis.

A3. Formulação do modelo de geração de cenários de procura global

Conjuntos

- K: número total de cenários considerados.
- Λ: conjunto de propriedades estatísticas que se pretende ajustar na distribuição discreta dos cenários.

Parâmetros

- V_λ: valor empírico da propriedade estatística λ, estimado a partir dos dados históricos dos afetados.
- f_λ: função não linear que calcula o valor da propriedade estatística λ.
- w_λ: importância atribuída ao ajuste da propriedade estatística λ no conjunto Λ.
- ε: tolerância máxima permitida no ajuste agregado das propriedades estatísticas consideradas.
- $V_{\max}$: número máximo de pessoas afetadas observado nos registos históricos.
- $\hat{p}$: probabilidade mínima atribuída a cada cenário.
- H: número total de registos históricos disponíveis.

Variáveis de decisão

- D^k: número total de afetados no cenário k, com $k = 1, \ldots, K$.
- p^k: probabilidade associada ao cenário k.
- κ: fator de dispersão entre cenários consecutivos.

- ΔV_λ^+: desvio positivo entre o valor calculado f_λ e o valor empírico V_λ da propriedade estatística λ.
- ΔV_λ^-: desvio negativo entre o valor calculado f_λ e o valor empírico V_λ da propriedade estatística λ.

Formulação linear

$$\max_{D,p,\kappa} \quad \kappa \tag{A3.1}$$

$$\text{s.a.} \quad f_{\text{mean}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot D^k \tag{A3.2}$$

$$f_{\text{var}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot (f_{\text{mean}} - D^k)^2 \tag{A3.3}$$

$$f_{\text{skew}} = \sum_{k=1}^{K} p^k \cdot \left(\frac{f_{\text{mean}} - D^k}{\sqrt{f_{\text{var}}}} \right)^3 \tag{A3.4}$$

$$f_\lambda - V_\lambda = \Delta V_\lambda^+ - \Delta V_\lambda^-, \quad \forall \lambda \in \{\text{mean}, \text{var}, \text{skew}\} \tag{A3.5}$$

$$\sum_{\lambda \in \Lambda} w_\lambda \cdot \left(\Delta V_\lambda^+ + \Delta V_\lambda^- \right) \leq \varepsilon \tag{A3.6}$$

$$D^k \geq \kappa \cdot D^{k-1}, \quad \forall k = 2, \ldots, K \tag{A3.7}$$

$$D^K \geq V_{\max}, \quad p^K \geq p_{\max} \tag{A3.8}$$

$$\sum_{k=1}^{K} p^k = 1 \tag{A3.9}$$

$$p^k \geq \hat{p}, \quad \forall k = 1, \ldots, K \tag{A3.10}$$

$$D^k \geq 0, \quad \forall k = 1, \ldots, K \tag{A3.11}$$

$$\Delta V_\lambda^+, \ \Delta V_\lambda^- \geq 0, \quad \forall \lambda \in \{\text{mean}, \text{var}, \text{skew}\} \tag{A3.12}$$

Maximizar κ impõe uma separação exponencial entre cenários, promovendo a diversidade e uma representação adequada de eventos extremos.

A restrição (A3.2) define a média da distribuição discreta dos cenários, enquanto (A3.3) estabelece a variância e (A3.4) o coeficiente de assimetria da distribuição. A restrição (A3.5) estabelece a diferença entre o valor calculado de cada propriedade estatística e o seu valor empírico, e (A3.6) limita o desvio total ponderado no ajuste das propriedades estatísticas.

Por seu lado, (A3.7) impõe uma separação exponencial mínima entre cenários consecutivos, controlada pelo fator de dispersão κ.

Através de (A3.8), assegura-se que o cenário de maior magnitude seja, pelo menos, tão grave quanto o maior registo histórico observado e que esse cenário tenha uma probabilidade mínima atribuída.

A equação (A3.9) garante que as probabilidades associadas aos cenários formem uma distribuição válida cuja soma seja igual a um, enquanto (A3.10) impõe um limite inferior às probabilidades de todos os cenários.

O termo (A3.11) garante que as magnitudes dos afetados não sejam negativas e (A3.12) que as variáveis auxiliares de desvio também não o sejam.