

MAPEAMENTO DE SUSCETIBILIDADE ÀS INUNDAÇÕES COM BASE NA ANÁLISE MULTICRITÉRIO (AHP): ESTUDO DE CASO DO DISTRITO DE CHÓKWE, EM MOÇAMBIQUE

Tomé Francisco Chicombo
Instituto Superior Politécnico de Gaza, Lionde, Gaza, Moçambique
tchicombo@gmail.com

Alecir Antônio Maciel Moreira
Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Belo Horizonte, MG, Brasil
alecirmoreira@hotmail.com

RESUMO

Este estudo procurou identificar os níveis de suscetibilidade às inundações no distrito de Chókwe (Moçambique), em um contexto de aumento de eventos extremos derivados das mudanças do clima. O Chókwe está localizado numa planície de inundação da bacia hidrográfica do rio Limpopo. Para a elaboração dos mapas foram aplicados pesos conforme a metodologia *Analytical Hierarchy Process* (AHP), proposta por Saaty na década de 1970. A elaboração do mapa foi realizada usando-se o *ArgGis* 10.4.1. A altitude foi o fator de maior influência. Outros fatores que contribuíram de forma significativa para a formação da suscetibilidade nessas áreas foram: a proximidade de canais de drenagem e o índice topográfico de umidade.

Palavras-chave: SIG. Métodos multicritério. Mapa de suscetibilidade.

FLOOD SUSCEPTIBILITY MAPPING BASED ON MULTI-CRITERIA ANALYSIS (AHP) AND GIS: CASE OF CHÓKWE DISTRICT – MOZAMBIQUE

ABSTRACT

This study aimed to identify flood levels susceptibility in the district of Chokwe (Mozambique) in a context in which it is expected that there will be an increase in extreme events as a result of climate change. Chókwe district is located on a floodplain in the Limpopo River basin. To prepare the mapping, weights were applied according to the Analytical Hierarchy Process (AHP) methodology, proposed by Saaty in the 1970s. The map was carried out by ArgGis 10.4.1. Altitude was the most influential factor. The other factors that most significantly contributed to the formation of susceptibility were: the proximity of drainage channels and the Topographic Wetness Index (TWI).

Keywords: SIG. Multicriteria methods. Susceptibility map.

INTRODUÇÃO

As mudanças do clima causadas pelo aquecimento global constituem uma realidade cada vez mais evidente. Projeções do Banco Mundial (2010) e IPCC (2021) apontam que um aumento da temperatura global de 1,5° pode ser excedido em meados deste século. Nesse cenário, espera-se o agravamento da ocorrência de extremos climáticos e meteorológicos, tais como queda de grandes volumes de precipitação em curtos períodos de tempo, flutuações das de monções, secas pronunciadas, ondas de calor, dentre outros. Assim sendo, espera-se que as condições geográficas naturais e aquelas derivadas da ação humana criem sintonias finas, amplificando a suscetibilidade e a vulnerabilidade à ocorrência de desastres. As inundações constituem a categoria de “desastre que mais prevalece no mundo, com maiores perdas econômicas, afetando um número elevado de pessoas” (SUZEN e LACRUZ, 2015). Segundo o relatório da Organização das Nações Unidas – ONU (2014) “Perspectivas de Urbanização Mundial”, espera-se o agravamento da condição de vulnerabilidade populacional às inundações, uma vez que se projeta o crescimento dos níveis de urbanização dos atuais 54% para 66% da população global até o ano de 2050.

Do ponto de vista conceitual, a inundação, segundo Mandych (2010),   uma consequência da migra o de uma fronteira entre os corpos terrestres e aquáticos, refletindo a intera o normal da atmosfera, hidrosfera e litosfera. Conforme o autor, os principais fatores responsáveis pela gera o de inunda es são: i) processos geofísicos interativos entre a atmosfera, hidrosfera e litosfera; e ii) a característica geográfica da área inundada. Especificamente, pode-se destacar como causas, a "intensidade da dura o das precipita es, o derretimento de neve, o desmatamento, práticas inadequadas do uso do solo, a sedimenta o de leitos e obstru o de canais de rios" (SUZEN e LACRUZ, 2015). São, portanto, condicionantes de origem natural e/ou antrópica. Dentre as condicionantes naturais, podem-se destacar a intensidade e a dura o das precipita es, a morfologia dos canais fluviais e da sua planície de inunda es, a condi o topográfica, bem como a dinâmica de vertentes. Dentre as causas de origem antrópica, podem-se destacar as atividades de constru o e urbaniza o, as práticas agrícolas, o desflorestamento, as mudanças do uso da terra e a manipula o dos canais de drenagem.

Na  rea objeto deste estudo, as inunda es ocorrem numa vasta planície de inunda o, derivadas das cheias do rio Limpopo. Observa-se o extravasar do leito do rio, quando a sua capacidade de vazão   excedida como resultado da ocorrência de chuva   montante, principalmente na África do Sul e Zimbábue. Os últimos eventos de inunda es ocorridos na região foram registrados nos anos 2000 e 2013. Entretanto, frequentemente têm-se verificado eleva o dos níveis do rio, sem que ocorra, necessariamente, o transbordo das  guas. Este comportamento tem deixado as popula es sempre apreensivas   época chuvosa. Por outro lado, nos principais centros urbanos da região, ocorrem eventos de alagamento caracterizados pelo acúmulo momentâneo de águas em determinados locais, devido   inexistência ou ao funcionamento deficiente do sistema de drenagem. Estes eventos não são relacionados com as cheias do rio Limpopo.

Os problemas relacionados às inunda es trazem uma série de desafios   sociedade. Há constante necessidade de tomada de medidas para evitar perdas de vidas humanas e danos a infraestruturas e na agropecuária, por exemplo. Um desses desafios   a identifica o de áreas sujeitas às inunda es. Esta identifica o permite que desenvolvam-se a es que vão desde a retirada das popula es ribeirinhas até a ado o de medidas de constru o de resiliência social.

A identifica o de áreas propensas às inunda es   vital para o gerenciamento da bacia hidrográfica, a fim de se ter um desenvolvimento adequado e sustentável (Tehrany *et al.*, 2014). Trata-se de um recurso abrangente que permite prever e prevenir as inunda es onde elas ocorrem regularmente (Sakmongkoljitt *et al.*, 2021). O mapeamento tem o potencial de viabilizar opera es de resgate, criar rotas e procedimentos de migra o e planejar o futuro do uso da terra (Mahmoud e Gan, 2018). Os mapas produzidos podem, ainda, auxiliar o planejamento urbano nas regiões suscetíveis (Tehrany *et al.*, 2015).

O mapa de suscetibilidade pode, ainda, ser usado para oferecer informa es de alerta precoce de longo prazo para melhorar a gestão pública e prepara o da sociedade civil. Isso permitirá esclarecer o público sobre as áreas altamente suscetíveis a inunda es e subsidiar a cria o e aprimoramento das políticas atuais de uso da terra para evitar danos futuros (Dano *et al.*, 2019). Para o caso de planejadores e engenheiros, os mapas ajudarão na escolha de locais adequados para implementa o de empreendimentos para auxiliar na mitiga o de enchentes (Pradhan, 2009).

O mapeamento da suscetibilidade às inunda es envolve a combina o de diversas variáveis. Nessa  tica, os métodos multicritério são uma soluço viável. Existem vários estudos que aplicam metodologias para selecionar as melhores estratégias para mitiga o de risco de inunda o. Esses métodos, quando realizados em SIG, viabilizam um planejamento espacial inteligente ao identificar a importância relativa dos fatores condicionantes a inunda es (Nachappaa *et al.*, 2020). Segundo Aruldoss *et al.* (2013), eles permitem a sele o da melhor alternativa, estruturar e resolver problemas de decisão e planejamento envolvendo múltiplos critérios.   necessário que, para cada fator de suscetibilidade seja atribuído um peso diferente, salientando que cada um deles contribui de forma diferente para a ocorrência da inunda o.

Neste estudo optou-se pelo método AHP para atribui o dos pesos. A escolha deveu-se   sua simplicidade de execu o, clareza no procedimento lógico matemático, escalas de medi o, facilidade de implementa o, possibilidade de síntese de julgamentos com fun es de fusão e possibilidade de análise sensitiva. Além disso, existe, no meio científico, grande adesão a este método.

Este método foi desenvolvido por Thomas Lorie Saaty, nos Estados Unidos da América, na década de 1970. Ele consiste em um dos métodos multicritérios de tomada de decisão, onde os fatores são

organizados de forma hierárquica. Essa hierarquização permite construir uma visão global das relações entre dois fatores. No método, a organização das metas, atributos, problemas e partes interessadas em uma hierarquia tem como propósito fornecer uma visão geral dos relacionamentos complexos, reduzindo a subjetividade no processo de atribuição de pesos aos fatores selecionados.

No método, de acordo com Moghadas *et al.* (2019), a ponderação de indicadores ou dimensões individuais reflete a importância relativa de cada um, referente ao assunto sob escrutínio, quando há conhecimento suficiente sobre a importância relativa de indicadores. Segundo esses autores, a ponderação desigual pode fornecer uma avaliação empírica baseada na opinião precisa de especialistas locais. Portanto, aplicando um método de ponderação desigual, é possível integrar o conhecimento de especialistas de diferentes disciplinas (avaliação qualitativa), numa análise teórica e quantitativa.

Segundo Lima e Cerri (2012), o método AHP divide o problema geral em avaliações de menor importância, mantendo simultaneamente a participação desses problemas menores na decisão global, permitindo que estes sejam solucionados e depois integrados, representando a decisão do problema inicial. Para Kazakis *et al.* (2015), o método é usado para analisar problemas complexos que envolvam um elevado número de objetivos ou critérios inter-relacionados. Segundo Vaidya e Kumar (2006), desde a sua criação, é uma ferramenta usada amplamente por decisores e pesquisadores, sendo uma das mais usadas no processo de tomada de decisões multicritérios.

Assim, este estudo propôs o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações no distrito de Chókwe, em Moçambique, visando definir diretrizes para que a ocupação do solo seja feita com o conhecimento de áreas de risco. Nesse mapeamento, assume-se que a suscetibilidade está mais associada às condições naturais do terreno que contribuem para a elevação do nível d'água nos canais de drenagem, contribuindo para o transbordamento e consequentemente a inundação de determinadas áreas do distrito.

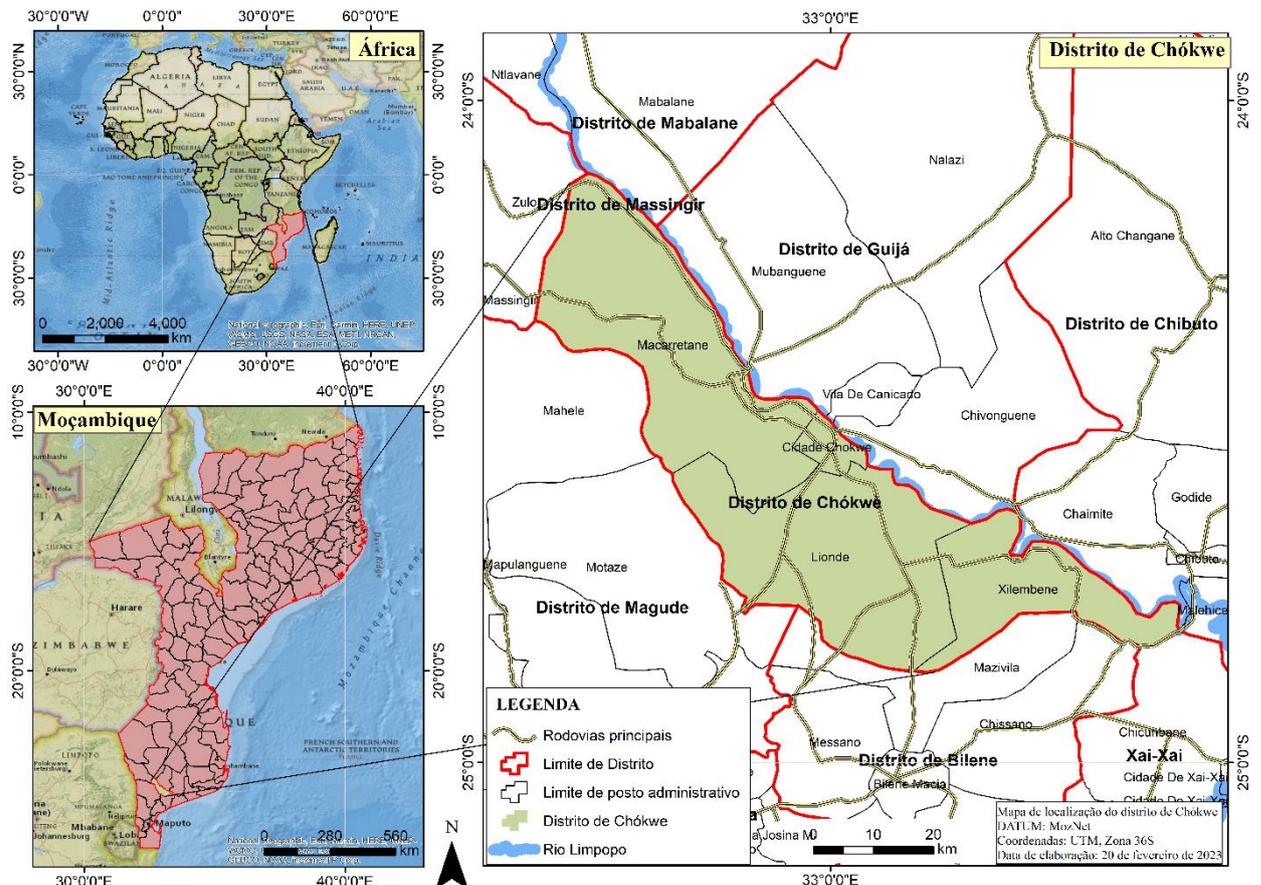
ÁREA DE ESTUDO

O Distrito de Chókwe foi criado em 1975 pelo decreto 6/75 de 18 de janeiro, e foi classificado por distrito de 1ª classe pela resolução 8/87 de 25 de abril, em 1987. Tem como sede a cidade de Chókwe que ascendeu à categoria de distrito municipal em 1992, através da lei 3/94. Por seu turno, esta lei foi revogada pela lei 2/97, que tornou a sede do distrito uma autarquia. Conforme seja um distrito do interior, seu processo de urbanização sempre esteve relacionado com o “estabelecimento de pequenos centros comerciais cujo desenvolvimento ficou limitado devido à fraca rede de transportes” (BAIA, 2011). O distrito, após a independência do país, foi beneficiário das principais reformas econômicas do programa de reabilitação econômica. Segundo Baia (2011), essas reformas estavam orientadas para o meio rural, como os programas de abastecimento do campesinato, formação de extensionistas rurais para prestar apoio técnico ao setor agrícola familiar, legalização do setor privado na agricultura e no comércio, tornando o distrito em um foco importante para produção agrícola.

Chókwe detém potencialidades agroclimáticas para a produção agrícola, principalmente para as culturas de arroz e tomate e possui um dos maiores regadios da África. Sua grande potencialidade na aquicultura tem contribuído significativamente para a melhoria das condições de vida das populações, aumentando a produção de alimentos piscícolas no interior do país.

Chókwe está localizado na província de Gaza, a 24°05' e 24°48' latitude sul e 32°33' e 33°35' longitude oeste, na região sul de Moçambique, e possui uma superfície de 2600 km², no curso médio do rio Limpopo. Faz fronteira com os distritos de Mabalane a norte, de Gujá a norte e nordeste, Chibuto a leste, Limpopo e Bilene a sul e Magude e Massingir a oeste. A oeste, também faz fronteira com a província de Maputo. A Figura 1 ilustra o mapa de sua localização.

Figura 1 – Distrito de Chókwe: mapa de localização, 2023



Elaboração: os autores, 2023; Fonte: *Humanitarian Data Exchange*.

O distrito de Chókwe faz parte da bacia hidrográfica do rio Limpopo que abrange quatro países, a saber: Botswana, Moçambique, África do Sul e Zimbabué. Segundo o relatório “Data Sharing and *Early Warning Flood Forecasting in the Limpopo River Basin*” (CRIDF 2018). Moçambique abriga a parte baixa da bacia.

Spaliviero *et al.* (2014) apontam que as principais mudanças que ocorreram na bacia hidrográfica do Limpopo, desde o final do período Jurássico e início do Cretáceo foram devidos a sucessivos eventos tectônicos que demonstram a conformação de drenagem aparentemente abandonada do paleo-Limpopo nos trechos superior e médio deste rio, que hoje constituem áreas propensas a inundações preferenciais em caso de grandes chuvas.

A dinâmica da atmosfera de grande escala atuante na região é influenciada pelo posicionamento da Zona de Convergência Intertropical – ZCIT. Por outro lado, de acordo com Uele *et al.* (2017) a variabilidade sazonal e mensal das chuvas, na região sul de Moçambique, é condicionada pela passagem de ciclones tropicais, sistemas frontais e a influência da corrente quente do canal de Moçambique. Trata-se da corrente quente Moçambique-Agulhas que no seu movimento para sul, escoar água quente e ar úmido da zona equatorial, produzindo um clima quente e úmido e consequentemente, condicionando o aumento das chuvas (Reason, 2001). No regime climático local, os maiores totais de precipitação ocorrem no litoral (850-1000 mm anuais), durante os meses do verão austral (dezembro a fevereiro). Os totais pluviométricos se reduzem substancialmente ao adentrar o continente (aproximadamente 550 mm anuais).

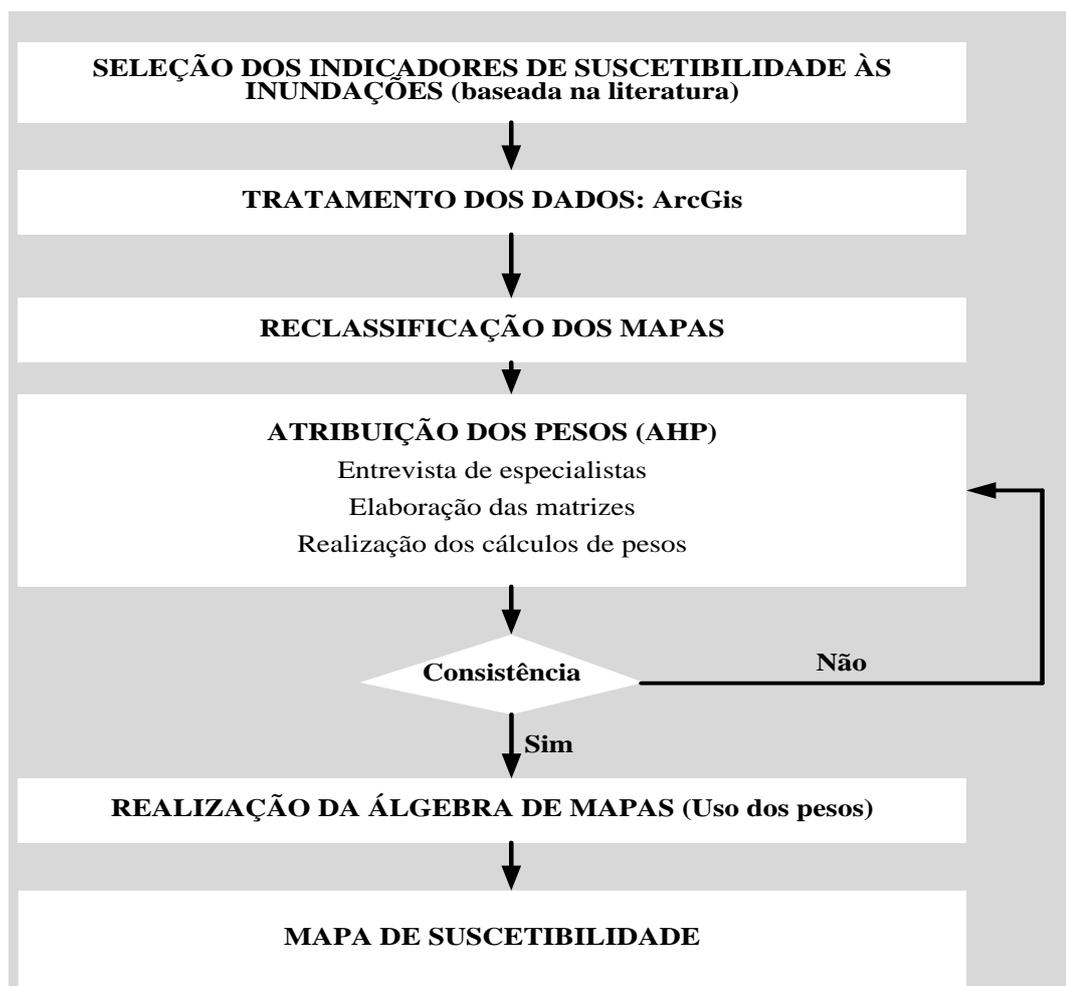
Não obstante, graves inundações foram registradas nos últimos 60 anos na bacia (em 1955, 1967, 1972, 1975, 1977, 1981, 2000 e 2013). Estas inundações foram, geralmente, causadas por chuvas fortes a montante. Rio abaixo elas afetaram, particularmente, as comunidades de baixa renda e as principais atividades econômicas - agricultura, silvicultura, mineração e turismo.

Os eventos de inundações no distrito de Chókwe, principalmente os de grande magnitude como o caso do último ocorrido em 2013, tiveram como consequência perdas humanas, na pecuária e na agricultura. Elas promoveram a insegurança alimentar nas populações e acarretaram em desnutrição, desabrigo das populações, destruição de hospitais, salas de aulas e material de ensino, surgimento de doenças como a malária e diarreias, perda dos meios de subsistência e de renda das populações, interrupção de vias de acesso e telecomunicações entre outras, segundo dados apresentados em relatórios de *United Nations Resident Coordinator Office* (UNRCO, 2013) e de *Global Facility for Disaster Reduction and Recovery* (GFDRR, 2014).

METODOLOGIA

O material cartográfico foi elaborado a partir de dados geológicos, e de solo, obtidos no Ministério de Terra e Ambiente de Moçambique nas escalas de 1: 500 000, 1:1 000 000. A mancha de inundação foi elaborada através da vetorização de um mapa pré-existente de Spaliviero *et al.*, (2014). Os mapas de altitude, declividade, distância de drenagem, índice topográfico de umidade (TWI) (Figura 3), foram obtidos através do processamento do modelo digital de elevação (MDE), derivado dos dados topográficos do radar *Phased Array L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) acoplado no satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS), com uma resolução de 12,5 metros. A Figura 2 apresenta os procedimentos seguidos na elaboração do mapa de suscetibilidade às inundações no distrito de Chókwe.

Figura 2 - Procedimentos metodológicos



Elaboração: os autores, 2023.

Escolha dos parâmetros

Ao consultar a vasta literatura específica, fica evidente que não existe uma concordância exata sobre quais parâmetros devem ser usados nas avaliações de suscetibilidade a inundações. Entretanto, existem certos critérios considerados como indispensáveis nessa análise. A ausência de um ou outro critério pode estar relacionada com a falta de dados ou até preferências do autor, atendendo as características da área de estudo.

No mapeamento de suscetibilidade a inundações, fatores topológicos, geológicos e hidrológicos podem ser usados (Tehrany *et al.*, 2015). Nesse estudo, os aspectos hidrológicos, que contemplam um conjunto de processos que ocorrem tanto nas vertentes, quanto no canal fluvial e na planície de inundação, foram considerados. Aspectos geomorfológicos atuais e pretéritos do canal e da planície de inundação revelam sua evolução do ponto de vista de sistêmico (Douhi e Santos, 2018) e contribuem significativamente para o entendimento da dinâmica da paisagem.

Não existindo uma regra específica para determinar quantos fatores condicionantes são suficientes na análise de suscetibilidade a inundações, o presente estudo se baseou em estudos já realizados e na disponibilidade de dados para construir sua análise. Entretanto, é importante pontuar a existência de um debate sobre o maior ou menor número de fatores em relação à precisão dos mapas de suscetibilidade às inundações. A seguir são apresentados os parâmetros usados no presente estudo.

Altitude

Otokiti (2019) define a altitude como a altura de um determinado lugar acima do nível do mar. Para o autor, trata-se de um fator primário que controla a ocorrência de inundações em uma determinada área. A altitude, segundo Fernandez e Lutz (2010), sempre desempenhou um papel importante no mapeamento da suscetibilidade de inundações através do movimento horizontal da água na paisagem. Assim, a água tende a se acumular nas áreas mais baixas e planas (Mariappan *et al.*, 2019). O movimento e profundidade das inundações são determinados pela altitude. Zonas baixas e planas inundam mais rapidamente em relação àquelas elevadas e íngremes, dado o fato de que altitudes mais baixas são mais suscetíveis a inundações repentinas pelo acúmulo simultâneo de água da chuva (Waqas *et al.*, 2021). Em outras palavras, a baixa elevação é um bom indicador de áreas com alto potencial de acumulação de água (Cabrera e Lee, 2019).

Geologia

A geologia de uma área tem grande influência nas inundações, posto que as propriedades hidráulicas do leito rochoso podem influenciar o potencial de inundação. Rochas altamente porosas, fraturadas e permeáveis contribuem para a infiltração da água da chuva, reduzindo assim o potencial de inundação, enquanto o inverso é visto com leito rochoso menos poroso, compacto e impermeável (Nandi *et al.*, 2016). Desse modo, pode-se afirmar que a geologia atua como um fator de permeabilidade e no escoamento superficial na inundação de bacias hidrográficas (Haghizadeh *et al.*, 2017). Dito de outra forma, a principal característica das superfícies de escoamento superficial é a capacidade de absorção. Da mesma forma, em comparação com uma camada permeável, o solo impermeável causa escoamento superficial rápido e significativo (Waqas *et al.*, 2021).

Declividade

A declividade representa o grau de inclinação de uma feição em relação ao plano horizontal. Ela influencia a direção e volume das águas superficiais de um determinado lugar, pois regula a velocidade do escoamento superficial e a percolação vertical que afeta a suscetibilidade a inundações (Nachappaa *et al.*, 2020). Um gradiente de declividade baixo é altamente vulnerável a ocorrências de inundações em comparação com as declividades elevadas. Isso ocorre porque a chuva ou o excesso de água do rio sempre se acumulam em uma área onde a declividade é baixa (Ouma e Tateishi, 2014; Gigovic *et al.*, 2017; Mariappan *et al.*, 2019). De acordo com Rahmati *et al.* (2015), o fator declividade deve ser considerado na determinação de áreas propensas às inundações.

Topographic Wetness Index (TWI)

O índice topográfico de umidade (TWI) é um modelo conceitual simplificado de processos hidrológicos que fornece indicações sobre características topográficas de umidade (Nandi *et al.*, 2016). Trata-se de um indicador que visualiza a distribuição espacial do teor de água do solo, permitindo a identificação de áreas com saturação hídrica, usando elementos topográficos para onde a água pode fluir ou se acumular. Representa, segundo Lee e Kim (2021), o grau de movimento de sedimentos da erosão e do escoamento superficial. Segundo Moore *et al.* (1991), com este índice pode-se descrever quais regiões tendem à saturação, conhecendo a sua área de contribuição e as características da declividade local. Assim, tornou-se possível, neste estudo, visualizar as áreas com alto teor de acúmulo de água, o que, segundo Yousefzadeh *et al.* (2019), contribui para descrever o solo e estimar as condições físicas e características hidrológicas do lugar. Áreas com alto índice de umidade ocorrem onde há uma combinação de baixa declividade e alto acúmulo de fluxo, podendo indicar locais com maior risco de inundação (Quinn *et al.*, 1995). Valores altos representam depressões de drenagem (planícies com baixo gradiente de declividade) com solo úmido, enquanto os baixos representam cristas e cumes (terras altas com alto declive), ou seja, quanto maior o valor de TWI, as áreas serão mais suscetíveis a inundações (Lappas e Kallioras, 2019). O mapa TWI determina o efeito da topografia na quantidade de níveis saturados para criar escoamentos, sendo considerado um índice útil na investigação do potencial de inundação das bacias hidrográficas (Haghizadeh *et al.*, 2017).

O TWI foi obtido a partir do MDE, pela equação $TWI = [a/\tan(b)]$. Entretanto, antes foram obtidas as camadas de direção e acúmulo de fluxo, declividade em graus, radianos da declividade, tangente da declividade e o acúmulo de fluxo escalado.

Distância de canais de drenagem/rio

A rede de drenagem consiste em sistemas de canal de águas residuais, sistemas de águas pluviais e sistema geral (Gigovic *et al.*, 2017). Um fator importante na inundação de terras adjacentes é a distância do rio (Haghizadeh *et al.*, 2017). Particularmente, a área próxima aos rios é mais propensa a inundações, pois a água flui de altitudes mais altas e se acumula em elevações mais baixas. Principalmente durante chuvas fortes, as áreas próximas a locais de água ficam inundadas, como represas, lagoas e lagos. Além disso, os terrenos próximos aos corpos d'água são em sua maioria planos (Waqas *et al.*, 2021). O transbordamento dos rios é uma das principais causas para o início das enchentes. Muitas vezes, as inundações começam no leito do rio ou canal e se expandem na região. Assim, áreas próximas a corpos d'água são áreas de risco muito alto para a ocorrência de inundações, sendo que o efeito desse critério é reduzido com o aumento da distância (Kazakis *et al.*, 2015; Gigovic *et al.*, 2017).

O mapa de distância de drenagem foi obtido a partir do MDE, que foi recortado de acordo com a área de estudo (*Extract by Mask*) e foram preenchidas as depressões espúrias. Em seguida, foi criada uma camada de direção de fluxo de cada ponto para a sua encosta íngreme. A partir dessa camada, foi criada uma camada de acúmulo de fluxo. Nessa camada, alguns fluxos não se encontram conectados. Através da operação *Stream Link* os fluxos são interligados, e posteriormente é criada uma ordem de drenagem onde o fluxo é identificado a partir do seu tributário. Por fim foi criada a área de influência, conforme distâncias (em metros) pré-estabelecidas a partir do rio.

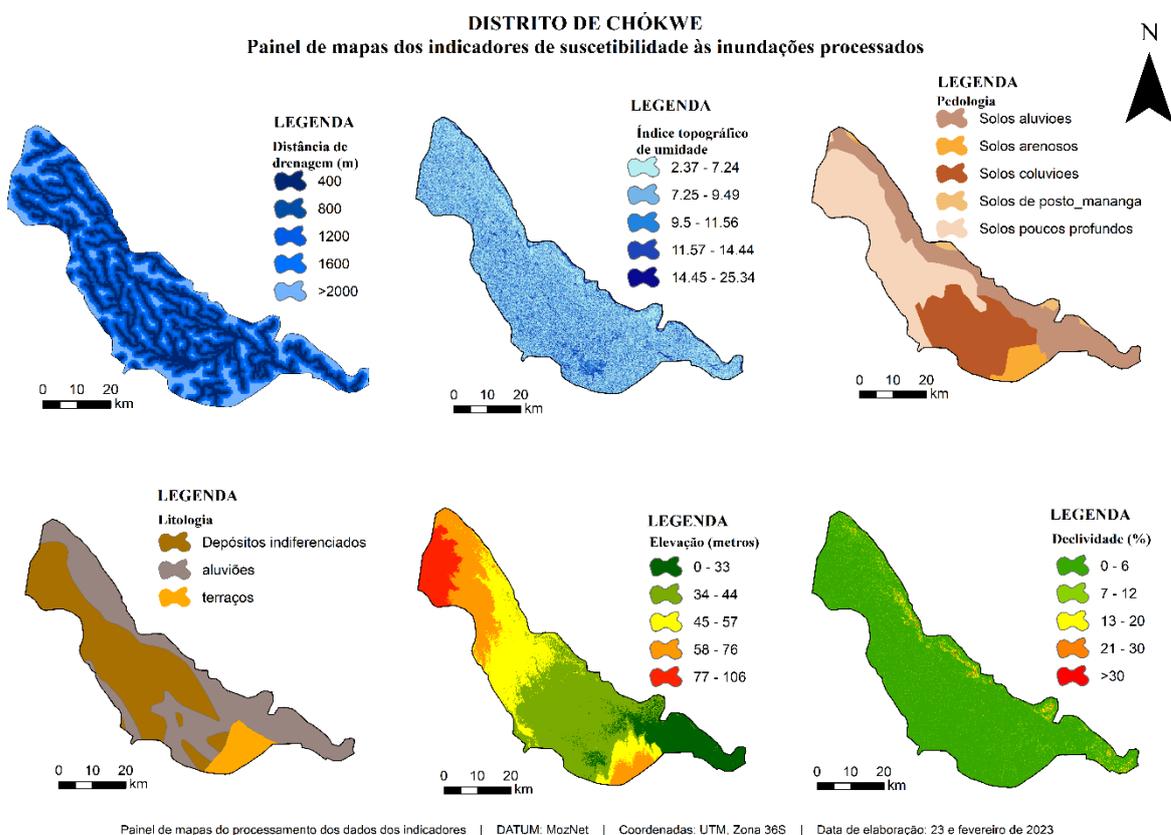
Caraterísticas dos solos

A composição do solo afeta significativamente as inundações, pois a água é rapidamente drenada pelos solos arenosos onde ocorrem poucos escoamentos. Este fator desempenha um papel importante no escoamento superficial e fluxo subterrâneo. As características litológicas e pedológicas têm um efeito importante na quantidade de permeabilidade da água no solo ou no escoamento direto e, conseqüentemente, no equilíbrio do fluxo do rio ou na inundação (Haghizadeh *et al.*, 2017). Isso significa que as áreas de solos argilosos influenciam mais as inundações. A probabilidade de risco de inundação aumenta com a diminuição da penetração no solo, permitindo o aumento do escoamento superficial (Mariappan *et al.*, 2019; Waqas *et al.*, 2021). Quanto maior a taxa de infiltração, menores as chances de ocorrências de inundações (Islam *et al.*, 2021). Segundo Ghazavi *et al.* (2010); Santos e Pereira (2013), a maior presença de argila no solo é acompanhada pela diminuição da infiltração. Em outras palavras, solos arenosos possuem taxas de infiltração mais elevadas que os solos argilosos.

Saliente-se ainda que, o grau em que a infiltração será reduzida depende do tamanho das partículas dos materiais em suspensão, da carga total de sedimentos e da geometria dos poros dos materiais subjacentes, segundo Ghazavi *et al.*, (2010). Os solos ricos em argila são em sua maioria impermeáveis e causam mais escoamento superficial, potencializando a ocorrência de inundações (Pham *et al.*, 2020). Solos argilosos são, portanto, propensos a inundações. Solos constituídos majoritariamente por areias são mais permeáveis e com relativa facilidade de infiltração, pois podem absorver abundante água superficial (Lappas e Kallioras, 2019).

Os dados obtidos nos fatores descritos anteriormente foram processados com ajuda do aplicativo ArcGis 10.4.1, tendo sido obtida a sequência de mapas apresentados na Figura 3. Os mapas representam a caracterização espacial de cada fator de suscetibilidade às inundações.

Figura 3 - Distrito de Chókwe: mapa de processamento dos dados indicadores de suscetibilidade, 2023



Elaboração: os autores, 2023.

Cálculo dos pesos dos indicadores e reclassificação dos critérios

A aplicação do método AHP serviu para a atribuição dos pesos dos parâmetros de suscetibilidade às inundações. Aplicando-se o método AHP e atribuindo-se aos fatores, valores de 1 a 9, foi possível determinar a importância relativa de cada um em relação ao outro. Neste caso, especialistas participaram na avaliação subjetiva dos pares de fatores numa escala de 9 pontos, via inquérito. Um formulário foi distribuído para 3 participantes que opinaram sobre qual a importância de uma variável em relação a um par de fatores. Tratou-se de um geólogo, um professor de geografia especialista em vulnerabilidades socioambientais e um técnico de gestão de desastres naturais ao nível do serviço distrital e infraestruturas de Chókwe. Os entrevistados responderam ao questionário aplicando as ponderações aos indicadores ou dimensões individuais, refletindo a importância relativa de cada um, referente às inundações, segundo o seu conhecimento da importância relativa dos indicadores. Por exemplo, na comparação de um par de fatores de inundações apresentados no quadro, o entrevistado avaliou até que ponto um fator é mais relevante nas inundações em relação ao outro, considerando as

escalas estabelecidas. O Quadro 1 representa o julgamento que apresentou maior consistência entre os três. Em relação às diferenças de julgamento do grupo, Saaty (1987), considera que elas podem ser resolvidas por meio de uma verificação de consistência. No caso de julgamentos radicalmente diferentes, realizados em certas posições da matriz, estes são testados com base na medição da consistência. Assim, o julgamento que produzir maior consistência no problema geral é considerado.

Quadro 1 - Julgamento dos pesos dos parâmetros, 2023

Comparação da importância relativa																		
1 = Iguamente importantes			3 = Moderadamente mais importante						5 = Fortemente mais importante									
			7 = Muito fortemente mais importante						9 = Extremamente mais importante									
	9	8	7	6	5	4	3	2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	
TWI											X							Elevação
TWI					X													Pedologia
TWI					X													Litologia
TWI							X											Distância Drenagem
TWI							X											Declividade
Elevação			X															Pedologia
Elevação					X													Litologia
Elevação							X											Distância Drenagem
Elevação					X													Declividade
Pedologia							X											Litologia
Pedologia												X						Distância Drenagem
Pedologia											X							Declividade
Litologia													X					Distância Drenagem
Litologia											X							Declividade
Distância Drenagem					X													Declividade

Elaboração: os autores, 2023.

Os valores do Quadro 1 foram introduzidos numa matriz que, a partir de operações matemáticas, permitiu cálculo do peso de cada indicador, através da normalização da matriz e cálculo de valor máximo *Eigen* (Tabela 1). O preenchimento da matriz teve como base a simetria inversa da matriz. Por exemplo, se um indicador é cinco vezes mais relevante que o outro, então, o último é 1/5 tão relevante quanto o primeiro indicador. Neste caso, os elementos de quaisquer duas matrizes, colunas ou linhas serão proporcionais.

Tabela 1 - Matrizes de cálculo de peso dos indicadores

MATRIZ DE COMPARAÇÃO PAREADA							
Fator	Elevação	Distância de drenagem	Declividade	Pedologia	Litologia	TWI	
Elevação	1	3	5	7	5	3	
Distância de drenagem	1/3	1	5	5	5	3	
Declividade	1/5	1/5	1	3	3	1/3	
Pedologia	1/7	1/5	1/3	1	3	1/5	
Litologia	1/5	1/5	1/3	1/3	1	1/5	
TWI	1/3	1/3	3	5	5	1	
Soma	2,20	4,93	14,66	21,33	22,00	7,73	
MATRIZ NORMALIZADA							
Fatores	Elevação	Distância de drenagem	Declividade	Pedologia	Litologia	TWI	Média (Pesos)
Elevação	0,45	0,61	0,34	0,33	0,23	0,39	0,39
Distância de drenagem	0,15	0,20	0,34	0,23	0,23	0,39	0,26
Declividade	0,09	0,04	0,07	0,14	0,14	0,04	0,09
Pedologia	0,06	0,04	0,02	0,05	0,14	0,03	0,06
Litologia	0,09	0,04	0,02	0,02	0,05	0,03	0,04
TWI	0,15	0,07	0,20	0,23	0,23	0,13	0,16

Elaboração: os autores, 2023.

Após este procedimento foram realizados a verificação da consistência do julgamento e, por último, o cálculo das prioridades globais das alternativas, cujos resultados são apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 - Cálculo da razão da consistência, 2023

AVALIAÇÃO DA CONSISTÊNCIA DO JULGAMENTO						
Fator	Elevação	Distância de drenagem	Declividade	Pedologia	Litologia	TWI
Elevação	1,00	3,00	5,00	7,00	5,00	3,00
Distância de drenagem	0,33	1,00	5,00	5,00	5,00	3,00
Declividade	0,20	0,20	1,00	3,00	3,00	0,33
Pedologia	0,14	0,20	0,33	1,00	3,00	0,20
Litologia	0,20	0,20	0,33	0,33	1,00	0,20
TWI	0,33	0,33	3,00	5,00	5,00	1,00
Pesos	0,39	0,26	0,09	0,06	0,04	0,16

	Elevação	Distância de drenagem	Declividade	Pedologia	Litologia	TWI	Soma	Prioridades	Resultado
Elevação	0,39	0,77	0,43	0,39	0,20	0,48	2,67	0,39	6,83
Distância de drenagem	0,13	0,26	0,43	0,28	0,20	0,48	1,78	0,26	6,92
Declividade	0,08	0,05	0,09	0,17	0,12	0,05	0,56	0,09	6,45
Pedologia	0,06	0,05	0,03	0,06	0,12	0,03	0,34	0,06	6,13
Litologia	0,08	0,05	0,03	0,02	0,04	0,03	0,25	0,04	6,21
TWI	0,13	0,09	0,26	0,28	0,20	0,16	1,12	0,16	6,98
							Total		39,51
								RI	1,24
								n	6,00
								Lambda max	6,59
								IC	0,12
								CR	0,09

Elaboração: Autores, 2023.

O cálculo da razão serviu para verificar a consistência dos julgamentos. O cálculo do índice de consistência foi realizado com base na seguinte fórmula:

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

onde, λ_{\max} representa o maior autovalor e n é o número de fatores. Deste modo, a razão do valor de consistência foi obtida pela fórmula:

$$RC = \frac{IC}{IR} \quad (2)$$

onde IC é o índice de consistência e IR é o índice randômico, cujos valores dependem do número de fatores envolvidos na comparação pareada, segundo a Tabela 3.

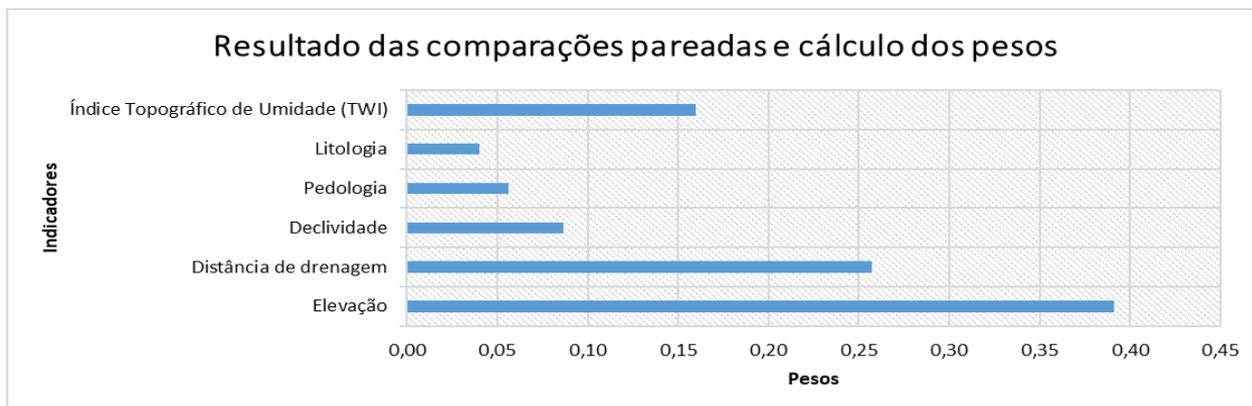
Tabela 3 - Valores do índice de consistência

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
IR	0	0	0,58	0,9	1,12	1,24	1,32	1,41	1,45	1,49	1,51

Fonte: Saaty (1987)

A Figura 4 representa um gráfico com os pesos adotados para a elaboração dos mapas de suscetibilidade às inundações no distrito de Chókwe, a partir do julgamento considerando o mais consistente.

Figura 4 - Gráfico de pesos dos fatores de suscetibilidade a partir do julgamento adotado, 2023



Elaboração: os autores, 2023.

A confrontação dos parâmetros de suscetibilidade levou em consideração as características específicas da região (uma vasta planície de inundação). Todavia, tendo em conta o caráter subjetivo em que é feita a avaliação dos fatores, foi necessário realizar a verificação da consistência. A verificação foi feita através do cálculo do índice de consistência e da razão da consistência. Nesse caso, o julgamento adotado foi o que teve razão de 0,09, estando de uma margem de segurança ($< 0, 1$). Para Satty (1987), se alguém tiver uma escala para uma propriedade de alguns indicadores e medi-la neles, então seus pesos relativos em relação a essa propriedade serão fixos. Entretanto, como os indicadores podem estar envolvidos em mais de uma comparação e não existe uma escala padrão, mas atribuem-se valores relativos através de julgamento, podem ocorrer inconsistências. Assim, o objetivo de se desenvolver um quadro abrangente de critérios depende da admissão de alguma inconsistência.

Dessa forma, para efeitos de interpretação e mapeamento, foi elaborado o Quadro 2. Os pesos constantes na última coluna do Quadro 2 foram usados na elaboração do mapa de suscetibilidade da Figura 6 através da sobreposição dos mapas dos indicadores com ponderação dos pesos.

Quadro 2 - Classes de Critérios e subcritérios de suscetibilidade às inundações, 2023

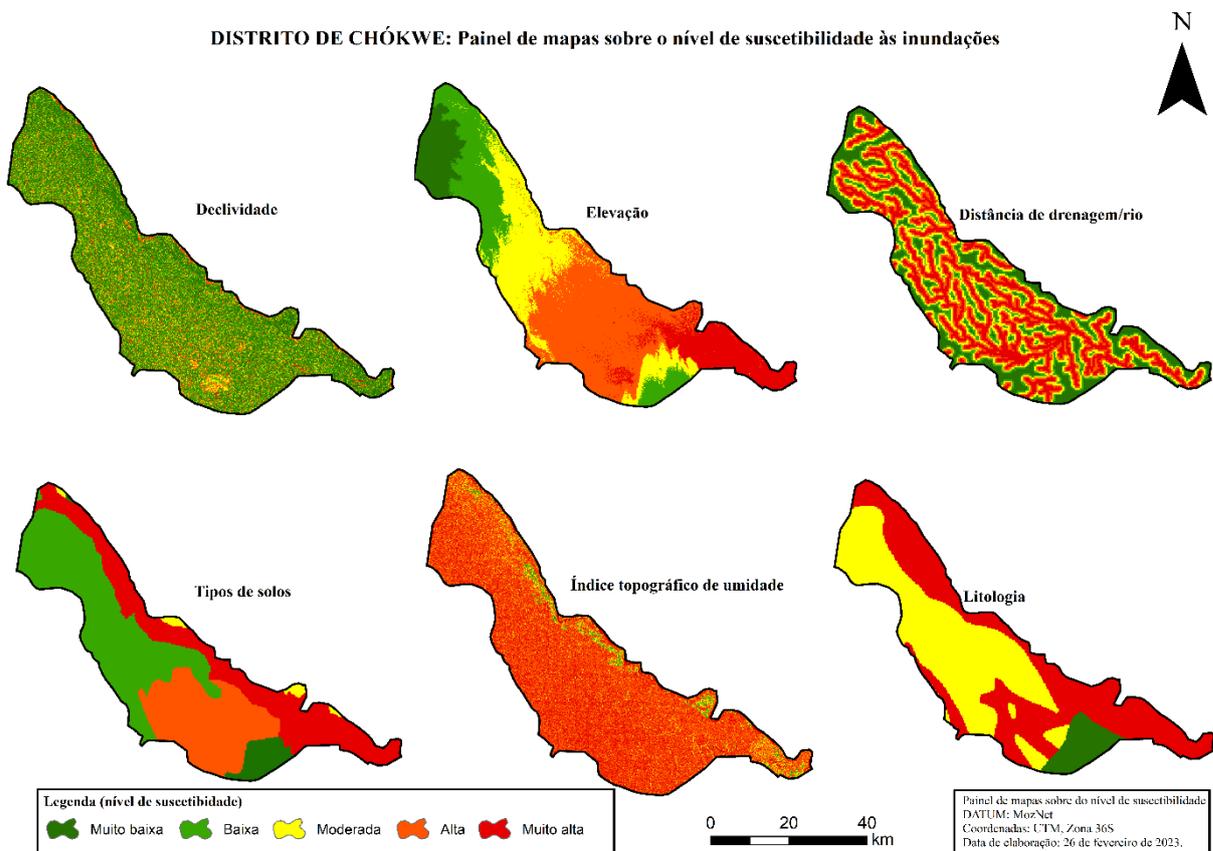
Critério causador de suscetibilidade	Unidade	Classes	Avaliação das classes de suscetibilidade	Avaliação numérica	Peso (em %)
TWI	Nível	2.37 - 7.24	Muito baixa	1	16
		7.25 - 9.49	Baixa	2	
		9.5 - 11.56	Moderada	3	
		11.57 - 14.44	Alta	4	
		14.45 - 25.34	Muito alta	5	
Elevação	Metros	0 -33	Muito alta	5	39
		34 - 44	Alta	4	
		45 - 57	Moderada	3	
		58 - 76	Baixa	2	
		77 - 106	Muito baixa	1	
Pedologia	Permeabilidade	Solos aluviões	Muito alta	5	6
		Solos coluviões	Alta	4	
		Solos de posto mananga	Moderada	3	
		Solos pouco profundos	Baixa	2	
		Solos arenosos	Muito baixa	1	
		Aluviões	Muito alta	5	

Litologia	Tipo	Depósitos Indiferenciados	Moderada	3	4
		Terraços	Muito Baixa	1	
Distância Drenagem	Metros	400	Muito alta	5	26
		800	Alta	4	
		1200	Moderada	3	
		1600	Baixa	2	
		> 1600	Muito baixa	1	
Declividade	%	0 – 6	Muito alta	5	9
		7 – 12	Alta	4	
		13 – 20	Moderada	3	
		21 – 30	Baixa	2	
		> 30	Muito baixa	1	

Elaboração: os autores, 2023.

Em seguida, foi necessário realizar a reclassificação dos mapas de modo a padronizar os níveis de suscetibilidade para sua posterior integração via álgebra de mapas. Nesse caso, para as classes de suscetibilidade foram atribuídas avaliações numéricas de 1 a 5, correspondendo de muito baixa a muito alta suscetibilidade respectivamente (Figura 5).

Figura 5 – Distrito de Chókwe: Mapas resultantes da reclassificação dos fatores de suscetibilidade, 2023



Utilização da operação *Weighted Overlay* do aplicativo *ArcGis*

O mapa de suscetibilidade foi elaborado conforme proposta de Ross (1994) e de vários outros estudos realizados sobre a temática, entre os quais, Ouma e Tateishi (2014), Danumah *et al.* (2016), Caldas *et al.* (2018), Trevisan *et al.* (2018), Campioli e Vieira (2019), Dano *et al.* (2019), Desalegn e Mulu (2020). Conforme esses estudos, a reclassificação das variáveis foi realizada por hierarquia segundo o grau de cada classe: 1 (muito baixa), grau 2 (baixa), grau 3 (moderada), grau 4 (alta) e grau 5 (muito alta).

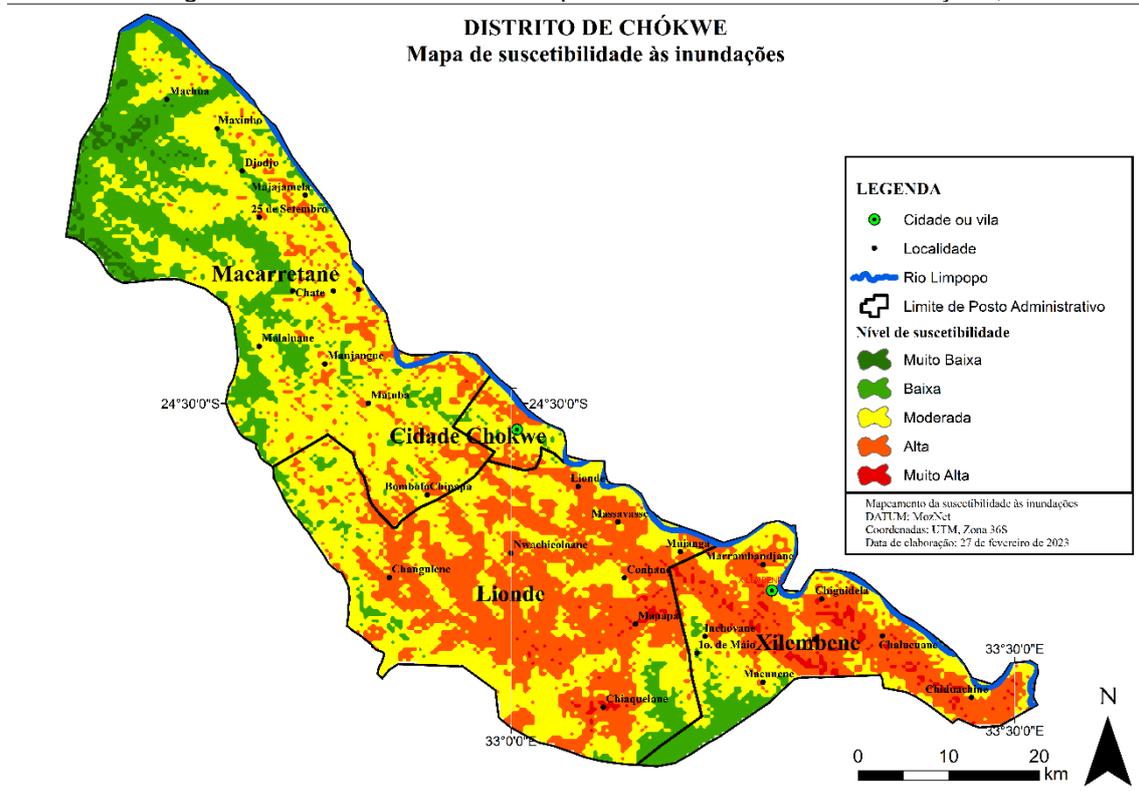
Com os graus de suscetibilidade já estabelecidos e o peso de cada indicador já calculado, seguiu-se a sobreposição ponderada dos mapas. Essa operação foi realizada com a utilização da ferramenta *Weighted Overlay* do aplicativo *ArcGis*. Nessa operação, os valores das células são multiplicados pela sua importância percentual e os resultados são somados para criar uma nova camada matricial de saída. Assim, cada camada matricial de entrada (indicador) é ponderada de acordo com sua importância ou influência percentual, onde a soma dos pesos dos indicadores deve ser igual a 100%.

O processo foi realizado obedecendo-se os seguintes passos: i) seleção da escala de avaliação (1 a 5); ii) adição das camadas matriciais dos indicadores de suscetibilidade às inundações; iii) definição dos valores de escala das células para cada camada matricial; iv) atribuição dos pesos as camadas matriciais dos indicadores resultantes da aplicação do método AHP; e v) execução da ferramenta sobreposição ponderada *Weighted Overlay* do aplicativo *ArcGis*. Nesse processo, os valores das células de cada camada matricial de entrada foram multiplicados pelo peso da camada, adicionando-se os resultados de modo a se obter a de saída final.

RESULTADO E DISCUSSÃO

O que está visualizado na Figura 6 é o resultado dos cálculos dos pesos dos critérios usando-se o método AHP, integração dos pesos e processamento dos dados no aplicativo *ArcGis*. Esse processamento incluiu a reclassificação dos mapas de cada fator e a sobreposição pela operação *Weighted Overlay*. O processamento esteve restrito ao distrito de Chókwe, situado na planície fluvial na bacia hidrográfica do rio Limpopo.

Figura 6 - Distrito de Chókwe: Mapa de Suscetibilidade às inundações, 2023



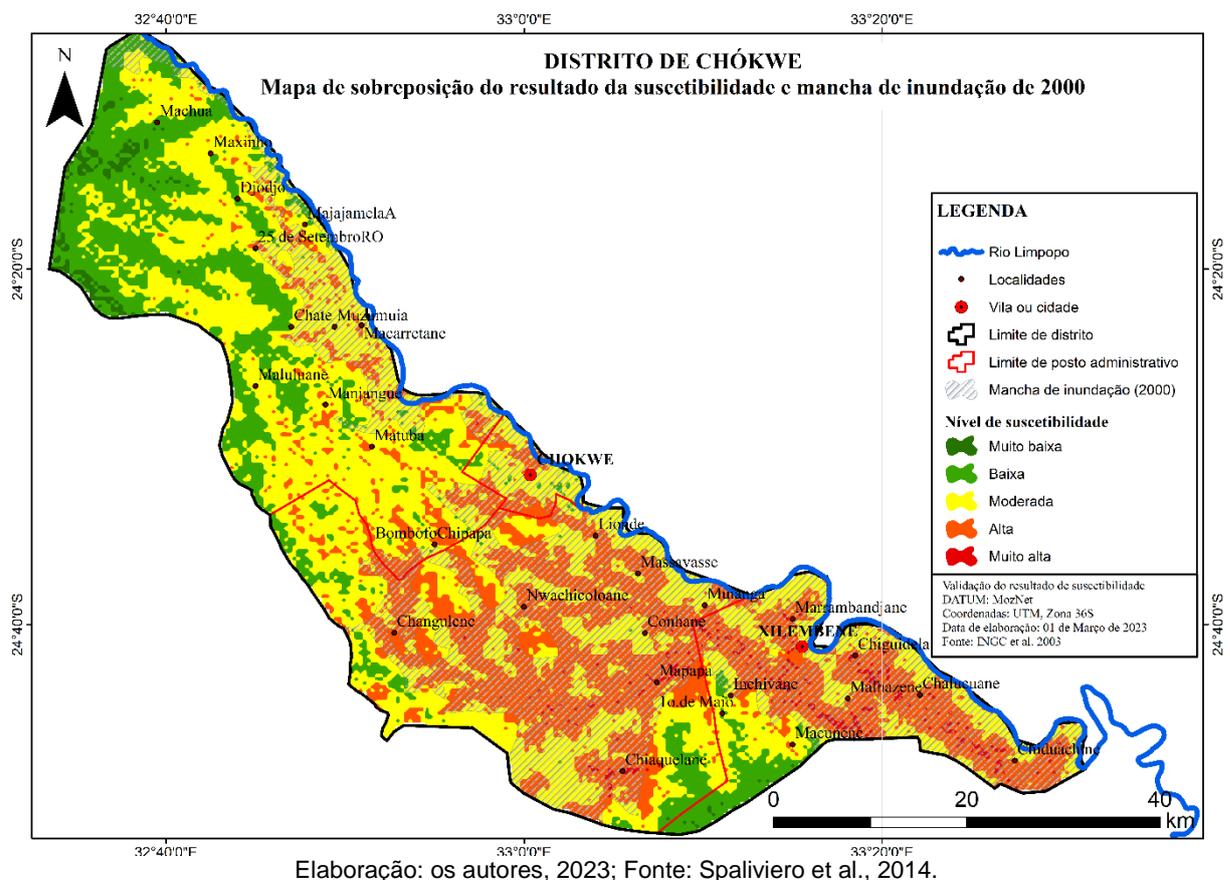
Ao observar-se o mapa da suscetibilidade à inundações na Figura 6, é possível depreender que a maior concentração de áreas suscetíveis se situa nos postos administrativos de Lionde e Xilembene. Nessas áreas também podem ser observados aglomerados populacionais (vila ou localidade), com maior risco de sofrerem inundações. O nível de suscetibilidade nessas áreas é alto, e em alguns pontos é muito alto.

O parâmetro que mais contribuiu para a suscetibilidade alta a muito alta dessas áreas foi a altitude, (44 metros e 33 metros respectivamente). A este perfil de altimetria de alta a muito alta suscetibilidades, acrescentam-se outros fatores de críticos, como a ocorrência de solos aluviões e coluviões, e áreas de maior saturação hídrica. Essas áreas, por suas características físicas, além de serem mais suscetíveis às inundações, tendem a permanecer mais tempo inundadas.

Por outro lado, no noroeste do distrito, no posto administrativo de Macarretane e a sul, em Xilembene, estão localizadas áreas de baixa suscetibilidade. Trata-se de áreas com altitude entre 58 e 106 metros. Nessas áreas registram-se depósitos indiferenciados com solos pouco profundos (Macarretane) e terraços com solos arenosos (Xilembene).

O mapa de suscetibilidade à inundações obtido foi confrontado com mapa pós-inundações de 2000, do estudo de Spaliviero *et al.* (2014) intitulado “Análise das cheias da bacia do rio Limpopo através da evolução passada reconstrução e uma abordagem geomorfológica”, onde foi apresentada a mancha de inundações de 2000. Esse mapa foi vetorizado e sobreposto ao mapa de suscetibilidade deste estudo, o que serviu para a sua validação. A Figura 7 mostra o resultado da sobreposição dos dois (suscetibilidade e mancha de inundações).

Figura 7 - Distrito de Chókwe: Mapa de mancha de inundações e suscetibilidade às inundações, 2023



No mapa, é possível constatar que a mancha de inundações seguiu as áreas consideradas de alta e muito alta suscetibilidades. Isso demonstra que o resultado do processamento dos parâmetros teve

uma acurácia significativa, tanto como os pesos atribuídos aos fatores que contribuem para a suscetibilidade.

O mapeamento de suscetibilidade no distrito pode ajudar na adoção de várias medidas estruturais e não estruturais. As medidas estruturais incluem redução do pico das inundações através da retenção da água em barragens de modo que o fluxo passe sem transbordo, direcionamento das inundações para reservatórios, bacias de detenção ou zonas úmidas, fora do alcance das populações. Essas medidas devem permitir retardar, acelerar ou desviar o curso das águas de modo a reduzir o risco de ocorrência das inundações. O controle da cobertura vegetal, construção e diques de proteção também podem servir como medidas para redução do risco e da suscetibilidade.

Por outro lado, as medidas não estruturais envolvem estudos que permitam fazer o levantamento do nível de vulnerabilidade das comunidades de modo a aferir o grau de preparação para o enfrentamento dos eventos de inundações e redução do tempo de recuperação, o que poderia minimizar os danos socioambientais sensivelmente. Estes estudos podem potencializar o conhecimento das características particulares das populações de cada local de risco e incorporar a dimensão espacial às demais análises, de forma holística e integrada” (MARANDOLA JR, 2004). Assim, tornar-se-á possível, segundo Oliveira (2018), conhecer a vulnerabilidade dos elementos expostos, o que permitirá saber com maior precisão quais medidas serão necessárias para reduzir a capacidade de perda humana de um determinado grupo social e seus bens materiais. Isso corresponde a identificar e medir vulnerabilidades antes que ocorra um desastre, e também após os desastres. Estas medidas são tarefas essenciais para uma ação eficaz e de longo prazo, contribuindo na redução do risco (Birkmann, 2007).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo apresentou o mapeamento de áreas suscetíveis a inundações no distrito de Chókwe, com a aplicação de métodos de tomada de decisão multicritérios, e particularmente o método AHP. Sua relevância torna-se maior num contexto de mudanças climáticas e da esperada intensificação de ocorrência de eventos extremos, particularmente impactantes em países e regiões do mundo em desenvolvimento.

Refletir sobre as inundações, no distrito de Chókwe coloca em evidência a construção do risco e dos desastres, quer sejam em Moçambique, ou em outras áreas similarmente suscetíveis e vulneráveis. Inundações e enchentes são sempre eminentes durante cada estação chuvosa. Diante de padrões que se repetem, um dos passos importantes para o enfrentamento do problema é o mapeamento de áreas de risco. Reitera-se, nessa perspectiva, que o mapeamento das áreas suscetíveis deve ser acompanhado de levantamento de vulnerabilidade das populações a para lidar com os eventos, criar medidas de mitigação e formular políticas públicas para o enfrentamento dos desastres potenciais.

No estudo, foram adotados seis fatores de suscetibilidade às inundações, tendo sido atribuídos pesos diferentes e consoantes à sua relevância para as inundações. Nesse sentido, a altitude recebeu maior peso e o mapa de suscetibilidade demonstrou que áreas relativamente mais elevadas são consideradas de suscetibilidade baixa ou muito baixa. Associa-se a esses locais elevados, depósitos indiferenciados e terraços, no noroeste e sul do distrito. Por outro lado, nos postos administrativos de Lionde e Xilembene está a maior área de suscetibilidade alta a muito alta. Trata-se da combinação de baixa altitude e maior saturação hídrica.

Este estudo apresenta-se como mais uma contribuição na criação de um arcabouço de informações que contribuem nas estratégias para enfrentamento das inundações no distrito de Chókwe, a partir da identificação de áreas propensas. Essa contribuição, atrelada a outras baseadas no sensoriamento remoto e no SIG, são vitais no fornecimento de informações espaciais que permitam o monitoramento, previsão e análise dos eventos de inundações. Outra vertente de análise é a modelagem, que permitiria o gerenciamento de inundações. A partir disso, várias medidas podem ser tomadas, como a instalação de sistemas de avisos prévios nas comunidades, conscientização, evacuação, e o planejamento do uso e ocupação do solo.

AGRADECIMENTOS

Agradecemos à Pontifícia Universidade Católica de Minas Gerais, Instituto Superior Politécnico de Gaza e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior.

REFERÊNCIAS

- ARULDOSS, M. *et al.* A Survey on Multi Criteria Decision Making Methods and Its Applications. **American Journal of Information Systems**, n. 1, p. 31-43, 2013.
- BAIA, A. Os Meandros da Urbanização em Moçambique. **GEOUSP - Espaço e Tempo**, n. 29, p. 3-30, 2011.
- BIRKMANN, J. Risk and Vulnerability Indicators at Different Scales: Applicability, usefulness and policy implications. **Environmental Hazards**, n. 7, p. 20-30, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.envhaz.2007.04.002>
- CALDAS, A. M. *et al.* Flood Vulnerability, Environmental Land Use Conflicts, and Conservation of Soil and Water: A Study in the Batatais SP Municipality, Brazil. **Water**, n. 10, 2018. <https://doi.org/10.3390/w10101357>
- CAMPIOLI, P. F.; VIEIRA, C. V. Avaliação do Risco a Inundação na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, Joinville/SC. **Revista Brasileira de Geografia Física**, n. 1, p. 124-138, 2019. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v12.1.p124-138>
- CABRERA, J. S.; LEE, H. S. Flood-Prone Area Assessment Using GIS-Based Multi-Criteria Analysis: A Case Study in Davao Oriental, Philippines. **Water**, v. 11, p. 1-23, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11112203>
- CRIDF. **Data Sharing and Early Warning Flood Forecasting in the Limpopo River Basin**. Ukaid, 2018. Disponível em: https://media.africaportal.org/documents/P2537_CRIDF_CS_LIMPOPO_WEB_v5.pdf. Acesso em: 16 de abr. 2021.
- DANO, U. L. *et al.* Flood Susceptibility Mapping Using GIS-Based Analytic Network Process: A Case Study of Perlis, Malaysia. **Water**, v. 615, n. 11, p. 1-28, 2019. <https://doi.org/10.3390/w11030615>
- DANUMAH, J. H. *et al.* Flood risk assessment and mapping in Abidjan district using multi-criteria analysis (AHP) model and geoinformation techniques, (cote d'ivoire). **Geoenvironmental Disasters**, n. 2, 2016. <https://doi.org/10.1186/s40677-016-0044-y>
- DESALEGN, H.; MULU, A. Flood vulnerability assessment using GIS at Fetam watershed, upper Abbay basin, Ethiopia. **Heliyon**, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e05865>
- DOUHI, N.; SANTOS, M. L. Cartografia das Inundações na Planície Aluvial do Rio Ivaí. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v.11, n. 1, p. 223-236, 2018. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v10.6.p223-236>
- FERNANDEZ, D. S.; LUTZ, M. A. Urban flood hazard zoning in Tucumán Province, Argentina, using GIS and multicriteria decision analysis. **Engineering Geology**, n. 1, p. 90-98, 2010. <https://doi.org/10.1016/j.enggeo.2009.12.006>
- GHAZAVI, R.; VALI, A.; ESLAMIAN, S. Impact of Flood Spreading on Infiltration Rate and Soil Properties in an Arid Environment. **Water Resour Manage**, v. 24, p. 24:2781–2793, Jan. 2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9579-y>
- GIGOVIC, L. *et al.* Application of GIS-Interval Rough AHP Methodology for Flood Hazard Mapping in Urban Areas. **Water**, v. 9, p. 1-26, 2017. <https://doi.org/10.3390/w9060360>
- GLOBAL FACILITY FOR DISASTER REDUCTION AND RECOVERY. **A Recuperação de Cheias Recorrentes 2000-2013: Estudo do Caso para o Quadro de Recuperação de Desastres**. GFDRR, 2014. Disponível em: https://www.gfdr.org/sites/default/files/publication/report-mocambique-recuperacao-cheias-recorrentes-2014_0.pdf. Acesso em: 1 mar. 2021.
- HAGHIZADEH, A. *et al.* Forecasting flood-prone areas using Shannon's entropy model. **J. Earth Syst. Sci**, v. 126, n. 39, p. 1-11, 2017. <https://doi.org/10.1007/s12040-017-0819-x>

HUMANITARIAN DATA EXCHANGE. Disponível em: <https://data.humdata.org/dataset>. Acesso em: 20 fev. 2023.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change. Climate Change 2021. **The Physical Science Basis Summary for Policymakers**. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>

ISLAM, A. R. M. T. *et al.* Flood susceptibility modelling using advanced ensemble machine learning models. **Geoscience Frontiers**, v. 12, p. 1-18, 2021. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2020.09.006>

KAZAKIS, N.; KOUGIAS, L; PATSIALIS, T. Assessment of flood hazard areas at a regional scale using an index-based approach and Analytical Hierarchy Process: Application in Rhodope–Evros region, Greece. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 555-563, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.055>

LAPPAS, I.; KALLIORAS A. Flood Susceptibility Assessment through GIS-Based Multi-Criteria Approach and Analytical Hierarchy Process (AHP) in a River Basin in Central Greece. **International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)**, v. 6, n. 3, p. 738-751, 2019.

LEE, J.; KIM, J. Detecting Areas Vulnerable to Flooding Using Hydrological-Topographic Factors and Logistic Regression. **Appl. Sci**, v. 11, p. 1-20, 2021. <https://doi.org/10.3390/app11125652>

LIMA, P. B.; CERRI, L. E. S. Aplicação do Processo Analítico Hierárquico (AHP) Para Priorização de Obras de Intervenção em Áreas e Setores de Risco Geológico nos Municípios de Itapeverica da Serra e Suzano (SP). **Geociências**, v. 31, n. 2, p. 247-257, 2012.

MAHMOUD, S. H.; GAN, T. Y. Multi-criteria approach to develop flood susceptibility maps in arid regions of Middle East. **Journal of Cleaner Production**, v.196, p. 216-229, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2018.06.047>

MANDYCH, A. F. “Classification of Floods”. In Encyclopedia of Life Support. Natural Disasters, Vol. II, ed. W.M. Kotlyakov, UNESCO, **Eolss Pbl. Co.**, p. 63-88, 2010.

MARIAPPAN, S.; ROSLEE, R.; SHARIR, K. Flood Susceptibility Analysis (FSAn) Using Multi-Criteria Evaluation (MCE) Technique for Landuse Planning: A Case from Penampang, Sabah, Malaysia. **Journal of Physics: Conference Series**, v. 1358, p. 1-15, 2019 <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1358/1/012067>

MARANDOLA JR., E. Uma Ontologia Geográfica dos Riscos. Duas escalas, Três Dimensões. **GEOGRAFIA**, v. 29, n. 3, p. 315-338, 2004.

MOGHADAS, M. et al. A Multi-criteria Approach for Assessing Urban Flood Resilience in Tehran, Iran. **International Journal of Disaster Risk Reduction**, n. 35, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2019.101069>

MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital Terrain Modelling: A review of Hydrological, Geomorphological, and Biological Applications. **Hydrological Process**, v. 5, p. 3-30, 1991. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050103>

NACHAPPAA, T. G. et al. Flood susceptibility mapping with machine learning, multi-criteria decision analysis and ensemble using Dempster Shafer Theory. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 1-17, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125275>

NANDI, A.; WILSON, A. M. M.; SMITH, D. Flood hazard mapping in Jamaica using principal component analysis and logistic regression. **Environ Earth Sci**, v. 75, n. 465, 2016. <https://doi.org/10.1007/s12665-016-5323-0>

OLIVEIRA, E. L. A. Vulnerabilidade: A Questão Central da Educação de Risco. **Geografia, Ensino & Pesquisa**, n. 19, p. 1-09, 2018. <https://doi.org/10.5902/2236499429448>

OTOKITI, K. V.; ADESINA, O. S.; MOHAMMED, I. Forest Cover Dynamics in a Changing Climate: A Case Study of Ibadan, Nigeria. **Journal of Environment Protection and Sustainable Development**, v. 5, n. 3, p. 118-125, 2019.

OUMA, Y.; TATAISHI, R. Urban Flood Vulnerability and Risk Mapping Using Integrated Multi-Parametric AHP and GIS: Methodological Overview and Case Study Assessment. **Water**, n. 6, p. 1515-1545, 2014. <https://doi.org/10.3390/w6061515>

- PHAM, B. T. et al. GIS Based Hybrid Computational Approaches for Flash Flood Susceptibility Assessment. **Water**, v. 12, p. 1-29, 2020. <https://doi.org/10.3390/w12030683>
- PRADHAN, B. Flood susceptible mapping and risk area delineation using logistic regression, GIS and remote sensing. **Journal of Spatial Hydrology**, v. 9, n.2, p. 1-18, 2009.
- QUINN, P.; BEVEN K; LAMB R. The $\ln(a/\tan b)$ index: how to calculate it and how to use it within the topmodel framework. **Hydrological Processes**, v. 9, p. 161–182, 1995. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360090204>
- RAHMATI, O.; ZEINIVAND, H.; BESCHARAT, Z. Flood hazard zoning in Yasooj region, Iran, using GIS and multi-criteria decision analysis. **Geomatics, Natural Hazards and Risk**, v. 7, n. 3, p. 1000-1017, 2015. <https://doi.org/10.1080/19475705.2015.1045043>
- REASON, C. J. C. Evidence for the Influence of the Agulhas Current on Regional Atmospheric Circulation Patterns. **Journal of Climate**, v. 14, n. 12, p. 2769-2778, 2001. [https://doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<2769:EFTIOT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<2769:EFTIOT>2.0.CO;2)
- ROSS, J. L. S. Análise empírica da fragilidade dos ambientes naturais e antropizados. **Revista do Departamento de Geografia**, n. 8, p. 63-74, 1994. <https://doi.org/10.7154/RDG.1994.0008.0006>
- SAATY, R. W. The Analytic Hierarchy Process – What It is and How It is Used. **Mathematical Modelling**, v. 9, n. 3-5, p. 161-176, 1987.
- SAKMONGKOLJIT, K, et al. **Multi-criteria Flood Susceptibility Assessment Using Remote Sensing and GIS-based Approaches in Chi River Basin, Thailand**. The 9th International Conference on Engineering and Technology (ICET-2021) May 27th, 2021, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University (PSU), Thailand. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1163/1/012025>
- SANTOS, J. N.; PEREIRA, E. D. Carta de Suscetibilidade a Infiltração da Água no Solo na Sub-Bacia do Rio Maracanã-MA. **Cad. Pesq**, v. 20, n. especial, 2013. <https://doi.org/10.18764/2178-2229.v20n.especialp63-71>
- SILVA, M.; PEREIRA, S. S. Assessment of Physical Vulnerability and Potential Losses of Buildings due to Shallow Slides. **Natural Hazards**, n. 2, p.1029-1050, 2014. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1052-4>
- SPALIVIERO, M. ; DAPPER, M. ; MALÓ, S. Flood Analysis of the Limpopo River Basin Through Past Evolution Reconstruction and a Geomorphological Approach. **Natural Hazards Earth Syst. Sci.**, n. 14, p. 2027-2039, 2014. <https://doi.org/10.5194/nhess-14-2027-2014>
- SUZEN, T. M.; LACRUZ, M. S. **Sensoriamento Remoto para Desastres**. São Paulo: Oficina Textos, 2015.
- TEHRANY, M, S. et al. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types. **Catena**, v. 125, p. 91–101, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2014.10.017>
- TEHRANY, M. S.; PRADHAN, B.; JEBUR, M. N. Flood susceptibility mapping using a novel ensemble weights-of-evidence and support vector machine models in GIS. **Journal of Hydrology**, v. 512, p. 332–343, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2014.03.008>
- THE INTERNATIONAL DISASTER DATABASE (EM-DAT). Disponível em: www.emdat.be. Acesso em: 3 jun. 2021.
- TREVISAN, D. P. et al. Avaliação da Vulnerabilidade Ambiental de São Carlos – SP. R. **Ra'e Ga, Curitiba**, v.44, p. 272 -288, 2018. <https://doi.org/10.5380/raega.v44i0.50439>
- UELE, D. I.; LYRA, G. B.; OLIVEIRA JR. J. F. Variabilidade Espacial e Intranual das Chuvas na Região Sul de Moçambique, África Austral. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 3, p. 473-484, 2017. <https://doi.org/10.1590/0102-77863230013>
- UNITED NATIONS. Department of Economic and Social Affairs. Population Division. **World Urbanization Prospects: The 2014 Revision**. 2015. Disponível em: <https://population.un.org/wup/publications/files/wup2014-report.pdf>. Acesso em: 6 mar. 2021.

UNRCO - United Nations Resident Coordinator Office. **Mozambique Floods 2013**. UNRCO, 2013. Disponível em: <https://reliefweb.int/sites/reliefweb.int/files/resources/MOZ-Consolidated%20Early%20Recovery%20Strategy-Final-20130404.pdf>. Acesso em: 1 mar. 2021.

VAIDYA, O. S.; KUMAR, S. Analytic hierarchy process: An overview of applications. **European Journal of Operational Research**, p. 1-29, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2004.04.028>

WAQAS, H *et al.* Flash Flood Susceptibility Assessment and Zonation Using an Integrating Analytic Hierarchy Process and Frequency Ratio Model for the Chitral District, Khyber Pakhtunkhwa, Pakistan. **Water**, v. 1650, n. 13, p. 1-28, 2021. <https://doi.org/10.3390/w13121650>

WORLD BANK. **Economics of Adaptation to Climate Change**. Washington, DC: World Bank, 2010. Disponível em: http://www-wds.worldbank.org/external/default/WDSContentServer/WDSP/IB/2012/06/27/000425970_20120627163039/Rendered/PDF/702670ESW0P10800EACCSynthesisReport.pdf. Acesso em: 15 abr. 2021.

YOUSEFZADEH, A. *et al.* The Extraction of Flood Potential of Simineh River Basin Applying Satellite Images, Topographic Wetness Index and Morphological Features. **Geography and Sustainability of Environment**, v. 32, p. 49-61, 2019.

Recebido em: 08/08/2023

Aceito para publicação em: 06/02/2024