

MAPEAMENTO DE RISCOS EROSIVOS EM AMBIENTE URBANO E PERIURBANO UTILIZANDO SISTEMAS DE INFORMAÇÃO GEOGRÁFICA: O CASO DO LUBANGO, HUÍLA

MAPPING OF EROSION RISKS IN URBAN AND PERI-URBAN ENVIRONMENTS USING GEOGRAPHIC INFORMATION SYSTEMS: THE CASE OF LUBANGO, HUÍLA

MAPEO DE RIESGOS EROSIVOS EN AMBIENTES URBANOS Y PERIURBANOS MEDIANTE SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA: EL CASO DE LUBANGO, HUÍLA

Jerónimo Tchipepe Adriano Lofa¹
Mariano Chimbinga Cangombe²

RESUMO: A erosão hídrica em cidades de crescimento acelerado resulta da interação entre precipitação, relevo, propriedades do solo, cobertura vegetal, drenagem e formas de ocupação do território. Este artigo analisa, numa perspectiva teórica e analítica, o mapeamento de riscos erosivos em ambiente urbano e periurbano, tomando o município do Lubango, província da Huíla, Angola, como estudo de caso. A abordagem combina revisão crítica da literatura recente, análise das fontes geoespaciais utilizadas num mapa de risco previamente elaborado em ambiente QGIS e interpretação espacial das cinco classes de risco representadas. Foram consideradas cartografias do Instituto Geográfico e Cadastral de Angola, ESA WorldCover, OpenStreetMap, modelos digitais de elevação do SRTM/NASA/USGS e superfícies climáticas do WorldClim. A leitura do produto cartográfico evidencia maior concentração de risco alto e muito alto no sector norte/noroeste, particularmente em Mapunda, e ocorrências pontuais associadas a linhas de drenagem e frentes de expansão urbana. A discussão mostra que a utilização de SIG permite integrar fatores biofísicos e antrópicos num quadro espacialmente explícito, mas não substitui a validação de campo nem a calibração quantitativa. Conclui-se que o mapeamento deve ser incorporado ao ordenamento municipal, à gestão de drenagem, à proteção da cobertura vegetal e à monitorização multitemporal da expansão urbana.

Palavras-chave: Erosão do solo. Sistemas de Informação Geográfica. Risco ambiental.

¹ Professor, Investigador e graduando finalista em Ensino da Biologia. Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla (ISCED-Huíla) / Professor de Biologia no Complexo Escolar nº 282-Produção & Luta-Matala, Huíla, Angola.

² Graduando finalista em Ensino da Biologia, Professor de Biologia e Química e Investigador. Instituto Superior de Ciências da Educação da Huíla (ISCED-Huíla) / Professor de Biologia e Química no Complexo Escolar n.º 1721 Nondjava, Município do Chituto, Huíla, Angola.

ABSTRACT: Water erosion in rapidly growing cities results from the interaction of rainfall, terrain, soil properties, vegetation cover, drainage and land-use patterns. This theoretical and analytical article examines erosion-risk mapping in urban and peri-urban environments, using Lubango municipality, Huíla Province, Angola, as a case study. The approach combines a critical review of recent literature, an assessment of the geospatial sources used in a previously prepared QGIS risk map, and spatial interpretation of the five represented risk classes. Data from the Angolan Institute of Geographic and Cadastral Information, ESA WorldCover, OpenStreetMap, SRTM/NASA/USGS digital elevation models and WorldClim climate surfaces were considered. The cartographic reading indicates a greater concentration of high and very high risk in the northern/northwestern sector, particularly Mapunda, as well as localized occurrences along drainage lines and urban expansion fronts. The discussion shows that GIS makes it possible to integrate biophysical and anthropogenic factors in a spatially explicit framework, but it does not replace field validation or quantitative model calibration. It is concluded that erosion-risk mapping should be incorporated into municipal land-use planning, drainage management, vegetation protection and multitemporal monitoring of urban expansion.

Keywords: Soil erosion. Geographic Information Systems. Environmental risk.

RESUMEN: La erosión hídrica en ciudades de crecimiento acelerado resulta de la interacción entre precipitación, relieve, propiedades del suelo, cobertura vegetal, drenaje y formas de ocupación del territorio. Este artículo analiza, desde una perspectiva teórica y analítica, el mapeo de riesgos erosivos en ambientes urbanos y periurbanos, tomando el municipio de Lubango, provincia de Huíla, Angola, como estudio de caso. El enfoque combina una revisión crítica de literatura reciente, el análisis de las fuentes geoespaciales utilizadas en un mapa de riesgo elaborado previamente en QGIS y la interpretación espacial de cinco clases de riesgo. Se consideraron datos del Instituto Geográfico y Catastral de Angola, ESA WorldCover, OpenStreetMap, modelos digitales de elevación SRTM/NASA/USGS y superficies climáticas WorldClim. La lectura cartográfica evidencia una mayor concentración de riesgo alto y muy alto en el sector norte/noroeste, especialmente en Mapunda, además de ocurrencias localizadas asociadas a líneas de drenaje y frentes de expansión urbana. La discusión demuestra que los SIG permiten integrar factores biofísicos y antrópicos de forma espacialmente explícita, pero no sustituyen la validación de campo ni la calibración cuantitativa. Se concluye que el mapeo del riesgo debe incorporarse a la planificación territorial municipal, la gestión del drenaje, la protección de la cobertura vegetal y el seguimiento multitemporal de la expansión urbana.

Palabras clave: Erosión del suelo. Sistemas de Información Geográfica. Riesgo ambiental.

1. INTRODUÇÃO

A erosão do solo deve ser entendida como um processo geomorfológico e ambiental que adquire expressão particularmente crítica quando os mecanismos naturais de remoção de partículas são intensificados por alterações humanas no território. Em cidades e áreas periurbanas, a retirada da vegetação, a compactação do solo, a abertura de arruamentos, os cortes de talude, a construção sobre vertentes e a concentração do escoamento pluvial podem

transformar processos difusos em sulcos, ravinas e voçorocas. O problema não é exclusivamente físico: a erosão interfere na mobilidade, danifica infraestruturas, transporta sedimentos para cursos de água, amplia custos de manutenção e pode deslocar populações ou limitar o uso seguro de parcelas urbanas. A literatura sobre África tem mostrado que a expansão urbana para áreas sujeitas a perigos naturais tende a ocorrer justamente nas franjas menos reguladas, onde a capacidade institucional de prevenção é mais limitada (DE GEETER S, et al., 2023).

No contexto africano, a erosão urbana não apresenta um mecanismo único. Em alguns territórios predominam solos arenosos altamente erodíveis; noutros, a combinação de vertentes íngremes, chuvas concentradas e cobertura vegetal degradada controla a geração de escoamento e a instabilidade superficial. A especificidade local é, por isso, decisiva. No caso angolano, trabalhos dedicados às ravinas salientam a combinação entre clima, topografia, características dos solos e intervenção antrópica, incluindo obras, obstrução de drenagens, agricultura, incêndios e exploração de materiais (QUETA FM, DUARTE IMR e PINHO AB, 2016). Estudos sobre os solos de Luanda acrescentam que as características geotécnicas de determinados materiais podem favorecer processos de erosão e colapso quando ocorre saturação (ANTÓNIO FM, et al., 2024).

Para o Lubango, a questão assume importância adicional porque a cidade se desenvolve num planalto de elevada altitude, com setores de relevo diversificado e uma dinâmica de expansão urbana que alcança áreas periféricas. A investigação de TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A, publicada na revista Tundavala, mostrou que a erosão na região não pode ser explicada apenas pelas propriedades dos solos, morfologia e clima, uma vez que a ocupação humana e a remoção da vegetação alteram as condições de erodibilidade. Os autores recomendaram a preservação da cobertura vegetal, melhoria dos sistemas de drenagem e proteção das áreas já afetadas por sulcos e ravinas. Esta evidência local é particularmente relevante porque permite interpretar a cartografia de risco não como simples representação do relevo, mas como expressão espacial de relações entre ambiente físico e transformação do território.

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) oferecem uma estrutura adequada para essa integração. Através de operações de álgebra de mapas, classificação, análise de declive, distância, densidade de drenagem e sobreposição ponderada, diferentes camadas podem ser combinadas para produzir superfícies de suscetibilidade ou risco. A disponibilidade de dados

abertos de detecção remota e de modelos digitais de elevação reduziu uma barreira histórica à investigação em países com redes de observação de campo pouco densas. Produtos como o ESA WorldCover permitem representar a cobertura terrestre a 10 m, enquanto o SRTM fornece informação topográfica global suficientemente detalhada para análises de escala municipal ou regional (ZANAGA D, et al., 2022; NASA JPL, 2013).

A adoção de SIG, contudo, não garante automaticamente a qualidade de um mapa de risco. A escolha das variáveis, os pesos atribuídos, a resolução espacial, o método de classificação e a validação dos resultados podem introduzir incerteza. Modelos multicritério como o Analytic Hierarchy Process (AHP) tornam explícita a hierarquia dos fatores, mas dependem da coerência das comparações entre critérios. Modelos empíricos, como a Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE), permitem estimar perda média potencial de solo, mas exigem parametrização de fatores de erosividade, erodibilidade, comprimento e declive da vertente, cobertura e práticas de conservação. Em áreas urbanas, fatores não representados diretamente na RUSLE, como microdrenagem, pavimentação e obras de terra, podem ser determinantes. Por isso, a integração de métodos é mais promissora do que a adoção acrítica de uma única técnica.

A presente investigação parte de um mapa de risco de erosão elaborado para o Lubango e procura transformá-lo em objeto de análise científica mais amplo. O objetivo geral é analisar criticamente o mapeamento de riscos erosivos em ambiente urbano e periurbano utilizando SIG, tomando o Lubango como caso de estudo. São objetivos específicos: (i) aprofundar o enquadramento conceptual da erosão hídrica urbana; (ii) discutir os principais fatores biofísicos e antrópicos associados ao risco; (iii) sistematizar as potencialidades e limitações dos dados geoespaciais utilizados; (iv) interpretar a distribuição das cinco classes de risco no território do Lubango; (v) comparar a abordagem com evidências regionais e internacionais; e (vi) propor uma agenda de investigação e gestão aplicável ao município.

A relevância do estudo decorre de três lacunas. A primeira é empírica: ainda são relativamente escassos os estudos recentes que combinam geotecnologias e análise espacial de erosão especificamente para cidades angolanas. A segunda é metodológica: mapas de risco podem circular como produtos finais sem explicitação suficiente das incertezas e sem validação de campo. A terceira é institucional: o conhecimento cartográfico nem sempre é incorporado nos instrumentos de ordenamento e nas decisões sobre expansão urbana. Ao abordar

simultaneamente essas três dimensões, o artigo procura contribuir para uma leitura mais robusta do risco erosivo no Lubango e para o fortalecimento de uma cultura de prevenção baseada em evidências.

2. ENQUADRAMENTO TEÓRICO E CONCEPTUAL

2.1. Erosão hídrica: processos, formas e escalas

A erosão hídrica envolve, de forma simplificada, três movimentos conectados: desprendimento das partículas, transporte e deposição. A energia da chuva pode desagregar a superfície por impacto direto das gotas; posteriormente, o escoamento superficial mobiliza partículas, concentra-se em pequenas depressões e pode originar canais progressivamente mais profundos. A distinção entre erosão laminar, erosão em sulcos e erosão em ravinas é útil para compreender a evolução espacial do processo, embora os limites entre formas nem sempre sejam universais. ANTÓNIO FM, BONITO FAB e BENTA AARCA (2024) chamam atenção precisamente para a diversidade terminológica usada para descrever as formas erosivas em Angola e para a necessidade de critérios mais consistentes de classificação.

Em áreas naturais, a cobertura vegetal reduz a energia das gotas, favorece infiltração e aumenta a rugosidade superficial. Raízes podem contribuir para a estabilidade do solo, enquanto matéria orgânica e agregação modificam propriedades físicas importantes. Quando a cobertura é removida, o balanço entre infiltração e escoamento pode mudar rapidamente. Em áreas urbanas, a pavimentação introduz outro mecanismo: a água que antes infiltrava passa a ser conduzida para redes artificiais ou para pontos de descarga concentrada. Uma rua sem drenagem adequada pode funcionar como canal erosivo, sobretudo quando a água é direcionada para uma vertente ou para uma área de solo exposto.

A escala temporal também importa. Eventos extremos podem iniciar feições erosivas em horas, enquanto a evolução de uma ravina depende da repetição de eventos, das características do material, da geometria da encosta e das intervenções de controlo. A análise de uma fotografia ou de um mapa de um único ano não deve, portanto, ser interpretada como descrição completa da dinâmica. A erosão é um processo. O mapa de risco representa uma condição espacial em determinado momento e, idealmente, deve ser atualizado por séries temporais de imagens e observações de campo.

A pesquisa realizada na região do Lubango por TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A (2015) é particularmente importante neste ponto. A comparação de imagens de 1979, 1986, 2000 e 2010 evidenciou transformações na ocupação dos solos e relacionou a exposição do terreno e a modificação da cobertura vegetal com a promoção dos processos erosivos. O estudo reforça a ideia de que o risco não é apenas uma propriedade estática do terreno: ele emerge da interação entre condições naturais e trajetórias de uso do solo. Para o planejamento urbano, isso significa que uma área atualmente classificada como risco moderado pode tornar-se mais problemática se a urbanização remover a cobertura vegetal, alterar a drenagem ou aumentar a concentração do escoamento.

2.2. Urbanização, impermeabilização e drenagem

A urbanização modifica o ciclo hidrológico local através de alterações na infiltração, evapotranspiração, armazenamento superficial e velocidade de escoamento. O aumento de superfícies impermeáveis tende a produzir picos de escoamento mais rápidos. Quando a infraestrutura de drenagem é insuficiente, a água procura caminhos de menor resistência, podendo concentrar-se em ruas, valas, talwegues naturais ou áreas abertas. A erosão pode então aparecer não necessariamente onde a chuva cai com maior intensidade, mas onde o fluxo é concentrado e a capacidade de resistência do solo é menor.

6

Nas franjas periurbanas, o problema é frequentemente agravado pela ausência de hierarquia viária, drenagem dimensionada, estabilização de taludes e fiscalização do uso do solo. A ocupação informal pode aproveitar superfícies relativamente baratas e acessíveis, mas algumas dessas áreas correspondem a fundos de vale, encostas, cabeceiras de drenagem ou terrenos sujeitos a processos de instabilidade. A expansão urbana para áreas expostas a perigos naturais reforça a importância de incorporar riscos ambientais na leitura do crescimento urbano.

Em Angola, o problema assume configurações diferenciadas. Em Luanda, as ravinas associadas aos solos arenosos e colapsíveis constituem um exemplo de interação entre propriedades do terreno e transformação urbana. ANTÓNIO FM, BONITO FAB e BENTA AARCA (2024) destacam que as areias vermelhas de Luanda apresentam comportamento metaestável e podem sofrer alterações significativas quando saturadas. QUETA FM, DUARTE IMR e PINHO AB (2016) já haviam observado, em escala nacional, que ravinas ocorrem em várias províncias e que fatores antrópicos podem acelerar o processo. O valor desses

trabalhos para o Lubango está menos na transferência direta de mecanismos geotécnicos e mais na demonstração de que a gestão da erosão urbana precisa ser territorialmente específica.

A drenagem deve ser tratada, portanto, como componente de prevenção e não apenas como infraestrutura complementar. Uma política municipal de redução do risco erosivo precisa considerar a origem da água, os caminhos preferenciais, os pontos de concentração, a capacidade de dissipação de energia e a estabilidade do exutório. Soluções como valas revestidas, dissipadores, bacias de retenção, pavimentos permeáveis, manutenção de canais e proteção vegetal podem ser combinadas de acordo com o contexto. O desenho deve partir do mapa de risco, mas também de diagnóstico hidráulico e de observação de campo.

2.3. Fatores biofísicos determinantes

O risco erosivo pode ser organizado em fatores de erosividade, erodibilidade, topografia, cobertura do solo e intervenção humana. A erosividade representa a capacidade da precipitação e do escoamento associado de produzir erosão; a erodibilidade representa a susceptibilidade do solo à desagregação e transporte. A topografia controla a energia potencial e a concentração do fluxo. A cobertura do solo modula a exposição superficial. Finalmente, a ação humana pode alterar todos esses fatores em escalas temporais curtas.

O declive é um dos fatores mais frequentemente utilizados em modelos de suscetibilidade. Em igualdade de outras condições, vertentes mais íngremes tendem a permitir maior velocidade de escoamento e maior capacidade de transporte. Entretanto, o declive isolado não determina o risco. Uma encosta íngreme protegida por vegetação densa pode apresentar menor vulnerabilidade superficial do que uma vertente moderada completamente desnuda e cortada por caminhos. Por isso, modelos que integram declive, cobertura e precipitação tendem a ser mais informativos do que classificações baseadas numa única variável.

O uso e cobertura do solo constitui outro componente central. O produto ESA WorldCover, com resolução espacial de 10 m, disponibiliza classes globais de cobertura derivadas de Sentinel-1 e Sentinel-2 e é particularmente útil em regiões onde a cartografia temática atualizada é limitada (ZANAGA D, et al., 2022). Contudo, a resolução não captura todos os elementos de microescala. Uma vala estreita, uma estrada informal ou uma pequena ravina podem não ser representadas de forma adequada. O uso de imagens de maior resolução ou levantamentos com drones pode complementar essa limitação em áreas prioritárias.

A precipitação é outro fator relevante. Superfícies climáticas como WorldClim oferecem uma base consistente para representar padrões médios, mas a erosão urbana frequentemente responde a eventos de curta duração e elevada intensidade. Assim, médias anuais não devem ser interpretadas como substitutas perfeitas da intensidade de chuva. Para uma fase de diagnóstico, elas são úteis; para dimensionamento de estruturas e calibração de modelos, são preferíveis séries pluviográficas ou dados de estações capazes de representar eventos intensos.

Os fatores pedológicos e geológicos merecem atenção específica. A composição granulométrica, estrutura, matéria orgânica, permeabilidade, plasticidade, agregação e mineralogia influenciam a resposta do solo à água. Trabalhos sobre solos residuais de Angola mostram que a mineralogia e o grau de alteração das rochas parentais condicionam propriedades geotécnicas relevantes (DUARTE IMR, PEDRO EDC, VARUM H, MIRÃO JAP e PINHO AB, 2017). No sudoeste de Angola, a investigação do sistema Caculuar–Cunene também demonstra que relevo, geologia, precipitação e processos exógenos controlam a produção e transformação dos sedimentos (CRUZ AT, et al., 2023). Esses resultados reforçam a necessidade de não tratar o solo como uma camada homogênea em análises municipais.

2.4. Sig, detecção remota e análise multicritério

O SIG constitui uma infraestrutura analítica para integrar dados que diferem em origem, resolução, escala e natureza. Um modelo de risco erosivo pode combinar um raster de declive, uma classificação de cobertura, uma superfície de precipitação, um mapa de solos e variáveis de acessibilidade ou drenagem. O resultado não é apenas um mapa ilustrativo: quando as etapas são documentadas, o sistema permite atualizar dados, testar cenários e localizar áreas prioritárias para intervenção.

A sobreposição ponderada é uma das técnicas mais simples e transparentes. Cada variável é reclassificada numa escala comum de suscetibilidade e recebe um peso. O índice final pode ser expresso, de forma genérica, como $R = \sum(w_i x_i)$, em que x_i corresponde à classe normalizada do fator e w_i ao peso atribuído, com $\sum w_i = 1$. A simplicidade é uma vantagem para contextos de dados escassos, mas os pesos precisam ser justificados. Kucuker DM e Cedano Giraldo D (2022) e Mushtaq F, et al. (2023) demonstram a aplicação de AHP e sobreposição

ponderada em diferentes contextos e mostram como a coerência das comparações entre critérios pode ser avaliada.

O AHP acrescenta uma estrutura formal de comparação par a par. Os decisores ou especialistas comparam fatores segundo sua importância relativa e a matriz resultante produz pesos. Uma vantagem é tornar visível a lógica de decisão; uma limitação é que diferentes especialistas podem produzir pesos diferentes. Em estudos científicos, recomenda-se apresentar a matriz, o rácio de consistência e uma análise de sensibilidade. Esta última pergunta quanto o mapa mudaria se os pesos fossem ligeiramente alterados. Sem análise de sensibilidade, uma classe de risco pode parecer mais objetiva do que realmente é.

Modelos de aprendizagem automática constituem uma evolução adicional. CHUMA GB, et al. (2023) compararam quatro algoritmos para mapear suscetibilidade a ravinas na bacia de Luzinzi, na República Democrática do Congo, demonstrando que relações não lineares entre variáveis podem ser captadas por modelos mais flexíveis. Contudo, machine learning requer dados de treino e validação adequados. Em contextos angolanos, onde inventários georreferenciados de erosão ainda são insuficientes, o desafio não é apenas escolher o algoritmo, mas construir uma base de ocorrências confiável.

A RUSLE permanece útil para estimar a perda média anual potencial de solo, especialmente em áreas rurais e periurbanas. A formulação clássica, $A = R \times K \times LS \times C \times P$, representa erosividade, erodibilidade, topografia, cobertura/manejo e práticas de conservação. Em áreas urbanas, porém, o modelo deve ser interpretado com cautela porque as superfícies impermeáveis e os sistemas artificiais de drenagem alteram os processos representados pelos fatores originais. Ssewankambo G, et al. (2023) mostram como a RUSLE pode ser integrada a SIG numa bacia periurbana, mas a aplicação ao Lubango exigiria dados locais para cada fator e validação de campo.

2.5. Risco, suscetibilidade, exposição e vulnerabilidade

É importante distinguir conceitos que frequentemente aparecem como sinônimos. A suscetibilidade refere-se à propensão física de um território para desenvolver determinado processo. Exposição diz respeito à presença de pessoas, edifícios, estradas, equipamentos ou atividades na área suscetível. Vulnerabilidade corresponde ao grau de perda ou dano potencial, condicionado por características físicas, sociais, econômicas e institucionais. Risco resulta da

interação entre perigo, exposição e vulnerabilidade. Um mapa construído apenas com variáveis biofísicas representa sobretudo suscetibilidade ou perigo físico; não deve ser apresentado como medida completa de risco social sem incorporar elementos de exposição e vulnerabilidade.

No presente artigo, a expressão “risco de erosão” é mantida porque corresponde ao produto cartográfico analisado. Entretanto, do ponto de vista conceptual, a classificação apresentada deve ser interpretada principalmente como uma superfície de suscetibilidade ambiental. Para transformar o produto em mapa de risco propriamente dito seria necessário integrar, por exemplo, densidade populacional, valor e localização de infraestruturas, importância de vias, serviços essenciais e capacidade de resposta. Esta distinção é fundamental para evitar decisões equivocadas e para aproximar a cartografia de risco das práticas internacionais de redução de desastres.

A incorporação da dimensão social também é relevante no Lubango. Bairros periféricos podem apresentar menor infraestrutura de drenagem, maior dependência de vias não pavimentadas e menor capacidade financeira para reparar danos. Uma pequena ravina pode ter impacto desproporcional se interromper a única via de acesso a uma comunidade. Assim, a prioridade de intervenção não deve ser determinada somente pelo tamanho da feição erosiva, mas pela combinação entre intensidade do processo, população exposta, infraestrutura crítica e possibilidade de agravamento.

10

3. ÁREA DE ESTUDO: A CIDADE DO LUBANGO

3.1. Localização e contexto territorial

Lubango é a capital da província da Huíla e constitui um dos principais centros urbanos do sul de Angola. A cidade situa-se no planalto da Huíla, a aproximadamente 1 760 m de altitude, em contexto de relevo que articula superfícies relativamente planas com vertentes e áreas de transição geomorfológica. O perímetro urbano analisado inclui bairros consolidados e zonas de expansão, entre os quais Mapunda, Comandante Cow-Boy, Comandante Nzaji, A Luta Continua/Lucrécia, Mitcha, Tchavola, Kuawa, Tchituno, Mutundo, Nambambi, Bula Matadi, Lalula, Valodia, Tchioco e Joaquim Kapango, além da área de expansão da Centralidade da Quilemba.

A posição do Lubango no planalto confere ao município características distintas das cidades costeiras angolanas. A combinação entre altitude, sazonalidade da precipitação, relevo

e cobertura vegetal condiciona o comportamento do escoamento superficial. Na região sudoeste de Angola, a estação chuvosa concentra-se, em termos gerais, entre Outubro e Abril, enquanto o período mais seco ocorre entre Maio e Setembro. No sistema Caculuar–Cunene, CRUZ AT, et al. (2023) identificaram forte contraste espacial de precipitação, relevo e unidades geológicas, evidenciando a importância desses gradientes para a produção de sedimentos. Embora a bacia estudada seja mais ampla que o município, os resultados oferecem contexto geomorfológico regional para interpretar a dinâmica dos materiais transportados.

A análise da erosão no Lubango deve também considerar a transformação do uso do solo. A expansão urbana substitui progressivamente as superfícies vegetadas por habitações, caminhos, muros, áreas compactadas e superfícies impermeáveis. A transformação é especialmente relevante nas periferias, onde o parcelamento pode anteceder a instalação de drenagem formal. A investigação local de TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A (2015) já demonstrava que alterações da ocupação do solo e remoção da vegetação constituíam fatores relevantes na promoção da erosão. O mapa analisado neste artigo prolonga essa preocupação para uma representação espacial integrada.

3.2. Relevo, solos, cobertura e precipitação

11

O relevo do planalto da Huíla apresenta contrastes que podem produzir diferentes respostas hidrológicas. Setores com menor declive tendem a reduzir a velocidade do fluxo, enquanto vertentes mais inclinadas favorecem concentração e transporte. A transição entre superfícies elevadas e áreas mais baixas pode funcionar como zona de concentração de energia, sobretudo quando a cobertura vegetal é removida. A interpretação deve, entretanto, ser feita em conjunto com orientação, curvatura, área de contribuição e rede de drenagem.

Os solos do sul e centro de Angola resultam de processos de alteração de diferentes litologias e apresentam propriedades que variam espacialmente. Estudos de geologia e geotecnia realizados por autores que trabalham com solos angolanos mostram que mineralogia, granulometria e grau de alteração condicionam o comportamento mecânico e hidráulico. DUARTE IMR, et al. (2017), ao estudar materiais da região do Huambo, demonstraram a importância da composição mineralógica para a durabilidade de materiais terrosos. Embora o objeto do estudo seja diferente, a evidência reforça a necessidade de considerar propriedades locais do material superficial em modelos de erosão.

A cobertura vegetal funciona como uma interface entre precipitação e solo. Em setores onde a vegetação é mantida, a interceptação e a rugosidade superficial podem reduzir a energia erosiva. Quando ocorre remoção da vegetação, a exposição aumenta. A análise histórica de imagens na região do Lubango realizada por TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A (2015) permite compreender que a transformação da cobertura não é apenas consequência do crescimento urbano: ela pode ser um dos mecanismos que intensificam a erosão.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Delineamento do estudo

O estudo é de natureza teórica, analítica e espacial. Não se apresenta como levantamento de campo nem como calibração de um modelo físico de perda de solo. O objeto empírico é um produto cartográfico de risco erosivo elaborado em ambiente SIG para o município do Lubango, cuja leitura espacial é confrontada com literatura científica e com as fontes de dados declaradas no mapa. Essa definição metodológica é importante porque impede que as classes cartográficas sejam tratadas como medições diretas de perda de solo ou como inventário de ravinas.

A estratégia foi organizada em quatro etapas: (1) revisão crítica de literatura sobre erosão, SIG, AHP, RUSLE, expansão urbana e contexto angolano; (2) identificação das fontes e

12

variáveis que sustentam o mapa do Lubango; (3) interpretação espacial das cinco classes de risco; e (4) discussão das implicações para planeamento, prevenção e investigação futura. A revisão priorizou artigos recentes, especialmente de 2022 a 2026, sem excluir trabalhos clássicos indispensáveis para compreender RUSLE, conservação do solo e conceitos geomorfológicos.

Como princípio de integridade científica, não foram criados valores quantitativos de área, percentagens de superfície ou taxas de erosão que não estivessem disponíveis no material de origem. A leitura das classes é, portanto, qualitativa. Essa opção evita atribuir precisão estatística a um mapa cujo raster original não foi disponibilizado para o presente artigo. A limitação será retomada na discussão e na seção específica de limitações.

4.2. Fontes de dados e variáveis

Tabela 1 — Fontes de dados utilizadas no mapeamento do risco de erosão do Lubango

Fonte	Tipo de informação / variável	Função analítica
IGCA	Cartografia de base e limites administrativos	Delimitação e referência territorial

ESA WorldCover 10 m 2021 v200	Uso e cobertura do solo	Representação da cobertura terrestre
OpenStreetMap	Rede viária, hidrografia e elementos urbanos	Apoio à interpretação e concentração do escoamento
NASA/USGS SRTM	Modelo digital de elevação	Derivação de declive e orientação
WorldClim	Superfícies climáticas de precipitação	Representação do gradiente climático

Fonte: elaborado pelos autores a partir das fontes declaradas no produto cartográfico e na literatura consultada.

O Instituto Geográfico e Cadastral de Angola (IGCA) foi considerado como fonte de cartografia de base e limites administrativos. O OpenStreetMap foi utilizado como camada complementar para vias, hidrografia e toponímia. O ESA WorldCover forneceu a camada de cobertura do solo. Para topografia, o modelo SRTM disponibilizado pela NASA/USGS permitiu derivar variáveis como declives. O WorldClim foi indicado como fonte de superfícies climáticas. A combinação é coerente com abordagens utilizadas em estudos recentes de risco de erosão, mas cada camada possui limitações próprias de escala e atualização.

A resolução de 10 m do WorldCover é suficiente para reconhecer padrões gerais de urbanização e cobertura, mas não necessariamente estruturas de microdrenagem. O SRTM, embora globalmente consistente, também pode suavizar pequenas diferenças topográficas em ambiente urbano. O OpenStreetMap apresenta vantagem de atualização colaborativa, porém sua completude depende do mapeamento local. Consequentemente, a qualidade do mapa final é função não apenas do método de sobreposição, mas da compatibilidade entre as resoluções e as incertezas de cada fonte.

13

4.3. Estrutura de modelação espacial

A lógica geral do mapa analisado pode ser representada por uma sobreposição de fatores biofísicos e antrópicos. O declive tende a aumentar a suscetibilidade; determinadas classes de uso e cobertura podem aumentar ou reduzir a proteção; a precipitação funciona como fator de erosividade; a drenagem e as vias podem indicar concentração ou canalização do escoamento. A classificação final foi organizada em cinco níveis: muito baixa, baixa, média, alta e muito alta.

Em estudos formais de AHP, a matriz de comparação par a par é usada para derivar pesos e avaliar consistência. O mapa do Lubango, conforme documentado no artigo de origem, deve ser interpretado como uma combinação por sobreposição ponderada; entretanto, os valores numéricos dos pesos não foram disponibilizados no material analisado. Assim, não é metodologicamente defensável reconstruir esses pesos a partir da aparência do mapa. A presente

investigação discute a lógica do método, mas não afirma que um determinado fator tenha recebido peso específico quando esse valor não está documentado.

Para estudos futuros, recomenda-se que o modelo seja formalizado em ambiente reprodutível, com metadados para cada camada, data de aquisição, resolução, sistema de referência, método de reclassificação, peso, fonte e regra de normalização. Isso permitiria que outro investigador reproduzisse o procedimento e realizasse análise de sensibilidade. A reprodutibilidade é especialmente importante quando mapas de risco são usados para orientar decisões de investimento público.

4.4. Critérios de interpretação e validação

A interpretação do mapa foi realizada por leitura espacial das manchas de risco e sua relação com bairros, relevo aparente, cobertura do solo, vias e drenagem. A leitura não deve ser confundida com validação. Validar significa confrontar previsões do modelo com ocorrências reais observadas no terreno, imagens de alta resolução ou inventários históricos. Como essa etapa não foi realizada, as conclusões espaciais são apresentadas como padrões sugeridos pelo mapa e não como prova causal.

Uma estratégia robusta de validação para o Lubango poderia combinar inventário georreferenciado de ravinas e sulcos, fotografias de campo, levantamentos GNSS, imagens de drones e séries temporais de satélite. Pontos de erosão seriam comparados com as classes previstas, permitindo construir matriz de confusão ou métricas como sensibilidade, especificidade, precisão e área sob a curva ROC, caso se disponha de um modelo binário ou contínuo. Em modelos multiclases, métricas específicas poderiam avaliar a correspondência entre severidade observada e classe cartográfica.

Além da validação espacial, seria necessária validação temporal. Uma classe de risco pode estar correta para um determinado ano e tornar-se inadequada após urbanização, abertura de uma estrada ou alteração da cobertura vegetal. A atualização periódica é, portanto, parte da qualidade do produto. A experiência de YUKSEL EE, KARAN OF e AKAY AE (2024), que analisaram risco erosivo multitemporal, ilustra a importância de observar mudanças no uso do solo ao longo do tempo.

5. RESULTADOS

5.1. Estrutura espacial das classes de risco

A leitura do mapa de risco revela uma distribuição espacial heterogênea. As classes baixa e média ocupam grande parte da mancha urbana, enquanto as classes alta e muito alta aparecem de forma mais concentrada. O padrão geral é compatível com a expectativa de que a combinação de declive, cobertura do solo, precipitação e concentração de escoamento produza maior suscetibilidade em setores onde esses fatores se sobrepõem.

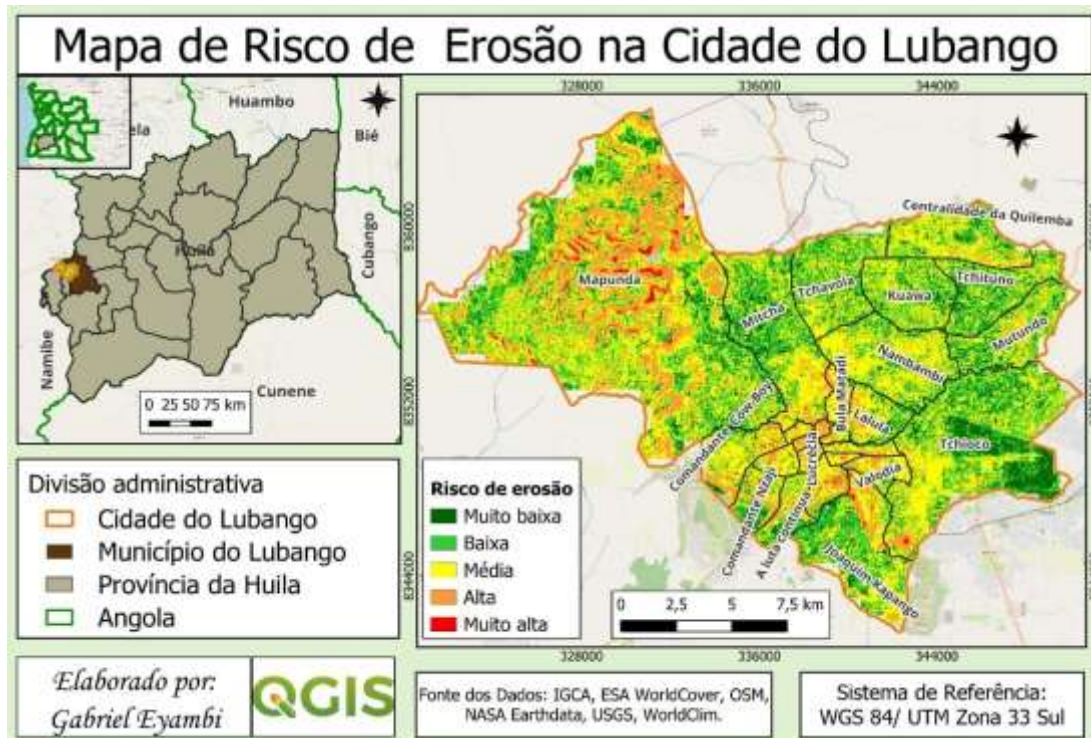
No quadrante norte e noroeste, particularmente em Mapunda, destaca-se uma extensa área de risco alto, intercalada por ocorrências de risco muito alto. A interpretação visual sugere relação com relevo mais acidentado e superfícies de solo exposto. O mapa, entretanto, não permite concluir isoladamente que uma única causa seja responsável. A presença de solo exposto pode resultar de urbanização, remoção de vegetação, circulação, exploração de materiais ou outras formas de uso do território. A confirmação exigiria observação de campo e dados temporais.

Na faixa central e meridional, setores como Nambambi, Lalula, Bula Matadi e Valodia apresentam predominância de risco médio, com transições para classes mais elevadas. Essas zonas podem representar áreas de contacto entre tecido urbano consolidado, superfícies abertas e frentes de expansão. O resultado é coerente com a hipótese de que a transformação gradual da cobertura pode produzir um mosaico espacial de suscetibilidade em vez de uma distribuição uniforme.

Nas proximidades de Comandante Cow-Boy e A Luta Continua/Lucrécia observam-se manchas de risco alto e muito alto associadas, na leitura cartográfica, a corredores que aparentam corresponder a linhas de drenagem ou vias. Esse padrão é particularmente relevante porque demonstra que o risco pode ser condicionado pela concentração do escoamento. Mesmo que a superfície circundante seja classificada como risco moderado, um corredor de fluxo pode concentrar energia e gerar uma feição erosiva localizada.

Nas zonas leste e sudeste, incluindo Tchioco, Kuawa e Tchituno, aparecem classes muito baixa e baixa com maior expressão. A interpretação possível é de menor pressão antrópica direta e/ou maior manutenção da cobertura vegetal em setores menos urbanizados. Contudo, essa leitura deve ser considerada hipótese espacial, pois a classificação não foi acompanhada de medições independentes de cobertura vegetal ou de taxas de erosão.

Figura 1 — Mapa de risco de erosão na Cidade do Lubango



Fonte: Cartografia: Gabriel Eyambi (QGIS). Fontes: IGCA; ESA WorldCover; OpenStreetMap; NASA Earthdata/USGS; WorldClim. Sistema de referência: WGS 84/ UTM Zona 33 Sul.

16

Tabela 2 — Síntese das classes de risco de erosão e expressão espacial no Lubango

Classe	Expressão espacial interpretada	Implicação prioritária
Muito baixa	Maior presença a leste/sudeste e em franjas menos urbanizadas.	Conservar cobertura e evitar alterações que aumentem escoamento.
Baixa	Distribuída pela mancha urbana e encostas de menor declive.	Monitorização e manutenção preventiva da drenagem.
Média	Faixa central/sul e zonas de transição urbano-solo exposto.	Controlo de expansão e proteção do solo.
Alta	Concentração no norte/noroeste, sobretudo Mapunda.	Priorizar diagnóstico de campo e intervenções de drenagem.
Muito alta	Manchas pontuais em Mapunda e junto a eixos de drenagem/vias.	Intervenção prioritária e avaliação de exposição.

Fonte: elaborado pelos autores com base na leitura do mapa de risco analisado.

5.2. Comparação metodológica com estudos recentes

Tabela 3 — Estudos de referência sobre mapeamento de erosão e risco (2022–2024)

Autor(es)	Contexto	Método	DOI
Kucuker; Cedano Giraldo (2022)	Erzurum, Turquia	SIG + AHP + sobreposição ponderada	10.1016/j.ecoinf.2022.101788

Fekete (2023)	Nairobi e Nyeri, Quênia	Análise multitemporal de imagens	10.1007/s11069-022-05515-4
Ssewankambo et al. (2023)	Bacia periurbana do Lago Vitória	RUSLE + SIG	10.1007/s40808-022-01565-6
Salhi et al. (2023)	Tanger, Marrocos	Morfometria + detecção remota	10.1038/s41598-023-40135-3
De Geeter et al. (2023)	África	Modelo probabilístico de suscetibilidade a ravinas	10.1016/j.envres.2023.115573
Chuma et al. (2023)	Luzinzi, RD Congo	Machine learning	10.1016/j.pce.2022.103295
Salhi; Benabdelouahab; Heggy (2024)	Norte de África	SIG + detecção remota + hidroclima	10.1016/j.jag.2024.104132
Yuksel; Karan; Akay (2024)	Bacia de Doğancı, Turquia	AHP multitemporal	10.3390/f15071135

Fonte: elaborado pelos autores com base na literatura selecionada.

A comparação revela uma convergência metodológica importante: a erosão é tratada como fenômeno espacialmente estruturado, e os estudos utilizam SIG para integrar variáveis topográficas, climáticas e de uso do solo. A principal diferença está na sofisticação do modelo. Enquanto alguns trabalhos recorrem a sobreposição ponderada e AHP, outros empregam RUSLE, modelos probabilísticos ou algoritmos de aprendizagem automática. Essa diversidade mostra que não existe uma solução universal; a escolha depende do objetivo, da escala e da disponibilidade de dados.

O estudo de DE GEETER S, et al. (2023) é particularmente relevante para o continente africano por produzir um mapa de suscetibilidade a cabeceiras de ravinas em resolução de 30 m. A escala continental oferece contexto para compreender que processos de ravinamento podem ser modelados com variáveis ambientais relativamente simples, mas também demonstra a importância de grandes bases de dados de ocorrências. Para o Lubango, uma base municipal de ravinas poderia permitir modelos muito mais específicos.

SSEWANKAMBO G, et al. (2023) demonstram a utilidade da RUSLE em contexto periurbano africano e reforçam a necessidade de validação de campo. A comparação com o Lubango sugere uma agenda metodológica: utilizar o mapa multicritério como diagnóstico inicial e, posteriormente, testar se a distribuição das classes se mantém quando são introduzidos fatores quantitativos de erosividade e erodibilidade. O objetivo não seria substituir automaticamente o mapa atual, mas avaliar sua robustez.

CHUMA GB, et al. (2023) apontam uma possibilidade ainda mais avançada. Modelos de machine learning podem aprender relações não lineares entre ocorrência de ravinas e fatores ambientais. Para Angola, contudo, a prioridade deve ser a criação de inventários de ocorrências

e a padronização das variáveis antes da adoção de modelos complexos. Um algoritmo sofisticado treinado com dados incompletos pode gerar uma aparência de precisão sem correspondente qualidade científica.

5.3. Confronto com evidências nacionais

A literatura nacional é produzida por investigadores que trabalham diretamente com Angola confirma que o risco erosivo possui forte dimensão territorial. TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A (2015) identificaram na região do Lubango uma relação entre erosão, ocupação do solo e perda de cobertura vegetal. Este resultado constitui a evidência local mais diretamente relacionada com o presente mapa e dá suporte à interpretação das áreas de expansão urbana como setores que merecem monitorização.

QUETA FM, DUARTE IMR e PINHO AB (2016) analisaram ravinas em Angola numa perspectiva nacional e concluíram que a ocorrência resulta da combinação de clima, topografia e tipo de solo, agravada por ações humanas como obras, obstrução da drenagem, exploração mineral, agricultura e incêndios. A contribuição desse estudo é importante para evitar uma leitura exclusivamente climática do problema. Mesmo quando a chuva atua como gatilho, a configuração do território pode determinar onde a água se concentra e onde o solo cede.

18

ANTÓNIO FM, BONITO FAB e BENTA AARCA (2024) atualizam a discussão sobre ravinas em Luanda e chamaram atenção para a diversidade de formas erosivas e para as características dos solos arenosos locais. Embora Lubango e Luanda tenham contextos geológicos diferentes, o estudo demonstra que intervenções urbanas podem acelerar processos erosivos e produzir danos em infraestrutura. O uso desse paralelo é comparativo e não implica que os solos do Lubango possuam o mesmo comportamento geotécnico.

CRUZ AT, DINIS PA, LUCIC M e GOMES A (2023), ao estudarem o sistema Caculuar–Mucope, fornecem evidências de que relevo, geologia, precipitação e processos exógenos influenciam a produção de sedimentos no sudoeste de Angola. A proximidade regional torna esse resultado relevante para compreender a importância da conectividade sedimentar e das características da paisagem. Para o Lubango, isso significa que processos erosivos locais podem contribuir para fluxos sedimentares que ultrapassam a parcela ou o bairro onde a erosão começou.

A contribuição de DUARTE IMR, et al. (2017) para o entendimento de materiais terrosos de Angola reforça outro ponto: propriedades mineralógicas e texturais devem ser incorporadas quando se pretende avançar de um índice qualitativo para uma estimativa quantitativa. A cartografia de cobertura e relevo é essencial, mas não substitui o conhecimento do material erodível. Um modelo futuro para o Lubango deveria integrar um mapa pedológico/geotécnico de detalhe e ensaios de erodibilidade em locais representativos.

6. DISCUSSÃO

6.1. O que o mapa explica e o que ele não explica

O mapa analisado é cientificamente útil porque transforma um conjunto heterogêneo de fatores em uma linguagem espacial comum. A existência de classes de risco permite localizar setores prioritários, orientar campanhas de campo e comunicar o problema a decisores. Entretanto, o mapa não explica por si só a taxa de crescimento de uma ravina, a frequência de eventos erosivos, a profundidade das feições ou a perda anual de solo. Essas perguntas exigem outros tipos de dados. Uma boa cartografia de risco não deve ser sobrecarregada com interpretações que o método não suporta.

A distinção entre suscetibilidade e risco é central. O padrão espacial observado pode ser utilizado para identificar áreas onde o ambiente físico favorece a erosão, mas a prioridade pública depende também da exposição. Uma pequena mancha de risco muito alto em terreno desocupado pode ter menor prioridade imediata que uma mancha de risco alto atravessada por uma estrada, junto a uma escola ou em zona densamente habitada. A próxima geração de mapas do Lubango deveria, por isso, produzir pelo menos dois produtos complementares: um mapa de suscetibilidade biofísica e um mapa de risco territorial baseado em exposição e vulnerabilidade.

A interpretação das áreas de Mapunda como setores prioritários é coerente com a leitura cartográfica apresentada, mas deve ser confirmada em campo. A concentração das classes mais altas pode refletir efetivamente maior declive e exposição do solo; contudo, sem acesso aos rasters e sem inventário de ocorrências, não é possível calcular a contribuição relativa de cada variável. Essa cautela não reduz o valor do mapa; ao contrário, torna sua utilização mais responsável e fornece uma agenda clara para investigação.

6.2. Urbanização e produção de risco

A expansão urbana pode ser interpretada como processo de produção de risco quando transforma características do terreno sem acompanhar a capacidade de drenagem e estabilização. Abrir uma rua modifica a superfície; retirar vegetação altera infiltração; construir muros pode redirecionar água; lançar águas pluviais num ponto concentrado pode iniciar um canal. Assim, a erosão urbana é frequentemente resultado de uma sequência de pequenas decisões territoriais, e não de um único evento extremo.

A literatura de Nairobi e Nyeri mostra que as franjas periurbanas merecem atenção porque concentram a expansão e exposição a perigos. No Lubango, a mesma lógica pode ser aplicada como hipótese de planeamento: novas áreas de urbanização devem ser avaliadas antes da ocupação, evitando que o mapa de risco seja utilizado apenas depois do aparecimento de ravinas. A cartografia preventiva é mais económica do que a cartografia reativa, porque permite ajustar traçados, preservar corredores de drenagem e orientar infraestruturas.

A prevenção deve também considerar a escala de bairro. Um mapa municipal pode identificar setores prioritários, mas a intervenção física ocorre em microbacias e corredores de escoamento. A unidade operacional recomendada para planos de drenagem pode ser a microbacia urbana: delimitar área contribuinte, identificar pontos de concentração, localizar solos expostos, medir declives, avaliar capacidade das estruturas existentes e definir medidas de retenção ou dissipação. O SIG é particularmente adequado para esse encadeamento.

6.3. Implicações das alterações climáticas

A relação entre erosão e clima deve ser tratada com cautela. O risco não aumenta simplesmente porque a precipitação anual aumenta ou diminui. A distribuição temporal dos eventos é igualmente importante. Chuvas intensas concentradas em curtos períodos podem gerar picos de escoamento superiores aos produzidos por chuvas mais uniformemente distribuídas. Em regiões com estação seca prolongada, a superfície pode permanecer desprotegida antes do início das chuvas, enquanto incêndios, remoção de vegetação e compactação podem reduzir a infiltração. Assim, a análise climática relevante para erosão deve considerar intensidade, duração, frequência e sazonalidade.

Estudos recentes do Norte de África associam alterações hidroclimáticas e erosão a processos de inundação e produção de sedimentos (SALHI A, BENABDELOUAHAB S e

HEGGY E, 2024). O paralelismo com Angola não deve ser entendido como equivalência climática, mas como indicação de que erosão, drenagem e cheias precisam ser analisadas de forma integrada. Uma ravina pode funcionar como indicador de concentração de escoamento e, ao mesmo tempo, contribuir para transportar sedimentos para canais, alterando a capacidade hidráulica a jusante.

Para o Lubango, recomenda-se que futuros mapas incorporem indicadores de extremos de precipitação e cenários climáticos, além das médias utilizadas como base inicial. A abordagem pode incluir séries históricas de estações locais, produtos de precipitação por satélite e projeções climáticas regionalizadas. A finalidade não é prever exatamente onde ocorrerá cada ravina, mas testar como a superfície de suscetibilidade mudaria sob diferentes regimes de chuva.

6.4. Vegetação, soluções baseadas na natureza e engenharia

A mitigação da erosão não deve ser reduzida à construção de estruturas rígidas. Em áreas de risco baixo a médio, a conservação da cobertura vegetal, o plantio de espécies adequadas, a cobertura morta, a recuperação de taludes e o controle do pisoteio podem reduzir a exposição do solo. Em setores onde o fluxo é concentrado, medidas vegetativas podem precisar ser combinadas com estruturas de dissipação e estabilização. A escolha deve considerar a intensidade do processo e a manutenção disponível.

21

A recomendação de preservar e recuperar a cobertura vegetal já aparece no estudo de TRINDADE A, DINIS PA e PEREIRA A (2015). Essa convergência entre evidência local e literatura internacional é importante para o desenho de políticas. A vegetação não deve, entretanto, ser usada como solução universal. Em ravinas profundas ou em locais onde a água chega com grande energia, são necessárias intervenções hidráulicas e geotécnicas. A solução adequada é aquela que reduz a energia do escoamento, estabiliza o solo e mantém funcionalidade ao longo do tempo.

A educação ambiental e a participação comunitária também podem apoiar a prevenção. Moradores conhecem frequentemente os caminhos de água, os pontos onde as estradas ficam intransitáveis e as feições que evoluem durante a época chuvosa. Um sistema municipal de ciência cidadã, integrado a SIG, poderia permitir o envio de fotografias georreferenciadas e alertas. Esses dados não substituiriam levantamento técnico, mas poderiam melhorar a detecção precoce e a atualização do inventário.

6.5. Qualidade dos dados, incerteza e reprodutibilidade

A qualidade de um mapa de risco depende de três componentes: qualidade dos dados de entrada, qualidade do modelo e qualidade da validação. Um mapa pode ser cartograficamente perfeito e, ainda assim, cientificamente frágil se os dados de entrada forem inadequados. Da mesma forma, um modelo sofisticado não compensa uma base de ocorrências incompleta. No caso do Lubango, a transparência sobre as fontes é uma vantagem do produto analisado, mas faltam informações essenciais sobre pesos, regras de reclassificação e validação.

Recomenda-se a criação de um protocolo de metadados para cada camada: nome, fonte, data, resolução, projeção, escala, processamento, responsável e limitações. Também seria útil armazenar as versões dos dados e do projeto QGIS, permitindo auditoria. A ciência geoespacial contemporânea valoriza cada vez mais a reprodutibilidade; em países onde os dados são escassos, essa prática é ainda mais importante porque permite que sucessivos investigadores melhorem o mesmo produto em vez de reiniciar o trabalho.

A análise de sensibilidade deveria ser incorporada. Se pequenas alterações nos pesos provocarem grandes mudanças na localização das áreas de alto risco, o mapa é sensível e as decisões devem ser acompanhadas de incerteza. Se o padrão permanecer estável em diferentes cenários, aumenta a confiança no resultado. Esse procedimento é relativamente simples e poderia elevar significativamente a robustez científica do mapeamento do Lubango.

2.6. Conectividade hidrológica e sedimentar em paisagens urbanas

A análise do risco erosivo beneficia de uma mudança de perspectiva: em vez de considerar cada parcela de terreno como unidade isolada, é útil compreender a conectividade entre áreas produtoras, corredores de transporte e zonas de deposição. Em uma microbacia urbana, a água que cai sobre telhados e ruas pode ser transferida para um caminho, depois para uma vala e, finalmente, para uma linha de drenagem natural. Em cada etapa, a energia do fluxo e a quantidade de sedimento transportado podem mudar. O ponto onde a erosão aparece pode, portanto, estar distante do local onde a alteração do território ocorreu.

Essa ideia é particularmente importante para o Lubango porque a urbanização cria superfícies conectadas artificialmente. Uma estrada pode ligar duas encostas que anteriormente drenavam de forma independente. Um muro pode bloquear um caminho natural e concentrar água numa abertura. Um aterro pode reduzir uma depressão que funcionava como

armazenamento temporário. Essas alterações são pequenas quando observadas isoladamente, mas podem produzir mudanças relevantes no comportamento hidrológico quando se acumulam ao longo da expansão urbana.

A cartografia de risco pode incorporar essa dimensão através de variáveis como área de contribuição, acumulação de fluxo, densidade de drenagem, distância a canais e posição topográfica. A simples distância euclidiana a um rio é menos informativa do que uma medida que considere o caminho efetivo da água. Ferramentas de análise hidrológica em SIG permitem derivar redes de fluxo a partir de modelos digitais de elevação, embora a qualidade do resultado dependa da resolução e da correção do MDE. Em ambientes urbanos, a inclusão da rede viária e das estruturas de drenagem é necessária para evitar que o modelo represente apenas o relevo natural.

A conectividade também permite compreender o assoreamento. Sedimentos mobilizados em encostas podem ser depositados em valas, canais ou zonas de baixa velocidade. Quando esses depósitos reduzem a seção hidráulica, aumentam a probabilidade de transbordamento durante eventos de chuva intensa. Assim, erosão e inundação podem formar um ciclo de retroalimentação: a erosão fornece sedimentos, o sedimento reduz a capacidade de drenagem e a inundação pode voltar a erodir margens e superfícies expostas. A gestão municipal deveria, portanto, evitar tratar os dois problemas como processos administrativos completamente separados.

7. IMPLICAÇÕES PARA O ORDENAMENTO DO TERRITÓRIO E GESTÃO MUNICIPAL

A primeira implicação é a necessidade de incorporar o risco erosivo no licenciamento e expansão urbana. Antes de autorizar novos loteamentos, o município deveria verificar a classe de suscetibilidade, a proximidade de linhas de drenagem, o declive e a capacidade de infraestrutura. Áreas de risco muito alto deveriam ser objeto de avaliação específica e, quando necessário, de restrição de ocupação. Em zonas de risco alto, a ocupação pode ser condicionada a medidas de drenagem e estabilização previamente definidas.

A segunda implicação é a criação de corredores de drenagem protegidos. Linhas de água e caminhos preferenciais de escoamento devem ser tratados como infraestrutura natural. A ocupação ou obstrução desses corredores pode deslocar o fluxo para áreas habitadas e aumentar

a erosão. O SIG permite delimitar essas zonas e cruzá-las com o cadastro urbano, criando mapas de conflito entre ocupação e drenagem.

A terceira implicação é a priorização territorial. Com base no mapa analisado, Mapunda e alguns corredores periféricos merecem campanhas de campo prioritárias. A prioridade deve ser confirmada por critérios adicionais: número de ocorrências, exposição populacional, importância das vias, proximidade de equipamentos públicos, profundidade das ravinas e taxa de evolução. Uma matriz multicritério municipal poderia apoiar a alocação de recursos.

A quarta implicação é a integração entre ambiente e infraestrutura. Obras de drenagem não devem ser projetadas isoladamente da vegetação, do solo e do desenho urbano. A solução deve considerar toda a microbacia. Isso evita transferir o problema para o jusante: uma vala que acelera o fluxo pode reduzir a erosão num ponto e aumentar a erosão noutro. A dissipação de energia e a retenção temporária devem ser parte do desenho.

A quinta implicação é a criação de um sistema permanente de monitorização. O município pode atualizar anualmente a cobertura do solo, registrar novas vias, acompanhar áreas de risco e comparar imagens antes e depois da estação chuvosa. Um painel geográfico simples poderia apresentar ocorrências, fotografias, intervenções e estado de manutenção. O investimento em dados pode reduzir custos futuros de resposta.

8. LIMITAÇÕES DO ESTUDO E AGENDA DE INVESTIGAÇÃO

A principal limitação é a ausência dos ficheiros raster originais e das matrizes de pesos do mapa analisado. Sem esses dados, não é possível calcular áreas por classe, reproduzir exatamente a sobreposição ou testar a sensibilidade do modelo. A análise permanece qualitativa e interpretativa. Esta limitação foi assumida deliberadamente para evitar a fabricação de resultados quantitativos.

A segunda limitação é a ausência de validação de campo. O mapa pode identificar corretamente padrões gerais, mas a correspondência entre classes e feições reais ainda precisa ser testada. A validação deve ser realizada em pontos distribuídos por todas as classes, com maior densidade nas áreas de risco alto e muito alto. Fotografias, medidas de profundidade e largura, declive local e condições de drenagem seriam dados mínimos.

A terceira limitação está relacionada à escala dos dados. WorldCover e SRTM são excelentes fontes de referência, mas podem ser insuficientes para processos urbanos de pequena

dimensão. Dados de drones, LiDAR quando disponíveis ou imagens comerciais de alta resolução poderiam melhorar a representação de ravinas, valas e microtopografia. A adoção dessas tecnologias deve ser seletiva, concentrando recursos nas áreas prioritárias.

A quarta limitação é a ausência de uma base municipal sistemática de ocorrências erosivas. Sem inventário histórico, torna-se difícil calibrar modelos estatísticos ou de aprendizagem automática. A criação desse inventário deveria ser uma prioridade de pesquisa aplicada. Cada ocorrência deveria conter localização, data, tipo de feição, dimensões, material, causa aparente, infraestrutura afetada, fotografia e estado de evolução.

A agenda futura pode ser organizada em cinco frentes: (1) validação de campo; (2) modelação quantitativa com RUSLE e/ou AHP; (3) análise multitemporal do crescimento urbano; (4) integração de exposição e vulnerabilidade; e (5) desenvolvimento de um sistema municipal de monitorização. Essas etapas transformariam um mapa diagnóstico em uma plataforma de apoio à decisão.

Uma linha adicional consiste na análise de conectividade sedimentar entre encostas, ruas, ravinas e cursos de água. O trabalho de CRUZ AT, et al. (2023) no sudoeste de Angola mostra que a produção de sedimentos depende da combinação entre geologia, relevo e processos exógenos. Aplicar uma perspectiva semelhante em escala urbana permitiria compreender não apenas onde ocorre erosão, mas para onde os sedimentos são transportados e onde se acumulam.

9. CONCLUSÃO

O mapeamento de riscos erosivos no Lubango demonstra o potencial dos Sistemas de Informação Geográfica para integrar relevo, cobertura do solo, precipitação, drenagem e dinâmica urbana em uma representação espacialmente explícita. A leitura do mapa analisado evidencia heterogeneidade territorial, com concentração das classes alta e muito alta no norte/noroeste, particularmente em Mapunda, e ocorrências localizadas associadas a corredores de drenagem e frentes de expansão. Esses padrões são compatíveis com a literatura que identifica a interação entre declive, cobertura vegetal, precipitação e intervenção humana como determinante para a intensificação da erosão.

A principal contribuição do estudo está em articular evidências nacionais com metodologias geoespaciais contemporâneas. Trabalhos de investigadores que estudam Angola já demonstraram a relevância da ocupação do solo, dos solos, do relevo e da ação humana na

geração de ravinas e erosão. A literatura internacional recente acrescenta ferramentas como AHP, RUSLE, análise multitemporal e machine learning. Para o Lubango, a combinação dessas abordagens deve ser progressiva e orientada pela disponibilidade e qualidade dos dados.

Conclui-se que o mapa atual deve ser utilizado como instrumento de diagnóstico e priorização, não como substituto de levantamentos de campo ou de estudos hidráulicos e geotécnicos. A transformação do produto em ferramenta de gestão exige validação, análise de sensibilidade, atualização temporal e integração da exposição humana e da infraestrutura. A criação de um inventário municipal de erosão e a incorporação do risco nos instrumentos de ordenamento são passos decisivos.

Mais do que localizar áreas vulneráveis, a cartografia deve ajudar a evitar a produção de novos riscos. Para isso, a informação geoespacial precisa chegar às decisões sobre loteamento, vias, drenagem, conservação vegetal e expansão urbana. No Lubango, a prevenção baseada em SIG pode constituir uma ponte entre ciência, administração pública e participação comunitária, contribuindo para uma cidade mais resiliente diante da variabilidade climática e da transformação acelerada do território.

REFERÊNCIAS

26

ANTÓNIO FM, BONITO FAB, BENTA AARCA. Ravines in collapsible soils of Luanda, Angola: forms of erosion – state of the art. In: Proceedings of the XVIII ECSMGE. 2024. DOI: 10.1201/9781003431749-179.

CHUMA GB, et al. Gully erosion susceptibility mapping using four machine learning methods in Luzinzi watershed, Eastern Democratic Republic of Congo. Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, 2023; 129:103295. DOI: 10.1016/j.pce.2022.103295.

CRUZ AT, DINIS PA, LUCIC M, GOMES A. Spatial variations in sediment production and surface transformations in subtropical fluvial basins (Caculuar River, south-west Angola): implications for the composition of sedimentary deposits. The Depositional Record, 2023; 9(1):83-98. DOI: 10.1002/dep2.208.

DE GEETER S, VERSTRAETEN G, POESEN J, CAMPFORTS B, VANMAERCKE M. A data driven gully head susceptibility map of Africa at 30 m resolution. Environmental Research, 2023; 224:115573. DOI: 10.1016/j.envres.2023.115573.

DUARTE IMR, PEDRO EDC, VARUM H, MIRÃO JAP, PINHO AB. Soil mineralogical composition effects on the durability of adobe blocks from the Huambo region, Angola. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2017; 76:125-132. DOI: 10.1007/s10064-015-0800-3.

FICK SE, HIJMANS RJ. WorldClim 2: new 1-km spatial resolution climate surfaces for global land areas. *International Journal of Climatology*, 2017; 37(12):4302-4315. DOI: 10.1002/joc.5086.

IGCA – INSTITUTO GEOGRÁFICO E CADASTRAL DE ANGOLA. Cartografia de base e limites administrativos de Angola. Luanda: IGCA; s.d.

KUCUKER DM, CEDANO GIRALDO D. Assessment of soil erosion risk using an integrated approach of GIS and Analytic Hierarchy Process (AHP) in Erzurum, Türkiye. *Ecological Informatics*, 2022; 71:101788. DOI: 10.1016/j.ecoinf.2022.101788.

NASA JPL. NASA Shuttle Radar Topography Mission Global 1 arc second (SRTM). NASA EOSDIS Land Processes DAAC; 2013.

OPENSTREETMAP CONTRIBUTORS. OpenStreetMap. 2024.

QUETA FM, DUARTE IMR, PINHO AB. Ravines in Angola: causes and restraint methods. In: 35th International Geological Congress, Cape Town, South Africa. 2016.

SALHI A, EL HASNAOUI Y, PÉREZ CUTILLAS P, HEGGY E. Soil erosion and hydroclimatic hazards in major African port cities: the case study of Tangier. *Scientific Reports*, 2023; 13:13158. DOI: 10.1038/s41598-023-40135-3.

SALHI A, BENABDELOUAHAB S, HEGGY E. Growing soil erosion risks and their role in modulating catastrophic floods in North Africa. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2024; 133:104132. DOI: 10.1016/j.jag.2024.104132.

SSEWANKAMBO G, KABENGE I, NAKAWUKA P, et al. Assessing soil erosion risk in a peri-urban catchment of the Lake Victoria basin. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2023; 9:1633-1649. DOI: 10.1007/s40808-022-01565-6.

TRINDADE A, DINIS PA, PEREIRA A. Erosão de solos na região do Lubango. Tundavala: *Revista Angolana de Ciências*, 2015; 2(1). Trabalho baseado na dissertação de mestrado “Erosão de solos na região do Lubango, Angola”, 2011.

WISCHMEIER WH, SMITH DD. Predicting rainfall erosion losses: a guide to conservation planning. Washington, DC: USDA; 1978.

YUKSEL EE, KARAN OF, AKAY AE. Spatio-temporal analysis of erosion risk assessment using GIS-based AHP method: a case study of Doğancı Dam Watershed in Bursa (Türkiye). *Forests*, 2024; 15(7):1135. DOI: 10.3390/f15071135.

ZANAGA D, VAN DE KERCHOVE R, DAEMS D, et al. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. 2022. DOI: 10.5281/zenodo.7254221.