

Geotecnologias aplicadas à análise e modelagem de riscos ambientais: uma revisão sistemática da literatura

Thalline Rodrigues da Silva¹

¹Professor de Gestão e Negócios da Escola do Futuro Luiz Rassi, Aparecida de Goiânia, Brasil (thalline.ro@gmail.com)

Resumo: A revisão sistemática analisou a produção científica (2015–2025) sobre geotecnologias aplicadas aos riscos ambientais. Foram identificadas tendências relacionadas ao uso de SIG, sensoriamento remoto, inteligência artificial e aprendizado de máquina na modelagem espacial. Os resultados evidenciam a evolução para abordagens multiriscos e apontam lacunas quanto à integração de fatores socioambientais e sistemas inteligentes de apoio ao planejamento territorial e à gestão ambiental.

Palavras-chave: Análise espacial; Sistemas de Informação Geográfica; Sensoriamento remoto; Inteligência artificial; Planejamento territorial.

INTRODUÇÃO

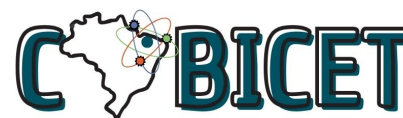
As transformações territoriais decorrentes da urbanização constituem um dos principais desafios ambientais do século XXI. Segundo as Nações Unidas, mais de dois terços da população mundial viverão em áreas urbanas até 2050, intensificando a pressão sobre os recursos naturais, os sistemas hídricos e a infraestrutura das cidades (UNITED NATIONS, 2019). Esse processo, frequentemente caracterizado pela expansão horizontal da malha urbana, impermeabilização do solo, supressão da cobertura vegetal e ocupação de áreas ambientalmente frágeis, modifica profundamente o funcionamento dos ecossistemas urbanos e aumenta a suscetibilidade à ocorrência de eventos adversos, como enchentes, erosão, movimentos de massa e degradação ambiental (IPCC, 2023; FARINA, 2006). Nesse contexto, compreender a distribuição espacial dos riscos ambientais tornou-se uma necessidade estratégica para o planejamento territorial sustentável e para a formulação de políticas públicas orientadas pela prevenção e pela adaptação às mudanças ambientais.

A compreensão do risco ambiental evoluiu significativamente nas últimas décadas, deixando de ser interpretada apenas como consequência das características naturais da paisagem para incorporar fatores sociais, econômicos, tecnológicos e institucionais. De acordo com Ross (1994), a fragilidade ambiental resulta da interação entre os componentes físicos do meio e as formas de uso e ocupação do território, enquanto Cutter (1996) argumenta que a vulnerabilidade representa uma construção socioespacial determinada pela capacidade das populações de responder aos impactos ambientais. Mais recentemente, o relatório do IPCC (2023) reforça que risco, exposição e vulnerabilidade constituem

dimensões inseparáveis dos sistemas territoriais contemporâneos, exigindo abordagens integradas capazes de representar a complexidade das relações entre natureza e sociedade.

Nesse cenário, as geotecnologias consolidaram-se como uma das principais ferramentas para análise, monitoramento e modelagem dos fenômenos ambientais. O desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), do sensoriamento remoto, dos modelos digitais de elevação, dos Sistemas Globais de Navegação por Satélite (GNSS) e das plataformas de processamento em nuvem revolucionou a produção e a análise de informações espaciais, permitindo integrar grandes volumes de dados provenientes de diferentes fontes e escalas (GOODCHILD, 2007; LONGLEY et al., 2015). Essa capacidade de integração tornou possível representar espacialmente fenômenos complexos e compreender suas interações de maneira muito mais precisa do que os métodos tradicionais de análise territorial.

O avanço da disponibilidade de dados geoespaciais de livre acesso também impulsionou uma profunda transformação na ciência geográfica e ambiental. Bases como MapBiomas, Sentinel, Landsat, CBERS, SRTM, ALOS, OpenStreetMap e diversas infraestruturas nacionais de dados espaciais passaram a disponibilizar informações contínuas sobre relevo, uso e cobertura da terra, hidrografia, clima e expansão urbana, favorecendo a construção de diagnósticos territoriais em diferentes escalas espaciais e temporais (PIROLI, 2022; NASA, 2024). Como destacam Goodchild (2007) e Tibenderana, Ndalla e Kessy (2024), a sociedade contemporânea produz um volume sem precedentes de dados geográficos, transformando a informação espacial em um dos principais ativos estratégicos para a gestão pública, o



planejamento urbano e a tomada de decisão baseada em evidências.

Paralelamente à evolução das geotecnologias, observa-se uma rápida incorporação de técnicas de ciência de dados, aprendizado de máquina e inteligência artificial aos estudos ambientais. Algoritmos como Random Forest, Support Vector Machine, Redes Neurais Artificiais, Gradient Boosting e Deep Learning passaram a ser amplamente empregados na classificação do uso da terra, na modelagem de suscetibilidade ambiental, na previsão de inundações, na identificação de áreas suscetíveis a processos erosivos e na construção de modelos espaciais preditivos (ZHANG et al., 2024; HACAR et al., 2024; DELLA-SILVA et al., 2024). Essa convergência entre geoprocessamento e inteligência artificial representa uma das principais tendências da ciência geoespacial contemporânea, ampliando significativamente a capacidade analítica dos modelos ambientais e permitindo explorar relações espaciais cada vez mais complexas.

Apesar desse avanço tecnológico, a produção científica relacionada aos riscos ambientais permanece bastante fragmentada. Diferentes áreas do conhecimento utilizam terminologias específicas — como *environmental risk*, *environmental vulnerability*, *urban risk*, *flood risk*, *erosion risk*, *landslide susceptibility*, *hazard assessment* e *environmental fragility* — frequentemente associadas a objetivos, métodos e escalas distintas. Essa diversidade terminológica reflete a natureza multidisciplinar do tema, mas também dificulta a consolidação do conhecimento científico, tornando mais complexa a identificação das abordagens predominantes, das lacunas metodológicas e das tendências emergentes da pesquisa internacional (GALVÃO; PEREIRA, 2014; COOK; MULROW; HAYNES, 1997).

Nesse contexto, a revisão sistemática da literatura constitui um instrumento metodológico fundamental para organizar criticamente a produção científica disponível. Diferentemente das revisões narrativas, a revisão sistemática segue protocolos explícitos e reprodutíveis de identificação, seleção, avaliação crítica e síntese das evidências, reduzindo vieses de seleção e proporcionando maior robustez às conclusões obtidas (CRONIN; RYAN; COUGHLAN, 2008; FILIPPI et al., 2019). Além de sintetizar o estado do conhecimento, esse método permite identificar tendências de pesquisa, metodologias predominantes, lacunas científicas e oportunidades para o desenvolvimento de novas investigações, contribuindo para o avanço do conhecimento em áreas caracterizadas por elevada produção científica e rápida evolução tecnológica.

Diante desse panorama, torna-se pertinente reunir e analisar criticamente as evidências disponíveis acerca das pesquisas relacionadas aos riscos ambientais, considerando a diversidade de abordagens conceituais, metodológicas e tecnológicas empregadas na literatura recente. A sistematização desse conhecimento possibilita compreender como as geotecnologias vêm sendo utilizadas na identificação, análise e modelagem dos riscos ambientais, bem como identificar tendências emergentes e desafios científicos que poderão orientar futuras pesquisas e fortalecer a aplicação dessas ferramentas no planejamento territorial, na gestão ambiental e na construção de cidades mais resilientes e sustentáveis (GOODCHILD, 2007; LONGLEY et al., 2015; PIROLI, 2022).

A literatura também aponta para a carência de integração dessas tecnologias no ensino e no planejamento urbano. Conforme Ramadani et al. (2018), a falta de integração limita o impacto social e econômico dessas ferramentas, especialmente em contextos educacionais e municipais.

O objetivo deste estudo foi realizar uma revisão sistemática da literatura sobre a produção científica publicada entre 2015 e 2025 a respeito da aplicação das geotecnologias na análise e modelagem de riscos ambientais, identificando as principais abordagens metodológicas, tecnologias empregadas, tendências de pesquisa e lacunas do conhecimento.

MATERIAL E MÉTODOS

A revisão da literatura é uma etapa essencial no desenvolvimento de pesquisas acadêmicas e científicas, pois desempenha um papel fundamental na prevenção da duplicação de estudos, além de permitir a reutilização de pesquisas em diferentes contextos e escalas, quando aplicável. Esse processo é crucial para identificar lacunas existentes na literatura e contribuir para a formulação de novos temas, problemas de pesquisa, hipóteses e metodologias inovadoras (Baek, 2018; Galvão, 2019).

No entanto, as revisões sistemáticas da literatura seguem uma abordagem mais detalhada e rigorosa em comparação às revisões tradicionais. Elas visam visitar de forma criteriosa e abrangente a produção científica disponível sobre um tema específico. Esse método envolve a definição de estratégias de busca estruturadas, que têm como objetivo localizar fontes relevantes de maneira criteriosa e abrangente (Cronin, Ryan & Coughlan, 2008; Routroy & Behera, 2017; Filippi, 2019).

O protocolo utilizado para a realização de uma revisão sistemática envolve várias etapas: (i) definição da

questão de pesquisa; (ii) determinação dos critérios de inclusão e exclusão; (iii) seleção e acesso às fontes relevantes; (iv) avaliação da qualidade dos estudos incluídos; e (v) análise, síntese e disseminação dos resultados obtidos (Cronin, Ryan & Coughlan, 2008; Filippi, 2019).

No quadro 01, apresentada a seguir, descreve o desenvolvimento de cada uma dessas etapas no protocolo de revisão sistemática adotado neste estudo.

Quadro 1. Etapas do protocolo de revisão sistemática

Etapas do protocolo	Desenvolvimento
(i) Formulação da questão de pesquisa	Quais são as principais geotecnologias, métodos de modelagem e ferramentas computacionais utilizados na análise de riscos ambientais e quais contribuições apresentam para o planejamento territorial e a gestão ambiental?
(ii) Estabelecimento de critérios de inclusão e exclusão	Os critérios de inclusão e exclusão utilizados nas buscas da literatura existente obedeceram às seguintes delimitações para obter materiais: (a) palavra-chave em inglês: <i>Environmental Risk</i> (b) operadores booleanos: uso do AND (inclusão da palavra <i>Environmental Vulnerability AND Urban Risk AND Flood Risk AND Erosion Risk AND landslide</i> ; (c) apenas artigos completos em periódicos (exclusão de resumos, capítulos de livros, anais de eventos, editoriais, patentes etc.); (d) período de publicação: 2015-2025. (e) base de dados: <i>periódicos da CAPES, Web of Science e Scopus</i> em inglês.
(iii) Seleção e acesso à literatura	Artigos completos publicados nas bases de dados de acordo com os critérios de inclusão e exclusão estabelecidos.

(iv) Avaliação da qualidade da literatura incluída na revisão	A partir das buscas e dos critérios estabelecidos no protocolo, foram encontrados inicialmente 627.211 artigos. Deste, apenas 11 artigos que abordavam ou mencionavam o tema.
(v) Análise, síntese e disseminação dos resultados	Figura 1

Fonte: Elaborado pelo autor

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados obtidos na revisão sistemática da literatura estão apresentados na Figura 1.

Figura 1. Sistematização do protocolo de pesquisa

Periódicos Capes	Web of Science	Scopus	Filtro temporal 2015-2025
15.803	405.906	205.502	"Environmental Risk"
15	18.921	7.581	Adicionado AND "Environmental Vulnerability"
1	4.319	1.310	Adicionado AND "Urban Risk"
0	1.482	307	Adicionado AND "Flood Risk"
0	62	13	Adicionado AND "Erosion Risk"
0	14	3	Adicionado AND "landslide"
0	11	0	Filtro de leitura e análise

Fonte: Elaborado pelo autor

Uma vez que, os estudos relevantes são identificados, é hora de extrair os dados de interesse. É importante desenvolver um formulário ou uma matriz de extração de dados para padronizar esse processo. Para analisar cada um dos 11 artigos selecionados pelo protocolo, foram listados os títulos, os autores, o ano de cada publicação, a editora, a revista, o assunto abordado e as palavras-chave. A sintetização das informações pode ser acompanhada na Tabela 2 a seguir:

Tabela 2 – Caracterização dos estudos selecionados na revisão sistemática (2015–2025)

Ref.	Autoria (Ano)	Periódico / Editora	Assunto Principal	Palavras-chave
R1	Gholami et al. (2025)	<i>Urban Climate</i> (Elsevier)	Modelagem de risco de inundação utilizando Deep Learning (bLSTM) integrado ao método COPRAS para avaliação multicritério	Flood Risk; Deep Learning; bLSTM; COPRAS; MCDM; GIS; DEM; Flood Hazard; Environmental Variables
R2	Cremonini et al. (2025)	<i>GeoHazards</i> (MDPI)	Sistema de alerta precoce para inundações urbanas baseado na análise de chuvas convectivas intensas e cenários hidrometeorológicos	Urban Flooding; Early Warning System; Climate Change; Rainfall; Urban Risk; Hazard Scenarios
R3	Sam-Mbomah et al. (2025)	<i>Jàmhá: Journal of Disaster Risk Studies</i> (AOSIS)	Avaliação da efetividade das políticas de Gestão de Riscos de Desastres (DRM) e Adaptação às Mudanças Climáticas (CCA) em Freetown	Disaster Risk Management; Climate Change Adaptation; Flood; Landslide; Governance; Resilience; Policy
R4	Laino et al. (2024)	<i>Science of the Total Environment</i> (Elsevier)	Desenvolvimento de estrutura integrada para avaliação multiriscos em cidades	Multi-Hazard; Climate Change; Coastal Cities; Remote Sensing;

Ref.	Autoria (Ano)	Periódico / Editora	Assunto Principal	Palavras-chave
			costeiras utilizando sensoriamento remoto e indicadores climáticos	Urban Resilience; Risk Assessment
R5	Laino & Iglesias (2024)	<i>Journal of Environmental Management</i> (Elsevier)	Avaliação integrada de múltiplos riscos climáticos em cidades costeiras europeias baseada em indicadores padronizados	Multi-Hazard Assessment; Coastal Hazards; Climate Change; Indicators; Coastal Cities; Risk Assessment
R6	Mfondo um et al. (2023)	<i>Geoenvironmental Disasters</i> (Springer Nature)	Integração entre Processo Analítico Hierárquico (AHP) e Machine Learning para modelagem de deslizamentos, erosão e inundações	Machine Learning; AHP; Landslide; Gully Erosion; Flash Flood; Google Earth Engine; Random Forest
R7	Youssef et al. (2023)	<i>Journal of African Earth Sciences</i> (Elsevier)	Modelagem multiriscos (deslizamentos, erosão e inundações) utilizando algoritmos de aprendizado de máquina	Multi-Hazards; Flood; Landslide; Gully Erosion; Random Forest; Sustainability; Susceptibility Mapping
R8	Alberico, Iavarone e	<i>International Journal of Disaster Risk</i>	Mapeamento da resiliência ambiental urbana por	Urban Resilience; GIS; Disaster Risk

Ref.	Autoria (Ano)	Periódico / Editora	Assunto Principal	Palavras-chave
	Petrosino (2020)	<i>Reduction</i> (Elsevier)	meio de indicadores espaciais integrados em ambiente SIG	Management; Indicators; Environmental Resilience
R9	Odiase, Wilkinso e Neef (2020)	<i>International Journal of Disaster Resilience in the Built Environment</i> (Emerald)	Avaliação da capacidade de enfrentamento comunitário frente aos riscos naturais em Auckland	Coping Capacity; Disaster Risk; Community Resilience; Social Vulnerability; Communication
R10	Cui et al. (2019)	<i>Landslides</i> (Springer Nature)	Relação entre urbanização desordenada, mudanças no uso da terra e ocorrência de deslizamentos em Freetown	Urbanization; Landslide; Remote Sensing; Land Use Change; Disaster; Environmental Risk
R11	Zanetti, Sousa Junior e Freitas (2016)	<i>Sustainability</i> (MDPI)	Desenvolvimento de índice de vulnerabilidade socioambiental para cidades costeiras brasileiras considerando múltiplos riscos climáticos	Vulnerability Index; Climate Change; Coastal Areas; Flood; Sea Level Rise; Environmental Vulnerability

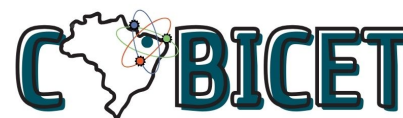
A aplicação do protocolo de revisão sistemática permitiu identificar uma produção científica ampla sobre riscos ambientais, porém marcada por elevada dispersão temática e metodológica. A estratégia inicial de busca utilizando apenas o descritor "Environmental Risk" retornou um expressivo volume de publicações, evidenciando o crescente interesse da comunidade científica pelo tema.

Entretanto, o refinamento progressivo por meio da inclusão dos descritores Environmental Vulnerability, Urban Risk, Flood Risk, Erosion Risk e Landslide revelou que apenas um número reduzido de estudos abordava simultaneamente múltiplas dimensões do risco ambiental, indicando que a literatura ainda permanece fragmentada entre diferentes áreas de pesquisa. Esse comportamento reforça a observação de Kappes *et al.* (2012) de que os estudos sobre riscos ambientais tradicionalmente concentram-se em ameaças individuais, enquanto abordagens integradas permanecem relativamente escassas. Os resultados encontrados corroboram ainda Gallina *et al.* (2016), que apontam a necessidade de modelos capazes de integrar múltiplos perigos ambientais em uma mesma estrutura analítica, especialmente diante dos efeitos cumulativos das mudanças climáticas.

Uma característica comum observada entre praticamente todos os estudos selecionados foi a compreensão de que o risco ambiental não pode mais ser explicado exclusivamente pelas características físicas da paisagem. Embora fatores naturais como relevo, geologia, precipitação, hidrografia e cobertura vegetal continuem desempenhando papel fundamental na ocorrência de desastres, os autores convergem ao afirmar que os processos de urbanização acelerada, expansão territorial desordenada e ocupação inadequada do solo constituem importantes condicionantes da vulnerabilidade ambiental contemporânea.

O estudo de Cui *et al.* (2019), ao analisar o desastre ocorrido em Freetown, demonstra claramente que a precipitação intensa representou apenas o elemento deflagrador do evento, enquanto a urbanização desordenada, a remoção da vegetação e a ocupação de encostas foram responsáveis pelo aumento significativo da exposição e da vulnerabilidade da população. Resultados semelhantes foram observados por Cremonini *et al.* (2025), que destacam a impermeabilização do solo urbano como um dos principais fatores responsáveis pelo aumento da frequência e intensidade das inundações em ambientes urbanos.

Outro aspecto recorrente refere-se à consolidação das geotecnologias como principal suporte metodológico para estudos de riscos ambientais. Independentemente do tipo de ameaça analisada como enchentes, erosão, deslizamentos, riscos costeiros ou perigos múltiplos, em todos os trabalhos utilizaram Sistemas de Informação Geográfica (SIG), sensoriamento remoto, Modelos Digitais de Elevação (MDE) e análise espacial como base para construção dos modelos de suscetibilidade. Essa convergência metodológica confirma as proposições de Goodchild (2007) e Longley *et al.* (2015), segundo as quais a informação geográfica passou a constituir um dos principais insumos científicos para compreensão da dinâmica



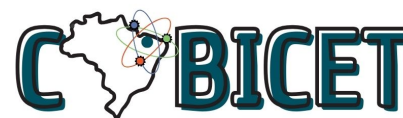
territorial contemporânea. Além disso, observa-se crescente utilização de imagens provenientes dos satélites Sentinel, Landsat, DEM, MERIT DEM, Urban Atlas, além de bancos de dados públicos, demonstrando uma tendência de democratização do acesso às informações geoespaciais e maior reprodutibilidade das pesquisas científicas.

Os estudos também evidenciam uma importante mudança na forma como os modelos de risco vêm sendo construídos. Enquanto pesquisas desenvolvidas na década anterior priorizavam abordagens baseadas em índices de vulnerabilidade ou em análises multicritério convencionais, os trabalhos mais recentes incorporam algoritmos de Aprendizado de Máquina (Machine Learning) e Inteligência Artificial para aumentar a capacidade preditiva dos modelos ambientais. Gholami *et al.* (2025) combinaram redes neurais bidirecionais do tipo bLSTM com o método COPRAS, produzindo mapas integrados de perigo e vulnerabilidade para áreas sujeitas a inundações. Da mesma forma, Mfondoum *et al.* (2023) integraram o Processo Analítico Hierárquico (AHP) com algoritmos Random Forest, CART, Gradient Boosting e Support Vector Regression para modelagem simultânea de deslizamentos, erosão em voçorocas e inundações repentinas, alcançando elevados índices de desempenho preditivo. Esses resultados demonstram que a inteligência artificial deixou de representar apenas uma ferramenta complementar, passando a constituir elemento central na construção de modelos espaciais voltados à gestão ambiental.

Outro consenso identificado entre os artigos refere-se à necessidade de abandonar abordagens voltadas para um único tipo de ameaça ambiental. Estudos recentes demonstram que enchentes, erosão, movimentos de massa, processos costeiros e eventos extremos frequentemente compartilham fatores condicionantes comuns, tornando inadequadas análises isoladas. Nesse sentido, Youssef *et al.* (2023) verificaram que aproximadamente dois terços da área estudada apresentavam ocorrência simultânea de dois ou mais perigos naturais, evidenciando a necessidade de modelos multiriscos. De forma semelhante, Laino e Iglesias (2024) desenvolveram uma estrutura metodológica capaz de integrar elevação do nível do mar, erosão costeira, inundações, chuvas intensas, ondas de calor, ventos extremos e deslizamentos em um único sistema de avaliação, permitindo comparar diferentes cidades europeias por meio de indicadores padronizados. Esses estudos indicam que a avaliação integrada dos riscos representa uma das principais tendências da literatura internacional e reforçam a necessidade de substituir análises setoriais por modelos sistêmicos capazes de representar a complexidade dos ambientes urbanos contemporâneos.

A análise conjunta dos estudos permitiu identificar que os fatores condicionantes mais frequentemente empregados na modelagem dos riscos ambientais podem ser agrupados em quatro grandes categorias: fatores topográficos, hidrológicos, climáticos e antrópicos. Entre as variáveis físicas, destacam-se altitude, declividade, orientação das encostas, curvatura do terreno, Índice de Umidade Topográfica (TWI), Índice de Potência de Fluxo (SPI), densidade de drenagem e distância dos cursos d'água, presentes na maioria dos modelos analisados. Já entre os fatores antrópicos, uso e cobertura da terra, densidade populacional, expansão urbana, impermeabilização do solo, infraestrutura e padrão de ocupação territorial foram amplamente empregados para representar a vulnerabilidade das áreas estudadas. Gholami *et al.* (2025) demonstraram, inclusive, que variáveis derivadas do Modelo Digital de Elevação apresentaram maior importância estatística na previsão das áreas suscetíveis à inundação do que diversas variáveis climáticas tradicionalmente utilizadas. Resultados semelhantes foram observados por Mfondoum *et al.* (2023), que identificaram a precipitação como principal fator desencadeador dos processos de erosão, movimentos de massa e inundações, enquanto os atributos geomorfológicos exerceram maior influência sobre a distribuição espacial dos eventos. Esses resultados evidenciam que a modelagem dos riscos ambientais depende da integração entre características naturais da paisagem e transformações promovidas pela ocupação humana.

Outro aspecto que merece destaque refere-se à evolução metodológica observada na literatura. Os estudos mais antigos priorizavam abordagens baseadas em índices de vulnerabilidade e métodos multicritério, especialmente o Processo Analítico Hierárquico (AHP), devido à facilidade de incorporação do conhecimento especializado e à possibilidade de ponderar diferentes fatores ambientais. Entretanto, os artigos mais recentes demonstram uma tendência clara de integração entre métodos multicritério e algoritmos de aprendizado de máquina, buscando reduzir a subjetividade inerente à definição dos pesos e aumentar a precisão preditiva dos modelos. Mfondoum *et al.* (2023) propuseram uma integração entre AHP e algoritmos como Random Forest, CART, Gradient Boosting e Support Vector Regression, obtendo valores superiores a 0,96 de AUC, enquanto Gholami *et al.* (2025) combinaram Deep Learning (bLSTM) com COPRAS para construir modelos integrados de perigo e vulnerabilidade. Essa convergência metodológica indica que a inteligência artificial não substitui completamente os métodos tradicionais, mas amplia sua capacidade analítica ao incorporar padrões complexos presentes em grandes bases de dados geoespaciais.



Além do avanço tecnológico, os estudos convergem para uma mudança conceitual importante: a transição da análise de perigos (hazards) para a avaliação integrada do risco (risk). Enquanto trabalhos anteriores concentravam-se predominantemente na identificação de áreas suscetíveis à ocorrência de determinado fenômeno natural, as pesquisas recentes procuram incorporar simultaneamente componentes de exposição, vulnerabilidade e capacidade adaptativa. Laino *et al.* (2024) propõem uma estrutura de avaliação multiriscos capaz de integrar indicadores físicos, sociais e institucionais em cidades costeiras europeias, permitindo não apenas identificar áreas críticas, mas também priorizar intervenções segundo diferentes níveis de urgência. Alberico, Iavarone e Petrosino (2020), por sua vez, reforçam que o conceito de resiliência urbana deve complementar a avaliação do risco, considerando a capacidade do território de resistir, responder e recuperar-se diante de eventos extremos. Essa mudança representa um avanço significativo, aproximando a literatura científica das recomendações internacionais do Marco de Sendai para Redução do Risco de Desastres e das diretrizes do IPCC para adaptação às mudanças climáticas.

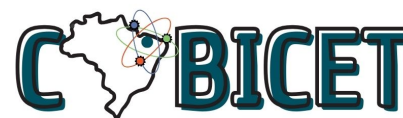
Embora os avanços metodológicos sejam expressivos, a revisão também revelou limitações recorrentes na literatura. A primeira refere-se à predominância de estudos desenvolvidos em escalas locais ou regionais, dificultando comparações entre diferentes contextos geográficos. A segunda consiste na ausência de padronização das variáveis utilizadas, uma vez que cada pesquisa seleciona fatores condicionantes de acordo com a disponibilidade de dados, o que reduz a comparabilidade entre modelos. Também foi constatada limitada incorporação de indicadores socioeconômicos, institucionais e de governança, apesar de a literatura reconhecer que o risco ambiental resulta da interação entre perigos naturais e vulnerabilidades sociais. Sam-Mbomah *et al.* (2025) demonstram que fragilidades institucionais, baixa capacidade de coordenação entre órgãos públicos, deficiência na comunicação de riscos e limitada participação comunitária comprometem significativamente a efetividade das políticas de adaptação climática, independentemente da qualidade dos modelos espaciais utilizados. Dessa forma, observa-se que o avanço das geotecnologias precisa ser acompanhado por melhorias na governança territorial e nos processos de planejamento urbano.

Contudo, esta revisão sistemática evidencia uma importante lacuna científica relacionada à integração entre múltiplos riscos ambientais e técnicas emergentes de inteligência territorial. Embora os estudos demonstrem elevado desempenho na modelagem de inundações, deslizamentos, erosão ou riscos costeiros de forma isolada, poucos trabalhos

incorporam simultaneamente múltiplos perigos, variáveis socioambientais, dados em tempo real e algoritmos de inteligência artificial em plataformas capazes de subsidiar a gestão territorial contínua. Nesse sentido, a principal contribuição desta revisão consiste em demonstrar que a literatura internacional caminha para modelos cada vez mais integrados, baseados em geotecnologias, sensoriamento remoto, computação em nuvem e aprendizado de máquina, mas ainda carece de abordagens que articulem essas ferramentas em sistemas de apoio à decisão voltados ao planejamento urbano e ambiental. A síntese das evidências produzidas permite concluir que o futuro da gestão dos riscos ambientais está associado ao desenvolvimento de plataformas geoespaciais inteligentes, capazes de integrar monitoramento contínuo, modelagem preditiva e suporte à tomada de decisão, contribuindo para cidades mais resilientes, sustentáveis e adaptadas às mudanças climáticas.

A análise cronológica dos estudos selecionados evidencia uma evolução significativa da pesquisa em riscos ambientais ao longo da última década. Enquanto trabalhos publicados até aproximadamente 2020 concentravam seus esforços na construção de índices de vulnerabilidade e suscetibilidade específicos para determinado tipo de ameaça, os estudos mais recentes passaram a incorporar abordagens sistêmicas fundamentadas no conceito de multi-hazard, considerando a interação simultânea entre diferentes perigos ambientais. Essa mudança reflete a própria evolução conceitual promovida pelo Escritório das Nações Unidas para Redução do Risco de Desastres (UNDRR), segundo o qual eventos extremos raramente ocorrem de maneira isolada, sendo normalmente caracterizados por processos em cascata que potencializam impactos ambientais, econômicos e sociais. Os trabalhos de Alberico *et al.* (2020), Laino *et al.* (2024), Youssef *et al.* (2023) e Mfondoum *et al.* (2023) demonstram claramente essa mudança de paradigma ao integrarem deslizamentos, erosão, inundações, riscos costeiros e eventos climáticos extremos em modelos únicos de avaliação territorial.

Outra tendência observada refere-se à crescente integração entre geotecnologias e inteligência artificial. Diferentemente dos primeiros modelos de análise espacial, fortemente dependentes da interpretação do especialista e da atribuição subjetiva de pesos aos fatores condicionantes, os estudos mais recentes utilizam algoritmos capazes de identificar automaticamente padrões espaciais complexos em grandes bases de dados geográficos. Essa transformação aproxima a ciência geoespacial do conceito de Inteligência Territorial, no qual imagens orbitais, sensores remotos, bancos de dados espaciais, aprendizado de máquina e computação em nuvem passam a atuar de maneira integrada na produção de



conhecimento. A utilização de plataformas como Google Earth Engine, bases Sentinel, Landsat, MERIT DEM e algoritmos Random Forest, Gradient Boosting e Redes Neurais evidencia que a modelagem ambiental vem migrando de abordagens essencialmente cartográficas para sistemas inteligentes de apoio à decisão, capazes de produzir diagnósticos quase em tempo real.

Sob outra perspectiva, os resultados também revelam uma mudança importante quanto à finalidade das pesquisas. Os estudos mais antigos concentravam-se predominantemente na produção de mapas de suscetibilidade, enquanto as pesquisas recentes buscam desenvolver ferramentas efetivamente aplicáveis ao planejamento urbano e à gestão pública. Exemplos dessa evolução incluem a elaboração de sistemas de alerta precoce para eventos hidrológicos, plataformas de monitoramento climático, modelos de apoio à tomada de decisão e estruturas voltadas ao planejamento adaptativo frente às mudanças climáticas. Cremonini *et al.* (2025), por exemplo, desenvolveram uma proposta destinada especificamente à implementação de sistemas de alerta para chuvas convectivas intensas em áreas urbanas, enquanto Laino *et al.* (2024) propuseram uma metodologia padronizada para subsidiar políticas públicas de adaptação em cidades costeiras europeias. Esses resultados demonstram que a produção científica tem evoluído de uma perspectiva predominantemente diagnóstica para uma abordagem orientada à gestão do território.

Entretanto, apesar dos avanços observados, a revisão evidencia que ainda persistem importantes desafios científicos. O primeiro refere-se à ausência de padronização metodológica entre os estudos. Embora exista relativa convergência quanto às variáveis ambientais utilizadas, verifica-se ampla diversidade na escolha dos algoritmos, escalas espaciais, critérios de validação e procedimentos de ponderação dos fatores condicionantes. Essa heterogeneidade dificulta a comparação entre pesquisas desenvolvidas em diferentes regiões do mundo e limita a construção de protocolos universais para avaliação de riscos ambientais. Além disso, poucos estudos realizam validações temporais capazes de verificar o desempenho dos modelos frente à evolução das condições ambientais, aspecto particularmente relevante em cenários de mudanças climáticas aceleradas.

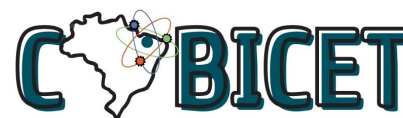
Outra lacuna identificada diz respeito à limitada incorporação da dimensão social nos modelos analisados. Embora praticamente todos os artigos reconheçam que o risco resulta da interação entre perigo e vulnerabilidade, observa-se predominância de variáveis físicas em detrimento de indicadores relacionados à desigualdade socioeconômica, governança, infraestrutura, percepção de risco e

capacidade adaptativa das populações. Apenas parte dos estudos incorpora explicitamente aspectos institucionais, capacidade de resposta ou resiliência comunitária como componentes estruturantes do risco. Sam-Mbomah *et al.* (2025) demonstram que fragilidades institucionais, baixa coordenação entre órgãos governamentais, deficiência na comunicação de riscos e reduzida participação comunitária representam fatores tão determinantes quanto as características físicas do território para explicar os impactos dos desastres. Da mesma forma, Odiase, Wilkinson e Neef (2020) destacam que a capacidade de enfrentamento das comunidades constitui elemento essencial para reduzir perdas humanas e materiais, reforçando que mapas de suscetibilidade, isoladamente, não são suficientes para orientar políticas públicas eficazes.

Sob esse aspecto, a presente revisão sistemática oferece uma contribuição relevante ao reunir evidências produzidas em diferentes continentes como Europa, África, Ásia e América do Sul, permitindo identificar padrões científicos que dificilmente seriam observados em estudos isolados.

A síntese realizada demonstra que, independentemente do contexto geográfico, existe consenso acerca da necessidade de integrar geotecnologias, análise espacial, inteligência artificial e avaliação da vulnerabilidade socioambiental em modelos únicos de apoio ao planejamento territorial. Ao sistematizar essas evidências, a pesquisa contribui para consolidar um panorama atualizado do estado da arte sobre riscos ambientais e fornece subsídios para o desenvolvimento de metodologias mais robustas, reprodutíveis e adaptáveis às diferentes realidades territoriais.

Por fim, os resultados permitem afirmar que a próxima fronteira da pesquisa em riscos ambientais não consiste apenas em produzir modelos mais precisos, mas em desenvolver ecossistemas inteligentes de gestão territorial, integrando dados provenientes de satélites, sensores IoT, veículos aéreos não tripulados (VANTs), estações meteorológicas automáticas, bancos de dados geoespaciais, inteligência artificial e plataformas WebGIS. Essa integração possibilitará a construção de sistemas capazes de monitorar continuamente o território, identificar alterações ambientais em tempo quase real e apoiar decisões estratégicas relacionadas ao planejamento urbano, à defesa civil, à conservação ambiental e à adaptação às mudanças climáticas. Assim, a literatura analisada indica que o futuro da gestão dos riscos ambientais está diretamente associado ao avanço da inteligência territorial e da ciência geoespacial orientada por dados, representando uma importante agenda de pesquisa para os próximos anos.



CONCLUSÃO

A presente revisão sistemática evidenciou que a pesquisa internacional sobre riscos ambientais tem evoluído significativamente na última década, impulsionada pelo avanço das geotecnologias, pela ampliação da disponibilidade de dados geoespaciais e pela incorporação de técnicas de inteligência artificial na modelagem espacial. Os estudos analisados demonstram consenso quanto ao papel estratégico dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), do sensoriamento remoto e dos Modelos Digitais de Elevação como pilares metodológicos para a identificação de áreas suscetíveis a inundações, deslizamentos, erosão e outros perigos ambientais. Paralelamente, observou-se uma transição consistente de abordagens fundamentadas exclusivamente em análises multicritério para modelos híbridos que integram algoritmos de aprendizado de máquina, ampliando a precisão preditiva e a capacidade de representar a complexidade dos sistemas ambientais.

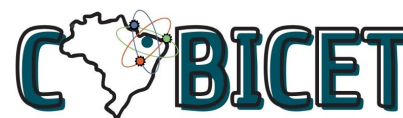
Outro resultado relevante consiste na consolidação da abordagem multi-hazard como uma das principais tendências da literatura científica contemporânea. A revisão demonstrou que os riscos ambientais raramente ocorrem de forma isolada, sendo influenciados por múltiplos fatores naturais e antrópicos que interagem entre si e potencializam seus impactos. Nesse contexto, os estudos convergem para a necessidade de integrar componentes físicos, ambientais, sociais e institucionais em modelos capazes de representar simultaneamente perigo, exposição, vulnerabilidade e capacidade adaptativa. Essa perspectiva amplia o potencial das geotecnologias como ferramentas de apoio ao planejamento territorial, à gestão ambiental e à formulação de políticas públicas voltadas à redução do risco de desastres e à adaptação às mudanças climáticas.

Entretanto, a revisão também revelou importantes lacunas científicas que limitam o avanço do conhecimento na área. Entre elas destacam-se a ausência de padronização metodológica entre os estudos, a limitada integração entre indicadores socioambientais e modelos espaciais, a predominância de análises desenvolvidas em escala local e a escassez de pesquisas que incorporem dados dinâmicos provenientes de sensores, Internet das Coisas (IoT), veículos aéreos não tripulados (VANTs) e monitoramento em tempo real. Da mesma forma, verificou-se que poucos trabalhos exploram de maneira integrada o potencial da inteligência artificial, da computação em nuvem e das infraestruturas de dados espaciais na construção de plataformas inteligentes de suporte à decisão, indicando um campo promissor para futuras investigações.

Por fim, esta revisão sistemática contribui para a consolidação do estado da arte sobre riscos ambientais ao sintetizar criticamente as principais abordagens conceituais, metodológicas e tecnológicas desenvolvidas entre 2015 e 2025. Mais do que reunir evidências, o estudo demonstra que o futuro da gestão dos riscos ambientais está diretamente relacionado ao desenvolvimento de sistemas integrados de Inteligência Territorial, capazes de combinar geotecnologias, inteligência artificial, análise espacial e monitoramento contínuo para apoiar decisões em diferentes escalas de planejamento. Espera-se que os resultados aqui apresentados subsidiem novas pesquisas, estimulem o desenvolvimento de metodologias mais robustas e fortaleçam a utilização de ferramentas geoespaciais na construção de territórios mais resilientes, sustentáveis e preparados para enfrentar os desafios impostos pelas mudanças climáticas e pela crescente complexidade dos ambientes urbanos.

REFERÊNCIAS

- AHMAD, A. et al. Unveiling urban violence crime in the State of Selangor, Kuala Lumpur and Putrajaya: a spatial-temporal investigation of violence crime in Malaysia's key cities. *Cogent Social Sciences*, v. 10, n. 1, 2024.
- AMORIM BESERRA, B.; FERNANDES AZEVEDO, G. Avaliação da adequação geotécnica para fins de ocupação urbana do setor habitacional Sol Nascente – DF por meio de análise multicriterial. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 17, n. 4, p. 2412-2434, 2024.
- ARALDI, A.; FUSCO, G. Retail Fabric Assessment: Describing retail patterns within urban space. *Cities*, v. 85, p. 51-62, 2019.
- ARAÚJO, B. H. B. et al. Mapeamento de suscetibilidade a movimentos de massas na área urbana de Areia-PB. *Revista de Geociências do Nordeste*, v. 10, n. 2, p. 420-437, 2024.
- BAEK, S. Writing your literature review. *The Journal of Korean Academic Society of Nursing Education*, v. 24, n. 2, p. 127-128, 2018.
- CAMPOS, P. B. R.; ALMEIDA, C. M.; QUEIROZ, A. P. Spatial Dynamic Models for Assessing the Impact of Public Policies: The Case of Unified Educational Centers in the Periphery of São Paulo City. *Land*, v. 11, n. 6, p. 922, 2022.
- CRÉTAT, J. et al. Impact of topography and land cover on air temperature space-time variability in an urban environment with contrasted topography (Dijon, France, 2014–2021). *Theoretical and Applied Climatology*, v. 155, n. 3, p. 1941-1958, 2024.
- CRONIN, P.; RYAN, F.; COUGHLAN, M. Undertaking a literature review: a step-by-step



approach. British Journal of Nursing, v. 17, n. 1, p. 38-43, 2008.

DE BEER, D. J.; JOUBERT, J. W. Logistic facility identification from spatial time series data. Computers, Environment and Urban Systems, v. 114, p. 102182, 2024a.

DE BEER, D. J.; JOUBERT, J. W. Logistic facility identification from spatial time series data. Computers, Environment and Urban Systems, v. 114, 2024b.

DE SOUZA, P. A.; VIEIRA, E. M. V. M. Delimitação do potencial erosivo em áreas urbanas: estudo de caso da Ocupação Vitória, Belo Horizonte-MG. Revista Brasileira de Geografia Física, v. 16, n. 3, p. 1450-1465, 2023.

DELLA-SILVA, J. L. et al. Land use prediction accuracy of different supervised classifiers over agriculture and livestock economy-based municipality in Brazil. Remote Sensing Applications: Society and Environment, v. 35, p. 101257, 2024.

DÖKER, M. F. et al. Identification of Urban Functional Areas Based on Point of Interest Data and Thiessen Polygons for Sustainable Urban Management. Social Indicators Research, 2024.

FILIPPI, A. C. G.; GUARNIERI, P.; CUNHA, C. A. Condomínios rurais: revisão sistemática da literatura internacional. Estudos Sociedade e Agricultura, v. 27, n. 3, p. 525-546, 2019.

FROTA, J. S. Sistema de Informação Geográfica aplicado ao ensino de Geografia. 2015. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Universidade Federal do Ceará, Fortaleza, 2015.

GARCÍA-LÓPEZ, J.; DOMÍNGUEZ-AMARILLO, S.; SENDRA, J. J. Clustering Open Data for Predictive Modeling of Residential Energy Consumption across Variable Scales: A Case Study in Andalusia, Spain. Buildings, v. 14, n. 8, p. 2335, 2024.

GALVÃO, M. C. B.; RICARTE, I. L. M. Revisão sistemática da literatura: conceituação, produção e publicação. Logeion: Filosofia da Informação, v. 6, n. 1, p. 57-73, 2019.

GARSHASBI, D. et al. Assessment of future urban flood risk of Thailand's Bangkok metropolis using geoprocessing and machine learning algorithm. Environmental and Sustainability Indicators, v. 25, p. 100559, 2025.

HACAR, M.; ALTAFINI, D.; CUTINI, V. Network-Based Hierarchical Feature Augmentation for Predicting Road Classes in OpenStreetMap. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 13, n. 12, p. 456, 2024a.

HACAR, M.; ALTAFINI, D.; CUTINI, V. Network-Based Hierarchical Feature Augmentation for Predicting Road Classes in OpenStreetMap. ISPRS International Journal of Geo-Information, v. 13, n. 12, p. 456, 2024b.

HAERY, S.; MAHPOUR, A.; VAFAEINEJAD, A. Forecasting urban travel demand with Geo-AI: a combination of GIS and machine learning techniques utilizing Uber data in New York City. Environmental Earth Sciences, v. 83, n. 20, 2024.

HASHTARKHANI, S.; SCHWARTZ, D. L.; SHABAN-NEJAD, A. Enhancing Health Care Accessibility and Equity Through a Geoprocessing Toolbox for Spatial Accessibility Analysis: Development and Case Study. JMIR Formative Research, v. 8, e51727, 2024.

LABUS, A.; DESPOTOVIĆ-ZRAKIĆ, M.; RISTIĆ, A.; BOGDANOVIĆ, Z.; RISTIĆ, M. Smart cities as a framework for creating competitive advantages in higher education and open innovation. Journal of Engineering Management and Competitiveness (JEMC), v. 6, n. 2, p. 57–69, 2016.

KANG, Y. et al. A review of urban physical environment sensing using street view imagery in public health studies. Annals of GIS, v. 26, n. 3, p. 261-275, 2020.

KLAFKE, F.; HENNING, E.; BARROS, V. G. Using Machine Learning to Improve Vector Control, Public Health and Reduce Fragmentation of Urban Water Management. Hygiene, v. 4, n. 1, p. 49-75, 2024.

MARCOCHI DE MELO, D. et al. Integrated intelligent geoprocessing tool for screening candidate locations suitable for Distributed Generation Deployment. Renewable Energy, v. 177, p. 797-806, 2021.

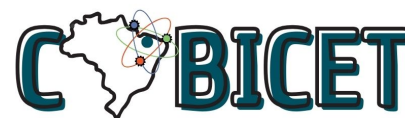
MCKENNA, H. P. Innovating Metrics for Smarter, Responsive Cities. Data, v. 4, n. 1, p. 25, 2019.

NASSAR, E. et al. Development of a Land Suitability Analysis Model for Slums Relocation: The Case of Cairo, Egypt. Journal of Environment and Development, v. 33, n. 1, p. 3-28, 2024.

PARASHAR, D. et al. Use of machine learning-based classification algorithms in the monitoring of Land Use and Land Cover practices in a hilly terrain. Environmental Monitoring and Assessment, v. 196, n. 1, p. 8, 2023.

PEREZ, J.; ORNON, A.; USUI, H. Classification of residential buildings into spatial patterns of urban growth: A morpho-structural approach. Environment and Planning B: Urban Analytics and City Science, v. 48, n. 8, p. 2402-2417, 2021.

PODOLSKAIA, E.; ERSHOV, D.; KOVGANKO, K. Spatial Evaluation and Modelling of Fire Stations



Layout to Access Forest Fires by Roads (Case Study: Krasnoyarsk Region, Russia). *European Journal of Forest Engineering*, v. 10, n. 2, p. 112-122, 2024.

ROUTROY, S.; BEHERA, A. *Research Methodology for Management Decision*. New Delhi: Cengage Learning, 2017.

SISMAN, S.; AYDINOGLU, A. C. Improving performance of mass real estate valuation through application of the dataset optimization and Spatially Constrained Multivariate Clustering Analysis. *Land Use Policy*, v. 119, 2022.

SUHAIBAH, A.; AZIZ, N. A. A.; MAIZATUL AKMAR, I.; JABAR, M. A. 3D Geomarketing segmentation using K-means++ algorithm. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. XLI-B2, p. 631–637, 2016.

TIBENDERANA, J. R.; NDALLA, M. M.; KESSY, S. A. Spatial insights unleashed: unlocking the potential of geospatial data. *International Journal of Surgery: Global Health*, v. 6, n. 5, 2023.

WANG, J.; HUANG, W.; BILJECKI, F. Learning visual features from figure-ground maps for urban morphology discovery. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 109, 2024.

XU, S.; EHLERS, M. Automatic detection of urban vacant land: An open-source approach for sustainable cities. *Computers, Environment and Urban Systems*, v. 91, 2022.

YADAV, P. K. et al. Spatially explicit simulation and forecasting of urban growth using weights of evidence based cellular automata model in a millennium city of India. *Physics and Chemistry of the Earth*, v. 136, 2024.

YANG, C. et al. Detecting road network errors from trajectory data with partial map matching and bidirectional recurrent neural network model. *International Journal of Geographical Information Science*, v. 38, n. 3, p. 478-502, 2024.

ZHANG, P. et al. A New Framework for Integrating DNN-Based Geographic Simulation Models within GISystems. *ISPRS International Journal of Geo-Information*, v. 13, n. 10, p. 361, 2024.