v7.n5.2026

REVISTA CIENTÍFICA - RECIMA21 ISSN 2675-6218

ANÁLISE DA SUSCETIBILIDADE A INUNDAÇÕES COM MODELOS HAND E ITU INTEGRADOS AO USO DO SOLO: APLICAÇÃO EM UMA BACIA HIDROGRÁFICA

FLOOD SUSCEPTIBILITY ANALYSIS USING HAND AND ITU MODELS INTEGRATED WITH LAND USE: APPLICATION IN A WATERSHED

ANÁLISIS DE LA SUSCEPTIBILIDAD A INUNDACIONES MEDIANTE MODELOS HAND E ITU INTEGRADOS CON EL USO DEL SUELO: APLICACIÓN EN UNA CUENCA HIDROGRÁFICA

Andressa Ellen Bastos[1], Lucas Meneguim Pereira[2], Ana Carolina Mattei Garcia[3], Emily Lima Albuquerque[4], Fabiana Meurer[5], Claudia Guimarães Camargo Campos[6]

e757747
https://doi.org/10.47820/recima21.v7i5.7747

PUBLICADO: 05/2026

RESUMO

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte (SC) apresenta recorrentes episódios de alagamentos, agravados pela urbanização desordenada, impermeabilização do solo e canalização inadequada. Este estudo tem como objetivo identificar zonas suscetíveis a inundações por meio da integração do modelo HAND (Height Above Nearest Drainage), ITU (Índice Topográfico de Umidade) e da análise do uso e cobertura do solo, com apoio de geotecnologias e modelos morfométricos. A metodologia adotada consistiu na aplicação dos modelos HAND e ITU, aliados à análise do uso e cobertura do solo, em ambiente SIG (Sistema de Informação Geográfica). Os dados foram processados no software ArcGIS 10.8 com a extensão TAUDEM, utilizando o Modelo Digital de Terreno (MDT) com resolução de 1 metro. Os resultados revelaram que as zonas mais propensas a inundações estão concentradas nas áreas urbanizadas próximas ao exutório da bacia. A abordagem integrada demonstrou ser uma ferramenta eficaz para o diagnóstico de áreas hidrologicamente vulneráveis, fornecendo subsídios para o planejamento urbano e a gestão de riscos ambientais.

---

[1] Mestranda em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado de Santa Catarina, com bolsa da FAPESC, e graduada em Engenharia Ambiental e Sanitária pela mesma instituição. Atua como residente em Engenharia Ambiental no Ministério Público de Santa Catarina.

[2] Engenheiro Ambiental e Sanitarista formado pela Universidade do Estado de Santa Catarina (UDESC). Atua como analista ambiental, com experiência em planejamento, organização e tramitação de documentos técnicos e administrativos, bem como na elaboração e revisão de estudos e laudos ambientais efeitos ao licenciamento e à gestão ambiental.

[3] Técnica em Saneamento Básico e engenheira ambiental e sanitária, com sólida formação técnica e científica voltada à gestão de recursos hídricos, controle de poluição e sustentabilidade empresarial. Atualmente, é pós-graduanda em Auditoria, Gestão e Licenciamento Ambiental, aprimorando seus conhecimentos em legislação, conformidade e processos de licenciamento.

[4] Graduanda em Engenharia Ambiental e Sanitária, com atuação em projetos de educação ambiental, incluindo a Oficina Socioambiental 'Despertar e Conscientizar', desenvolvida em escolas da região, e o Projeto Viva Parnamul, realizado em uma Unidade de Conservação de Proteção Integral.;

[5] Graduada em Arquitetura e Urbanismo pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (2002), pós-graduação em nível de especialização em Planejamento e Gestão Urbana e Regional pela Fundação Universidade Regional de Blumenau (2006) e Mestrado em Ciências Ambientais pela Universidade do Estado de Santa Catarina (2026). Trabalhou como Assessora de Planejamento Territorial na Associação dos Municípios do Alto Vale do Itajaí - AMAVI (2005-2022).

[6] Pós-Doutorado (PNPD/CAPES) no Programa de Pós-graduação em Recursos Genéticos Vegetais - UFSC, projeto executado em parceria com a EPAGRI/CIRAM. Doutorado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2010), mestrado em Meteorologia pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (2004) e graduação em Meteorologia, pela Universidade Federal de Pelotas/RS - UFPEL (2001).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

PALAVRAS-CHAVE: Modelagem hidrológica. Modelo digital de elevação (MDE). Mapeamento de planícies de inundação. Análise geoespacial. Avaliação de risco.

ABSTRACT
The Cubatão do Norte River Watershed (Santa Catarina, Brazil) presents recurrent flooding events, aggravated by unplanned urbanization, soil sealing, and inadequate channelization. This study aims to identify flood-prone areas through the integration of the HAND (Height Above Nearest Drainage) and TWI (Topographic Wetness Index) models, combined with land use and land cover analysis, supported by geotechnologies and morphometric models. The methodology consisted of applying the HAND and TWI models alongside land use and land cover analysis within a GIS (Geographic Information System) environment. Data were processed using ArcGIS 10.8 software with the TauDEM extension, based on a Digital Terrain Model (DTM) with a 1-meter spatial resolution. The results showed that the areas most susceptible to flooding are concentrated in urbanized zones near the watershed outlet. The integrated approach proved to be an effective tool for diagnosing hydrologically vulnerable areas, providing support for urban planning and environmental risk management.

KEYWORDS: *Hydrological modeling. Digital elevation model (DEM). Floodplain mapping. Geospatial analysis. Risk assessment.*

RESUMEN
La cuenca hidrográfica del río Cubatão do Norte (Santa Catarina, Brasil) presenta eventos recurrentes de inundación, agravados por la urbanización desordenada, la impermeabilización del suelo y la canalización inadecuada. Este estudio tiene como objetivo identificar zonas susceptibles a inundaciones mediante la integración de los modelos HAND (Height Above Nearest Drainage) e ITU (Índice Topográfico de Humedad), junto con el análisis del uso y cobertura del suelo, con el apoyo de geotecnologías y modelos morfométricos. La metodología consistió en la aplicación de los modelos HAND e ITU, combinados con el análisis del uso y cobertura del suelo, en un entorno SIG (Sistema de Información Geográfica). Los datos fueron procesados en el software ArcGIS 10.8 con la extensión TauDEM, utilizando un Modelo Digital del Terreno (MDT) con resolución espacial de 1 metro. Los resultados mostraron que las zonas más propensas a inundaciones se concentran en áreas urbanizadas cercanas al exutorio de la cuenca. El enfoque integrado demostró ser una herramienta eficaz para el diagnóstico de áreas hidrológicamente vulnerables, proporcionando insumos para la planificación urbana y la gestión de riesgos ambientales.

PALABRAS CLAVE*: Modelación hidrológica. Modelo digital de elevación (MDE). Cartografía de llanuras de inundación. Análisis geoespacial. Evaluación de riesgos.*

INTRODUÇÃO

As bacias hidrográficas são unidades naturais de captação, armazenamento e drenagem das águas precipitadas, cuja delimitação topográfica define os fluxos que convergem para um ponto de saída comum, denominado exutório (Lawson *et al.*, 2014). As alterações no uso e cobertura da terra nessas áreas são reconhecidas como fatores determinantes na alteração do comportamento hidrológico, afetando processos de infiltração, evapotranspiração e escoamento superficial (Sun e Xiang, 2020; Silveira; Ribeiro Rodrigues; Dornelles, 2025; Nunes *et al.*, 2025).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

No contexto brasileiro, a rápida expansão urbana, muitas vezes sem planejamento, tem intensificado a ocorrência de inundações, mesmo em regiões com baixa declividade (Koriche e Rientjes, 2016; Guimarães *et al.*, 2024). A impermeabilização do solo, a canalização inadequada de cursos d'água e o subdimensionamento de sistemas de drenagem são fatores recorrentes nas cidades afetadas por esse problema.

A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, localizada no estado de Santa Catarina, apresenta um histórico persistente de alagamentos e inundações. Esses eventos são agravados por processos de urbanização desordenada, descarte irregular de resíduos sólidos e ausência de manutenção nos sistemas de drenagem (Castro e Alvim, 2022). A ocupação de áreas naturalmente suscetíveis a inundações, combinada à baixa percepção de risco da população e à fragilidade do controle territorial por parte do poder público, aumenta a vulnerabilidade socioambiental da região (Koriche e Rientjes, 2016; Farias e Mendonça, 2022).

A intensificação dos eventos hidrológicos extremos nas últimas décadas tem evidenciado a vulnerabilidade das áreas urbanas brasileiras, especialmente aquelas situadas em bacias hidrográficas com histórico de ocupação desordenada. Estudos recentes apontam que a combinação de fatores como o aumento da impermeabilização do solo, a supressão da vegetação nativa e a insuficiência dos sistemas de drenagem urbana tem contribuído significativamente para a elevação do risco de inundações e alagamentos em diversas regiões do país (Ramos *et al.*, 2024; Vousdokas *et al.*, 2018).

Estudos históricos, como os realizados por Galli e Baldin (2020) nos meandros da bacia hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, apontam que o corte excessivo da Mata Atlântica iniciou o fim da mata ciliar que margeava o rio, afetando consequentemente o ciclo hidrológico do Cubatão e seu afluente, o Rio do Braço. Esse processo marcou o início da degradação ambiental da bacia.

A região tem experimentado um crescimento urbano acelerado, muitas vezes sem o devido planejamento, resultando na ocupação de áreas naturalmente suscetíveis a inundações. Além disso, a ausência de políticas públicas eficazes para a gestão dos recursos hídricos e a falta de conscientização da população local sobre os riscos associados às inundações agravam ainda mais a situação (Farias *et al.*, 2024).

Casos semelhantes são observados em diversas regiões do Brasil. Em São João del-Rei (MG), o avanço da urbanização, associado ao aumento da intensidade das chuvas, tem resultado em alagamentos mais frequentes, afetando negativamente o ambiente urbano e a qualidade de vida da população (Ramos *et al.*, 2024). Tais evidências reforçam a necessidade de estratégias preventivas integradas à gestão territorial.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Conforme estabelece a Lei n° 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), a bacia hidrográfica deve ser utilizada como unidade de gestão dos recursos hídricos no território brasileiro. Dessa forma, a modelagem e simulação matemática se mostram ferramentas essenciais se aplicados à análise hidrológica e ambiental, devido à complexidade dos processos hidrológicos, evidenciando a importância de estudos realizados na escala de bacia hidrográfica, os quais apresentam maior eficácia na compreensão dos recursos hídricos (Dill, 2021).

Nesse cenário, o uso de geotecnologias, como os Sistemas de Informações Geográficas (SIG) e os Modelos Digitais de Terreno (MDT), tem se mostrado fundamental para o mapeamento de áreas de risco e o apoio à gestão urbana (Sun e Xiang, 2020; Guimarães *et al.*, 2024). Modelos como o Índice Topográfico de Umidade (ITU) e o *Height Above Nearest Drainage* (HAND) têm sido aplicados com sucesso na identificação de zonas com alta suscetibilidade à saturação hídrica e ao escoamento superficial (Lawson *et al.* 2014; Tominaga; Santoro; Amaral, 2009).

Os Sistemas de Informação Geográfica (SIG) consistem em ferramentas computacionais voltadas à aquisição, armazenamento, análise e representação de dados espaciais georreferenciados, permitindo a integração de diferentes camadas de informação para suporte à tomada de decisão (Longley et al., 2015).

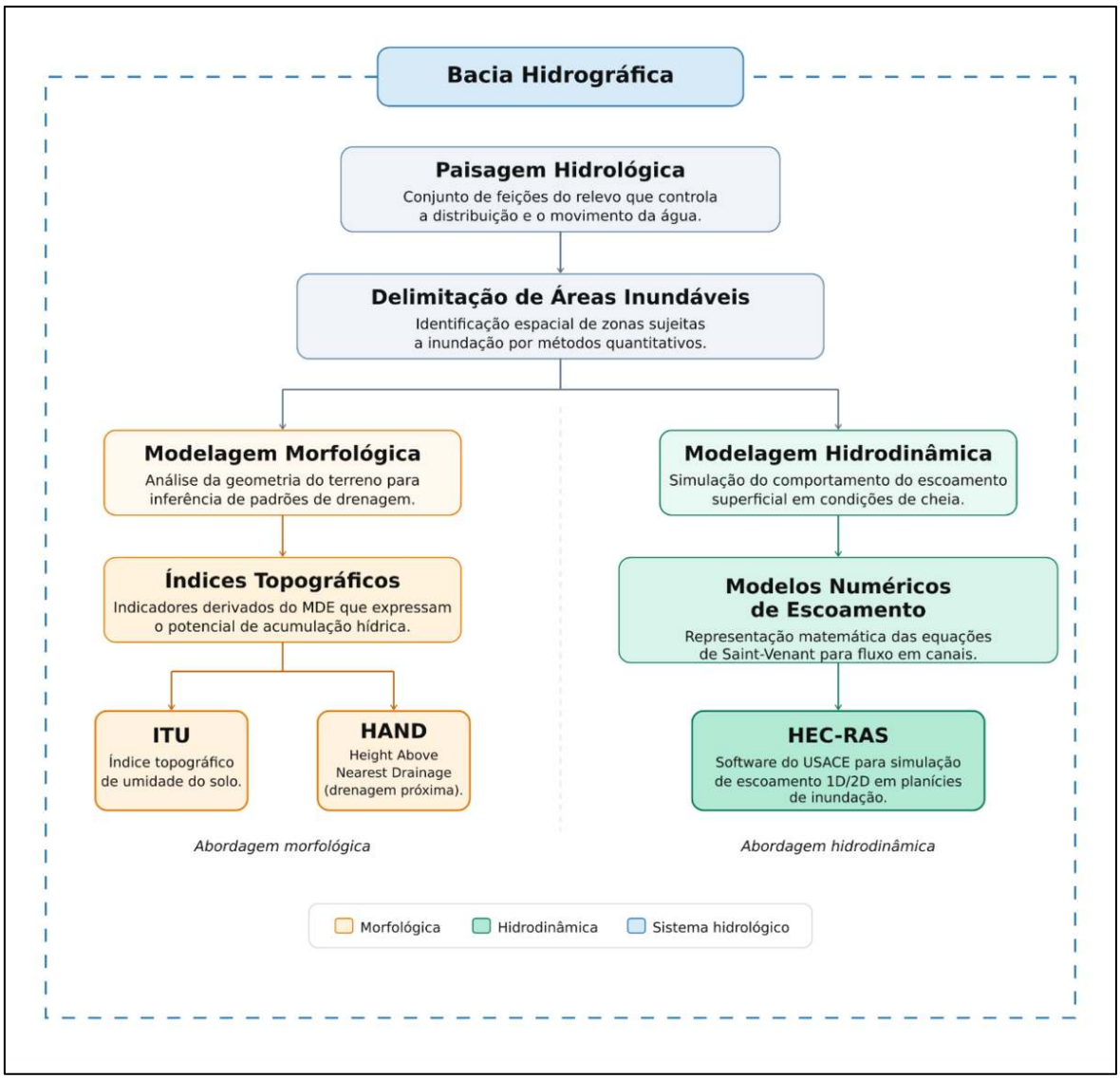
No contexto deste estudo, o SIG foi utilizado para o processamento de dados derivados de sensoriamento remoto, incluindo Modelos Digitais de Terreno (MDT) obtidos a partir de dados da missão SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*). O uso de sensores orbitais permite a coleta de informações da superfície terrestre sem contato direto, sendo fundamental para análises hidrológicas e geomorfológicas (Burrough; McDonnell; Lloyd, 2015).

Essas ferramentas possibilitam a aplicação de modelos como o ITU e o HAND, contribuindo para a identificação de áreas suscetíveis à inundação com base em parâmetros topográficos e hidrológicos.

Esses modelos morfológicos (ITU e HAND) se baseiam na forma e estrutura do relevo presentes na paisagem hidrológica e áreas inundáveis como apresentado na Figura 1; os quais se destacam, pois, se configuram como ferramentas de fácil aplicação e viáveis financeiramente (Schier, 2020).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 1. Métodos para identificação de Zonas Inundáveis



Fonte: Adaptado de SCHIER (2020).

Atualmente, a modelagem de recursos hídricos tem sido impulsionada pelo avanço das tecnologias de sensoriamento remoto e dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), que permitem elaborar os modelos morfológicos. Essas informações e ferramentas são eficazes para o monitoramento e gestão dos recursos naturais (Aryal e Bates, 2008). Com base nisso, a gestão de bacias hidrográficas é um elemento essencial para atingir a sustentabilidade (Bharath *et al.*, 2021).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Diante desse cenário, este estudo propõe a aplicação integrada dos modelos HAND e ITU, aliados à análise do uso e ocupação do solo, com o objetivo de identificar áreas suscetíveis a inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte. A abordagem metodológica adotada visa oferecer subsídios técnicos ao planejamento urbano sustentável, contribuindo para a redução da vulnerabilidade socioambiental e a mitigação dos impactos decorrentes de eventos hidrológicos extremos.

2. METODOLOGIA

A pesquisa caracteriza-se como um estudo de caso, de caráter exploratório e descritivo, baseado em análise espacial multicritério, com suporte de geotecnologias. Foram aplicados os modelos HAND e ITU em ambiente SIG, com posterior cruzamento com dados de uso e ocupação do solo, visando à identificação das áreas com maior suscetibilidade a inundações na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte.

Os modelos morfológicos se baseiam na forma e estrutura do relevo, como o Índice Topográfico de Umidade (ITU) e o *Height Above Nearest Drainage* (HAND), caracterizados como ferramentas acessíveis e de baixo custo. Esses modelos permitem a identificação de áreas de perigo natural, favorecendo o reconhecimento de áreas suscetíveis a eventos hidrológicos extremos (Tominaga; Santoro; Amaral, 2009), embora não quantifiquem o risco, que é a relação entre o perigo e a vulnerabilidade (UNDRR, 2015).

Segundo Guimarães *et al.* (2024), a associação entre modelos digitais de terreno, dados de uso e ocupação do solo e declividades locais permite um mapeamento eficiente de áreas vulneráveis a inundações. O risco compreende a extensão espacial das inundações, sua magnitude em termos de recorrência dos eventos, a profundidade da água nas áreas atingidas e os potenciais danos (Tucci, 2014).

Independentemente do modelo adotado, sua função é representar o sistema real da forma mais precisa possível, com o objetivo de resolver problemas. No contexto sistêmico, um problema ocorre quando um sistema perde a capacidade de manter suas variáveis dentro de determinados limites (Hendriks; Vriens, 1995).

Área de estudo

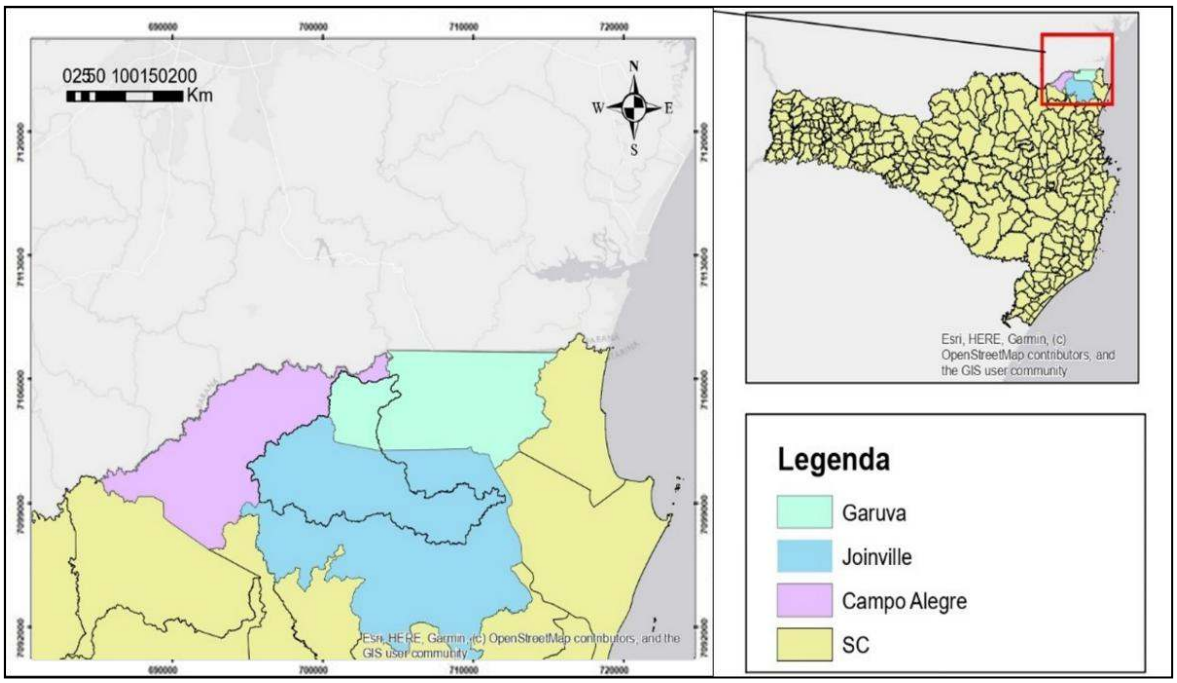
A Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte abrange uma área de aproximadamente 487 km², estendendo-se pelos municípios de Joinville, Garuva e Campo Alegre, no estado de Santa Catarina (Figura 2).

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

O município de Joinville está localizado na região nordeste do estado, nas coordenadas aproximadas de 26°15’ S e 48°45’ W, com uma área territorial de 1.126 km². Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (2023), sua população é estimada em 616.323 habitantes. O município de Garuva, limítrofe a Joinville e ao estado do Paraná, possui uma área de 503,60 km² e uma população estimada em 15.846 habitantes (IBGE, 2023). Campo Alegre, por sua vez, apresenta uma área de 494,22 km² e conta com uma população estimada de 11.770 habitantes (IBGE, 2023).

A maior parte da bacia hidrográfica encontra-se no território de Joinville, correspondendo a cerca de 75% de sua extensão. A nascente do Rio Cubatão do Norte localiza-se a aproximadamente 1.200 metros de altitude, na região do planalto serrano. As águas do rio drenam diferentes formações vegetais, incluindo campos de altitude, floresta ombrófila densa (Mata Atlântica), vegetação de restinga e manguezais (Gonçalves *et al.*, 2006). Ressalta-se que o Rio Cubatão do Norte é responsável por aproximadamente 70% do abastecimento público de água do município de Joinville, evidenciando sua relevância socioambiental para a região.

Figura 2. Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Análise de uso e ocupação do solo

Dentro dos fatores que podem influenciar o regime hidrológico de uma bacia hidrográfica, o uso e a cobertura do solo desempenham um papel significativo, determinando a interação da água com o solo e afetando o escoamento superficial e a infiltração (Wang, S. *et al.*, 2022; Kopecký e Čížková, 2010). O uso do solo se define pela forma como o espaço geográfico é ocupado pelas atividades humanas, o que afeta diretamente a sustentabilidade e a qualidade ambiental da bacia hidrográfica (Liu *et al.*, 2024).

As informações sobre uso da terra são fundamentais para o desenvolvimento de soluções de gestão ambiental, principalmente no que se refere à qualidade da água e ao controle de inundações (Luo *et al.*, 2020). O levantamento desses dados é relevante, pois a ocupação desordenada do solo pode levar à degradação ambiental, agravando problemas hidrológicos e prejudicando a integridade dos ecossistemas (Babaremu; Taiwo; Ajayi, 2024).

A classificação de uso e ocupação do solo é realizada automaticamente por categorização de pixels em imagens de satélite, como as do *Landsat* 8, que combinam bandas pancromáticas e multiespectrais para facilitar a análise (Gadal e Mozgeris, 2025). Neste estudo, a análise foi feita utilizando o *software ArcGIS 10.8*, com apoio do *Google Earth* para distinguir objetos no mundo real e melhorar a precisão da classificação georreferenciada. Após a definição de classes específicas para a Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, foram realizadas interpretações visuais para produzir um mapa das classes de uso e cobertura do solo.

Modelagem com o Índice Topográfico de Umidade (ITU)

O ITU conhecido em inglês como *Topographic Wetness Index (TWI)*, é amplamente utilizado nas áreas de hidrologia e ecologia devido à sua capacidade de representar áreas com potencial de saturação hídrica (Wang, C. *et al.*, 2022; Sørensen; Seibert; Beven, 2018). Proposto inicialmente por Beven e Kirkby (1979), o índice é definido pelo logaritmo natural da razão entre a área de contribuição específica e a tangente do ângulo de declividade do terreno

O ITU reflete a influência da topografia sobre o regime de umidade de uma bacia hidrográfica, considerando tanto a inclinação quanto as áreas de contribuição de escoamento, o que permite a identificação de locais de provável acúmulo de água (Hung *et al.*, 2016). Além disso, o índice facilita a análise de processos de saturação do solo e características do aquífero, pois mapeia áreas hidrologicamente sensíveis ao escoamento convergente (Guasselli; Simioni; Laurent, 2020).

O cálculo do ITU é realizado por meio da seguinte fórmula, que fornece uma medida relativa da umidade potencial de uma área (Wang, C. *et al.*, 2022):

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

$$ITU = \ln\left(\frac{As}{tan\beta}\right)$$

Em estudos aplicados, essa metodologia tem sido utilizada com sucesso para prever áreas de acúmulo de água, especialmente quando combinada com dados morfométricos e análises espaciais em ambiente SIG (Guimarães *et al.*, 2024).

Onde:

As - representa a área de contribuição a montante por unidade de comprimento de contorno, expressa em metros (m), e β - refere-se à inclinação da superfície como uma fração (ângulo de declividade em radianos).

Para que o método funcione corretamente, existe uma restrição matemática nos valores de β, que devem estar entre 0º e 90º, pois a função tangente tende ao infinito quando o cosseno se aproxima de zero (Capoane, 2015).

Para a aplicação do Modelo ITU utilizou-se o MDT da Bacia do Rio Cubatão do Norte, disponibilizado pela Secretaria Estadual de Desenvolvimento Econômico Sustentável do Estado de Santa Catarina, com imagens datadas de 2012 e resolução de 1 metro.

O método ITU foi implementado no *software* SIG ArcGIS 10.8, utilizando a extensão TAUDEM para realizar os diversos processamentos necessários para a obtenção do ITU. Para otimizar o processamento e melhorar a visualização dos resultados, o MDT em *fill* foi reamostrado (*Resample*) para uma resolução de 20 metros. Com o intuito de reduzir erros, o processamento *Fill Sinks* foi realizado previamente no MDT, eliminando células problemáticas que poderiam comprometer a análise computacional. O *raster* resultante, ou seja, o novo MDT ajustado, serviu como ponto inicial para o cálculo do ITU.

Para a classificação do ITU, foram adotadas as classes estabelecidas por Schier (2020), que indica a capacidade de cada classe em representar planícies inundáveis, conforme apresentado na Tabela 1.

Tabela 1. Classificação de ITU

CLASSE	INTERPRETAÇÃO	VALOR DE ITU	ESCALA DE COR ADOTADA
0 - 6,4	Pouca área de contribuição e alta declividade	Baixo	Bege
6,4 – 8,0	Média área de contribuição e declividades médias	Médio	Azul
>8	Grande área de contribuição e baixa declividade	Alto	Azul-turquesa

Fonte: Autores, 2024.

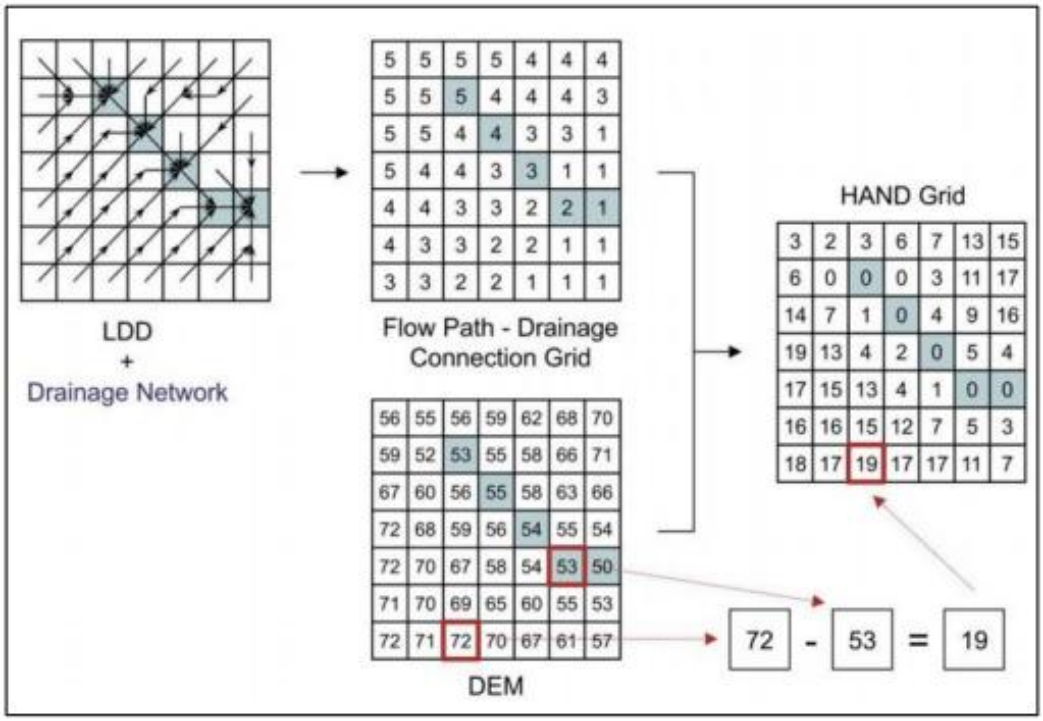
Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Modelagem com *Height Above Nearest Drainage* (HAND)

O modelo HAND traduzido como altura acima da drenagem mais próxima, é fundamentado nas características morfológicas dos locais, utilizando-se do MDT para identificar padrões de elevação e drenagem na superfície terrestre (Nobre *et al.*, 2016).

Esse modelo é amplamente empregado para mapear áreas suscetíveis a inundações e classificar paisagens hidrológicas, pois estima locais com maior probabilidade de alagamento durante eventos de precipitação intensa (Alves *et al.*, 2024; Teng; Tan; Le, 2021). O HAND foi inicialmente desenvolvido por Rennó *et al.* (2008) para descrever o terreno a partir de um MDT, sendo ajustado para múltiplas aplicações hidrológicas em ambientes SIG. O modelo efetua a subtração da elevação entre pixels do MDT em relação àqueles próximos da rede de drenagem, facilitando o mapeamento de áreas vulneráveis (Malek; Verburg; Grau, 2020), como apresentado na Figura 3.

Figura 3. Modelo HAND



Fonte: RENNÓ *et al*. (2008)

Para este estudo, a aplicação do modelo demandou o uso do *software* SIG ArcGIS 10.8 e, através de extensões especializadas como o TAUDEM, foi possível gerar o HAND com a

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

precisão necessária. Na Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, a classificação proposta por Rennó *et al.* (2008) foi utilizada, categorizando as áreas em quatro classes: >5,3 m; 5,3 a 15 m; 15 a 50 m; e <50 m.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Uso e Ocupação do Solo

Dentro das classes de uso do solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, destacam-se a Floresta Nativa e o Reflorestamento, que juntas cobrem 77,09% da área. A cobertura predominante de floresta nativa em relação ao reflorestamento reflete o grau de preservação ambiental proporcionado pela presença de Unidades de Conservação na região. Entre essas, estão três Unidades de Conservação de Uso Sustentável: a Área de Proteção Ambiental (APA) Quiriri, que ocupa mais de 19% da bacia; a APA Serra Dona Francisca, com abrangência de 59% da área da bacia; e a Reserva Particular do Patrimônio Natural (RPPN) Caetezal, localizada no interior da APA Serra Dona Francisca. A terceira classe mais representativa são as áreas de Campo/Pasto, que cobrem aproximadamente 11% da bacia. Os solos dessa região são, em sua maioria, rasos, pedregosos, ácidos e de baixa fertilidade, sendo encontrados principalmente em áreas de relevo ondulado, características que restringem seu uso a reflorestamento e pastagens (EMBRAPA, 1979).

A área urbana também apresenta crescimento significativo, sobretudo devido à expansão do perímetro urbano de Joinville. Essa expansão está particularmente associada à zona industrial e aos bairros Bom Retiro, Jardim Sofia, Jardim Paraíso e Vila Cubatão, indicando uma tendência de ocupação e desenvolvimento urbano (Silva; Lima; Saito, 2023). As classes de uso do solo e suas respectivas áreas estão descritas na Tabela 2 e ilustradas na Figura 4.

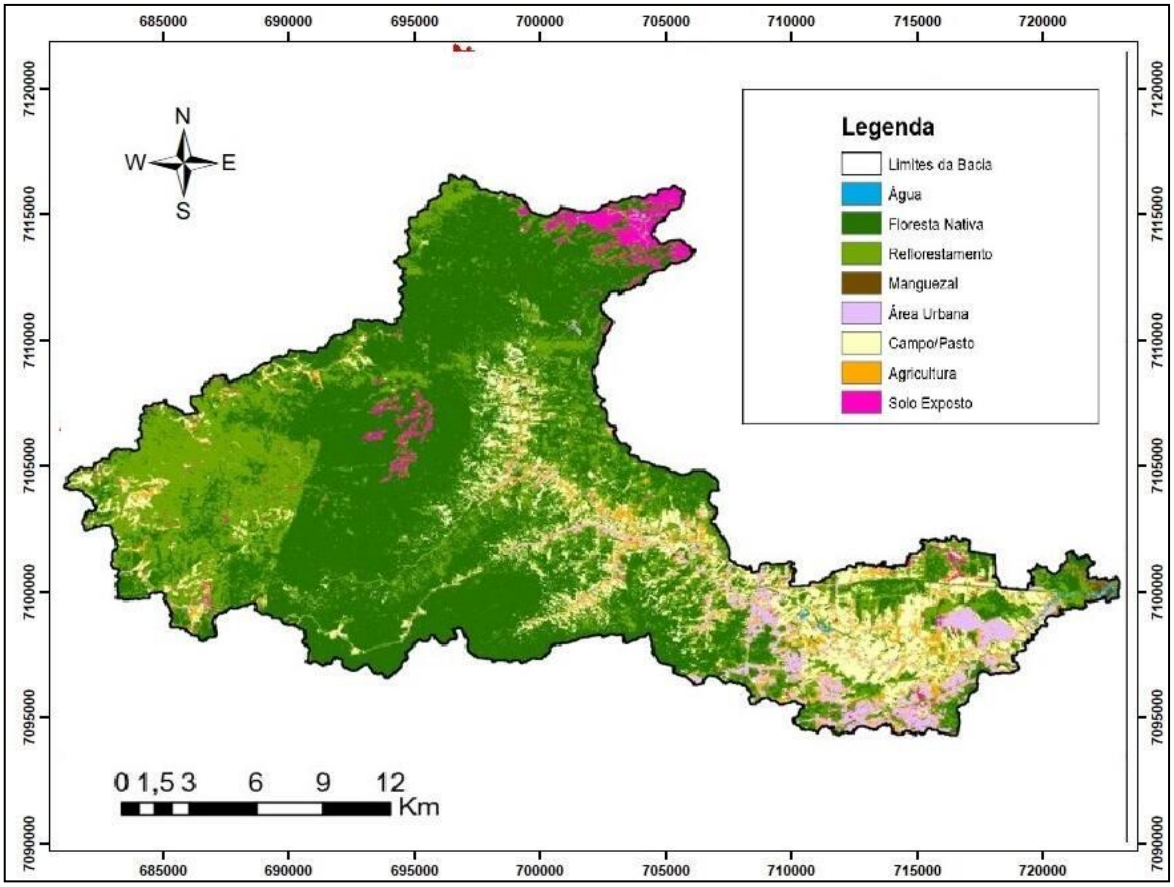
Tabela 2. Área e Uso do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte

CLASSE	ÁREA (KM²)	%
ÁGUA	0,71	0,14
FLORESTA NATIVA	237,78	48,77
REFLORESTAMENTO	138,03	28,32
MANGUEZAL	1,27	0,26
ÁREA URBANA	21,68	4,45
CAMPO/PASTO	55,87	11,46
AGRICULTURA	18,64	3,82
SOLO EXPOSTO	13,4	2,75
TOTAL	**487,38**	**100**

Fonte: Autores, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 4. Uso e Ocupação do Solo da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores, 2024.

Essa tendência de urbanização em áreas de planície e baixa declividade, próxima ao exutório da bacia, coincide com o padrão observado em outras cidades brasileiras que enfrentam desafios de drenagem urbana, como Curitiba e Recife (Vojinović, 2012; Koriche e Rientjes, 2016). A substituição de cobertura vegetal por superfícies impermeáveis reduz a capacidade de infiltração e aumenta o escoamento superficial, intensificando os riscos de alagamentos (Guimarães *et al.*, 2024).

Índice Topográfico de Umidade – ITU

Os maiores valores de ITU tendem a ser encontrados em locais com amplas áreas de contribuição, geralmente situados em regiões mais baixas da paisagem hidrológica, onde, em

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

alguns casos, podem coincidir com áreas urbanas (Kopecký e Čížková, 2010). Áreas próximas aos cursos d'água são propensas ao acúmulo de água devido à grande área de captação e à influência do lençol freático, conforme observado no mapeamento do ITU da bacia hidrográfica estudada, indicando zonas hidrologicamente sensíveis (Zhang *et al.*, 2025).

Valores elevados de ITU são geralmente associados a áreas planas com grandes áreas de contribuição, pois essas áreas apresentam maior potencial de acúmulo de água, conforme evidenciado na Bacia do Rio Cubatão do Norte, onde as áreas mais suscetíveis ao acúmulo de água coincidem com as regiões menos inclinadas da paisagem (Nguyen e Bae, 2019). Por outro lado, as cotas mais altas da bacia geralmente apresentam valores de ITU mais baixos, uma vez que sua maior declividade as caracteriza como partes superiores da paisagem hidrológica, ou "*uplands*", com menor potencial de acúmulo de água.

Os valores de ITU indicam áreas com diferentes probabilidades de ocorrência de inundações para a Bacia do Rio Cubatão do Norte. A classe > 8 é que representa os maiores índices de saturação hídrica, está representada na cor azul-turquesa na Figura 5, com uma área de 107,1 km². Valores abaixo de 8 já apresentam menos chances de acúmulo de água, de 0 a 8, representando uma área de 79% do total da bacia. Na Tabela 3 apresenta-se as classes e os valores das áreas.

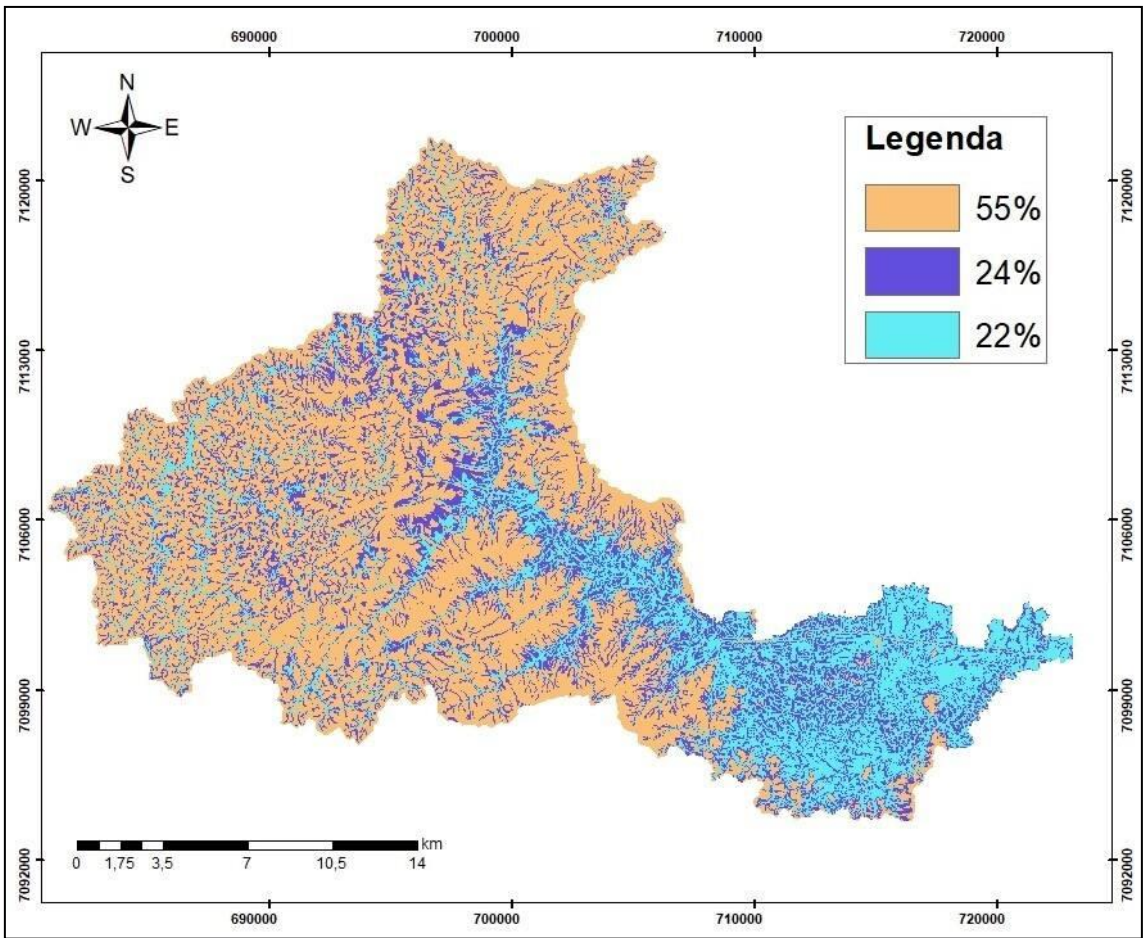
Tabela 3. Classes ITU e suas respectivas áreas

CLASSE	ÁREA (KM²)	%
0 – 6,4	263,7	55
6,4 – 8	116,2	24
>8	107,1	22
TOTAL	**487**	**100**

Fonte: Autores, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 5. Mapa ITU da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores, 2024.

Em vez de apenas descrever os valores cartográficos, a interpretação crítica dos dados revela um padrão claro: áreas com maior contribuição de escoamento e baixa declividade coincidem com regiões de expansão urbana recente, o que reforça a necessidade de incorporar o ITU como variável crítica no planejamento territorial e no licenciamento ambiental.

Height Above the Next Drainage – HAND

A análise do mapa do modelo HAND revela uma semelhança significativa entre as áreas mais propensas à saturação hídrica e o mapeamento obtido com o ITU, descrevendo adequadamente a paisagem hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte. A classificação adotada identifica valores mais elevados como áreas não inundáveis, observados

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

principalmente nas regiões inclinadas e elevadas da bacia, reforçando a concordância entre os resultados do modelo HAND e o ITU (Liu; Zhang; Wang, 2021).

Dessa forma, a Bacia do Rio Cubatão do Norte apresenta elevado risco de inundações em áreas planas com concentração urbana consolidada, abrangendo uma extensão de 82,7 km² da área da bacia. Essas regiões devem manter alto nível de alerta em eventos de precipitação intensa, devido à vulnerabilidade identificada nos estudos de mapeamento de suscetibilidade à inundação (Pakati; Shoko; Dube, 2025).

O modelo HAND possui uma relação intrínseca com as paisagens hidrológicas de uma bacia hidrográfica, permitindo, por meio dessa modelagem, a identificação das diferentes paisagens dentro da área de estudo. Esta classificação torna possível mapear as variações de paisagem hidrológica e sua relação com inundações, principalmente em áreas de planície que estão urbanizadas e são suscetíveis a alagamentos (Hu e Tang, 2021).

As classes de paisagens hidrológicas propostas por Rennó *et al.* (2008) estão divididas em categorias como Alagamento (<5 m), Ecótono (5-15 m), Encostas (15-50 m) e Topo de Morro (>50 m). Essa classificação auxilia na distinção de zonas vulneráveis dentro da bacia, conforme ilustrado na Figura 6, identificando as áreas com maior propensão a inundações (Miralha *et al.*, 2023).

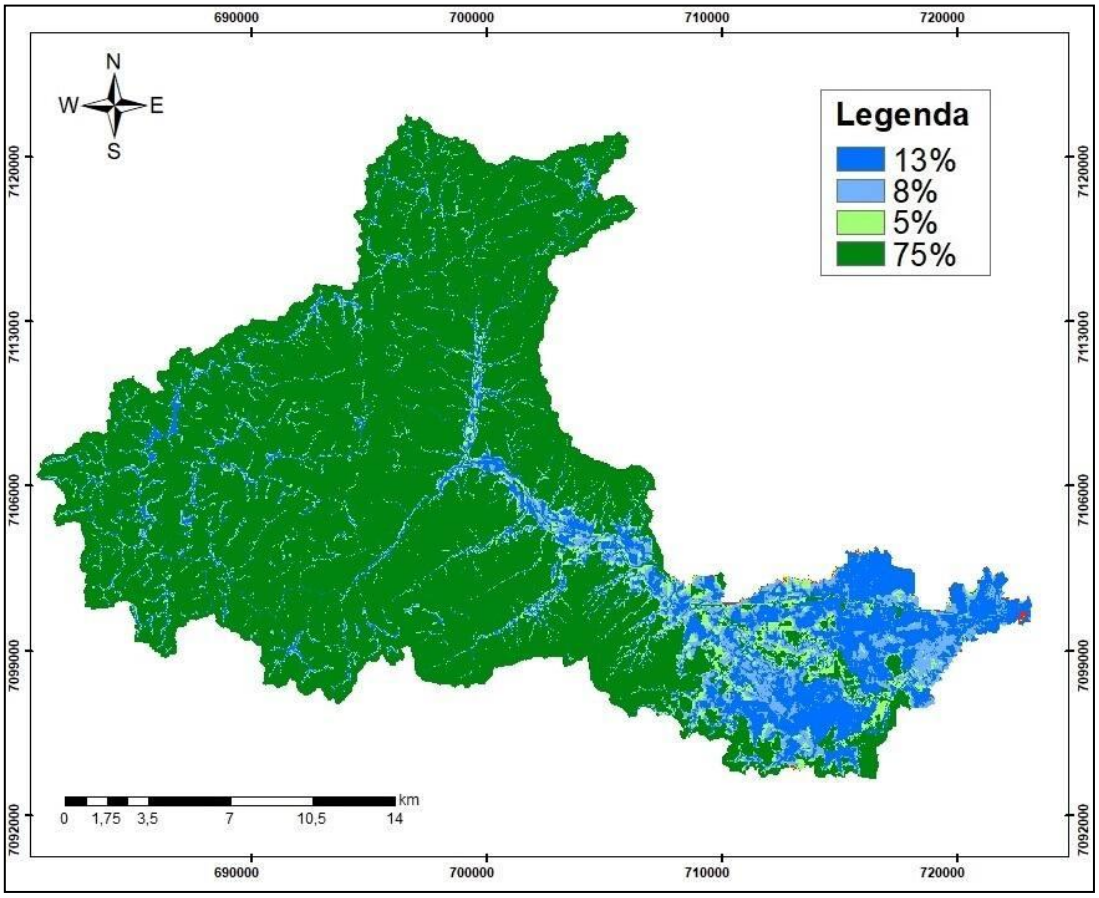
Tabela 4. Áreas contribuintes de cada classe HAND - Rennó *et al.* (2008)

CLASSE	ÁREA (KM²)	%
<5,3 M	82,7	13
MÉDIA 5,3 – 15 M	14,6	8
BAIXA 15 – 50 M	24,4	5
NÃO INUNDÁVEL >50	365,3	75
TOTAL	**487**	**100**

Fonte: Autores, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

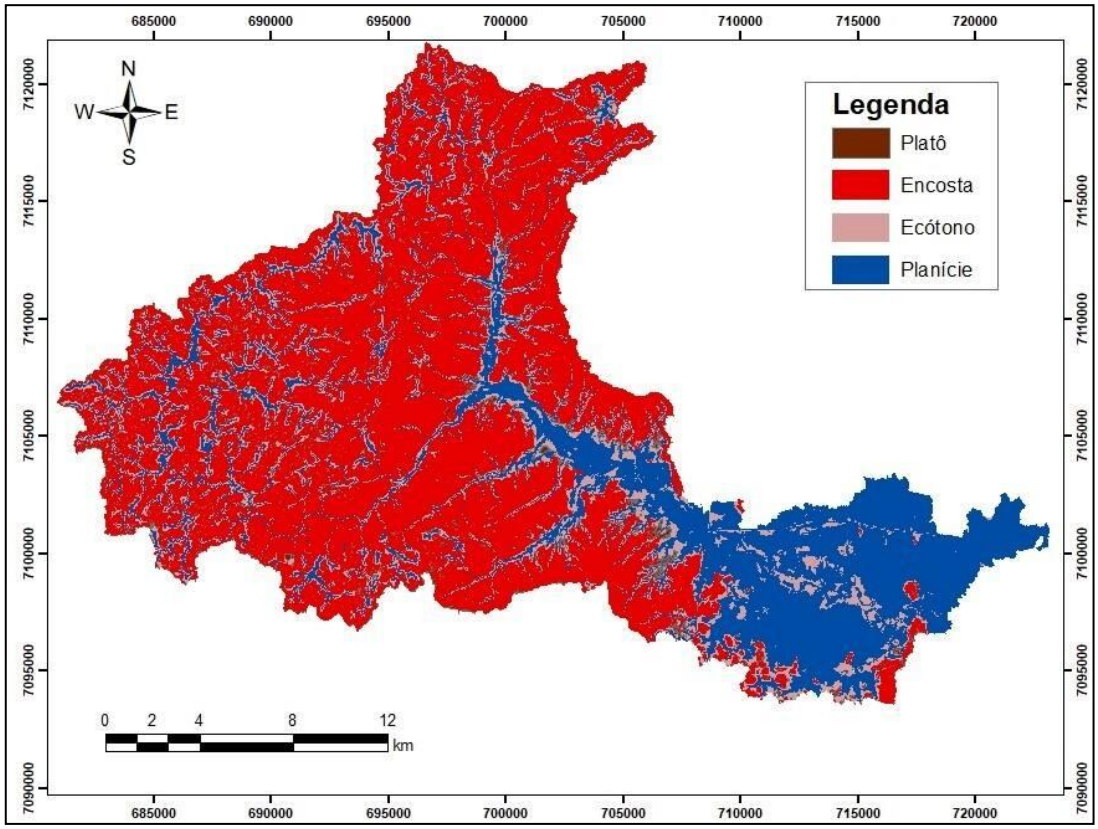
Figura 6. Mapa HAND da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores, 2024.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Figura 7. Mapa de Paisagem Hidrológica da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores, 2024.

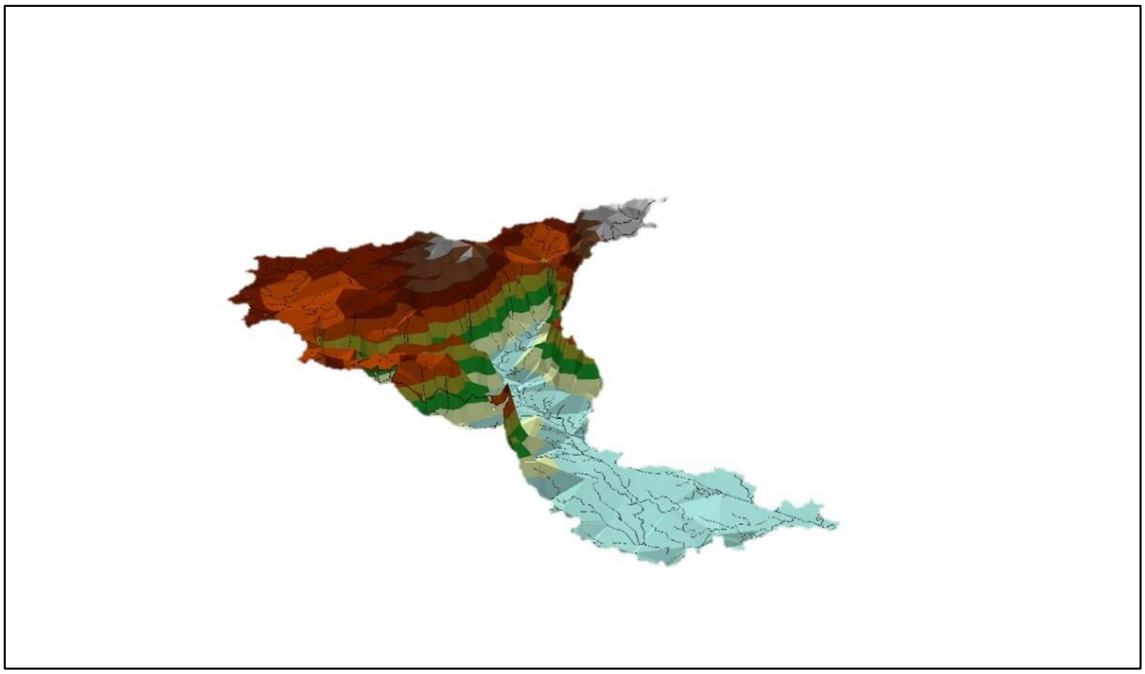
Outra possibilidade de modelagem das paisagens hidrológicas consiste na geração de representações tridimensionais (3D) a partir de arquivos no formato *TIN* (*Triangulated Irregular Network*), utilizando o *software* ArcScene 10.5.1 (Figura 8). Esse tipo de abordagem permite uma visualização mais detalhada e realista do relevo, facilitando a interpretação das características geomorfológicas da área de estudo.

Por meio da modelagem 3D, torna-se possível analisar com maior precisão a variação da declividade na Bacia do Rio Cubatão do Norte, identificando áreas com maior inclinação e regiões mais planas. Além disso, a representação tridimensional contribui para a identificação e

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

delimitação das áreas potencialmente inundáveis, destacadas pela coloração azul, o que auxilia na compreensão da dinâmica hidrológica e no planejamento ambiental da bacia.

Figura 8. Paisagem Hidrológica em 3D da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte



Fonte: Autores (2024).

Integração dos resultados e implicações espaciais

A análise integrada dos modelos e do uso do solo evidencia que as áreas urbanizadas coincidem com zonas de maior risco hidrológico. Esse cruzamento revela a ausência de critérios hidrológicos na ocupação territorial, especialmente nas zonas próximas ao exutório do rio, onde há maior concentração de fluxo superficial e menor capacidade de escoamento natural.

Quando comparada a outras bacias urbanas do sul do Brasil, como as dos rios Cachoeira e Itajaí-Açu, a Bacia do Cubatão do Norte apresenta semelhanças na ocupação de áreas alagáveis, mas diferencia-se pela presença significativa de áreas conservadas. Isso representa uma oportunidade estratégica para implementar políticas preventivas de mitigação, como a definição de zonas de restrição à ocupação com base em critérios hidrológicos.

O estudo reafirma a utilidade dos modelos HAND e ITU como instrumentos técnicos para subsidiar decisões de ordenamento territorial e reforça a importância de integrá-los a instrumentos legais como planos diretores, zoneamentos ecológico-econômicos (ZEE) e mapas de risco.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise dos modelos HAND e ITU, aliada à visualização 3D da Bacia Hidrográfica do Rio Cubatão do Norte, revela que a acumulação de água ocorre predominantemente nas áreas mais baixas da paisagem, os chamados *lowlands.* Segundo Winter (2001), o conceito de paisagem hidrológica considera essas unidades como partes fundamentais que interagem com o sistema hidrológico completo, o qual é influenciado por fatores como inclinação e permeabilidade das superfícies.

Ao comparar os mapas HAND e ITU com o mapa de uso e ocupação do solo, observa-se que a área urbana apresenta maior risco de alagamentos, enchentes e inundações, caracterizando-se como uma área ambientalmente vulnerável. As regiões de maior sensibilidade ambiental e propensão a inundações encontram-se próximas ao exutório da bacia, em áreas densamente urbanizadas, como o município de Joinville.

Recomenda-se que estudos futuros considerem análises de proximidade e padrões espaciais para verificar as conclusões deste estudo, bem como explorar metodologias complementares que possam aprimorar a compreensão dos riscos hidrológicos e apoiar a gestão territorial e a mitigação de desastres.

REFERÊNCIAS

ALVES, M.; OLIVEIRA, R.; ROCHA, C.; FILGUEIRA, H. J.; SILVA, R. da; SANTOS, C.. Assessing flood susceptibility with ALOS PALSAR and LiDAR digital terrain models using the height above nearest drainage (HAND) model. **Environment, Development and Sustainability**, v. 27, p. 26489–26512, 2024. DOI: https://doi.org/10.1007/s10668-024-04785-1.

ARYAL, S.; BATES, B. Effects of catchment discretization on topographic index distributions. **Journal of Hydrology,** v. 359, p. 150-163, 2008.

BABAREMU, K.; TAIWO, O.; AJAYI, D.. Impacts of land use and land cover changes on hydrological response: a review of current understanding and implications for watershed and water resources management. **Twist,** v. 19, p. 256–267, 2024. DOI: https://doi.org/10.5281/zenodo.10049652.

BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43–69, 1979. DOI: https://doi.org/10.1080/02626667909491834.

BHARATH, A.; KIRAN KUMAR, K.; MADDAMSETTY, R.; MANJUNATHA, M.; TANGADAGI, R. B.; PREETHI, S. Drainage morphometry based sub-watershed prioritization of Kalinadi basin

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

using geospatial technology. **Environmental Challenges**, v. 5, p. 100277, 2021. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100277.

BRASIL. **Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997**. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera dispositivos legais. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/l9433.htm. Acesso em: 30 mar. 2025.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, Rachael; LLOYD, Christopher D. **Principles of geographical information systems**. Oxford: OUP Oxford, 2015.

CAPOANE, V. et al. Influência da resolução do modelo digital de elevação na determinação do índice topográfico de umidade e na capacidade de predição dos teores carbono orgânico do solo. Geo UERJ, Rio de Janeiro, n. 27, p. 144-155, 2015.

CASTRO, A. C. V. de; ALVIM, A. T. B.. Urbanização e gestão de riscos hidrológicos em São Paulo. **Cadernos Metrópole**, v. 24, n. 54, p. 669–695, 2022. DOI: https://doi.org/10.1590/2236-9996.2022-5410.

DILL, J. **Gestão dos Recursos Hídricos: simulação do impacto das mudanças climáticas e de uso do solo através da modelagem** SWAT. 2021. 177f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil). Universidade do Estado de Santa Catarina, Florianópolis, 2021.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Súmula da 10ª reunião técnica de levantamento de solos.** Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1979. 83 p.

FARIAS, A.; MENDONÇA, F. Riscos socioambientais de inundação urbana sob a perspectiva do sistema ambiental urbano. **Sociedade & Natureza**, v. 34, 2022. DOI: https://doi.org/10.14393/SN-v34-2022-63717.

FARIAS, P, R.; FONTES, A. S.; ASSIS, J. M. O. de; SOUZA, N. C. R. de. Identificação de áreas com risco de inundação na bacia hidrográfica do Rio Cachoeira no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 17, n. 6, p. 4244–4259, 2024. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v17.6.p4244-4259.

GADAL, S.; MOZGERIS, G.. Advances in remote sensing for land cover and land use mapping. **Remote Sensing**, v. 17, n. 12, p. 1980, 2025. DOI: https://doi.org/10.3390/rs17121980.

GALLI, V. B.; BALDIN, N. Desgaste nos meandros da bacia hidrográfica do Rio Cubatão do norte: história e economia do desmatamento da mata atlântica (Joinville – SC). In: OLIVEIRA, Robson José (org.). **Engenharia Florestal: desafios, limites e potencialidades**. Guarujá: Editora Científica, 2020. p. 460–477. DOI: https://doi.org/**10.37885/200801115.**

GONÇALVES, M.L.; ZANOTELLI, C.T.; OLIVEIRA, F.A. Diagnóstico e prognóstico das disponibilidades e demandas hídricas do Rio Cubatão do Norte. Joinville. Editora UNIVILLE, Joinville, SC. 2006. Disponível em: https://www.aguas.sc.gov.br/jsmallfib_top/Comite%20Rio%20Cubatao%20Norte/Publicacoes/livro-1--diagnostico-e-prognostico-das-disponibilidades-e-demandas-hidricas-do-rio-cubatao-do-norte--joinville--santa-catarina-(1).pdf. Acesso em: 12 jan. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

GUASSELLI, L. A.; SIMIONI, J.P. D.; LAURENT, F. Mapeamento e classificação de áreas úmidas usando topographic wetness index (TWI) a partir de modelos digitais de elevação, na bacia hidrográfica do rio Gravataí – Rio Grande do Sul, Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. DOI: https://doi.org/10.20502/rbg.v21i3.1714.

GUIMARÃES, É. A.; SILVA, V. V. M. da; UMBELINO, L. F.; MOLISANI, M. M.; LUGON JÚNIOR, J. Susceptibility to Flooding and Urban Flooding in Small Municipalities: Hydrogeomorphological, Land Use and Land Cover Aspects in a Multi-Criterion Analysis. **Revista de Gestão Social e Ambiental - RGSA**, São Paulo (SP), v. 18, n. 9, p. e06513, 2024. DOI: https://doi.org/10.24857/rgsa.v18n9-040. Disponível em: https://rgsa.openaccesspublications.org/rgsa/article/view/6513. Acesso em: 4 dez. 2025.

HENDRIKS, P.; VRIENS, D. Collaborative exploration of spatial problems. London: NCGIA. 1995.

HU, Y.; TANG, H. Sobre a capacidade de generalização de um modelo global para mapeamento rápido de edificações a partir de imagens de satélite heterogêneas em múltiplos cenários de desastres naturais. **Remote Sensing**, v. 13, n. 5, p. 984, 2021. DOI: https://doi.org/10.3390/rs13050984.

HUNG, M.N.W.B.; WROBLEWSKI, C.A.; OLIVEIRA, J.G.; PAULA, E.V. **Utilização do Índice Topográfico de Umidade como suporte ao planejamento e gestão ambiental de unidades de conservação de uso sustentável**. In: XI SINAGEO, 2016, Maringá - PR. XI SINAGEO, 2016. Disponível em: https://www.sinageo.org.br/2016/trabalhos/8/8-131-1550.html. Acesso em: 13 abr. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Joinville (SC)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/joinville.html. Acesso em: 30 mar. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Garuva (SC)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/garuva.html. Acesso em: 30 mar. 2025.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. **Cidades e Estados: Campo Alegre (SC)**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023. Disponível em: https://www.ibge.gov.br/cidades-e-estados/sc/campo-alegre.html. Acesso em: 30 mar. 2025.

KOPECKÝ, M.; ČÍŽKOVÁ, Š. Using topographic wetness index in vegetation ecology: does the algorithm matter? **Applied Vegetation Science**, v. 13, n. 4, p. 450–459, 2010. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1654-109X.2010.01083.x.

KORICHE, S. A.; RIENTJES, T. H. M. Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. **Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C**, v. 93, p. 12–23, 2016. DOI: https://doi.org/10.1016/j.pce.2016.03.007.

LAWSON, E.; THORNE, C.; AHILAN, S.; ALLEN, D.; ARTHUR, S.; EVERETT, G.; FENNER, R.; GLENIS, V.; GUAN, D.; HOANG, L.; KILSBY, C.; LAMOND, J.; MANT, J.; MASKREY, S.; MOUNT, N.; SLEIGH, A.; SMITH, L.; WRIGHT, N. Delivering and evaluating the multiple flood risk benefits in blue-green cities: an interdisciplinary approach. In: PROVERBS, D.; BREBBIA, C. A. (ed.). **Flood Recovery, Innovation and Response IV**. Southampton: WIT Press, 2014. p.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

113–124. Disponível em: https://www.witpress.com/elibrary/wit-transactions-on-ecology-and-the-environment/184/28342. Acesso em: 04 mar. 2025.

LIU, C.; ZHANG, J.; WANG, F. Assessing flood-prone areas using topographic and hydrological models: Insights from the application of the HAND model in urban catchments. Journal of Hydrology, v. 595, p. 126065, 2021.

LIU, J.; PEI, X.; ZHU, W.; JIAO, J. Water-related ecosystem services interactions and their natural-human activity drivers: implications for ecological protection and restoration. **Journal of Environmental Management**, v. 352, p. 120101, 2024. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120101.

LONGLEY, P. A.; GOODCHILD, M. F.; MAGUIRE, D. J.; RHIND, D. W. *Geographic information systems and science*. 4. ed. Chichester: Wiley, 2015.

LUO, Z.; SHAO, Q.; ZUO, Q.; CUI, Y. Impact of land use and urbanization on river water quality and ecology in a dam dominated basin. **Journal of Hydrology**, v. 584, p. 124655, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.124655.

MALEK, Ž.; VERBURG, P. H.; GRAU, H. R. Flood hazard in rural landscapes of the Americas. **Environmental Research Letters**, v. 15, n. 3, p. 034010, 2020.

MIRALHA, L.; WISSLER, A. D.; SEGURA, C.; BLADON, K. D. Characterizing stream temperature hysteresis in forested headwater streams. **Hydrological Processes**, v. 37, n. 1, p. e14795, 2023. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.14795.

NGUYEN, Hoang-Minh; BAE, Deg-Hyo. An approach for improving the capability of a coupled meteorological and hydrological model for rainfall and flood forecasts. **Journal of Hydrology**, v. 577, p. 124014, 2019. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.124014.

NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; MOMO, M. R.; SEVERO, D. L.; PINHEIRO, A.; NOBRE, C. A. HAND contour: a new indirect predictor of inundation extent. **Hydrological Processes**, v. 30, n. 2, p. 320–333, 2016. DOI: https://doi.org/10.1002/hyp.10581.

NUNES, N. da C.; ANGELINI, L. P.; ALVES, W. dos S.; CASTRO, R. M.; MORAIS, W. A.; MORAIS, N. G.. Análise espaço-temporal da erosão hídrica por meio de modelagem e geotecnologias em bacias hidrográficas no Centro-Oeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 18, n. 2, p. 1465–1492, 2025. DOI: https://doi.org/10.26848/rbgf.v18.2.p1465-1492.

PAKATI, S. S.; SHOKO, C.; DUBE, T. Integrated flood modelling and risk assessment in urban areas: a review on applications, strengths, limitations and future research directions. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v. 61, p. 102583, 2025. DOI: https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102583.

RAMOS, M. P.; SHABBACH, L.; DE LIMA E CUNHA, L.; MARX, V. As enchentes de 2024 no Rio Grande do Sul e a capacidade de resposta dos municípios às inundações. **Redes**, *[S. l.]*, v. 29, n. 1, 2024. DOI: 10.17058/redes.v29i1.19566. Disponível em: https://seer.unisc.br/index.php/redes/article/view/19566. Acesso em: 30 mar. 2026.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

RENNÓ, C. D.; NOBRE, A. D.; CUARTAS, L. A.; SOARES, J. V.; HODNETT, M. G.; TOMASELLA, J.; WATERLOO, M. J. HAND, a new terrain descriptor using SRTM-DEM: mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. **Remote Sensing of Environment**, v. 112, n. 9, p. 3469–3481, 2008. DOI: https://doi.org/10.1016/j.rse.2008.03.018.

SCHIER, D. T. **Avaliação do índice topográfico de umidade para detecção de zonas urbanas inundáveis.** 2020. 122 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2020. Disponível em: https://www.udesc.br/arquivos/cav/id_cpmenu/2789/disserta__ofinal_Daiane_Teixeira_Schier_16352612865948_2789.pdf. Acesso em: 30 mar. 2026.

SILVA, R. G. P. da; LIMA, C. L.; SAITO, C. H.. Urban green spaces and social vulnerability in Brazilian metropolitan regions: towards environmental justice. **Land Use Policy**, v. 129, p. 106638, 2023. DOI: https://doi.org/10.1016/j.landusepol.2023.106638.

SILVEIRA, G. B.; RIBEIRO RODRIGUES, L. H.; DORNELLES, F. Nature-based solutions (NbS) for urban drainage: a review focused on sustainable stormwater management. **Urban Water Journal**, v. 22, n. 6, p. 627–641, 2025. DOI: https://doi.org/10.1080/1573062X.2025.2494784.

SØRENSEN, R.; SEIBERT, J.; BEVEN, K. Topographic wetness index: a review of its use and modifications in hydrology and geomorphology. **Earth Science Reviews**, v. 181, p. 36-61, 2018.

SUN, X.; XIANG, Y. Comparison of transfer function models for well-aquifer system response to atmospheric loading. **Journal of Hydrology**, v. 590, p. 125494, 2020. DOI: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125494.

TENG, H.; TAN, W.; LE, Q. Application of HAND model in identifying flood-prone areas in urban landscapes. **Journal of Hydrology**, v. 595, p. 125989, 2021.

TOMINAGA, L.; SANTORO, J.; AMARAL, R. **Desastres naturais: conhecer para prevenir.** São Paulo:Instituto Geológico, 2009. – 196 p. Disponível em: https://repositorio.cetesb.sp.gov.br/items/2a0abc86-726a-4ca7-8849-78fb004c14de. Acesso em: 15 abr. 2025

TUCCI, C. E. M. ***Inundações urbanas*.** 2014.

UNDRR. Living with Risk: A global review of disaster reduction initiatives. United Nations Office for Disaster Risk Reduction, Genebra, 2015. Disponível em: https://www.undrr.org/publication/living-risk-global-review-disaster-reduction-initiatives. Acesso em: 12 jan. 2026.

VOJINOVIĆ, Z. Flood risk and social justice: from quantitative to qualitative flood risk assessment and mitigation. London: IWA Publishing, 2012. DOI: https://doi.org/10.2166/9781780400822.

VOUSDOKAS, M.; MENTASCHI, L.; VOUKOUVALAS, E.; BIANCHI, A.; DOTTORI, F.; FEYEN, L. Climatic and socioeconomic controls of future coastal flood risk in Europe. **Nature Climate Change**, v. 8, p. 776–780, 2018. DOI: https://doi.org/10.1038/s41558-018-0260-4.

WANG, Chunlin; SI, Jianhua; LI, Zhijun; ZHAO, Chunyan; JIA, Bing; CELESTIN, Sindikubwabo; HE, Xiaohui; ZHOU, Dongmeng; QIN, Jie; ZHU, Xinglin. Evaluation of three gridded potential evapotranspiration datasets for streamflow simulation in three inland river basins in the arid Hexi

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.

Corridor, Northwest China. **Environmental Challenges**, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100277.

WANG, X.; SONG, K.; WANG, Z.; LI, S.; ZHENG, M.; WEN, Z.; LIU, G. Are topsoil spectra or soil-environmental factors better indicators for discrimination of soil classes? **CATENA**, v. 218, p. 106580, 2022. DOI: https://doi.org/10.1016/j.catena.2022.106580.

WINTER, T. C. The concept of hydrologic landscapes. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 37, n. 2, p. 335–349, 2001. DOI: https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2001.tb00973.x.

ZHANG, X.; YU, B.; XIN, Z.; CONG, M.; ZHANG, C. . Spatial–temporal variations of river water quality under human-induced land use changes in large river basins. **Scientific Reports**, v. 15, p. 36955, 2025. DOI: https://doi.org/10.1038/s41598-025-20876-z.

Este artigo é publicado em acesso aberto (Open Access) sob a licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional (CC-BY), que permite uso, distribuição e reprodução irrestritos em qualquer meio, desde que o autor original e a fonte sejam creditados.