

Simulação de Cenários de Expansão Urbana e Avaliação da Exposição às Áreas Suscetíveis à Inundação na Bacia do Rio Paranapanema sob as Diretrizes do Plano Clima

Jaqueline Carolino Santos¹; Argemiro Teixeira Leite Filho¹; Javier Tomasella¹; Maria Clara Fava²; Anaí Floriano Vasconcelos²; Daniel Andrés Rodriguez³; Minella Alves Martins¹; Erica Canamary Accioli¹; Sara Bastos de Oliveira¹

RESUMO

Nas últimas décadas, a expansão urbana desordenada tem intensificado a ocupação de áreas ambientalmente frágeis e ampliado a exposição aos impactos de eventos climáticos extremos. O presente estudo analisou a dinâmica da expansão urbana da BRP e simulou cenários alinhados (APC) e não alinhados (IPC) às políticas de adaptação climática. A modelagem espacial foi realizada no software Dinamica EGO, utilizando variáveis biofísicas e socioeconômicas calibradas a partir da expansão urbana observada. A suscetibilidade à inundação foi estimada pelo modelo HAND, empregando limiares previamente estabelecidos para a bacia. Os mapas de suscetibilidade foram sobrepostos aos cenários simulados para quantificar a expansão urbana em áreas de altíssima suscetibilidade à inundação. Os resultados indicam crescimento urbano em todos os cenários, variando de 1.766,25 km² no cenário APC a 2.185,74 km² no cenário IPC em 2064. A área urbana inserida em zonas suscetíveis aumentou de 8,33 km² em 2024 para 8,74 km², 9,45 km² e 12,23 km² nos cenários APC, tendencial (TEND) e IPC, respectivamente. Esses resultados evidenciam o potencial das políticas de adaptação para reduzir a ocupação de áreas suscetíveis e subsidiar estratégias de planejamento urbano resiliente.

Palavras-Chave: expansão urbana; suscetibilidade à inundação; políticas de adaptação.

ABSTRACT– In recent decades, disorderly urban expansion has intensified the occupation of environmentally fragile areas and increased exposure to the impacts of extreme climate events. This study analyzed the dynamics of urban expansion within the BRP and simulated scenarios aligned (Climate Adaptation Policy - APC) and unaligned (Climate Inaction Policy - IPC) with climate adaptation policies. Spatial modeling was performed using Dinamica EGO software, utilizing biophysical and socioeconomic variables calibrated based on observed urban expansion. Flood susceptibility was estimated using the HAND model, employing previously established thresholds for the basin. The susceptibility maps were overlaid onto the simulated scenarios to quantify urban expansion within areas of extremely high flood susceptibility. The results indicate urban growth across all scenarios, ranging from 1,766.25 km² under the APC scenario to 2,185.74 km² under the IPC scenario by 2064. Furthermore, the urban area located within susceptible zones increased from 8.33 km² in 2024 to 8.74 km², 9.45 km², and 12.23 km² in the APC, trend (TEND), and IPC scenarios, respectively. These findings highlight the potential of adaptation policies to curb the occupation of susceptible areas and support resilient urban planning strategies.

Key-words: urban expansion; flood susceptibility; adaptation policies.

1) Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, Avenida dos Astronautas, 1.758, Jardim da Granja, São José dos Campos, SP, Brasil.

2) Universidade Federal de São Carlos, Rodovia Washington Luís, km 235 - SP-310, São Carlos, SP, Brasil.

3) Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rua Antônio Barros de Castro, 119, Cidade Universitária, Rio de Janeiro, RJ, Brasil.

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, a expansão urbana no Brasil tem sido marcada por um crescimento acelerado e frequentemente desordenado, concentrando-se em áreas periféricas e regiões de vulnerabilidade socioambiental (SETO et al., 2012). Esse fenômeno, impulsionado pela migração rural-urbana, pela especulação imobiliária e por lacunas no planejamento territorial, aprofunda desigualdades socioespaciais e eleva a exposição das populações a eventos climáticos extremos (IPCC, 2022; UN-HABITAT, 2024).

Nesse contexto, as cidades médias emergem como polos estratégicos de reestruturação demográfica, exigindo estratégias de adaptação alinhadas ao Objetivo de Desenvolvimento Sustentável 11 (Cidades e Comunidades Sustentáveis) (ONU, 2015). Contudo, a persistência de ocupações em áreas de risco amplia a severidade de enchentes e deslizamentos, demandando respostas que integrem mitigação e adaptação de forma indissociável (NETO et al., 2025).

A Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema (BRP) reflete essa complexidade, abrangendo 247 municípios entre São Paulo e Paraná, com papel decisivo na segurança energética e alimentar do país (CBH Paranapanema, 2026). A dinâmica territorial da BRP é fortemente moldada pela coexistência entre a urbanização e atividades agroindustriais de grande escala — como a produção de cana-de-açúcar, soja, milho e papel e celulose. Essa interação constante tem gerado transformações profundas no uso e cobertura da terra, impactando diretamente a resiliência dos sistemas hídricos e ambientais frente às pressões climáticas contemporâneas (ANA, 2024).

No que tange aos riscos, a bacia possui um histórico recorrente de inundações severas, especialmente em baixos cursos e várzeas ocupadas irregularmente (MÉNDEZ VALLEJO, 2024). A ocupação desordenada, muitas vezes fruto de pressões do mercado imobiliário em zonas de fragilidade, agrava os impactos socioeconômicos ao aumentar a exposição de infraestruturas críticas (MAIOR; CÂNDIDO, 2014). Tais evidências reforçam a urgência de análises integradas que conectem os processos de urbanização aos riscos de desastres hidrológicos na região.

Como resposta institucional, o Brasil instituiu arcabouços como o Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima (PNA) e o Plano Clima, que buscam fomentar a resiliência setorial (BRASIL, 2009; BRASIL, 2016). Embora essas políticas reconheçam a necessidade de articulação multiescalar, sua implementação prática ainda esbarra na escassez de dados espacializados e na dificuldade de incorporar cenários de longo prazo à gestão territorial imediata (MILHORANCE et al., 2019).

Essa dificuldade de operacionalização aponta para uma lacuna científica crítica, enquanto modelos de expansão urbana tradicionais focam majoritariamente em trajetórias tendenciais

(VERBURG et al., 2015), ainda há carência de abordagens que integrem simulações espaciais a riscos de desastres e cenários climáticos em escala de bacia hidrográfica. A ausência dessas ferramentas limita a eficácia de políticas públicas, dificultando a identificação de áreas prioritárias para intervenções de adaptação (SEZINI; DIAS, 2025).

Diante do exposto, O presente estudo tem como objetivo analisar a dinâmica da expansão urbana na BRP e simular cenários de ocupação territorial alinhados ou não às diretrizes do Plano Clima. Adicionalmente, busca avaliar a exposição da expansão urbana em áreas suscetíveis à inundação, por meio da integração entre o modelo de expansão urbana Dinamica EGO e o mapeamento de suscetibilidade obtido pelo modelo HAND.

2. METODOLOGIA

2.1. Área de Estudos

A BRP (Figura1) abrange cerca de 106,5 mil km² nos estados de São Paulo e Paraná, sendo uma unidade estratégica da Região Hidrográfica do Paraná com população superior a 4,7 milhões de habitantes. O rio principal, com 930 km de extensão e desnível de 900 m, apresenta um fluxo regulado por um sistema de 13 usinas hidrelétricas em cascata, além de PCHs e CGHs, desempenhando papel central na segurança energética nacional (PIRH Paranapanema, 2016; CBH Paranapanema, 2026).

Essa configuração hídrica sustenta múltiplos usos consuntivos e não consuntivos, incluindo o abastecimento de importantes polos urbanos regionais como Londrina, Maringá e Presidente

Prudente, além de atividades de piscicultura e turismo (PIRH Paranapanema, 2016; CBH Paranapanema, 2026).

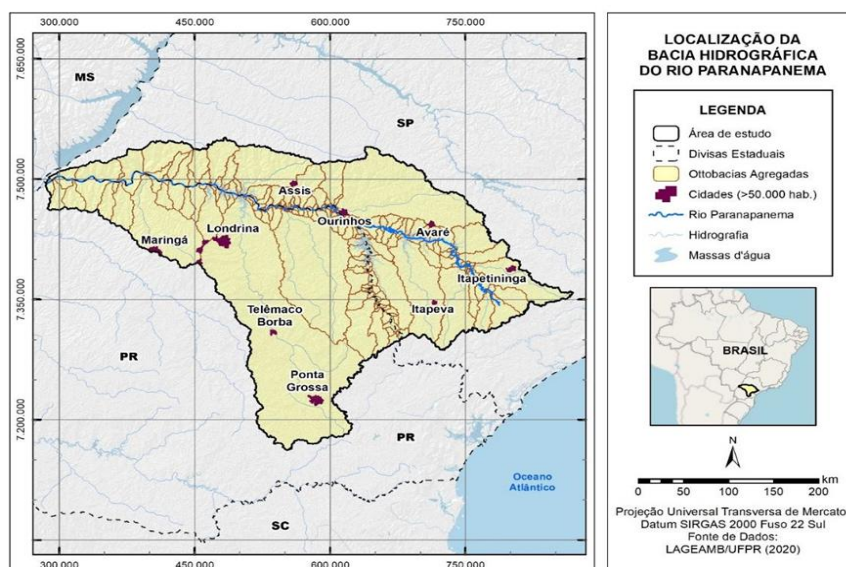


Figura 1 - Localização da Bacia Hidrográfica do rio Paranapanema. Fonte: LAGEAMB/ UFPR (2020).

A BRP está inserida nos biomas Mata Atlântica (76%) e Cerrado (24%), o clima da região é classificado como Cfa (Köppen e Geiger), com temperatura média anual de 20,2°C e precipitação média anual de aproximadamente 1.324 mm, variando de 1.300 mm a leste e noroeste até 1.800 mm na porção centro-sul (CBH-ALPA, 2014). As temperaturas médias anuais diminuem com o aumento da latitude e da continentalidade, sendo inferiores a 18°C no sul e sudeste e superiores a 21°C no norte e noroeste. Cabe destacar que a bacia pode apresentar períodos significativamente mais secos ou úmidos em decorrência da ocorrência intensificada dos fenômenos El Niño e La Niña (PIRH Paranapanema, 2016; CBH Paranapanema, 2026).

2.2. Levantamento de Dados

Os dados utilizados para a modelagem da expansão urbana foram selecionados com base em variáveis biofísicas e socioeconômicas relevantes ao processo de ocupação do território. As variáveis biofísicas incluem altitude, declividade, distância a infraestruturas (rodovias, ferrovias, usinas, áreas urbanas, unidades de conservação e terras indígenas), hidrografia e uso e cobertura da terra, obtidas de bases como ANADEM, ANA, SICAR/DATAGEO e MapBiomas. As variáveis socioeconômicas incluem população, renda, acesso a água, esgotamento sanitário e coleta de resíduos, provenientes do IBGE, além de infraestrutura de serviços (energia, telecomunicações, saúde e educação). Os dados foram padronizados, reprojatados para o mesmo sistema de referência espacial, reamostrados para

resolução comum de 30 x 30m e transformados em variáveis explicativas de distâncias contínuas, adequadas à modelagem espacial.

Os dados topográficos foram obtidos a partir do Modelo Digital de Elevação do projeto ANADEM, desenvolvido pela Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico, que disponibiliza informações altimétricas consistentes para análises hidrológicas em escala nacional. E ainda, os limiares adotados na elaboração do mapa de suscetibilidade foram obtidos a partir do estudo de Vasconcelos, et al. (2025).

2.3. Modelo de Expansão Urbana

A modelagem da expansão urbana foi realizada utilizando o software Dinamica EGO, baseado em autômatos celulares e alocação espacial probabilística. O modelo simula mudanças no uso e cobertura da terra a partir da relação entre variáveis explicativas e padrões históricos de expansão urbana. A calibração foi realizada com base em mapas de uso e cobertura da terra de 2000 a 2020, extraindo taxas de transição e coeficientes de ponderação para cada variável analisada, bem como a validação considerou o período de 2021 a 2024. A simulação foi executada anualmente até o horizonte de 2064, aplicando o método de expansão celular com alocação espacial controlada por funções de pesos de evidência (weights of evidence) obtidos por meio de cada variável explicativa analisada (OLIVEIRA et al., 2021).

2.3. Cenários de Expansão Urbana

2.3.1 Cenário tendencial (TDC)

Simulou a continuidade das dinâmicas atuais de expansão urbana, mantendo as tendências históricas de ocupação do território e a influência das variáveis explicativas calibradas.

2.4.2 Cenário de adequação às diretrizes do Plano Clima (APC)

Considerou a implementação de políticas públicas de ordenamento territorial e adaptação climática previstas no Plano Clima com restrições à ocupação de áreas de risco e incentivo à expansão urbana planejada.

2.4.3 Cenário de inadequação às diretrizes do Plano Clima (IPC)

Assumiu a ausência ou fragilidade de políticas públicas, resultando na intensificação da ocupação desordenada, expansão em áreas ambientalmente sensíveis e aumento da vulnerabilidade socioambiental.

2.5. Suscetibilidade a Inundações

A suscetibilidade a inundações foi estimada por meio do modelo HAND (Height Above the Nearest Drainage), que se baseia na diferença altimétrica entre cada ponto do terreno e o nível da drenagem mais próxima, permitindo identificar áreas potencialmente sujeitas à inundação em função da elevação relativa do terreno em relação à rede de drenagem (NOBRE et al., 2011; CUARTAS et al., 2012). A aplicação do modelo utilizou como base registros históricos de cotas de inundação observadas na área de estudo (VASCONCELOS et. al, 2025), em que o limiar entre 0.59m e 2.38m foi considerado de altíssima suscetibilidade a inundação. A partir dessa validação, foi possível avaliar a exposição ao risco de inundação com base nos cenários de expansão urbana (ZAMBRANO-BIGIARINI, 2017).

2.6 Avaliação da expansão urbana em áreas suscetíveis à inundação

Os mapas simulados de expansão urbana para os APC, TEND e IPC foram sobrepostos ao mapa de suscetibilidade, permitindo quantificar a área urbana localizada em regiões classificadas como de altíssima suscetibilidade à inundação. A comparação entre os diferentes cenários permitiu avaliar o efeito potencial da adoção das diretrizes do Plano Clima sobre a ocupação futura dessas áreas.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As simulações realizadas no Dinamica EGO evidenciaram que a expansão urbana continuará ocorrendo na BRP até 2064 em todos os cenários avaliados, embora com intensidades distintas em função do grau de implementação das diretrizes do Plano Clima. A Figura 2 apresenta a distribuição

espacial das áreas urbanizadas observadas em 2024, bem como as projeções para os cenários APC, TEND e IPC, juntamente com o mapa de áreas suscetíveis à inundação obtido pelo modelo HAND.

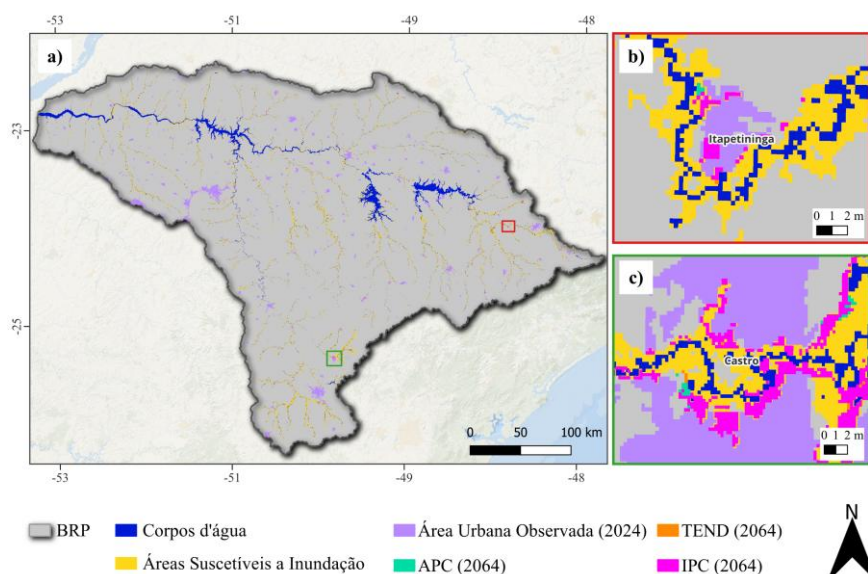


Figura 2 – Mapa de suscetibilidade à inundação (HAND) e cenários de expansão urbana para 2024 e 2064

A modelagem espacial indica que a área urbana da BRP, atualmente estimada em 1.384,46 km², poderá atingir 1.766,25 km² no cenário APC, 2.097,02 km² no cenário TEND e 2.185,74 km² no cenário IPC até 2064, correspondendo a incrementos de 27,58%, 51,47% e 57,88%, respectivamente (Tabela 1). Esses resultados evidenciam que a adoção de políticas públicas voltadas ao ordenamento territorial e à adaptação climática pode reduzir significativamente o ritmo de expansão urbana horizontal, corroborando estudos que destacam a influência das políticas de uso do solo sobre a dinâmica da urbanização (SETO; GÜNERALP; HUTYRA, 2012; VERBURG et al., 2015).

Tabela 1 - Projeção da área urbana total da BRP por cenário (2024-2064)

Área Urbana (km ²)	2024 (Observado)	2044	2064	Aumento (%) 2024 – 2064
APC	1384.46	1575.26	1766.25	27.58
TEND	1384.46	1740.74	2097.02	51.47
IPC	1384.46	1785.19	2185.74	57.88

O cruzamento entre os cenários de expansão urbana e o mapa de suscetibilidade revelou diferenças expressivas na ocupação futura de áreas classificadas como altíssima suscetibilidade à inundação (Figura 2 e Tabela 2). Em 2000, a área urbana localizada nessas classes correspondia a 5,68 km², aumentando para 8,33 km² em 2024, o que representa um crescimento aproximado de

46,8% em pouco mais de duas décadas. Esse resultado demonstra que o processo histórico de urbanização da BRP ocorreu, em parte, sobre áreas naturalmente mais suscetíveis à ocorrência de inundações.

Tabela 2 - Área urbana localizada em zonas suscetíveis a inundação na BRP.

Área suscetível a inundação (km ²)	2000	2024	2064	Aumento (%)
OBSERVADO	5.68	8.33	-	46.76 *
APC	-	-	8.74	4.90 **
TEND	-	-	9.45	13.42 **
IPC	-	-	12.23	46.78 **

* Ano Base Comparação: 2000

** Ano Base Comparação: 2024

As projeções para 2064 indicam que a continuidade desse processo dependerá diretamente da efetividade das políticas de adaptação territorial. No cenário APC, a área urbana inserida em zonas suscetíveis aumenta apenas para 8,74 km², correspondendo a um acréscimo de 4,9% em relação a 2024. Em contrapartida, o cenário TEND apresenta expansão para 9,45 km² (13,42%), enquanto o cenário IPC atinge 12,23 km², representando um aumento de aproximadamente 46,8% no mesmo período. Esses resultados sugerem que políticas de controle da ocupação em áreas ambientalmente frágeis podem reduzir consideravelmente a exposição futura da urbanização às inundações.

A análise espacial evidencia ainda que as maiores diferenças entre os cenários concentram-se nas proximidades da rede hidrográfica principal e das planícies aluviais, especialmente em municípios que apresentam expansão urbana acelerada, como ilustrado pelos detalhes apresentados na Figura 2. Nessas regiões, observa-se que a ausência de restrições territoriais favorece a ocupação de áreas de baixa altitude relativa, aumentando o potencial de conflitos entre a urbanização e a dinâmica natural das inundações. Em contraste, o cenário APC restringe a expansão nessas áreas, direcionando o crescimento para setores menos suscetíveis.

Esses resultados estão em consonância com o Sexto Relatório de Avaliação do IPCC (IPCC, 2022), que destaca a necessidade de incorporar critérios de adaptação climática ao planejamento urbano como estratégia para reduzir perdas associadas aos eventos extremos. Da mesma forma, o Plano Clima brasileiro enfatiza que instrumentos de planejamento territorial constituem um dos principais mecanismos para aumentar a resiliência das cidades frente às mudanças climáticas (BRASIL, 2024). Embora o modelo HAND represente apenas a suscetibilidade topográfica à inundação, sua integração com cenários de expansão urbana mostrou-se uma abordagem eficiente

para identificar áreas prioritárias para o planejamento preventivo e para subsidiar políticas públicas de mitigação e adaptação em escala de bacia hidrográfica.

Em conjunto, os resultados demonstram que diferentes estratégias de desenvolvimento urbano produzem impactos significativamente distintos sobre a ocupação de áreas suscetíveis à inundação. Enquanto o cenário IPC praticamente duplica a taxa histórica de crescimento da exposição observada entre 2000 e 2024, o cenário APC mantém esse incremento em níveis reduzidos, reforçando a importância da implementação efetiva das diretrizes do Plano Clima para minimizar a ocupação futura de áreas ambientalmente vulneráveis.

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A modelagem espacial demonstrou que a implementação de políticas de adaptação influencia diretamente a dinâmica da expansão urbana e a ocupação de áreas suscetíveis à inundação na BRP. Embora todos os cenários indiquem crescimento urbano até 2064, o cenário APC apresentou o menor incremento da ocupação em áreas suscetíveis (4,90%), enquanto o cenário IPC registrou o maior incremento (46,78%). Vale ressaltar que o crescimento da área urbana, por si só, não representa necessariamente aumento proporcional da exposição aos eventos hidrológicos extremos, há outros fatores a serem considerados em uma avaliação mais aprofundada. No entanto, em uma avaliação menos complexa, os resultados evidenciam o potencial da integração entre o Dinamica EGO e o modelo HAND como ferramenta de apoio ao planejamento territorial e à implementação de estratégias de adaptação às mudanças climáticas previstas no Plano Clima.

REFERÊNCIAS

ANA – AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS E SANEAMENTO BÁSICO. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil 2024**. Brasília: ANA, 2024.

BRASIL. **Política Nacional sobre Mudança do Clima**. Lei nº 12.187, de 29 de dezembro de 2009.

BRASIL. **Plano Nacional de Adaptação à Mudança do Clima**. Brasília, 2016.

CBH PARANAPANEMA. **6º Relatório de Avaliação da Implementação do Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Paranapanema**. Marília, SP, 2026. Disponível em: <https://www.paranapanema.org/wp-content/uploads/2026/03/2025-Relatorio-de-Avaliacao-da-Implementacao-do-PIRH-Paranapanema.pdf>. Acesso em: 05 abr. 2026.

CUARTAS, Luz Adriana et al. Distributed hydrological modeling of a micro-scale rainforest watershed in Amazonia: Model evaluation and advances in calibration using the new HAND terrain model. **Journal of Hydrology**, v. 462, p. 15-27, 2012.

IPCC – INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE. **Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability**. Cambridge: Cambridge University Press, 2022.

LAGEAMB, UFPR, 2020. Localização da Bacia Hidrográfica do rio Paranapanema. Disponível em: <https://lageamb.ufpr.br/?s=PARANAPANEMA>. Acesso em: 06 ago. 2025.

MAIOR, Mônica Maria Souto; CÂNDIDO, Gesinaldo Ataíde. Avaliação das metodologias brasileiras de vulnerabilidade socioambiental como decorrência da problemática urbana no Brasil. *Cadernos Metrópole*, v. 16, n. 31, p. 241-264, 2014.

MAPBIOMAS. Projeto MapBiomias – Coleção 2022 da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso de Solo do Brasil 2021. Disponível em: <https://mapbiomas.org/visao-geral-da-metodologia>. Acesso em: 10 ago. 2025.

MÉNDEZ VALLEJO, Carlos Andrés. Modelagem e prognóstico hidrológico de fenômenos hidrometeorológicos na bacia hidrográfica do rio Paranapanema, Brasil. [S.l.]: Universidade Estadual Paulista (Unesp), 21 out. 2024.

MILHORANCE, Carolina et al. O desafio da integração de políticas públicas para a adaptação às mudanças climáticas no semiárido brasileiro. *Revista Brasileira de Climatologia*, v.24, p. 175 – 195, 2019.

NETO, João Batista Ferreira et al. Impact of April and May, 2024 extreme precipitation on flooding in Rio Grande do Sul, Brazil. *Urban Climate*, v. 61, p. 102487, 2025.

NOBRE, Antonio Donato et al. Height Above the Nearest Drainage—a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*, v. 404, n. 1-2, p. 13-29, 2011.

OLIVEIRA, Laís Marques de et al. Modelagem dinâmica da expansão urbana usando autômatos celulares: o caso de Fortaleza-CE. *urbe. Revista Brasileira de Gestão Urbana*, v. 13, p. e20200092, 2021.

ONU. **Transformando nosso mundo: a Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. Nova York, 2015. Disponível em: https://www.mds.gov.br/webarquivos/publicacao/Brasil_Amigo_Pesso_Idosa/Agenda2030.pdf. Acesso em: 02 abr. 2026.

PIRH-PARANAPANEMA. **Plano Integrado de Recursos Hídricos do Rio Paranapanema**. 2016. Disponível em: <https://www.paranapanema.org/plano-de-bacia/>. Acesso em: 26 ago. 2025.

SETO, Karen C.; GÜNERALP, Burak; HUTYRA, Lucy R. Global forecasts of urban expansion to 2030 and direct impacts on biodiversity and carbon pools. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, v. 109, n. 40, p. 16083-16088, 2012.

SEZINI, Liliane Bernardo; DIAS, Fernanda Moura Vargas. CIDADES INTELIGENTES E RESILIÊNCIA URBANA: PREPARANDO-SE PARA O FUTURO DAS MUDANÇAS CLIMÁTICAS. *Aracê*, v. 7, n. 3, p. 13291-13310, 2025.

UN-HABITAT. **World cities report 2024: Cities and climate action**. Stylus Publishing, LLC, 2024.

VASCONCELOS, A.F., et al., 2025 Contribuições da ciência cidadã para o gerenciamento de riscos de inundações: o caso de Campina do Monte Alegre – SP, Brasil. In: Raquel Dezidério Souto, Org.. Estudos de caso em mapeamento colaborativo. Rio de Janeiro: **IVIDES.org**, 303–334. doi:10.5281/zenodo.16808938

VERBURG, Peter H. et al. Land system science and sustainable development of the earth system: A global land project perspective. *Anthropocene*, v. 12, p. 29-41, 2015.

ZAMBRANO-BIGIARINI, Mauricio. Goodness-of-fit functions for comparison of simulated and observed hydrological time series. **R Package Version 0.3-8**, 2017.