

APLICAÇÕES HIDROLÓGICAS PARA PREVISÃO DE VAZÕES EXTREMAS NA BACIA DO RIO ÁGUA FRIA, FORTALEZA-CE

Yasmin Cavalcante Winck do Amaral ¹

Davi Rodrigues Rabelo ²

Mariana Silva Feijó ³

RESUMO

O crescimento urbano acelerado e desordenado em Fortaleza (CE) tem intensificado os impactos sobre os sistemas naturais, especialmente no aumento das inundações urbanas. A bacia hidrográfica do rio Água Fria, localizada em área densamente urbanizada da cidade, apresenta alta vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos, em função de sua baixa declividade (0,2%), elevada taxa de impermeabilização e ocupação em áreas de risco. Este estudo tem como objetivo analisar a resposta hidrológica da bacia frente a chuvas intensas, a partir de parâmetros como precipitação diária total, tempo de concentração, vazão de pico e volume de escoamento. A metodologia baseou-se na aplicação de equações de intensidade-duração-frequência (IDF), associadas ao tempo de concentração (1,02 h) e ao uso de dados pluviométricos do posto Fund. Ma. Nilva – Água Fria (ID:311), da FUNCEME. Os resultados indicam uma precipitação máxima diária média de 170 mm, com tempo de retorno de 27 anos, intensidade corrigida de 824,16 mm/h (classificada como “chuva violenta” pela OMM, 2008), vazão de pico de 1.652,43 m³/s e volume escoado de 1.231.392 m³. Esses valores revelam um comportamento típico de bacias urbanas, com rápida resposta aos eventos extremos e risco elevado de inundações repentinas. A comparação com outras bacias da Região Metropolitana de Fortaleza, como a do rio Coaçu, evidencia a recorrência de um modelo de urbanização que ignora as limitações ambientais, agravando os processos de impermeabilização e vulnerabilidade hídrica. O estudo reforça a importância da integração entre análise geoambiental e parâmetros hidrológicos no planejamento urbano e na gestão de riscos, apontando para a urgência de medidas que promovam maior resiliência frente aos extremos climáticos em áreas urbanizadas.

Palavras-Chave: Análise hidrológica, Bacia hidrográfica, Eventos extremos, Urbanização.

INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas, o mundo testemunhou uma rápida e intensa urbanização, fenômeno que tem reconfigurado paisagens, modos de vida e, sobretudo, os padrões de uso e ocupação do solo (Santos et al, 2017). De acordo com projeções internacionais, mais de dois terços da população global estará concentrada em áreas urbanas até meados do século XXI, o que traz à tona uma série de desafios socioambientais

¹ Graduanda do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Ceará - UECE, yasmin.winck@aluno.uece.br ;

² Professor orientador: Dr. Davi Rodrigues Rabelo, Universidade Estadual do Ceará - UECE, rodrigues.rabelo@uece.br.

³ Graduanda do Curso de Geografia da Universidade Estadual do Ceará - UECE, mariana.feijo@aluno.uece.br ;



(UN-Habitat, 2022). No Brasil, esse processo foi ainda mais acelerado, com uma urbanização muitas vezes desprovida de planejamento adequado, especialmente nas grandes cidades e capitais estaduais, onde o crescimento urbano se deu de forma concentrada e desigual.

As capitais brasileiras, como Fortaleza, configuram-se hoje como espaços marcados por intensas transformações no território, nas quais a expansão urbana se sobrepôs, em muitos casos, à capacidade de suporte dos sistemas naturais (Rodrigues; Silva, 2019). Um dos reflexos mais evidentes dessa lógica de crescimento é o comprometimento das bacias hidrográficas urbanas, que passaram a desempenhar um papel secundário frente aos interesses do capital imobiliário e da infraestrutura urbana, assim, as consequências são múltiplas: impermeabilização dos solos, obstrução de canais, degradação ambiental e, sobretudo, o agravamento dos eventos hidrológicos extremos, como enchentes e inundações (Girão et al, 2018).

Diante desse cenário, o estudo de bacias hidrográficas inseridas em áreas urbanas adquire centralidade nas agendas científicas e de planejamento, tais bacias constituem unidades fundamentais para a compreensão da dinâmica hidrológica urbana, oferecendo subsídios técnicos e conceituais para a formulação de políticas públicas voltadas à mitigação de riscos e à promoção de cidades mais resilientes. Portanto, compreender os padrões de vazão, identificar áreas críticas e propor medidas de controle de escoamento são ações que se tornam cada vez mais urgentes em face da intensificação dos eventos extremos, potencializados pelas mudanças climáticas e pela ação antrópica (Martins; Souza, 2021).

É nesse contexto que se insere a Bacia Hidrográfica do Rio Água Fria, localizada na porção oeste da cidade de Fortaleza, trata-se de uma bacia intensamente urbanizada, marcada por uma ocupação desordenada e pela escassez de infraestrutura adequada de drenagem (Silva; Almeida, 2022). A região apresenta histórico recorrente de alagamentos, o que revela não apenas a fragilidade dos sistemas de contenção existentes, mas também a carência de estudos técnicos voltados à sua dinâmica hidrológica, assim, a análise dessa bacia torna-se estratégica tanto para a compreensão das especificidades locais quanto para a construção de modelos preditivos que possam ser aplicados em contextos semelhantes.

Diante do exposto, o presente trabalho tem como objetivo aplicar métodos hidrológicos para a previsão de vazões extremas na bacia do rio Água Fria, em

Fortaleza-CE, buscando compreender os padrões de escoamento superficial em cenários de precipitação intensa.

METODOLOGIA

A bacia do rio Água Fria (Figura 1) se localiza na cidade de Fortaleza, capital do Estado do Ceará, e é uma das várias microbacias que existem dentro da Região Metropolitana, que é intensamente urbanizada. Abrangendo uma área de 9,052 km² e tendo um curso d'água principal de 5,68km de extensão, essa bacia, apesar de sua pequena dimensão, desempenha um papel importante na dinâmica urbana da capital cearense.

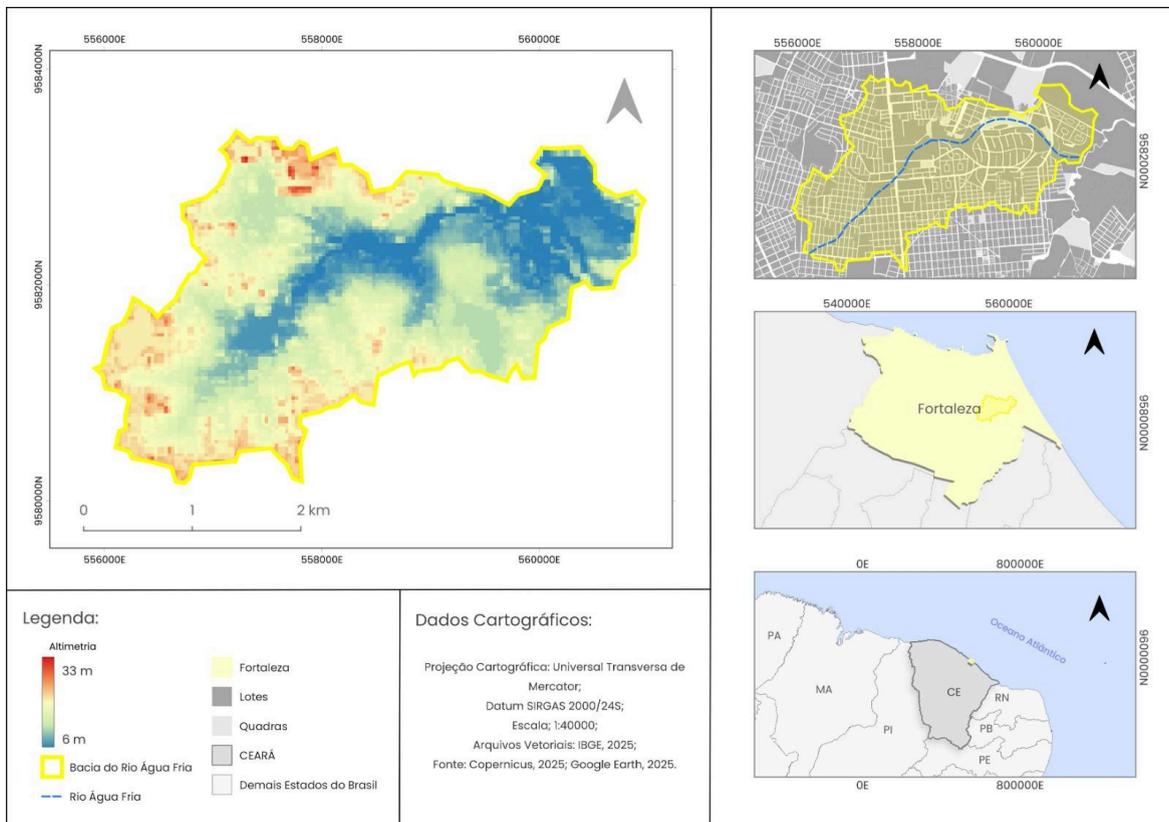


Figura 1 - Mapa de Localização da Bacia do Rio Água Fria
Fonte: Elaborado pelos autores

Sob a perspectiva fisiográfica, o rio principal exibe uma declividade média baixa de 0,2%, o que, combinado com um intenso processo de impermeabilização do solo, prejudica consideravelmente a capacidade de drenagem superficial natural. A limitada capacidade de infiltração, resultante da conversão de áreas verdes em superfícies impermeáveis, confere à bacia um padrão hidrológico caracteristicamente urbano,



marcado por um tempo de resposta rápido e uma alta vulnerabilidade a inundações em situações de chuvas intensas (Costa; Pereira, 2023).

Localizada numa região de topografia predominantemente plana a levemente ondulada, apesar de favorecer a urbanização, complica o fluxo das águas pluviais, principalmente em períodos de grande precipitação, dessa forma, essa circunstância é intensificada pela substituição quase completa da vegetação original por superfícies impermeáveis, consequência de um processo de urbanização acelerado e desordenado.

Além disso, o contexto urbano da bacia do rio Água Fria é caracterizado por um padrão de ocupação onde a falta de um planejamento territorial eficaz se reflete na construção de residências em áreas de risco, como nas margens de rios e em áreas suscetíveis a inundações, seguindo essa linha de pensamento, essa situação é ainda mais acentuada pela insuficiência de infraestrutura de drenagem adequada à alta densidade populacional, resultando em um aumento dos efeitos hidrológicos e ambientais adversos. Portanto, fica claro que a ocupação da bacia ignora os limites impostos pelo ambiente, afetando não apenas a viabilidade ambiental da região, mas também a segurança das populações mais vulneráveis.

Assim sendo, a presente investigação foi realizada a partir da delimitação da Bacia Hidrográfica do rio Água Fria, por meio de técnicas de geoprocessamento, utilizando como base o Modelo Digital de Elevação (MDE) do Copernicus DEM, com resolução espacial de 30 metros, amplamente reconhecido por sua precisão e atualmente considerado o melhor MDE global (Bielski et al, 2024). Esse processo foi conduzido no software ArcGIS, permitindo a extração de informações essenciais como a área da bacia e o comprimento do curso d'água principal. A aplicação de ferramentas de Sistemas de Informações Geográficas (SIG) viabilizou uma análise espacial detalhada da morfologia da bacia, essencial para a compreensão do seu comportamento hidrológico em contextos urbanos. Além disso, o levantamento de dados pluviométricos foi realizado a partir do posto Fund. Ma. Nilva – Água Fria (ID: 311), monitorado pela Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos (FUNCEME), a série de dados obtida a partir deste foi organizada em tabela com a chuva máxima anual em um recorte de 26 anos (1999 a 2024) e empregada nos cálculos hidrológicos, possibilitando a estimativa de parâmetros como precipitação total diária, tempo de retorno, intensidade de chuva e vazão de pico. Esses dados contribuíram significativamente para a avaliação da resposta hidrológica da



bacia frente a eventos extremos, destacando as vulnerabilidades impostas pela intensa urbanização.

A análise hidrológica da bacia fundamentou-se em quatro parâmetros principais: precipitação total diária, tempo de concentração, vazão de pico e volume escoado. A partir dos dados obtidos no posto pluviométrico analisado, constatou-se uma precipitação máxima diária média de 170 mm, associada a um tempo de retorno de 27 anos, o que indica a ocorrência de eventos extremos com baixa frequência, porém com elevado potencial de impacto. A duração da chuva considerada foi de 24 horas, enquanto o tempo de concentração estimado para a bacia foi de 1,02 horas, evidenciando uma resposta rápida do sistema hidrológico frente às precipitações intensas, característica comum em áreas urbanizadas e fortemente impermeabilizadas. Os procedimentos metodológicos adotados nesta etapa basearam-se em cálculos hidrológicos com ênfase na aplicação de equações de intensidade-duração-frequência (IDF) adaptadas à realidade urbana da bacia. Para estimar o tempo de concentração (T_c), parâmetro essencial para o dimensionamento da resposta hidrológica da bacia frente a eventos extremos, empregou-se a fórmula de Kirpich (1940) (equação 1):

$$T_c = 0,0195 \times L^{0,77} \times S^{-0,385} \quad (1)$$

Onde:

T_c = Tempo de Concentração (minutos)

L = Comprimento do rio (metros)

S = Declividade (em decimal, porcentagem \div 100)

Em seguida, a intensidade da chuva corrigida (i) foi estimada com base na precipitação máxima diária de 170mm, ajustada ao tempo de concentração calculado (CHOW, et al, 1988; TUCCI, 1998), o que permitiu obter uma intensidade significativa de 824,16 mm/h, a partir da equação 2:

$$i = P_{24h} \times \left(\frac{24}{\frac{T_c}{60}} \right)^{0,5} \quad (2)$$

Onde:

i = Intensidade da chuva corrigida (mm/h)

P_{24h} : Precipitação em 24 horas (mm)

De posse desses dados, procedeu-se ao cálculo da vazão de pico (Q) em m^3/s , utilizando o método racional (COGO, 2005), que considera a relação entre o coeficiente

de escoamento superficial (C), a intensidade da chuva (i) e a área da bacia (A), em hectares, de acordo com a equação 3:

$$Q = \frac{C \times i \times A}{360} \quad (3)$$

A combinação dessas técnicas e fórmulas clássicas, adaptadas ao contexto urbano, permitiu avaliar de forma integrada a dinâmica hidrológica da bacia, evidenciando sua vulnerabilidade a eventos pluviométricos intensos e de rápida resposta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise hidrológica da Bacia do Rio Água Fria, realizada a partir dos dados pluviométricos do posto Fund. Ma. Nilva – Água Fria (ID: 311), monitorado pela FUNCEME, revelou um quadro significativo sobre o comportamento hidrológico da bacia em resposta a eventos extremos de chuva. A precipitação máxima diária observada no período de 1999 a 2024 foi de 170 mm, associada a um tempo de retorno estimado em 27 anos (Figura 2), o que corresponde a uma probabilidade anual de ocorrência de 3,7%. Esse dado indica que, embora eventos dessa magnitude sejam relativamente raros, seu impacto potencial é elevado, exigindo atenção especial no planejamento urbano e na gestão de riscos.

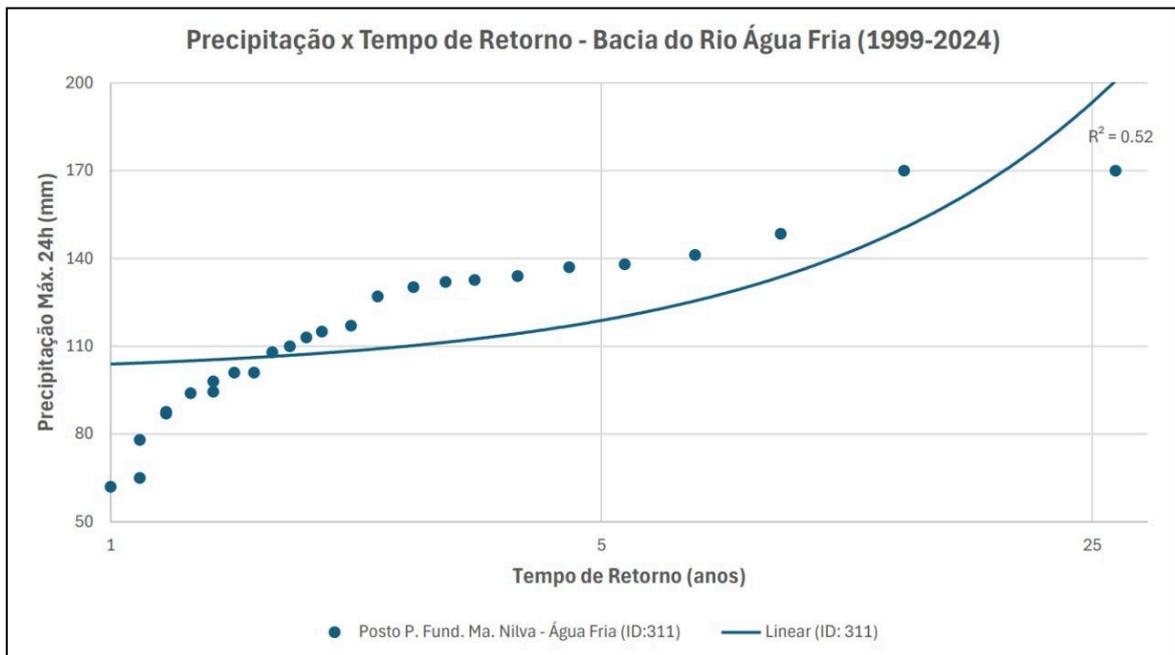


Figura 2 - Gráfico Precipitação Máxima x Tempo de Retorno
Fonte: Elaborado pelos autores



A partir desses dados, foi obtida uma intensidade corrigida de 824,16 mm/h, valor que pode ser classificado como “chuva violenta” conforme os critérios da Organização Meteorológica Mundial (OMM, 2008). Essa classificação reforça a severidade dos eventos pluviométricos que afetam a bacia, especialmente em um contexto urbano marcado pela elevada impermeabilização do solo.

A aplicação das equações hidrológicas adaptadas à realidade urbana da bacia permitiu calcular uma vazão de pico de 1.652,43 m³/s, esse valor representa um aumento expressivo de 11.486% em relação à vazão média estimada para a bacia, evidenciando a intensificação do escoamento superficial em condições de chuvas extremas. O volume total escoado foi estimado em 1.231.392 m³, volume que, apesar de não ser excepcional em termos absolutos, torna-se significativo devido à sua liberação em um curto intervalo de tempo, essa característica contribui diretamente para o agravamento do risco de inundações repentinas, fenômeno já recorrente na região.

A rápida resposta hidrológica da bacia, evidenciada pelo tempo de concentração estimado em 1,02 horas, é típica de áreas urbanizadas e fortemente impermeabilizadas, onde a capacidade de infiltração do solo é drasticamente reduzida. Essa condição, aliada à insuficiência da infraestrutura de drenagem existente, potencializa a ocorrência de alagamentos e enchentes, colocando em risco a segurança e o bem-estar da população local.

Em comparação, estudos realizados em outras bacias urbanas da região metropolitana de Fortaleza, como as bacias do Rio Cocó e do Rio Maranguapinho (Zanella et al, 2012; Juvenal, 2022), também apontam para um padrão hidrológico semelhante, com tempos de resposta rápidos e vazões de pico elevadas, resultado da expansão urbana desordenada e da impermeabilização crescente, tais trabalhos corroboram a vulnerabilidade da Bacia do Rio Água Fria e reforçam a necessidade de intervenções estruturais e não estruturais para a mitigação dos riscos associados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da análise realizada, torna-se evidente que os objetivos inicialmente propostos foram alcançados, ao passo que se obteve uma compreensão aprofundada da dinâmica hidrológica da Bacia do Rio Água Fria, especialmente no que se refere à sua resposta a eventos extremos em um cenário de intensa urbanização.



Os resultados apresentados ao longo do estudo apontam para desequilíbrios crescentes entre o ritmo da urbanização e a capacidade de resposta do sistema de drenagem urbana. O expressivo aumento da vazão de pico, aliado à intensidade das chuvas classificadas como “violentas”, revela a urgência de intervenções que vão além das soluções pontuais, logo, torna-se indispensável considerar estratégias que incluam a recuperação da permeabilidade dos solos urbanos, a requalificação da rede de drenagem e a formulação de políticas públicas integradas que articulem planejamento urbano, gestão ambiental e controle hidrológico.

A fragilidade da infraestrutura existente, somada ao avanço contínuo da impermeabilização do solo, expõe a bacia a uma condição de vulnerabilidade permanente frente às intensas precipitações, cuja tendência é de agravamento em função das mudanças climáticas, reforçando a necessidade de reverter a lógica tradicional de enfrentamento aos desastres urbanos, baseada na reação aos danos, e substituir por uma abordagem proativa, que incorpore previsibilidade, planejamento e resiliência territorial.

Neste sentido, os achados desta pesquisa contribuem de forma significativa não apenas para o campo acadêmico, ao oferecer parâmetros técnicos e metodológicos aplicáveis a outras bacias urbanas, mas também para o aprimoramento das práticas de gestão urbana.

Ademais, o trabalho evidencia a necessidade de ampliar os horizontes de investigação, uma vez que, pesquisas futuras podem aprofundar o estudo das interações entre urbanização, infraestrutura e clima, com vistas ao desenvolvimento de modelos preditivos mais robustos, bem como à proposição de soluções baseadas na natureza, que conciliam eficiência técnica e sustentabilidade ambiental.

Em suma, reafirma-se a relevância deste estudo nas complexas relações entre o meio urbano e os processos hidrológicos extremos, apontando caminhos concretos para a mitigação dos impactos das inundações em áreas urbanas vulneráveis e contribuindo, assim, para o fortalecimento de políticas públicas ambientalmente eficazes e socialmente justas.



REFERÊNCIAS

- BIELSKI, Conrad; LÓPEZ-VÁZQUEZ, Carlos; GROHMANN, Carlos H.; GUTH, Peter L.; HAWKER, Laurence; GESCH, Dean; TREVISANI, Sebastiano; HERRERA-CRUZ, Virginia; RIAZANOFF, Serge; CORSEAUX, Axel; REUTER, Hannes I.; STROBL, Peter. **Novel approach for ranking DEMs: Copernicus DEM improves one arc second open global topography**. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. -, p. 1-1, 2024.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. McGraw-Hill, 1988.
- COGO, N. P. **Hidrologia aplicada à conservação do solo. Erosão e Conservação do Solo (AGR 03006)**. 2005. 13f. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Departamento de Solos. Faculdade de Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS.
- COSTA, Lúcia M.; PEREIRA, Rafael S. Impactos da impermeabilização do solo na dinâmica hidrológica da Bacia do Rio Água Fria, Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, v. 28, n. 1, p. 45-60, 2023. Disponível em: <https://www.revistas.ufc.br/rbea/article/view/67890>. Acesso em: 25 maio 2025.
- GIRÃO, Ítalo Renan Ferreira; RABELO, Davi Rodrigues; ZANELLA, Maria Elisa. Análise teórica dos conceitos: riscos socioambientais, vulnerabilidade e suscetibilidade. **Revista Brasileira de Educação em Geografia – REGNE**, v. 4, n. esp., p. 72-84, 2018. Disponível em: <http://www.periodicos.ufrn.br/revistadoregne>. Acesso em: 26 maio 2025.
- JUVENAL, Pedro Henrique da Silva. **Exposição físico-ambiental à inundações: um estudo de caso na bacia hidrográfica do rio Maranguapinho, Fortaleza (CE), Brasil**. 2022. 104 f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Centro de Ciências Humanas, Letras e Artes, Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2022. Orientador: Prof. Dr. Lutiane Queiroz de Almeida.
- KIRPICH, T. P. Time of Concentration of Small Agricultural Watersheds. **Journal of Civil Engineering**, v. 10, n. 6, p. 362, 1940.
- MARTINS, Fábio R.; SOUZA, Ana L. S. Bacias hidrográficas urbanas: fundamentos para o planejamento e a gestão sustentável das cidades. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 26, e12, 2021. Disponível em: <https://www.scielo.br/j/rbrh/a/xyz123abc456/?lang=pt>. Acesso em: 25 maio 2025.



15º SIMPÓSIO NACIONAL DE
GEOMORFOLOGIA

Organização Meteorológica Mundial. **Guide to Meteorological Instruments and Methods of Observation – (WMO-No. 8)**. Genebra: Organização Meteorológica Mundial, 2008. p. I.14–9. ISBN 978-92-63-10008-5.

RODRIGUES, M. C.; SILVA, R. A. Desafios do planejamento urbano na expansão das cidades: entre o crescimento e a sustentabilidade. **URBE – Revista Brasileira de Gestão Urbana**, 2019. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/urbe/a/55dJtxNQzWQggjYmJSbKf5F/>. Acesso em: 25 maio 2025.

SANTOS, Karla Azevedo; RUFINO, Iana Alexandra Alves; BARROS FILHO, Mauro Normando Macêdo. **Impactos da ocupação urbana na permeabilidade do solo: o caso de uma área de urbanização consolidada em Campina Grande-PB**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 22, n. 5, p. 943-952, 2017.

SILVA, João Carlos da; ALMEIDA, Mariana F. Análise da dinâmica hidrológica e dos impactos da urbanização na Bacia do Rio Água Fria, Fortaleza-CE. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 14, n. 3, p. 1025-1040, 2022. Disponível em:
<https://periodicos.ufc.br/rbgf/article/view/12345>. Acesso em: 25 maio 2025.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS Editora, 1998. UNITED NATIONS HUMAN SETTLEMENTS PROGRAMME (UN-HABITAT). **World Cities Report 2022: Envisaging the Future of Cities**. Nairobi: UN-Habitat, 2022. Disponível em:
https://ppl-ai-file-upload.s3.amazonaws.com/web/direct-files/attachments/71676178/49d88007-1b9f-46c1-9d93-e3b7c6f5a34d/wcr_2022.pdf. Acesso em: 25 maio 2025.

ZANELLA, Maria Elisa; OLÍMPIO, João Luís; COSTA, Maria Clélia Lustosa; DANTAS, Eustógio Wanderley Correia. Vulnerabilidade socioambiental do baixo curso da bacia hidrográfica do rio Cocó, em Fortaleza-CE. **Sociedade & Natureza**, v. 24, n. 3, p. 469-484, 2012. Disponível em:
<https://www.scielo.br/j/sn/a/3cfvBdtdv8yKCHH4bszHhhL/>. Acesso em: 25 maio 2025.

