ANÁLISE INTEGRADA DE PARÂMETROS MORFOMÉTRICOS E EXPANSÃO URBANA NA SUB-BACIA DO RIACHO TIMBAÚBAS (CE)

Rayanne Bezerra de Melo[1]; Láysla Raielly Cruz de Oliveira Castro[2]; Celme Torres Ferreira da Costa[3]; Paulo Roberto Lacerda Tavares[4]; Amanda Bezerra de Sousa Pino[5]; Adélia Alencar Brasil[6]; Ana Rute Pereira Batista[7]; Isaac Felix Victor[8]

RESUMO – A intensificação da urbanização no semiárido brasileiro altera drasticamente a dinâmica hidrológica das bacias, ampliando a ocorrência de inundações em áreas consolidadas. Este estudo objetivou analisar os parâmetros morfométricos e a influência dos eventos de inundação em Juazeiro do Norte (CE), com foco na sub-bacia do Riacho Timbaúbas. A metodologia consistiu no uso de dados de radar SRTM (Topodata) e processamento em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (QGIS 3.40.11), utilizando os módulos GRASS e SAGA para a delimitação da sub-bacia e extração de variáveis hidrográficas. Os resultados revelaram uma área de 36,95 km², elevada densidade de drenagem (4,25 km/km²), alta sinuosidade (3,20) e um tempo de concentração de 7,68 horas. Conclui-se que a alta densidade de drenagem, associada à rápida impermeabilização do solo, potencializa a vulnerabilidade a inundações rápidas (flash floods), fornecendo subsídios essenciais para a gestão de águas pluviais e o planejamento urbano local.

ABSTRACT– The intensification of urbanization in the Brazilian semi-arid region drastically alters the hydrological dynamics of basins, increasing the occurrence of floods in consolidated areas. This study aimed to analyze morphometric parameters and their influence on flooding in Juazeiro do Norte (CE), focusing on the Riacho Timbaúbas sub-basin. The methodology involved using SRTM radar data (Topodata) and geoprocessing in a Geographic Information System (QGIS 3.40.11), employing GRASS and SAGA modules for sub-basin delimitation and hydrographic variable extraction. Results revealed an area of 36.95 km², high drainage density (4.25 km/km²), high sinuosity (3.20), and a concentration time of 7.68 hours. It is concluded that the high drainage density, combined with rapid soil sealing, enhances vulnerability to flash floods, providing essential data for stormwater management and local urban planning.

Palavras-Chave – Bacia hidrográfica urbana; Urbanização; Drenagem Urbana.

[1] Auxiliar de Engenharia, Cagece; Rua Interventor Francisco Erivânio Cruz, 120 – Centro; (88) 3221-9549; rayannebmelo@gmail.com
[2] Graduando, Engenharia Civil, Bolsista IC/CNPq, Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; laysla.castro@aluno.ufca.edu.br
[3] Professora titular; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; celme.torres@ufca.edu.br
[4] Professor Associado; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; paulo.tavares@ufca.edu.br
[5] Professora Adjunta; Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; amanda.souza@ufca.edu.br
[6] Professora substituta, Universidade Regional do Cariri, Crato, Campus Pimenta; adeliaalencar@gmail.com
[7] Engenheira, MPCE; Rua Oliveira Alves Pontes, 145, Lagoa Seca, Juazeiro do Norte; anarutebpereira@gmail.com
[8] Graduando, Engenharia Civil, Bolsista IC/CNPq, Universidade Federal do Cariri; Avenida Tenente Raimundo Rocha, 1639; Cidade Universitária, Juazeiro do Norte; CE, CEP: 63048-080; (88) 3221.9549; felix.isaac@aluno.ufca.edu.br

INTRODUÇÃO

A urbanização no semiárido brasileiro tem provocado alterações profundas na dinâmica hidrológica das bacias, resultando no aumento de alagamentos e inundações. A impermeabilização do solo e a canalização de cursos d'água reduzem a infiltração e modificam os processos de armazenamento, gerando picos de vazão elevados e respostas hidrológicas rápidas (Berland et al., 2021). Nesse contexto, as bacias urbanas tornam-se sistemas dinâmicos e vulneráveis à ocupação desordenada e à supressão de seus elementos naturais reguladores (Teodoro et al., 2007).

O uso de geotecnologias, fundamentado em Modelos Digitais de Elevação (MDE) obtidos via SRTM/Topodata e processados em Sistemas de Informação Geográfica (SIG), como o QGIS, permite a extração automatizada e precisa de parâmetros morfométricos. Este estudo visa analisar as características morfométricas da sub-bacia do Riacho Timbaúbas e sua relação direta com inundações urbanas em Juazeiro do Norte. Embora existam diversos estudos sobre morfometria de bacias hidrográficas, ainda são escassas análises que integrem parâmetros morfométricos, expansão urbana e padrões recentes de uso e ocupação do solo em pequenas bacias urbanas do semiárido brasileiro, especialmente na região do Cariri cearense.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de Estudo

A sub-bacia do Riacho Timbaúbas abrange porções dos municípios de Juazeiro do Norte, Crato e Barbalha, no Sul do Cearás, localizada entre as coordenadas geográficas de 39°36'W a 39°18'W de longitude e 7°30'S a 6°54'S de latitude (Figura 01). Inserida na bacia do Rio Salgado, apresenta área de drenagem de um gradiente 36,94 km², perímetro de 43,40 km e comprimento do canal principal de 33,52 km. A altitude varia de 538,31 m (nascente) a 373,79 m (foz), condicionando o escoamento superficial em direção ao exutório localizado em zona densamente urbanizada.

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos a partir de um Modelo Digital de Elevação (MDE) proveniente do banco de dados TOPODATA, cujas informações altimétricas apresentam resolução espacial de 30 m × 30 m. O processamento e a extração das variáveis foram realizados no software QGIS (versão 3.40.11), com o suporte dos módulos GRASS e SAGA, o que possibilitou a análise integrada das características hidrológicas da sub-bacia do Riacho Timbaúbas.

Inicialmente, procedeu-se ao ajuste do MDE no ambiente SIG, com a remoção de camadas e informações não pertinentes ao objetivo do estudo, visando maior consistência e precisão nas análises

subsequentes. Em seguida, foram gerados os mapas de direção de fluxo e declividade. A partir desses produtos, tornou-se possível delimitar a área de drenagem da sub-bacia.

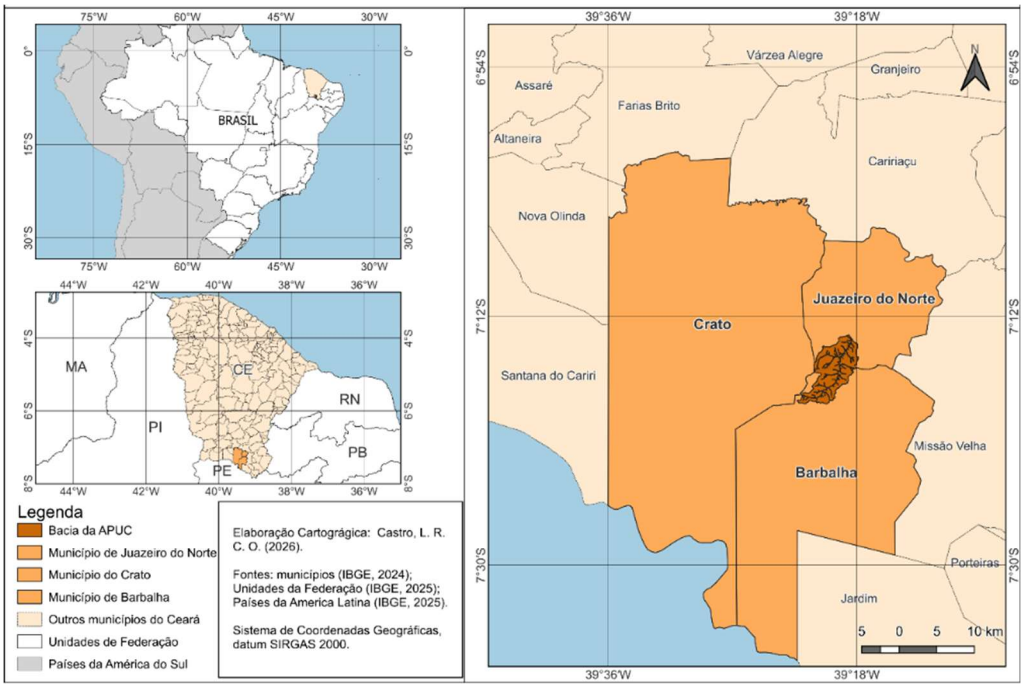


Figura 1 - Localização geográfica da sub-bacia do Riacho Timbaúbas nos municípios de Juazeiro do Norte e Barbalha, Ceará, Brasil. Fonte: Elaboração dos Autores, 2026.

Para a caracterização morfométrica da sub-bacia urbana do Riacho Timbaúbas, foram utilizados dados vetoriais no formato shapefile, obtidos a partir das bases cartográficas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) e do QUALIMAPAS. O processamento dos dados foi realizado em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), utilizando o software QGIS, no qual foram aplicadas ferramentas de vetorização e análise de atributos para a obtenção de variáveis fundamentais, como área de drenagem, perímetro da bacia, comprimento do canal principal e comprimento total da rede de drenagem. Os parâmetros morfométricos foram calculados com base em metodologias clássicas da literatura hidrológica (Horton, 1945; Strahler, 1957; Miller, 1953; Schumm, 1956; Villela e Mattos, 1975), sendo organizados em três grupos: geométricos, topográficos e hidrográficos. A formulação matemática adotada para cada parâmetro está apresentada no Quadro 1.

Quadro 1 – Parâmetros morfométricos, equações e variáveis utilizadas na caracterização da sub-bacia.

Grupo	Parâmetros	Equação	Descrição das variáveis
Geométricos	Área de drenagem (A)	—	Área delimitada da bacia (km²), obtida automaticamente no SIG
	Perímetro (P)	—	Comprimento do divisor de águas (km)
	Coeficiente de compacidade (Kc)	$K_c = 0{,}28 \cdot \frac{P}{\sqrt{A}}$	P = perímetro (km); A = área (km²)

	Fator de forma (Kf)	$K_f = \frac{A}{L^2}$	A = área (km²); L = comprimento da bacia (km)
	Índice de circularidade (Ic)	$I_c = \frac{12{,}57 \cdot A}{P^2}$	A = área (km²); P = perímetro (km)
Topográficos	Declividade média (S)	$S = \frac{Z_{cabeceira} - Z_{foz}}{L}$	Z = cotas altimétricas (m); L = comprimento do canal (km)
	Tempo de concentração (Tc)	$T_c = (0{,}87 \cdot \frac{L^3}{H})^{0{,}385}$	L = comprimento do canal (km); H = desnível (m)
Hidrográficos	Ordem dos cursos d'água	—	Classificação segundo Strahler (1957)
	Densidade de drenagem (Dd)	$D_d = \frac{L_t}{A}$	Lt = comprimento total dos canais (km); A = área (km²)
	Sinuosidade (Sin)	$Sin = \frac{L}{D_v}$	L = comprimento do canal (km); Dv = comprimento do talvegue (km)

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A sub-bacia do Riacho Timbaúbas apresenta desnível altimétrico de 165 m entre a nascente (538 m) e a foz (373 m), configurando áreas de geração de escoamento no alto curso e zonas de convergência nos setores médio e inferior. A redução das declividades associada à intensa impermeabilização urbana favorece a concentração dos fluxos superficiais e aumenta a suscetibilidade a alagamentos e inundações (Figura 2).

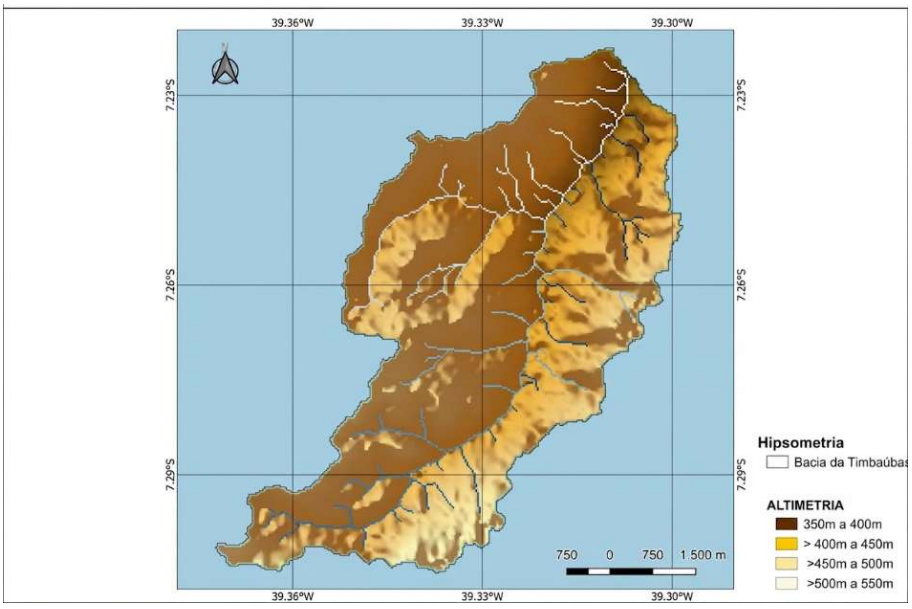


Figura 2 - Mapa Hipsométrico da sub-Bacia do Riacho Timbaúbas. Fonte: Elaboração dos Autores, 2026.

A rede de drenagem possui elevada ramificação, com predominância de canais de 1ª e 2ª ordem que alimentam os cursos principais de 3ª e 4ª ordem, formando um sistema de alta conectividade hidrológica. Esse padrão, associado às características do semiárido e à expansão urbana, favorece respostas rápidas aos eventos de precipitação e a ocorrência de cheias súbitas.

As microbacias de cabeceira atuam como áreas prioritárias de geração de escoamento devido à elevada densidade de drenagem e ao controle topográfico, enquanto as unidades localizadas nos setores intermediários e inferiores funcionam como zonas de integração hidrológica, onde a convergência dos fluxos e a ocupação urbana intensificam os picos de vazão. A identificação dessas áreas críticas permite direcionar ações de planejamento e controle da drenagem urbana.

A ocupação urbana na sub-bacia do Riacho Timbaúbas sobrepõe-se diretamente aos canais de drenagem, suprimindo áreas naturais e comprometendo a funcionalidade hidrológica do sistema. Essa dinâmica é agravada pelo controle do relevo: enquanto as superfícies planas a suave onduladas (0 a 8% de declividade) facilitam a expansão urbana, elas também reduzem a velocidade natural do escoamento e tornam-se zonas de acúmulo propensas a alagamentos devido à intensa impermeabilização. Em contrapartida, as cabeceiras e encostas (declividades acima de 8%) aceleram o fluxo superficial e o transporte de sedimentos, direcionando rapidamente as águas para os fundos de vale vulneráveis.

A análise do uso e ocupação do solo evidencia um padrão espacial heterogêneo (Figura 3), destacando-se a formação savânica, que ocupa 16,32% da área da sub-bacia e exerce importante função reguladora ao favorecer a infiltração, reduzir o escoamento superficial e minimizar processos erosivos. Em contraste, as áreas urbanizadas contribuem para a amplificação dos escoamentos e do risco de inundações.

Em contrapartida, a área urbanizada (21,45%) concentra-se nos fundos de vale e eixos de circulação, resultando em microbacias com elevado grau de impermeabilização e alta conectividade com a rede de drenagem. Esse cenário favorece a rápida geração e transferência do escoamento superficial, intensificando os picos de vazão e ampliando a vulnerabilidade a inundações, particularmente nos setores onde ocorre a convergência de fluxos de múltiplas áreas urbanas.

Os usos agropecuários, compostos por pastagens e lavouras (aproximadamente 10,7%), ocupam a porção sul e contribuem para a intensificação do escoamento e da erosão hídrica devido à remoção da cobertura original, o que pode resultar no assoreamento dos canais a jusante. A presença ínfima de formações florestais (0,05%) e corpos hídricos (0,07%) evidencia a baixa representatividade de áreas conservadas, reforçando a necessidade de proteção estratégica desses remanescentes frente à crescente pressão antrópica.

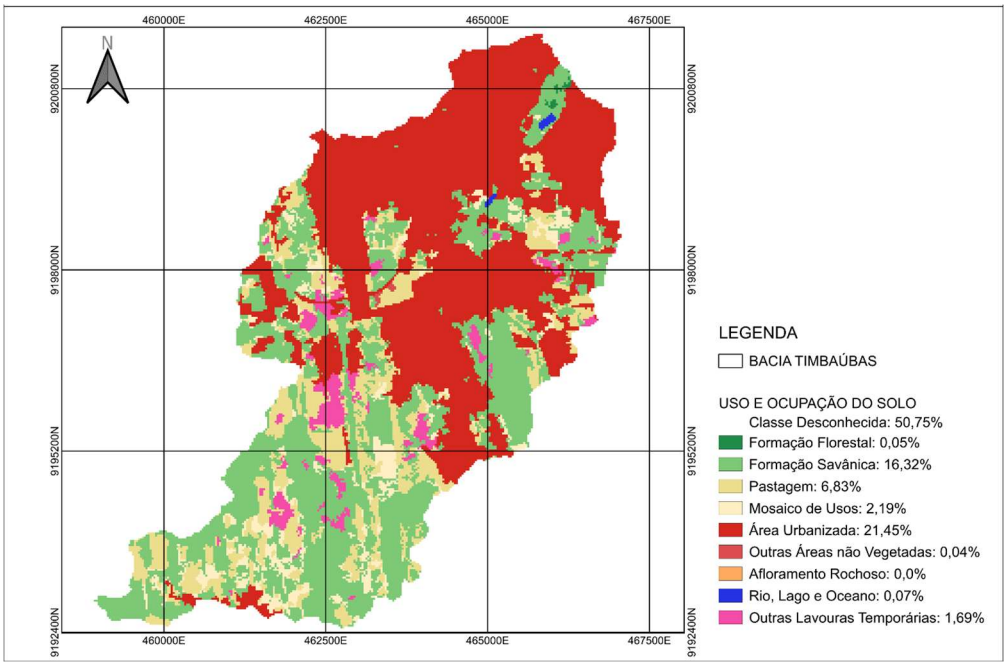


Figura 3 – Mapa da Uso e Ocupação do solo da sub-Bacia do Riacho Timbaúbas. Fonte: Elaboração dos Autores, 2026.

Do ponto de vista evolutivo, a sub-bacia do Riacho Timbaúbas apresenta uma dinâmica inversa à observada por Shiferaw et al. (2025) na bacia do Gap Cheon: enquanto lá houve aumento de áreas verdes, em Juazeiro do Norte a área urbanizada saltou de 10,56% em 2000 para 21,45% em 2024. Esse processo acelerado de urbanização intensifica as pressões antrópicas, resultando no aumento direto do escoamento superficial e na redução da infiltração, o que amplia os riscos hidrológicos e a frequência de inundações na região.

A articulação entre o uso do solo e a estrutura das microbacias permite identificar unidades críticas, caracterizadas por elevada urbanização e alta conectividade hidrológica. Esses setores exercem maior influência na dinâmica de cheias e devem ser priorizados para intervenções de gestão, como a implementação de soluções baseadas na natureza (SbN), recuperação vegetal e adoção de técnicas compensatórias de drenagem. Tais estratégias são fundamentais para mitigar os impactos das inundações e promover um planejamento urbano resiliente que respeite as condicionantes geomorfológicas locais.

Os resultados da análise morfométrica revelam que a sub-bacia possui uma área de drenagem de 36,95 km², um perímetro de 43,41 km e um comprimento do canal principal de 33,52 km. O talvegue estende-se por 10,48 km, apresentando um desnível altimétrico total de 164,52 m, entre a cota da cabeceira (538,31 m) e a cota da foz (373,80 m). Adicionalmente, o comprimento total da rede hidrográfica, obtido por meio do processamento no SAGA, totaliza 157,14 km. Os mapas temáticos elaborados constituíram a base analítica para a caracterização morfométrica da sub-bacia do Riacho Timbaúbas, contemplando seus atributos geométricos, topográficos e hidrográficos, cujos

resultados estão sistematizados na Tabela 1. Esses cálculos consideraram parâmetros como forma da bacia, declividade e tempo de concentração, estabelecendo uma relação direta com as variáveis derivadas dos produtos cartográficos.

Tabela 1 – Cálculo dos Parâmetros

Parâmetro	Unidade	Valores
Declividade	m/km	4,907
Tempo de Concentração	h	7,678
Coef. de Compacidade	adim.	1,99
Fator de Forma	adim.	0,033
Índice de Circularidade	adim.	0,245
Sinuosidade	adim.	3,199
Densidade de Drenagem	km/km²	4,253

Os parâmetros morfométricos indicam que, embora a sub-bacia apresente forma alongada, característica que naturalmente tenderia a reduzir a sincronização dos escoamentos, essa condição é compensada pela elevada densidade de drenagem e pelo elevado grau de impermeabilização urbana. Como consequência, observa-se alta conectividade hidrológica, redução do tempo de resposta da bacia e maior suscetibilidade à ocorrência de inundações rápidas.

Adicionalmente, o alto índice de sinuosidade (Sin = 3,20) indica um canal principal meandrante que tende a elevar a lâmina d'água durante eventos extremos, facilitando o extravasamento em trechos urbanizados e confinados. O tempo de concentração de 7,68 h (Figura 8) reforça que eventos pluviométricos com duração igual ou superior a esse intervalo mobilizam integralmente os fluxos da sub-bacia, gerando a sincronização das diferentes unidades de drenagem e aumentando a probabilidade de cheias rápidas com picos de vazão elevados.

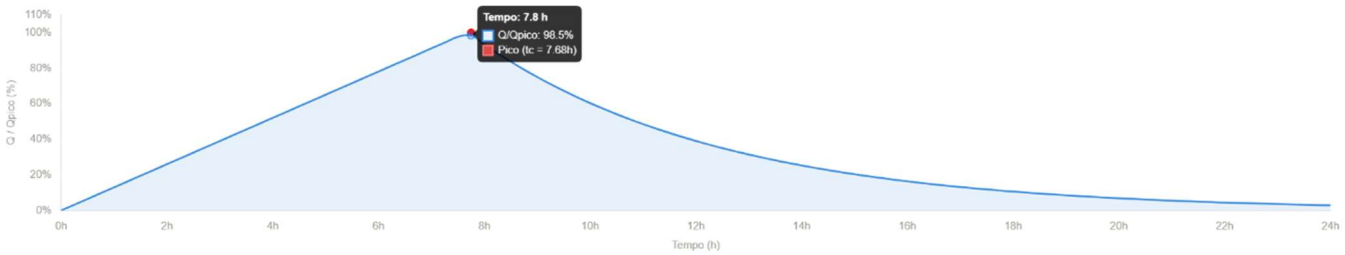


Figura 8 – Gráfico do tempo de concentração (Tc) na sub-bacia. Fonte: Elaboração dos Autores, 2026.

A resposta hidrológica da sub-bacia do Riacho Timbaúbas é fortemente influenciada pela elevada densidade de drenagem, pela sinuosidade do canal principal e pelo avanço da impermeabilização do solo. Embora os índices de circularidade (Ic = 0,25) e de fator de forma (Kf = 0,033) caracterizem uma bacia alongada, condição que normalmente contribuiria para reduzir a concentração dos escoamentos, a intensa urbanização altera esse comportamento, favorecendo a

rápida transferência do escoamento superficial e aumentando a suscetibilidade à ocorrência de inundações.

A comparação com a bacia do rio Gap Cheon, na Coreia do Sul, estudada por Shiferaw et al. (2025), evidencia como diferentes trajetórias de ocupação do solo podem modificar a resposta hidrológica das bacias urbanas. Naquele estudo, o aumento das áreas verdes contribuiu para reduzir o escoamento superficial. Na sub-bacia do Riacho Timbaúbas, entretanto, observa-se o processo oposto, marcado pela expansão das áreas impermeáveis. Esse comportamento reforça as observações de Miller et al. (2014), que associam a substituição de superfícies permeáveis por áreas urbanizadas à redução da infiltração, ao aumento dos picos de vazão e à intensificação dos riscos de inundação. No caso de Juazeiro do Norte, a ocupação de fundos de vale e de canais naturais potencializa ainda mais esses efeitos, tornando a sub-bacia mais vulnerável aos eventos hidrológicos extremos.

As áreas de menor altitude e maior grau de urbanização concentram os escoamentos provenientes das microbacias e, devido à elevada impermeabilização do solo, apresentam maior suscetibilidade à ocorrência de inundações. Essa condição pôde ser observada no evento de 7 de janeiro de 2025, quando a precipitação diária de 89,5 mm (FUNCEME, 2026) provocou alagamentos e inundações nas porções mais baixas da sub-bacia. Embora esse volume não represente o maior registro da série histórica, ele evidencia que eventos de chuva intensa são suficientes para desencadear impactos significativos quando coincidem com áreas urbanizadas e naturalmente favoráveis à concentração dos fluxos superficiais.

A série histórica de precipitação para o município de Juazeiro do Norte (Figura 9) demonstra que episódios extremos fazem parte do regime pluviométrico regional. Entre os maiores acumulados diários registrados destacam-se 166 mm (2016), 150 mm (2011), 133 mm (2020), 130 mm (2008) e 127,7 mm (2022), além de diversos eventos superiores a 112 mm ao longo das últimas décadas.

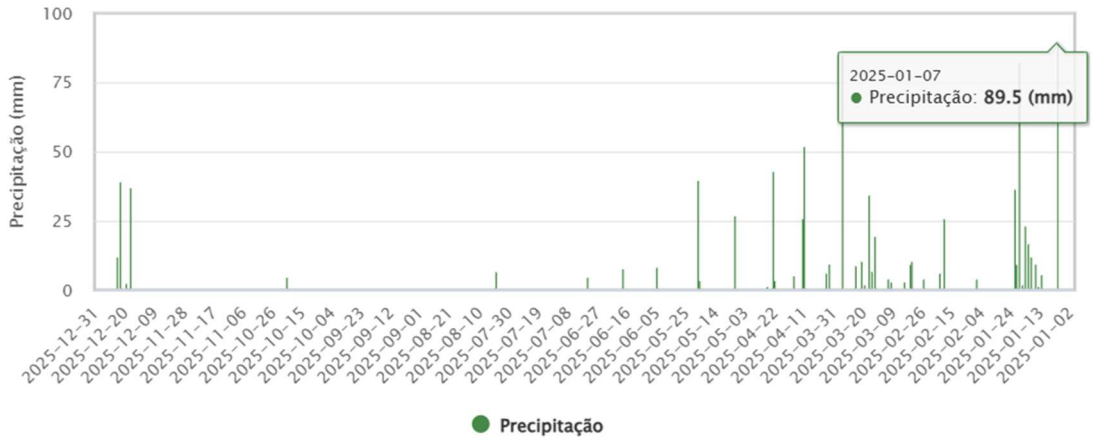


Figura 9- Série temporal diária de precipitação na sub-bacia do Riacho Timbaúbas, com destaque para eventos extremos no ano de 2025. Fonte: FUNCEME, 2026.

A série temporal indica que chuvas intensas são recorrentes na região e reforçam que a ocorrência de inundações na sub-bacia do Riacho Timbaúbas não depende apenas da magnitude da precipitação, mas também da interação entre as características morfométricas da bacia e o processo de urbanização. Nas áreas de menor declividade e maior ocupação urbana, onde os fluxos convergem, eventos dessa natureza tendem a elevar rapidamente as vazões e ampliar os impactos sobre a população.

De forma integrada, os resultados demonstram que a suscetibilidade a inundações na sub-bacia do Riacho Timbaúbas resulta da combinação entre suas características morfométricas e o avanço da urbanização. A recorrência de eventos pluviométricos intensos, associada à elevada impermeabilização do solo e à ocupação das áreas de menor altitude, favorece a rápida concentração do escoamento superficial e amplia os impactos das inundações. Esses resultados reforçam a necessidade de incorporar as características físicas da bacia ao planejamento urbano e às estratégias de drenagem, contribuindo para a redução da vulnerabilidade e para uma gestão mais eficiente das águas pluviais.

CONCLUSÃO

A análise integrada dos parâmetros morfométricos e do uso e ocupação do solo demonstrou que a suscetibilidade a inundações na sub-bacia do Riacho Timbaúbas resulta da interação entre suas características físicas e o processo de urbanização. Embora a configuração geométrica da bacia indique uma forma alongada, a elevada densidade de drenagem, associada ao avanço da impermeabilização do solo e à ocupação das áreas de menor altitude, favorece a rápida concentração do escoamento superficial e intensifica a ocorrência de inundações durante eventos pluviométricos extremos.

O estudo evidencia que a avaliação isolada dos parâmetros morfométricos não é suficiente para explicar o comportamento hidrológico de bacias urbanas, sendo necessária sua integração com informações sobre a dinâmica de uso e ocupação do solo. Essa abordagem representa a principal contribuição deste trabalho ao demonstrar como as transformações antrópicas podem modificar a resposta hidrológica de uma bacia, mesmo quando suas características geométricas indicariam menor propensão à ocorrência de cheias.

Os resultados fornecem subsídios para o planejamento urbano e a gestão da drenagem pluvial, indicando áreas prioritárias para intervenções estruturais e para a adoção de Soluções Baseadas na Natureza, contribuindo para reduzir a vulnerabilidade às inundações em cidades inseridas no semiárido brasileiro.

AGRADECIMENTOS – Os autores agradecem ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo fomento ao projeto **"Elas nas Exatas"** (Edital CNPq/MCTI/MMulheres nº 31/2023) e pela concessão da bolsa de Iniciação Científica, bem como à Pró-Reitoria de Pesquisa, Pós-Graduação e Inovação da Universidade Federal do Cariri (PRPI/UFCA) pelo apoio institucional.

REFERENCIAS

EMBRAPA. *Relevo – Território Mata Sul Pernambucana. Agência Embrapa de Informação Tecnológica*. Disponível em: https://www.embrapa.br/agencia-de-informacao-tecnologica/territorios/territorio-mata-sul-pernambucana/caracteristicas-do-territorio/recursos-naturais/relevo. Acesso em: 21 mar. 2026.

FUNCEME – Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. Postos pluviométricos. Fortaleza, [s. d.]. Disponível em: \http://www.funceme.br/?page_id=2694. Acesso em: 21 mar. 2026.

HORTON, R. E. *Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology*. Geological Society of America Bulletin, v. 56, p. 275–370, 1945.

MILLER, J. D. *et al*. *Assessing the impact of urbanization on storm runoff in a peri-urban catchment using historical change in impervious cover*. Journal of Hydrology, v. 515, p. 59-70, 2014. DOI: 10.1016/j.jhydrol.2014.04.011.

MILLER, V. C. *A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area, Virginia and Tennessee*. New York: Columbia University, 1953.

SCHUMM, S. A. *Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey*. Geological Society of America Bulletin, v. 67, p. 597–646, 1956.

SHIFERAW N, HABTE L, WALEED M. *Land use dynamics and their impact on hydrology and water quality of a river catchment: a comprehensive analysis and future scenario*. Environ Sci Pollut Res Int. 2025 Feb;32(7):4124-4136. doi: 10.1007/s11356-025-35946-y. Epub 2025 Jan 25. PMID: 39862375; PMCID: PMC11835986.

STRAHLER, A. N. *Quantitative analysis of watershed geomorphology*. Transactions of the American Geophysical Union, v. 38, n. 6, p. 913–920, 1957.

TEODORO, V. L. I.; SOUZA, C. G.; GUIMARÃES, M. A. *O conceito de bacia hidrográfica e a importância da caracterização morfométrica*. Revista Uniara, n. 20, p. 137–157, 2007.

TUCCI, C. E. M. *Águas urbanas*. Porto Alegre: ABRH, 2005.

VILLELA, S. M.; MATTOS, *A. Hidrologia aplicada. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil*, 1975.