


MODELAGEM HIDROLÓGICA EM BACIAS URBANIZADAS: O IMPACTO DA MUDANÇA DO USO DO SOLO PELO MÉTODO CN

 <https://doi.org/10.56238/arev7n1-044>

Data de submissão: 03/12/2024

Data de publicação: 03/01/2025

Willian José Ferreira

Doutor em Geofísica Espacial
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: willian.jferreira@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4636-868X>

Rodrigo Cesar da Silva

Doutor em Desastres Naturais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: rodrigo.peb@gmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9721-6988>

Cheila Flávia de Praga Baião

Doutora em Desastres Naturais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: cheila@prof.educacao.sp.gov.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0729-2280>

Rafael Barbosa Rodrigues

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: rafael.brodriques@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0009-0005-6072-3520>

Thiago Fantus Ribeiro

Mestrando em Ciências Ambientais
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: thiago_fantus@hotmail.com
ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-8824-3746>

Marcelo dos Santos Targa

Doutor em Agronomia
Universidade de Taubaté (UNITAU)
E-mail: mtarga@unitau.br
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-4140-3493>

RESUMO

As mudanças no uso e cobertura do solo, especialmente em áreas urbanizadas, têm impactado significativamente o regime hidrológico das bacias hidrográficas, intensificando o escoamento superficial e os picos de vazão. Nesse contexto, este estudo buscou investigar os impactos dessas mudanças nas sub-bacias dos ribeirões Fojo e Perdizes, em Campos do Jordão, SP, respondendo à pergunta: de que forma as alterações no uso e cobertura do solo impactam o regime hidrológico das

sub-bacias, e como o método CN (Curve Number) pode ser aplicado para estimar esses impactos? O objetivo foi estimular a resiliência hídrica por meio da aplicação do método CN, associado ao uso de ferramentas de geoprocessamento, para estimar vazões de projeto em diferentes cenários. Os resultados revelaram que, entre os anos de 2002 e 2022, as áreas florestais reduziram-se em 6% na sub-bacia Perdizes e 18% na sub-bacia Fojo, com aumento correspondente de áreas urbanizadas e de mosaicos de usos. Essa transformação resultou em um aumento das vazões de pico, especialmente em tempos de retorno elevados (50 e 100 anos), com valores máximos de 18 m³/s no ribeirão Fojo e 7 m³/s no ribeirão Perdizes em 2022. Além disso, observou-se redução no tempo de concentração, indicando um escoamento mais rápido e intenso, sobretudo na sub-bacia Fojo devido à maior declividade e área de contribuição. Os resultados evidenciam os impactos hidrológicos das pressões antrópicas e destacam a necessidade de estratégias de manejo sustentável, reforçando a importância de políticas públicas para mitigar os efeitos das alterações no uso do solo e promover a resiliência hídrica na região.

Palavras-chave: Escoamento Superficial. Vazão de Pico. Geoprocessamento. Urbanização.

1 INTRODUÇÃO

Enquanto unidades de análise, as bacias hidrográficas desempenham um papel central na compreensão das interações entre processos hidrológicos e pressões antrópicas, sendo fundamentais para o planejamento ambiental e o desenvolvimento sustentável (Ferreira *et al.*, 2023a). Contudo, mudanças no uso e ocupações do solo alteram significativamente o regime hidrológico, impactando padrões de escoamento, erosão e sedimentação nas bacias (Fan *et al.*, 2013). Segundo Santos *et al.* (2012), tais transformações comprometem o ciclo hidrológico e a qualidade dos recursos hídricos, especialmente em áreas urbanas e periurbanas, onde o crescimento desordenado intensifica os impactos, exigindo estratégias de manejo sustentável e resiliência hídrica.

No Brasil, o Sistema Integrado de Gerenciamento de Recursos Hídricos (SIGRHI) organiza o monitoramento e planejamento hidrológico. Entretanto, a escassez de dados contínuos exige o uso de métodos estimativos, como o modelo do Número da Curva (Curve Number - CN), que calcula o escoamento superficial com base no uso e cobertura do solo, tipo de solo e condições hidrológicas (Soulis, 2021). Hoje, a integração desse método com ferramentas hidrológicas, como *Soil and Water Assessment Tool* (SWAT), *Storm Water Management Model* (SWMM) e *Hydrologic Engineering Center – Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS), permite análises mais precisas e detalhadas, facilitando a calibração local (Machado *et al.*, 2003; Fengei *et al.*, 2013).

Nesse contexto, a bacia hidrográfica do rio Capivari, localizada em Campos do Jordão, na região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte (RMVPLN), destaca-se como um objeto relevante para o estudo do método CN devido à sua importância hídrica e às pressões antrópicas a que está submetida. Suas sub-bacias dos ribeirões Perdizes e Fojo são fundamentais para o abastecimento da população local, tornando a área particularmente sensível às alterações no uso e cobertura do solo. Essas mudanças intensificam os desafios do regime hidrológico, evidenciando a necessidade de estudos que subsidiem políticas de manejo ambiental e hídrico (Santos *et al.*, 2012).

Diante disso, questiona-se: de que forma as mudanças no uso e cobertura do solo impactam o regime hidrológico das sub-bacias urbanizadas, e como o método CN pode ser aplicado para estimar o escoamento superficial e embasar estratégias de gestão sustentável?

O presente estudo investiga os impactos dessas mudanças por meio da aplicação do método CN e do uso de ferramentas de geoprocessamento para estimar as vazões de projeto. Os resultados visam subsidiar o manejo hídrico sustentável, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030, especialmente o ODS 6, que trata da gestão eficiente da água, e o ODS 11, que busca promover cidades e comunidades resilientes. Nesse sentido, o estudo pretende fortalecer a resiliência hídrica, permitindo que os sistemas hidrológicos respondam às pressões

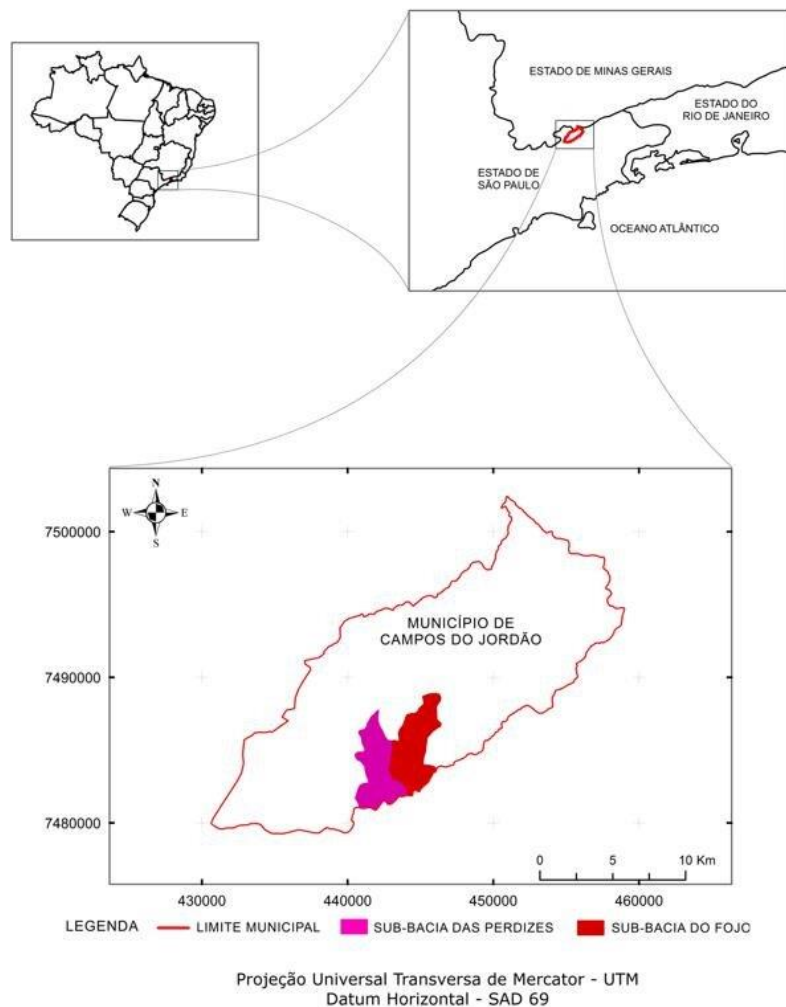
antrópicas, ao mesmo tempo em que contribui para o equilíbrio ambiental por meio de estratégias de manejo sustentável.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente estudo abrange as sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Perdizes e Fojo, que desaguam no rio Sapucaí-guaçu, na região central do município de Campos do Jordão, SP (Figura 1). Situado a uma altitude média de 1.600 metros, o município integra a região Metropolitana do Vale do Paraíba e Litoral Norte e possui uma população de 47.983 habitantes (IBGE, 2024).

Figura 1. Localização das sub-bacias em estudo, em relação ao município de Campos de Jordão, SP. Em roxo: Perdizes; Em vermelho: Fojo.



Campos do Jordão é um dos sete municípios paulistas que fazem parte da Área de Proteção Ambiental (APA) da Serra da Mantiqueira. A topografia do município é predominantemente

acidentada, sendo composta por aproximadamente 85% de regiões onduladas, 10% de encostas de serra e 5% de áreas escarpadas. A área central da cidade localiza-se em um vale estreito, com largura média de 500 metros, enquanto pontos do entorno alcançam altitudes superiores a 2.000 metros (São Paulo, 2010). A ocupação urbana se desenvolve predominantemente na porção plana desse vale, coincidindo com o exutório das duas sub-bacias em estudo.

A bacia hidrográfica do ribeirão Perdizes, localizada na porção nordeste do município de Campos do Jordão é caracterizada por uma área com relevo fortemente ondulado e acidentado, típico da região serrana da Serra da Mantiqueira. A bacia possui predominantemente Cobertura Florestal, embora tenha sofrido perdas ao longo dos anos devido à expansão urbana e à ocupação por áreas de Mosaico de Usos. A área próxima ao exutório do ribeirão, no bairro de Capivari, tem registrado crescimento expressivo de infraestrutura urbana, especialmente com a ampliação da rede hoteleira e de serviços.

A bacia hidrográfica do ribeirão Fojo, por sua vez, apresenta características semelhantes em termos de relevo. No início dos anos 2000, a cobertura florestal era predominante, mas a partir de 2010 houve uma perda mais expressiva em comparação com a bacia do Perdizes, refletindo maior pressão antrópica. A bacia do Fojo também registrou expansão de áreas urbanizadas e Mosaico de Usos, particularmente em regiões de menor declividade, o que contribui para o aumento do escoamento superficial e dos riscos associados, como erosão e inundações. Essas mudanças ressaltam a necessidade de monitoramento contínuo e estratégias de manejo voltadas à resiliência hídrica e conservação ambiental.

Ambas as sub-bacias são pareadas e como importantes afluentes do rio Capivari, desempenham papel fundamental na drenagem da região e no abastecimento hídrico local.

2.2 PROCEDIMENTOS PARA ESTIMATIVA DO ESCOAMENTO SUPERFICIAL E GERAÇÃO DO HIDROGRAMA

A caracterização do uso e cobertura do solo das sub-bacias hidrográficas dos ribeirões Fojo e Perdizes foi realizada para os anos de 2002 e 2022, utilizando o software QGIS. Os dados foram obtidos a partir do *MapBiomias* (versão 9.0), projeto que disponibiliza mapas de uso e cobertura do solo no Brasil e América do Sul com base em imagens de satélite da série *Landsat*, cobrindo o período entre 1985 e 2022, com resolução espacial de 30 metros.

Um parâmetro relevante no modelo aplicado é o tempo de concentração (T_c), que representa o tempo necessário para que o escoamento percorra o ponto mais distante da bacia até o exutório. O

T_c foi estimado utilizando a *California Culvert Practice* (Califórnia, 1944), expressa pela Equação (1):

$$T_c = 57 \times \left(\frac{L^3}{\sqrt{I_{eq}}} \right)^{0,385} \quad (1)$$

em que: T_c = Tempo de concentração (minutos); I_{eq} = Declividade equivalente do talvegue (m/km); L = Comprimento do talvegue (km). Neste estudo, o comprimento do talvegue foi subdividido em trechos, e o cálculo considerou a declividade individual de cada segmento.

As precipitações máximas para tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos foram estimadas a partir da Equação (2), proposta por Martinez Junior e Magni (1999):

$$I(t, T) = 19,153(t + 15)^{-0,7928} + 2,034(t + 15)^{-0,659}[-0,478 - 0,9046 \ln(\ln(T/T - 1))] \quad (2)$$

em que: I = Intensidade de precipitação (mm/min); T = Tempo de retorno da chuva (anos); t = Tempo de duração da chuva (min).

O Método do Número da Curva (CN) foi utilizado para estimar o escoamento superficial (P_e) e o hidrograma resultante. Esse método foi selecionado por sua aplicabilidade na determinação da vazão de pico e do hidrograma completo gerado pela precipitação máxima de projeto. As etapas adotadas foram:

- a) Conversão da precipitação total em vazão, com base nas Equações (3) e (4).

$$P_e = \frac{(P - 0,2S)^2}{P + 0,8S}, \text{ para } P > 0,2S \quad (3)$$

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (4)$$

em que: P_e = Precipitação efetiva (mm); P = Precipitação máxima (mm); S = Infiltração potencial (mm), relacionada ao CN.

b) Geração do hidrograma com base na hidrógrafa unitária adimensional do NRCS (Natural Resources Conservation Service), uma ferramenta hidrológica que representa a resposta de uma bacia hidrográfica a uma precipitação uniforme, levando em conta suas características físicas e hidrológicas. A hidrógrafa utiliza as relações entre o tempo de pico (T_p), a duração da precipitação máxima e os coeficientes adimensionais t/T_p e q/q_p , respectivamente, a relação entre o tempo real (t)

e o tempo de pico (T_p) da bacia, e a relação entre a vazão em um dado instante (q) e a vazão de pico (q_p) da bacia.

c) Cálculo do coeficiente de drenagem e vazão de projeto utilizando o processo de convolução, permitindo a determinação do pico de descarga (q_p) Para a definição do CN, foi utilizada a ponderação das áreas das classes de uso do solo identificadas nos mapas gerados, conforme sugerido por Targa (2011). A geração do hidrograma foi realizada pela soma dos hidrogramas unitários dimensionais, aplicados a cada intervalo de tempo de precipitação efetiva.

O hietograma de entrada foi elaborado em intervalos de 0,25 horas, com distribuição de chuvas baseada no primeiro quartil da classificação, proposta por Huff (1967). A precipitação acumulada foi convertida em precipitação efetiva utilizando as equações do CN, e a variação em cada intervalo de tempo foi calculada pela Equação (5).

$$\Delta P_e = P_e(t + 1) - \frac{P_e(t)}{\Delta P_e} \quad (5)$$

Por fim, os valores de t/T_p e q/q_p extraídos da hidrógrafa unitária adimensional foram utilizados para gerar, por meio da Equação (6), o hidrograma final, que resulta da soma dos hidrogramas unitários dimensionais obtidos para cada pulso de chuva.

$$q_p = 2,08 \frac{\Delta P_e}{T_p} \quad (6)$$

Esse cálculo dá forma ao pico de descarga (q_p) do hidrograma gerado por cada ΔP_e .

Ao final das análises, pretende-se contribuir para o fortalecimento de estudos e diretrizes voltadas à resiliência hídrica, de modo a permitir que os sistemas hidrológicos respondam de forma eficiente às crescentes pressões antrópicas. Paralelamente, busca-se fomentar o equilíbrio ambiental por meio da proposição de estratégias de manejo sustentável, que considerem as transformações no uso e cobertura do solo e seus impactos sobre o regime hidrológico.

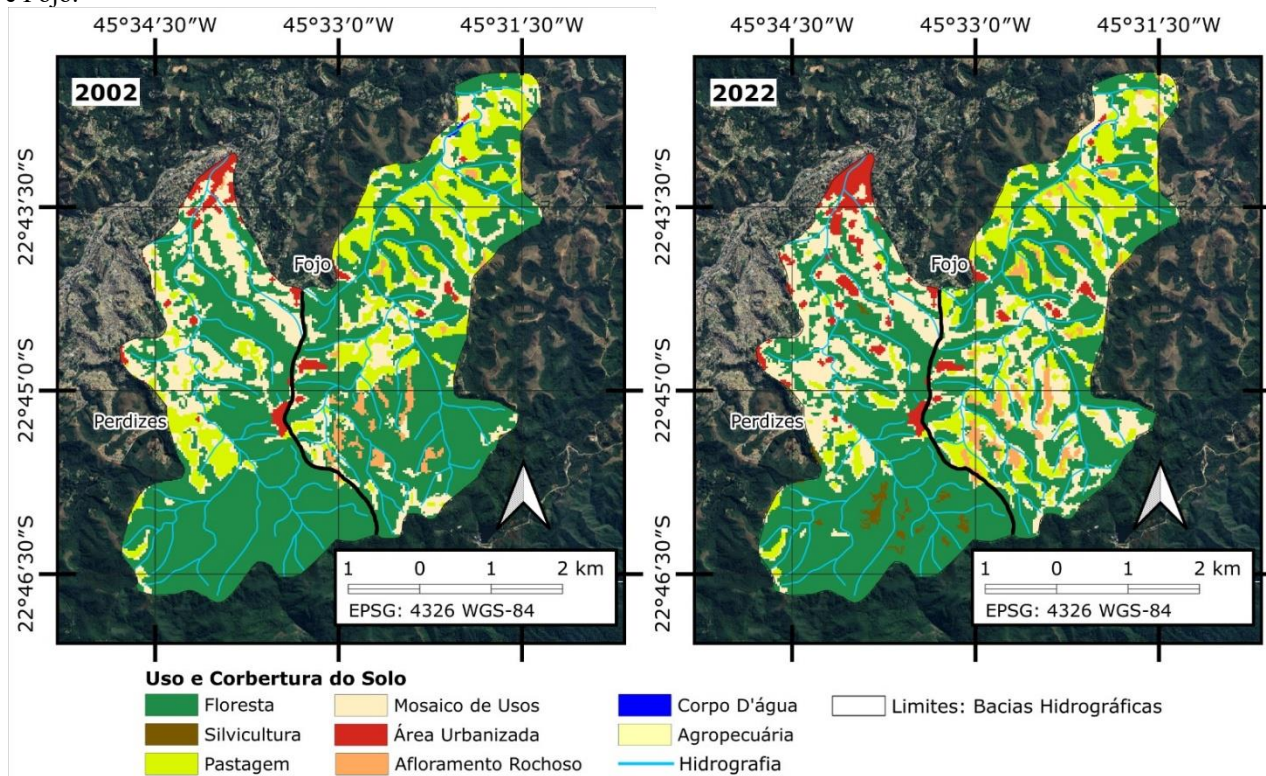
3 RESULTADOS

3.1 ANÁLISE DAS ALTERAÇÕES DO USO E COBERTURA DO SOLO NAS SUB-BACIAS

O mapeamento do uso e ocupação do solo, obtido a partir de dados do MapBiomias (2024), das sub-bacias Perdizes e Fojo, localizadas no município de Campos do Jordão, SP, nos anos de 2002 e 2022, é apresentado na Figura 2. Nela, é possível observar as alterações ocorridas ao longo desse período, destacando mudanças nas classes de uso e cobertura do solo. A Figura 2 ilustra os mapas

comparativos de uso e cobertura do solo para os anos de 2002 e 2022 nas sub-bacias dos ribeirões Perdizes e Fojo, evidenciando os padrões espaciais de transformação na região.

Figura 2. Mapas comparativos de uso e cobertura do solo para os anos de 2002 e 2022 nas sub-bacias dos ribeirões Perdizes e Fojo.



Fonte. Elaborada pelos autores.

As alterações no uso e cobertura do solo das sub-bacias Perdizes e Fojo, no município de Campos do Jordão, SP, foram quantificadas e estão apresentadas na Tabela 1. A análise comparativa entre os anos de 2002 e 2022 evidencia mudanças significativas nos tipos de cobertura existentes.

A classe Floresta, predominante em 2002, ocupava 857 ha (67,7%) na sub-bacia Perdizes e 826 ha (59,4%) na sub-bacia Fojo. No entanto, em 2022, verificou-se uma redução de 6% e 18%, respectivamente, nessas áreas. A classe Silvicultura surgiu como cobertura apenas em 2022, restrita à sub-bacia Perdizes.

A cobertura denominada Pastagem, em 2002, abrangia 85,6 ha (6,8%) na sub-bacia Perdizes e 265,3 ha (19,1%) na sub-bacia Fojo. Em 2022, essa cobertura apresentou comportamentos distintos: uma redução de 53,8% na sub-bacia Perdizes e um aumento de 8,9% na sub-bacia Fojo.

Deve-se destacar a classe Mosaico de Usos, que, no Brasil, está associada a áreas de transição entre o rural e o urbano, como chácaras, pomares, hortas e espaços de lazer com gramados, ou uma mistura de pastagens, áreas em regeneração natural e agricultura. Em 2002, essa classe representava

21,9% e 17,1% das áreas das sub-bacias Perdizes e Fojo, respectivamente. Em 2022, registrou-se um aumento de 24,9% na sub-bacia Perdizes e de 24,7% na sub-bacia Fojo, substituindo, principalmente, áreas de pastagem e floresta.

Tabela 1. Classes de uso e ocupação dos solos das sub-bacias Fojo e Perdizes e os valores de CN escolhidos em função das características hidrológicas das sub bacias.

Uso e Ocupação	Area (ha) Sub-Bacia Perdizes		CN	Area (ha) Sub-Bacia Fojo	
	2002	2022		2002	2022
Floresta	857.19	804.13	42	826.05	676.86
Silvicultura		21.61	62		
Pastagem	85.55	39.50	75	265.27	289.08
Mosaico Usos	277.46	315.24	70	237.86	342.74
Area Urbanizada	43.10	78.75	90	14.31	19.96
Corpo d'Agua		4.06	90	1.30	0.66
Afloramento Rochoso	1.63	1.63	90	43.99	59.70
Agropecuária	2.03	2.03	75	1.46	1.24
Total	1267	1267		1390	1390

Fonte. Elaborada pelos autores.

A área urbanizada também apresentou expansão considerável. Na sub-bacia Perdizes, passou de 43,1 ha em 2002 para 78,75 ha em 2022, enquanto na sub-bacia Fojo, o aumento foi de 14,3 ha para 19,96 ha no mesmo período. Conforme mostrado na Figura 3, a urbanização avançou sobre áreas do Mosaico de Usos, indicando que, à medida que essas propriedades recebem melhorias em infraestrutura, especialmente voltadas ao setor hoteleiro e de hospedagem, tendem a consolidar-se como aglomerações urbanas típicas.

Os solos predominantes no município de Campos do Jordão são Cambissolos Háplicos, classificados por Santos *et al.* (2011), situados em relevos fortemente ondulados a escarpados, com severas restrições para usos agrícola, pastoril e florestal devido à sua suscetibilidade à desagregação (Oliveira, 1999). Segundo Sartori *et al.* (2005), esses solos pertencem ao Grupo Hidrológico C. Com base na tabela de valores calibrados de CN para o Brasil (Setzer; Porto, 1979), foram atribuídos os valores de CN para cada classe de uso e ocupação do solo sob condições médias de umidade, conforme apresentados na Tabela 1.

3.2 ANÁLISE HIDROLÓGICA COMPARATIVA DAS SUB-BACIAS (2002-2022)

Os dados necessários para o cálculo da vazão de projeto, por meio da construção do hietograma e do hidrograma unitário, estão detalhados em Targa (2011) e são apresentados na Tabela 2. As características morfométricas das sub-bacias, utilizadas para a análise, foram obtidas a partir de Santos *et al.* (2012).

Tabela 2. Características morfométricas e hidrológicas das sub-bacias Fojo e Perdizes necessárias para o cálculo dos hietogramas e hidrogramas de projeto.

Parâmetros	Perdizes	Fojo
Comprimento do talvegue – L (Km)	8,81	9,64
Área da bacia hidrográfica – A (Km ²)	12,70	13,97
Declividade equivalente da bacia – Ieq (m/km)	37,46	44,61
Tempo de concentração da bacia – Tc (h)	1,25	1,25
Tempo entre pico da chuva e do hidrograma – tp (h)	0,88	0,88
Tempo de elevação do pico do hidrograma - Tp (h)	1,50	1,50
Vazão do pico do hidrograma – qp (m ³ /s)	1,75	1,92
Tempo de base do hidrograma – Tb (h)	2,35	2,36

Fonte. Elaborada pelos autores.

Considerando as características morfométricas da área de estudo, o comprimento total do canal principal é de 8,81 km para a sub-bacia Perdizes e 9,64 km para a sub-bacia Fojo, com declividades equivalentes de 37,5 m/km e 44,61 m/km, respectivamente. Esses parâmetros resultam em um Tempo de Concentração (Tc) aproximado de 1,25 horas para ambas as sub-bacias, indicando que a água que cai no ponto mais distante da bacia leva cerca de 75 minutos para atingir o exutório.

Com o tempo de concentração igualado ao tempo de duração da chuva máxima e utilizando pulsos de chuva de 15 minutos, foram calculados, com base na Equação 3, os valores das chuvas máximas correspondentes aos tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos, apresentados na Tabela 3.

A partir dos valores de CN apresentados na Tabela 1, foram calculados os valores de CN ponderado, considerando as alterações no uso e ocupação do solo nos anos de 2002 e 2022. Para as sub-bacias, os valores obtidos foram 55,180 e 58,567 para o ribeirão Fojo, e 52,108 e 53,589 para o ribeirão Perdizes, respectivamente.

Tabela 3. Chuvas máximas para os tempos de retorno 10, 25, 50 e 100 anos para pulsos de chuva de 15 minutos nas sub-bacias Fojo e Perdizes.

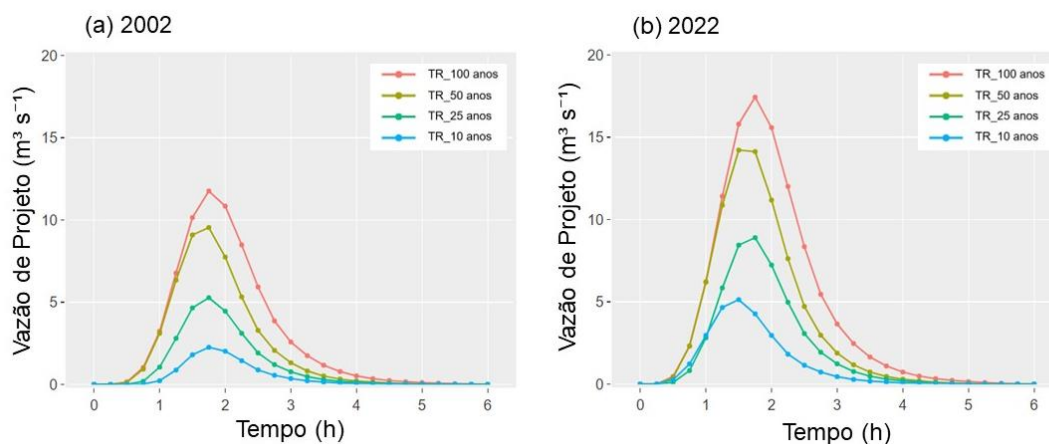
t (min)	TR (Anos)			
	10	25	50	100
15	25.98	29.61	32.31	34.98
30	37.23	42.26	45.99	49.69
45	44.38	50.34	54.76	59.15
60	49.63	56.31	61.27	66.20
75	53.79	61.08	66.48	71.85

Fonte. Elaborada pelos autores.

As Figuras 3 e 4 apresentam as curvas de vazão de projeto para as sub-bacias dos ribeirões Fojo e Perdizes, respectivamente, no município de Campos do Jordão, SP, comparando os anos de 2002 (3a e 4a) e 2022 (3b e 4b), para os tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Em ambas as

sub-bacias, observa-se um aumento significativo das vazões de pico em 2022, especialmente para os tempos de retorno mais elevados, como 50 e 100 anos.

Figura 3. Curvas de vazão de projeto para a sub-bacia do ribeirão Fojo: 2002 (a) e 2022 (b).

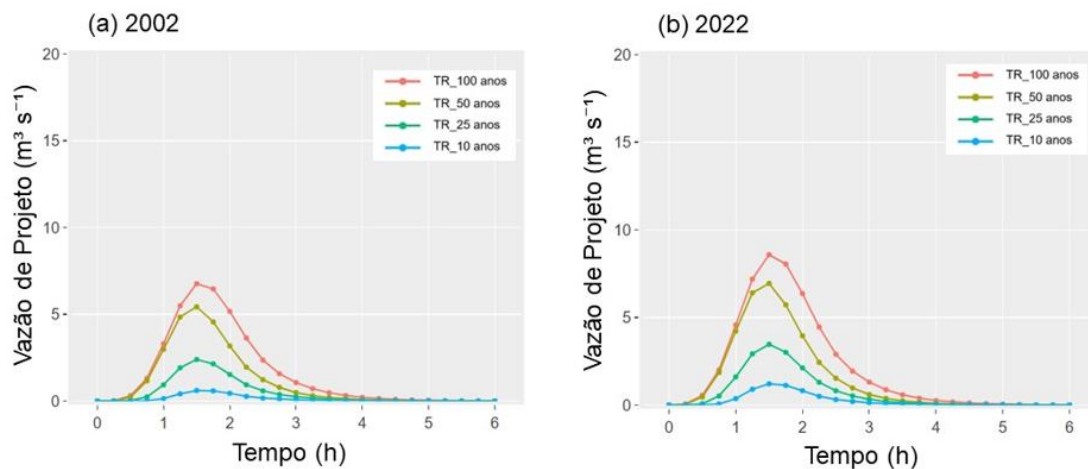


Fonte. Elaborada pelos autores.

Esse comportamento reflete as mudanças no uso e cobertura do solo ao longo do período, com destaque para a expansão das áreas urbanizadas, que reduziram a capacidade de infiltração e intensificaram o escoamento superficial direto. Além disso, as curvas de 2022 mostram uma redução no tempo de concentração, indicando um comportamento hidrológico mais acentuado, possivelmente relacionado ao adensamento urbano e à substituição de áreas florestais por superfícies impermeáveis. Esses resultados evidenciam os impactos cumulativos das transformações antrópicas nas bacias e reforçam a necessidade de estratégias de manejo sustentável e resiliência hídrica para mitigar os riscos associados ao aumento do escoamento superficial.

A Figura 4 apresenta as curvas de vazão de projeto para a bacia hidrográfica do ribeirão Perdizes, comparando os anos de 2002 (Figura 4a) e 2022 (Figura 4b), com tempos de retorno de 10, 25, 50 e 100 anos. Observa-se um aumento perceptível das vazões de pico em 2022 em relação a 2002, especialmente para os tempos de retorno maiores, como 50 e 100 anos. Esse aumento reflete as alterações no uso e cobertura do solo ocorridas ao longo do período, com destaque para a expansão das áreas urbanizadas, que reduzem a capacidade de infiltração e aumentam o escoamento superficial direto. Além disso, a forma mais acentuada das curvas em 2022 sugere uma redução no tempo de concentração, possivelmente associada ao adensamento urbano e à substituição de áreas florestais por superfícies impermeáveis. Esses resultados evidenciam os impactos hidrológicos do processo de urbanização na bacia, demandando estratégias de manejo e mitigação voltadas à resiliência hídrica.

Figura 4. Curvas de vazão de projeto para a sub-bacia do ribeirão Perdizes: 2002 (a) e 2022 (b).



Fonte. Elaborada pelos autores.

O que se nota de diferente entre as Figuras 3 e 4 é a magnitude das vazões de pico e o comportamento das curvas hidrológicas nas sub-bacias do ribeirão Fojo e do ribeirão Perdizes. Em ambos os anos analisados (2002 e 2022), as vazões de pico são mais elevadas na sub-bacia Fojo, alcançando aproximadamente $18 \text{ m}^3/\text{s}$ em 2022 para o tempo de retorno de 100 anos, enquanto na sub-bacia Perdizes os valores máximos chegam a cerca de $7 \text{ m}^3/\text{s}$. Essa diferença pode ser atribuída ao maior tamanho da área e à maior declividade média da sub-bacia Fojo, que favorecem um escoamento mais rápido e intenso.

Adicionalmente, em 2022, os hidrogramas apresentaram picos mais elevados em ambas as sub-bacias devido ao aumento dos valores de chuvas máximas. As alterações no uso e ocupação do solo entre 2002 e 2022, especialmente a redução das áreas de Floresta em 6% na sub-bacia Perdizes e 18% na sub-bacia Fojo, também contribuíram para o aumento das vazões. A substituição de florestas por pastagens e áreas urbanizadas reduziu a capacidade de infiltração, intensificando o escoamento superficial. Conforme Santos *et al.* (2012), as taxas de infiltração em áreas de vegetação nativa são de 298 mm/h , enquanto em pastagens caem para 63 mm/h , o que evidencia o impacto direto das mudanças no uso do solo sobre o comportamento hidrológico das sub-bacias.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos evidenciam que as mudanças no uso e cobertura do solo nas sub-bacias dos ribeirões Fojo e Perdizes provocaram alterações significativas no comportamento hidrológico ao longo do período analisado (2002–2022). Os hidrogramas demonstraram um aumento expressivo nas vazões de pico e uma redução no tempo de concentração, especialmente nas áreas com maior declividade e urbanização, como a sub-bacia do ribeirão Fojo. Enquanto a expansão das áreas

urbanizadas e dos mosaicos de uso reduziu a capacidade de infiltração, a substituição das áreas florestais por pastagens intensificou o escoamento superficial direto. Esse cenário é corroborado pelos valores de taxas de infiltração apresentados por Santos *et al.* (2011), que indicam 298 mm/h em áreas florestais e apenas 63 mm/h em áreas de pastagem, refletindo a sensibilidade das sub-bacias às transformações no uso do solo.

A análise dos dados revela que a sub-bacia do Fojo, devido ao maior tamanho da área e à declividade mais acentuada, apresenta maior vulnerabilidade a eventos hidrológicos extremos, como demonstrado pelos picos de vazão superiores em relação à sub-bacia Perdizes. Conforme apontado por Ferreira *et al.* (2023a; 2023b), esse comportamento reforça a importância de ações preventivas e de mitigação voltadas a regiões de maior suscetibilidade, principalmente em função da expansão urbana desordenada observada próximo ao exutório das sub-bacias.

Do ponto de vista metodológico, o método CN (Curve Number) mostrou-se uma ferramenta eficiente para a estimativa do escoamento superficial e para a construção dos hidrogramas, possibilitando a quantificação dos impactos das mudanças no uso do solo. No entanto, é importante reconhecer algumas limitações desse método, como a necessidade de calibração local dos valores de CN e a sua dependência de dados atualizados sobre uso e ocupação do solo. A sensibilidade do modelo a erros cartográficos e a falta de séries temporais contínuas de dados hidrológicos também podem influenciar os resultados, sugerindo a necessidade de combinar o CN com outras abordagens, como medições em campo e modelagens mais complexas.

Diante desse cenário, este estudo responde à pergunta inicial ao demonstrar que as mudanças no uso e cobertura do solo impactam diretamente o regime hidrológico, alterando as vazões e o tempo de resposta das sub-bacias. A aplicação do método CN, associada às ferramentas de geoprocessamento, possibilitou identificar áreas críticas e quantificar as transformações hidrológicas ao longo do período analisado.

Por fim, é necessário avançar em estratégias de manejo sustentável para fortalecer a resiliência hídrica das sub-bacias, em consonância com os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) da Agenda 2030. Recomenda-se a implementação de infraestrutura verde, como pavimentos permeáveis, áreas de infiltração e criação de zonas de amortecimento em áreas críticas. Além disso, ações de reflorestamento e controle da expansão urbana desordenada são fundamentais para mitigar os impactos hidrológicos e promover o equilíbrio ambiental. Em uma perspectiva futura, a consideração dos cenários de mudanças climáticas e a intensificação do monitoramento contínuo são essenciais para antecipar riscos e orientar políticas públicas que assegurem a gestão eficiente dos recursos hídricos.

Tal abordagem, mais integrada e preventiva, permitirá que os sistemas hidrológicos respondam de forma eficiente às pressões antrópicas, ao mesmo tempo em que contribui para a sustentabilidade ambiental e urbana na região de Campos do Jordão, SP.

5 CONCLUSÃO

O objetivo geral deste estudo foi investigar os impactos das mudanças no uso e cobertura do solo sobre o regime hidrológico das sub-bacias dos ribeirões Fojo e Perdizes, no município de Campos do Jordão, SP, utilizando o método CN (Curve Number) e ferramentas de geoprocessamento para estimar as vazões de projeto. A pesquisa permitiu identificar o aumento das vazões de pico e a redução do tempo de concentração, especialmente no ano de 2022, em resposta à expansão das áreas urbanizadas e à redução das áreas florestais.

Como contribuição científica, o estudo demonstrou a relação direta entre as mudanças no uso do solo e as alterações hidrológicas, evidenciando o impacto da urbanização e do avanço das pastagens sobre o escoamento superficial. O uso do método CN, integrado às técnicas de geoprocessamento, mostrou-se uma abordagem robusta e acessível para modelagem hidrológica, oferecendo subsídios técnicos que podem embasar o planejamento ambiental e ações de mitigação dos riscos associados ao aumento do escoamento superficial.

Dentre as contribuições práticas e sociais, destacam-se a possibilidade de orientar políticas públicas de gestão hídrica sustentável e de manejo do solo, além de fornecer informações fundamentais para o controle da urbanização desordenada, a preservação das áreas florestais remanescentes e a implementação de infraestruturas verdes nas sub-bacias analisadas. Tais estratégias podem mitigar problemas como inundações, erosão e assoreamento, garantindo a resiliência hídrica e a melhoria da qualidade de vida da população local.

A principal limitação da pesquisa está relacionada à dependência dos valores de CN calibrados, que, apesar de serem amplamente utilizados, podem não capturar integralmente as especificidades locais das sub-bacias estudadas. Além disso, a escassez de dados hidrológicos observacionais contínuos restringiu a validação mais precisa dos hidrogramas gerados, tornando necessária a utilização de métodos estimativos baseados em parâmetros secundários e literatura disponível.

Para pesquisas futuras, sugere-se a realização de medições diretas em campo, incluindo dados de infiltração, vazão e uso do solo, a fim de melhorar a calibração local dos modelos e aumentar a precisão das estimativas. Adicionalmente, é recomendável a aplicação de modelos hidrológicos mais complexos, como o SWAT ou HEC-HMS, que permitam simulações de cenários de mudanças climáticas e de crescimento urbano. Por fim, futuros estudos poderiam explorar a implementação de

soluções baseadas na natureza para mitigação dos impactos hidrológicos, como o uso de pavimentos permeáveis, recuperação de áreas degradadas e criação de zonas de amortecimento em áreas críticas das bacias.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os autores também gostariam de agradecer ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais (PPGCA) da Universidade de Taubaté e ao Instituto de Pesquisas Ambientais em Bacias Hidrográficas (IPABHi) pelo apoio técnico e institucional.

REFERÊNCIAS

- ARAI, F. K., PEREIRA, S. B., & GONÇALVES, G. G. (2012). Characterization of water availability in a hydrographic basin. *Engenharia agrícola*, 32, 591-601. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000300018>
- CALIFORNIA. Division of Highways. (1944). *California culvert practice*.
- FAN, F., DENG, Y., HU, X., & WENG, Q. (2013). Estimating composite curve number using an improved SCS-CN method with remotely sensed variables in Guangzhou, China. *Remote Sensing*, 5(3), 1425-1438. <https://doi.org/10.3390/rs5031425>
- FERREIRA, C. S. S., TARGA, M. S., & CATELANI, C. S. (2023a). Temporal evolution of suspended solids in the management of medium-sized watersheds in the Metropolitan Region of Paraíba Valley. *Revista Ambiente & Água*, 18, e2945. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2945>
- FERREIRA, W. J., DA SILVA RICHETTO, K. C., & CHAGAS, E. V. (2023b). Educação Ambiental: um caminho sustentável para combater as mudanças climáticas. *Revista Biociências*, 29(especial).
- GUERRA, A. J. T. (1994). *Geomorfologia: uma atualização de bases e conceitos*. Bertrand Brasil.
- HUFF, F. A. (1967). Time distribution of rainfall in heavy storms. *Water resources research*, 3(4), 1007-1019. <https://doi.org/10.1029/WR003i004p01007>
- INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). (2024). *Estimativas da população residente no Brasil e unidades da federação*. <https://cidades.ibge.gov.br/>
- MAPBIOMAS - Projeto MapBiomass – Coleção [versão 9] da Série Anual de Mapas de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, acessado em [20/09/2024] por meio do link: <http://brasil.mapbiomas.org>
- MARTINEZ JÚNIOR, F., & MAGNI, N. L. G. (1999). Governo do Estado de São Paulo. secretaria de recursos hídricos, saneamento e obras departamento de águas e energia elétrica centro tecnológico de hidráulica e recursos hídricos.
- NASCIMENTO, D. M., CAVALIERI-POLIZELI, K. M. V., DA SILVA, A. H., FAVARETTO, N., & PARRON, L. M. (2019). Soil physical quality under long-term integrated agricultural production systems. *Soil and Tillage Research*, 186, 292-299. <https://doi.org/10.1016/j.still.2018.08.016>
- OLIVEIRA, J. B. (1999). *Solos do Estado de São Paulo: descrição das classes registradas no mapa pedológico* (Boletim Técnico nº 45). Campinas, SP: Instituto Agrônomo de Campinas.
- SANTOS, A. M. D., TARGA, M. D. S., BATISTA, G. T., & DIAS, N. W. (2012). Análise morfométrica das sub-bacias hidrográficas Perdizes e Fojo no município de Campos do Jordão, SP, Brasil. *Revista Ambiente & Água*, 7, 195-211. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.945>
- SANTOS, A. M., DOS SANTOS TARGA, M., BATISTA, G. T., & DIAS, N. W. (2011). Florestamento compensatório com vistas à retenção de água no solo em bacias hidrográficas do município de Campos do Jordão, SP, Brasil. *Ambiente & Água-An Interdisciplinary Journal of Applied Science*, 6(3), 110-126. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=92821301008>

SARTORI, A., LOMBARDI NETO, F., & GENOVEZ, A. M. (2005). Classificação hidrológica de solos brasileiros para a estimativa da chuva excedente com o método de serviço de conservação do solo dos Estados Unidos – Parte 1: Classificação. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, 10(4), 5–18.

SETZER, J., & PORTO, R. L. L. (1979). Tentativa de avaliação do escoamento superficial de acordo com o solo e seu recobrimento vegetal nas condições do Estado de São Paulo. *Boletim Técnico do DAAE*, 2(2), 82–135.

SOULIS, K. X. (2021). Soil conservation service curve number (SCS-CN) Method: Current applications, remaining challenges, and future perspectives. *Water*, 13(2), 192. <https://doi.org/10.3390/w13020192>

TARGA, M. S. (2011). Vazão de projeto em bacias hidrográficas rurais com áreas em declive. Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Universidade de Taubaté - UNITAU, *Repositório Eletrônico Ciências Agrárias*, Coleção Recursos Hídricos.