

# ÍNDICES DE PRESSÃO HIDROLÓGICA E CENÁRIOS HIPOTÉTICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS

*HYDROLOGICAL PRESSURE INDICES AND HYPOTHETICAL SCENARIOS IN URBAN WATERSHEDS*

*ÍNDICES DE PRESIÓN HIDROLÓGICA Y ESCENARIOS HIPOTÉTICOS EN CUENCAS HIDROGRÁFICAS URBANAS*

## RESUMO

Os estudos sobre drenagem urbana são relevantes no Brasil e no mundo. Como efeito, destacam-se pesquisas que aplicam modelos hidrológicos de abordagem preditiva. Tais iniciativas ganham força devido aos cenários de ocupação das bacias hidrográficas e de suas perturbações na dinâmica hidrológica de superfície. No âmbito da modelagem preditiva, esta pesquisa tem como objetivo avaliar os impactos da expansão urbana, em três microbacias da Região Metropolitana de Goiânia (RMG), mediante a elaboração de um Índice de Pressão Hidrológica (IPH). Os procedimentos metodológicos envolveram a associação entre dois modelos, um de projeção de crescimento da área urbana, e o outro, da previsão de geração de escoamentos superficiais. Os dados para as projeções de crescimento urbano foram manipulados no software Dinâmica EGO, pela abordagem do autômato celular. As variáveis que representam a dinâmica das águas de superfície foram avaliadas via álgebra de mapas em um Sistema de Informação Geográfica (SIG). Os resultados demonstraram que a aplicação dos dois modelos conjugados permitiu estabelecer de forma menos subjetiva, a relação do crescimento da malha urbana e suas alterações na dinâmica hidrológica, tanto em uma perspectiva histórica, como de cenários hipotéticos. Além disso, dos cenários hipotéticos, pôde-se observar que à medida que se ampliam as áreas urbanas, eleva-se o fluxo do escoamento superficial e, portanto, do IPH.

**Palavras-chave:** Expansão urbana, Parâmetros hidrológicos, Modelagem ambiental.

## ABSTRACT

Studies on urban drainage are relevant in Brazil and worldwide. In fact, research that applies predictive hydrological models stands out. Such initiatives gain strength due to the scenarios of occupation of watersheds and their disturbances in surface hydrological dynamics. Thus, within the scope of predictive modeling, this research aims to evaluate the impacts of urban expansion in three micro-watersheds of the Metropolitan Region of Goiânia (RMG) through the development of a Hydrological Pressure Index (HPI). The methodological procedures involved the association between two models: one for projecting urban area growth and the other for predicting surface runoff generation. The data for growth projection were manipulated using the Dinâmica EGO software, using the cellular automaton approach. The variables representing the dynamics of surface water were evaluated using map algebra in a Geographic Information System (GIS). The results demonstrated that the application of the two combined models allowed for a less subjective establishment of the relationship between urban grid growth and its alterations in hydrological dynamics, both from a historical perspective and hypothetical scenarios. Furthermore, from the hypothetical scenarios, it can be observed that as urban areas expand, the flow of surface runoff and therefore the HPI increase.

**Keywords:** Urban expansion, Hydrological parameters, Environmental modelling.

 Carlos Fabricio Assunção da Silva <sup>a</sup>

 Rodrigo Lima Santos <sup>b</sup>

 Fabrizia Gioppo Nunes <sup>c</sup>

 Alex Mota dos Santos <sup>d</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Recife, PE, Brasil

<sup>b</sup> Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil

<sup>c</sup> Universidade Federal de Goiás (UFG), Goiânia, GO, Brasil

<sup>d</sup> Universidade Federal do Sul da Bahia (UFSB), Itabuna, BA, Brasil

DOI: 10.12957/geouerj.2024.78606

## Correspondência:

calos.assuncao@ufpe.br

**Recebido em:** 17 ago. 2023

**Revisado em:** 19 mar. 2024

**Aceito em:** 01 ago. 2024





## RESUMEN

Los estudios sobre drenaje urbano son relevantes tanto en Brasil como en el resto del mundo. En consecuencia, se destacan investigaciones que aplican modelos hidrológicos de enfoque predictivo. Estas iniciativas cobran fuerza debido a los escenarios de ocupación de las cuencas hidrográficas y sus perturbaciones en la dinámica hidrológica superficial. En el ámbito de la modelización predictiva, esta investigación tiene como objetivo evaluar los impactos de la expansión urbana en tres microcuencas de la Región Metropolitana de Goiânia (RMG), a través de la elaboración de un Índice de Presión Hidrológica (IPH). Los procedimientos metodológicos involucraron la combinación de dos modelos, uno para proyectar el crecimiento del área urbana y otro para prever la generación de escorrentía superficial. Los datos para las proyecciones de crecimiento urbano fueron manipulados en el software Dinámica EGO, utilizando el enfoque del autómata celular. Las variables que representan la dinámica de las aguas superficiales se evaluaron a través del álgebra de mapas en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Los resultados demostraron que la aplicación de los dos modelos combinados permitió establecer de manera menos subjetiva la relación entre el crecimiento de la trama urbana y sus alteraciones en la dinámica hidrológica, tanto desde una perspectiva histórica, como en escenarios hipotéticos. Además, de los escenarios hipotéticos se pudo observar que a medida que las áreas urbanas se expanden, aumenta el flujo de la escorrentía superficial y, por lo tanto, del IPH.

**Palabras Clave:** Expansión urbana, Parámetros hidrológicos, Modelización ambiental.



## INTRODUÇÃO

A elaboração de modelos hidrológicos para o ordenamento do uso do solo em bacias hidrográficas urbanas tem adquirido relevância nas pesquisas científicas (UNGARO *et al.*, 2014; MCCABE *et al.*, 2017). Recentemente, as abordagens do quantitativo dos fluxos hidrológicos, direcionadas à análise das vulnerabilidades e resiliências das cidades, passam a assumir elevada importância no planejamento e na gestão dos recursos hídricos (FOX, *et al.* 2019; COVILLE; ENDRENY; NOWAK, 2020). Neste sentido, podemos salientar o manejo adequado das águas de superfície, que tem papel fundamental na dinâmica hidrológica urbana (TUCCI, 2008). Entretanto, esse processo não envolve somente aspectos hidrológicos e hidráulicos, mas engloba também questões ambientais, sociais, de planejamento urbano e de segurança pública (ARAÚJO *et al.*, 2017).

Em todo o globo, incluindo o Brasil, crescem as demandas por soluções de serviços ecossistêmicos sustentáveis da drenagem urbana, visto que as cidades são consideradas como os ambientes mais alterados das paisagens, especialmente quando se olha para os riscos de inundações pluviais associadas às mudanças climáticas e aos processos intensos de evolução das malhas urbanas (ROSA; PAPPALARDO, 2020).

De acordo com Rezaei *et al.* (2019), os principais fatores que afetam a dinâmica das águas de superfície em bacias hidrográficas urbanas são as ações antropogênicas, aspectos geomorfológicos e meteorológicos. Para os referidos autores, os diferentes cenários podem ser desenhados com base na análise da situação atual e das prováveis condições de desequilíbrio ambiental. Assim, as formulações de modelos hidrológicos se apropriam de índices e indicadores que buscam caracterizar a realidade do ambiente, por meio de critérios selecionados (FENG *et al.* 2021).

Nas literaturas, nacionais e internacionais, várias são as abordagens que têm sido empregadas para estudar os efeitos das alterações do ambiente sobre a dinâmica de bacias hidrográficas, principalmente, aquelas direcionadas aos modelos de cenários atuais e hipotéticos (IVANOV *et al.*, 2004; KOURTIS; TSIHRINTZIS, 2021). Em destaque, encontra-se a modelagem hidrológica espacialmente distribuída que é definida como uma representação matemática dos fluxos de água e seus constituintes, distribuídos no espaço e tempo (ROUSSEAU *et al.*, 2011).

Ademais, já é de conhecimento que em bacias hidrográficas altamente urbanizadas, o escoamento das águas de superfície é responsável pela ocorrência de inúmeros problemas ambientais, incluindo a formação de ciclos severos de inundações e alagamentos, que podem ser agravados pelo aumento da intensidade das chuvas (SABÓIA *et al.*, 2017; PUMO *et al.*, 2017; BEN-DAOUD *et al.*, 2022). Inclusive, o Marco de Sendai -



*Framework for Disaster Risk Reduction* (UNDRR, 2019), propõe uma de série medidas para a redução de risco de desastres naturais, em todos os níveis, seja no contexto das alterações climáticas e/ou de outras vulnerabilidades associadas a alta intensificação dos processos exógenos da dinâmica da Terra.

No Brasil, Mendes e Santos (2022) chamam a atenção para as limitações do planejamento e da gestão sustentável das águas pluviais urbanas, destacando que o país necessita romper barreiras históricas da ocupação pelo modelo convencional/higienista de manejo das águas de chuvas, ainda predominante. De acordo com os referidos autores, o foco da infraestrutura de base sustentável deve incluir o uso adequado do solo urbano e de ações preventivas, sustentáveis e integradas às demais políticas de controle da drenagem urbana. Como exemplo, citamos as medidas não estruturais de zoneamento urbano, preventivas dos desastres naturais e uma rede estrategicamente planejada de áreas naturais e seminaturais, incluindo espaços verdes e aquáticos, concebidas e geridas para fornecer uma vasta gama de serviços ecossistêmicos a diversas escalas (MONTEIRO; FERREIRA; ANTUNES, 2020).

Neste contexto, Loewen e Pinheiro (2017) consideram que as técnicas que estabelecem relações entre os mecanismos de escoamento superficial e o uso predominante da terra, podem ajudar a definir o planejamento adequado de bacias hidrográficas. Hawley e Bledsoe (2011) e Prosdocimi *et al.* (2015) já destacavam os impactos da perda da capacidade da permeabilidade do solo urbano na redução do tempo de concentração ( $T_c$ ) da água na bacia e, portanto, do aumento do volume das águas de superfície, e conseqüentemente, dos picos de inundações e alagamentos. Assim, identificar os mecanismos que promovem a geração do escoamento superficial e suas dinâmicas correlatas, pode ajudar a minimizar os danos ambientais resultantes.

Em Goiânia, já existem alguns estudos que têm se preocupado com a questão do uso e cobertura do solo e escoamento superficial das águas em bacias hidrográficas da cidade (SANTOS, 2010; NUNES, 2012; ROCHA *et al.*, 2021). Porém, neste artigo, diferente aos estudos anteriores, procurou-se avançar nas técnicas da modelagem preditiva, associada a um modelo hidrológico distribuído, para retratar cenários atuais e futuros da dinâmica da água de superfície em três bacias hidrográficas com características de urbanização distintas.

Assim sendo, este trabalho tem por objetivo avaliar os impactos da expansão urbana, em três microbacias da Região Metropolitana de Goiânia (RMG), mediante a elaboração de um Índice de Pressão Hidrológica (IPH). Desse modo, procurou-se estimar as alterações dos principais parâmetros hidrológicos ao longo de intervalos de tempo selecionados, reconhecendo padrões de crescimento urbano e projetando possíveis cenários futuros de amplitudes do escoamento superficial, e conseqüente aumento das pressões hidrológicas. Para

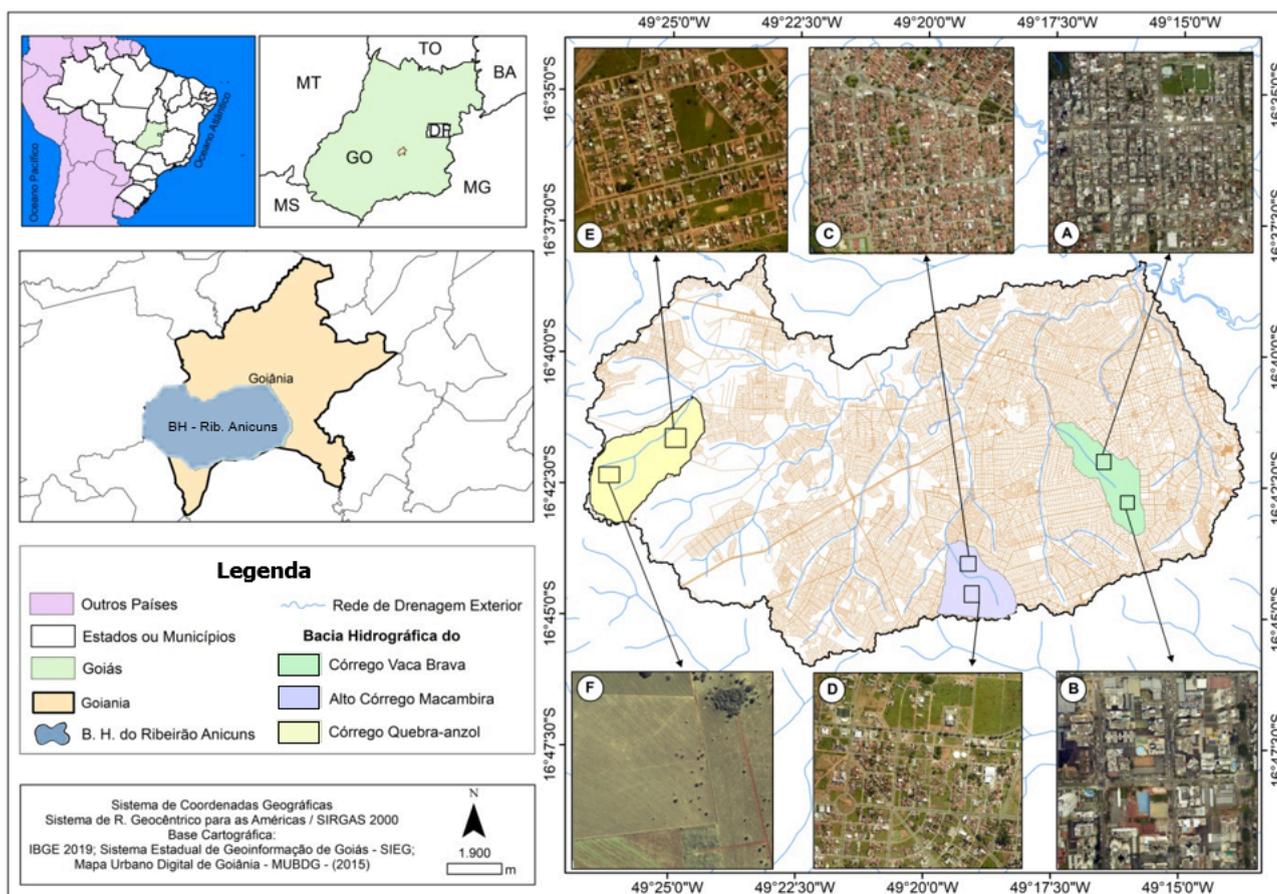
tanto, utilizou-se de técnicas de classificação de imagens de sensoriamento remoto, modelagem da expansão urbana e de cenários hidrológicos.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização da área de estudo

A área de estudo compreende as bacias hidrográficas dos Córregos: Vaca Brava (BHCVB), Alto Córrego Macambira (BHACM) e Quebra-Anzol (BHCQA), localizadas na porção centro-sul do município de Goiânia, capital do estado de Goiás. Essas bacias hidrográficas possuem as seguintes áreas: 4,8 km<sup>2</sup> para o Vaca Brava, 9,1 km<sup>2</sup> para o Alto Córrego Macambira e 4,9 km<sup>2</sup> para o Quebra-Anzol. Elas pertencem à região hidrográfica do Ribeirão Anicuns, a mais urbanizada do município, conforme ilustrado na Figura 1.

Figura 1 – Localização das bacias hidrográficas em estudo



Fonte: Elaborado pelos autores.



As três microbacias foram selecionadas em função das suas condições diferenciadas de crescimento urbano e, por apresentarem, pontos de alagamentos e/ou inundações, recorrentes na cidade de Goiânia (SANTOS; ROMÃO, 2010; NUNES, 2012; ROCHA et al., 2021). Neste sentido, foi possível validar um modelo hidrológico preditivo, para pequenas bacias hidrográficas, em distintas condições de urbanização.

De acordo com o censo demográfico de 2022, mostram que a população do município de Goiânia foi a que mais cresceu em todo o país nos últimos 12 anos, com um aumento de 18,9% no número de habitantes, em comparação ao censo de 2010 (IBGE, 2023), ou seja, mais de 390 mil pessoas.

Dentre as três bacias estudadas, as BHCVB e BHACM são as duas mais urbanizadas. A BHCVB é formada por um aspecto de adensamento de suas edificações predominantemente verticalizadas, e com cerca de 80% de sua área constituída pelo núcleo urbano de Goiânia. Já a BHACM é definida por extensas áreas urbanizadas, no entanto, com um padrão de adensamento e verticalização menor que a anterior.

Por sua vez, a BHCQA é marcada por um baixo percentual da malha urbana, menos de 10% e ainda em processo de consolidação. Inicialmente, a bacia hidrográfica era formada pela cobertura vegetal típica do Bioma Cerrado, com predomínio de formação florestal e arbórea. Mais recentemente, em virtude dos processos de conversão das tipologias de uso e cobertura da terra, sobressai as feições de gramíneas, em solos compactados, pelo pisoteio do gado bovino (RIBEIRO; WALTER, 2008).

As três bacias estão localizadas na região de clima tropical do Centro-Oeste brasileiro. As precipitações costumam ser concentradas em um período característico, que vai de novembro a abril. Já entre os meses de maio a outubro predomina a estação seca, evidenciando bem a sazonalidade do sistema biogeográfico da região, marcada por um período seco, e o outro chuvoso (BARBOSA; ARAÚJO, 2020).

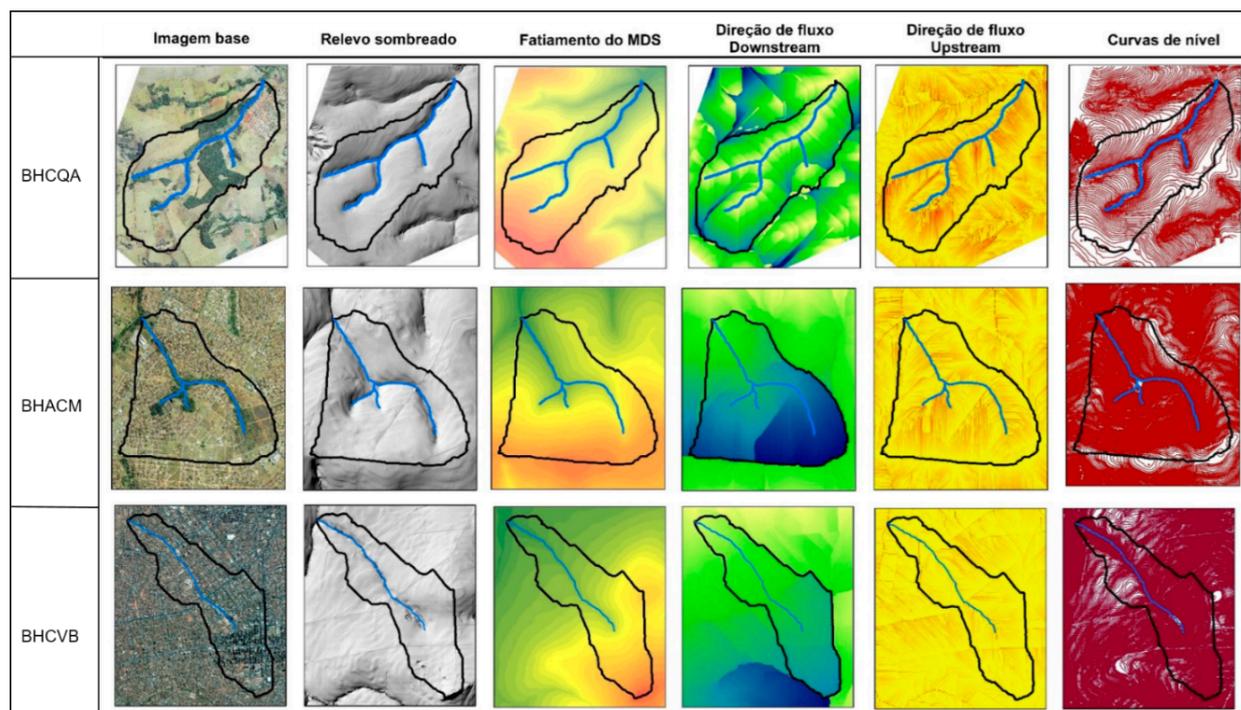
Considerando os eventos de precipitações extremas ocorridos em Goiânia, e verificados por Nascimento *et al.* (2019), entre 1961 e 2018, as variações de acordo com a média móvel ocorrem mais ou menos com intervalos de três anos. Tendo em vista, apenas os cinco eventos extremos mais significativos, tem-se, respectivamente, os anos de 2005 (136,6 mm), 1972 (134 mm), 1996 (127,8 mm), 1969 (124,7 mm) e 2014 (116,8 mm). Conforme os autores citados acima, o último evento analisado, ou seja, o de 2014, representou cerca de 91% da precipitação esperada para o mês de abril. Este elevado índice de precipitação causou grandes danos para a cidade de Goiânia, como “problemas de apagões, pontos de alagamentos, arrastamento de veículos, congestionamentos, destruição patrimonial e elevação de cerca de 50 cm dos cursos de água” (NASCIMENTO *et al.*, 2019).

Do ponto de vista geomorfológico, a região hidrográfica que compreende as bacias em análise é constituída por planaltos, chapadas, terraços e fundos de vales (CASSETI, 1992). Pode-se avaliar que as três bacias hidrográficas são marcadas por variações altimétricas entre 724 m à 905 m, configurando um desnível altimétrico que varia, em média, 181 m ao longo das áreas de captação à jusante. Em geral, a declividade do terreno é baixa, com exceção de alguns trechos do canal principal, formadores de fundos de vales mais encaixados. Quanto aos tipos de solos, verifica-se o predomínio de Latossolos Vermelhos e de associações entre Cambissolos Háplicos e Argissolos Vermelhos, além de associações de Neossolos Flúvicos com Gleissolos Háplicos. Este último, localizado nas regiões das planícies de inundações.

### Procedimentos técnicos e operacionais

A delimitação da área de contribuição das bacias de drenagem foi realizada a partir da avaliação de um conjunto de dados específicos. Para tanto, foi utilizado o Modelo Digital do Terreno (MDT) e seus respectivos produtos geomorfométricos como: (a) relevo sombreado; (b) MDT fatiado de acordo com as classes de altitude; (c) direção de fluxos, elaborada pelos modelos *downstream* e *upstream* e; (d) curvas de nível do terreno (Figura 2). A conferência das redes de drenagem foi executada via ajustes manuais, com imagem de alta resolução espacial do *Google Earth Pro*.

Figura 2 – Delimitação da área de contribuição das bacias hidrográficas em estudo e variáveis geomorfométricas



Fonte: Elaborado pelos autores.



O MDT utilizado corresponde a um levantamento aerofotogramétrico realizado em 2016, com sensor *Light Detection and Ranging – LIDAR*, obtido junto à Prefeitura Municipal de Goiânia. Do MDT também foram geradas as declividades do terreno e a curvatura vertical das encostas para as três bacias em análise.

Para o levantamento do uso e cobertura da terra e verificação da malha urbana foram utilizadas fotografias aéreas convencionais dos anos de 2002 e 2011, obtidas junto à Prefeitura Municipal de Goiânia. As imagens referentes ao ano de 2020 foram obtidas por meio do SAS.Planet, um software open source que oferece acesso aos principais serviços de mapas *online*. Nas fotografias aéreas e imagens do SAS.Planet, aplicou-se o algoritmo *Segment Mean Shift*, presente na versão 10.6.1 do *ArcMap*, com a finalidade de homogeneizar os detalhes espectrais internos das classes a serem mapeadas. As classes de uso e cobertura da terra adotadas foram: solo exposto, gramíneas compactadas, gramíneas não compactadas, vegetação arbórea, vegetação arbustiva, superfícies pavimentadas, áreas edificadas e massa d'água.

Em seguida, e de posse das amostras de treinamento das classes a serem mapeadas, foi aplicado o método de classificação *Maximum Likelihood Classification*. Neste método, o algoritmo classificador assume que a imagem é composta por *pixels* distribuídos e calcula a probabilidade, de determinado *pixel*, pertencer a uma das classes delimitadas.

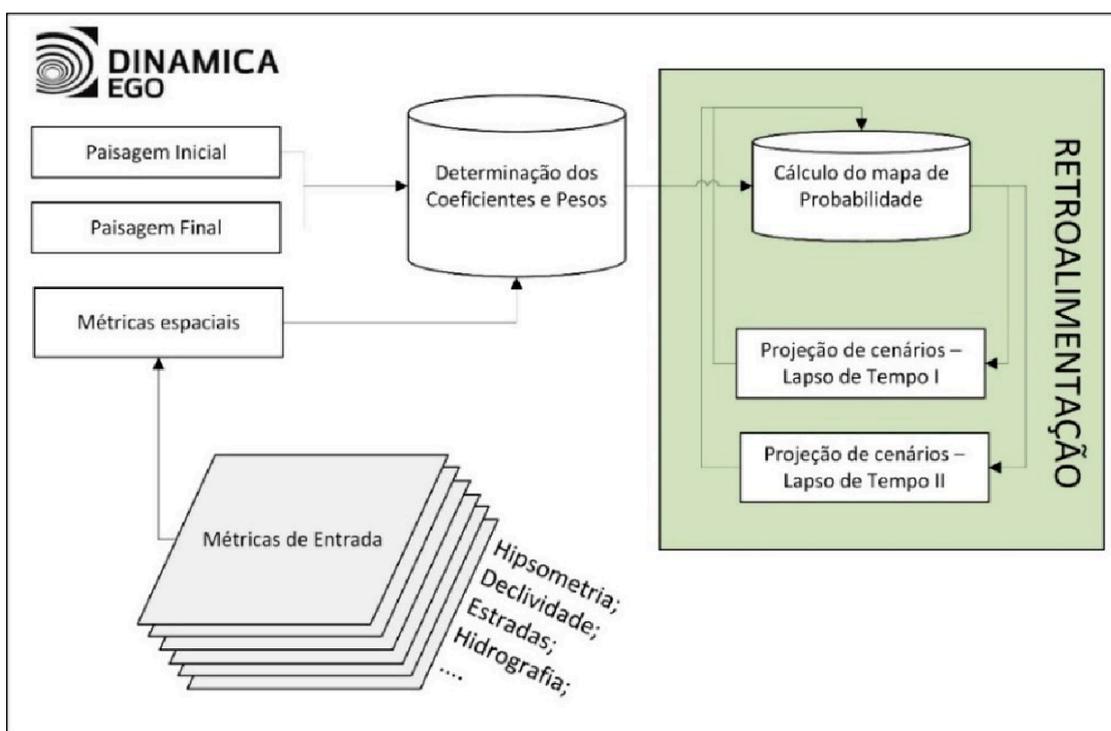
Para avaliar a qualidade das classificações do uso e cobertura da terra, estas foram submetidas a análise de sua acurácia com o auxílio do *plugin Accuracy Assessment of Thematic Maps (AcATaMa)*. O AcATaMa, é *plugin* do *software* QGIS que opera baseado na conferência visual de amostras das classes mapeadas. As amostras são indicadas aleatoriamente e estratificadas segundo a predominância de cada classe temática mapeada. Foi definido um limiar de 10 inspeções por classe/ano em cada mapa gerado, para as três bacias hidrográficas em estudo.

O modelo de projeção de crescimento da malha urbana foi realizado utilizando o *software* construtor de modelos Dinâmica EGO, elaborado pelo Centro de Sensoriamento Remoto da Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG), em sua versão 5.10. O Dinâmica EGO permite avaliar o comportamento das áreas urbanas em função da entrada de dados, de modo a gerar cenários no espaço-tempo, baseados em comportamentos/tendências por meio da abordagem dos autômatos celulares ou *cellular automata (CA)*. Segundo Pedrosa e Câmara (2004, p.1) a abordagem dos autômatos celulares preconiza que “[...] o espaço é representado através de um *array* de células, em que cada célula pode assumir diferentes estados ao longo do tempo”.

Nesse processo, foi utilizado o método dos pesos e evidências, que funciona por meio dos valores determinados nas taxas de transição, de modo que valores positivos favorecem a ocorrência de transição dos *pixels* pertencentes a determinada classe para outra. Já os valores negativos indicam baixa possibilidade da ocorrência de mudança e os valores próximos de zero têm tendência inalterada de modificação.

Assim, para a geração do modelo executou-se três etapas básicas que consistiram em: (i) entrada das paisagens, inicial e final; (ii) entrada das métricas e determinação dos pesos e; (iii) cálculos dos mapas de probabilidade e retroalimentação do modelo (Figura 3).

Figura 3 – Fluxograma da modelagem de projeção da malha urbana



Fonte: Elaborado pelos autores (2022).

As paisagens inicial e final, representadas pelos anos de 2011 e 2020, respectivamente, admitiram, como classes de cobertura simplificadas: a vegetação, a água, as áreas urbanas e as áreas com gramíneas compactadas. As métricas de entrada, utilizadas para determinar os pesos, foram as seguintes: hipsometria, declividade, distância de estradas, distância de nascentes e hidrografia. Os mapas de probabilidades foram calculados de modo que se tornou possível a projeção dos cenários futuros, por meio da definição do período de modelagem no tempo, sempre retroalimentado pelo ano anterior, para considerar a próxima probabilidade de cenário.



Para realizar a modelagem do escoamento superficial utilizou-se a proposta do *Soil Conservation Service* (SCS), revisada e ampliada pela *Federal Highway Administration* – FHA (2013). Dessa forma, o coeficiente de escoamento superficial foi estimado pela chuva efetiva, ou seja, a parcela da chuva não infiltrada e que pode ser convertida em fluxo superficial, sendo dada pela equação:

$$C = \left[ \frac{(p-0,2S)^2}{(p+0,8S)} \right] * 1/P$$

Eq. 1

Em que: C = coeficiente de escoamento superficial; P = precipitação considerada em mm e S = coeficiente de infiltração.

O valor de retenção de água potencial no solo, coeficiente (S) foi determinado pela equação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254$$

Eq. 2

Em que: S = retenção potencial, dada em (mm), que considera o tipo de solo e duas de suas propriedades, textura e profundidade e; CN = valor do Número de Escoamento (*adimensional*), que considera o tipo de cobertura do solo e sua condição de umidade antecedente.

A precipitação considerada foi a média da intensidade máxima das chuvas de Goiânia, obtidas do histórico de chuvas e de seus parâmetros sistematizados por Oliveira *et al.* (2005), formulada na equação:

$$Im = \frac{K \times T r^a}{(tc+b)^c}$$

Eq.3

Em que: Im = média das intensidades máximas de precipitação, em mm/h; T = tempo de retorno, em anos, para um evento extremo; tc = tempo de concentração do escoamento superficial, em minutos e K = 920,450; a = 0,1468; b = 12; c = 0,7599.

O tempo de concentração foi calculado pelo método cinemático, que considera a bacia em trechos homogêneos e calcula a velocidade do escoamento por segmentos (Menezes Filho; SÁ, 2019), seguindo a equação:



$$Tc = \frac{1}{60} \times \sum \frac{Li}{Vi}$$

Eq.4

Em que:  $Tc$  = tempo de concentração do escoamento superficial em minutos;  $1/60$  = fator de transformação de segundos para minutos;  $Li$  = comprimento de fluxo no segmento considerado, em metros e  $Vi$  = velocidade do escoamento superficial, em m/s.

Por sua vez, a velocidade do escoamento superficial foi estimada pela relação entre o coeficiente de escoamento superficial e a declividade (Porto, 1995), sendo representada na equação:

$$Vi = Cv \times Si^{0,5}$$

Eq.5

Em que:  $Vi$  = velocidade de escoamento superficial, em m/s;  $Cv$  = coeficiente de escoamento superficial, adimensional e  $Si$  = declividade, em %, elevada ao expoente 0,5.

### Índice de pressão hidrológica - IPH

Para a formulação matemática que calculou o IPH foi levado em consideração dois grupos de variáveis a serem empregadas na “álgebra de mapas”, as que representam as características hidrológicas das bacias e; aquelas que representam os elementos geomorfométricos da paisagem, expressas na equação:

$$IPH = \sum (Tc + Vi + 2 * (C) + S + D + H + Df + Cv)/8$$

Eq. 6

Em que:  $Tc$  = tempo de concentração em minutos;  $Vi$  = velocidade de escoamento superficial em m/s;  $C$  = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;  $S$  = coeficiente de armazenamento de água no solo em mm;  $D$  = declividade em graus;  $H$  = hipsometria em m;  $Df$  = direção de fluxo (*upstream*) e;  $Cv$  = curvatura vertical.

No que se refere às variáveis hidrológicas trabalhadas no índice, temos como parâmetros teóricos aquelas indicadas por Tucci (2001) e Rocha *et al.* (2021). Desse modo, a categoria equivalente ao tempo de concentração ( $Tc$ ) mínimo recebeu o maior peso, ou seja, peso igual a 10. Já a categoria de valores máximos



recebeu peso mínimo, uma vez que, quanto maior o intervalo de deslocamento da água na bacia, maior será a chance de não haver impactos.

Esta mesma lógica de valorização de pesos também foi empregada para o coeficiente de armazenamento de água no solo ( $S$ ), ou seja, quanto mais água for infiltrada no solo, menor será o coeficiente de escoamento superficial, e por tanto, menor será a vulnerabilidade do ambiente às águas de superfície.

Nesse cenário, a velocidade de escoamento superficial ( $V_i$ ) foi pensada de modo que as categorias com menores intervalos de velocidade recebessem o menor peso, enquanto, aquelas que representam as maiores velocidades, recebem os maiores pesos. Assim, foi considerado que, quanto maior o valor da  $V_i$ , maior será a possibilidade de o ambiente de captação da bacia sofrer pressão da circulação das águas de superfície.

O grupo das variáveis geomorfométricas foi pensado a partir da referência de Silva Neto (2013). De acordo com o referido autor, na visão da hidrologia de encostas, as áreas com declividades elevadas geralmente apresentam fluxos densos e rápidos com predomínio do escoamento superficial, enquanto as baixas declividades estão associadas ao predomínio da infiltração. Nesse sentido, o sistema de pesos utilizados seguiu uma constante crescente a partir das menores declividades, recebendo progressivamente pesos maiores, conforme a declividade aumenta.

Na variável extensão do fluxo de drenagem, os maiores pesos foram fornecidos aos canais de maior extensão/ordem, por seu potencial, de receberem a maior quantia dos fluxos superficiais em circulação na bacia (HORTON, 1945). A hipsometria, foi considerada como uma variável que reflete as unidades homogêneas do relevo. Para tanto, às baixas altitudes foram associadas a áreas de planícies e, portanto, de maior peso devido ao maior represamento das águas de superfície. Em oposição, às áreas mais elevadas do terreno, que em geral, encontram-se atreladas aos divisores de drenagem, receberam valores de pesos menores.

A geometria da encosta foi outro fator considerado. Ponderar a curvatura vertical, significa compreender que as áreas de perfil convexo estão relacionadas ao escoamento inicial e, portanto, a presença de fluxos superficiais difusos. Já no perfil côncavo, o fluxo é convergente, linear e concentrado (SILVA NETO, 2013). Desta forma, os valores associados ao IPH consistiram em um maior peso para as áreas côncavas, pesos intermediários para as áreas retilíneas e pesos baixos, para as áreas com perfil convexo. O Quadro 1 apresenta os pesos atribuídos para as variáveis consideradas, na Equação 6.



Quadro 1 – Variáveis e pesos atribuídos aos dados utilizados no cálculo do IPH

Variáveis	Bacias			Peso
	BHCQA	BHACM	BHCVB	
Tempo de concentração	407 – 630	78 – 118	64 – 110	1
	234 – 407	46 – 78	33 – 64	5
	0 – 234	0 – 46	0 – 33	10
Velocidade do escoamento superficial	0 – 0,29	0 – 0,27	0 – 0,27	1
	0,29 – 0,70	0,27 – 0,68	0,27 – 0,73	4
	0,70 – 1,08	0,68 – 1,08	0,73 – 1,15	6
	1,08 – 1,54	1,08 – 1,42	1,15 – 1,67	8
	1,54 – 3,24	1,42 – 3,90	1,67 – 5,35	10
Coeficiente de armazenamento de água no solo	2,25 – 20	2,25 – 12,5	2,25 – 12,5	10
	20 – 51	12,5 – 26,7	12,5 – 26,7	8
	51 – 128	26,7 – 42,2	26,7 – 51,2	6
	128 – 256	42,2 – 172,2	51,2 – 172,5	4
	256 – 331	172,2 – 331,3	172,5 – 331,3	1
Coeficiente de escoamento superficial	0 – 0,11	0 – 0,13	0 – 0,16	1
	0,11 – 0,38	0,13 – 0,23	0,16 – 0,54	4
	0,38 – 0,54	0,23 – 0,58	0,54 – 0,74	6
	0,54 – 0,73	0,58 – 0,79	0,74 – 0,84	8
	0,73 – 0,96	0,79 – 0,94	0,84 – 0,97	10
Declividade	0 – 1,75	0 – 1,74	0 – 2,15	1
	1,75 – 3,51	1,74 – 3,16	2,15 – 4,7	4
	3,51 – 5,96	3,16 – 4,91	4,7 – 10,2	6
	5,96 – 10,53	4,91 – 9,27	10,2 – 20,4	8
	10,53 – 29,83	9,27 – 27,8	20,4 – 50	10
Hipsometria	785 – 817	775 – 803	724 – 760	10
	817 – 836	803 – 818	760 – 786	8
	836 – 855	818 – 833	786 – 811	6
	855 – 878	833 – 849	811 – 836	4
	878 – 905	849 – 867	836 – 891	1
Extensão do fluxo de drenagem	0 – 207	0 – 273	0 – 308	1
	207 – 590	273 – 1.594	308 – 2.190	5
	590 – 2.119	1.594 – 4.106	2.109 – 8.728	10
Curvatura vertical		Côncava		10
		Retilíneo		5
		Convexa		1

Fonte: Elaborado pelos autores.

A álgebra de mapas foi realizada com a calculadora *raster* do ArcMap 10.1, versão para estudantes. Aos modelos gerados foram atribuídos intervalos de classes, em que os valores iguais ou próximo a 1 correspondem a classe de menor pressão e os valores iguais ou próximo a 10, a classe de maior pressão, além das classes intermediárias. Por fim, foram confeccionados mapas e diagramas que ilustram a distribuição espacial e temporal da pressão hidrológica nas três bacias para os anos 2002, 2011, 2020 e respectivas projeções para os anos de 2025 e 2030.



## RESULTADOS E DISCUSSÃO

A síntese dos resultados da modelagem de crescimento da malha urbana para as três bacias hidrográficas analisadas, pode ser visualizada no Quadro 2. Considerando os dados quantificados em números percentuais é evidente que o maior salto de crescimento, das áreas urbanas, está previsto logo para o primeiro período modelado, ou seja, de 2020 a 2025. Dessa forma, os valores das tendências, representados no referido Quadro, evidenciam o aumento em todos os cenários projetados, sendo a bacia hidrográfica do Córrego Vaca Brava (BHCVB), a que apresenta a menor amplitude de crescimento urbano nos períodos analisados.

Quadro 2 – Cenários de crescimento modelados para a malha urbana

Variável	Ano	Bacia Hidrográfica do Córrego Vaca Brava	Bacia Hidrográfica do Córrego Macambira	Bacia Hidrográfica do Córrego Quebra-Anzol
		(BHCVB)	(BHACM)	(BHCQA)
Malha Urbana	2020	54,7%	21,9%	5,5%
	2025	58,9%	42,9%	22,7%
	2030	61,7%	44,1%	33,2%
Tempo de concentração (Tc) em minutos	2020	102,57	99,47	446,47
	2025	101,5	92,01	306,15
	2030	98,43	80,01	261,34
Percentual de áreas com escoamento mais rápido	Acima de →	1,86 m/s	1,49 m/s	1,52 m/s
	2020	1,8%	8,4%	1,5%
	2025	1,3%	8,8%	2,5%
	2030	1,3%	9,9%	3,0%

Fonte: Elaborado pelos autores.

A referida bacia (BHCVB) representa um potencial de modificação das coberturas urbanas menos expressivo, em relação às outras, por já se encontrar bastante consolidada e comprometida. Esse fato pode ser comprovado pela estimativa de apenas 4,2% de aumento desse tipo de cobertura entre os anos de 2020 a 2025, podendo chegar a 7% de ampliação no ano de 2030, quando atingirá 61,7% de sua área coberta pela malha urbana. Como efeito deste processo, tem-se a diminuição do tempo de concentração de 102,5 minutos em 2020 para uma estimativa de 101,5 minutos em 2025 e de 98,43 minutos em 2030, ou seja, uma redução de 4,07 minutos durante todo o período analisado. O modelo ainda revela o aumento da velocidade máxima do escoamento superficial que era de 5,35 m/s em 2020 para 6,54 m/s em 2030.

A BHACM, embora não seja a mais comprometida hidrológicamente, passará de 21,8% de cobertura urbana, em 2020, para 44,1% no ano de 2030, um aumento de 22,3%. Desta forma, seu tempo de concentração (Tc) de 99,47 minutos em 2020 será reduzido para 92,01 em 2025 e para 80,1 minutos em 2030. Em outras palavras, esta redução significa um maior volume de água em um menor tempo, convergindo para o exutório da bacia (TUCCI, 2008). Porém, não podemos esquecer, que em um cenário tendencial essa redução do Tc



poderá ser ainda mais agravada, devido às alterações dos regimes de chuvas, derivadas das mudanças climáticas.

Segundo Silveira (2005) o tempo de concentração ( $T_c$ ) é um parâmetro hidrológico que é influenciado pela velocidade do escoamento superficial ( $V_i$ ), uma vez que o aumento do ( $V_i$ ) diminui o ( $T_c$ ), sendo assim, variáveis inversamente proporcionais.

O aumento do  $V_i$ , e conseqüente, diminuição do  $T_c$  em bacias hidrográficas urbanas foi alvo de profundas análises realizadas por Lima *et al.* (2007), em uma bacia experimental da região hidrográfica da Ribeira do Livramento, na região de Setúbal, Portugal. Assim, para os autores o  $T_c$  é uma variável “que assume um papel fulcral” na determinação do caudal e do hidrograma do escoamento superficial, pois com a redução da cobertura vegetal, tem-se a diminuição da macrorrugosidade do terreno, que oferece resistência a velocidade do escoamento superficial.

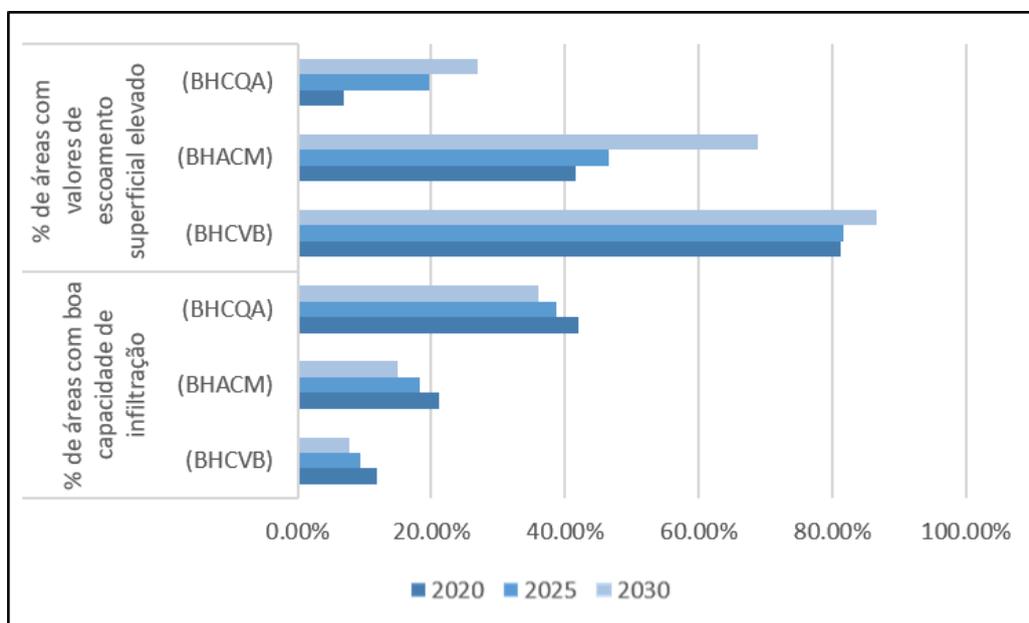
Já a BHCQA possui somente 5,5% de sua área representada pela malha urbana em 2020 (Quadro 2). Para a referida bacia, dois aspectos merecem destaque. Um diz respeito ao avanço das áreas construídas sobre as áreas de gramíneas e solos compactados, principalmente à jusante da bacia, e o outro refere-se a presença de plantios comerciais, que se distribuem, principalmente, pela média e baixa bacia, caracterizando-a como uma bacia periurbana.

Entretanto, a tendência apontada pelo modelo é que em 2025 já se tenha 22,7% de toda a área da bacia ocupada por cobertura urbana e que este total chegue a 33,2% no ano de 2030, ou seja, um terço de toda a bacia hidrográfica. Conseqüentemente, o tempo de concentração ( $T_c$ ) da água na bacia de 446,47 minutos estimado para o ano de 2020, diminuirá para 306,15 minutos em 2025 e para 261,34 minutos em 2030, redução esta, causada, pela propagação da velocidade máxima do escoamento superficial.

No ano de 2020, somente 1,5% de toda a área da BHCQA possuía uma velocidade de escoamento superficial acima de 1,52 m/s. Em estimativas para os anos de 2025 e 2030, esta velocidade será atingida em 2,5% e 3%, de toda a bacia, respectivamente (Quadro 2).

A Figura 4 demonstra que à medida que diminui a capacidade de infiltração da água no solo, ou seja, do coeficiente de armazenamento, aumenta o percentual de áreas com valores de coeficiente de escoamento superficial elevados, com isso, tem-se uma projeção da redução do percentual de áreas com boa capacidade de armazenamento (coeficiente  $S$ ) de 4% para a BHCVB, de 6,1% para a BHACM e de 5,9% para a BHCQA entre os anos de 2020 a 2030, ou seja, em um período de 10 anos.

Figura 4 – Relação entre a capacidade de infiltração da água no solo e aumento das áreas com elevado escoamento superficial



Fonte: Elaborado pelos autores.

O percentual de áreas com valores de escoamento superficial elevado representa as classes 4 e 5 do Quadro 1, ou seja, aquelas que receberam peso = 8 e 10. O percentual de áreas com boa capacidade de infiltração representa as classes 4 e 5 do Quadro 1. Por conseguinte, a quantidade de áreas com elevado escoamento superficial (coeficiente C) que já era alta para a BHCVB, ampliou-se 5,5%, entre 2020 a 2030. Para as bacias hidrográficas do Alto Córrego Macambira e Quebra-Anzol, o aumento estimado é de 27,4% e 20,1%, respectivamente, considerando o mesmo período analisado (Figura 4).

Mapeando a variação do coeficiente de escoamento superficial na região hidrográfica do Anicuns e Nunes (2012), constatou que as maiores lâminas d'água de escoamento superficial, por unidades de áreas da bacia, encontram-se nas regiões de edificações muito densas com solos de baixa capacidade de infiltração, como os Gleissolos. Para a referida autora, as condições destas áreas proporcionam um escoamento de quase 95% do total da água precipitada.

Assim sendo, e observando os cenários modelados, os resultados desta pesquisa revelam um desdobramento que pode ser intensificador do desequilíbrio hidrológico do sistema hidrográfico do Ribeirão Anicuns. Pois, como já mencionado a ampliação do escoamento superficial, em detrimento da capacidade de infiltração do solo, em ambas as três bacias, pode gerar problemas de excedentes de água no exutório e/ou em outras bacias localizadas a jusante, ou seja, em outras sub-bacias deste complexo hidrográfico.



Em vista disso, Santos e Romão (2010) já haviam identificado a ocorrência de eventos de inundações e alagamentos na porção centro-sul de Goiânia, que se apresenta amplamente urbanizada, logo, estes eventos estariam associados a impermeabilização e canalização da rede de drenagem com destaque as bacias hidrográficas do Cascavel, Botafogo e Macambira, ambas sub-bacias do Ribeirão Anicuns.

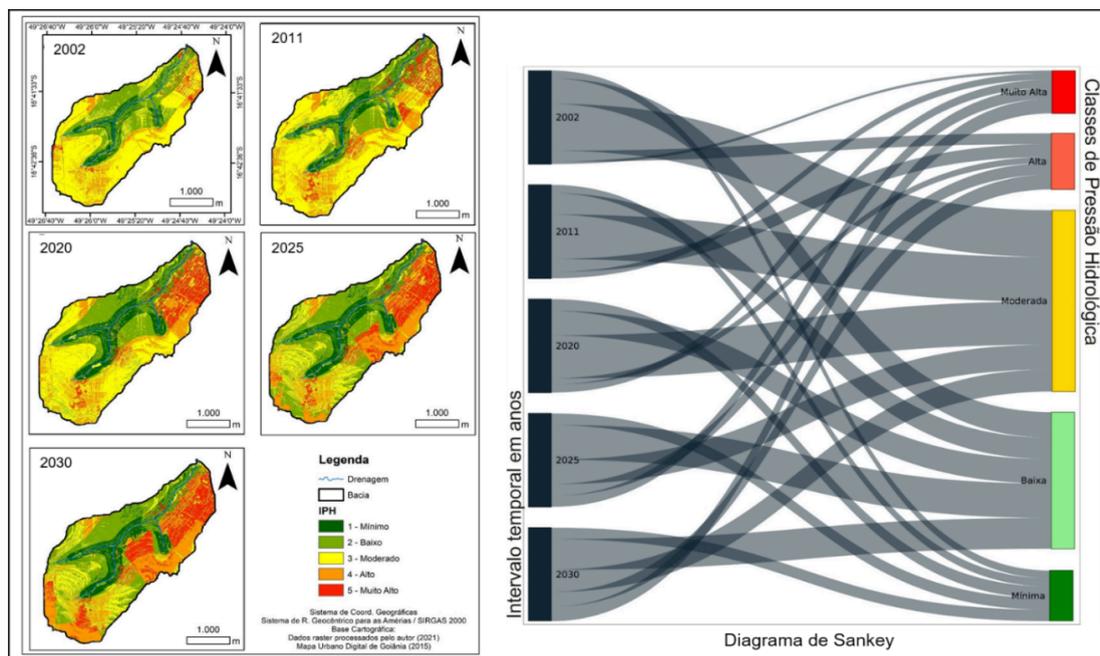
Estudos como os de Pistocchi *et al.* (2015) e Feng *et al.* (2021) já alertavam para o fato de que a alta impermeabilização do solo, derivada da densa malha urbana, afeta diretamente a resposta hidrológica da bacia hidrográfica em relação ao incremento do escoamento superficial e, portanto, do aumento, das descargas de picos de inundações. Para os referidos autores, um maior volume de inundações pode significar maiores extensões de áreas inundadas e/ou maior persistência das inundações após o evento, embora a permanência do tempo das áreas inundadas, esteja condicionada também a topografia do terreno (direção e intensidade do escoamento) e a geometria dos canais de drenagens.

### **Índice de Pressão Hidrológica (IPH)**

O cálculo do Índice de Pressão Hidrológica (IPH) na BHCQA, liga-se, de maneira intrínseca, às mudanças da cobertura da terra ao longo dos anos. Essas, convertem-se em novas ocupações urbanas, ainda em setores muito específicos, mas quase sempre instaladas em antigas áreas de pastagens. Dessa forma, o primeiro aspecto a ser observado é a intensificação das áreas pressionadas hidrológicamente, especialmente a partir do ano de 2020, representadas pelas classes Alto e Muito Alto (Figura 5).

Tais manchas localizam-se, predominantemente, na porção leste, próximas ao exutório da bacia. Entretanto, a partir de 2025, um novo eixo de avanço das classes de IPH elevados pode ser notado na região sul da bacia, onde se localizam as cabeceiras de drenagem. É necessário destacar a forte presença da classe de IPH mínimo, nas regiões coincidentes aos fundos de vales, do canal principal e seus afluentes imediatos. Geralmente, associado às áreas de proteção permanente (APPs) de cursos d'água, o IPH mínimo, mostra uma certa estabilidade hidrológica ainda presente na bacia. Ackermann e Samora (2020), já haviam destacado, mediante a uma série de medidas mitigadoras, a importância da conservação das APPs de cursos d'água para a estabilidade dos recursos hídricos e de áreas de riscos a inundações, ou seja, da drenagem urbana.

Figura 5 – Índice de pressão hidrológica na BHCQA e diagrama de Sankey (2002 a 2030)



Fonte: Elaborado pelos autores.

De modo geral, o diagrama de Sankey (Figura 5) demonstra que a classe com maior percentual de área ao longo do tempo é a Moderada, pois recebe as maiores contribuições dos eixos que representam os intervalos temporais, seguida, imediatamente, pelas áreas com baixa pressão hidrológica. Em oposição a essas áreas, encontram-se as zonas com pressão hidrológica Muito Alta e Alta, sendo essas localidades constituídas com os menores fluxos atribuídos nos períodos analisados. Porém, quando focaliza a análise nas classes superiores nota-se um aumento considerável em ambas as classes, de modo que o intervalo Muito Alto, registra um aumento em sua proporção, projetado para o ano de 2030, da ordem de cinco vezes e meia em relação ao registrado em 2002. Movimento semelhante ocorre com os valores atribuídos à classe Alta, no entanto, com menor expressividade.

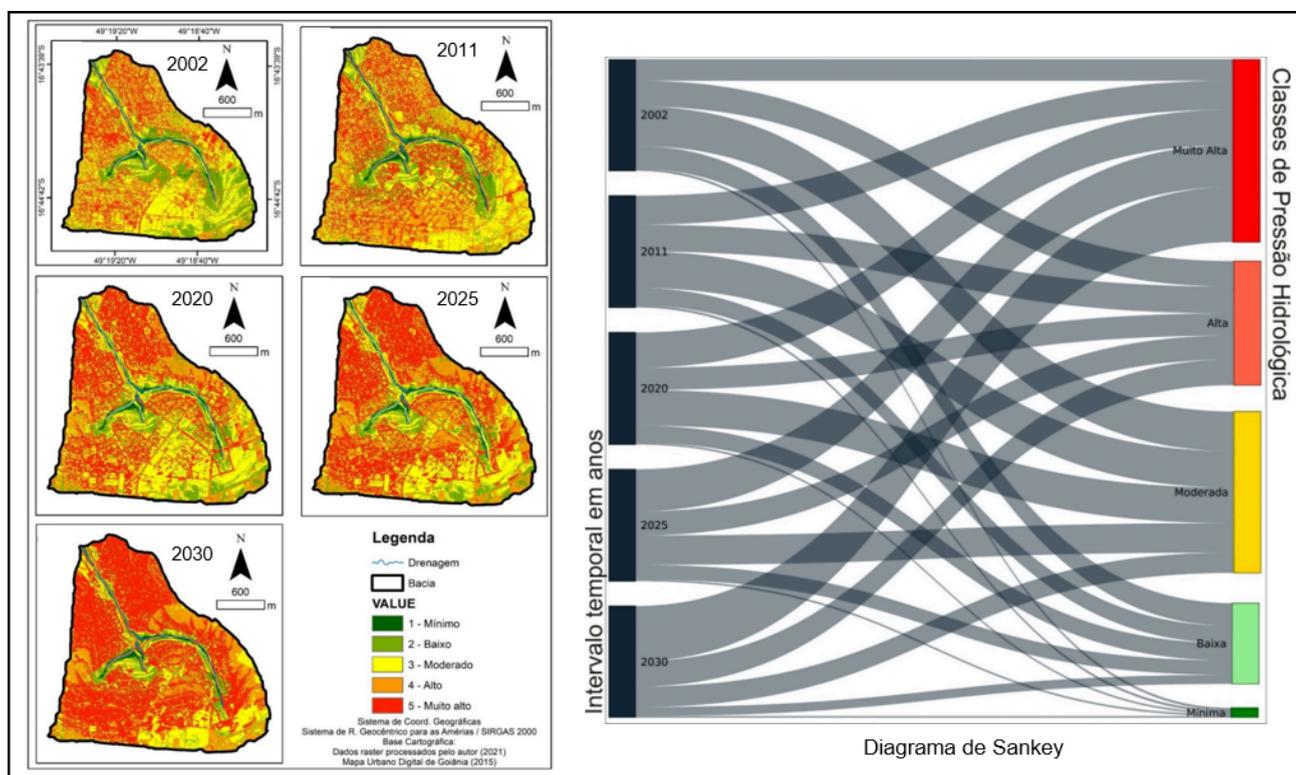
Já as classes Mínimo e Baixo, que representam os ambientes com menor pressão hidrológica, apresentam sensíveis aumentos quando comparadas temporalmente entre si. Em parte, esse ganho territorial pode ser explicado em virtude das características naturais da bacia, que favorecem esse tipo de área e, ainda, do avanço sobre parte das áreas anteriormente classificadas como moderadas, especialmente no último período analisado. Outro ponto a ser ressaltado foi o intervalo de tempo considerado, que permitiu a recuperação florestal em trechos específicos, notadamente associados aos canais de drenagem e ao seu entorno próximo.

Diferentemente da bacia anterior, a BHACM chama a atenção pelo elevado índice de pressão hidrológica, distribuído por todo o seu perímetro (Figura 6). Em função do nível da urbanização, e por tanto, da

impermeabilização dos solos, as áreas com IPH mínimo e baixo são pouco representativas nesta bacia. Estas, se reduzem à medida que os valores são examinados, nos intervalos de anos modelados, às regiões de APPs dos cursos de drenagens.

O diagrama de Sankey (Figura 6), evidencia o aspecto ordenado de crescimento da significância das classes de IPH. Neste, é visível a tendência histórica de agrupamentos dos valores em torno das classes Muito Alta, Alta e Moderada, caracterizando a BHACM, como uma região hidrográfica muito impactada no decorrer de todos os períodos simulados e ampliando-se, ainda mais, para os cenários futuros.

Figura 6 – Índice de pressão hidrológica na BHACM e diagrama de Sankey (2002 a 2030)

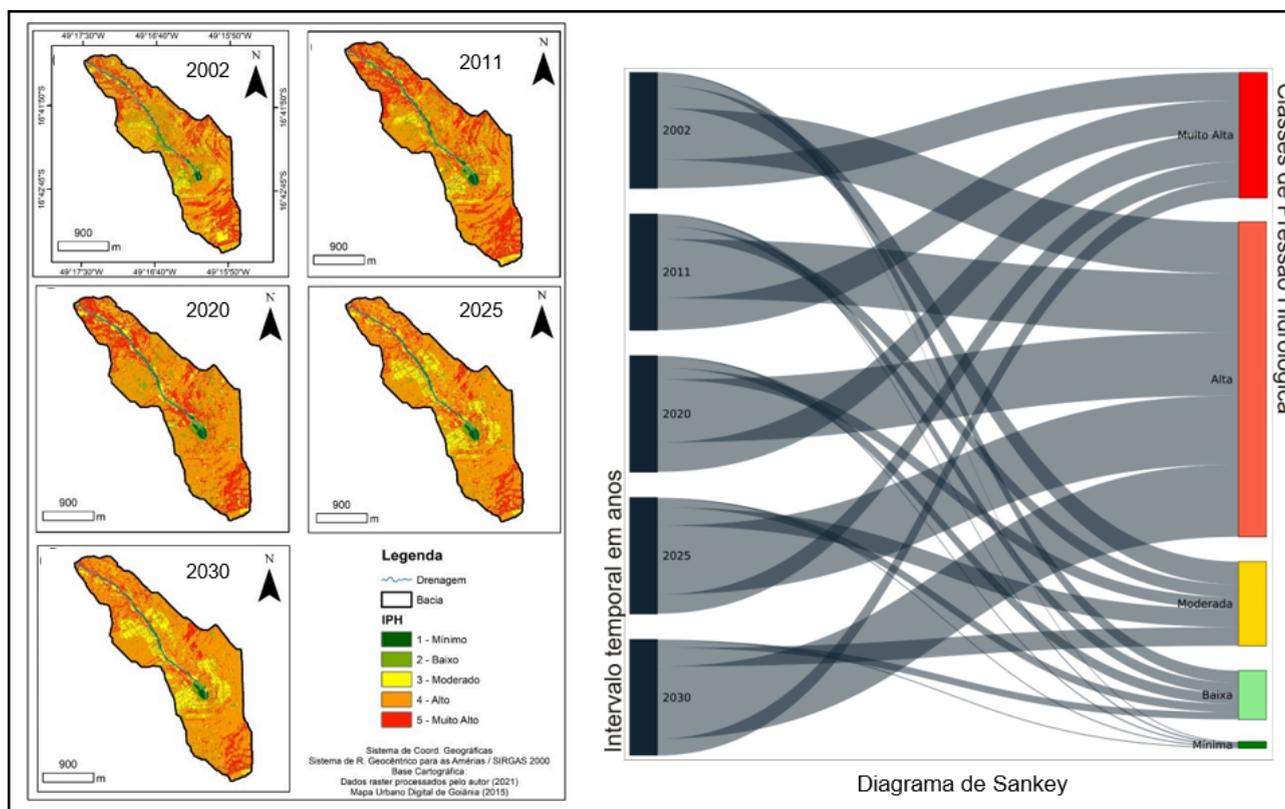


Fonte: Elaborado pelos autores.

As áreas com moderado IPH têm tendência de redução, de modo a diminuir em uma proporção de 70%, quando comparadas ao fluxo relativo ao ano de 2002. O IPH alto tem uma tendência de estabilidade, sem mudanças significativas durante os intervalos analisados. Já as áreas com IPH muito alto, respondem por um intenso aumento de fluxo, especialmente a partir de 2025, de modo que o fluxo final corresponde a cerca de 2,5 vezes a mais, do valor registrado inicialmente. Por sua vez, as áreas com IPH mínimo são marcadas pela constância dos valores ao longo dos intervalos analisados. Por outro lado, as áreas classificadas com IPH baixo encontram-se representadas por uma tendência decrescente (Figura 6).

No caso da BHCVB, o IPH mostrou-se elevado desde o primeiro cenário analisado (Figura 7). Tal característica acontece em virtude de ser esta bacia, uma das que apresenta, ocupação mais antiga no município de Goiânia. O IPH alto e muito alto, se concentram, tanto no baixo como no médio e alto curso. Quanto à espacialização dessas duas classes, o padrão notado é difuso, com especial destaque para as porções norte e sul da bacia. A primeira região (porção norte) refere-se às áreas ligadas ao exutório e a porção sul, as áreas de recarga da bacia.

Figura 7 – Índice de pressão hidrológica na BHACVB e diagrama de Sankey (2002 a 2030)



Fonte: Elaborado pelos autores.

O diagrama de Sankey (Figura 7), revela que o IPH dominante é sem dúvida, a classe referente à pressão alta, que chega a se ampliar em cerca de 50% do fluxo total recebido, comparado ao ano de 2002. Tal transfiguração, converge para uma concentração dos fluxos de pressão alta, contribuindo para a redução das demais classes. Deste modo, o diagrama ilustra, para a classe de IPH baixo uma redução de área da ordem de 4,28%, entre os períodos de 2002 a 2030. Já as áreas moderadas exibem, por sua vez, uma redução de seu percentual até o ano de 2020, e em seguida, ocorre um pequeno aumento, da ordem de 6%, mas ainda se mantendo menor que o patamar registrado no ano de 2002.



Mesmo com características distintas e ocupação variada, as três bacias analisadas desenvolvem uma tendência de impacto hidrológico semelhante, uma vez que, na medida que a urbanização avança, os desequilíbrios tornam-se mais visíveis. Porém, a BHCQA pode ainda conciliar a necessidade de crescimento urbano e preservação dos processos hidrológicos superficiais, por meio de um planejamento urbano/territorial adequado e da execução de medidas estruturais extensivas, menos onerosas e de fácil execução (Botelho, 2011).

As BHACM e BHCVB, por seu elevado grau de ocupação, necessitam, portanto, de medidas estruturais intensivas como forma de atenuar os problemas hidrológicos a exemplo dos reservatórios de captação da água da chuva, em forma de lagos artificiais, muito presentes nos parques e bosques de Goiânia.

Além do mais, é possível citar também as infraestruturas “verde e azul” e os benefícios hidrológicos que estas podem trazer, na melhoria da capacidade de infiltração do solo urbano e redução do volume do escoamento superficial (ROSA *et al.*, 2020). Segundo os referidos autores as infraestruturas verdes são as medidas estruturais que visam a conservação da natureza, harmonizando uso e ocupação do solo com a preservação do ecossistema local. Já as infraestruturas azuis são aquelas destinadas a gestão eficiente da água da chuva, como as bacias de retenção e de infiltração.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Nas três bacias analisadas, constatou-se que à medida que a malha urbana evolui, o tempo de concentração e a capacidade de infiltração diminui, acarretando o aumento da velocidade e da quantidade de fluxos do escoamento superficial. Desta forma, os principais resultados dos parâmetros hidrológicos modelados podem ser comprovados por meio das variações de suas amplitudes, que é a diferença entre o maior e o menor valor registrado.

No caso do tempo de concentração ( $T_c$ ), e considerando o intervalo de anos analisados, houve uma redução equivalente a 185,13 min, 19,36 min e 4,07 min, respectivamente, nas BHCQA, BHACM e BHCVB. Já os valores representativos da classe de maior velocidade de escoamento superficial equivalem em área dessas bacias, a um aumento de 2,6%, 3,6% e 13,7%, respectivamente. Em relação ao coeficiente S, os valores apontam para uma perda da capacidade de armazenamento de água no solo com percentuais iguais a 13,8%, 21,6% e 33,3%, registrados nas BHCQA, BHACM e BHCVB, entre os anos de 2020 a 2030. No caso dos valores do escoamento superficial por bacia, representados pelo coeficiente C, os percentuais de intensificação registrados foram de 13,8%, 39,9% e 17,2%.



Na Bacia Hidrográfica do BHCVB, a situação do IPH mostrou-se ser a mais complicada, uma vez que a cobertura urbana domina todos os setores da bacia. Já na BHACM, a situação é um pouco menos agravada, mas ainda delicada, devido à intensificação da ocupação urbana. Porém, na BHCQA, que está passando por um processo recente de conversão de áreas naturais para áreas urbanas, a situação ainda é passível de diligência sem grandes custos operacionais, a partir de planejamento e ordenamento territorial.

Por fim, esclarecemos que a forma de ocupação nas três bacias analisadas, acontece de jusante para montante. Tal situação, implica em inúmeras modificações sob a perspectiva hidrológica e de alterações em parâmetros essenciais ao equilíbrio da hidrologia de superfície. Por esse motivo, torna-se necessário um plano de drenagem urbana que reconheça as particularidades das cotas de inundações, dos regimes de chuva e dos elementos topográficos e hidrológicos das bacias, e que pense na modelagem de cenários futuros, com base na cronografia dos distintos cenários de alterações da paisagem. Assim sendo, os resultados desta pesquisa servem de apoio à gestão e ao planejamento, a partir de planos de ações, direcionados às tomadas de decisões.

## REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, M.; SAMORA, P. R. Área de preservação permanente urbana e o manejo das águas: inovações, resiliência e adaptação aos eventos hidrológicos extremos. **Labor & Eng**, Campinas, v. 14, n. 1, p. 1-10, 2020.
- ARAÚJO, D. C. *et al.* Multicriteria analysis applied to the management of urban pluvial Waters. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, e18, 2017.
- BARBOSA, A. S.; ARAÚJO, L. M. de. Pré-História do Cerrado. **Élisée - Revista de Geografia da UEG - Goiás**, v. 9, n. 2, e922007, 2020.
- BEN-DAOUD, A. *et al.* The use of low impact development technologies in the attenuation of flood flows in an urban area: Settat city (Morocco) as a case. **Environmental Challenges**, v. 6, e100403, 2022.
- BOTELHO, R. G. M. Bacias hidrográficas urbanas. In: GUERRA, A. J. T. (org.). **Geomorfologia urbana**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2011. cap. 3, p. 71-115.
- CASSETI, V. Geomorfologia do município de Goiânia. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 12, n. 1, p. 65-85, 1992.
- COVILLE, R.; ENDRENY, T.; NOWAK, D. J. Modeling the impact of urban trees on hydrology. In: LEVIA, D. *et al.* **Forest-Water Interactions**. Cham: Springer, 2020. cap. 19, p. 459-487.
- FENG, B. *et al.* Urbanization impacts on flood risks based on urban growth data and coupled flood models. **Natural Hazards**, n. 106, p. 613-627, 2021.
- FHA - Federal Highway Administration. **Urban Drainage Design Manual, Hydraulic Engineering**. 3. ed. Washington: National Highway Institute, USDT, 2013. p. 478.
- FOX, D. M. *et al.* Relating imperviousness to building growth and developed area in order to model the impact of peri-urbanization on runoff in a Mediterranean catchment (1964-2014). **Journal of Land Use Science**, v. 14, n. 3, p. 210- 224, 2019.
- HAWLEY, R. J.; BLEDSOE, B. P. How do flow peaks and durations change in suburbanizing semi-arid watersheds? A southern California case study. **Journal of Hydrology**, v. 405, p. 69-82, 2011.



HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins: a hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geol Soe. Am. Bull.**, v. 56, n.3, p. 275-370, 1945.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Censo Brasileiro de 2022**. Rio de Janeiro: IBGE, 2023.

IVANOV, V. Y. *et al.* Preserving high-resolution surface and rainfall data in operational-scale basin hydrology: a fully-distributed physically-based approach. **Journal of Hydrology**, v. 298, p. 80-111, 2004.

KOURTIS, I. M.; TSIHRINTZIS, V. A. Adaptation of urban drainage networks to climate change: A review. **Science of the Total Environment**, v. 771, n.1, e145431, 2021.

LIMA, H. M. *et al.* Comportamento hidrológico de bacias hidrográficas: integração de métodos e aplicação a um estudo de caso. **Revista Escola de Minas, Ouro Preto**, v. 60, n. 3, p.525-536, 2007.

LOEWEN, A. R.; PINHEIRO, A. Overland flow generation mechanisms in the Concórdia River basin, in southern Brazil. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 4, 2017.

MCCABE, M. F. *et al.* The future of Earth observation in hydrology. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 21, n. 7, p. 3879-3914, 2017.

MENDES, A. T.; SANTOS, G. R. dos. **Drenagem e manejo sustentável de águas pluviais urbanas: o que falta para o Brasil adotar?** Instituto de Pesquisa Economia Aplicada – Ipea. Rio de Janeiro: IPEIA, 2022. 53p.

MENEZES FILHO, F. C. M. de; SÁ, R. A. de. Estudo comparativo entre as equações empíricas e o método da velocidade na estimativa do tempo de concentração. **Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 15, n. 1, p. 221-244, 2019.

MONTEIRO, Renato; FERREIRA, José C.; ANTUNES, Paula. Green infrastructure planning principles: An integrated literature review. **Land**, v. 9, n. 12, p. 525, 2020.

NASCIMENTO, D. T. F. *et al.* Episódios e gênese dos eventos climáticos extremos em Goiânia-GO. **Caderno de Geografia**, v. 29, n. 57, p. 583-608, 2019.

NUNES, F. G. Modelagem hidrológica e técnicas de geoprocessamento na estimativa da impermeabilização do solo e escoamento superficial da bacia hidrográfica do Ribeirão Anicuns - Goiânia (GO). **Ateliê Geográfico**, Goiânia, v. 6, n. 2, p. 55-74, 2012.

OLIVEIRA, L. F. C. de. *et al.* Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 35, n. 1, p. 13-18, 2005.

PEDROSA, B. M.; CÂMARA, G. Modelagem dinâmica e geoprocessamento. In: DRUCK, S. *et al.* (ed.). **Análise espacial de dados geográficos**. Brasília: Embrapa, 2004. cap. 8, p. 1-39.

PISTOCCHI, A. *et al.* Soil sealing and flood risks in the plains of Emilia-Romagna, Italy. **Journal of Hydrology: Regional Studies**, v 4, p.398-409, 2015.

PORTO, R. L. L. Escoamento superficial direto. In: TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. P. (org.). **Drenagem urbana**. Porto Alegre: Ed. da Universidade - UFRG, ABRH, 1995. cap. 5, p.107-166.

PROSDOCIMI, I. *et al.* Detection and attribution of urbanization effect on flood extremes using nonstationary flood-frequency models. **Water Resources Research**, v. 51, n. 6, p. 4244-4262, 2015.

PUMO, D. *et al.* Potential implications of climate change and urbanization on watershed hydrology. **Journal of Hydrology**, v. 554, p. 80–99, 2017.

REZAEI, A. R. *et al.* Investigating the effective factors influencing surface runoff generation in urban catchments – A review. **Desalination and Water Treatment**, n. 164, p. 276-292, 2019.

RIBEIRO, J. F.; WALTER, B. M. T. As principais fitofisionomias do bioma Cerrado. In: SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. (ed.). **Cerrado: ecologia e flora**. Brasília: Embrapa, 2008. cap. 6, p. 151-222.

ROCHA, W. S. *et al.* **Goiânia, Córrego Botafogo**. 1 ed. Goiânia: Editora da PUC Goiás, 2021, 140 p.



- ROSA, D. W. B. *et al.* Assessment of the hydrological response of an urban watershed to rainfall-runoff events in different land use scenarios - Belo Horizonte, MG, Brazil. **Water Science & Technology**, v. 81, n. 4, p. 679-693, 2020.
- ROSA, D. L.; PAPPALARDO, V. Planning for spatial equity-A performance based approach for sustainable urban drainage systems. **Sustainable Cities and Society**, v. 53, e101885, 2020.
- ROUSSEAU, A. N. *et al.* Physitel, a specialized GIS for supporting the implementation of distributed hydrological models. **Water News-Official Magazine of the Canadian Water Resources Association**, v. 31, n.1, p. 18-20, 2011.
- SABÓIA, M. A. M. *et al.* Climate changes impact estimation on urban drainage system located in low latitudes districts: a study case in Fortaleza-CE. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 22, n. 21, 2017.
- SANTOS, K. R. dos. **Distribuição espacial das inundações em Goiânia (GO) e análise desse fenômeno na bacia do córrego pedreira**. 2010. 115 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Humanas) - Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2010.
- SANTOS, K. R.; ROMÃO, P. A. Espacialização de inundações em Goiânia (GO), 2004-2007. **Boletim Goiano de Geografia**, Goiânia, v. 30, n. 2, p. 81-97, 2010.
- SILVA NETO, J. C. A. da. Avaliação da vulnerabilidade à perda de solos na bacia do rio Salobra, MS, com base nas formas do terreno. **Geografia (Londrina)**, Londrina, v. 22, n. 1, p. 5-25, 2013.
- SILVEIRA, A. L. L. da. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. **RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 10, n. 1, p. 5-23, 2005.
- TUCCI, C. E. M. **Hidrologia: ciência e aplicação**. 2. ed. Porto Alegre: Ed. da Universidade - UFRGS: ABRH, 2001. 943p.
- TUCCI, C. E. M. Águas urbanas. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 22, n. 63, p. 97-112, 2008.
- UNDRR. Sendai Framework for Disaster Risk Reduction 2015-2030. 2019. Disponível em: <https://www.undrr.org/publication/sendai-framework-disaster-risk-reduction-2015-2030>. Acesso em: 27 de maio de 2024.
- UNGARO, F. *et al.* Modelling the impact of increasing soil sealing on runoff coefficients at regional scale: a hydrogeological approach. **Journal of Hydrology and Hydromechanics**, v. 62, n.1, p. 33-42, 2014.