

Uso do modelo HEC-RAS com base em informações de LiDAR para avaliação de inundações urbanas

Use of the HEC-RAS model based on LiDAR information for urban flood assessment

Thiago Augusto Mendes^{1*} , Marlon Barbosa de Sousa² ,
Sávio Aparecido dos Santos Pereira¹ , Kamila Almeida dos Santos³ ,
Klebber Teodomiro Martins Formiga³ 

RESUMO

O crescimento desordenado das cidades e o excesso de impermeabilização são problemáticas dos grandes centros urbanos, tendo como consequência principal a ocorrência de inundações e alagamentos. Nesse contexto, a modelagem hidrodinâmica pode ser uma importante ferramenta para a determinação de áreas inundáveis, permitindo estimar as cotas de inundações para diferentes cenários de tempos de retorno (T_R) e chuvas de projetos, permitindo, assim, representar mais fielmente a realidade e minimizar erros decorrentes de projetos hidráulicos. Trabalhando em conjunto com o Sistema de Informações Geográficas (SIG), em que a geometria do canal é extraída por meio do Modelo Digital do Terreno (MDT) de alta precisão gerado por levantamento com técnica LiDAR (*Light Detection and Ranging*) e software de modelagem hidrodinâmica (*Hydrologic Engineering Center – River Analysis System – HEC-RAS*), foi possível avaliar diferentes cenários de inundações no trecho canalizado em concreto, no córrego Botafogo, em Goiânia, Goiás. Com os resultados da modelagem hidrodinâmica foi possível avaliar o comportamento da propagação das vazões geradas, constatando-se que para precipitações com T_R de 50 anos ou mais, os limites da canalização não suportam os volumes gerados e transportados, provocando inundações em seis trechos críticos. Os dados obtidos pelo HEC-RAS puderam ser validados a partir de registros fotográficos divulgados pela imprensa local e levantamento topográfico dos locais inundados, de modo que a integração entre o SIG e a modelagem hidrodinâmica se mostrou eficiente para o estudo de áreas inundáveis.

Palavras-chave: efeitos da urbanização; drenagem urbana; modelagem hidrológica; hidrodinâmica.

ABSTRACT

The disordered growth of cities and the excessive waterproofing are problematic of the large urban centers, having as a main consequence the occurrence of floods and overflows. Within this context, hydrodynamic modeling can be an important tool for the determination of floodable areas, allowing the estimation of flood quotas for different scenarios of return periods (T_R) and project rainfall, thus allowing to more accurately represent reality and minimize errors arising from hydraulic designs. Working with Geographic Information System (GIS), where the channel geometry is extracted using the high precision Digital Terrain Model (DTM) generated by LiDAR (Light Detection and Ranging) survey and hydrodynamic modeling software (HEC-RAS), it was possible to evaluate different flood scenarios in the channeled concrete section, in the Botafogo Stream in Goiânia, Goiás. With the results of hydrodynamic modeling, it was possible to evaluate the propagation behavior of the generated flows, finding that for precipitation with T_R 50 years or older, the plumbing limits do not support the generated and transported volumes, causing flooding in six critical stretches. The data obtained by HEC-RAS could be validated from photographic records released by the press and topographic survey of flooded sites, so that the integration between GIS and hydrodynamic modeling proved to be efficient for the study of floodable areas.

Keywords: urbanization effects; urban drainage; hydrological and hydrodynamic modeling.

¹Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás - Aparecida de Goiânia (GO), Brasil.

²Tecnologia e Planejamento Ambiental - Aparecida de Goiânia (GO), Brasil.

³Universidade Federal de Goiás - Goiânia (GO), Brasil.

*Autor correspondente: thiago.mendes@ifg.edu.br

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Goiás e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico.

Recebido: 10/08/2020 - Aceito: 15/03/2021 - Reg. ABES: 2020276

INTRODUÇÃO

As inundações urbanas são uma realidade presente nos grandes centros urbanos, e sem medidas preventivas, a tendência é a intensificação das ocorrências. O aumento das áreas impermeáveis, a diminuição da infiltração da água no solo e a ocupação de fundo de vale são problemas recorrentes dos grandes centros brasileiros. Em bacias hidrográficas de pequeno porte localizadas em centros urbanos, esses problemas tendem a ser maiores, pois o tempo de concentração do escoamento superficial é pequeno. As mudanças antrópicas no uso do solo afetam de forma negativa os processos hidrológicos da bacia hidrográfica, corroborando para os eventos de inundações. Tucci e Berton (2003) reforçam como os sistemas de drenagem clássicos contribuem para o aumento da velocidade do escoamento, de forma que favorecem a contribuição simultânea de grandes volumes de água aos corpos d'água, intensificando as inundações de áreas ocupadas pela população.

Portanto, a representação matemática do comportamento da geração (hidrológica) e da propagação (hidrodinâmica) do escoamento superficial é essencial para avaliação de áreas inundáveis, justificando a necessidade e a aplicabilidade dos modelos matemáticos, seja pela agilidade, seja pela confiabilidade no processamento dos fenômenos envolvidos. Especialmente para o meio urbano, os modelos integram formulações hidrológicas e hidrodinâmicas com o Sistema de Informações Geográficas (SIG). Essa integração é ferramenta importante para a criação de ações preventivas, em que os dados da geometria do canal são extraídos por meio de dados de geoprocessamento e sensoriamento remoto. A extração é feita a partir de um Modelo Digital do Terreno (MDT) e a aquisição dos dados geométricos do canal ocorre sem a necessidade de coleta direta em campo, economizando-se tempo e custos financeiros.

A necessidade de maiores detalhamentos em projetos de Engenharia Hidráulica requer modelos com alta precisão altimétrica. Nesses casos, os MDTs podem ser gerados a partir de dados de LiDAR (*Light Detection and Ranging*) a partir de voos aerofotogramétricos, em que é utilizado laser scanner aerotransportado, que faz a varredura do terreno. Durante o processamento da nuvem de pontos, os pontos referentes aos objetos acima do solo, por exemplo, árvores, carros e edificações, são excluídos, realizando uma filtragem das nuvens de pontos, mantendo apenas a superfície do terreno.

O detalhamento resultante desse produto é fundamental para identificar a rede de drenagem e, conseqüentemente, o escoamento gerado, resultando em um modelo mais realista. Além de gerar o MDT, os dados obtidos com o LiDAR podem ser utilizados em modelos hidrodinâmicos para previsão de áreas inundáveis (manchas de inundação), como o *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* — HEC-RAS (USACE, 2002), tendo aplicações em diversas áreas, como proteção costeira (BRZANK *et al.*, 2005; SCHMIDT *et al.*, 2013), estudos de deslizamentos (MAHALINGAM *et al.*, 2016), sistemas viários (OLIVEIRA *et al.*, 2010; GUEDES; OLIVEIRA, 2018), entre outros. Oliveira e Guasselli (2011) também utilizaram MDT para extrair informações de áreas impermeabilizadas e trechos suscetíveis à inundação a partir de informações de elevação de superfícies.

Existem inúmeros estudos envolvendo a utilização do modelo HEC-RAS para a previsão de áreas inundáveis urbanas e rurais em todo o mundo, em que a geometria da rede de drenagem dos canais (naturais ou artificiais) é georreferenciada em ambiente SIG e integrada ao banco de dados do MDT para extração do modelo do terreno, diferenciando-se apenas no que se refere às resoluções dos MDTs utilizados (CALÇADA *et al.*, 2004; YANG, 2004; KNEBL *et al.*,

2005; YANG *et al.*, 2006; SANTOS, 2009; CUNHA *et al.*, 2012; MEDEIROS; ZANELLA, 2019).

Merwade *et al.* (2008) e Podhorányi *et al.* (2013) utilizaram o HEC-RAS em conjunto com SIG, cruzando dados LiDAR para geração de canal 3D. Ghimire (2013) utilizou dados LiDAR com modelo hidrodinâmico 2D TUFLOW para cenário de chuva intensa em áreas rurais da Escócia, onde foi aplicada para vários eventos de diferentes probabilidades de ocorrência. Abushandi e Merkel (2013) aplicaram imagens do satélite e MDTs no modelo hidrológico *Hydrologic Modeling System* (HEC-HMS) e no modelo hidrodinâmico *Identification of unit Hydrographs and Component flows from Rainfall, Evaporation and Streamflow data* (IHACRES) na região árida da Jordânia. Os dados de alta resolução foram fundamentais para os resultados, nos quais os autores demonstram o sucesso obtido em identificar diversos tipos de solos encontrados.

Assim, o objetivo deste trabalho foi o emprego da base de dados de LiDAR junto ao modelo hidrodinâmico HEC-RAS para avaliar as previsões de inundações provenientes do córrego Botafogo, município de Goiânia, estado de Goiás, Brasil, de modo a definir as áreas possivelmente atingidas por intensidade pluviométrica com tempo de retorno (T_R) de 50 anos.

METODOLOGIA

Caracterização da área de estudo e do canal

A área de estudo refere-se à bacia hidrográfica do córrego Botafogo, constituída de duas principais sub-bacias: a do córrego Capim Puba e Areião, e seu respectivo trecho canalizado, localizado no município de Goiânia, estado de Goiás, Brasil. A caracterização física das sub-bacias hidrográficas, como área, perímetro, comprimento do talvegue, altitudes (cotas) da nascente e foz, declividade e tempos de concentração, teve como dado de entrada o MDT de Goiânia com resolução espacial de 1 m (COMDATA, 2014), sendo processado no *software* ArcGIS versão 10.4 (Tabela 1).

O córrego Botafogo percorre um trajeto de 10,98 km desde sua nascente até desaguar no ribeirão Anicuns, que, por sua vez, deságua no rio Meia Ponte (bacia do rio Paranaíba), segmentado conforme demonstra a Figura 1: trecho de aproximadamente 2,85 km canalizado em gabião, 3,23 km canalizado em concreto e 4,90 km ainda sem intervenção direta. A execução do trecho canalizado em concreto ocorreu nos anos de 1974 a 1976, o qual foi dimensionado para suportar vazões geradas por intensidade de precipitação com T_R de 10 anos (IPLAN, 1990).

A partir da obtenção dos dados físicos de cada sub-bacia foi possível determinar o tempo de concentração (t_c), seguindo as formulações recomendadas pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005), sendo elas: equações do Departamento Nacional de Obras de Saneamento — DNOS (MELLO, 1973), Kirpich modificada, George Ribeiro e onda cinemática, recomendada pela *Federal Highway Administration* (FHA, 2011) (Tabela 1). Destaca-se a importância de calcular o tempo de concentração médio entre os métodos, principalmente os métodos Kirpich e FHA (indicados para bacias rurais e urbanas), considerados satisfatórios por apresentarem erro médio absoluto menor que 10% (SILVEIRA, 2005).

Para a determinação da máxima intensidade de chuva para Goiânia (requerida pelo método FHA), foi utilizada a equação intensidade-duração-frequência (curva *idf*) proposta por Costa e Prado (2003), válida para T_R entre

Tabela 1 - Dados físicos e tempos de concentração da bacia e das sub-bacias do córrego Botafogo (Goiânia, Goiás) utilizando métodos recomendados pelo Departamento Nacional de Infraestrutura de Transportes (DNIT, 2005).

Bacia/Sub-bacia	A	h_n	h_e	L	l_t	Tempo de concentração (min)				
						DNOS	Kirpich modificada	George Ribeiro	FHA	Média
Botafogo	30,58	824	693	10,98	0,012	133	207	176	206	189
Areião	3,24	804	765	2,09	0,019	41	49	33	40	41
Capim Puba	11,01	722	695	3,33	0,008	90	96	54	84	82

A: área da bacia hidrográfica (km²); h_n : cota da nascente (m); h_e : cota do exutório (m); L: comprimento do talvegue (km); l_t : declividade do talvegue (m.m⁻¹); DNOS: Departamento Nacional de Obras de Saneamento; FHA: Federal Highway Administration.

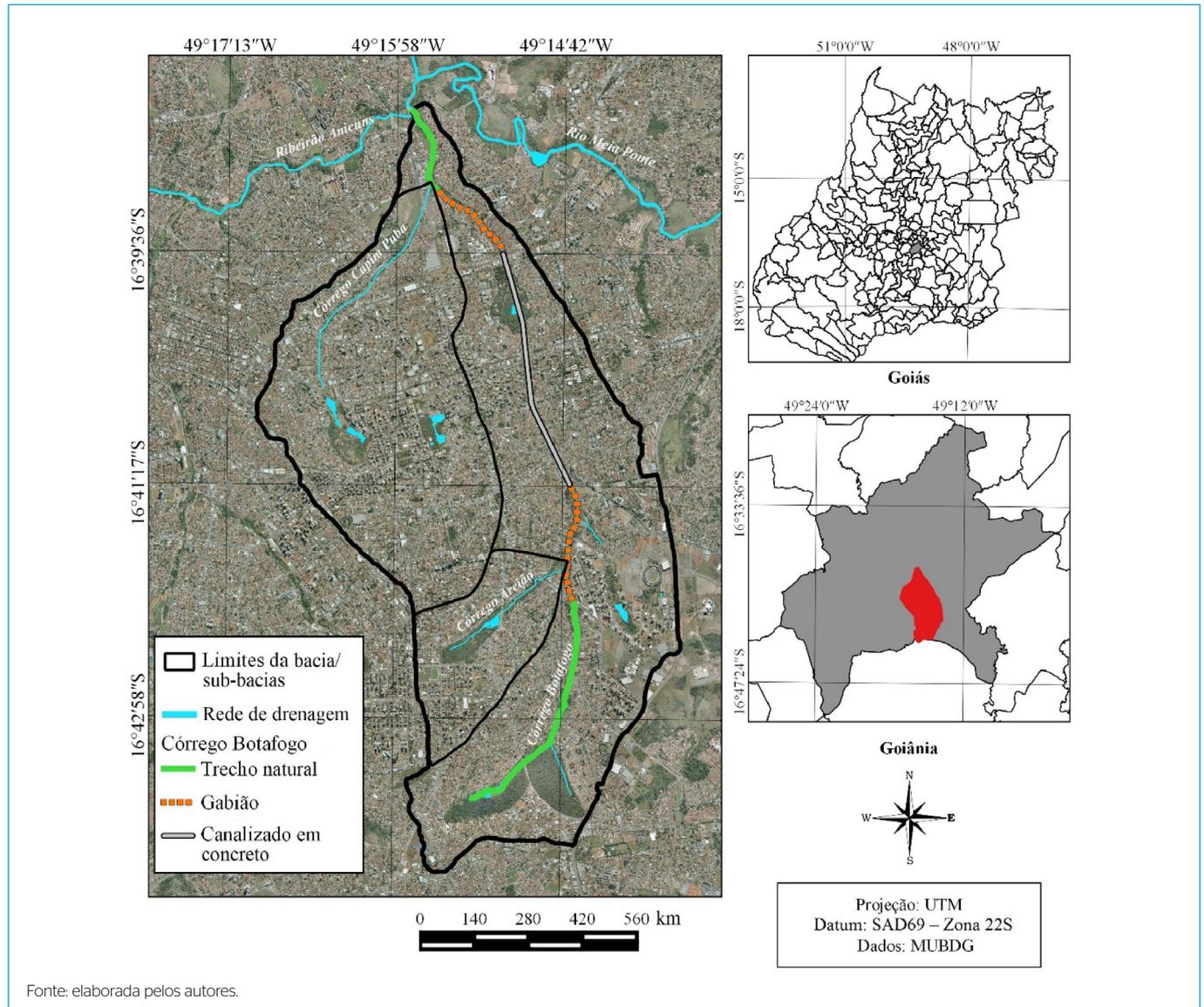


Figura 1 - Localização da bacia hidrográfica do córrego Botafogo e sub-bacias (Goiânia, Goiás).

8 e 100 anos. Adotou-se, neste trabalho, T_R de 50 anos, tempo recomendado pelo Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE; CETESB, 1980), por Tucci *et al.* (1995), Tucci (1997) e por Mays (2005) para obras de macrodrenagem. A intensidade de chuva máxima para T_R de 50 anos e tempo de concentração de 189 min (tempo de concentração médio calculado para toda a bacia

hidrográfica do córrego Botafogo e considerado igual ao tempo de duração da chuva) é de 36,75 mm.h⁻¹.

Para a determinação da curva número (CN), este estudo baseou-se nas considerações feitas por Santos (2015) (Tabela 2) e na descrição do solo da área feita por Seibt (2013), admitindo o solo como pertencente ao grupo hidrológico

“A”, ou seja, solos com baixo potencial de escoamento e alta taxa uniforme de infiltração, quando saturados, consistidos principalmente de solos de granulometria alta (argiloarenoso ou arenoso) (USDA; NRCS, 1986).

A análise e a classificação (supervisionada) do uso e ocupação do solo da bacia hidrográfica do córrego Botafogo foram realizadas por meio de imagens Landsat8, resolução de 30 m, apresentando grande área impermeabilizada (81% ocupada por edificações, pavimentação, solo exposto e compactado, e apenas 18% ocupada por vegetação), evidenciando o alto valor de CN (98) (Figura 2).

Tabela 2 – Valores médios de curva número e área das sub-bacias hidrográficas do córrego Botafogo.

Bacia/Sub-bacia	Curva número	A (km ²)
Botafogo	90	32,31
Areião	90	3,17
Capim Puba	90	11,99

Fonte: adaptada de Santos (2015).

Para a representação da geometria do canal necessária para a modelagem hidrodinâmica, foi determinado o MDT a partir de varredura com laser aerotransportado. O Laser Scanner Aerotransportado — ALS (*Airbone Laser Scanner*), também conhecido como LiDAR, é utilizado em estudos e aplicações relacionados à representação da superfície terrestre. O LiDAR se mostrou uma alternativa para a aquisição de MDTs de alta resolução (SHAN; APARAJITHAN, 2005; WU *et al.*, 2011; LI *et al.*, 2013; ZHAO *et al.*, 2016).

O sistema de varredura LiDAR baseia-se na determinação da distância entre o sensor emissor e a superfície por meio de pulsos propagados com a velocidade da luz. O pulso emitido volta para o sensor com as informações da superfície, gerando coordenadas tridimensionais pontuais da superfície terrestre (x, y, z). Com a nuvem de pontos geradas, cria-se o MDT, em que são obtidas as informações de elevação do terreno.

Com a utilização desse equipamento, pode-se extrair informações como a geometria do canal (área de estudo) por meio da extensão HEC-GeoRAS, versão 10.2 do *software* HEC-RAS, e da integração com o *software* ArcGis, versão 10.3. Para a modelação dos dados de geometria do canal no HEC-RAS é necessário

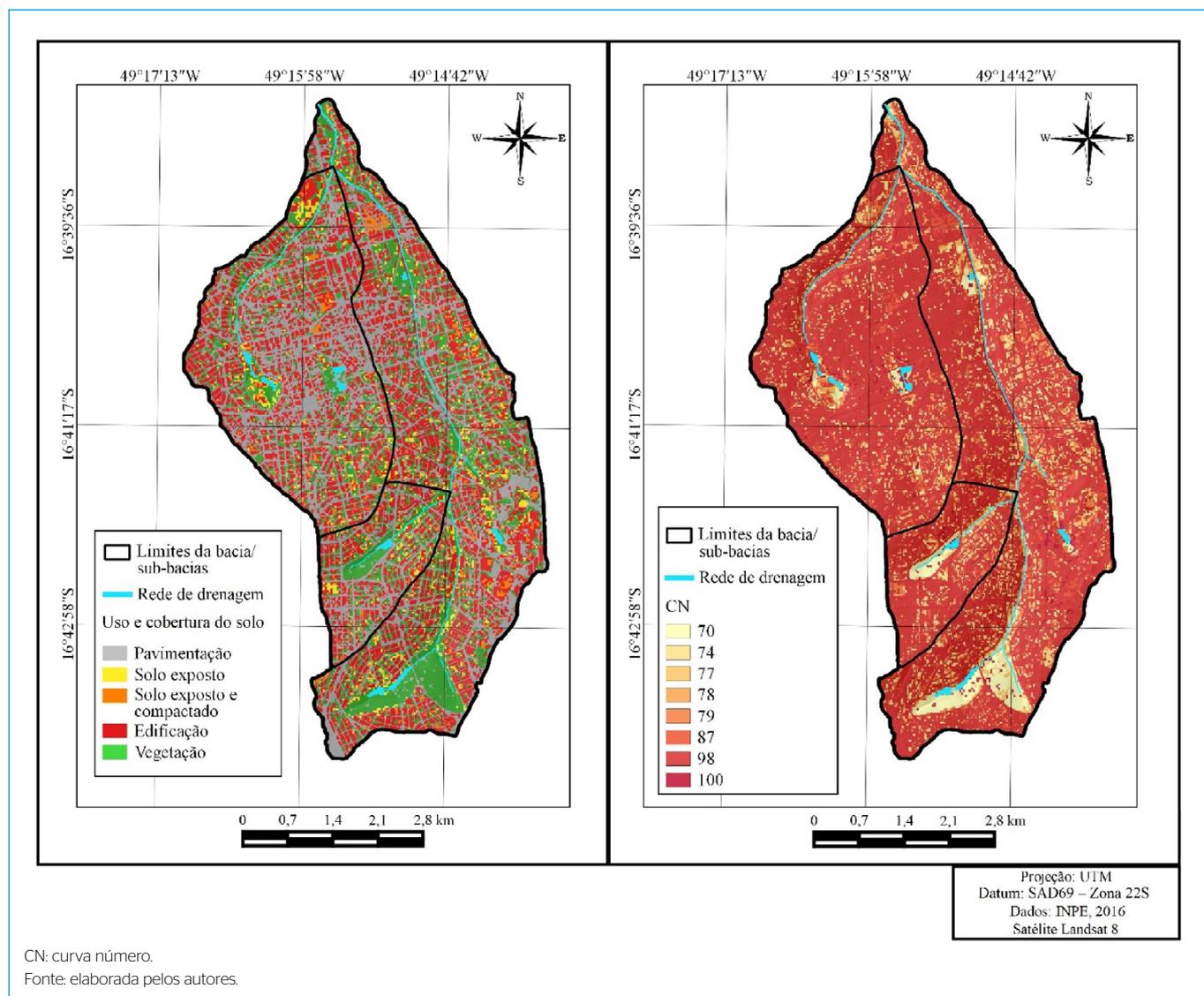
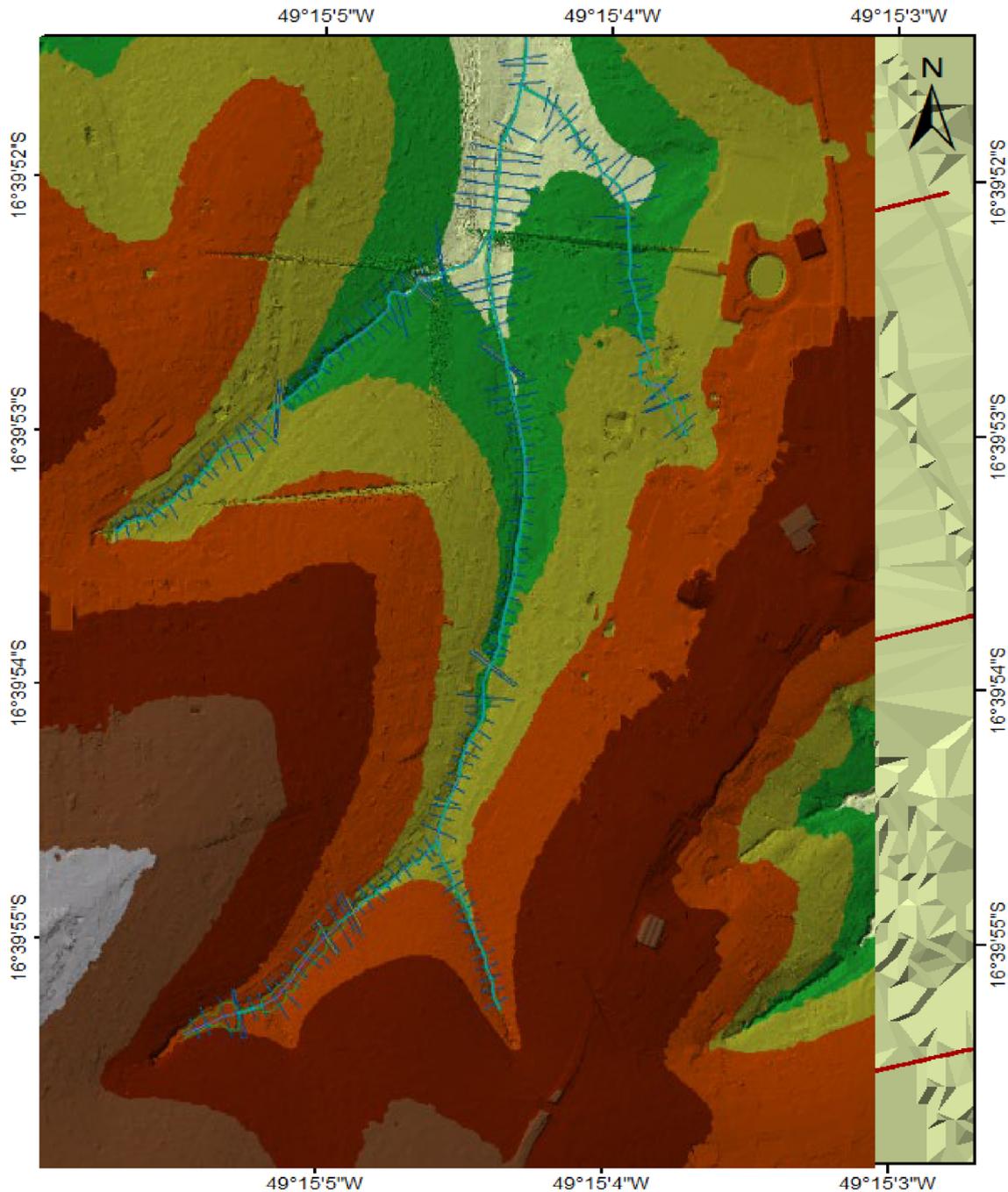


Figura 2 – Bacia e sub-bacias hidrográficas do córrego Botafogo (ano base de 2016): (A) uso do solo e (B) curva número.

criar um modelo do tipo TIN (*Triangular Irregular Network*) por meio do MDT (USACE, 2002), utilizando o método de triangulação de Delauney.

Enquanto sua resolução é de 1 m, de outros métodos tradicionais, como o *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM), é de 30 m, possuindo certo nível de incerteza quanto às elevações, o que pode afetar, sobretudo, estudos que envolvam recursos hídricos (MILIARESI; PARASCHOU, 2005; VALERIANO; ABDON, 2007; COSTA *et al.*, 2010).

As seções transversais do canal em estudo (trecho urbano do córrego Botafogo) foram geradas de forma semiautomática, com intervalo de 50 m entre as seções. A Figura 3 ilustra o modelo TIN com a geometria do canal extraída em polilinhas. As seções transversais não podem cruzar o canal mais de uma vez, assim como não podem sobrepor outras seções. Caso ocorra essa situação, as informações obtidas em cada seção se tornam imprecisas. Os produtos obtidos do TIN têm resultado melhor para as zonas de inundação e também para



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 3 - Modelo TIN do canal inserido no *Hydrologic Engineering Center - River Analysis System* (HEC-RAS).

a visualização da superfície 3D. Hasan *et al.* (2011) aplicaram o MDT LiDAR e mostraram que o modelo hidrológico aplicado com ele se mostra mais eficaz do que outros modelos digitais do terreno.

Na Figura 4, são apresentadas as inserções de cada seção transversal do canal (de 50 em 50 m) na bacia hidrográfica do córrego Botafogo e exemplos de como são inseridas as obras de arte (bueiros e pontes).

Definição dos hidrogramas de projeto

A definição do hidrograma de projeto foi realizada com base no método do Hidrograma Unitário Adimensional (HUA) do *Soil Conservation Service* – SCS (MAYS, 2005).

Para composição dos hidrogramas, utilizou-se a relação intensidade, duração e frequência pluviométrica (curva *idf*) específica da região do município de Goiânia, Goiás, definida por Costa e Prado (2003), após análises de precipitações máximas locais. Essa relação possibilita determinar a precipitação de projeto para certo T_R , nesse caso, de 50 anos (conforme descrito anteriormente).

Assim, o hidrograma que se busca determinar relaciona uma unidade de vazão dividida pela vazão máxima (q/Q_p), acontecendo em uma unidade de tempo dividida pelo tempo para o pico do hidrograma (t/T_p) (MAYS, 2005; GRIBBIN, 2009).

Esses hidrogramas possuem proporções relativas à precipitação efetiva unitária, e que se construídos para as várias distribuições de chuva, e posteriormente somados, chegam ao hidrograma de projeto (Figura 5). A relação entre escoamento e tempo, representado na Figura 5, é dada em função da precipitação efetiva, da área de drenagem da bacia, do armazenamento potencial e do tempo de concentração (Tabela 1). Dessa forma, a relação chuva-escoamento separa as perdas da precipitação total, resultando na chuva denominada precipitação efetiva ou chuva excedente, em que Q_p é a vazão de pico para uma altura de chuva excedente de 1 mm sobre a área de estudo.

Modelo hidrodinâmico: Hydrologic Engineering Center – River Analysis System

Para a modelagem hidrodinâmica, utilizou-se o *software* HEC-RAS, versão 5.1.0, desenvolvido pelo *U.S. Army Corps of Engineers*, adotando as mesmas configurações e dados de entrada referente ao canal utilizados nas simulações de Oliveira *et al.* (2016), inclusive os valores dos diferentes materiais (rugosidade de Manning) dos trechos do córrego em estudo (Tabela 3).

Embora a equação de Manning seja desenvolvida para escoamento permanente e uniforme, o seu uso em condições transientes é aceitável (VENÂNCIO *et al.*, 2017; MEDEIROS; ZANELLA, 2019), e por ter coeficientes muito assimilados na Engenharia (Tabela 3), é o mais empregado em situações reais de

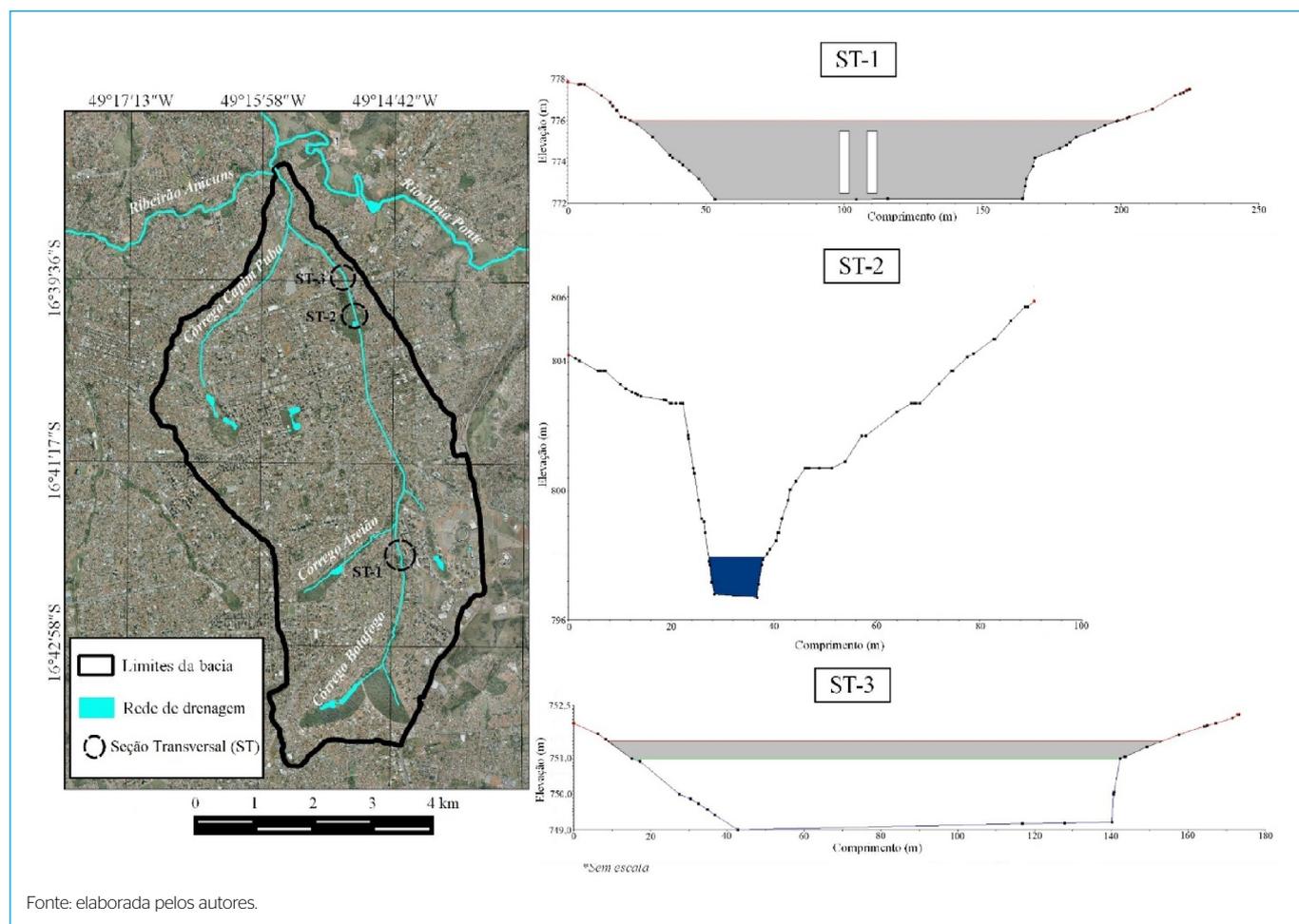
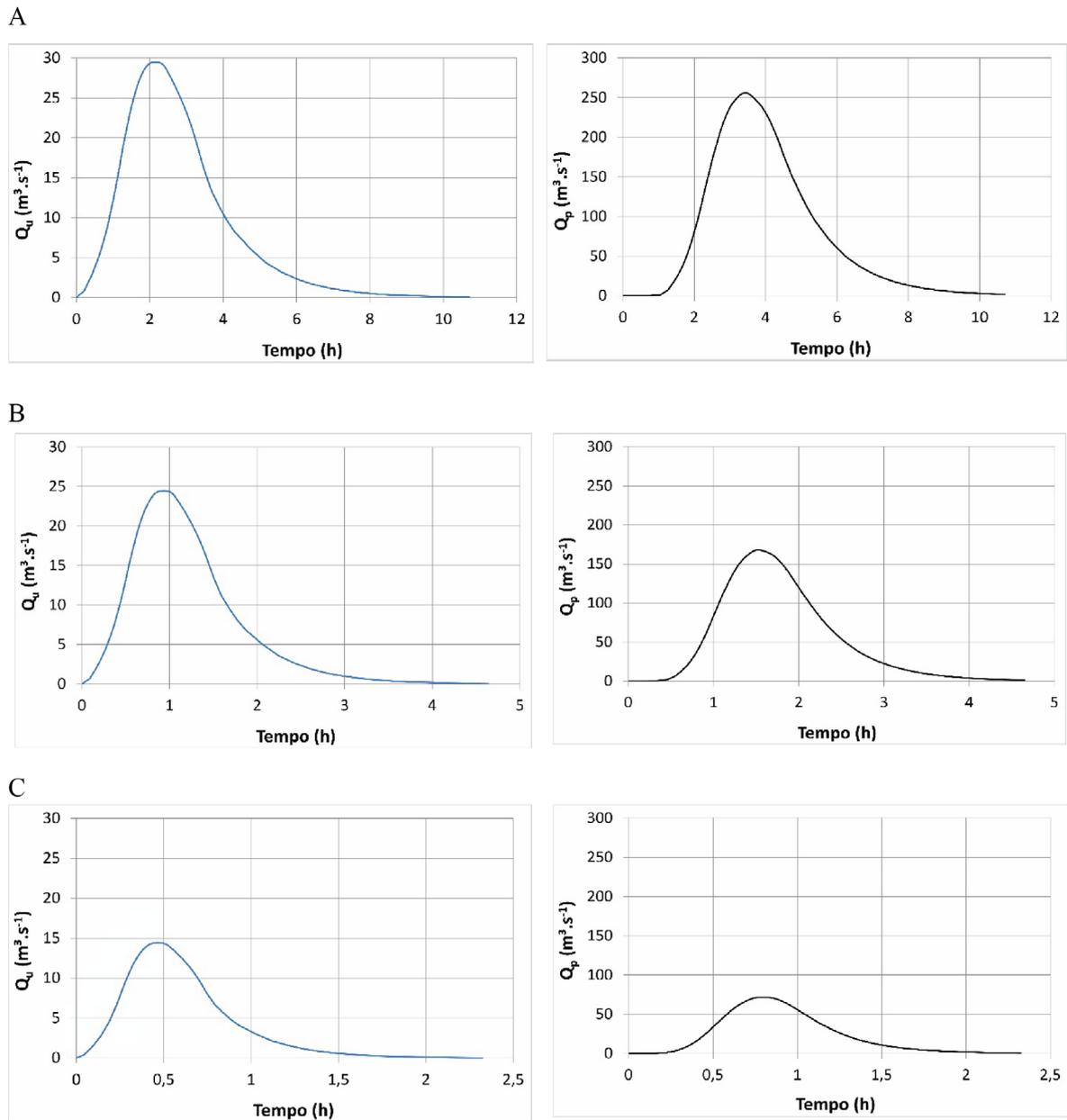


Figura 4 - Exemplo de seções transversais do canal e obras de arte (bueiro duplo celular de concreto e ponte) inseridos no *Hydrologic Engineering Center – River Analysis System* (HEC-RAS).



Q_u : vazão unitária; Q_p : vazão de pico.
Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 5 - Hidrogramas unitários e de projeto, respectivamente, para tempo de retorno de 50 anos: (A) bacia hidrográfica do córrego Botafogo; (B) sub-bacia do córrego Capim Puba; e (C) sub-bacia do córrego Areião.

Tabela 3 - Coeficiente de rugosidade dos materiais que compõem o canal do córrego Botafogo.

Material/Estrutura (conforme Figura 1)	Trecho (conforme Figura 7)	n_1
Concreto sem acabamento	3, 4 e 5	0,062
Revestimento vegetal	Próximo a nascente e foz	0,30 a 0,50
Gabião	1 e 2	0,05

n_1 : rugosidade de Manning do material do canal considerada inicialmente (não calibrada) nas simulações no HEC-RAS.
Fonte: adaptada de Oliveira *et al.* (2016).

projeto. No entanto, o nível de incertezas ainda é alto no uso desse tipo de formulação, principalmente em situações em que a vegetação é considerada, como é o caso das avaliações desenvolvidas neste artigo.

Outros dados de entrada necessários para a modelação hidrodinâmica foram: rede de drenagem; características das estruturas hidráulicas (obras de arte); seções transversais; e limites das calhas dos rios. Todos os elementos foram previamente processados na extensão do ArcGIS, HEC-GeoRAS, tendo como dado de entrada o MDT da rede de drenagem com resolução espacial de 1 m, feito a partir de LiDAR aerotransportado. As seções transversais

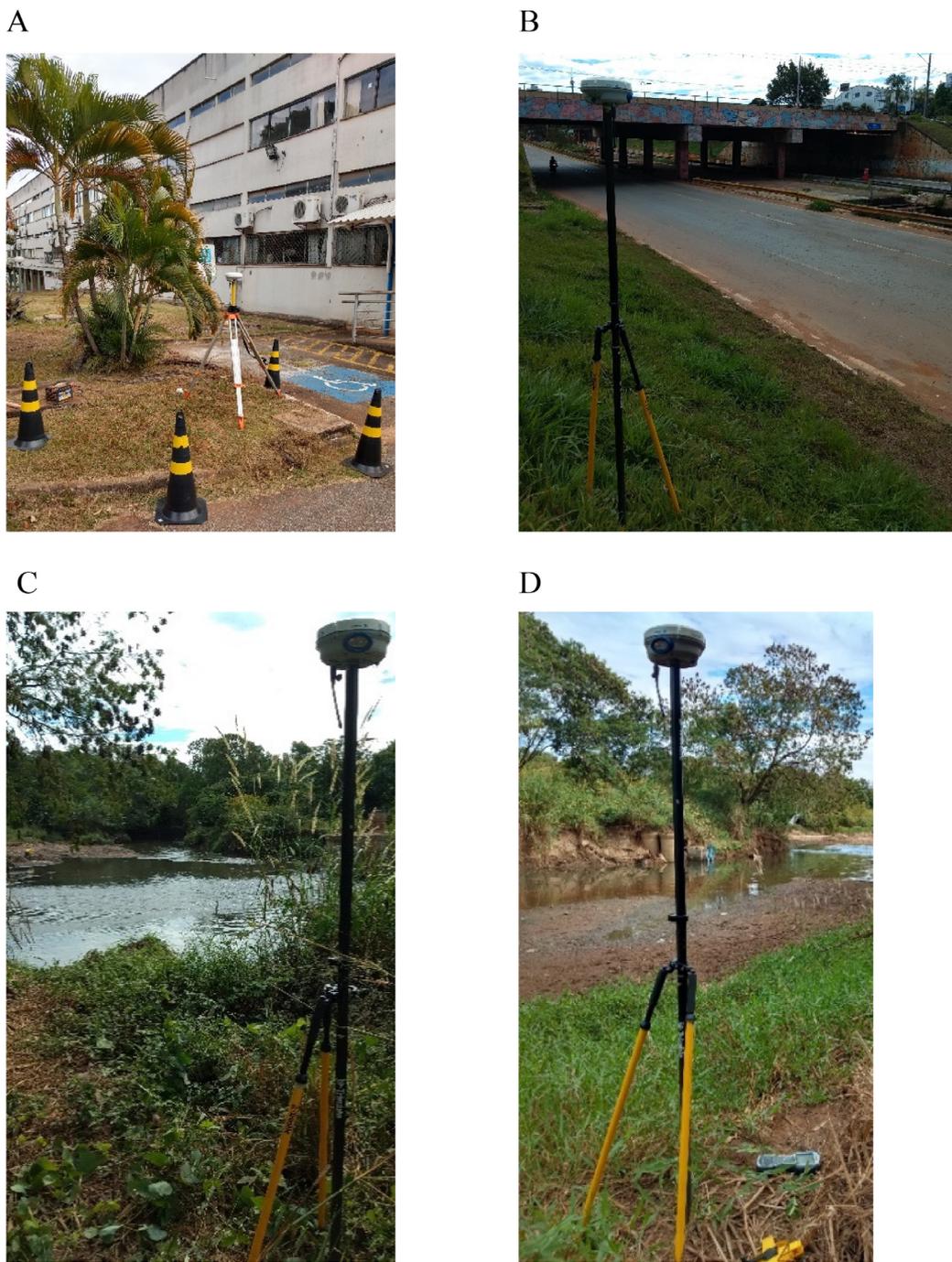
utilizadas nas simulações foram dispostas de 50 em 50 m, conforme estabelecido por Santos (2015).

Calibração e validação do modelo

O processo de calibração e validação do modelo consistiu na comparação entre as cotas de inundação simuladas no HEC-RAS para os trechos principais do

córrego Botafogo (denominados Trechos 1 a 6), considerando os diferentes T_R , e as cotas de inundação reais ocorridas e monitoradas em eventos chuvosos, a partir de registros fotográficos e, posteriormente, determinadas por levantamento topográfico (Figura 6).

Para a verificação das cotas das inundações reais (em campo) nos trechos considerados, foi utilizado um receptor GNSS (*Global Navigation Satellite*



Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 6 - Equipamento utilizado para determinação das cotas de inundação reais ao longo do córrego Botafogo: (A) base situada na Escola de Engenharia Civil e Ambiental da Universidade Federal de Goiás; (B) Trecho 5; (C) Trecho 6 (lado esquerdo); (D) Trecho 6 (lado direito).

System) Trimble R6 (Figura 6), no método de Posicionamento por Ponto Preciso (PPP), com coletas de oito minutos por ponto. No PPP, é essencial a utilização de efemérides e correções dos relógios dos satélites, ambos com alta precisão (MONICO, 2008; MARQUES *et al.*, 2014). Para localização em campo, foram utilizadas imagens de satélite e cartas dos locais de cada ponto. Para o pós-processamento foi utilizado o IBGE-PPP, que é um serviço *on-line* para o pós-processamento de dados GNSS pelo método PPP.

O procedimento de comparação entre cotas simuladas (HEC-RAS) e as cotas atingidas pelas inundações (GNSS) foi realizado subdividindo cada trecho inundável (Trechos 1 a 6, conforme a Figura 7) em três seções transversais principais, denominadas de A (montante), B (média) e C (jusante), considerando tanto o lado esquerdo quanto o lado direito do canal.

Assim, foi aplicado o modelo proposto por Oliveira (2012) e Formiga *et al.* (2016), que utiliza análise multiobjetiva, o NSGA – II (Algoritmo Genético Elitista com Ordenação Não Dominada), adaptada para utilizar as cotas como variável de entrada. Com relação às funções objetivo (F_o) utilizadas, etapa em que os objetivos são quantificados numericamente de modo que se possam comparar duas alternativas, foram empregados o coeficiente de eficiência de Nash-Stucliffé (Equação 1), proposto por ASCE Task Committee (1993) e Moriasi *et al.* (2007), e o erro percentual (Equação 2):

$$F_{oi} = 1 - \frac{\sum_{i=1}^t (H_{OBS,i} - H_{CAL,i})^2}{\sum_{i=1}^t (H_{OBS,i} - \bar{H}_{OBS,i})^2} \quad (1)$$

$$F_{o2} = \left| \frac{\max(H_{OBS,t}) - \max(H_{CAL,t})}{\max(H_{OBS,t})} \right| \quad (2)$$

Em que:

$H_{OBS,i}$ e $H_{CAL,i}$: altura da lâmina de água observada e calculada no tempo i na seção x , respectivamente;

H_{OBSx} : altura da lâmina de água média na seção x ;

t : número de intervalos de tempo.

O processo de ajuste no HEC-RAS dos parâmetros envolvidos na calibração foi realizado por meio de tentativa e erro, de modo a obter os valores de coeficientes de Manning que minimizassem a F_o .

Foram utilizadas também, para verificação dos resultados, os dados de Santos e Romão (2010), os quais fizeram espacialização das inundações em Goiânia, por meio da compilação de informações contidas em artigos de jornais locais e de dados da Defesa Civil da cidade de Goiânia, Goiás, entre os anos de 2004 e 2007.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Após a inserção dos dados da rede de drenagem (seções transversais, características das obras de arte, limites da calha e cotas), que foram previamente processados na extensão do ArcGIS (HEC-GeoRAS) e no hidrograma de projeto (Figura 5), foi realizada modelagem do canal no HEC-RAS

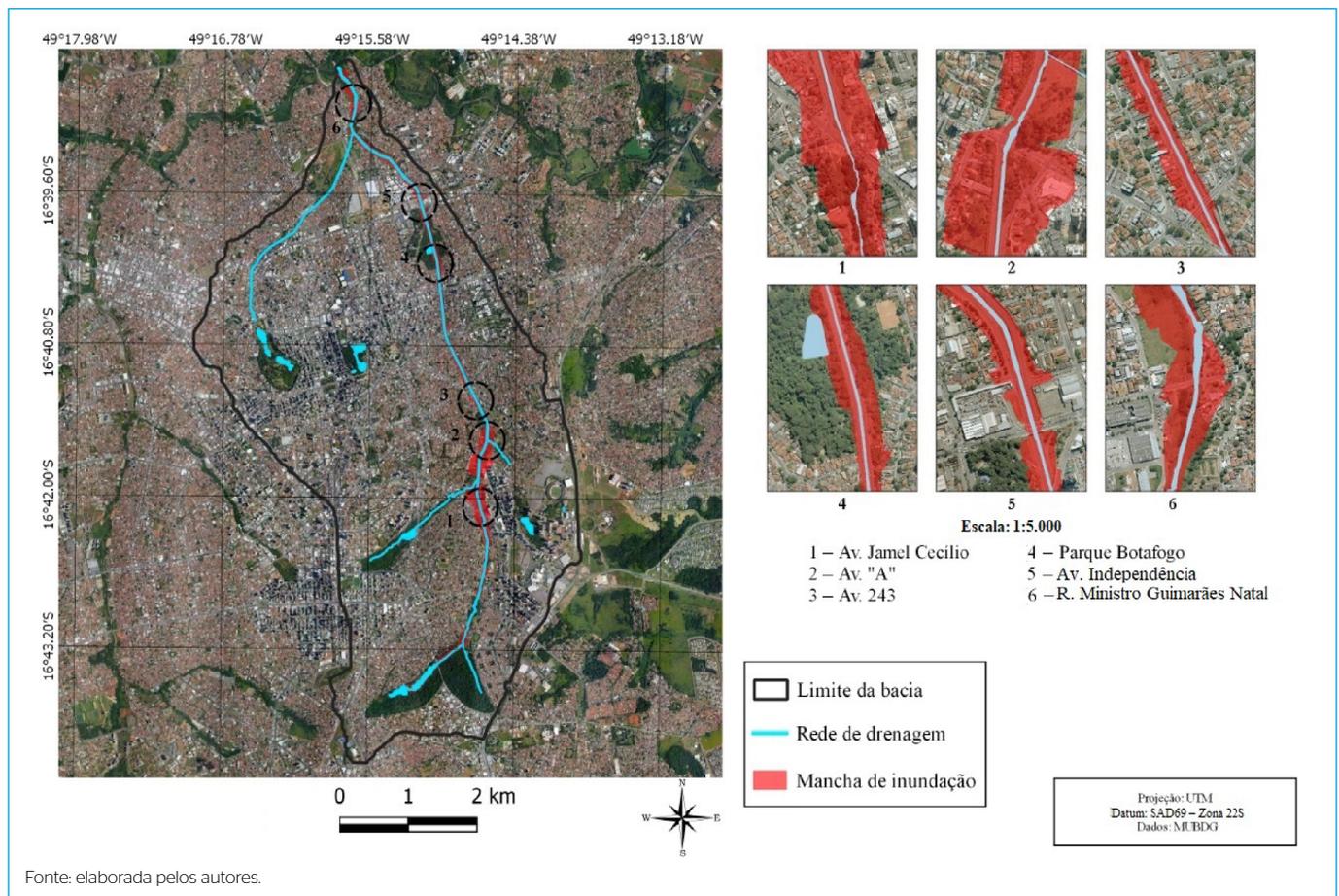


Figura 7 - Trechos críticos de inundação simulada para a bacia hidrográfica do córrego Botafogo (tempo de retorno de 50 anos).

para avaliação das áreas inundáveis para a bacia hidrográfica do córrego Botafogo (Figura 7).

É possível identificar vários trechos ao longo do canal onde o nível da água ultrapassa a cota de delimitação da calha natural ou artificial do terreno, ou seja, ocorre transbordamento. Seis trechos de transbordamento são mais críticos, apresentando maior magnitude de alagamento (Figura 7). A partir das simulações realizadas no HEC-RAS, considerando $T_R = 50$ anos, foi possível avaliar a mancha de inundação e quantificar a área inundada, que é de aproximadamente 1,12 km², cerca de 3,6% da bacia hidrográfica em estudo.

Na Figura 7, percebe-se que as áreas inundáveis simuladas invadem a avenida que margeia o córrego (marginal Botafogo), podendo atingir a cota em que se situam casas, prédios, e até outras ruas circunvizinhas. Cabral *et al.* (2014; 2016) ressaltam que o risco de inundação é em função da lâmina média de água escoada em certa área e da quantidade de pessoas vulneráveis às enchentes, podendo-se afirmar que nesses seis trechos simulados há ameaça de risco de enchentes.

Quanto ao trecho canalizado em concreto do córrego Botafogo (Trechos 3 a 5), há transbordamento em toda sua extensão (Figura 8).

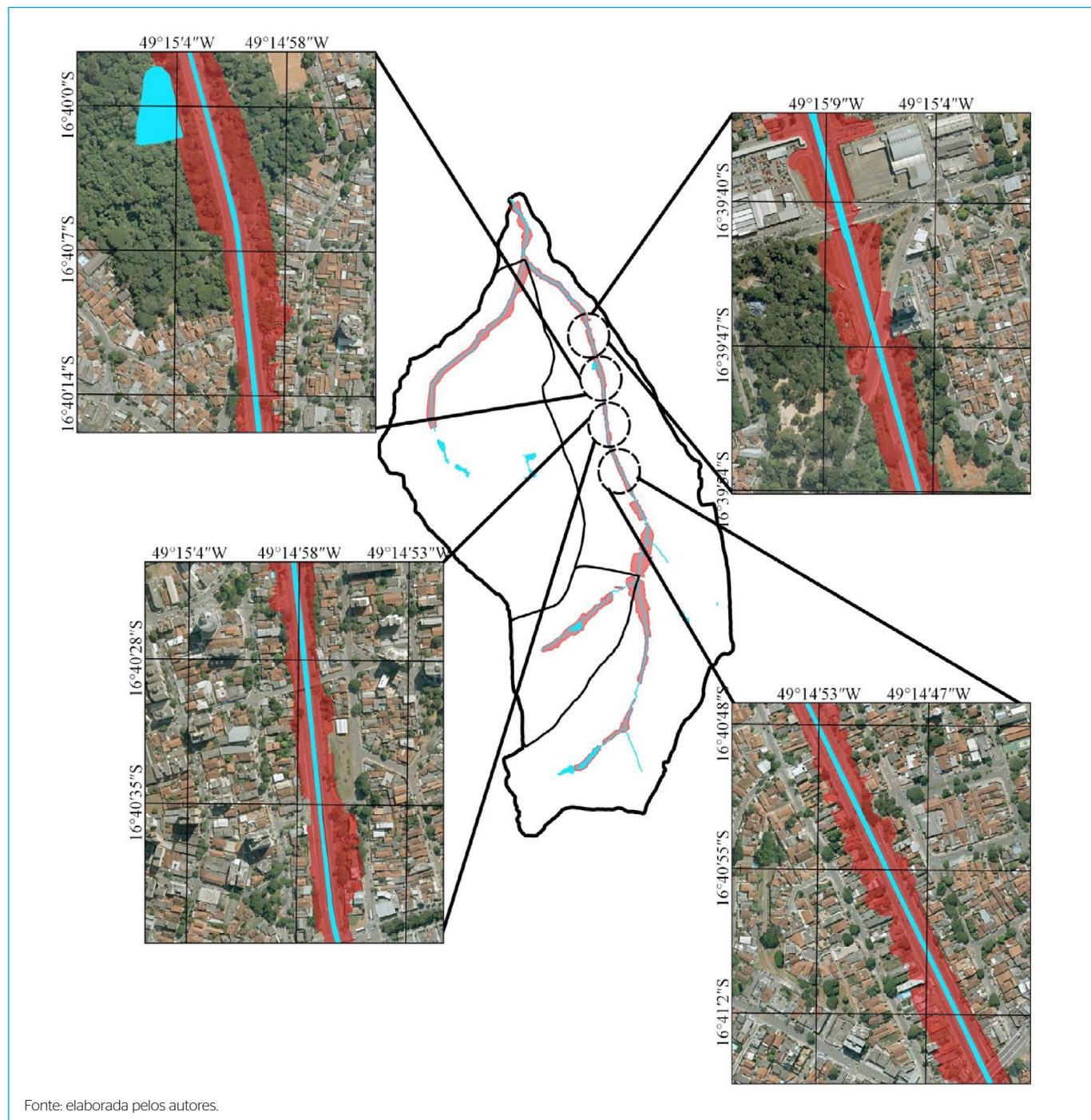


Figura 8 - Detalhe da inundação simulada no trecho canalizado em concreto, córrego Botafogo, Trechos 3 a 5 (tempo de retorno de 50 anos).

Nesses trechos, há três pontos críticos de inundação (denominados de Ponto 3, 4 e 5 — Figura 8). Percebe-se que a área inundável simulada na parte canalizada em concreto é menor que em outros trechos onde o canal é natural, evidenciando menor potencial de inundação desse trecho em razão do ganho de energia e velocidade dos volumes de água propagados.

Porém, apesar de a área inundável simulada ser menor na extensão da canalização do que a montante dela, ela tende a voltar a crescer à medida que a água escoar em sentido ao exutório, ou seja, o problema é transferido para a jusante do trecho em concreto, mesmo com o trecho a jusante possuindo maiores áreas transversais e rugosidades (gabião e revestimentos vegetais — diversos tipos de espécies gramíneas), corroborado também pela topografia favorável, ou seja, trechos menos inclinados.

Para verificar as cotas atingidas pelas diferentes inundações ocorridas, foram avaliados alguns registros fotográficos de eventos significativos na área de

estudo (Figuras 9 a 12) para cada trecho avaliado (denominados de Trechos 1 a 6, Figura 7). Em seguida, para cada trecho, foram identificados os locais inundáveis para que fossem confrontados com os dados do levantamento topográfico (GNSS) e, depois, comparados com as simulações das manchas de inundação realizadas no HEC-RAS, conforme demonstra a Tabela 4.

Para cada trecho avaliado foram identificadas as maiores cotas atingidas pelas inundações para ambos os lados do córrego Botafogo a partir do levantamento topográfico (GNSS), com o intuito de verificar e validar a modelagem numérica.

Para a maioria dos pontos avaliados, o ajuste empregado para minimizar a F_0 utilizada (Tabela 4) pode ser considerado como bom. Para o Ponto 6 (Tabela 4), observam-se valores de cotas estimadas maiores que os valores encontrados pelos registros fotográficos (Figuras 9 a 12). Os valores do coeficiente de Manning calibrados ficaram acima dos encontrados na literatura (PORTO, 2006), principalmente para os trechos em que o material do canal é



A



B

Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 9 – Após inundações na avenida Marginal Botafogo: (A) Trecho 1, próximo à avenida Jamel Cecílio (21 de janeiro de 2017); e (B) foz do córrego Areião, pouco a jusante do Trecho 1 (21 de janeiro de 2017).



A



B

Fonte: (A) O Popular (2015), (B) Mais Goiás (2015).

Figura 10 – Inundações do córrego Botafogo, no trecho canalizado em concreto na avenida Marginal Botafogo: (A) Trecho 3, entre a avenida 11 e a rua 10, setor Leste Universitário (15 de fevereiro de 2015), e (B) Trecho 5, avenida Independência (26 de novembro de 2015).

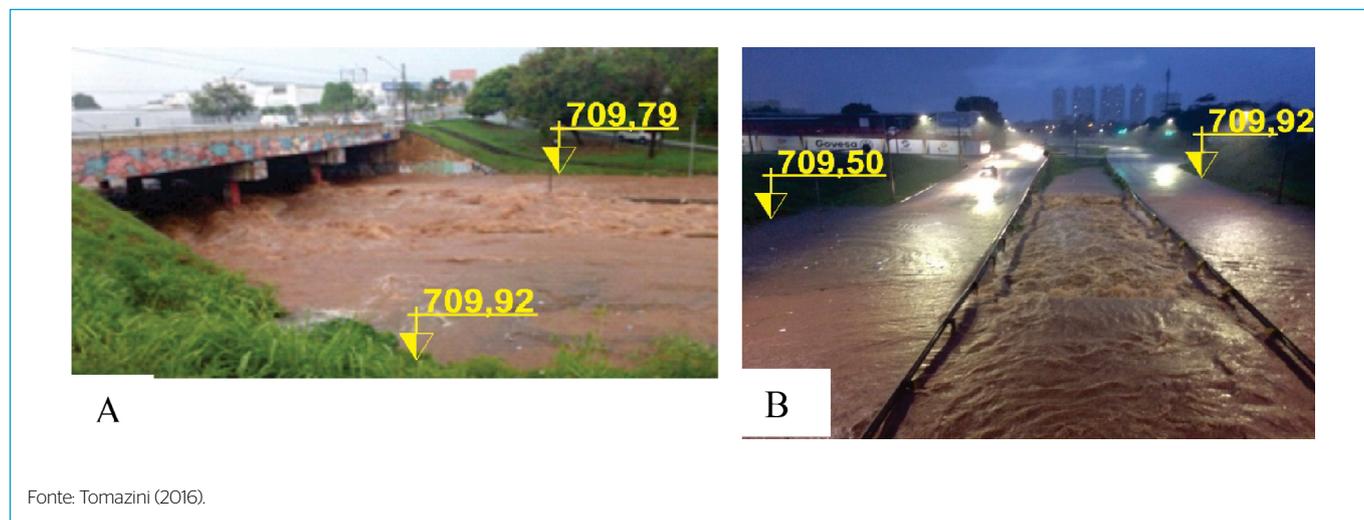


Figura 11 – Inundações do córrego Botafogo, avenida Marginal Botafogo, próximo à avenida Independência – Trecho 5: (A) 30 de outubro de 2016 e (B) 06 de dezembro de 2016.

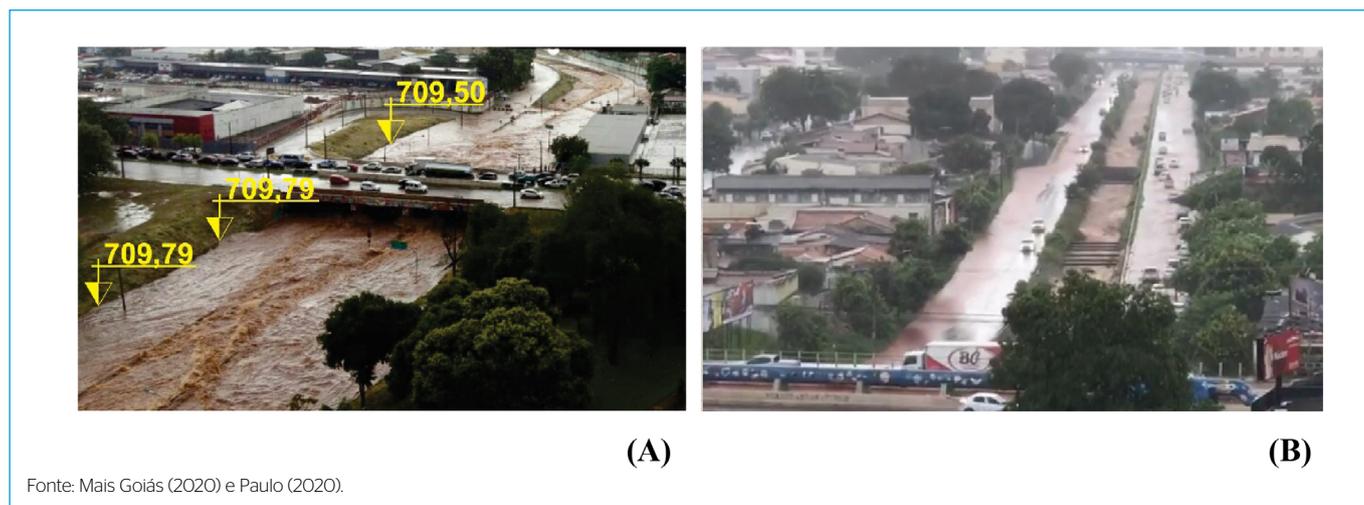


Figura 12 – Inundação na avenida Marginal Botafogo – Trecho 5: (A) com a avenida Independência (05 de abril de 2018) e (B) com a avenida Universitária, entre os Trechos 3 e 4 (21 de dezembro de 2020).

do tipo natural (Tabela 5). Isso se deve, principalmente, à falta de manutenção dos canais, ao processo de assoreamento (que diminui a seção de escoamento) e ao aparecimento de vegetação, que aumenta a rugosidade. Esses fatores aumentam o coeficiente de resistência ao escoamento dos trechos, aumentando assim o coeficiente de Manning.

Exemplificando, a Figura 9 ilustra o Trecho 1 no dia 21 de janeiro de 2017 após 30 minutos de ter ocorrido um evento chuvoso de 23,8 mm em 34 minutos, registrado na estação pluviométrica da rede de monitoramento da UFG, que corresponde a um T_r menor que um ano.

A rede de monitoramento da UFG possui seis pluviógrafos em diferentes pontos da bacia hidrográfica do córrego Botafogo. Os dados utilizados foram coletados no Pluviógrafo 16, localizado no setor Pedro Ludovico, escola Pedro Xavier (próximo da nascente), em Goiânia, Goiás.

A Figura 12 ilustra inundações ocorridas no dia 05 de abril de 2018 para o Trecho 5, evidenciando também as consequências do evento (Figura 12B), em

que foram registrados 67,6 mm de chuva em 43 minutos, ou seja, intensidade pluviométrica de 94,3 mm.h⁻¹.

É importante ressaltar que as cotas de inundação previstas nas simulações realizadas (Figuras 7 e 8) foram maiores que as cotas identificadas e registradas nos acervos fotográficos e no levantamento topográfico (Figuras 9 a 12), pois na modelagem numérica foi utilizada intensidade pluviométrica condizente a $T_r = 50$ anos, diferentemente do que foram registrados nos pluviógrafos da rede de monitoramento pluviométrico da Universidade Federal de Goiás — UFG (Tabela 6).

Os dados utilizados foram coletados no Pluviógrafo 16, localizado no setor Pedro Ludovico, escola Pedro Xavier (próximo da nascente), para as precipitações apresentadas na Tabela 6. Somente as precipitações dos dias 15 de fevereiro de 2015 e 05 de abril de 2018 foram registradas pelo Pluviógrafo 13, localizado no Setor Oeste no colégio Ateneu Dom Bosco (centro da bacia hidrográfica).

Tabela 4 - Maiores cotas atingidas nas áreas inundáveis (trechos) obtidas na simulação numérica (*Hydrologic Engineering Center - River Analysis System – HEC-RAS*) versus registros fotográficos e levantamento topográfico.

Ponto	Orientação	Coordenadas (UTM)		Cotas		F _{oi}
		E	W	Simulação numérica	Registro fotográfico e levantamento topográfico	
Ponto O1						
1ª	Esquerda	687317,776	8152269,457	776	776,15	0,994
	Direita	687352,852	8152275,505	777	777,07	
1B	Esquerda	687104,748	8152578,350	781	775,68	
	Direita	687371,222	8152616,137	779	775,58	
1C	Esquerda	687155,775	8152782,447	773	770,44	
	Direita	687269,168	8152812,686	773	770,33	
Ponto O2						
2ª	Esquerda	687097,189	8153372,091	769	766,09	0,959
	Direita	687272,948	8153315,395	767	765,89	
2B	Esquerda	687125,537	8153496,824	771	761,90	
	Direita	687507,294	8153608,327	771	761,79	
2C	Esquerda	687262,388	8153831,333	758	760,17	
	Direita	687419,603	8153802,910	762	760,15	
Ponto O3						
3ª	Esquerda	687088,193	8154413,720	750	751,54	0,959
	Direita	687125,688	8154450,006	757	751,40	
3B	Esquerda	686998,688	8154598,778	749	749,52	
	Direita	687039,812	8154621,759	753	749,33	
3C	Esquerda	686943,000	8154743,921	747	748,08	
	Direita	686967,000	8154763,273	749	747,50	
Ponto O4						
4ª	Esquerda	686591,078	8156177,209	732	728,37	0,862
	Direita	686666,068	8156177,209	730	728,35	
4B	Esquerda	686453,192	8156466,286	726	723,68	
	Direita	686591,078	8156489,267	727	724,36	
4C	Esquerda	686485,849	8156625,944	727	723,32	
	Direita	686557,211	8156648,925	730	723,15	
Ponto O5						
5ª	Esquerda	686407,000	8156915,020	724	720,99	0,738
	Direita	686457,000	8156924,697	725	720,75	
5B	Esquerda	686357,639	8157026,297	723	709,79	
	Direita	686453,192	8157039,602	725	709,92	
5C	Esquerda	686314,096	8157192,002	725	709,50	
	Direita	686406,000	8157217,402	721	709,92	
Ponto O6						
6ª	Esquerda	685364,618	8158499,500	698	688,00	0,910
	Direita	685492,828	8158511,595	701	685,20	
6B	Esquerda	685321,075	8158552,719	701	688,00	
	Direita	685509,761	8158584,167	701	685,20	
6C	Esquerda	685281,161	8158746,243	699	688,00	
	Direita	685433,561	8158790,996	705	685,20	

F_{oi}: função objetivo 1.

Fonte: elaborada pelos autores.

Tabela 5 - Coeficiente de rugosidade dos materiais após o processo de calibração.

Material/Estrutura (conforme Figura 1)	Trecho (conforme Figura 7)	n _c	%
Concreto sem acabamento	3, 4 e 5	0,1	161,3
Revestimento vegetal	Próximo a nascente e foz	0,75	150 a 250
Gabião	1 e 2	0,087	174

n_c: rugosidade de Manning do material do canal após calibração no HEC-RAS; %: o quanto a n_c aumentou em comparação à n_i (Tabela 3).

Sendo assim, foi possível validar os resultados numéricos modelados a partir das F_o (Equações 1 e 2) com base nos dados da Tabela 4, originando os resultados apresentados na Figura 13, considerados toda a metodologia e dados de entrada já apresentados para T_R de 50 anos.

A Figura 14 apresenta o comportamento das F_o utilizadas no processo de validação das simulações numéricas, em que se observa que, para as duas F_o, foram encontradas soluções próximas do máximo valor ótimo, ou seja, 1 para F_{oi} (correlação) e zero para F_{o2} (erro).

Tabela 6 - Intensidades pluviométricas registradas pela rede de monitoramento da Universidade Federal de Goiás.

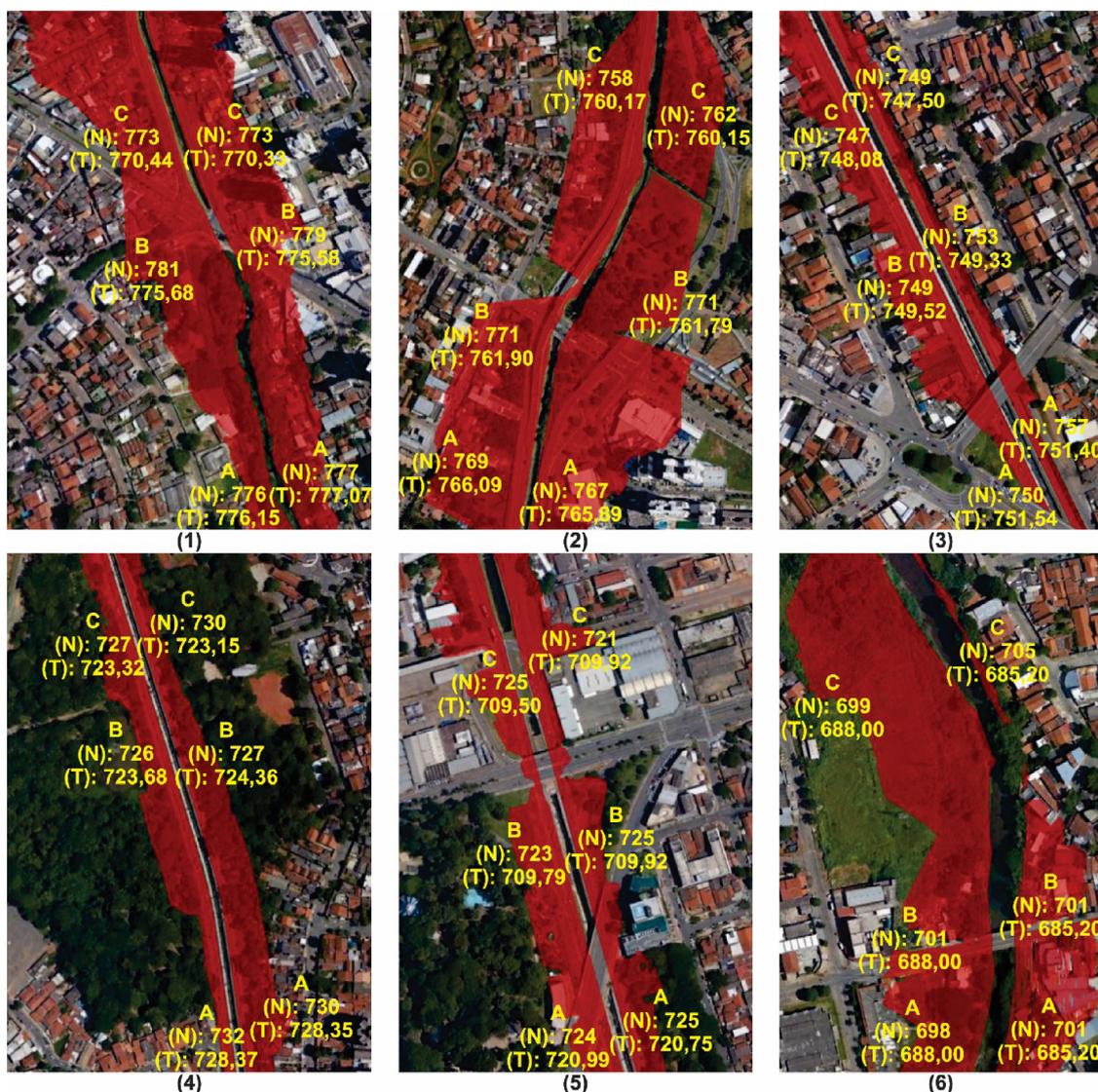
Data	Total precipitado (mm)	Tempo de duração da chuva (minutos)	Intensidade pluviométrica média (mm.h ⁻¹)	T _R (ano)
15/02/2015*	32,6	63	31,0	< 1,00
26/11/2015	51,6	57	54,3	1,09
30/10/2016	55,4	61	54,4	1,46
06/12/2016	43,2	68	38,1	< 1,00
05/04/2018*	31,2	72	26,0	< 1,00
05/04/2018	67,6	43	94,3	15,00

T_R: tempo de retorno; *intensidades pluviométricas registradas pelo Pluviógrafo 13, situado no centro da bacia hidrográfica do córrego Botafogo.

Resultados semelhantes aos apresentados na Figura 14 foram encontrados por Formiga *et al.* (2016), porém eles utilizaram essas F_{o1} para validações de vazões e não de cotas de inundações, como neste estudo.

Moriasi *et al.* (2007) ressaltam que resultados de F_{o1} entre 0,75 e 1,00 podem ser considerados como bons para estudos que envolvam modelagem hidrológica. Assim, como a maioria dos valores de F_{o1} foi superior a 0,8, pode-se afirmar que o comportamento do modelo foi satisfatório, uma vez que as cotas de inundação observadas e as simuladas apresentaram erros inferiores a 20%.

Com relação à proposta de validação dos dados considerando os resultados de Santos e Romão (2010), estes também apontam ocorrências de inundações em três trechos da bacia hidrográfica do córrego Botafogo, sendo elas: no bairro Vila Isabel (lado direito, na baixada da avenida Segunda Radial, próximo



N: cota numérica (metros); T: cota topográfica (metros).
 Fonte: elaborada pelos autores.

Figura 13 - Comparativo entre as cotas de inundação simuladas numericamente no HEC-RAS e as determinadas nos registros fotográficos e no levantamento topográfico: (1) Av. Jamel Cecílio; (2) Av. A; (3) Av. 243; (4) Parque Botafogo; (5) Av. Independência; (6) Rua Guimarães Natal.

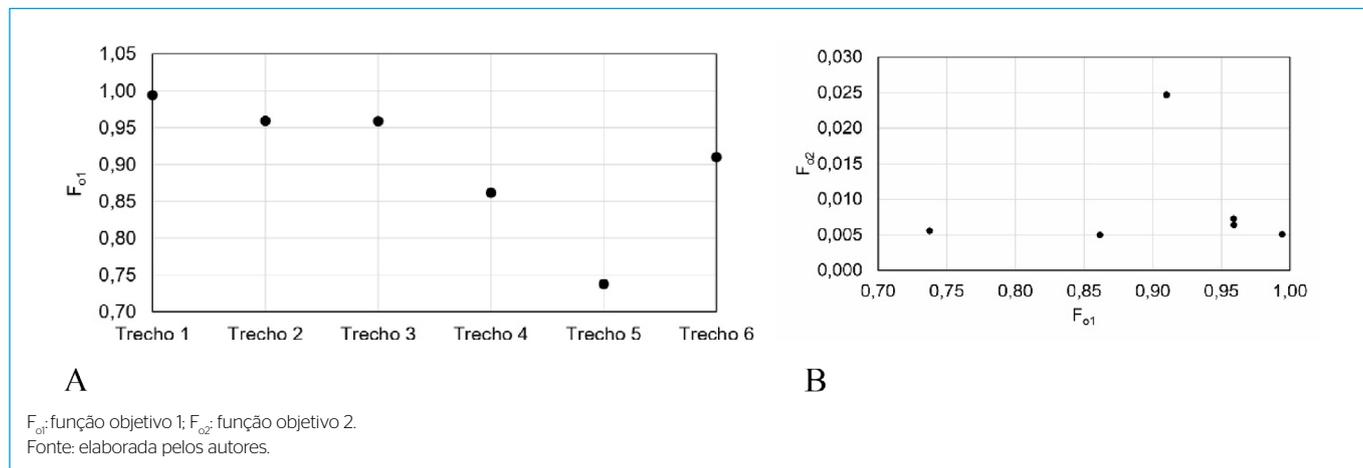


Figura 14 - Relação entre as funções objetivo utilizadas: (A) coeficiente de eficiência de Nash-Stucliffe para cada trecho; (B) função objetivo 1 e função objetivo 2.

à nascente), no setor Jardim Goiás (antiga Vila Lobó, Trechos 2 e 3 das Figuras 7 e 8) e no bairro Emílio Póvoa (Trecho 6 da Figura 7), corroborando os resultados da modelagem numérica realizada.

Diante do que foi registrado e divulgado por Mais Goiás (2015) e O Popular (2015) e Tomazini (2016) (Figuras 9 a 12), aliado aos relatos de Santos e Romão (2010) e às F_o utilizadas (F_{o1} próximas de 1 e F_{o2} menores que 0,025), consideram-se validados os resultados das simulações dos potenciais locais e áreas inundáveis obtidas pela modelagem utilizando o HEC-RAS com a base de dados LiDAR.

Ao se trabalhar com MDTs de alta resolução (LiDAR), têm-se geometrias mais detalhadas, sem generalizações do relevo e da topografia, o que influencia diretamente na área inundada. Podhorányi *et al.* (2013) demonstram as mudanças que ocorrem nos cenários inundados utilizando três MDTs de resolução diferentes (1, 5 e 10 m), e os resultados mostraram que a área inundada para MDT de menor resolução foi superior ao de maior resolução.

CONCLUSÕES

A integração LiDAR, ferramentas SIG e modelagem hidrodinâmica no HEC-RAS, para verificação e análise dos potenciais locais e áreas de inundações urbanas próximas de canais naturais e artificiais, é eficiente e possibilita identificar os principais trechos inundáveis para diferentes cenários de precipitação.

A análise das cotas de inundação observadas e simuladas no HEC-RAS durante o processo de otimização da validação é satisfatória, uma vez que os erros encontrados são inferiores a 20%, considerando as F_o utilizadas.

Precipitações com T_R inferiores a um ano, considerando o tempo de duração das chuvas avaliadas, são capazes de provocar inundações em alguns trechos do canal. A canalização em concreto não suporta as vazões geradas e propagadas para T_R de 50 anos.

Ressalta-se a importância de que, ao se projetar estruturas hidráulicas de drenagem urbana, seja considerada também a propagação das vazões pelos canais, e não apenas sua geração (vazão de pico).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao conselho editorial e aos revisores deste artigo.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Mendes, T. A.: conceituação, curadoria de dados, investigação, metodologia, administração do projeto, supervisão, validação, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Sousa, M. B.: curadoria de dados, análise formal, investigação, software, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Pereira, S. A. S.: curadoria de dados, software, validação, escrita – primeira redação, escrita – revisão e edição. Santos, K. A.: software, validação, visualização. Formiga, K. T. M.: metodologia, recursos, supervisão, escrita – revisão e edição.

REFERÊNCIAS

ABUSHANDI, E.; MERKEL, B. Modelling rainfall runoff relations using HEC-HMS and IHACRES for a single rain even in an arid region of Jordan. *Water Resources Management*, v. 27, n. 7, p. 2391-2409, 2013. <https://doi.org/10.1007/s11269-013-0293-4>

ASCE TASK COMMITTEE. Criteria for evaluation of watershed models. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, v. 119, n. 3, p. 429-442, 1993. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1993\)119:3\(429\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1993)119:3(429))

BRZANK, A.; GÖPFERT, J.; LOHMANN, P. Aspects of lidar processing in coastal areas. *International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 36, n. Part 1, p. W3, 2005.

CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, S. C. Hydrologic and hydraulic modelling integrated with GIS: a study of the Acaraú river basin - CE. *Journal of Urban and Environmental Engineering*, v. 8, n. 2, p. 167-174, 2014.

- CABRAL, S. L.; CAMPOS, J. N. B.; SILVEIRA, S. C.; TEIXEIRA, F. A. A. Integração do SIG, HEC/HMS e HEC/RAS no mapeamento de área de inundação urbana: aplicação à bacia do rio Granjeiro-CE. *Geociências*, v. 35, n. 1, p. 90-101, 2016.
- CALÇADA, M. C.; PORTELA, M. M.; MATOS, J. *Análise de cheias e delimitação de zonas inundáveis em Timor Lestes*. In: CONGRESSO DA ÁGUA, 7., 2004. *Anais...* Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos, 2004.
- COMDATA. *Mapa urbano básico digital de Goiânia – MUBDG V.24*. SIGGO V2.0. Goiânia: COMDATA, 2014. 1 CD-ROM.
- COSTA, A. R.; PRADO, L. A. Espacialização de chuvas intensas para o Estado de Goiás e o sul de Tocantins. *Revista Engenharia Agrícola*, v. 23, n. 2, p. 268-276, 2003.
- COSTA, C. A. G.; TEIXEIRA, A. S.; ANDRADE, E. M.; LUCENA, A. M. P.; CASTRO, M. A. H. Análise da influência vegetacional na altimetria dos dados SRTM em bacias hidrográficas no semiárido. *Revista Ciência Agronômica*, v. 41, n. 2, p. 222-230, 2010.
- CUNHA, L.; LEAL, C.; TAVARES, A.; SANTOS, P. Risco de inundação no município de Torres Novas (Portugal). *Revista Geonorte*, v. 1, n. 4, p. 961-973, 2012.
- DEPARTAMENTO DE ÁGUAS E ENERGIA ELÉTRICA (DAEE); COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). *Drenagem urbana: manual de projeto*. 2. ed. São Paulo: CETESB, 1980.
- DEPARTAMENTO NACIONAL DE INFRAESTRUTURA DE TRANSPORTES (DNIT). Diretoria de Planejamento e Pesquisa. Coordenação Geral de Estudos e Pesquisa. Instituto de Pesquisas Rodoviárias. *Manual de hidrologia básica para estruturas de drenagem*. 2. ed. Rio de Janeiro: DNIT, 2005. 133 p. (Publicação IPR, 715)
- FEDERAL HIGHWAY ADMINISTRATION (FHA). *U.S. Department of Transportation New Jersey Avenue, 1200, SE*. Washington, D.C.: FHA, 2011.
- FORMIGA, K. T. M.; CARVALHO, M. D.; SILVA, K. A.; SOARES, A. K. Calibração do *Storm Water Management Model* (SWMM) utilizando algoritmos evolucionários multiobjetivo. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, v. 21, n. 4, p. 697-707, 2016. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522016131862>
- GHIMIRE, S. Application of a 2D hydrodynamic model for assessing flood risk from extreme storm events. *Climate*, v. 1, n. 3, p. 148-162, 2013. <https://doi.org/10.3390/cli1030148>
- GRIBBIN, J. E. *Introdução à hidráulica, hidrologia e gestão de águas pluviais*. 3. ed. São Paulo: Norteamericana, 2009.
- GUEDES, K. G.; OLIVEIRA, F. H. L. Análise comparativa entre índices de medida de conforto ao rolamento no anel viário de Fortaleza. *Revista Tecnologia*, v. 39, n. 1, p. 1-10, 2018. <https://doi.org/10.5020/23180730.2018.7491>
- HASAN, A.; PILESJÖ, P.; PERSSON, A. The use of LIDAR as a data source for digital elevation models a study of the relationship between the accuracy of digital elevation models and topographical attributes in northern peatlands. *Hydrology and Earth System Sciences Discussions*, v. 8, n. 3, p. 5497-5522, 2011. <https://doi.org/10.5194/hessd-8-5497-2011>
- INSTITUTO DE PLANEJAMENTO MUNICIPAL (IPLAN). *Estudo e impacto ambiental e relatório e impacto ambiental*. Vias marginais dos córregos Botafogo e Capim Puba Goiânia. Goiânia: Tecnosan Engenharia S.A., 1990.
- KNEBL, M. R.; YANG, Z. L.; HUTCHISON, K.; MAIDMENT, D. R. Regional scale flood modeling using NEXRAD rainfall, GIS, and HEC-HMS/RAS: a case study for the San Antonio River Basin Summer 2002 storm event. *Journal of Environmental Management*, v. 75, n. 4, p. 325-336, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2004.11.024>
- LI, Y.; WU, H.; AN, R.; XU, H.; HE, Q.; XU, J. An improved building boundary extraction algorithm based on fusion of optical imagery and LiDAR data. *Optik*, v. 124, n. 22, p. 5357-5362, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2013.03.045>
- MAHALINGAM, R.; OLSEN, M. J.; O'BANION, M. S. Evaluation of landslide susceptibility mapping techniques using lidar-derived conditioning factors (Oregon case study). *Geomatics, Natural Hazards and Risk*, v. 7, n. 6, p. 1884-1907, 2016. <https://doi.org/10.1080/19475705.2016.1172520>
- MAIS GOIÁS. Chuva causa estragos em Goiânia. *Mais Goiás*, 2015. Disponível em: <http://www.emaisgoias.com.br/chuva-causa-estragos-em-goiania/>. Acesso em: 16 fev. 2017.
- MAIS GOIÁS. Tempo: veja como está a Marginal Botafogo nesse momento. *Instagram*, 2020. Disponível em: https://www.instagram.com/p/CJEVzYF4DE/?utm_source=ig_web_copy_link. Acesso em: 20 jan. 2021.
- MARQUES, H. A.; MONICO, J. F.; SHIMABUKURO, M. H.; OYAMA, R. T.; WENTZ, J. P. PPP em tempo real: fundamentos, implementação computacional e análises de resultados no modo estático e cinemático. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 66, n. 6, p. 1331-1345, 2014.
- MAYS, L. W. *Water resources engineering*. Nova York: John Wiley & Sons, 2005. 761 p.
- MEDEIROS, M. D.; ZANELLA, M. E. Estudo das vazões e estimativas de inundações no Baixo-Açu-RN. *Geo Uerj*, n. 34, p. 40946, 2019. <https://doi.org/10.12957/geouerj.2019.40946>
- MELLO, A. J. Q. *Rios e chuvas do Brasil: novos métodos e tabelas de hidrologia*. Curitiba: A. M. Cavalcante Cia, 1973.
- MERWADE, V.; COOK, A.; COONROD, J. GIS techniques for creating river terrain models for hydrodynamic modeling and flood inundation mapping. *Environmental Modelling & Software*, v. 23, n. 10-11, p. 1300-1311, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2008.03.005>
- MILIAREISIS, G. C.; PARASCHOU, C. V. E. Vertical accuracy of the SRTM DTED level 1 of Crete. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 7, n. 1, p. 49-59, 2005. <https://doi.org/10.1016/j.ijag.2004.12.001>
- MONICO, J. F. G. *Posicionamento pelo GNSS: descrição, fundamentos e aplicações*. São Paulo: Editora Unesp, 2008. 476 p.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M. W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. *Transactions of the American Society of Agricultural and Biological Engineering*, v. 50, n. 3, p. 885-900, 2007. <https://doi.org/10.13031/2013.23153>
- OLIVEIRA, F. A. *Calibração de um modelo hidrodinâmico unidimensional para canais urbanos*. Dissertação (Mestrado)-Programa de Pós-Graduação em Engenharia do Meio Ambiente, Escola de Engenharia Civil, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2012.
- OLIVEIRA, F. A.; ARANTES C. Q.; OLIVEIRA, J. A.; PEREIRA, T. S. R.; FORMIGA, K. T. M. Determinação do limite da faixa de inundação com uso do HEC-RAS para o parque linear do córrego macambira em Goiânia, Goiás. *Revista Eletrônica de Engenharia Civil*, v. 11, n. 1, p. 57-66, 2016. <https://doi.org/10.5216/reec.V11i1.32101>

- OLIVEIRA, G. G.; GUASSELLI, L. A. Relação entre a suscetibilidade a inundações e a falta de capacidade nos condutos da sub-bacia do Arroio da Areia, em Porto Alegre/RS. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 16, n. 1, p. 5-15, 2011. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrhv16n1.p5-15>
- OLIVEIRA, G. G.; SALDANHA, D. L.; GUASSELLI, L. A. Espacialização e análise das inundações na bacia hidrográfica do rio Cai/RS. *Geociências*, v. 29, n. 3, p. 413-427, 2010.
- O POPULAR. Chuvas: veja os trechos bloqueados em Goiânia. *O Popular*, 2015. Disponível em: <http://www.opopular.com.br/editorias/cidade/chuvas-veja-os-trechos-bloqueados-em-goi%C3%A2nia-11171976>. Acesso em: 7 nov. 2016.
- PAULO, T. Chuva forte em Goiânia causa transtornos e transborda Marginal Botafogo. *Mais Goiás*, 2020. Disponível em: <https://www.emaisgoias.com.br/chuva-forte-em-goiania-causa-transtornos-e-transborda-marginal-botafogo/>. Acesso em: 20 jan. 2021.
- PODHORÁNYI, M.; UNUCKA, J.; BOBÁL, P.; ŘÍHOVÁ, V. Effects of LIDAR DEM resolution in hydrodynamic modelling: model sensitivity for cross-sections. *International Journal of Digital Earth*, v. 6, n. 1, p. 3-27, 2013. <https://doi.org/10.1080/17538947.2011.596578>
- PORTO, R. D. M. *Hidráulica básica*. 4. ed. São Carlos: EESC-USP, 2006. 519 p.
- SANTOS, K. A. *Utilização de modelo hidrodinâmico para mapeamento de áreas inundáveis*. 89f. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente)-Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2015.
- 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. <https://doi.org/10.5216/bgg.v30i2.13796>
- SANTOS, P. M. P. *Cartografia de áreas inundáveis a partir do método de reconstrução hidrogeomorfológica e do método hidrológico-hidráulico: estudo comparativo na bacia hidrográfica do rio Arunca*. 145f. Dissertação (Mestrado em Geociência) - Faculdade de Ciências e Tecnologia, Departamento de Ciências da Terra, Universidade de Coimbra, Portugal, 2009.
- SCHMIDT, A.; ROTTENSTEINER, F.; SÖRGEL, U. Monitoring concepts for coastal areas using lidar data. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, v. 40, n. 1W1, p. 311-316, 2013. <https://doi.org/10.5194/isprarchives-XL-1-W1-311-2013>
- SEIBT, A. C. *Modelagem hidrológica da bacia hidrográfica do Córrego Botafogo - Goiânia - GO*. Dissertação (Mestrado em Engenharia do Meio Ambiente)-Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 2013.
- SHAN, J.; APARAJITHAN, S. Urban DEM generation from raw LiDAR data. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 71, n. 2, p. 217-226, 2005.
- SILVEIRA, A. L. L. Desempenho de fórmulas de tempo de concentração em bacias urbanas e rurais. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 10, n. 1, p. 5-29, 2005. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrhv10n1.p5-29>
- TOMAZINI, L. Forte chuva desta terça-feira inunda e fecha a Marginal Botafogo, no Centro de Goiânia. *O Popular*, 2016. Disponível em: <http://www.opopular.com.br/editorias/cidade/forte-chuva-desta-ter%C3%A7a-feira-inunda-e-fecha-a-marginal-botafogo-no-centro-de-goi%C3%A2nia-11191194>. Acesso em: 10 dez. 2016.
- TUCCI, C. E. M. Plano diretor de drenagem urbana: princípios e concepção. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 2, n. 2, p. 5-12, 1997. <http://dx.doi.org/10.21168/rbrhv2n2.p5-12>
- TUCCI, C. E. M.; BERTON, J. C. (org.). *Inundações urbanas na América do Sul*. Porto Alegre: ABRH, 2003.
- TUCCI, C. E. M.; PORTO, R. L. L.; BARROS, M. T. *Drenagem urbana*. Porto Alegre: Editora da Universidade, 1995. 428 p.
- UNITED STATES DEPARTMENT OF AGRICULTURE (USDA); NATURAL RESOURCES CONSERVATION SERVICE (NRCS). Technical Release (TR)-55. *Urban Hydrology of Small Watersheds*. Estados Unidos: USDA, NRCS, 1986.
- U.S. ARMY CORPS OF ENGINEERS (USACE). *HEC-RAS: river analysis system, user's manual*. Davis: Hydrologic Engineering Center, 2002.
- VALERIANO, M. M.; ABDON, M. M. Aplicação de dados SRTM a estudos do Pantanal. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 59, n. 1, p. 63-71, 2007.
- VENÂNCIO, S. S.; VILLETA, S. M.; PINHO, J. L. S. P.; VIEIRA, J. M. P. Numerical model for hydrodynamics simulations of Trabalhador channel. *Management of Environmental Quality*, v. 28, n. 2, p. 175-190, 2017. <https://doi.org/10.1108/MEQ-07-2015-0148>
- WU, H.; GUAN, X.; GONG, J. ParaStream: a parallel streaming Delaunay triangulation algorithm for LiDAR points on multicore architectures. *Computers & Geosciences*, v. 37, n. 9, p. 1355-1363, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.01.008>
- YANG, J. *Applying HEC-RAS and GIS techniques in river floodplain delineation*. Dissertação (Mestrado) - Department of Civil Engineering, Universidade de Ottawa, Ottawa, 2004.
- YANG, J.; TOWNSEND, R. D.; DANESHFAR, B. Applying the HEC-RAS model and GIS techniques in river network floodplain delineation. *Canadian Journal of Civil Engineering*, v. 33, p. 19-28, 2006. <https://doi.org/10.1139/105-102>
- ZHAO, C.; JENSEN, J.; DENG X.; DEDE-BAMFO, N. Impacts of LiDAR Sampling Methods and Point Spacing Density on DEM Generation. *Papers in Applied Geography*, v. 2, n. 3, p. 261-270, 2016. <https://doi.org/10.1080/23754931.2015.1121405>