



**Avaliação dos Modelos HEC-RAS e GRASS na
Identificação de Áreas Vulneráveis a Inundações em Áreas Urbanas**

HEC-RAS and GRASS Evaluation Models in Identifying Areas Vulnerable to Flooding in Urban Areas

Patrícia Antunes dos Reis & Marcio Augusto Reolon Schmidt

Universidade Federal de Uberlândia,
Avenida João Naves de Ávila, 2121, Bairro Santa Mônica, 38.408-100 Uberlândia, Minas Gerais - Brasil

E-mails: p.antunesreis@gmail.com; marcio.schmidt@gmail.com

Recebido em: 28/11/2016 Aprovado em: 25/01/2017

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2017_1_115_126

Resumo

Este artigo apresenta os resultados da avaliação de desempenho de dois modelos hidráulicos, o modelo HEC-RAS e os algoritmos inseridos no SIG, na delimitação das zonas inundáveis na bacia do Córrego Rangel, na cidade de Patrocínio, Minas Gerais. Os resultados apresentam a comparação do modelo hidráulicos HEC-RAS e os algoritmos do GRASS, ambos determinados para um evento de precipitação com o período de retorno 50 anos. Ao se comparar os produtos observou-se que cada modelo apresenta um resultado particular. A modelagem gerada pelo programa GRASS torna possível avaliar os efeitos da urbanização em toda a área de estudo por avaliar as características topográficas integrados aos dados de precipitação e infiltração do solo em toda a bacia, de forma a reter informações de fluxo e acumulação de toda a bacia. O modelo HEC-RAS analisa o sistema delimitado por meio das seções transversais, tendo a simulação restrita a área demarcada pelas seções e parâmetros construtivos. Com o estudo foi possível a criação dos mapas de riscos as enchentes e inundações na bacia do Córrego Rangel, composto por diferentes formas a localização e profundidade das manchas de ocupação das águas em eventos intensos de chuva. Apesar de diferentes abordagens ambos os modelos coincidem na identificação dos imóveis passíveis de inundação para a eventos com o período de recorrência avaliado.

Palavras-chave: Modelagem Hidráulica; SIG; Previsão de inundações urbanas

Abstract

This article presents the results of performance evaluation of two hydraulic models, the HEC-RAS model and GRASS algorithms in the delimitation of flooding zones in Córrego Rangel watershed in the city of Patrocínio, Minas Gerais. The results show the comparison of the HEC-RAS model and GRASS algorithms, both determined for a precipitation event with a return period of 50 years. Comparing the products, we could observe that each model provides a particular result. The model generated by GRASS makes possible to evaluate the effects of urbanization throughout the study area to assess the topographical features integrated with rainfall data and soil infiltration in order to retain information about the flow and accumulation of all watershed. The HEC-RAS model analyzes the area defined by the cross sections, and the simulation is restricted by cross sections and other constructive parameters in modelling. In the study it was possible the creation of floods and inundation risk maps in the watershed of Córrego Rangel, composed of different ways the location and depth of the water occupying spots in intense rainfall events. Although different approaches both models agree on the identification of properties subject to flooding to events evaluated recurrence.

Keywords: Hydraulics Modeling; GIS; urban floods forecast

1 Introdução

As ocupações e o desenvolvimento da maioria das cidades brasileiras ao longo de rios e corpos hídricos ocasionaram diversos problemas que atingem diretamente a sociedade, dentre eles as enchentes e inundações urbanas. Uma das razões é a expansão dos centros urbanos que nem sempre é acompanhada do desenvolvimento de infraestrutura adequada e que pode prejudicar os sistemas de drenagem locais. Esta situação é agravada pela não observância das características naturais dos ambientes ocupados e pela antropização de áreas sem a devida racionalização do espaço. Isto impossibilita que as áreas próximas aos rios e córregos efetivem o seu papel de zonas de amortecimento e absorção das inundações.

Em ambientes urbanos as inundações são consequências da impermeabilização do solo, visto que nos locais em que a vazão extravasada nos períodos de chuvas deveria ser amortecida pela vegetação e condições de solo favoráveis à infiltração encontram-se pavimentadas e dotadas de infraestrutura de drenagem que, em muitos casos, não foram projetados para suportar o crescimento urbano e tornam-se ineficientes. Diante da impermeabilização das superfícies faz-se necessário o controle na fonte das áreas de jusante para se evitar impactos e conflitos. Esta afirmação é concordante com Tucci (2008) que salienta ser de fundamental importância a instauração do controle de ocupações e implantação de uma legislação municipal regulamentadora (Tucci, 2008).

Neste contexto de regulação do processo de expansão urbana, foi criada a Lei do Estatuto da Cidade que estabelece o Plano Diretor (PD) de diretrizes para a ocupação urbana. Entretanto, a sua exigência é para municípios acima de cinquenta mil habitantes. Segundo dados do Censo 2010 divulgado pelo IBGE (IBGE, 2014), isto significa que 5.037 dos 5.561 municípios brasileiros não tem exigência legal do PD. Então para a grande maioria dos municípios é necessário a realização de estudos e definição dos critérios de ocupação do solo urbano, com uso de técnicas que trabalham a integração de dados provenientes de diferentes fontes como os fatores sociais, econômicos e ambientais. Neste último, ferramentas computacionais auxiliam na representação de fenômenos naturais e artificiais, e

avaliam os impactos gerados no ambiente causados por alterações na ocupação e distribuição populacional.

Para o zoneamento e caracterização da área de aplicação do PD, ferramentas de geoprocessamento são de fundamental importância. Por meio deste é possível estabelecer critérios para a expansão, visto que o objetivo do PD é ser instrumento na definição de uma estratégia para a intervenção imediata, com referencial espacial para o uso e ocupação do solo em concordância com as estratégias de políticas urbanas (Rolnik, 2002). O produto destas análises são representações cartográficas chamados de mapas de risco.

Neste contexto, esta pesquisa apresenta o uso dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), associando a análise espacial e modelagem hidráulica, para determinação de mapas de risco de inundação e tem como área de estudo a cidade de Patrocínio, especificamente a simulação de enchentes e inundações nas áreas vulneráveis da Microbacia do Córrego Rangel. A modelagem hidráulica integrada aos programas SIG foram realizadas por meio do ArcGis, desenvolvido pela ESRI que agrega a o módulo HEC-RAS (Nania & Molero, 2007; Merwade, 2012), e por meio dos diversos algoritmos independentes do módulo GRASS (Grass, 2015), que é implementado no programa QGIS, antigo *QuantumGIS* da *OpenSource Consortium*. Salienta-se que os módulos Hec-Ras e Grass são de licença livre, apesar do ArcGis ser de comercialização exclusiva da Esri.

2 Modelos Hidráulicos

Em âmbito internacional, diversas pesquisas têm focado na delimitação semiautomatizada de áreas suscetíveis à inundação por diversas abordagens diferentes e comprovam a atualidade do tema. Dentre elas destacam-se as pesquisas de Ballesteros *et al.* (2011) sobre a calibração de modelos geomorfológicos e hidráulicos para simulação de inundações no Rio Alberche; a realizada por Ribeiro & Lima (2011) sobre a modelagem de inundações urbanas com HEC-RAS e SIG, a pesquisa de Santos *et al.* (2010) aplicada a uma bacia hidrográfica ao Sul de Portugal, e a pesquisa de Sharma & Singh (2014) sobre modelagem do escoamento superficial e SIG.

Em comum estas pesquisas avaliam o risco de ocorrência e a extensão espacial dos danos possíveis com a utilização de sistemas de informação geográfica. Estudos baseados em modelos dinâmicos em SIG possibilitam a antecipação de eventos, simulando os efeitos da urbanização em uma bacia antes que ela ocorra, para assim elaborar medidas preventivas a favor de eventos como enchentes, impactos nas alterações de rios, entre outros (Tucci, 2005). O mapeamento de risco é elaborado com informações como a distribuição espacial do evento, conteúdo (tipo, tamanho, forma), que indicam a probabilidade temporal e espacial, tipologia e comportamento do fenômeno, advertindo sobre a potencialidade de ocorrência do evento. Esses tipos de informação são obtidos através da integração dos sistemas de informação geográfica que proporcionam a plataforma necessária para a integração e representação espacial dos dados, capaz de analisar, examinar e interferir em modelos de distribuição espacial para o estudo dos impactos nos sistemas ambientais (Chaves & Franca-Rocha, 2006). Nestes sistemas e a partir dos dados altimétricos da bacia hidrográfica se derivam os modelos digitais de terreno.

O Modelo Digital de Terreno (MDT) consiste na representação matemática da distribuição espacial de características de fenômenos vinculada a uma superfície real (Câmara & Felgueiras, 2005). A correção de parâmetros específicos, como linhas de quebra, sumidouros e outros, gera o Modelo Digital do Terreno Hidrologicamente Corrigido (MDTHC). Na interpolação do MDTHC são impostas restrições ao processo de interpolação, como por exemplo dados de lagos, rede de drenagem, condições de fronteira, sumidouros, pontos cotados, entre outros. Sobre os MDTHC são desenvolvidas as simulações hidráulicas dos sistemas fluviais. Estes MDTHC compõem o principal conjunto de dados, juntamente com os hietogramas, dos modelos selecionados nesta pesquisa. Para esta pesquisa foram avaliados os modelos HEC-RAS integrado ao ArcGIS, e o GRASS integrado ao QGIS.

2.1 HEC-RAS

O HEC-RAS consiste numa ferramenta que, segundo Fernandez *et al.* (2013), é um modelo 1D que resolve as equações de Saint-Venant completas,

por aplicação do método de diferenças finitas, permitindo simular o escoamento em superfície livre em regime permanente e em regime variável. A lei de resistência aplicada é a Equação de Manning-Strickler e a seção transversal de escoamento considera uma seção composta, tendo o canal definido pelos dados topográficos interpolados por meio da criação de um modelo digital de terreno, e delimitado pelas alturas calculadas no sistema.

Com base no MDTHC, dados geométricos de entrada do HEC-RAS podem ser gerados, como linhas de centro, fluxo, canal, seção transversal, uso do solo, dique, áreas ineficazes e áreas de armazenamento. Na implementação utilizada no Arcgis, as camadas de informações criadas manualmente no programa são editadas e os limites definidos pelo usuário de cada item de análise, sendo úteis ao mapeamento de várzea, aos cálculos dos danos e delimitações de inundações, restauração do ecossistema e alerta de cheias (HEC, 2014). O mapeamento das áreas inundáveis se dá a partir dos resultados obtidos pelas simulações hidráulicas no HEC-RAS e o traçado da área de inundação é realizado utilizando-se das alturas d'água, como resultados das análises hidráulicas, nas seções transversais.

As informações inerentes às condições de contorno e fluxos são definidas no próprio programa HEC-RAS, no qual os parâmetros de declividade, escoamento, profundidade e vazão de projeto são inseridos de acordo com cada situação. Os fluxos são normalmente definidos no local mais a montante de cada rio ou afluente, e em junções, sendo cada fluxo um perfil diferente dentro do programa. A análise permanente onde se tem o regime subcrítico definido deve ser selecionado pelo usuário de acordo com os critérios hidráulicos (Nania & Molero, 2007; Merwade, 2012).

2.2 Algoritmos do GRASS

O GRASS-GIS (*Geographic Resources Analysis Support System*) apresenta módulos para processamento e georreferenciamento de imagens multiespectrais, manipulação de dados em formato matricial e vetorial, com interfaces para bancos de dados (Grass, 2015). A funcionalidade do GRASS está distribuída em ferramentas de execução e as

interfaces de análises hidrológicas são aplicadas ao gerenciamento de bacia, com suporte a diferentes tipos de análise e delimitação (Grohmann, 2008; Grass, 2014).

Os insumos calculados anteriormente são inseridos no modelo e incluem a taxa de excedente de chuvas, o coeficiente de rugosidade dado por n de Manning, a intensidade de precipitação, a taxa de infiltração, que depende de propriedades do solo e cobertura da terra, o grau de permeabilidade que define a probabilidade das partículas passarem através da estrutura, a profundidade da água em metros e a descarga de água em m^3/s . Todos esses dados são inseridos como dados matriciais (*rasters*), calculados no próprio GRASS, ou incluídos os valores de referência. Estes parâmetros variam no espaço e no tempo. O resultado é o mapa de ocupação das manchas de inundação e a profundidade distribuída (Grass, 2015).

Tanto o modelo GRASS como HEC-RAS trabalham com o escoamento superficial da água como um processo distribuído, e correspondem a uma aproximação unidimensional na modelação do escoamento na linha de água, no qual a velocidade e a profundidade variam na direção longitudinal, no tempo e no espaço. Os modelos são calculados por meio das equações de Saint-Venant, que permitem calcular a taxa de escoamento e o nível de água como funções do tempo. Essas equações traduzem os princípios físicos da conservação de massa e da conservação da quantidade de movimento, onde o modelo de ondas cinemáticas considera a declividade da linha de energia igual à declividade da superfície do solo, assumindo assim uma seção transversal média de escoamento (Grass, 2015). Neste contexto, os efeitos de deposição e destacamento do fundo não influenciam devido ao baixo declive, e é aplicável o coeficiente de rugosidade proveniente da Equação de Manning para os quantificar (Grass, 2015).

3 Metodologia de Avaliação

A área de estudo se localiza na Microbacia do Córrego Rangel, como mostra a Figura 1, a qual cobre grande parte do perímetro urbano de Patrocínio e contempla uma área de 4,46 km². A escolha da área foi devido às características de ocupação da bacia e da frequência enchentes e inundações. Devido à proximidade da região central

da cidade, esta microbacia possui um elevado grau de impermeabilização do solo, próximo a 75% da área total da bacia. Além disso, as margens do Córrego do Rangel foram canalizadas no processo de ocupação, sendo que a distribuição do adensamento populacional é concentrada na parte superior do curso (montante), e loteamentos abertos na parte baixa da bacia (jusante), o que propicia o direcionamento rápido do fluxo para o exutório da bacia.

A metodologia foi organizada em três partes: a preparação dos dados de entrada que é comum aos dois modelos, a modelagem específica do HEC-RAS e a modelagem específica do GRASS. Na primeira parte da pesquisa, a metodologia se inicia com a criação do Modelo Digital de Terreno, construído a partir do programa ArcGis, por meio da base cartográfica altimétrica, disponibilizada pela Prefeitura Municipal de Patrocínio, em escala de 1:20.000, confeccionado através do levantamento dos pontos situados nos quarteirões em toda a área da bacia, com equidistância vertical de 1 metro. Esse modelo foi corrigido das informações sobre os corpos hídricos formando as linhas de quebra e correção de pontos extremos da simulação formando o MDT hidraulicamente corrigido (MDTHC).

Tendo em vista a escassez de dados pluviométricos da área de estudo os dados de precipitação considerados foram os da Estação Charqueada, que detém informações do ano de 1966 a 2014. Deste período foi usado o valor de precipitação de 133,5 mm, que corresponde a chuva horária mais intensa registrada para os cálculos da vazão de projeto.

Para o HEC-RAS, o dimensionamento hidráulico da bacia foi realizado mediante a criação de um banco de dados no ArcGis com informações exigidas para os cálculos e simulação, componentes do pré-projeto, no qual se integram dois programas: o Arcgis, com a ferramenta HEC-GeoRAS e o HEC-RAS em si. Foram testadas diferentes combinações entre equidistâncias das curvas de nível e distância entre as seções transversais no modelo HEC, para avaliar a consistência do modelo frente a escala de trabalho. As curvas de 1 metro foram modeladas com seções com 50, 100 e 200 metros de distância. As curvas de 5 metros e de 10 metros foram modeladas com seções transversais traçadas de 100 metros para identificar qual a definição mais adequada entre curvas de nível e número de seções transversais.

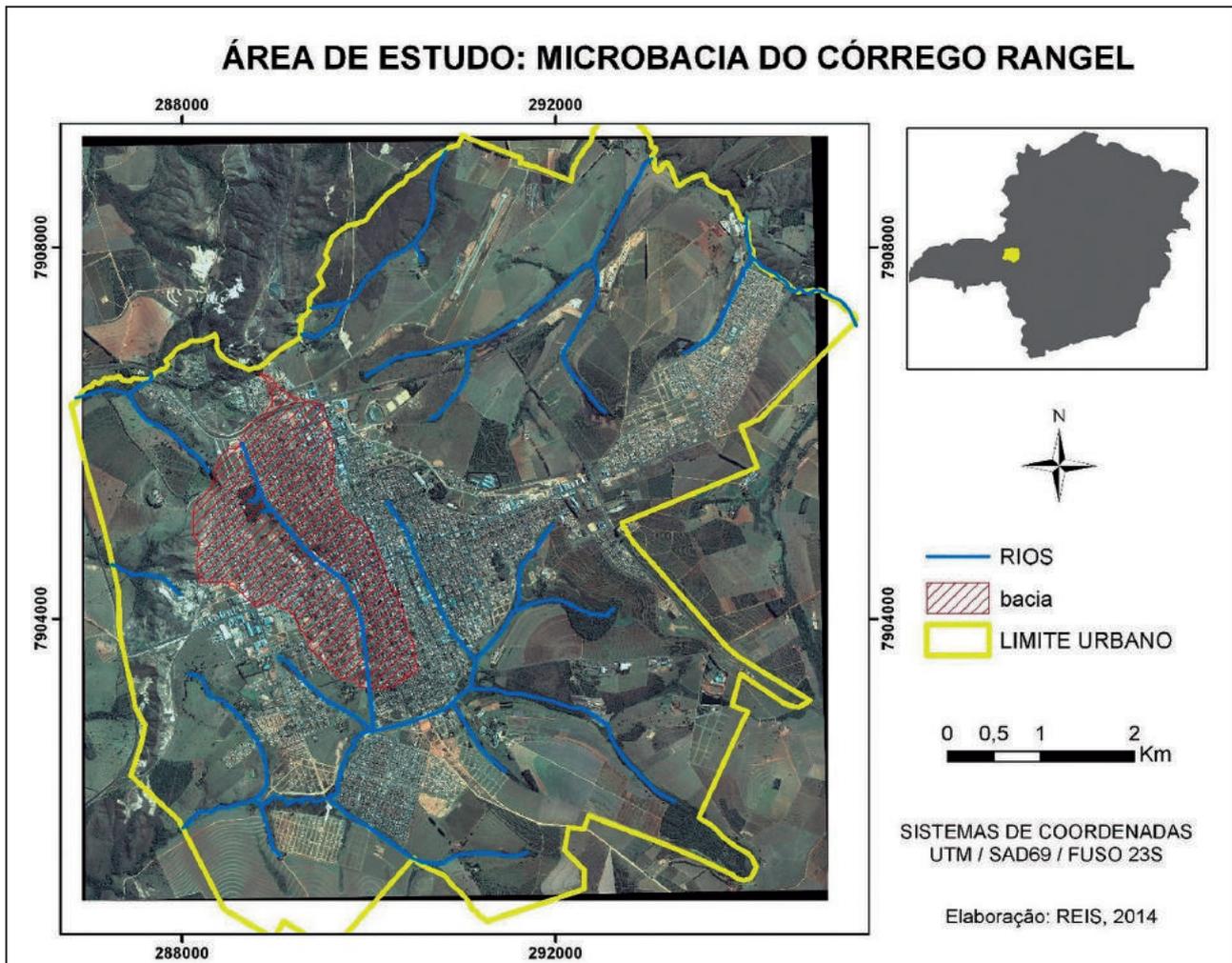


Figura 1 Mapa de localização da área de estudo na cidade de Patrocínio, Minas Gerais.

Na modelagem do HEC-RAS são necessárias informações dos valores do coeficiente de rugosidade de Manning (n), para cada tipo de material constituinte da área da bacia informadas na tabela do banco de dados associado. Este é definido pelas diferentes coberturas da superfície e assim, sendo possível a distribuição dos coeficientes ao longo da bacia hidrográfica, inserida na tabela de atributos da camada. O coeficiente de rugosidade de Manning é critério obrigatório para delimitação das áreas de inundação. O mapa de uso e ocupação do solo então foi criado por meio da imagem do Google Earth, datada em dezembro de 2014, disponibilizada gratuitamente e classificada de acordo com cinco classes representativas do local, sendo vegetação densa, vegetação baixa, solo exposto, asfalto e superfície impermeável. A imagem resultante foi reclassificada no ArcGis e para cada classe foi atribuída o valor da curva número (CN) calculada.

Diante das informações construídas no HEC-GeoRAS, os arquivos são importados na plataforma do HEC-RAS. Os componentes necessários à simulação da inundação são a forma, o fluxo/vazão ou nível de água e as condições de entorno, para que se possa obter o cálculo e dimensionamento da superfície da água em regime permanente. Para cada perfil é necessário informar a vazão de projeto calculada pelo modelo hidrológico baseado no tempo de retorno estabelecido. Para a obtenção das vazões máximas na Microbacia do Córrego Rangel foi usado o Método do Hidrograma Urbano Santa Barbara.

Na terceira etapa, através do GRASS, foi criado o mapa de fluxo de direção do escoamento, para delimitar qual o sentido de escoamento da água da chuva na bacia. O fluxo de direção é determinado a partir das alturas contidas nas células MDTHC, através do algoritmo D8. O resultado é a representação

da malha de direção de todo o fluxo superficial da bacia hidrográfica, no qual cada célula é conectada a uma de suas oito células vizinhas. Este algoritmo determina a progressão de acumulação da água precipitada na área da bacia, indicando a acumulação por meio de uma ponderação logarítmica de base 2, que é posteriormente transformada em um mapa cujos valores das células indicam as direções de fluxo acumuladas. A partir das direções de fluxo é gerado o mapa de fluxo de acumulação da bacia hidrográfica.

No GRASS são delimitadas as manchas de inundações e profundidade da inundação, definidas com base nos valores dos pixels que representam o fluxo de acumulação através da inserção do coeficiente Manning, estimada com base no mapa de uso e ocupação do solo. Diferentemente do sistema atribuído ao HEC-RAS, no GRASS a inserção é realizada através da imagem de satélite classificada por técnicas de classificação multiespectral e cujas classes definidas tem os seus valores indicados na tabela calculada de CN.

Dentre os parâmetros utilizados são contemplados os dados de excesso de chuvas, em que a intensidade da precipitação e a taxa de infiltração é considerado fator obrigatório. Os dados de chuva foram adquiridos pela estação climatológica e o percentual de infiltração calculado pelo HUSB, calculado anteriormente para uso no HEC-RAS. Os produtos finais gerados neste módulo é a profundidade da água, dada em metros, e a descarga de água em m^3/s , em arquivos do tipo *raster*.

4 Resultados

Os resultados obtidos estão apresentados em três etapas. A primeira etapa descreve a simulação por meio da integração entre a ferramenta HEC-GeoRAS (ArcGis) e programa HEC-RAS, conduzindo a uma análise espacial e hidráulica do modelo com simulações integradas às distâncias das seções transversais e equidistância das curvas de nível. A segunda etapa é a análise e simulação das enchentes e inundações por meio das ferramentas de hidrologia do GRASS integrada ao QGIS, no qual foram avaliadas as mesmas equidistâncias entre as curvas de nível. A terceira etapa consiste na análise comparativa entre os resultados obtidos pelo SIG e pelo HEC-RAS, por meio da álgebra de mapas, visando definir as diferenças identificadas entre as simulações.

4.1 Manchas de Inundações no HEC-RAS e GRASS

Com base na metodologia estabelecida para desenvolvimento da pesquisa, foram feitas simulações com diferentes equidistâncias de curvas de nível e distâncias entre as seções transversais, de forma a avaliar a representatividade e escala de detalhamento dos dados exigidos para a modelagem.

Obteve-se o hidrograma com a técnica alternada de três blocos, utilizando-se o evento de precipitação para um período de retorno de 50 anos. O tempo de concentração foi calculado de acordo com o método Califórnia Culverts Practice definido um resultado de 34,9 minutos. O caudal máximo obtido foi de $103,227 m^3/s$ calculados entre as seções de montante para jusante, por meio do Método Urbano de Santa Bárbara. Para a parametrização do modelo hidrológico detalhou-se as características da bacia, tendo para o cenário de análise o CN igual a 90, definido como padrão, baseado na distribuição do mapa de uso e ocupação do solo, visto que cada tipo de uso apresenta um valor de CN diferente.

Assim obteve-se o cálculo do potencial de máximo de retenção hídrica da bacia, através do método SCS. Para a data chuva de análise de 133,5 mm, tem-se o hietograma e o hidrograma de projeto resultante dos picos de vazão, demonstrado na Figura 2.

De posse dos dados da bacia obtidos por meio da simulação hidráulica no HEC-RAS e caracterização de entorno e importados no HEC-GeoRAS, estes foram processados sobre o MDTHC, no qual se deu a construção preliminar do projeto de delimitação de áreas de risco de inundação e enchentes.

A simulação no GRASS acompanhou os mesmos critérios de comparação utilizados no HEC-RAS, sendo criado o MDT com curvas com equidistância de 1, 5 e 10 metros. As manchas de inundação ocuparam faixas distintas nas três simulações, sendo a que apresentou detalhamento mais próximo do real foi a constituída pelo MDTHC produzido com curvas de 1 metro de equidistância. Os resultados da variação dos parâmetros com curvas de 1 m pode ser verificado na Figura 3.

No resultado apresentado pelo HEC-RAS, as áreas mais escuras apresentam maior profundidade de água, em consequência, estes são os locais mais

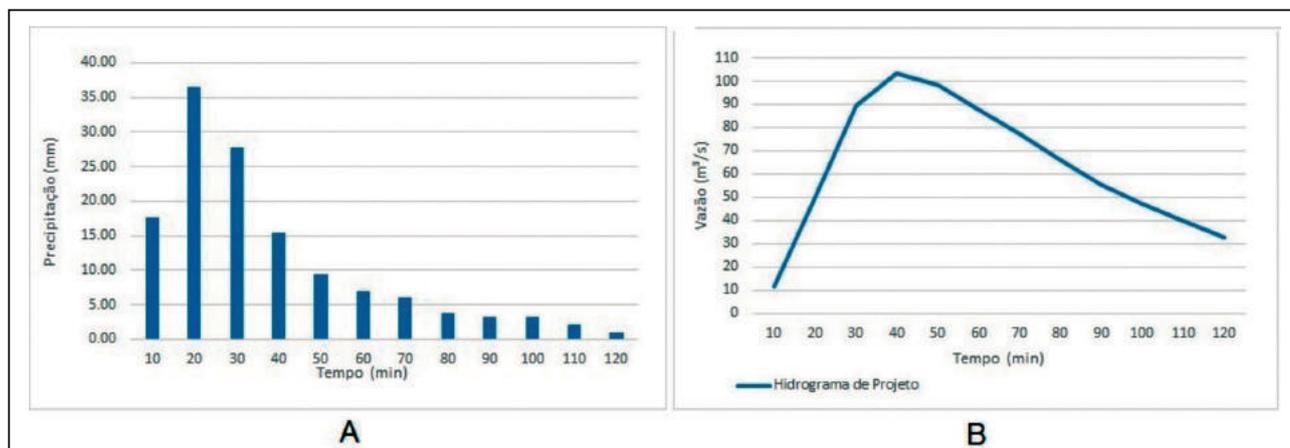


Figura 2 Hietograma (A) e hidrograma (B) de projeto resultante dos picos de vazão.

afetados pelas inundações. Os limites das manchas de inundação apresentam um desvio quanto à localização do leito do rio em alguns trechos. Isso se deve ao fato do modelo hidráulico não apresentar ajustes em sua geometria computacional, e do curso se encontrar canalizado, além das curvas de nível usadas nesta pesquisa não considerarem as modificações provenientes das construções, que alteram o seu traçado original. Para as análises foram simuladas combinações entre as curvas de nível com equidistâncias de 1m, 5m e 10 m e as distâncias entre as seções estabelecidas em 50, 100 e 200 metros. As diferenças são apresentadas na tabela 1.

Com relação a distância entre as seções transversais modeladas no HEC-RAS, a simulação com 100 metros apresentou a melhor situação para análise, visto que com essa escala foi possível a representação da mancha e identificar os pontos de maior risco as inundações, sem interrupção no modelo simulado. O cenário simulado com 50 metros de distância também representou bem a mancha, tendo poucas diferenças de 100 m, se concentrando mais à montante, próximos as áreas de nascentes. No entanto, não há necessidade de tal detalhamento para se chegar ao resultado proposto quando comparado com o modelo de 100 m.

O cenário com seções transversais projetadas em 200 metros de distância foi a que apresentou maior número de discontinuidades no polígono delimitador da mancha de inundação e enchentes, sem detalhamento da área de nascente. Isso se deve ao fato de não abranger áreas suficientes para caracterizar a superfície física do entorno do canal,

Simulações	Profundidade mínima (m)	Profundidade máxima (m)
Modelo 1 (GRASS):		
Curvas 1 metros	0,0025	4,0077
Curvas 5 metros	0,0005	4,4680
Curvas 10 metros	0,0006	6,7490
Modelo 2 (HREC):		
Curvas 1 m / Seções 50 m	0,0003	0,9708
Curvas 1 m / Seções 100 m	0,0003	1,2300
Curvas 1 m / Seções 200 m	0,0001	1,9530
Curvas 5 m / Seções 100 m	0,0002	6,9942
Curvas 10 m / Seções 100 m	0,0005	6,5740

Tabela 1 Profundidade das inundações.

dificultando a modelagem pelo modelo hidráulico em seu dimensionamento da inundação. Neste aspecto, o perfil topográfico sofre mudanças abruptas devido as dimensões serem coletadas em distâncias superiores as condições de modelagem. Isto representa uma limitação para a modelagem, tendo como exigência um detalhamento maior das seções transversais em consequência da escala do levantamento topográfico sobre a qual se baseiam.

Ainda com relação as seções, o programa HEC-RAS é limitado a 500 pontos de elevação para cada seção delimitada, tendo 20 referências de número de Manning cada. Durante a calibração é feita essa correção por meio da ferramenta de *Cross section*, onde os pontos são filtrados e corrigidos automaticamente em todas as seções, evitando futuros erros durante o processamento. Nas simulações realizadas com curvas de nível de 5 metros e 10 metros de equidistâncias verticais, estas demonstraram ser ineficientes para caracterizar o

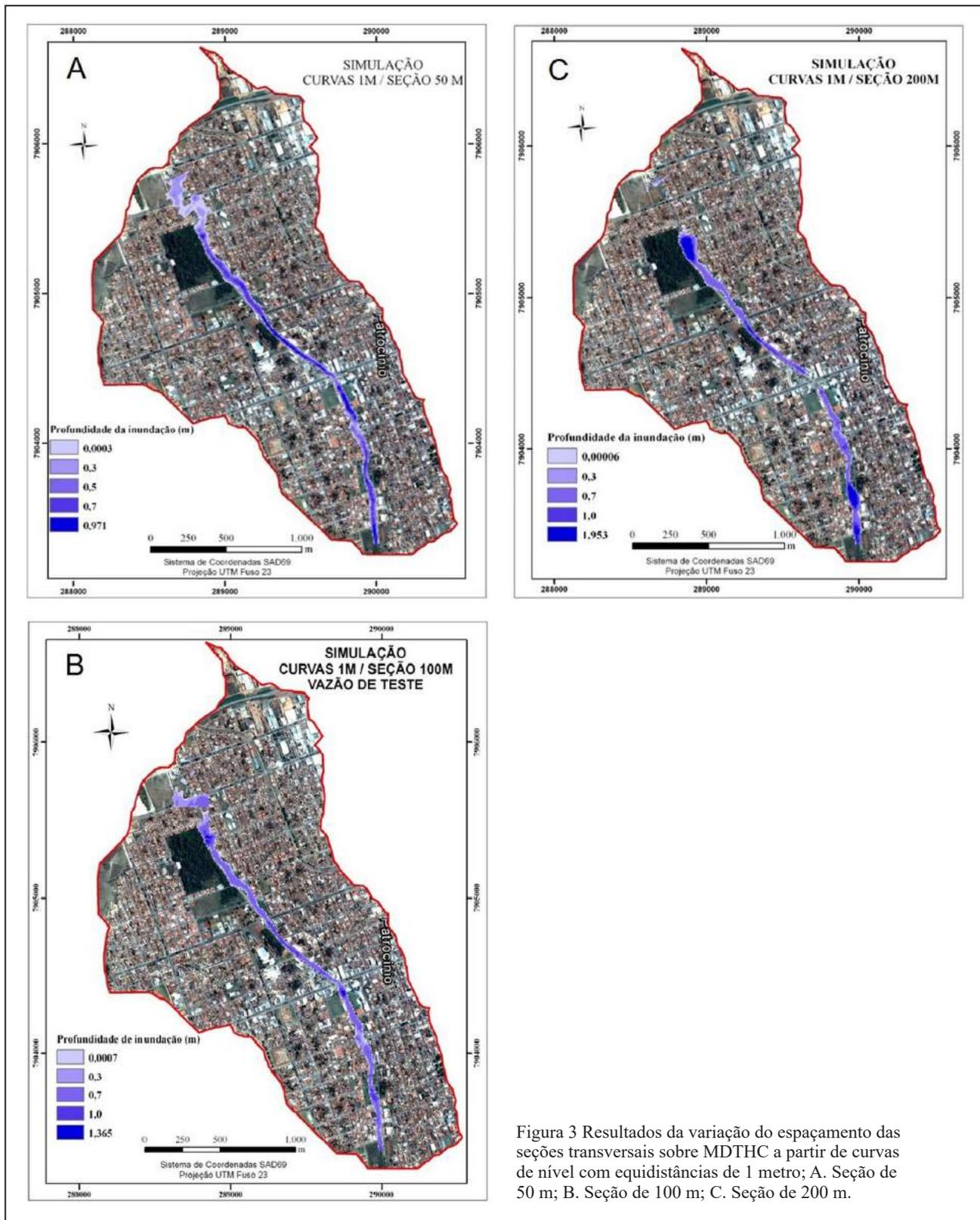


Figura 3 Resultados da variação do espaçamento das seções transversais sobre MDTHC a partir de curvas de nível com equidistâncias de 1 metro; A. Seção de 50 m; B. Seção de 100 m; C. Seção de 200 m.

fluxo de deslocamento na bacia, visto que detalhes foram ocultados nos polígonos de inundações, com representação falha da resposta da bacia.

As simulações realizadas no GRASS apresentam particularidades da análise espacial que incorrem em diferentes resultados do modelo

anterior. A orientação das vertentes que define a direção de fluxo, em áreas próximas do canal é descontínua, sendo curtas em diferentes direções e estendendo-se maiores nas bordas da bacia.

A simulação pelo modelo do GRASS apresenta resultados em toda a bacia, ou seja, os métodos utilizados computam a acumulação de fluxo inclusive de áreas externas àquelas delimitadas pela calha principal, indicando as áreas de inundação e não apenas enchente. Há lacunas e desvios nas manchas delimitadas com relação ao leito do córrego e trecho canalizado. Concordando com os estudos de Lima Neto & Tavares (2013), este resultado é devido ao modelo ser gerado com base nas curvas de nível, que representam o terreno em grande parte sem as modificações provenientes da infraestrutura de captação e controle do fluxo de água.

As simulações com curvas de nível com equidistância de 5 e 10 metros, nas áreas de jusante da bacia, apresentam deslocamento em relação a posição do curso do rio. Estima-se que esta diferença na delimitação do leito inundável se deve ao à escala dos dados utilizados na interpolação da MDTHC, visto que o modelo simulado com equidistância das curvas de nível em 1 metro não apresenta tais interferências, sendo a calha delimitada adequadamente coerente com a vertente. Este resultado é um importante indicativo de que a modelagem topográfica é bem representativa e define as áreas de acumulação do fluxo, direcionando os resultados adquiridos. Por exemplo, no modelo construído a partir das curvas de nível de metro em metro, as profundidades da inundação variam de 0,05 m a 4 m, sendo distribuída na maior parte da representação por uma lâmina de água de 0,5 m a 1 m. É importante salientar que o modelo se mostrou eficaz na descrição dos fluxos da bacia, sendo útil analisado em conjunto com os resultados obtidos no HEC-RAS.

4.2 Comparação Entre os Produtos Finais

Os modelos obtiveram resultados divergentes ao delimitar a calha do rio, de modo que, faz-se necessária a identificação das diferenças nas regiões do canal. A tabela 2 expressa essas diferenças presentes entre o modelo simulado pelo GRASS e o modelo do HEC-RAS. Os produtos avaliados foram criados com base na vazão de projeto, que

necessariamente representa um evento com pico de intensidade de chuva em 50 anos. A tabela 2 apresenta a avaliação dos seis pontos indicados na Figura 4 e considerados críticos ao longo do canal. Para cada um foi obtido a largura média da mancha de inundação e profundidade média (Figura 4).

Em análise, a área 1 define as áreas de nascentes da bacia, a montante do curso principal do córrego, no qual o programa GRASS caracterizou detalhadamente as possíveis acumulações nesta região, enquanto no HEC-RAS não há descrição desta imediação. Esse detalhe se deu devido a forma de avaliação dos programas, visto que pelo GRASS há uma interpretação de todo o fluxo da bacia, sendo possível a definição em diferentes pontos além da calha central do córrego, o que diferentemente se apresenta no HEC-RAS, um modelo hidráulico no qual são inseridas as informações e avaliadas somente a área de abrangência das seções transversais. É devido a esta forma de avaliação que se dão as diferenças entre as calhas simuladas, com pontos onde a ocupação da inundação preenche trechos mais abrangentes e pelo modelo do GRASS, o mesmo trecho com calha mais estreita.

Na área 2 são detalhadas as áreas de entorno do Horto da Matinha, a mancha de inundação criada no HEC-RAS corresponde à percepção da realidade do local, visto que nesta região há acúmulo de volume representativo de água, controlada pela barreira de vegetação que o Horto constitui. O modelo GRASS define a percolação das águas e origem de algumas nascentes que realmente se encontram dentro da reserva, como pequenos alagados. Neste contexto há necessidade de uma análise integrada da resposta dos dois modelos, tendo um conduzindo o resultado para a resposta da bacia em delimitar os fluxos provenientes da precipitação, e o outro na modelagem da zona de inundações determinando a ocupação das águas percoladas.

Nas áreas 3 e 4 representam o encontro de importantes vias nas quais há fluxo intenso de água proveniente das regiões mais alta à noroeste da bacia. O que define esta área de forma mais adequada como um local de alto risco é a simulação feita pelo HEC-RAS, no qual a profundidade da inundação alcança os picos máximos de 1,23 metros preenchendo as margens do canal e adentrando as vias de acesso que tange perpendicularmente. Neste local, pelo GRASS,

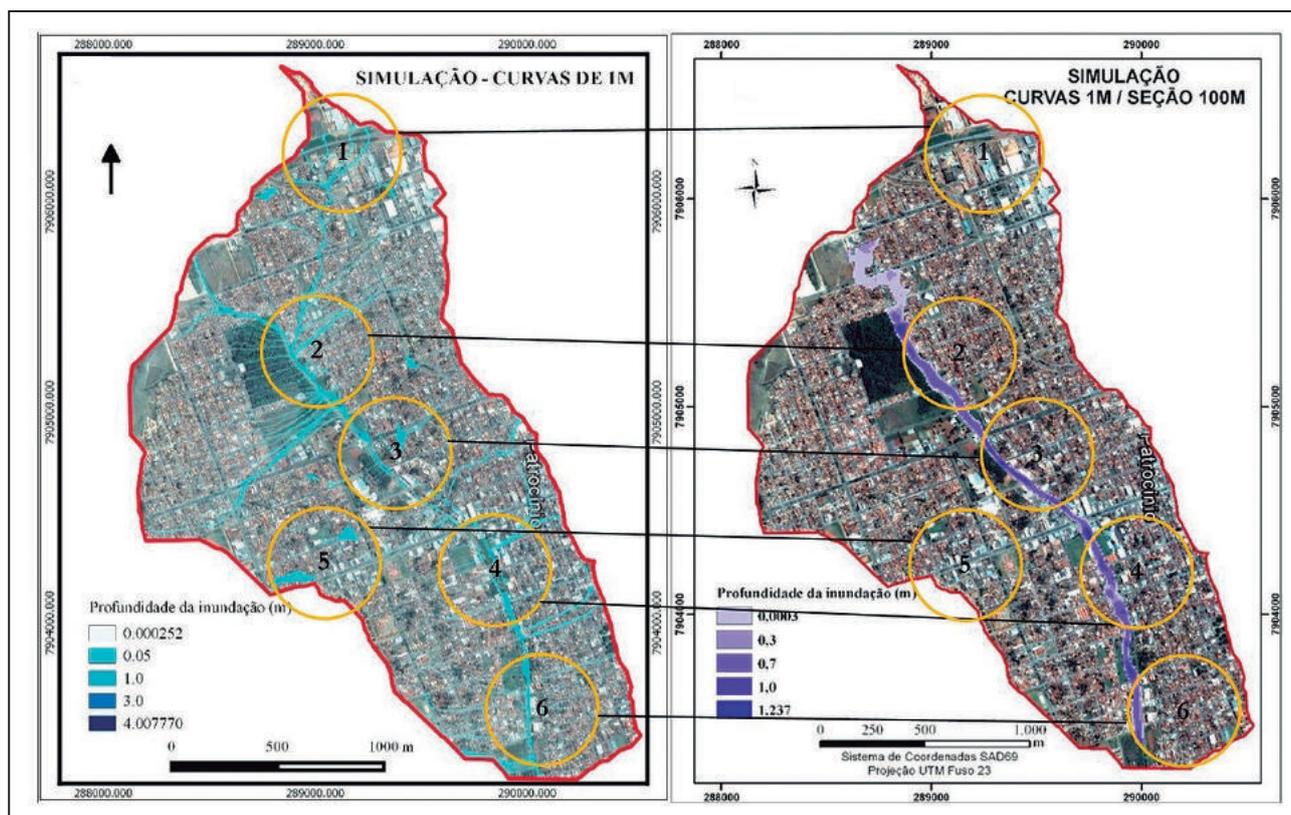


Figura 4 Indicação das áreas de inundação no HEC-RAS (A) e curvas de 1 metro no GRASS (B).

Área Destacada	Diferenças na Região do Canal entre HEC-RAS X GRASS			
	Largura (m)	Área (x 100 m em m ²)	Profundidade (m)	Vazão de Projeto (m ³)
1	23,0	2.300	0,05	103,277
2	69,0	6.900	0,50	103,277
3	8,0	800	0,30	103,277
4	50,0	5.000	1,15	103,277
5	70,0	7.000	0,05	103,277
6	35,0	3.500	0,10	103,277

Tabela 2 Diferenças na região do canal entre HEC-RAS X GRASS.

identificou-se pontos de pico de profundidade de 4 metros e o espalhamento da zona de inundação, mas, no entanto, este não é contínuo.

Na área 5 os mapas demonstram áreas exterior a calha do córrego, definidas como fonte de inundação devido as áreas de infraestrutura e relevo. Na área 6, parte mais a jusante da bacia, estão localizadas as declividades mais acentuadas, e neste ponto também há forte arraste de material, comprovado pelas imagens dos danos causados a superfície pavimentada. Por meio da modelagem do GRASS foi possível conhecer os regimes de

escoamento verificados nas linhas de água presente nesta região.

Os modelos obtiveram resultados diferentes ao delimitar a calha do rio, de modo que, faz-se necessário a identificação das diferenças nas regiões do canal. Mesmo com estas diferenças, e os resultados salientam a importância do planejamento e implantação do sistema de drenagem urbano, visto que eventos de chuva podem causar danos locais ocasionados por fenômenos regionais distribuídos.

A Figura 5 apresenta um detalhamento das áreas afetadas pela inundação considerando o período de recorrências de 50 anos. Nestes pontos, as áreas residenciais e de importância econômica para a cidade, tem potencial para serem diretamente atingidos pelos efeitos das inundações na bacia no caso de recorrência de cinquenta anos.

Por meio da representação da simulação feita no HEC-RAS, em maior detalhe, foi possível verificar as áreas atingidas pelas inundações, provocadas por um evento de ocorrência em 50 anos. São regiões habitadas, consideradas de alto

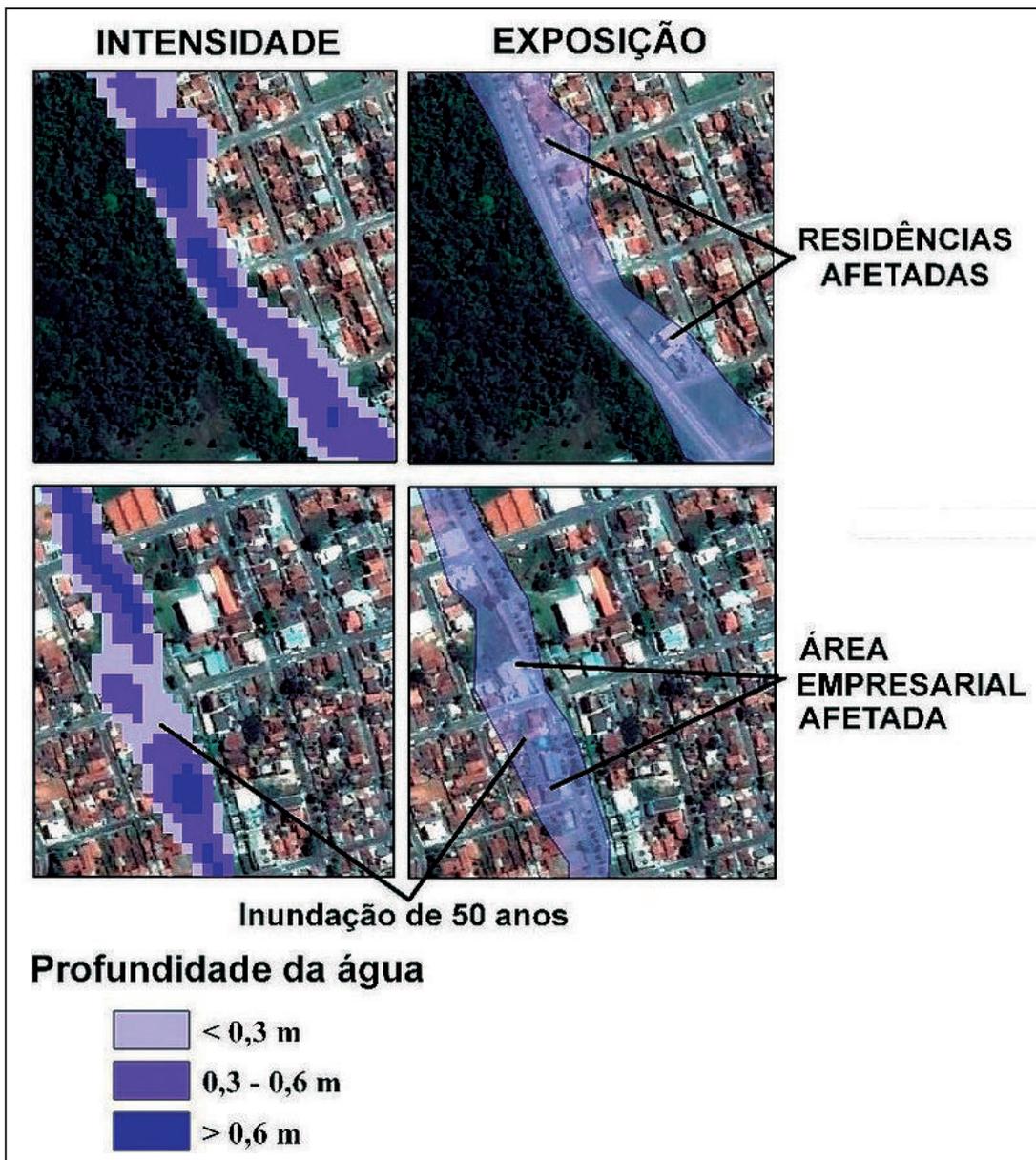


Figura 5
Detalhamento das áreas atingidas pela inundação na bacia do Córrego Rangel.

risco, que são diretamente afetadas pelas águas, em eventos de chuva intensa.

Na primeira exposição pode-se observar que a mancha atinge um número superior de dez residências, e a segunda exposição, de acordo com o estudo probabilístico realizado que define o alcance da mancha, uma média superior de 5 empreendimentos são atingidos. Esses dados expõem a fragilidade do sistema de drenagem local, onde as condições urbanas são desfavoráveis à segurança da população, que é exposta aos riscos de incidentes graves por falta de um planejamento estratégico eficiente, elaborado pela gestão pública.

5 Conclusão

A pesquisa revelou que o SIG é uma poderosa ferramenta na estimativa de parâmetros para todos os algoritmos compreendidos no modelo de bacia, sendo fundamental na ausência de dados de escoamento e dimensionamento hidráulico do canal. O estudo realizado evidencia o planejamento de recursos hídricos como uma prática positiva, no qual o poder público necessita ter acesso a tais ferramentas de modelação adequadas a situações de riscos como a identificada.

A modelagem computacional hidráulica da bacia requer ajustes, provenientes muitas vezes da

simplificação dos modelos com calibrações básicas. Os parâmetros de entrada (dados modelados em SIG) devem ser avaliados e livres de erros para o bom funcionamento dos modelos, sempre atento aos dados de origem desconhecida e sistema base de referência. Entre esses parâmetros estão a base topográfica, imagens de referência, dimensões do canal, histórico de precipitações, etc.

A metodologia proposta de comparação dos modelos oferece uma avaliação dos parâmetros de entrada para cada simulação, através da variação das principais condições de entrada dos dados, e obtendo uma percepção da robustez dos modelos testados. Os resultados apontam ser essencial que a modelagem dos dados iniciais, e considera diferentes cenários em termos de escala e configurações de sessões, ocupação urbana, índices de permeabilidade e recorrência de chuvas, visando analisar as diferentes condições e níveis de detalhes dos dados para proposição da base mais consistente.

Os modelos avaliados apresentam as áreas de risco de inundação para um evento extremo com recorrência de 50 anos. Diante desses resultados, observou-se uma análise consistente da área da bacia e, em sistemas mais complexos de áreas de contribuição podem exigir a integração de modelos, atribuindo a funcionalidade a cada um dos modelos de forma a se ter o melhor aproveitamento do resultado. Entretanto, os modelos uni e bidimensionais parecem não serem completamente compatíveis para toda a bacia. Além disso, os modelos não consideram fatores como a capacidade de infraestrutura de captação e condução de certa quantidade de água antes do início do transbordamento e que influencia no tempo registrado do pico do hietograma. Esta afirmação abre possibilidade para extensão desta pesquisa e continuação de trabalhos futuros. Recomenda-se avaliações em diferentes tempos de recorrência como forma de estabelecer uma correlação com as cotas de inundação previstas em áreas urbanas com as diferentes precipitações e, também, considerando mudanças nas condições de ocupação urbanas.

6 Referências

- Ballesteros, J.A.; Bodoque, J.M.; Díez-Herrero, A.; Sanchez-Silva, M. & Stoffel, M. 2011. Calibration of floodplain roughness and estimation of flood discharger based on tree-ring evidence and hydraulic modelling. *Journal of Hydrology*, 403(2): 103-115.
- Chaves, J.M. & Franca-Rocha, W.J. S. 2006. *Geotecnologias: Trilhando novos caminhos nas geociências*. Salvador, SBG, 221 p.
- Câmara, G. & Felgueiras, C.A. 2005. Modelagem numérica de terreno. In: CÂMARA, G.; DAVIS, C. & MONTEIRO, A.M.V. (eds.). *Introdução à Ciência da Geoinformação*. INPE, 1-36.
- Fernandez, P., Mourato, S. & Moreira, M. 2013. Comparação dos modelos hec-ras e lsflood-fp na delimitação de zonas inundáveis. *Associação Portuguesa dos Recursos Hídricos*, 34(1): 109-120.
- GRASS GIS. 2015. OsGeo Project. Url: <http://grass.osgeo.org/>
- Grohmann, C.H. 2008. *Introdução à Análise Digital de Terreno com GRASS-GIS*. São Paulo, Instituto de Geociências da USP, 99 p.
- HEC - Hydrologic Engineering Center. 2014. US Army Corps of Engineers. Davis, USA: Institute for Water Resources.
- IBGE. 2014. *Cidades*. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 2014.
- Merwade, V. 2012. *Tutorial on using HEC - GeoRAS with ArcGIS 10.x and HEC - RAS Modeling*. West Lafayette, School of Civil Engineering, Purdue University. 38 p.
- Nania, L. S. & Molero, E. 2007. *Manual básico de HEC-RAS 3.1.3 y HEC-GeoRAS 3.1.1*. Granada, Universidad de Granada, 59 p.
- Rolnik, R. 2002. *Estatuto da cidade: guia para implementação pelos municípios e cidadãos*. Brasília, Câmara dos Deputados - Coordenação de Publicações, 273 p.
- Ribeiro, C.B.M. & Lima, R.N.S. 2011. Simulação de inundações urbanas a partir da integração de técnicas de geoprocessamento à modelagem hidráulica e hidrológica. *Revista de Geografia*, 2(1): 1-9.
- Sharma, B.S. & Singh, A. 2014. Assessment of the flood potential on a lower tapi basin tributary using SCS-CN method integrated with remote sensing & GIS data. *Journal of Geography & Natural Disasters*, 4(2): 1-7.
- Tucci, C.E.M. 2005. *Plano Diretor de Drenagem Urbana: Manual de Drenagem Urbana*. Porto Alegre, Instituto de Pesquisas Hidráulicas - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 167 p.
- Tucci, C.E.M. 2008. Urban waters. *Estudos Avançados*, 22(63): 97-112.