



Identificação de Áreas Urbanas Inundáveis pela Avaliação de Áreas Variáveis de Afluência Identification of Urban Areas Flooded by the Evaluation of Variable Areas of Afluência

Jaciane Xavier Bressiani¹; Marcio Augusto Reolon Schmidt² & Carlos Eugênio Pereira³

*Universidade Federal de Uberlândia, FECIV - Faculdade de Engenharia Civil, Programa de Pós Graduação em Engenharia Civil
Av. João Naves de Ávila, 2121, Campus Santa Mônica - Bloco 1Y, 38400-902, Uberlândia, Minas Gerais
E-mails: jacianebrassiani@florestal.eng.br; marcio.schmidt@ufu.br; cepereira@ufu.br*

Recebido em: 15/05/2018 Aprovado em: 21/07/2018

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2018_2_677_684

Resumo

A frequência de eventos de inundação urbana denota que um padrão de ocupação urbana racional tem especial importância nos eventos de inundações nestas áreas. Esta pesquisa propõe uma abordagem baseada em imagens de radar para identificar as áreas variáveis de afluência (AVA) em bacias urbanas de Uberlândia. As AVA representam a dinâmica de fluxo durante eventos de precipitação que afetam o escoamento em bacias urbanas, pois sofrem variações na forma de acordo com a frequência e intensidade das chuvas. Esta característica torna difícil a delimitação das áreas e, para este estudo, foi utilizado imagens de radar SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) e modelos digitais de elevação na escala 1: 25.000 para o cálculo do Índice de umidade topográfica (TWI) associado ao modelo Altura Mais Próxima Acima da Drenagem (HAND). Os resultados foram comparados com o modelo de acumulação de fluxo TAUDEM para identificar mudanças de concentração de descargas e AVA. Os resultados do estudo mostram uma variação de 15% a 21% do valor das áreas para as bacias avaliadas no município de Uberlândia. Isto indica que a avaliação da variabilidade espacial de imagens de radar de satélite pode servir na delimitação das AVA e indicar o potencial de ocupação em bacias urbanas com forma de prevenir inundações definindo-as como zonas especiais em planos diretores.

Palavras-chave: Planejamento urbano; Recursos hídricos; Áreas Variável de Afluência; Modelagem de fluxo de água

Abstract

The frequency of urban flood events denotes that a pattern of rational urban occupation is of particular importance in flooding events on those areas. This research proposes an approach based on radar images to identify the variable areas of affluence (AVA) in urban watersheds of Uberlândia and its influence on the superficial runoff. AVA represent the flow dynamics of small areas in the basin and their behavior during precipitation events and how it affects the flow in urban basins, as they can suffer variations in shape according to the frequency, intensity and the interval between raining events. This makes it difficult to delimit these areas and, for this study, radar images from Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) and 1: 25,000 digital elevation models were used to calculate the Topographic Wetness Index (TWI) associated with the model Height Above Drain (HAND). The results were compared with the TAUDEM flow accumulation model to identify changes in discharge concentration and AVA. The results of the study show a variation of 15% to 21% of the value of the areas for the urban basins evaluated in the city of Uberlândia. This indicates that the assessment of the spatial variability of satellite radar images can serve to delineate the AVA and indicate the potential of occupation in urban basins in order to prevent floods by defining them as special zones in the master plans

Keywords: Water Protection; Areas of Variable Inflow; Water Flow Modeling

1 Introdução

As catástrofes causam muitos danos e sofrimentos nos países menos desenvolvidos com recursos financeiros limitados (Koriche & Rientjes, 2016). Segundo os autores, as más práticas de gestão de desastres, recursos financeiros limitados e alta pressão populacional são algumas características comuns para explicar o número de pessoas afetadas em caso de eventos -hidrológicos e meteorológicos extremos. As inundações são uma resposta natural aos eventos de precipitação quando o volume ou a duração deste evento induzem o transbordamento das margens dos rios para inundar as planícies adjacentes. O código florestal brasileiro adotou as Áreas de Preservação Permanente (APP) (Brasil, 2012), que consistem em faixas simétricas em torno de cursos de água e nascentes que não podem ser utilizados para fins agrícolas ou atividades antrópicas e são determinadas como uma distância horizontal contada a partir das margens dos rios e lagos. O problema é que, em áreas urbanas onde a ocupação e o uso da terra são definidos de acordo com o plano diretor de cada município, as APPs não consideram parâmetros físicos de recargas de aquíferos e escoamento superficial.

Portanto, o uso das APPs não cumpre seu papel ecológico na proteção da água e dos recursos do solo e na prevenção da impermeabilização do solo em pontos críticos da bacia hidrográfica. Além disso, a impermeabilização do solo em ambientes urbanos significa que menos água da chuva se infiltra no solo, levando a um aumento acentuado no volume e aceleração do escoamento em eventos de precipitação favorecendo a acumulação de água em pontos de saturação expostos e inundações nesses locais. Ao longo da hidrografia em áreas urbanas e sujeitas a canalizações e outras obras civis, faz-se necessário considerar as características físicas e dinâmicas destas áreas com base em um mecanismo mais complexo e mais amplo do que o das APPs para a proteção efetiva dos recursos hídricos e restringir a impermeabilização do solo nesses locais.

Um mecanismo para esta avaliação são as Áreas de Variáveis de Afluência (AVA). As AVA são pequenas áreas que se expandem e se contraem de

acordo com o volume de chuvas, onde os níveis de saturação de água no solo nem sempre se enquadram nas faixas estabelecidas pela legislação brasileira (Attanasio Junior *et al.*, 2011). Essas áreas ajudam a manter a qualidade dos recursos hídricos, absorvendo parte da precipitação até o limite de saturação do solo, e só então levam ao escoamento superficial que pode transportar sedimentos e poluentes para cursos de água. Dadas suas características físicas e dinâmicas, combinadas com a sazonalidade das chuvas, a AVA pode ser considerada um instrumento mais eficaz de proteção dos recursos hídricos do que as APPs.

No entanto, as AVA são difíceis de modelar e sua delimitação requer associação com a sua distribuição espacial. Portanto, este artigo apresenta a comparação de dois modelos para determinação da AVA em bacias urbanas da cidade de Uberlândia. O primeiro considera o modelo digital de elevação o modelo HAND, anacrônimo inglês para Altura Mais Próxima Acima da Drenagem (DPI-INPE, 2015b), e o segundo é o modelo de concentração de fluxo - TauDEM (anacrônimo inglês para Análise de Terreno usando Modelos Digitais de Elevação) (Tarboton, 2014). No contexto deste estudo, avaliou-se as AVA de duas bacias hidrográficas urbanas, considerando sua atual urbanização parcial e sua crescente impermeabilização do solo na modificação do padrão de escoamento superficial.

2 Trabalhos Relacionados

O conceito do mecanismo de AVA emergiu do fluxo de escoamento Hortoniano no qual parte da precipitação percola através do solo, alimentando o lençol freático e, eventualmente, atinge os rios através do fluxo de água subterrânea enquanto algumas das descargas fluem diretamente sobre a superfície topográfica sempre que a intensidade da precipitação excede a capacidade de infiltração do solo (Araújo Neto, 2013). Essas regiões da bacia hidrográfica estão localizadas em áreas saturadas que fazem fronteira com rios e nascentes, bem como nos recessos e cavidades do terreno aos quais as linhas de fluxo convergem, porém não coincidem com áreas de concentração

de fluxo que possam existir no terreno. Portanto, o comportamento do terreno e o tipo de ocupação influenciam a distribuição e a extensão das zonas saturadas de acordo com a distribuição espacial dos canais na bacia de drenagem.

Na dinâmica das AVA existe um desfasamento entre a variação das áreas de saturação próximos aos rios, canais e nascentes e os diferentes tempos em um hidrograma. No início do evento de precipitação percebe-se apenas o sistema de drenagem perene da bacia hidrográfica. Ao longo do tempo, as regiões de drenagem e captação começam a atingir o estado de saturação do solo. A meio do hidrograma, formam-se canais intermitentes em áreas adjacentes a canais perenes, e no pico do hidrograma a bacia hidrográfica atinge o estado máximo de saturação representando uma nova rede de drenagem criada por escoamento superficial originado das áreas saturadas.

Quinn *et al.* (1991) propõem o modelo hidrológico como um fator que reflete a tendência de acumulação de água em partes da bacia hidrográfica, e é expresso pela área de contribuição específica (As) sobre a declividade do terreno. Este modelo é implementado no programa TauDEM desenvolvido por Tarboton (2014) e calcula o índice de umidade topográfica (TWI) sobre um Modelo de Terreno Digital. O TWI é expresso pela equação:

$$TWI = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta} \right) \quad (1)$$

Onde: \ln é o logaritmo natural da área de captação específica e $\tan(\beta)$ a declividade no local. O modelo HAND (Nobre *et al.*, 2011) utiliza o DEM (Modelo de Elevação Digital) do TOPODATA, um refinamento da SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*) do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). O projeto TOPODATA é uma base de dados nacional com elevação e variáveis geomorfológicas calculadas a partir dos dados SRTM disponíveis para o Brasil (Valeriano *et al.*, 2009). Segundo o autor, o processamento de dados foi projetado para realizar a interpolação dos dados originais por krigagem e proporcionar uma resolução espacial de quase 30m. Dessa forma é possível análises de até 1:50.000. Este modelo adicionou ao cálculo do TWI

a variável de profundidade do solo (P) encontrada em algumas imagens de radar, como as do programa TOPODATA. De acordo com Pereira Dias (2014), o HAND avalia a altura determinada em relação ao ponto mais próximo da rede de drenagem. A regressão linear da área de contribuição específica (As) do pixel, dada em metros quadrados e dividida pela multiplicação da inclinação da terra ($\tan \beta$) em radianos graus e a profundidade do solo (P) (Nobre *et al.*, 2011), em metros, é a AVA (Equação 2):

$$IT = \ln \left(\frac{As}{\tan \beta} \cdot P \right) \quad (2)$$

As áreas adjacentes aos cursos de água geralmente têm um lençol freático raso, à medida que aprofunda aumenta o desnível superficial relativo ao dreno mais próximo, assim indiretamente o modelo descreve o terreno de acordo com a profundidade do lençol freático.

Segundo Pereira Dias (2014), a grade produzida pela HAND consegue determinar a altura com relação ao ponto do sistema de drenagem mais próximo. Essa distância vertical para a drenagem mais próxima está relacionada indiretamente com a profundidade do lençol freático, o que indica a disponibilidade de água do solo. Valores pequenos na distância vertical (próximas a zero) indicam regiões em que o lençol está próximo à superfície e, portanto, o solo está em condições próximas à saturação, enquanto valores elevados de distância vertical identificam áreas com águas subterrâneas profundas, isto é, áreas e drenadas (DPI-INPE, 2015b).

3 Materiais e Métodos

Foram selecionadas duas bacias hidrográficas na parte sul da cidade de Uberlândia, na mesorregião de Triângulo Mineiro / MG, identificadas pelas coordenadas geográficas de 18° 5' 23 "S e 48° 17' 19" W. As microbacias do rio Lagoinha compreende uma área de 608,4 ha e a microbacia do Campo Alegre cobre uma área de 765,5 ha (Figura 1).

A imagem Topodata foi processada e o modelo HAND processado pelo GIS TerraView Hydro 0.4.1 (DPI-INPE, 2015a). O primeiro passo consiste em

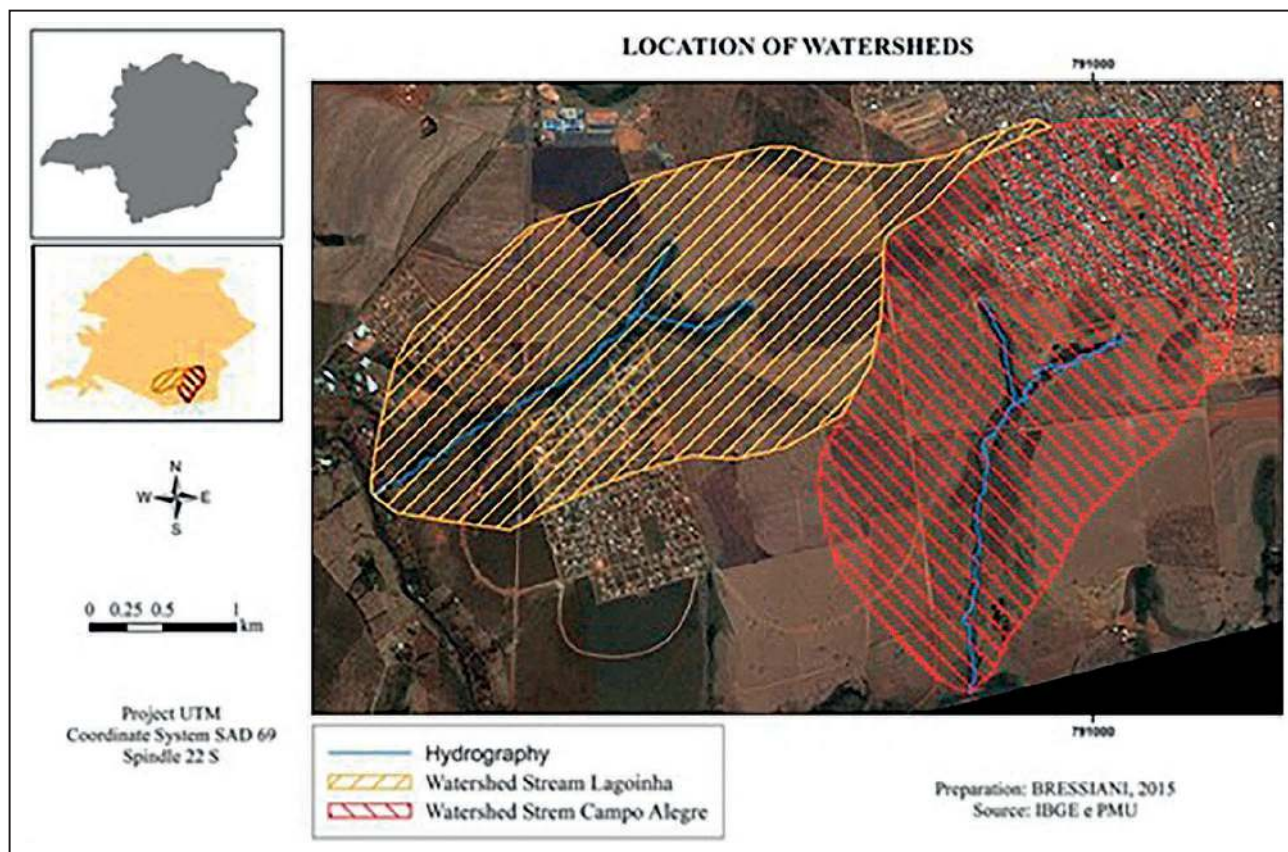


Figura 1 Mapa de localização das áreas em estudo

gerar a direção do fluxo (Direção de Drenagem Local - LDD) e as áreas de drenagem acumuladas, que são geradas a partir do LDD. A geração desses dois arquivos em formato matricial levou à delimitação automática do sistema de drenagem, a partir do qual um parâmetro limiar da área de contribuição mínima. Este limiar deve ser escolhido para minimizar dois tipos de erro na representação: quando o valor selecionado é muito alto incorre na falta de representação da drenagem existente; e quando o valor é muito baixo existe a criação de rotas que não existem na realidade. Nota-se que o valor limite varia de acordo com as características locais do terreno, uma vez que corresponde ao número de pixels contribuintes necessários para considerar o terreno como um corpo de água. Portanto, os testes foram realizados com limiares de 5, 50 e 75 e o limite mais próximo da rede de drenagem existente nesta pesquisa foi de 50. O modelo HAND gerado foi classificado utilizando uma proposta semelhante

à de Rennó et al. (2008), isto é, classe 1) $HAND \leq 1$: águas rasas onde o lençol freático está na superfície do solo ou muito perto dela; E classe 2) $1 < HAND \leq 11$: compreende ambientes mais altos, encostas e planaltos, onde o lençol freático é mais profundo.

Em uma segunda etapa, o mesmo MDT foi processado no modelo TauDEM e os resultados foram normalizados para uma escala de 0 a 1 usando a ferramenta ArcGIS *raster calculator* para posterior comparação. Os parâmetros hidrológicos das sub-bacias foram definidos e aplicados na análise da infiltração de água no solo pelo método SCS (Serviço de Conservação do Solo), no qual os valores da CN (Números de Curvas) Enfatizou que o valor da NC considera o grupo no qual o solo é classificado, a cobertura do solo e suas condições de umidade do solo antecedentes.

Definiu-se a média ponderada da CN para cada bacia. O método SCS considera as perdas

Uso e Ocupação do Solo (UOS)	Córrego da Lagoinha		Córrego Campo Alegre	
	(%)	CN	(%)	CN
Classificação da UOS				
Vegetação natural	64.88	70	51.28	70
Área Urbana	21.35	90	35.28	90
Mata Ciliar	13.77	20	13.44	20

Tabela 1 Valores da NC de acordo com o uso da ocupação da terra

antes do início do escoamento, que inclui a água retida em depressões superficiais, e este valor foi estimado em 20% do potencial de retenção máximo após o início da escorrência e não inclui uma análise de classificação diferenciada de acordo com as características topográficas da bacia. Com o QGis foi obtido o comprimento axial das microbacias e a diferença de elevação entre os pontos mais alto e mais baixo. A concentração de tempo foi calculada pela Califórnia Culverts Practice.

$$t_c = 57 \cdot \frac{L^{1.155}}{H^{0.885}} \quad (3)$$

Onde:

Tc: é o tempo de concentração em minutos;

L: comprimento axial da bacia em Km;

H: diferença de elevação entre o valor mais alto eo valor mais baixo em metros.

4 Resultados e Discussão

O TWI obtido variou de 5,82 a 19,07, enquanto o da bacia de Campo Alegre variou de 5,03 a 23,2. Os valores de TWI encontrados foram maiores do que os relatados por Alves¹ (2008 apud Prates, 2011), que afirma que o TWI de solos bem drenados deve variar de 4 a 5, o de solos moderadamente drenados de 5 a 7 e o de solos mal drenados de 7 a 12. Os valores TWI encontrados indicam que 44,29% da área da bacia do Lagoinha e 46,16% da área da bacia do Campo Alegre são considerados AVA.

1 ALVES, M.R. Múltiplas técnicas no mapeamento digital de solos. Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura "Luiz Queiroz", Piracicaba, 2008, 160 p. Tese (Doutorado em Agronomia).

Estes resultados sugerem que o modelo pode ser sensível para microbacias com pouca variabilidade altimétrica, pois Prates (2011) relata que os valores de TWI indicados por Alves (2008 apud Prates, 2011) seriam adequados para bacias maiores de 400 hectares.

Portanto, AVA foram considerados aqueles cujos valores TWI foram maiores ou iguais a 9,2, variando até 19,07 para a bacia Lagoinha e até 23,2 para a bacia hidrográfica de Campo Alegre.

As Figuras 2a e 2b ilustram a AVA obtida pelo modelo HAND para as bacias hidrográficas de Lagoinha e Campo Alegre, respectivamente. Os valores determinados pelo modelo HAND para as duas microbacias variaram de 0 a 11, e este modelo foi classificado como proposto por Rennó et al. (2008). Com base em testes, considerou-se que valores menores ou iguais a 1 são AVA e valores maiores que 1 representam as demais áreas. De acordo com o modelo HAND, 59,47% da área total da micro-bacia de Lagoinha e 55,51% da microbacia de Campo Alegre são considerados AVA.

Ambos os modelos mostraram a distribuição espacial de AVA nas microbacias hidrográficas, mas seus valores diferiram. Uma possível razão é que o modelo TauDEM se baseia na declividade e na área específica de contribuição da bacia hidrográfica ou fluxo acumulado, e o HAND baseia-se na distância até à rede de drenagem mais próxima.

Em uma comparação dos modelos TauDEM e HAND identificou-se as áreas comuns a ambos os modelos e consideradas AVA. Na Figura 3, as áreas azul escuro são as que coincidiram nos dois modelos, as áreas azul claro correspondem ao AVA do modelo TauDEM e as áreas médias ao AVA do modelo HAND.

A Figura 3 mostra a variação na porcentagem de área proporcional a cada uma das regiões cuja vulnerabilidade é considerada baixa, intermediária, alta e muito alta nas microbacias Lagoinha e Campo Alegre.

Para as duas microbacias, o modelo HAND aumentou as área das classes de vulnerabilidade alta

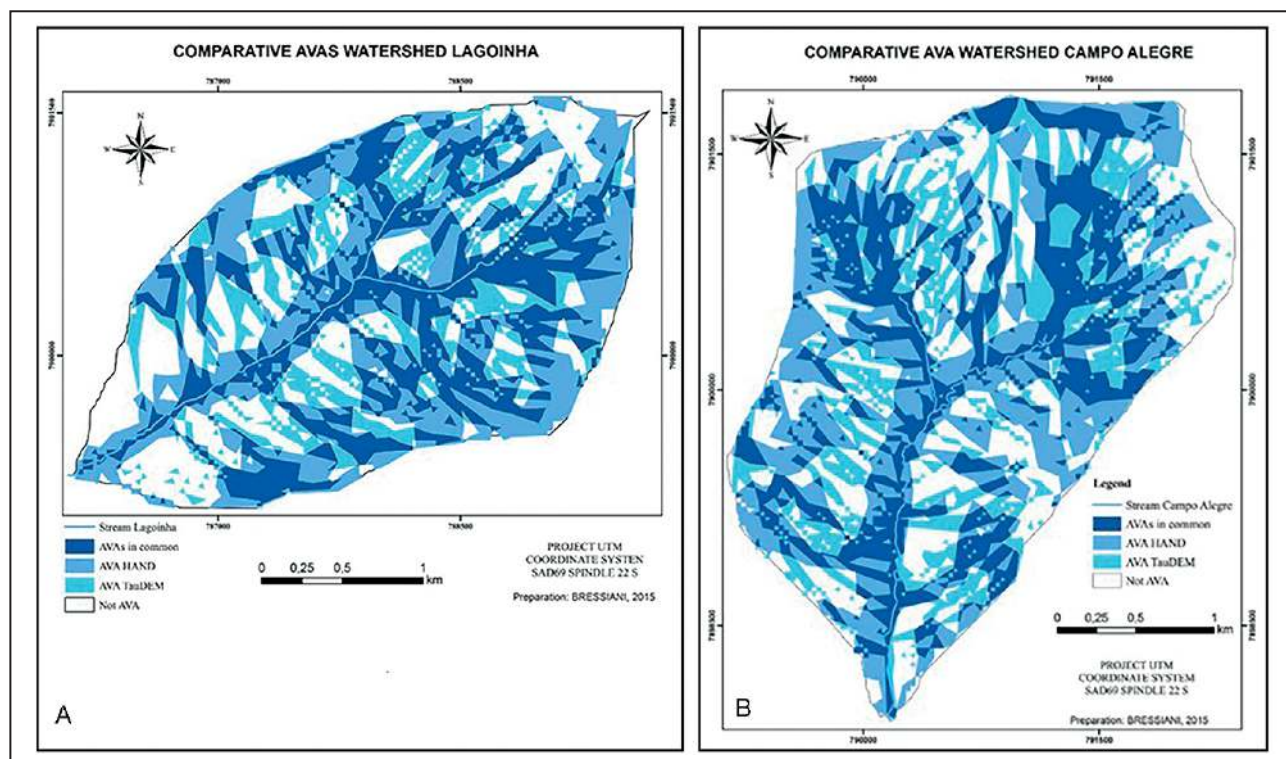


Figura 2 Comparação dos modelos TauDEM e HAND em a) bacia hidrográfica de Lagoinha, e b) bacia hidrográfica de Campo Alegre.

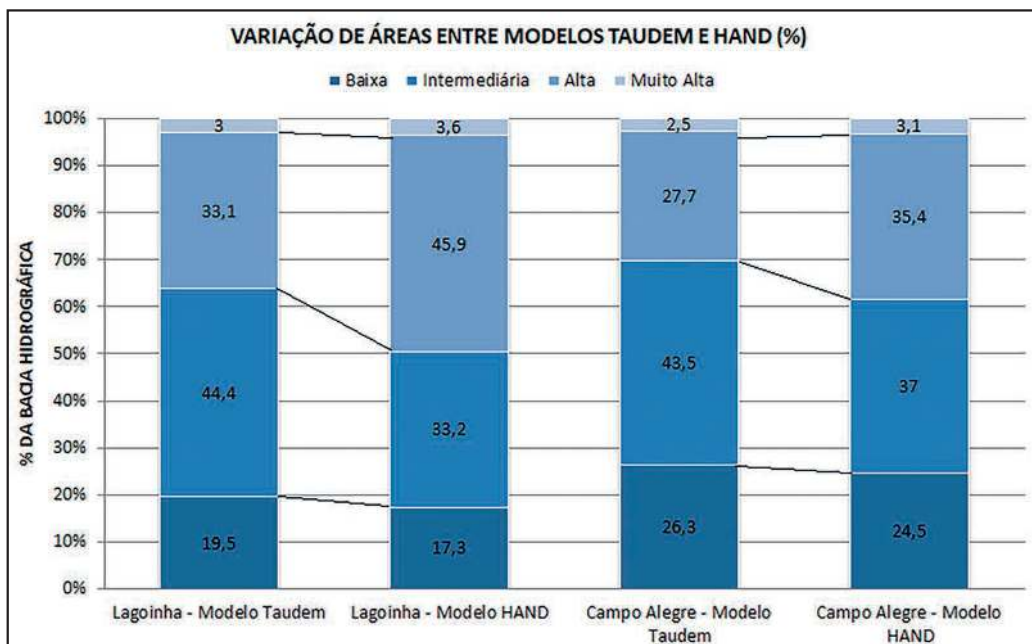


Figura 3 Variação da Área de Captação Proporcional em Modelos de HAND e Taudem

e muito alta em comparação ao modelo TauDEM. Isso implica maiores áreas de acúmulo de água da chuva. A área dos córregos tem influência direta

sobre os hidrogramas encontrados, sendo percebido uma diferença de quase 50 % de aumento de fluxo de escoamento superficial entre as bacias, como mostrado na Figura 4.

A precipitação para o local de estudo foi discretizada pelo método de Huff 1º quartil, e tem precipitação de 133,61 mm de altura, duração de 6h e 50 anos como período de retorno. Os resultados do hidrograma mostram que a influência da maior área do córrego Campo Alegre acrescentou à área mais impermeável, que é quase dobro impermeável de Córrego da Lagoinha gera um aumento de fluxo de aproximadamente 50% ao comparar as duas microbacias.

Os resultados encontrados no fluxo do Lagoinha são de 72.1 m³/s, enquanto que para o córrego de Campo Alegre o fluxo máximo é de 107.9 m³/s. Como as condições de uso e ocupação do solo são semelhantes, esse fluxo foi esperado, uma vez que corresponde em proporção à área impermeável anteriormente descrita entre as duas microbacias.

Entende-se que, com estas razões de área, fluxo do Campo Alegre tende a gerar fluxo em seu

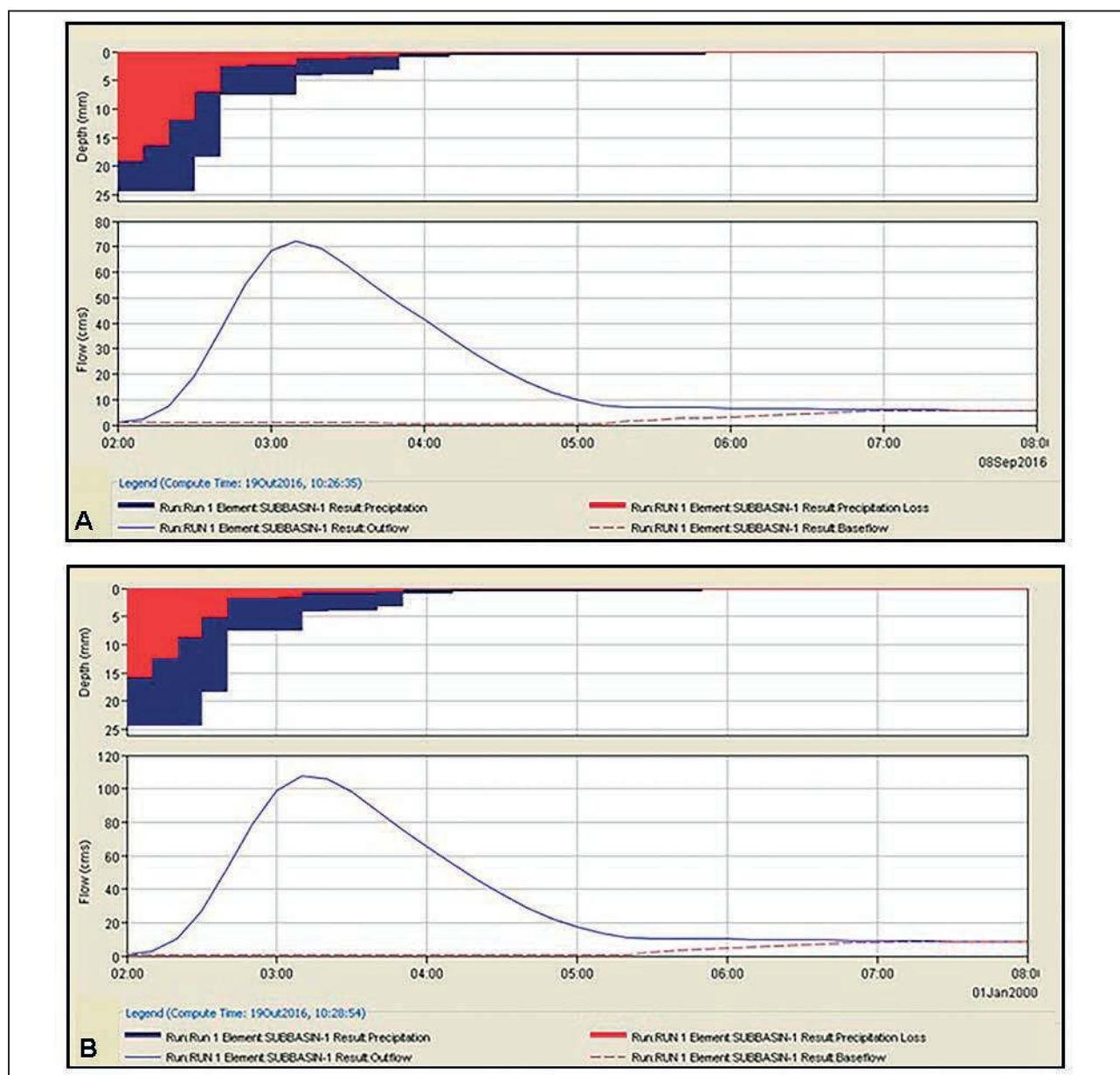


Figura 4 Hidrogramas encontrados para a) Córrego do Lagoinha e b) para Campo Alegre.

exutório com valores mais elevados que o Córrego da Lagoinha. Outra diferença observada e que interfere nos volumes gerados no talvegue é que o córrego de Campo Alegre tem área urbanizada a montante de suas fontes, portanto esta bacia recebe fluxos de contribuições ao longo da extensão do córrego, diferentemente do Córrego da Lagoinha.

5 Conclusões

Deve-se notar que a área urbana de Uberlândia está se expandindo para a parte sul da cidade. Assim, para proteger os recursos hídricos, é essencial localizar AVAs nesta região antes que a maior parte do solo seja impermeabilizada por edifícios e pavimentação. Assim, a AVA pode servir como instrumento mais eficaz de proteção dos recursos hídricos do que as APP, uma vez que sua identificação requer modelagem hidrológica e são modelos que consideram características físicas. Entretanto, os modelos são sensíveis quando se trata de pequenas áreas sem variações significativas de altitude; Isso foi confirmado por comparações feitas com estudos de Prates (2011) e Alves (2008). Em outras palavras, o modelo AVA apresentou melhor desempenho que as APPs no caso de terrenos com pouco desnível e em condições de precipitação esperadas. Entretanto, em eventos de grandes enxurradas, cujas águas podem percorrer quilômetros espraiando-se superficialmente pela região, mesmo com mesma cota, sem o tempo apropriado de penetração e percolação não são modelados. Os modelos apresentaram resultados numericamente diferentes por utilizarem diferentes algoritmos, embora ambos utilizem os mesmos dados de entrada.

O uso do solo e a gestão da ocupação devem ser priorizados no AVA para que essas áreas possam cumprir sua função. A AVA deve ser incluída nos planos de manejo das bacias hidrográficas para garantir a plena funcionalidade dos ecossistemas ribeirinhos porque, embora sejam áreas que não coincidem necessariamente com a zona ribeirinha,

tendem a atingir o estado de saturação de água do solo, onde predominam os escoamentos superficiais.

6 Referências

- Araújo Neto, M.D. 2013. Métodos de medição da água no solo: uma breve discussão. *Revista Geonomos*, 2(2): 51-61.
- Attanasio Jr.; M.R.; Attanasio, C.M. & Toniato, M.T. 2011. Aspectos ecológicos da conservação e restauração florestal: bases para o direito ambiental. *Fatecnológica (FATEC-JAHU)*, 4:91-106.
- BRASIL. Código Florestal. Lei n.º 12.651, de 25 de maio de 2012. Art. 2º. Disponível em: http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/ato2011-2014/2012/lei/112651.htm. Acessado em 01/05/2014.
- DPI-INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (Brasil). Divisão de Processamento de Imagens. *TerraViewHidro*. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/~alexandre/TerraHidro/>. Acessado em 14/11/15.
- DPI-INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, (Brasil). Divisão de Processamento de Imagens. 2015b. Grupo de Modelagem para Estudos da Biodiversidade. HAND Distância vertical à drenagem mais próxima. São José dos Campos, SP. Disponível em: <http://www.dpi.inpe.br/Ambdata/hand.php>. Acessado em 13/02/2015.
- Koriche, S.A. & Rientjes, T.H.M. 2016. Application of satellite products and hydrological modelling for flood early warning. *Physics and Chemistry of the Earth*, 93:12-23. Doi: 10.1016/j.pce.2016.03.007.
- Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Hodnett, M.; Rennó, C.D.; Rodrigues, G.; Silveira, A.; Waterloo, M. & Saleska, S. 2011. Height Above the Nearest Drainage – a hydrologically relevant new terrain model. *Journal of Hydrology*. 404: 13-29. Doi:10.1016/j.jhydrol.2011.03.051
- Pereira Dias, A. 2014. *Análise espacial aplicada à delimitação de áreas úmidas da planície de inundação do médio Araguaia*. Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais e Ambientais, Faculdade de Engenharia Florestal, Universidade Federal do Mato Grosso, Cuiabá, Dissertação de Mestrado, 91p.
- Prates, V. 2011. Utilização de índices para a representação da paisagem como apoio para levantamento pedológico em ambiente de geoprocessamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO - SBSR, 15, *Anais*, Curitiba.
- Quinn, P.F.; Beven, K.J.; Chevallier, P. & Planchon, O. 1991. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modelling using terrain models, *Hydrological Process*, 5:55-79.
- Rennó, C.D.; Nobre, A.D.; Cuartas, L.A.; Soares, J.V.; Hodnett, M.G.; Tomasella, J. & Waterloo, M. 2008. A new terrain descriptor using SRTM-DEM: Mapping terra-firme rainforest environments in Amazonia. *Remote Sensing of Environment*, 112 (9): 3469-3481.
- Tarboton, D.G. 2014. Terrain Analysis Using Digital Elevation Models (TauDEM). Disponível em <http://hydrology.usu.edu/taudem/taudem5/index.html>. Acessado em 18/10/2014.
- Valeriano, M.M.; Rossetti, D.F. & Albuquerque, P.C.G. 2009. Topodata: desenvolvimento da primeira versão do banco de dados geomorfométricos locais em cobertura nacional. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, Natal, RN, p. 1-8.