

# O USO DE MODELOS E SIMULAÇÕES NA REPRESENTAÇÃO CINEMÁTICA DE PROCESSOS HIDROLÓGICOS EM BACIAS HIDROGRÁFICAS URBANAS

*L. L. Borba<sup>1</sup>, E. D. Nunes<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Pontifícia Universidade Católica de Goiás, Brasil

<sup>2</sup>Universidade Federal de Goiás, Brasil

## Comissão III: Cartografia

### RESUMO

Historicamente os mapas têm se destinado a representações estáticas e bidimensionais de aspectos do mundo real. No entanto, a crescente intensidade e complexidade dos problemas relacionados ao espaço ou ambiente tem colocado novos desafios para a ciência cartográfica, requerendo o desenvolvimento e aprimoramento de representações dinâmicas e até mesmo de situações futuras, considerando as dimensões *z* (vertical) e *t* (tempo). Neste contexto, a representação de fenômenos e até mesmos processos que se desenvolvem em pequenos intervalos de tempo, tais como os fenômenos e os processos em ambientes urbanos que nas últimas décadas passaram a ocorrer de forma mais acelerada, vêm sendo cada vez mais possível, permitindo compreensões mais satisfatórias. Neste sentido, o objetivo do presente trabalho é apresentar os resultados decorrentes da simulação e modelagem do escoamento superficial em uma bacia hidrográfica urbana, destacando a importância da integração de múltiplas variáveis na representação de processos e fenômenos, considerando seus diversos estágios evolutivos no espaço e no tempo.

**Palavras chave:** Representações Dinâmicas. Fluxos Hídricos. Modelagem Multifatorial.

### ABSTRACT

Historically maps have been intended for static and two-dimensional representations of real-world aspects. However, the increasing intensity and complexity of problems related to space or environment has posed new challenges for cartographic science, requiring the development and improvement of dynamic representations and even future situations, considering the *z* (vertical) and *t* (time) dimensions. In this context, the representation of phenomenon and even processes that develop in short time intervals, such as the phenomenon and the processes in urban environments that in the last decades, it happened more quickly, are becoming more possible, allowing understandings. In this way, the objective of this paper is to present the results of the simulation and modeling of the runoff in an urban hydrographic basin, highlighting the importance of the integration of multiple variables in the representation of processes and phenomenon, considering their several evolutionary stages in space and in the time.

**Keywords:** Dynamic Representations. Water Flows. Multifactorial Modeling.

### 1- INTRODUÇÃO

Um dos grandes desafios da ciência cartográfica tem sido a modelagem espaço-temporal de fenômenos, os quais resultam da convergência de fatores naturais e antrópicos, com considerável precisão e eficiência. O desenvolvimento e aprimoramento da tecnologia computacional tem permitido pensar e implementar procedimentos operacionais destinados a abordagem de fenômenos ambientais de elevada complexidade (Mitasova et al., 2006). Para tanto, a coleta e a estruturação de banco de dados espaciais georreferenciados, a interpretação e a geração da informação geográfica têm se mostrado de fundamental importância para novos avanços na pesquisa envolvendo a cartografia, exigindo uma

estreita colaboração entre as disciplinas tradicionais, tais como a geografia, a matemática e a ciência computacional, resultando no que se chama atualmente de ciência da informação espacial. Isso porque parte dos processos que resultam em fenômenos no espaço ou ambiente não se encontra totalmente ao alcance direto da visão humana ou de instrumentos previamente projetados, como os sensores remotos. A saída tem sido o uso de modelos espaciais representativos pensados e estruturados com base em evidências e implementados com base em variáveis contínuas, consideradas mais importantes, apoiadas em dados coletados de forma direta e indiretamente, e complementados por constatações em campo. No que se refere aos fatores, estes podem ser representados por meio de variáveis que, se parametrizadas, inter-

relacionadas e avaliadas qualitativa e quantitativamente permitem abordagens multifatoriais e, conseqüentemente, mais abrangentes, fornecendo subsídios para diagnósticos e prognósticos mais precisos e conseqüentemente intervenções mais eficientes. Em ambientes urbanos, onde as mudanças na cobertura e no uso do solo imprimem grandes mudanças no comportamento dos fluxos hídricos em pequenos intervalos de tempo, essas representações se tornam extremamente necessárias e eficientes (Hammond et al., 2013). Isso porque, os processos e fenômenos que ocorrem em pequenos intervalos de tempo requerem representações que, além precisas, levem em conta diferentes cenários e respectivas probabilidades de ocorrência, para os órgãos públicos possam planejar diferentes respostas na forma de ações.

Nesse contexto, podem ser citados os fenômenos hidrológicos urbanos, tais como alagamentos e inundações (O'Driscoll et al., 2010). Esses se colocam entre as características climáticas; os condicionantes do relevo; as propriedades do solo - que podem ser modificadas -; e na maioria das vezes, podem ser potencializados pelas modificações impostas pela sociedade, especialmente na forma de mudanças na cobertura e uso do solo. Com tantos fatores a serem considerados, o entendimento dos fenômenos hidrológicos urbanos passa necessariamente pela análise, a priori, individual e, a posteriori, conjunta dos fatores e suas variáveis consideradas mais importantes, cuja parametrização se mostra correlata, do ponto de vista espacial e matemático, à ocorrência de um determinado fenômeno.

Considerando o exposto, o objetivo geral do presente trabalho é apresentar o uso de dados espaciais georreferenciados e os procedimentos metodológicos em geoprocessamento que permitem a aplicação do Método Racional Modificado na forma de um modelo espacial e temporalmente distribuído, bem como avaliar a dinâmica hidrológica em uma bacia hidrográfica que passou por consideráveis mudanças na cobertura e uso nos últimos 24 anos. Para tanto, serão considerados cada tipo, bem como as mudanças na cobertura e uso do solo, os efeitos cumulativos no terreno proporcionados, principalmente, pela direção e acúmulo de fluxo - os quais determinam a área de contribuição específica -, e diferentes cenários de intensidade e duração dos eventos pluviométricos.

## 2- METODOLOGIA

A metodologia compreendeu a aplicação do Método Racional Modificado (MULVANEY, 1850; KUICHLING, 1889), em ambiente de geoprocessamento, considerando diferentes cenários de intensidade e duração dos eventos pluviométricos para fins de comparação dos resultados entre os anos de 1992 e 2016, por meio da seguinte equação:

$$Q_{max} = C_i A / 3,6 \quad (1)$$

Em que:  $Q_{max}$  = vazão máxima estimada do escoamento superficial, em  $m^3/s$ ;  $C$  = coeficiente de escoamento superficial, adimensional;  $i$  = média das intensidades máximas de precipitação, em  $mm/h$  e considerando uma duração do evento pluviométrico menor ou igual ao tempo de concentração do escoamento superficial; e  $A$  = área da bacia em  $km^2$ .

Para tanto, a média das intensidades máximas de precipitação foram obtidas com base na equação de Duração-Intensidade-Frequência das chuvas de Goiânia (Oliveira et al., 2005). Os coeficientes de escoamento superficial foram determinados com base na proposta do SCS - USDA (1972), a qual leva em conta um dado valor de precipitação e coeficiente de armazenamento ou infiltração de água no solo, como apresentado na seguinte equação:

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

Em que:  $C$  = coeficiente de escoamento superficial ou razão entre o volume escoado e o total precipitado;  $P$  = precipitação considerada, em  $mm$ ; e  $S$  = coeficiente de armazenamento em  $mm$ . Este resulta da avaliação de grupos hidrológicos os quais envolvem a declividade, o tipo e textura do solo e principalmente o tipo de cobertura e uso e a umidade antecedente, resultando em valores de  $CN$  (número de escoamento), conforme o SCS-USDA (1972) por meio da seguinte equação:

$$S = \frac{25400}{CN} - 254 \quad (3)$$

Os mapas de cobertura e uso do solo foram elaborados por meio de classificação supervisionada, classificador maxver, tendo como base fotografias aéreas correspondentes ao ano de 1992 e imagens de satélites correspondentes ao ano de 2016, ambas com resolução espacial de 60 cm. Já para a elaboração dos modelos de declividade e comprimento de fluxo utilizou-se de Modelo Digital de Terreno com resolução espacial de 10 metros.

## 3- RESULTADOS E DISCUSSÃO

No que se refere à diversidade espacial da cobertura e uso do solo (a), e sua correspondência em coeficientes de escoamento superficial (b), a mesma se refletiu na capacidade de infiltração do solo, resultando no aumento do volume de escoamento superficial em função do aumento da intensidade e duração do evento pluviométrico, conforme pode-se observar do longo da Figura 1. Para o ano de 1992 observa-se que as áreas com maiores coeficientes de escoamento correspondiam às partes mais elevadas e edificadas da bacia, ao passo que os menores valores se distribuíam da porção intermediária às partes mais rebaixadas que ainda conservavam alguns fragmentos de vegetação. Nessa situação e considerando uma precipitação inicial de 6  $mm/h$ , nos 3 primeiros minutos a estimativa foi de um incremento de até 1,04  $m^3/s$  nos pontos de maior vazão ou concentração de fluxo (c). Vale ressaltar que esse tempo não era o necessário para que todas as

partes da bacia pudessem contribuir com o exutório, tendo em vista que a estimativa do tempo de concentração do escoamento superficial para toda a bacia para o ano de 1992 foi 32 minutos. Já considerando um evento pluviométrico de intensidade 10 mm/h e duração de 10 minutos, a estimativa de vazão máxima foi de 2.06 m<sup>3</sup>/s para os pontos de maior concentração de fluxo. Nesse estágio é possível perceber também que algumas áreas, mesmo localizadas a montante mas já urbanizadas, já apresentavam escoamento superficial de até 0.2 m<sup>3</sup>/s (d). Quando se considera uma intensidade de 25 mm/h

por um período de até 25 minutos, além de uma vazão máxima de 5,21 m<sup>3</sup>/s, o destaque é um maior predomínio da vazão variando de 0,2 a 0,6 m<sup>3</sup>/s ao longo da bacia, em especial nas principais linhas de concentração de fluxo e nos pontos de conexão entre os canais (e). Já quando se leva em conta a média das intensidades máximas de precipitação para a região de Goiânia - 78 mm/h -, e o tempo necessário para que todas as partes da bacia contribuíssem para o exutório - 32 min -, a estimativa de vazão foi de 16, 25 m<sup>3</sup>/s no ponto de máxima concentração de fluxo (f).

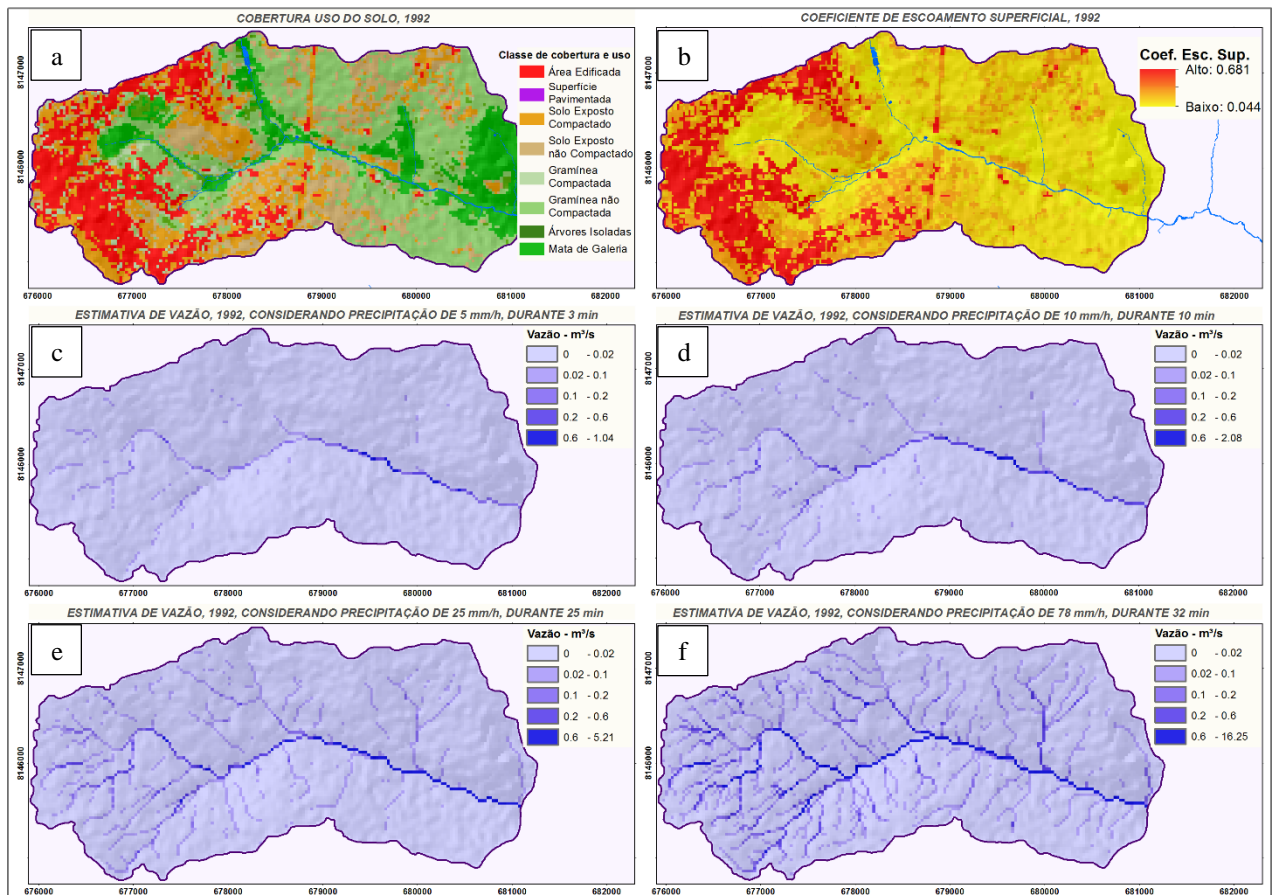


Fig. 1 – Mapa de cobertura e uso do solo, 1992 (a); respectivos coeficientes de escoamento superficial (b); estimativa de vazão com precipitação de 5 mm/h durante 3 min (c); vazão com precipitação de 10 mm/h durante 10 min (d); vazão com precipitação de 25 mm/h durante 25 min (e); e vazão com precipitação de 78 mm/h durante 28 min (f).

Pelo exposto entende-se que a intensidade de precipitação, bem como a duração dos eventos pluviométricos em face das condições de cobertura e uso do solo é de fundamental importância para o entendimento da dinâmica hidrológica em um sistema como a bacia hidrográfica. Além da cobertura e uso do solo, declividade do terreno e tipo de solo, variáveis como a umidade antecedente à chuva e orientação das ruas podem ser consideradas também na avaliação, de forma a obter simulações cada vez mais apoiadas em variáveis, cujo comportamento é correlato àquele do fenômeno e consequentemente mais fidedignas. Já no

que se refere à variável tempo, as partes *c*, *d*, *e* e *f* da Figura 1 podem, juntas, formar uma animação em vídeo ou no formato GIF (Graphics Interchange Format). Tal opção dispensaria o uso de múltiplas figuras e, principalmente, permitiria a transição entre vários recortes e situações no tempo, facilitando a compreensão. Essa variabilidade temporal associada à variabilidade espacial do volume do escoamento superficial cumpre mais satisfatoriamente com a representação do comportamento espaço-temporal dos processos hidrológicos e, consequentemente, de forma mais fidedigna em relação à realidade.

Em relação as mudanças na cobertura e uso do solo entre os anos de 1992 e 2016, essas se refletiram na menor capacidade de infiltração dos solos e conseqüentemente no aumento das estimativas de vazão, mesmo diante das mesmas condições de intensidade e duração dos eventos pluviométricos consideradas em 1992. Nesse sentido, destaca-se que em 2016 o surgimento da área pavimentada e, principalmente a expansão da área edificada e do adensamento urbano (a), deixaram a quase totalidade da bacia com elevados coeficientes de escoamento superficial (b). As poucas áreas que apresentavam considerável capacidade de infiltração dos solos se restringiam às proximidades dos canais de drenagem em função da preservação de poucos fragmentos de vegetação. Nessa situação a intensidade de 5 mm/h durante os 3 primeiros minutos de precipitação proporcionavam uma vazão máxima estimativa de 2,7 m<sup>3</sup>/s no ponto de maior convergência de fluxo (c), resultando em um aumento de 1,66 m<sup>3</sup>/s em relação ao ano de 1992. Os efeitos do adensamento urbano também resultaram em um maior predomínio de volumes de escoamento variando de 0,02 a 0,1 m<sup>3</sup>/s em diversas partes da bacia. Já quando se considera uma intensidade de 10 mm/h e uma duração de 10 minutos a

estimativa de vazão chegou a 5,36 m<sup>3</sup>/s no ponto de máxima convergência de fluxo. Em comparação com o ano de 1992 essa situação só foi alcançada quando se considerou precipitação de 25 mm/h por um período de 25 minutos, o que reflete a influência da compactação e impermeabilização na capacidade de infiltração do solo e conseqüentemente no aumento do escoamento superficial. Para um cenário de intensidade de precipitação de 25 mm/h durante um período de 25 minutos a estimativa de vazão máxima foi de 13,4 m<sup>3</sup>/s nos pontos de maior concentração de fluxo. Nessas condições em vários segmentos da bacia é possível observar estimativas de vazão de até 0,6 m<sup>3</sup>/s em função dos efeitos cumulativos proporcionados pelas formas do terreno. A situação mais preocupante dos efeitos decorrentes do processo de compactação e impermeabilização do solo em face de chuvas extremas fica evidente quando se considera a média das intensidades máximas de precipitação - 78 mm/h -, por um período suficiente para que todas as partes da bacia passassem a contribuir com o exutório, que foi de 28 minutos. Com isso, além de uma redução de 4 minutos do tempo de concentração do escoamento da bacia, chegou-se a uma estimativa de 41,8 m<sup>3</sup>/s no exutório da bacia.

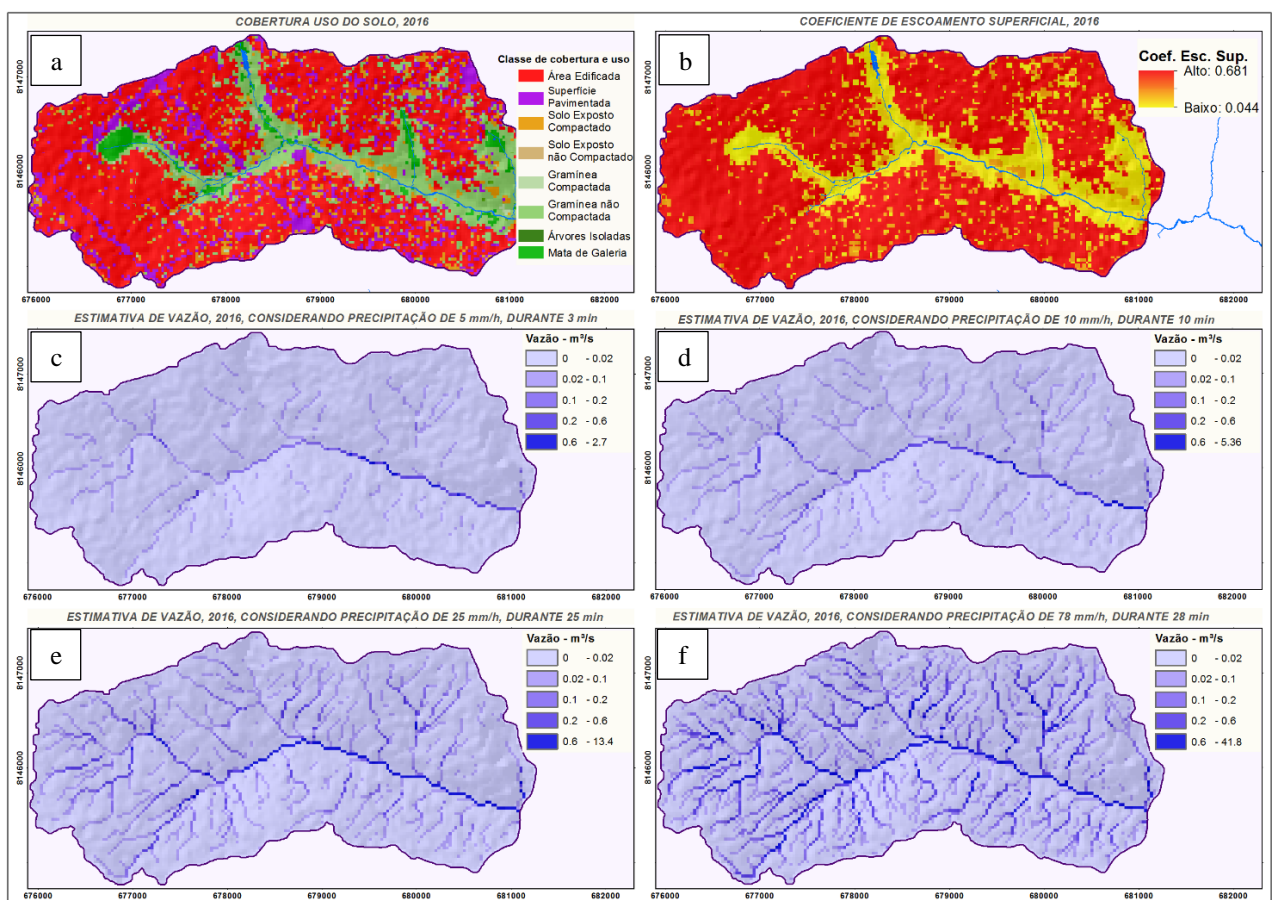


Fig. 2 – Mapa de cobertura e uso do solo, 2016 (a); respectivos coeficientes de escoamento superficial (b); estimativa de vazão com precipitação de 5 mm/h durante 3 min (c); vazão com precipitação de 10 mm/h durante 10 min (d); vazão com precipitação de 25 mm/h durante 25 min (e); e vazão com precipitação de 78 mm/h durante 28 min (f).

#### 4- CONCLUSÃO

Pelo exposto, percebe-se que é possível simular os efeitos decorrentes de eventos pluviométricos com diferentes intensidades e durações associados às condições de cobertura e uso do solo em um sistema como a bacia hidrográfica. O cálculo envolvendo dados espaciais georreferenciados, considerando os efeitos decorrentes do encadeamento sistematizado no espaço em função das condições do relevo e associado a diferentes cenários de precipitação permite representações dinâmicas no espaço e no tempo, permitindo representações mais satisfatórias e, portanto, melhores entendimentos.

A grande disponibilidade de dados envolvendo imagens de satélite, em especial aquelas coloridas e de alta resolução, Modelos Digitais de Terreno e de Superfície, a possibilidade de acesso, associadas as funções de geoprocessamento, bem como o desenvolvimento de modelos cada vez mais completos, vem permitindo a representação de processos e fenômenos cada vez mais dinâmicos considerando as dimensões x, y, z e t.

#### REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Hammond, M. J.; A. S. Chen; S. Djordjević; D. Butler e O. Mark, 2013. Urban flood impact assessment: A state-of-the-art review. Urban Water Journal, Vol. 12, pp. 14-29.

Kuichling, E., 1889. The relation between the rainfall and the discharge of sewers in populous districts. Transactions of the American Society of Civil Engineers, Vol. 20, Nº 1, pp. 1-60.

Mitasova, H. et al., 2006. Real-time Human Interaction With Landscape Models Using a Tangible Geospatial Modeling Environment. IEEE Computer Graphics & Applications, Special Issue - GeoVisualization, North Carolina, Vol. 26, pp. 55-63.

Mulvaney, T. J., 1851. On the use of self-registering rain and flood gauges in making observations of the relations of rainfall and flood discharges in a given catchment. Trans. Inst. Civil Eng. Ireland, Vol. 4, pp. 18-33.

O'Driscoll, M.; S. Clinton; A. Jefferson; A. Manda e S. McMillan, 2010. Urbanization effects on watershed hydrology and in-stream processes in the Southern United States. Water, Vol. 2, pp. 605-648.

Oliveira, L. F. C.; F. C. Cortês; T. R. Wehr; L. B. Borges; P. H. L. Sarmento e N. P. Griebeler, 2005. Intensidade-duração-frequência de chuvas intensas para localidades no estado de Goiás e Distrito Federal. Pesquisa Agropecuária Tropical, Vol. 35, Nº 1, pp. 13-18.

USDA – United States Department of Agriculture, 1972. Design Hydrographs, Section 4, National Engineering Handbook Hydrology, Washington D. C., pp. 127.