

## MODELAGEM DINÂMICA DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL

AURÉLIO AZEVEDO BARRETO-NETO<sup>1</sup>  
CARLOS ROBERTO DE SOUZA FILHO<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Departamento de Geologia e Recursos Naturais, Instituto de Geociências, Universidade Estadual de Campinas, Caixa Postal 6152, 13083-970, Campinas, SP

aurelio@ige.unicamp.br  
beto@ige.unicamp.br

**Abstract.** Dynamic simulation of water flow is a key point for planning and management of watersheds submitted to periodical land use changes and for which hydrologic data is lacking. The objective of this paper is to compute and evaluate the amount of runoff produced by a watershed considering land use maps yielded from digitally -processed Terra/ASTER satellite imagery and the Curve Number hydrologic model, adapted to employ rainfall time series. Data computing and integration were accomplished using the PCRaster environmental modelling language. The results from the modelling were confronted against measured field data and proved to concur quite plausibly, indicating the suitability of the Curve Number hydrologic model for applications in tropical terrains.

**Keywords:** runoff, dynamic modelling, PCRaster.

### Resumo

A simulação dinâmica de escoamento superficial pode contribuir para o auxílio ao planejamento e gerenciamento de bacias de drenagem carentes de dados hidrológicos e sujeitas a constantes mudanças no uso do solo. O objetivo deste artigo foi o de calcular e avaliar o volume do escoamento superficial gerado por uma bacia de drenagem, utilizando como base mapa de uso do solo obtido a partir de dados do satélite/sensor Terra/ASTER, e o modelo hidrológico *Curve Number*, adaptado para comportar séries temporais de precipitação. Os cálculos e integração dos dados foram realizados usando uma linguagem de modelagem ambiental, denominada 'PCRaster'. Os resultados obtidos na modelagem foram confrontados com dados medidos no campo e comprovaram a sensibilidade do modelo hidrológico para aplicações em terrenos tropicais.

### 1. Introdução

Os modelos matemáticos de processos ambientais têm contribuído para um melhor conhecimento da evolução do meio ambiente, bem como, auxiliado o planejamento e o gerenciamento do espaço e uso dos recursos naturais em diferentes escalas (Christofolletti 1999; Steyaert 1993).

A integração de modelos hidrológicos com sistemas de informação geográfica (SIG) tem sido discutida, analisada e utilizada por muitos pesquisadores, entre eles Goodchild (1993), Fedra (1993), Goodchild et al. (1996), Karimi e Houston (1997), Coroza et al. (1997), Burrough e McDonnel (1998), Sui e Maggio (1999), Pullar e Springer (2000), Millward e Mersey (2001). Esta tendência é um reflexo da grande capacidade dos SIG de armazenar, manipular, analisar, recuperar e visualizar informações geográficas (Burrough e McDonnel 1998). Embora o tempo seja um parâmetro explícito em muitos modelos hidrológicos, a sua representação é quase inexistente nas últimas gerações de SIG comerciais (Câmara et al. 1996; Burrough e McDonnel

1998). Entretanto, pesquisas têm sido feitas na tentativa de incorporar o parâmetro temporal nos SIG. (Langran 1992; Van Deursen 1995; Wesseling et al. 1996; Mitasova et al. 1996).

O principal objetivo deste artigo foi calcular e avaliar o volume do escoamento superficial gerado por uma bacia de drenagem, a partir de uma série temporal de chuva utilizando o modelo hidrológico *Curve Number* (MHCN) e a Linguagem de Modelagem Ambiental (LMA) PCRaster.

## 2. Área de Estudo

A área de estudo compreende a bacia de drenagem do Rio Quilombo, com uma área de 270 km<sup>2</sup>, localizada no vale do Ribeira, porção sul do Estado de São Paulo. A cobertura vegetal da área é composta basicamente por floresta (em sua maior parte), pastagem e plantação permanente (bananal).

## 3. O Modelo Hidrológico Curve Number

O MHCN (SCS, 1972) é um método bem conhecido e amplamente utilizado para estimar o escoamento superficial e, conseqüentemente, o fluxo de rios, a recarga de água, infiltração, umidade do solo e transporte de sedimentos. Portanto, ele pode auxiliar projetos de obras hidráulicas, trabalhos de conservação de solos e controle de enchentes (SCS, 1972; Engel et al. 1993; Mack, 1995; Johnson e Miller, 1997; Thompson, 1999; Pullar e Springer, 2000; Tucci, 2000).

Na aplicação do MHCN, as características físicas da bacia, tais como o grupo hidrológico do solo (GHS) (**Tabela 1**), uso, condição hidrológica do solo e umidade antecedente, são de fundamental importância, uma vez que a combinação destas características determina a escolha do CN, o qual estima o escoamento superficial gerado por uma chuva.

Tabela 1: Os GHS e suas características.

GHS	Características	Capacidade de infiltração
A	Solos arenosos, profundos e bem drenados	> 7,6 mm h <sup>-1</sup>
B	Solos arenosos com pouca argila e solo orgânico	3,8 e 7,6 mm h <sup>-1</sup>
C	Solos mais argilosos que o GHS B, com baixa permeabilidade	1,3 e 3,8 mm h <sup>-1</sup>
D	Solos com argilas pesadas, muito impermeáveis	< 1,3 mm h <sup>-1</sup>

## 4. A Linguagem de Modelagem Ambiental PCRaster

A LMA PCRaster (Wesseling *et al.* 1996) é uma linguagem computacional de alto nível criada para modelagem ambiental, que permite interação espacial e temporal. Ela possui um banco de dados similar a um SIG, além de software de visualização, o qual permite uma visualização dos resultados de pré ou pós-modelagem dos dados.

Segundo Karssenber *et al.* (2001) o PCRaster é um ambiente ideal para a construção de modelos, visto que: (1) apresenta um grande quantidade de algoritmos e funções padrão utilizadas em modelagem ambiental; (2) não é necessário ao usuário conhecimento em

programação de linguagem computacional tais como, FORTRAN ou C<sup>++</sup>, sendo necessário somente uma familiaridade com notações matemáticas; (3) a linguagem é simples e de fácil aprendizado; (4) sua interface, baseada em arquivo texto, além de suportar modelagem estática utilizando simples comandos, permite a construção de modelos espaço-temporais, com o mesmo conjunto de operações; (5) a linguagem trabalha como em um ambiente SIG, evitando, desta forma, a necessidade de uma conexão entre o modelo e o SIG; (6) é uma linguagem portátil e pode ser rodada em diferentes plataformas sem a necessidade de computadores de grande performance.

## 5. Método

### 5.1 Base de Dados

Os dados de solos da bacia do Rio Quilombo utilizados neste trabalho foram extraídos do mapa de solos da Região Ribeira do Iguape, na escala 1/100.000 (Sakai et al. 1983).

Basicamente a bacia é composta por quatro tipos de solos: latossolo, podzólico, cambissolo e orgânico. Uma característica importante dos solos localizados no estado de São Paulo, região de clima tropical, é o fato de que os solos argilosos proporcionam uma boa drenagem de água (Lombardi Neto *et al.* 1991), diferente do que acontece nos solos dos Estados Unidos, local onde o modelo CN foi concebido e calibrado. Na bacia estudada os solos orgânicos estão localizados nas baixadas dos vales e apresentam elevado índice de umidade. Em função dessas características particulares dos solos na área de estudo, foi necessário uma re-classificação dos mesmos de acordo com o GHS a que pertencem (**Tabela 2**).

Tabela 2: Tipos de solos e os seus respectivos grupos hidrológicos conforme Lombardi Neto *et al.* (1991).

Tipo de solo	GHS	id (identificador)
Latossolo	A	1
Podzólico	B	2
Cambissolo	C	3
Orgânico	D	4

O mapa de solo, originalmente em formato analógico, foi convertido para o formato vetorial. Em seguida foi rasterizado, com células de 15x15 metros (compatível com a resolução do mapa de uso do solo) (**Figura 1**), e convertido para o formato ASCII. A conversão dos mapas digitais em formato ASCII foi feita com o objetivo de permitir a transferência para o PCRaster.

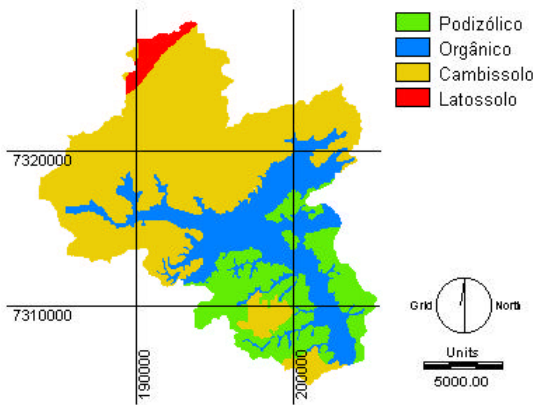


Figura 1: Mapa de solos.

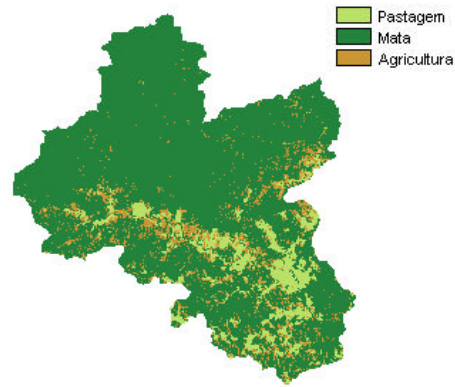


Figura 2: Mapa de uso.

O mapa de uso do solo **(Figura 2)** foi obtido a partir do processamento digital de dados adquiridos pelo sensor ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer), a bordo da plataforma orbital Terra (Abrams, 2000). O sensor ASTER possui 14 bandas, distribuídas no espectro eletromagnético da seguinte forma: duas bandas no espectro visível (VIS) (bandas 1 e 2) e uma no espectro do infra-vermelho próximo (NIR) (banda 3), com 15 metros de resolução espacial; seis bandas no espectro do infravermelho de ondas curtas (SWIR) (bandas 4, 5, 6, 7, 8 e 9), com 30 metros de resolução espacial e cinco bandas no espectro infra-vermelho termal (TIR) (bandas 10, 11, 12, 13, 14), com 90 metros de resolução espacial. O mapa de uso do solo foi gerado a partir das nove bandas do intervalo do espectro refletido (bandas 1 a 9). Primeiramente, as bandas do SWIR foram re-amostradas para uma resolução espacial de 15 metros, compatível com aquela das bandas 1 a 3. Em seguida, aplicando técnicas de classificação supervisionada e interpretação visual, obteve-se um mapa final com três classes de uso do solo: floresta (id = 1), pastagem (id = 2) e plantação permanente (bananal) (id = 3). Em seguida, este mapa foi convertido para o formato ASCII.

O mapa topográfico da área de estudo foi obtido a partir de quatro folhas topográficas nas escalas de 1/50.000 (IBGE, 1974), convertidas em arquivo vetorial de linhas, utilizando técnicas de vetorização semi-automática. Em seguida, foi realizada a delimitação da bacia de drenagem.

Os dados de precipitações, bem como os dados de vazões associadas a essas precipitações (medidas ao exutório da bacia), foram obtidos do posto pluviográfico e do posto fluviográfico (DAEE 2001) localizados na bacia estudada.

A chuva total associada a cada posto hidrográfico de vazão medido em campo foi discretizada em  $n$  intervalos  $\Delta t$  de 5 horas, onde  $n$  é o tempo total entre o início e o fim da chuva.

Os dados hidrográficos obtidos no exutório da bacia foram convertidos para unidades de vazão  $m^3 s^{-1}$  e subtraídos da vazão de base (vazão sem influência de chuvas). Em seguida, calculou-se o volume total escoado de cada posto hidrográfico. Estas vazões totais foram convertidas em  $mm$  com o intuito de facilitar comparações entre chuva/escoamento, no momento de validação do modelo.

## 5.2 Estrutura Matemática do Modelo Curve Number

A equação do escoamento superficial definida pelo modelo CN e pormenorizado no 'National Engineering Handbook' (SCS 1972) é a seguinte:

$$Q = \frac{(P-0,2S)^2}{P+0,8S} \quad (1)$$

onde:  $Q$  é o escoamento superficial (em mm),  $P$  a precipitação,  $S$  o potencial de infiltração máximo após o início do escoamento superficial. O parâmetro  $S$  está relacionado ao solo e a condição de cobertura da bacia de drenagem através do parâmetro CN, conforme equação (2).

$$S = \frac{25.400}{CN} - 254 \quad (2)$$

A distribuição do excesso de chuva no tempo, utilizando o MHCN, pode ser calculada a partir de uma série temporal de precipitação utilizando as equações (3) e (4) (Van Deursen 1995).

$$Fa = \frac{S(P-Ia)}{(P-Ia+S)} \quad (3)$$

$$Pe = P - Fa \quad (4)$$

onde  $P$  é a precipitação acumulada,  $Fa$  as abstrações acumuladas,  $Pe$  o excesso de precipitação acumulado e  $Ia$  perdas iniciais..

### 5.3 Implementação do Modelo com a Linguagem de Modelagem Ambiental PCRaster

Um programa escrito em PCRaster é estruturado em quatro seções: "binding", "initial", "timer" e "dynamic". A seção "binding" apresenta a lista de variáveis do programa que estão ligadas a nomes de arquivos; a seção "initial" determina o estado inicial do modelo (no tempo = 0) e determina os valores das variáveis constantes usando os operadores do PCRaster; a seção "timer" determina o número de passos e seqüência que o modelo vai rodar; a seção "dynamic" é uma seção interativa e seqüencial que realiza 'loops' baseado no número de intervalos de tempo definido na seção "timer".

## 6. Resultados e Discussões

A combinação do mapa de GHS com o mapa de uso do solo possibilitou a geração de onze complexos solo-cobertura. A **Tabela 3** apresenta o número de células existentes em cada complexo.

Tabela 3: Determinação do numero de células de cada complexo solo-cobertura e seus respectivos CNs.

CN	Número de células 1/100.000
26	26838
52	148073
61	36317
62	630274
67	2
69	176295
74	8746
78	27273
80	58988
85	32006
89	47077
<b>S = 1.191.889</b>	

As variações observadas nas áreas dos complexos solo-cobertura (**Tabela 3**) implicam em diferentes potenciais de geração do escoamento superficial para a bacia, uma vez que no MHCN o escoamento superficial está diretamente associado ao GHS e sua cobertura.

A validação do MHCN para ser utilizado na bacia do Rio Quilombo foi realizada com base em cinco eventos diferentes de chuvas (**Tabela 4**). Os escoamentos superficiais calculados pelo MHCN foram comparados com dados de vazão medidos em campo (**Tabela 4**).

Tabela 4: Dados calculados para validação do MHCN para uma região tropical do Estado de São Paulo.

Data	Chuva (mm)	Vazão observada (mm)	Vazão simulada (mm) solo 1/100.000
Junho/2000	35,5	4,04	2,01
Outubro/2000	56,5	12,63	6,64
Agosto/1997	87,0	19,25	19,14
Dezembro/2000	122,6	40,8	39,23
Setembro/2000	140,0	49,38	50,51

Conforme pode ser observado pela **Tabela 3**, o escoamento superficial simulado manteve-se muito próximo do escoamento superficial observado em campo, em todos os cinco eventos simulados. As duas primeiras vazões calculadas apresentadas na **Tabela 3** (meses de Junho e Outubro) foram as que mais se distanciaram da vazão observada, aproximadamente 50 %. Isto ocorreu pelo fato do MHCN apresentar pouca acurácia para pequenos volumes de chuva (SCS 1972).

A modelagem dinâmica do escoamento superficial para os sete intervalos de tempo da chuva medida no mês de agosto de 1997 pode ser observada pela **Figura 3**, onde é apresentado o volume acumulado do escoamento superficial gerado em cada intervalo de tempo. O recurso de animação, associado ao software PCRaster, permite a visualização de cada um dos passos ilustrados, de forma contínua na tela do computador.

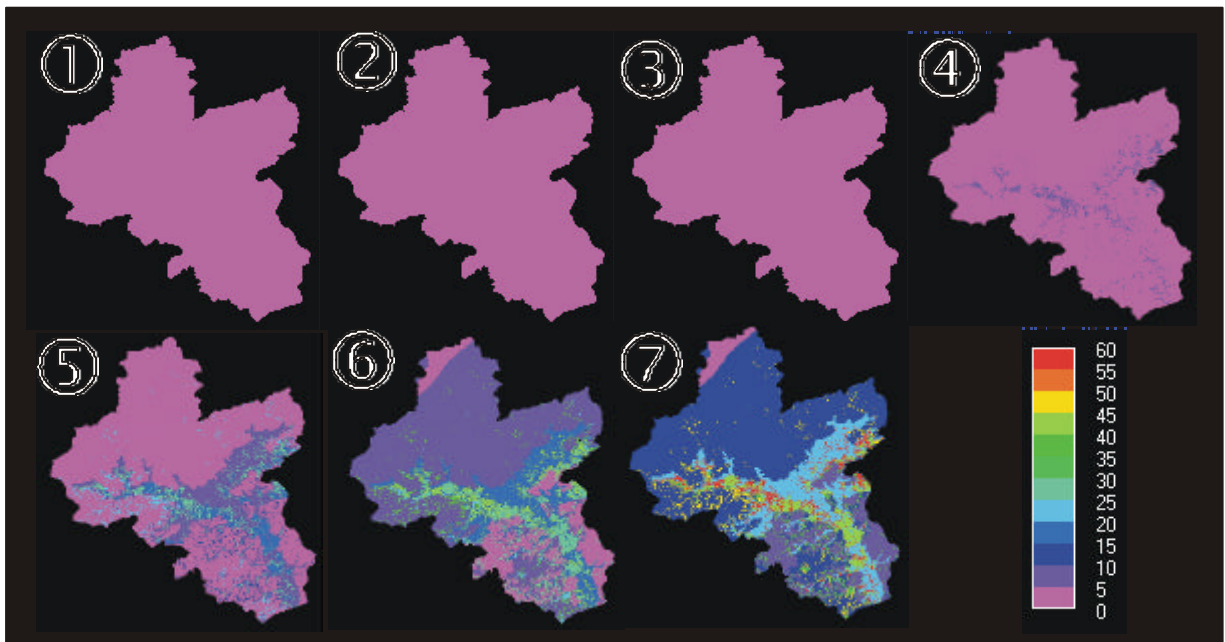


Figura 8: Simulação do escoamento superficial para sete intervalos de tempo (mm/ $\Delta t$ ):

①  $\Delta t_1$ , ②  $\Delta t_2$ , ③  $\Delta t_3$ , ④  $\Delta t_4$ , ⑤  $\Delta t_5$ , ⑥  $\Delta t_6$ , ⑦  $\Delta t_7$ .

## 7. Conclusões

Neste estudo, o volume do escoamento superficial simulado apresentou resultados muito similares com dados medidos no campo, comprovando assim a sensibilidade do MHCN para bacias hidrográficas em regiões tropicais.

O sistema desenvolvido com a LMA PCRaster baseado no MHCN apresentou vantagens quando comparado com pacotes comerciais de SIG. Isso pode ser atribuído aos seguintes fatores: (1) o software PCRaster pode ser adquirido pela internet, sem custos; (2) o MHCN necessita de um banco de dados reduzido, proporcionando diminuição de custos na sua implementação; (3) o sistema mostrou-se eficiente para ser utilizado no planejamento e gerenciamento de bacias hidrográficas de tamanho médio; (4) uma vez escrito o programa no ambiente do PCRaster, este pode ser utilizado indefinidamente; (5) mudanças em séries de chuvas podem ser realizadas facilmente pela substituição ou re-edição do arquivo ASCII, utilizado como dado de entrada na modelagem; e (6) mudanças no tipo de uso do solo podem ser prontamente atualizadas e re-editadas na tabela de procura contendo dados de CN.

A visualização espacial do escoamento superficial simulado na bacia permite a identificação de áreas mais susceptíveis a perdas de solos durante a ocorrência de chuvas. Esse fato possibilita, aos responsáveis pelo planejamento e gerenciamento da bacia, a concepção de prognósticos sobre o comportamento do escoamento superficial a partir de mudanças no uso do solo, tais como, substituição de florestas por pastagem, ampliação de área com culturas agrícolas, mudanças nas espécies agrícolas, entre outras, antes mesmo destas trocas serem perpetradas na bacia real. Além do mais, o sistema desenvolvido pode ser utilizado em outras bacias sem dados medidos em campo, proporcionando uma melhor utilização e conservação dos recursos naturais, principalmente nos países em desenvolvimento, nos quais os recursos aplicados à preservação ambiental, aos levantamentos de solos e de uso e a aquisição de dados pluviográficos e fluviográficos, são muito escassos.

O uso de dados do sensor ASTER para obtenção do mapa de uso do solo em bacias de médio a grande porte mostrou-se muito eficiente, principalmente pelo baixo custo de aquisição dos dados e rapidez na confecção de mapas de uso do solo. Além disso, esses dados, se adquiridos episodicamente, ao longo de anos, podem permitir o monitoramento da superfície do solo, permitindo um acompanhamento mais acurado nas mudanças ocorridas no seu uso e auxiliando na indicação e previsão de possíveis impactos ambientais.

## Referências

- Abrams, M., The Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer (ASTER): data products for the high spatial resolution imager on NASA's Terra platform. *International Journal of Remote Sensing*, 21, 847-859, 2000.
- Burrough, P. A.; McDonnell, R. A., *Principles of Geographical Information Systems*. Oxford University Press, England, 1998, 336p.
- Câmara, A. S., Ferreira, F., Castro, P., Spatial simulation modelling. In: Fischer, M., Scholten, H. J., Unwin, D. (eds), *Spatial Analytical Perspectives on GIS*. Taylor&Francis, 1996, 201-212.
- Christofolletti, A., *Modelagem de Sistemas Ambientais*. Editora Edgard Blücher, São Paulo, 1999, 236p.
- Coroza, O.; Evans, D.; Bishop, I.; 1997. Enhancing runoff modeling with GIS. *Landscape and Urban Planning*, 38:13-23, 1997.
- DAEE, *Dados Pluviográficos, Fluviográficos e Pluviométricos do Estado de São Paulo*. DAEE/FCTH, 1998, Arquivos técnicos.

- Engel, B. A.; Srinivasan, R.; Rewerts, C., A spatial decision support system for modeling and managing agricultural non-point-source pollution. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993, 231-237 p.
- Fedra, K., GIS and Environmental Modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993, 35-50 p.
- Goodchild, M. F., The state of GIS for environmental problem-solving. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993, 8-15 p.
- Goodchild, M. F., Steyaert, L. T., Parks, B. O., Johnson, C., Maidment, D., Crane, M., Glendinning, S. (Eds.), *GIS and environmental modeling: Progress and research issues*. Fort Collins, CO, GIS World Books, 1996.
- IBGE, Folha Topográfica Registro, Serra do Abodoral, São José e Taquaral na escala 1/50.000. São Paulo, Brasil, 1994.
- Johnson, D. L.; Miller, A. C., A spatially distributed hidrologic model utilizing raster data structure. *Computers & Geosciences*, vol. 23, 3:267-272, 1997.
- Karimi, H. A.; Houston, B. H., *Comput. Environ. and Urban Systems*, vol. 20, 6:413-425, 1997.
- Karssenber, D.; Burrough, P. A.; Sluiter, R.; de Jong, K., The PCRaster software and Course Materials for Teaching Numerical Modelling in the Environmental Sciences. *Transactions in GIS* 5(2):99-110, 2001.
- Langran, G., *Time in geographic information systems*. Taylor & Francis, London, 1992.
- Lombardi Neto, F.; Junior, R. B.; Lepsh, I. G.; Oliveira, J. B.; Bertolini, D.; Galeti, P. A.; Drugowich, M. I., Terracamento Agrícola. *Boletim téc.* 206, Secretaria de Agricultura e Abastecimento, CATI, Campinas, 1991, 39 p.
- Mack, M. J., HER-Hidrologic evaluation of runoff; the soil conservation service curve curve number technique as an interactive computer model. *Computer & Geosciences*, vol 21, 8:929-935, 1995.
- Millward, A. A., Mersey, J. E., Conservation strategies for effective land management of protected areas using an erosion prediction information system (EPIS). *Journal of Environmental Management*, 61:329-343, 2001.
- Mitasova, H., Hofierka, J., Zlocha, M., Iverson, L. R., Modelling topographic potential for erosion and deposition using GIS. *International Journal of Geographical Information Systems*, 10:629-642, 1996.
- Pullar, D.; Springer, D., Towards integrating GIS and catchment models. *Environmental Modelling & Software* 15:451-459, 2000.
- Rawls, W. J.; Ahuja, L. R.; Brakensiek, D. L.; Shirmohammadi, A., Infiltration and Soil Water Movement. In: *Handbook of Hydrology*, Maidment, D. R. (ed.), McGraw-Hill, New York, 1992, 5.1-5.51 p.
- Sakai, E.; Lepsh, I. F.; Amaral, A. Z., Levantamento Pedológico de Reconhecimento semidetalhado da Região de Ribeira do Iguape no Estado de São Paulo. SAA/IAC, São Paulo, 1983.
- SCS, Soil Conservation Service, *National Engineering Handbook*, USDA, 1972.
- Steyaert, L. T., A Perspective on the State of Environmental Simulation Modeling. In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T. (eds.), *Environmental Modeling with GIS*. Oxford University Press, New York, 1993.
- Sui, D. Z.; Moggio, R. C., Integrating GIS with hydrological modeling: practices, problems, and prospects. *Computers, Environment and Urban Systems*, 23:33-51, 1999.
- Thompson, S. A., *Hydrology for water management*. A.A. Balkema, 1 ed. Rotterdam, the Netherlands, 1999, 362 pp.
- Tucci, C. E. M., *Hidrologia ciência e aplicação*. Ed. da Universidade Federal do Rio Grande do Sul / Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2ed., Porto Alegre, 2000, 943p.
- Van Deursen, W.P.A., *Geographical Information Systems and Dynamic Models*. PhD thesis, Utrecht University, NGS Publication 190, 1995, 198 pp.
- Wesseling, C. G., Karssenber D., Van Deursen, W. P. A., Burrough, P. A., Integrating dynamic environmental models in GIS: The development of a Dynamic Modelling language. *Transactions in GIS* 1:40-48, 1996.