

Modelagem hidrológica utilizando lógica fuzzy, SIG e dados de sensoriamento remoto

Aurélio Azevedo Barreto-Neto¹
Carlos Roberto de Souza Filho²

¹ Centro Federal de Educação Tecnológica do Espírito Santo - CEFETES
Av. Vitória, 1729 - 29040-333 - Vitória - ES, Brasil
aurelio@cefetes.br

² Universidade de Campinas - UNICAMP
Caixa Postal 6152 – 13083-970 - Campinas - SP, Brasil
beto@unicamp.br

Abstract. This paper introduces a fuzzy rule-based model to estimate runoff in a tropical watershed using the Soil Conservation Service Curve Number model. The data used were collected within a tropical watershed covered by Atlantic forest and pasture and involved map compilation, ASTER multispectral data processing and fieldwork. The computer models were developed using the PCRaster Environmental Modelling Language. Fuzzy theory allowed the mathematical modelling in zones of imprecision and/or uncertainties as fuzzy theory considers the transition zones among geo-objects. The evaluation of runoff derived from fuzzy method demonstrated that the former provided calculated runoff closer to the measured runoff in the watershed, confirming the suitability of the fuzzy theory in modeling natural phenomena.

Palavras-chave: remote sensing, fuzzy logic, GIS, runoff, sensoriamento remoto, lógica fuzzy, SIG, escoamento superficial.

1. Introdução

Tradicionalmente, a representação de elementos da paisagem tais como solos, geologia, vegetação e uso da terra, são delimitados cartograficamente, em mapas bi-dimensionais, por polígonos, ou seja, esses elementos são representados como objetos exatos ou geo-objetos (Burrough, 1996).

Esta forma de representação, extremamente abrupta entre geo-objetos, deve ser considerada como uma aproximação e uma simplificação de um padrão de variação bem mais complexo. Embora as variações nas bordas sejam mais representativas que as variações no interior do polígono (Lagacherie et al., 1996), no mundo real, raramente estas bordas representam os fenômenos naturais. Em algumas situações, tais bordas são mais facilmente reconhecidas, uma vez que estão associadas à mudanças significativas e abruptas nos valores das propriedades observadas em pequenas distâncias. Estas variações podem ser extraídas a partir de observações na paisagem, tais como situações na qual as bordas estão localizadas nas margens de rios, em modificações da geologia (ex.: intrusões, falhas, fraturas) ou associadas com abruptas variações do relevo (Burrough, 1986). Além dessas situações de exceção, as bordas nos mapas estão associadas a dúvidas, inerentes ao objeto ou fenômeno identificado, e a incertezas, causadas por limitações de observações (Hadzilacos, 1996).

Zadeh (1965) desenvolveu a teoria dos conjuntos *fuzzy* permitindo assim a modelagem matemática em zonas de imprecisões e incertezas. A teoria dos conjuntos *fuzzy*, que é uma generalização da teoria clássica dos conjuntos, tem como característica a atribuição de uma função de pertinência a um conjunto de dados. A teoria dos conjuntos *fuzzy* é adequada quando é necessário descrever ambigüidades, incertezas e imprecisões em modelos matemáticos ou modelos conceituais de fenômenos empíricos (Kandel, 1986).

Estudos relacionados aos fenômenos naturais têm demonstrado que a utilização da lógica booleana aos geo-objetos é muitas vezes inadequada para um melhor entendimento das

interações ocorridas no meio ambiente (Burrough, 1986). O mapeamento de unidades de solo, de vegetação, declividade de terrenos e uso da terra, não apresentam, em todo o espaço geográfico, limites precisos e abruptos (Burrough, 1986). Entretanto, os mapeamentos de solo e geologia não apresentam nenhuma descrição indicadora da variação existente nas bordas dos geo-objetos da grande totalidade dos mapas publicados, indicando assim que essas bordas são extremamente abruptas, contradizendo com a realidade observada em campo (Lagacherie et al., 1996).

Dados de superfície tais como mapas de solos e de uso são extremamente importantes na modelagem de processos hidrológicos. O Modelo Hidrológico SCS (MHSCS) (SCS, 1972), desenvolvido pelo Serviço de Conservação do Solo dos Estados Unidos (*United States Soil Conservation Service* - SCS) tem como função a modelagem de escoamento superficial. O MHSCS leva em consideração o grupo hidrológico do solo, o tipo de cobertura do solo, a condição hidrológica e a umidade antecedente.

Apesar de ter sido concebido para pequenas bacias, o MHSCS pode ser facilmente aplicado em grandes áreas, com diversificada variedade espacial de solos e cobertura, se integrado a um sistema de informações geográficas (SIG) (Johnson e Miller, 1997; Thompson, 1999). Neste trabalho, foi realizada a modelagem do escoamento superficial em uma bacia de drenagem através da implementação da lógica fuzzy ao MHSCS, utilizando o Programa de Modelagem Ambiental (PMA) PCRaster (Wesseling et al., 1996).

2. Área de estudo

A área de estudo compreende a bacia hidrológica do Rio Quilombo, localizada no vale do Ribeira, porção sul do Estado de São Paulo, Brasil (**Figura 1**). Segundo Pilgrim e Cordery (1992), a bacia de 270 km² de extensão, é classificada como de tamanho médio. A cobertura vegetal da área é composta em sua maior parte por florestas e pastagens.

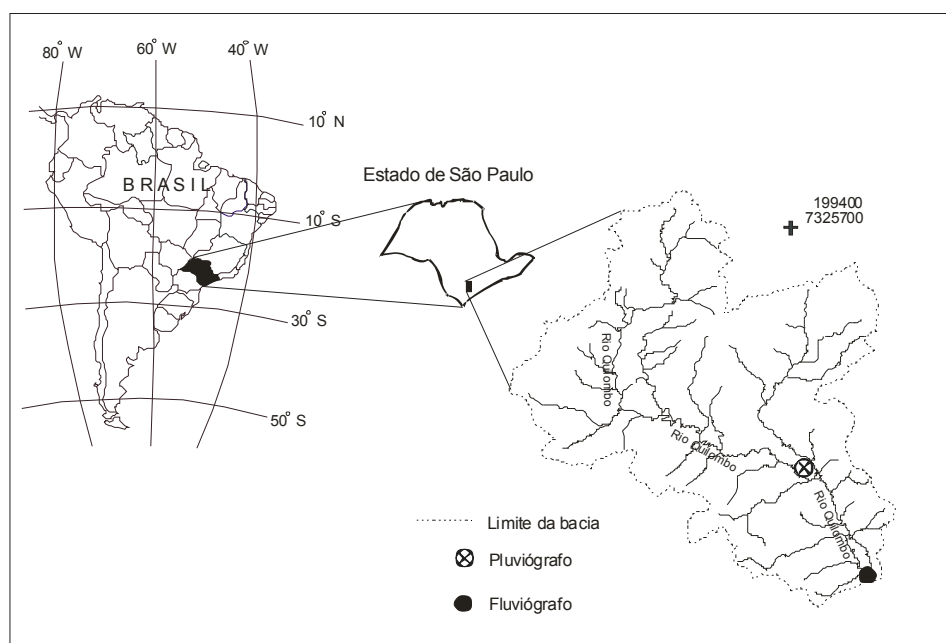


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo.

3. O modelo hidrológico utilizado

O MHSCS é um modelo empírico amplamente utilizado na estimação de escoamento superficial em bacias hidrográficas. Portanto, o modelo pode auxiliar nos trabalhos de planejamento e gerenciamento do meio ambiente que visam à conservação de solos, o controle de enchentes e a execução de obras hidráulicas (SCS, 1972; Engel et al., 1993; Mack, 1995; Johnson e Miller, 1997; Thompson, 1999; Pullar e Springer, 2000; Tucci, 2000).

Na aplicação do MHSCS, as características físicas da bacia, tais como o grupo hidrológico do solo (GHS), tipo de cobertura superficial, condição hidrológica, tipo de tratamento e condição de umidade antecedente, são de fundamental importância, uma vez que a combinação destas características determina a escolha do parâmetro curva número (CN), o qual estima o escoamento superficial gerado por uma chuva. O CN é um parâmetro adimensional que varia de 0 (sem geração de escoamento superficial) a 100 (toda a chuva é convertida em escoamento superficial). O CN foi estabelecido a partir de medidas de chuva e escoamento superficial em uma grande quantidade de bacias, com uma ampla variedade de tipos de solo.

O tipo de uso da terra representa a cobertura que está sobre a bacia, tais como florestas, pântanos, pastagens, solos descoberto, entre outras. O tipo de tratamento dado ao solo está relacionado a práticas mecanizadas (ex. plantação em contorno e em terraços) e de gerenciamento (controle de pastagens, rotação, redução e associação de culturas). A condição hidrológica refere-se a fatores que afetam a infiltração, incluindo densidade de vegetação, quantidade de pastagem, grau de rugosidade da superfície, entre outros, na qual o grau de avaliação é apresentado como pobre, bom, ruim, etc. A condição de umidade antecedente é um parâmetro relacionado à umidade do solo devido a chuva acumulada nos cinco dias que antecedem uma chuva selecionada.

No MHSCS os solos são classificados com base no GHS definidos pelo SCS. Esta classificação foi realizada a partir da análise das características do solo de permitir uma maior ou menor capacidade de infiltração de águas provenientes de precipitações. As descrições de cada GHS, segundo SCS (1972) e Rawls et al. (1992), estão contidas na **Tabela 1**.

Tabela 1: Definição das características do GHS.

GHS	Características
A	solos com alta capacidade de infiltração
B	média capacidade de infiltração
C	solos com baixa capacidade de infiltração
D	solos com muito baixa capacidade de infiltração

A associação do GHS (A, B, C ou D) a um determinado tipo de uso da terra é denominada complexo hidrológico solo/cobertura. A identificação deste complexo permite caracterizar o parâmetro CN em tabelas apresentadas por SCS (1972), Rawls et al. (1992), Pilgrim e Cordery (1992) e Tucci (1998). A equação final para cálculo do volume do escoamento superficial direto Q (mm) é:

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

Sendo P a precipitação (mm) e S é o máximo potencial de infiltração após início do escoamento superficial. O valor de S é determinado pela equação:

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

4. Teoria Fuzzy

Teoricamente, um conjunto *fuzzy* A , do conjunto universo X , onde os elementos x estão definidos, é representado pelo mapeamento de uma função de pertinência $\mu_A(x)$ na qual é atribuído a cada x um valor no intervalo de $[0,1]$ (Zadeh, 1965). Estes conjuntos são utilizados para descrever incertezas e imprecisões e podem ser aplicados em várias áreas do conhecimento.

Um conjunto *fuzzy* A é um conjunto de pares ordenados

$$A = \{x, \mu_A(x)\} \text{ para todo } x \in X, \quad (3)$$

A função de pertinência $\mu_A(x)$ define um valor entre 0 e 1 para cada ponto (x) no espaço de entrada, com x pertencendo ao conjunto universo X . Na prática a equação 3 é escrita da seguinte forma:

$$A = \{x_1, \mu_A(x_1) ; x_2, \mu_A(x_2) ; \dots ; x_n, \mu_A(x_n)\} \quad (4)$$

As operações básicas realizadas entre conjuntos *fuzzy* são uma generalização das operações utilizadas na teoria clássica dos conjuntos (conjuntos booleanos). Maiores detalhes de todas estas operações podem ser encontradas em Pedrycz e Gomide (1998), Kendel (1986) e Zimmermann (1985).

5. Materiais e métodos

A representação digital do uso da terra foi obtido pela aplicação do índice de vegetação *Leaf Pigment Index* (LPI) (Almeida e Souza Filho, 2004), adaptado para imagens do sensor ASTER - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (Abrams, 2000), com o objetivo de se obter uma representação da superfície contínua associado à cobertura vegetal da área em estudo (**Figura 2**). O índice de vegetação LPI é obtido pela equação:

$$LPI = (ASTER1)^2 / (ASTER2) \quad (6)$$

onde $ASTER1$ é a banda 1 (0.52-0.60 μm – visível verde) e $ASTER2$ é a banda 2 (0.63-0.69 μm – visível vermelho) do sensor ASTER. Outros índices de vegetação tais como, *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI) (Rouse et al., 1974) e *Moisture Stress Index* (MSI) (Rock et al., 1986) foram testados, sendo que o LPI foi o que melhor representou a cobertura vegetal da área em estudo, quando os resultados foram confrontados com observações realizadas em campo. A representação digital gerada com o LPI foi convertido para o formato ASCII, compatível com o PMA PCRaster.

A representação digital dos solos da bacia do Rio Quilombo foi extraída 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, argissolo, cambissolo e organossolo. O mapa de solos, originalmente em formato analógico, foi convertido para o formato digital, como dados vetoriais. Em seguida, esses dados foram transformados para o formato matricial com células de 15x15 metros (equivalente à resolução da representação digital do uso da terra). A representação digital matricial foi então convertida para o formato ASCII, compatível com o PMA PCRaster.

O modelo hidrológico SCS *fuzzy* (MHSCSF) foi desenvolvido computacionalmente utilizando o PMA PCRaster. A implementação do modelo computacional foi dividida em 3 etapas: (i) numa primeira, os dados de entrada, solo e cobertura vegetal, foram transformados em conjuntos *fuzzy* utilizando as funções de pertinência (função linear e seno). Nessa etapa, as bordas difusas na representação digital do solo e da cobertura foram geradas pela atribuição de valores, entre 0 e 1, aos dados de entrada com base nas funções de pertinência; (ii) em seguida, utilizando inferência fuzzy, a representação digital da distribuição espacial do parâmetro CN foi gerada com base na representação digital dos solos *fuzzy* e da representação digital da cobertura *fuzzy* (ambas desenvolvidas na etapa anterior); (iii) na terceira etapa, o escoamento superficial foi calculado utilizando a representação digital do parâmetro CN para quatro eventos de chuva distintos.

As funções de pertinência linear e seno (**Figura 3**) foram aplicadas ao mapa gerado pelo LPI (**Figura 2**) com o objetivo de determinar os limites da borda difusa entre os tipos de cobertura vegetal da área estudada. Os limites entre a floresta e as pastagens são marcados por uma vegetação tipo capoeira, bem como uma mata degradada com ocorrências de vegetação rasteira. A identificação destas bordas difusas no mapa de LPI permitiu a definição dos parâmetros (abscissa) das funções de pertinência utilizadas.

Este procedimento gerou quatro representações digitais *fuzzy* da cobertura floresta e pastagem, dois para a função de pertinência linear (crescente e decrescente) e dois para a função seno (crescente e decrescente).

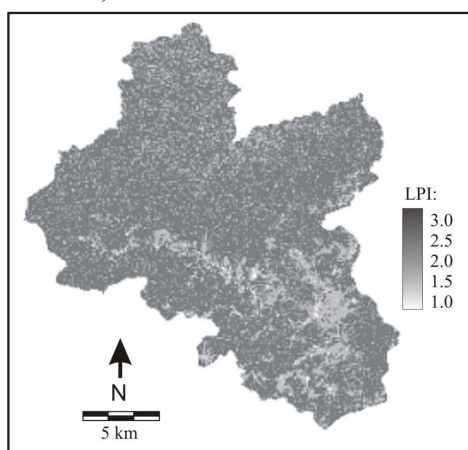


Figura 2: Mapa de distribuição espacial do LPI.

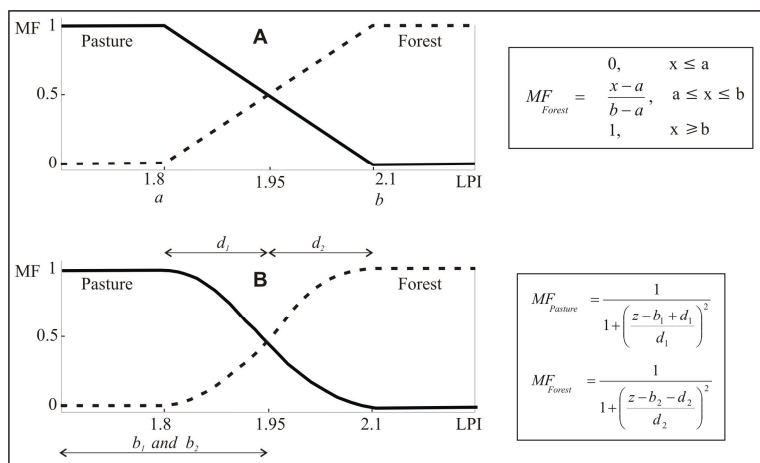


Figura 3: Funções de pertinência utilizadas na representação digital do LPI: (A) função de pertinência linear e (B) função de pertinência seno.

6. Resultados e discussões

Uma vez escrita a rotina computacional do MHSCSF, foram realizadas simulações utilizando dados de precipitação medidos em campo. Os parâmetros CN utilizados no modelo foram selecionados com base em trabalhos de calibração realizados pelos autores em etapas anteriores a esse trabalho.

A **Figura 4** apresenta a representação espaciais do parâmetro CN na bacia determinada pelo MHSCSF.

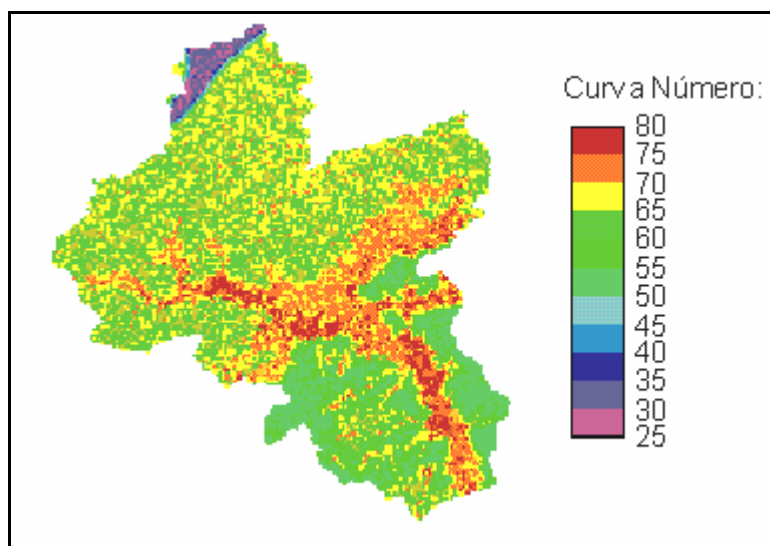


Figura 4: Representação digital da distribuição espacial do parâmetro CN utilizando o MHSCSF.

A **Tabela 2** apresenta os resultados encontrados na simulação do MHSCSF. Os valores obtidos para o escoamento superficial simulado pelo MSCSNF apresentaram resultados próximos aos medidos na bacia.

Tabela 2: Escoamento superficial simulado com o MHSCSF utilizando quatro eventos de chuva.

Evento	Precipitação (mm)	Escoamento superficial observado (mm)	Escoamento superficial por modelagem <i>Fuzzy</i> - MHSCSF (mm)	
			Pertinência LINEAR	Pertinência SIGMOIDE
Chuva 1	56,5	12,63	5,49	5,6
Chuva 2	87,0	19,0	18,40	18,55
Chuva 3	122,6	40,0	33,40	34,22
Chuva 4	140	56,0	57,61	58,1

7. Conclusões

O desenvolvimento de metodologias para a simulação do escoamento superficial gerado por uma chuva é essencial para avaliações dos recursos hídricos em uma bacia. Neste artigo, uma forma de melhor representar informações fisiográficas visando proporcionar uma avaliação mais acurada do escoamento superficial foi explorada.

O uso da teoria da lógica *fuzzy* foi mais adequada para modelagem do escoamento superficial, uma vez que a mesma possibilitou uma análise mais completa nas bordas entre geo-objetos, diferente da lógica booleana, que considera tais bordas como abruptas e bem definidas (0 ou 1).

A forma como o MHSCS foi desenvolvido não contempla a modelagem do escoamento superficial em zonas difusas. A incorporação de um sistema de inferência *fuzzy* ao MHSCS, que leva em consideração as zonas de transição entre unidades de mapas, permitiu uma interpretação dos dados de forma mais condizente com a realidade dos fenômenos naturais. As técnicas *fuzzy* reduzem as perdas de informações por sua capacidade de obtenção de graus de pertinência para cada classe de geo-objetos. Esta abordagem permitiu que o escoamento superficial simulado apresentasse resultados mais próximos dos valores medidos em campo do que os simulados pelo modelo booleano.

O MHSCSF poderá ser utilizado como uma nova ferramenta no auxílio da gestão de bacias hidrográficas, principalmente por ser um sistema que incorpora zonas de transição entre geo-objetos. Uma outra vantagem é o seu baixo custo de implantação, uma vez que o programa PCRaster pode ser adquirido, na internet, gratuitamente, e demanda computadores de pequeno porte.

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**, v. 21, 847-859, 2000.
- Almeida, T.I.R., de Souza Filho, C.R. Principal Component Analysis Applied to Feature-Oriented Band Ratios of Hyperspectral Data : A Tool for Vegetation Studies. **International Journal of Remote Sensing**, v. 25, n. 22, p. 5005-5024, 2004.
- Bardossy, A.; Duckstein, L. **Fuzzy Rule-Based Modeling with applications to Geophysical, Biological and Engineering Systems**. CRC Press, USA, 232 p., 1995.
- Burrough, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**. Oxford University Press, Oxford, 194 p., 1986.
- Burrough, P. A. **Natural Objects with Indeterminate Boundaries**. In: Geographic Objects with Indeterminate Boundaries, Burrough P. A. And Frank, A. U. (eds), 1996.
- 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, 231-237, 1993.
- Hadzilacos, T., 1996. On Layer-based Systems for Undetermined Boundaries. In: Geographic Objects with Indeterminate Boundaries, Burrough P. A. And Frank, A. U. (eds). Taylor & Francis.
- Johnson, D. L.; Miller, A C. A spatially distributed hidrologic model utilizing raster data structure. **Computers & Geosciences**, v. 23, n. 3, p. 267-272, 1997.
- Kandel, A., 1986. **Fuzzy Mathematical Techniques with Applications**. Addison-Wesley, Reading, MA.
- Kandel, A.; Pacheco, R.; Martins, A.; Khator, S., 1996. The Foundations of Rule-Based Computations in Fuzzy Models, In: **Fuzzy Modelling Paradigms and Practice**, Pedrycz, W. (ed.), Kluwer Academic Publishers, Netherlands. 231-263 p.

- Lagacherie, P., Andrieux, P., Bouzigues, R. Fuzziness and Uncertainty of Soil Boundaries: From Reality to Coding in GIS. In: **Geographic Objects with Indeterminate Boundaries**, Burrough P. A. And Frank, A. U. (eds). Taylor & Francis, 1996.
- Mack, M. J. HER-Hidrologic evaluation of runoff; the soil conservation service curve curve number technique as an interactive computer model. **Computer & Geosciences**, v. 21, n. 8, p. 929-935, 1995.
- Pedrycz, W. e Gomide, F. An Introduction to Fuzzy Sets: Analysis and Design. MIT Press, London, 465 p., 1998.
- Pilgrim, D. H., Cordery, I. Flood Runoff. In: **Handbook of Hydrology**, Maidment, D. R. (ed.), McGraw-Hill, New York, 9.1- 9.42 p., 1992.
- Pullar, D.; Springer, D. Tawards integrating GIS and catchment models. **Environmental Modelling & Software**, v. 15, p. 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, 5.1-5.51 p., 1992.
- Rock, B. N., Vogelmann, J. E., Williams, D. L., Voglemann, A. F., Hoshizaki, T. Remote Detection of Forest Damage, **BioScience**, v. 36: 439 p., 1986.
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceeding, Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, Greenbelt: NASA SP-351, 310-317, 1974.
- SCS - Soil Conservation Service. **National Engineering Handbook**, USDA, 1972.
- Thompson, S. A.. **Hydrology for water management**.A.A. Balkema, 1 ed. Rotterdam, the Netherlands, 362 pp., 1999.
- Tucci, C. E. M. **Modelos Hidrológicos**. Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 669p., 1998.
- 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, 943p., 2000.
- Wesseling, C. G., Karssenberg 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**, v. 1, p. 40-48, 1996.
- Zadeh, L. A. Fuzzy sets. **Information and Control**, v. 8, p. 338-353, 1965.
- Zimmermann, H. J. Fuzzy Set Teory and its applications. Kluwer-Nijhoff, Boston. 363p., 1985.