



## XIII SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS DO NORDESTE

### **Modelagem hidrológica para simulação do escoamento superficial em bacia hidrográfica do bioma caatinga através de parametrização da condutividade hidráulica saturada (Ksat)**

*Thayslan Renato Anchieta de Carvalho<sup>1</sup>; Antonio Álisson Fernandes Simplício<sup>2</sup>, Paulo Roberto de Souza Silveira<sup>3</sup>; José Carlos de Araújo<sup>4</sup> & Luiz Alberto Ribeiro Mendonça<sup>5</sup>*

**RESUMO** – A modelagem hidrológica é uma importante ferramenta no planejamento e gerenciamento de programas de recursos hídricos de bacias hidrográficas. O objetivo deste trabalho foi estimar o escoamento superficial através da parametrização da condutividade hidráulica do solo utilizando um modelo de base física baseada na infiltração de água. A área estudada foi a Bacia Experimental de Aiuaba (BEA) localizada na região semiárida do estado do Ceará, Brasil. Os resultados mostraram que a condutividade hidráulica apresentou um mínimo de 0,198 cm.h<sup>-1</sup> e máximo de 1,543 cm.h<sup>-1</sup> e um valor médio de 0,625 cm.h<sup>-1</sup> para os eventos estudados. A análise de sensibilidade mostrou que a condutividade hidráulica (Ksat) do solo é muito sensível à umidade residual do solo ( $\Delta\theta$ ).

**ABSTRACT**– The hydrologic modeling is an important tool in the planning and management of water resources in river basins programs. The objective of this study was to estimate the runoff through the parameterization of soil hydraulic conductivity using a physically based model based on water infiltration. The area studied was the Experimental Basin Aiuaba (BEA) located in the semiarid region of the state of Ceará, Brazil. The results showed that the hydraulic conductivity presented a minimum 0,198 cm.h<sup>-1</sup> and a maximum of 1,543 cm.h<sup>-1</sup> and a mean value of 0.625 cm.h<sup>-1</sup> for the events studied. The sensitivity analysis showed that the hydraulic conductivity (Ks) soil is very sensitive to residual soil moisture ( $\Delta\theta$ ).

**Palavras-Chave** – Bacia Experimental de Aiuaba; Condutividade hidráulica.

1) Doutorando em Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará – UFC- Rua Humberto Monte, SN, Centro de Ciências Agrárias - CCA/UFC, Bloco 804, - Pici, Fortaleza - CE, CEP: 60455-760, Fone: (85) 3366-9756, t\_sren@hotmail.com.

2) Professor do Instituto Federal de Ciência e Tecnologia do Maranhão (IFMA) e Doutorando em Engenharia Agrícola pela Universidade Federal do Ceará, UFC - Estrada Piraque, Codó - MA, CEP: 65400-000, Fone: (99) 3669-3000, antonio.simplicio@ifma.edu.br.

3) Mestrando em Engenharia Agrícola – Universidade Federal do Ceará – UFC, - Rua Humberto Monte, SN, Centro de Ciências Agrárias - CCA/UFC, Bloco 804, - Pici, Fortaleza - CE, CEP: 60455-760, Fone: (85) 3366-9756, t\_sren@hotmail.com.

4) Professor Doutor do Departamento de Eng. Agrícola, Universidade Federal do Ceará – UFC- Rua Humberto Monte, SN, Centro de Ciências Agrárias - CCA/UFC, Bloco 804, - Pici, Fortaleza - CE, CEP: 60455-760, Fone: (85) 3366-9756, jcaraujo@ufc.br.

5) Professor da Universidade Federal do Cariri (UFCA), Avenida Tenente Raimundo Rocha S/N - Bairro Cidade Universitária, Juazeiro do Norte – CE. CEP: 63048-080, Fone: (88) 3572-7200. larm@ufc.br.

## **INTRODUÇÃO**

A hidrologia no contexto de bacias hidrográficas busca conceituar e modelar diferentes processos que interagem sob condições ambientais variáveis no espaço e no tempo (Schuler, 2003); assim, a simulação hidrológica é de substancial significância para a previsão de respostas hidrológicas dessas unidades ambientais a determinado evento de precipitação (Tucci & Collischonn, 2003; Collischonn, 2001).

A modelagem hidrológica é uma técnica que possibilita o melhor entendimento e representação do comportamento hidrológico de bacias hidrográficas, sendo que os modelos hidrológicos possuem grande potencial para caracterizar a disponibilidade hídrica em condições de mudanças no clima ou no uso do solo (ZANETTI, 2007)

O escoamento superficial é o seguimento do ciclo hidrológico que estuda o deslocamento das águas na superfície da Terra, considerado um dos mais importantes para o manejo da bacia hidrográfica. A simulação hidrológica do escoamento superficial em bacias é extremamente complexa assim, para utilização de modelos aplicados à sua simulação, estes devem apresentar algumas características desejáveis (Mello et al., 2008), como serem baseados no processo físico, no evento e na distribuição espacial das variáveis associadas ao fenômeno.

Os modelos físicos utilizam as principais equações diferenciais do sistema físico, para representar os processos e os seus parâmetros são aqueles que mais se aproximam da realidade. Dessa forma, as mudanças das características das bacias podem alterar os valores dos parâmetros, os quais podem ser avaliados através de medidas de campo a de modelagem que se baseia nos processos físicos, bacias hidrográficas apresentam um sistema complexo de variáveis e parâmetros mensuráveis. Dessa forma a modelagem baseada em processos físicos, possibilita a aplicação de modelos para áreas hidrologicamente homogêneas. Os modelos hidrológicos são ferramentas úteis para tomada de decisão e gestão do recursos hídrico.

O objetivo deste trabalho foi elaborar uma modelagem de caráter física para estimar o escoamento superficial parametrizando a condutividade hidráulica do solo em uma bacia experimental do semiárido.

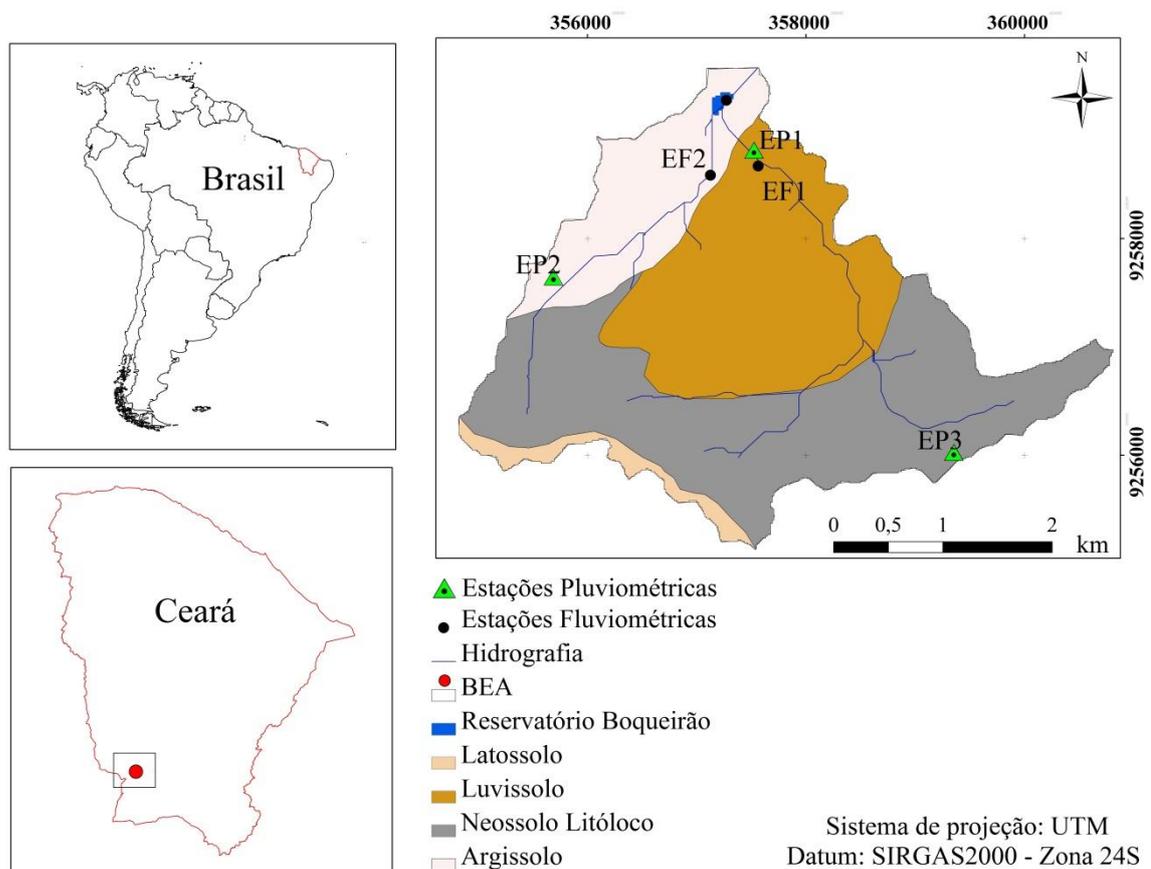
## **MATERIAIS E MÉTODOS**

### **Caracterização e localização da bacia hidrográfica em estudo**

O estudo foi realizado na Bacia Experimental de Aiuaba – BEA (Figura 1), com área total de 12 km<sup>2</sup>, controlada por um reservatório em seu exutório, com capacidade para armazenar 0,06 hm<sup>3</sup>,

localizada no município de Aiuaba, Estado do Ceará, Brasil, coordenadas 6°42' S e 40°17' W. O clima é BSh de acordo com a classificação de Köppen, apresentando precipitação média de 560 mm.ano<sup>-1</sup>, evaporação do tanque classe A de 2500 mm.ano<sup>-1</sup>. O período chuvoso está compreendido entre os meses de janeiro e maio e a temperatura média anual é de aproximadamente 25 °C.

É coberta com floresta seca, Caatinga arbustiva arbórea, completamente preservada, sendo monitorada pela Estação Ecológica de Aiuaba, do IBAMA, no sudoeste cearense. A principal unidade geológica é o Cristalino Pré-cambriano e Proterozóico, sendo os solos assentados sobre tal unidade normalmente rasos, argilosos e com conteúdo significativo de fragmentos de rochas (referencia). A BEA, criada em 2002 no âmbito do projeto IBESA, com apoio da FINEP/CT-Hidro, monitora dados do ciclo hidrológico desde janeiro de 2003.



**Figura 1:** Localização da Bacia Experimental de Aiuaba

## Modelo para estimativa da infiltração e do escoamento superficial

Inicialmente, considerou-se que o início do escoamento se dá quando a intensidade da precipitação é superior à taxa de infiltração de água no solo.

O modelo de infiltração permite uma redistribuição de água no solo, incluindo a recuperação da capacidade de infiltração durante os intervalos entre as chuvas, determinando as taxas de

infiltração durante e após esse intervalo sem chuva. A taxa de infiltração “f” é função da lâmina acumulada de infiltração “Ft” e de alguns parâmetros que descrevem as propriedades de infiltração no solo: condutividade hidráulica saturada efetiva “Ksat” (cm.h<sup>-1</sup>), valor efetivo do potencial matricial (cm) e índice de umidade residual do solo.

Para se estimar a infiltração de água no solo, foi utilizado o modelo proposto por Green - Ampt (1911) modificado por Mein e Larson (1973). A aplicação do modelo de Green e Ampt para cálculo da infiltração (f ou F) requer a estimativa prévia da condutividade hidráulica, K, do potencial matricial na frente de encharcamento,  $\psi$ , da porosidade do solo, h, e do teor inicial de umidade do solo,  $\Delta\theta$ . O modelo é derivado da equação de Darcy, considerando simplificações no processo de propagação da frente de umedecimento no interior do solo. Esse modelo assume que, no início da infiltração, existe uma lâmina de água na superfície, situação tal que ocorre somente após o início do empoçamento de água. O cálculo da taxa de infiltração  $f_t$  (cm.h<sup>-1</sup>) é feito pela seguinte equação (1):

$$f_t = K \left( \frac{\psi \Delta\theta}{F_t} + 1 \right) \quad (1)$$

em que  $f_t$  é taxa de infiltração (cm.h<sup>-1</sup>); K a condutividade hidráulica do solo saturado (cm.h<sup>-1</sup>);  $\psi$  o potencial matricial na frente de umedecimento (cm);  $\Delta\theta$  a umidade residual do solo (cm<sup>3</sup>.cm<sup>-3</sup>); e  $F_t$  a lâmina infiltrada (cm).

Mein e Larson (1973) modificaram a equação de Green-Ampt (1911) e obtiveram um novo modelo com o qual se calcula a lâmina infiltrada antes e depois do empoçamento. O modelo representa os dois estágios da infiltração que ocorrem quando a intensidade de precipitação é menor ou maior do que a capacidade de infiltração. Esse modelo ficou conhecido como Green-Ampt modificado por Mein-Larson.

$$F(t + \Delta t) - F_t - \psi \Delta\theta \theta \ln \left( \frac{F(t+\Delta t) + \psi \Delta\theta}{F_t + \psi \Delta\theta} \right) = K \Delta t \quad (2)$$

Após calculada a taxa de infiltração, verificou-se se havia ou não empoçamento; se sim, a lâmina escoada foi estimada através da diferença entre o total precipitado e o infiltrado num determinado tempo.

Neste trabalho, foram utilizados dados medidos de precipitação, duração da precipitação, potencial matricial e umidade residual do solo em campo de 16 eventos de chuva-deflúvio num período compreendido entre 2003 e 2006. Foi ajustado um K para cada evento que obtivesse o menor erro entre o escoamento observado e o medido.

## RESULTADOS E DISCUSSÕES

Na tabela 1 encontra-se os valores de precipitação, lâminas escoadas medidas e calculadas pelo modelo e respectiva condutividade hidráulica para cada evento. Pôde-se constatar que o Ksat apresentou uma média de 0,625 cm.h<sup>-1</sup>. O evento que apresentou maior valor de condutividade hidráulica foi 09/04/2006 com 1,543 cm.h<sup>-1</sup> e o menor valor foi no evento 20/01/2004 com 0,198 cm.h<sup>-1</sup>. Segundo Millar (1988), valores entre 0,1 a 0,5 cm.h<sup>-1</sup> é considerada lenta e valores entre 0,5 e 2,0 cm.h<sup>-1</sup>, moderada. Nogueira et. al (2006) verificou valores médios entre 57,6 a 14,4 cm.h<sup>-1</sup> de condutividade hidráulica em 5 pontos ao redor da zona portuária do Pecém, CE. Oliveira Júnior et. al (2014) verificou valores médios de 45 cm.h<sup>-1</sup> para condutividade hidráulica da caatinga sobre Neossolo Regolítico. Medeiros et al. (2007) verificou valores médios de 5,15 cm.h<sup>-1</sup> em uma bacia experimental do semiárido Potiguar. Quanto ao erro entre a lâmina medida e estimada pelo modelo verificou-se que o modelo erra mais a medida que aumenta a lamina escoada.

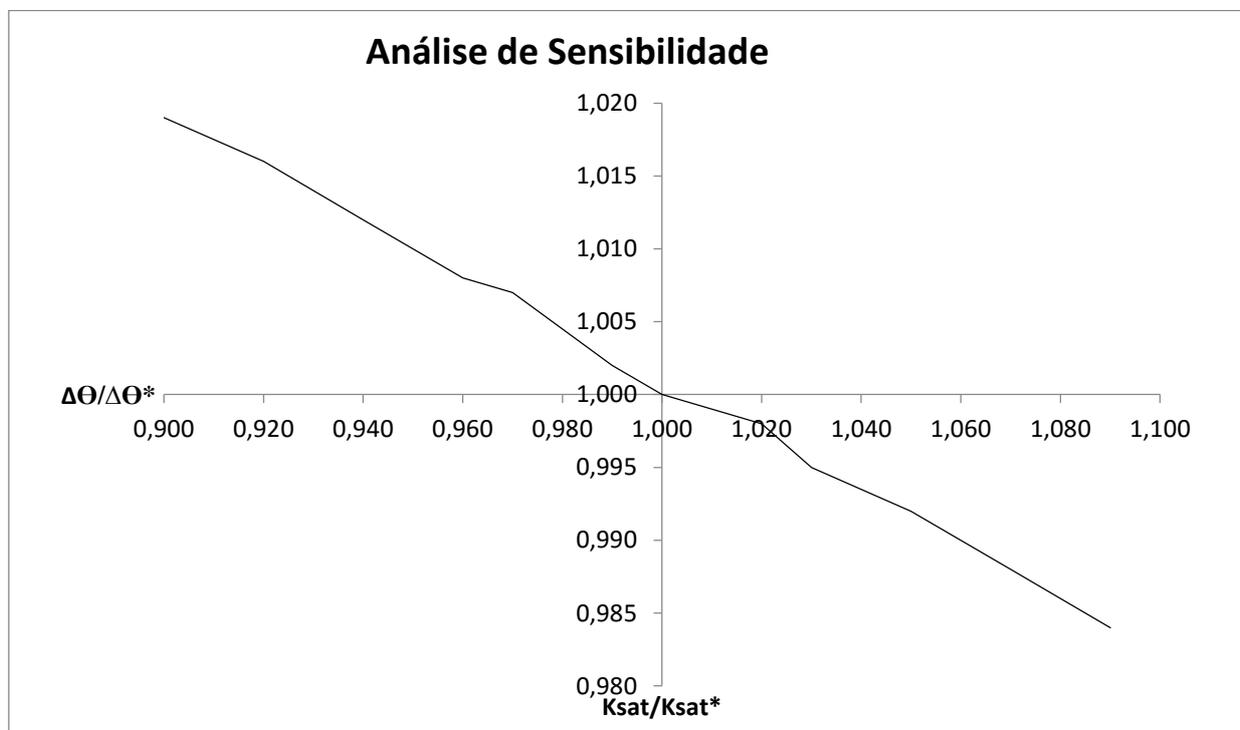
**Tabela 1:** Valores de precipitação (P), lâmina escoada medida (He med), lâmina escoada calculada pelo modelo (He calc), condutividade hidráulica saturada (Ksat) 16 eventos estudados.

Evento	P (mm)	He med (cm)	He calc (cm)	Ksat (cm.h <sup>-1</sup> )	Erro absoluto
12/02/2003	32,100	0,001	0,000	1,016	0,001
20/03/2003	25,900	0,047	0,054	0,680	0,007
20/03/2003	33,000	0,007	0,009	0,479	0,002
16/01/2004	67,000	0,012	0,012	0,458	0,000
18/01/2004	25,100	0,004	0,000	0,312	0,004
20/01/2004	57,300	0,019	0,019	0,605	0,000
21/01/2004	23,300	0,003	0,000	0,198	0,003
23/01/2004	25,100	0,029	0,030	0,430	0,001
25/01/2004	51,100	2,933	2,392	0,521	0,541
09/04/2006	16,600	0,014	0,074	0,519	0,060
09/04/2006	29,700	0,251	0,190	1,543	0,061
01/05/2006	57,900	0,302	0,244	0,714	0,058
23/06/2006	35,400	0,036	0,106	0,695	0,070
01/01/2007	54,700	0,233	0,222	0,705	0,011

14/02/2007	36,100	0,064	0,107	0,351	0,043
23/03/2007	25,800	0,047	0,088	0,700	0,041

Para avaliar a influência da condutividade hidráulica em relação à umidade residual do solo, realizou-se uma análise de sensibilidade mudando-se o valor da variável e avaliando-se o impacto sobre a umidade residual do solo, conforme realizado Medeiros e Araújo (2005) (Figura 2).

Observa-se que quando o Ksat variou até 0,998 a umidade residual mostrou-se pouco sensível, já entre 0,998 e 0,995 a umidade apresentou maior sensibilidade ao Ksat e a partir de 0,995 a sensibilidade aumentou de forma constante. Quando aumentou o Ksat a menor sensibilidade da umidade residual do solo foi quando o Ksat variou de 1,007 a 1,008.



**Figura 2:** Análise de sensibilidade da condutividade hidráulica em relação à umidade residual do solo.

## CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Pode-se concluir que a modelagem da condutividade hidráulica para estimar escoamento superficial mostrou-se adequada, apresentando melhores resultados para pequenas lâminas escoadas. Os resultados mostram que a modelagem da condutividade hidráulica é um importante parâmetro na modelagem hidrológica poisas pequenas alterações provocaram grandes variações na umidades residual do solo, por exemplo.

## BIBLIOGRAFIA

- ARABI, M.; GOVINDARAJU, R. S.; HANTUSH, M. M. *A probabilistic approach for analysis of uncertainty in the evaluation of watershed management practices*. Journal of Hydrology, v.333, p.459-471, 2006.
- Collischonn, W. *Simulação hidrológica em grandes bacias*. Porto Alegre: UFRGS, 2001. 194p. Tese Doutorado
- LIBARDI, P. L. *Dinâmica da água no solo*. 2. ed. Piracicaba, 2000. 509 p.
- LUCAS, E. W. M.; SOUZA, F. A. S.; SILVA, F. D. S.; LUCIO, P. S. *Modelagem hidrológica determinística e estocástica aplicada à região hidrográfica do Xingu-Pará*. Revista Brasileira de Meteorologia, v.24, n.3, p.308-322, 2009.
- MEDEIROS, P.H.A.; ARAÚJO, J.C. *Modelagem da interceptação no semi-árido brasileiro: aplicação do modelo de Gash na Bacia Experimental de Aiuaba – CE*. XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, PB, 2005.
- MESQUITA, M. G. B. F.; MORAES, S. O. *A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo*. Ciência Rural, v. 34, n. 3, p. 963-969, maio/jun. 2004.
- MILLAR, A. *Drenagem de terras agrícolas: base agronômicas*. São Paulo: Editerra Editorial, 1988.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; VAN LIEW, M.W.; BINGNER, R. L.; HARMEL, R. D.; VEITH, T. L. *Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations*. Transactions of the ASABE, v.50, n.3, p. 885-900, 2007.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. *River flow forecasting through conceptual models Part I - A discussion of principles*. Journal of Hydrology, v.10, p.282-290, 1970.
- SANTOS, L. L. *Modelos hidráulicos-hidrológicos: Conceitos e Aplicações*. Revista Brasileira de Geografia Física, v.2, n.03, p.01-19, 2009.
- Schuler, A. E. *Fluxos hidrológicos em micro bacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará*. Piracicaba: CENA, 2003. 120p. Tese Doutorado
- SUAREZ, G. A. *Abstração inicial de uma bacia hidrográfica de floresta natural na região de Viçosa, MG*. Dissertação de Mestrado. UFV. 54p. 1995.
- TASSI, R.; ALLASIA, D. G.; MELLER, A.; MIRANDA, T. C.; HOLZ, J.; SILVEIRA, A. L. L. *Determinação do parâmetro CN para sub-bacias urbanas do arroio dilúvio - Porto Alegre/RS*. I Simpósio de Recursos Hídricos do Sul-Sudeste. Curitiba-PR, 27 a 29 de Agosto de 2006.
- TUCCI, C. E. M. *Hidrologia: Ciência e aplicação*. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2001. 943p.
- TUCCI, C. E. M.; Collischonn, W. *Previsão de vazão*. In: Tucci, C. E. M.; Braga, B. (org.). *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, 2003. p.281-348.

TUCCI, C. E. M. (1998). *Modelos hidrológicos*, Ed. Universidade /UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, 668p.

VISSMAN, W.; LEWIS, G. L. *Introduction to hydrology*.5.ed. New Jersey: Upper Saddle River. 2003. 612p.

ZANETTI, S. S. *Modelagem hidrológica em micro bacia hidrográfica da bacia do rio Paraíba do Sul*. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) – Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro. Campos dos Goytacazes, RJ, 2007.