

MODELAGEM HIDROLÓGICA COM O TOPOG_SBM NA BACIA DO RIO SACI (SC) CONSIDERANDO A DINÂMICA ESPACIAL E TEMPORAL DAS ÁREAS SATURADAS

Hydrological modeling using Topog_SBM in Saci Watershed (SC) considering spatial and temporal dynamics of saturated areas

Fernando Helmuth Syring Marangon
Mestrando em Geografia, Universidade Federal do Paraná
marangon@ufpr.br

Irani dos Santos
Professor Doutor, Departamento de Geografia da Universidade Federal do Paraná
irani@ufpr.br

RESUMO

Na hidrologia é comum a utilização de modelos matemáticos como ferramentas para a compreensão das diferentes maneiras com as quais se espera que as bacias hidrográficas produzam escoamento. O objetivo deste trabalho é aplicar o modelo TOPOG_SBM para a bacia experimental do rio Saci e avaliar se os pressupostos sobre os quais o modelo foi concebido são capazes de representar adequadamente a sua dinâmica hidrológica no tempo e no espaço. Caracterizada por uso florestal, a bacia do rio Saci possui área de 10,2 ha e está localizada no município de Rio Negrinho, SC. O TOPOG_SBM é um modelo distribuído de base física que considera a variação espacial de características como relevo e solo. Foram simulados 20 eventos de precipitação ocorridos na bacia e os resultados mostraram tendências diferentes em função do grau de umidade antecedente dos eventos. Nos eventos com menor grau de umidade antecedente o modelo apresentou boa capacidade de representação dos processos hidrológicos presentes na bacia, com hidrogramas compatíveis aos observados e dinâmica das áreas saturadas em concordância com observações de campo e literatura. Porém, em eventos mais úmidos verificou-se que as simulações não foram capazes de reproduzir adequadamente as condições observadas na bacia, com hidrogramas simulados em desacordo com os dados observados e áreas saturadas superestimadas em virtude da baixa capacidade de escoamento no solo simulada. Conclui-se que o modelo TOPOG_SBM é adequado para a simulação de processos hidrológicos nesta bacia de clima úmido e uso florestal, porém com necessidade de implementação da simulação do escoamento subsuperficial por caminhos preferenciais de escoamento que aumentem a capacidade de drenagem do solo em eventos com elevada umidade antecedente.

Palavras chave: Modelagem hidrológica, TOPOG_SBM, áreas saturadas

ABSTRACT

Hydrological models are widely used in hydrology as tools to understand how catchments can generate runoff by different flow paths. This paper aims to simulate precipitation-runoff processes with TOPOG_SBM in the Saci river experimental watershed and assess whether the assumptions on which the model was designed are able to adequately represent its hydrological dynamics in time and space. The Saci river watershed has 10.2 ha area and forest land use. It is located in Rio Negrinho municipality, Santa Catarina, Southern Brazil. TOPOG_SBM is a physically based hydrological model which considers spatial variations of topography and soils. Twenty precipitation events were simulated and its results appeared according to the events antecedent moisture content. In the events of less antecedent moisture, the model showed good capability in reproduce the watershed's hydrological processes presenting hydrographs similarly to observed data and dynamics of saturated areas in agreement with field observations and literature. Nevertheless, in events with higher antecedent moisture condition the model was unable to represent the observed processes of watershed. In this case, the hydrographs showed dissemblance to observed data and saturated areas were overestimated due to low simulated soils' transmissivity. We concluded that TOPOG_SBM model is suitable to simulate the hydrological processes in this humid and forestry watershed. However the model performance for its conditions could be enhanced by adding a preferential subsurface flow pathway.

Keywords: Hydrological modeling, TOPOG_SBM, saturated areas

1 INTRODUÇÃO

Na hidrologia há grande interesse pelas diferentes respostas apresentadas pelas bacias hidrográficas em função da precipitação. Conseqüentemente se procura compreender melhor os caminhos pelos quais a água precipitada chega aos rios ou retorna para a atmosfera pela evapotranspiração (CHOW *et al.*, 1988).

A necessidade de modelar vem do fato de ainda não ser possível medir todas as variáveis do ciclo hidrológico em escalas temporais e espaciais adequadas para representar a totalidade do sistema da bacia hidrográfica. Dessa maneira, utilizam-se modelos para extrapolar as medições e avaliar o comportamento de determinadas variáveis em escalas de espaço e tempo mais amplas (BEVEN, 2001).

No caso de bacias florestais bem monitoradas, com solos altamente permeáveis e presença de caminhos preferenciais de escoamento, há indícios de que os modelos mais simplificados ou até mesmo modelos semidistribuídos não

são capazes de representar a complexidade e o grande número de processos hidrológicos presentes (BEVEN, 2002; MARANGON *et al.*, 2009; SANTOS, 2009; VERTESSY e ELSENBEER, 1999).

Santos (2009) simulou eventos hidrológicos na bacia do rio Saci com o modelo TOPMODEL (BEVEN e KIRKBY, 1979) e concluiu que a presença de caminhos preferenciais de escoamento faz com que esta bacia responda de forma não linear aos eventos de precipitação superiores a 25 mm, concluindo que as premissas do modelo não seriam adequadas a esta realidade física.

Assim, verifica-se que para o caso de bacias cujo processo chuva-vazão não é linear, como a do rio Saci, para uma melhor compreensão dos processos hidrológicos internos é necessário que se desenvolva uma atividade de modelagem mais complexa, na qual seja possível a avaliação distribuída das variáveis simuladas.

Desta maneira, o objetivo deste trabalho constitui-se em aplicar o modelo TOPOG_SBM (*Topography Model – Soil Bucket Mode*), proposto por Vertessy e Elsenbeer (1999), para a bacia experimental do rio Saci e avaliar se o pressuposto de modelo tanque reduzido sobre o qual o modelo foi concebido é capaz de representar adequadamente a dinâmica hidrológica no tempo e no espaço da bacia.

Como forma de avaliar o desempenho da atividade de modelagem com o TOPOG_SBM, é realizada a comparação objetiva entre os hidrogramas simulados e observados em 20 eventos de precipitação. Ademais se avalia a eficiência da modelagem de maneira distribuída por meio da espacialização das áreas saturadas ao longo das simulações.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

2.1 Área de estudo

A bacia hidrográfica do rio Saci (10,2 ha), inserida na Bacia do Alto Rio Negro, está localizada na porção leste da divisa entre os estados do Paraná e Santa Catarina, na região natural denominado Planalto de Canoinhas, no estado de Santa Catarina (Figura 1).

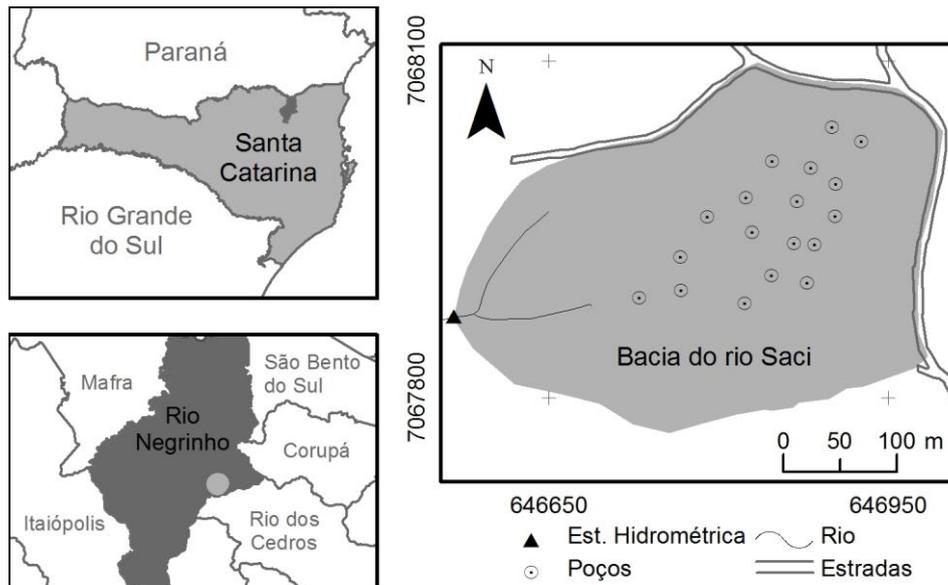


Figura 1 - Localização da área de estudo

O clima da região, de acordo com EPAGRI/CIRAM (2006), é predominantemente do tipo Cfb, conforme classificação de Köppen. A temperatura média anual varia de 15,5°C a 17,0°C, e a precipitação pluviométrica total anual pode variar de 1.360 a 1.670 mm, com o total anual de dias de chuva entre 138 e 164 dias. A umidade média relativa do ar varia de 80 a 86%.

A área da bacia do rio Saci é totalmente coberta com floresta, sendo aproximadamente 85% da sua área, principalmente as vertentes, composta por reflorestamento de *Pinus taeda* com idade de 30 anos. E, por mata nativa nos vales, ao longo da drenagem, ocupando uma área de 15% da área de drenagem.

A configuração de monitoramento hidrológico da bacia do rio Saci conta com 20 poços perfurados até a camada rochosa, sendo dois destes poços monitorados de maneira automatizada com leituras de nível freático raso em intervalos de tempo de 10 minutos. Além disso, monitora-se automaticamente, com o mesmo intervalo de tempo, a precipitação interna, o escoamento de tronco, tensão de água no solo, vazão e turbidez no exutório da bacia, local onde se encontra a estação hidrométrica indicada na Figura 1 (SANTOS *et al.*, 2008).

2.2 TOPOG_SBM

O modelo TOPOG_SBM é um modelo de base física e totalmente distribuído (BEVEN, 2001). Tendo sua arquitetura derivada da proposta pioneira de modelos de base física elaborada por Freeze e Harlan (1969).

É oriundo dos conceitos base do modelo semidistribuído e parcialmente dinâmico, TOPMODEL, proposto por Beven e Kirkby (1979) e Beven (1997), e da explicitação espacial do modelo TOPOG_DYNAMIC, proposto por Dawes *et al.*, (1997) e Vertessy *et al.* (1996).

O TOPOG_SBM utiliza uma estrutura simplificada de tanque reduzido, semelhante ao TOPMODEL, para o cálculo da dinâmica da água no solo e geração de escoamento. Assim como na proposta de Beven e Kirkby (1979), assume-se que condutividade hidráulica saturada (K_s) decai uniformemente na profundidade do solo. Este decaimento é controlado pela espessura da camada saturada e pelo parâmetro m , apresentado na Tabela 1. Quando há presença de camada saturada no solo, o escoamento subsuperficial é calculado em uma dimensão utilizando a lei de Darcy.

O modelo foi desenvolvido por (VERTESSY; ELSENBEER, 1999) com o objetivo de empregar o mínimo possível de parâmetros (seis neste caso), porém mantendo uma base física e uma representação espacial explícita. Estando assim de acordo com Beven (1989), que indica que o número de parâmetros de um modelo não deve ser muito superior a cinco.

Sua estrutura consiste em: (I) uma malha de elementos para propagar os escoamentos de superfície e subsuperfície, formada pelas linhas de contorno e drenagem; (II) um modelo “tanque” simples para o trato do escoamento de água no solo em cada elemento; (III) propagação por onda cinemática do escoamento subsuperficial para simular o movimento da água do solo ao longo das linhas de drenagem; e (IV) propagação por onda cinemática do escoamento superficial para simular o escoamento sobre a superfície ao longo das linhas de drenagem.

O modelo é capaz de calcular para cada intervalo de tempo (definido pelo usuário) e para cada elemento o nível do lençol freático, a umidade armazenada no solo, escoamento subsuperficial, e altura, velocidade e descarga do escoamento superficial.

A malha de elementos elaborada pelo TOPOG_SBM para a bacia do rio Saci (Figura 2) conta com 2030 elementos com área média de 52,45 m² e declividade média dos elementos de 0,17 m/m.

A espessura do solo hidrológico, composta de solo mais material intemperizado, cuja profundidade vai da superfície até a rocha, medida nos poços apresentou forte correlação com alguns atributos hidrogeomorfológicos das vertentes. Com base nestas relações, Santos (2009) elaborou um modelo para geração do mapa de espessura do solo da bacia, optando-se pela adoção do índice topográfico associado com o comprimento da vertente a montante.

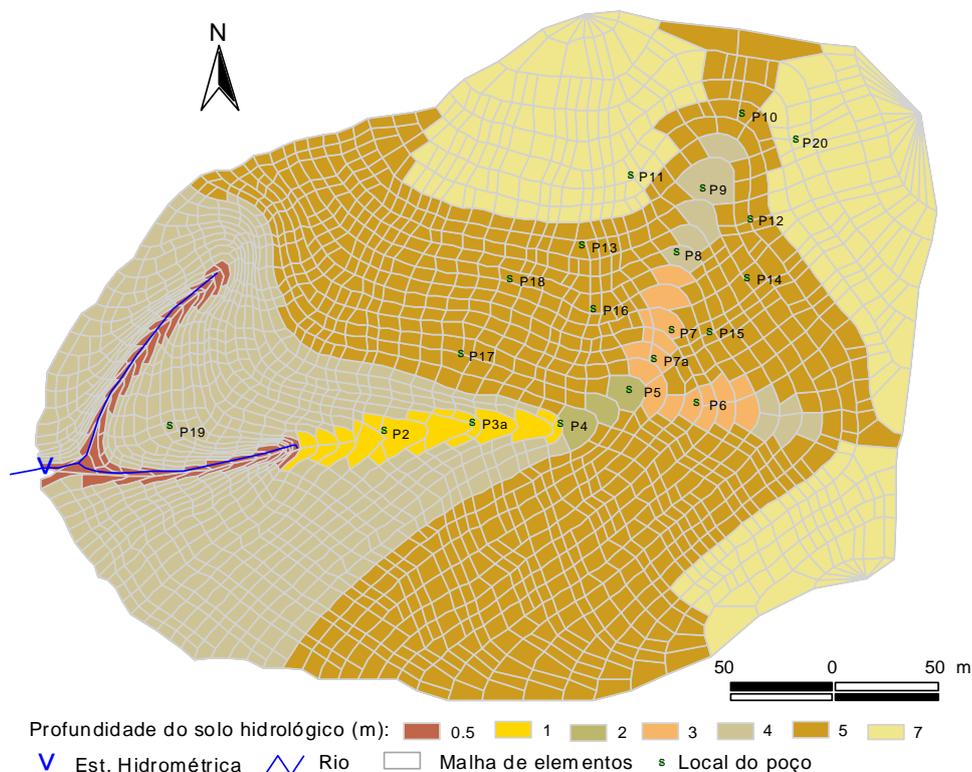


Figura 2 - Espessura do solo hidrológico na bacia do rio Saci.

A espessura média do solo na bacia resultou em 5 m, sendo máxima nos três topos localizados nos divisores da bacia e diminui em direção aos vales seguindo a orientação das linhas de drenagem, sendo mínima no fundo do vale encaixado. O fundo do vale corresponde à zona ripária e possui solo sempre saturado e extremamente permeável, com profundidade máxima de meio metro (Figura 2).

Com o intuito de diminuir o esforço computacional e dispêndio de tempo na fase de calibração ao se utilizar modelos para a simulação do processo chuva-vazão, é possível determinar alguns parâmetros que exercem maior influência nos resultados das simulações (ABBOTT *et al.*, 1986).

Neste sentido, a condutividade hidráulica saturada e o tamanho da espessura da camada saturada no início dos eventos são os parâmetros com maior influência em modelos que calculam o escoamento subsuperficial segundo a lei de Darcy. Haja vista que a declividade e o tamanho dos elementos não são calibráveis (DAVIS, *et al.*, 1999; DAWES *et al.*, 1997; VERTESSY *et al.*, 1998).

Assim, optou-se por um detalhamento maior dos parâmetros de condutividade hidráulica saturada e seu decaimento em função da profundidade no solo (Tabela 1). Os demais parâmetros caracterizadores do solo foram calibrados de maneira uniforme para toda a bacia com base em valores citados em trabalhos que se utilizam da mesma técnica e com condições ambientais semelhantes (CSIRO, 1999; DAVIS, *et al.*, 1999; FRANKENBERGER *et al.*, 1999; VERTESSY e ELSENBEER, 1999; VERTESSY *et al.*, 2000).

Os valores de condutividade hidráulica foram obtidos diretamente por meio de medição pelo método do poço direto (CAUDURO e DORFMAN, 1986) em 19 poços da bacia do rio Saci. Posteriormente, foi realizada uma calibração controlada com base nos valores medidos a fim de se obter parâmetros efetivos que melhor reproduzissem os hidrogramas da bacia (GRAYSON e BLÖSCHL, 2000). A Tabela 1 apresenta os valores dos parâmetros utilizados nas simulações agrupados pelas classes de profundidade do solo, conforme demonstrado na Figura 2.

Como variável de entrada foram utilizadas a “precipitação efetiva” (precipitação interna + escoamento de tronco) e as vazões observadas no exutório. Como o modelo é específico para simulação de eventos, o mesmo não considera a evapotranspiração, por isso optou-se pela utilização da “precipitação efetiva”, na qual os efeitos da interceptação já estão considerados.

A Tabela 2 mostra as principais características dos eventos selecionados para as simulações quanto à precipitação e a vazão no início dos eventos. É apresentada a precipitação efetiva total do evento juntamente com os valores de

intensidade máxima de precipitação efetiva observadas no evento em 10 e 30 minutos, chamadas $Pe_{(10)}$ e $Pe_{(30)}$, respectivamente. Constatam também as vazões observadas no momento de pico do hidrograma.

Tabela 1 - Parâmetros agrupados de acordo com a espessura total do solo hidrológico

| Esp. Total (m) | K_s (m/dia) | m | S_p (m^3/m^3) | Ψ_0 (m) | θ_r (m^3/m^3) | θ_s (m^3/m^3) |
|----------------|------------------|-----|------------------------|-----------------|-----------------------------|-----------------------------|
| 0,5 | 200 | 0,2 | | | | |
| 1,0 | 100 | 0,2 | | | | |
| 2,0 | 10 | 0,2 | | | | |
| 3,0 | 1 | 0,6 | 0,4 | -150 | 0,1 | 0,5 |
| 4,0 | 1 | 0,6 | | | | |
| 5,0 | 1 | 0,6 | | | | |
| 7,0 | 1 | 0,6 | | | | |

K_s : Condutividade hidráulica saturada (m/dia); m : Parâmetro que controla o decaimento de K_s em função da profundidade; S_p : Armazenamento específico do solo (m^3/m^3); Ψ_0 : Valor de pressão de água no solo na condição de umidade residual (m); θ_r : Umidade residual do solo (m^3/m^3); e θ_s : Umidade saturada do solo (m^3/m^3)

Tabela 2 - Características dos eventos

| Evento | Data | Pe (mm) | $Pe_{(10)}$ (mm/h) | $Pe_{(30)}$ (mm/h) | Q (início) (L/s) | Q Pico (L/s) |
|--------|------------|--------------|-----------------------|-----------------------|---------------------|-----------------|
| 1 | 31/07/2008 | 10.8 | 4.2 | 3.4 | 0.42 | 1.09 |
| 2 | 06/08/2008 | 6.1 | 6.0 | 4.7 | 0.50 | 0.95 |
| 3 | 09/08/2008 | 18.5 | 18.0 | 12.8 | 0.63 | 3.69 |
| 4 | 12/08/2008 | 29.4 | 10.8 | 9.0 | 0.74 | 5.86 |
| 5 | 06/09/2008 | 9.0 | 3.0 | 2.8 | 0.44 | 0.87 |
| 6 | 09/09/2008 | 10.6 | 24.0 | 11.1 | 0.37 | 1.09 |
| 7 | 11/09/2008 | 44.9 | 19.8 | 11.5 | 0.39 | 3.59 |
| 8 | 20/09/2008 | 18.8 | 9.6 | 7.7 | 0.53 | 2.38 |
| 9 | 01/10/2008 | 32.2 | 42.0 | 20.6 | 0.63 | 8.01 |
| 10 | 03/10/2008 | 77.5 | 22.2 | 20.0 | 1.00 | 17.34 |
| 11 | 14/10/2008 | 10.4 | 30.6 | 15.1 | 2.49 | 6.39 |
| 12 | 15/10/2008 | 21.4 | 37.2 | 25.5 | 2.57 | 10.97 |
| 13 | 16/10/2008 | 76.6 | 23.4 | 20.5 | 3.65 | 22.90 |
| 14 | 23/10/2008 | 27.5 | 87.0 | 38.6 | 6.40 | 32.65 |
| 15 | 26/10/2008 | 6.7 | 22.2 | 11.2 | 7.12 | 10.27 |
| 16 | 29/10/2008 | 34.3 | 27.0 | 19.7 | 5.72 | 15.21 |
| 17 | 02/11/2008 | 30.5 | 25.8 | 20.4 | 6.68 | 19.33 |
| 18 | 05/11/2008 | 8.4 | 42.0 | 16.3 | 7.27 | 15.21 |
| 19 | 10/11/2008 | 20.6 | 57.6 | 31.2 | 5.09 | 14.65 |
| 20 | 12/11/2008 | 51.8 | 19.8 | 17.5 | 5.47 | 34.85 |

O modelo foi calibrado para os três primeiros eventos ocorridos no início da série. Posteriormente foi aplicado para os demais 17 eventos, todos com

discretização temporal de 10 minutos, utilizando sempre o mesmo conjunto de parâmetros a fim de explorar e avaliar a potencialidade de sua base física.

O desempenho do modelo foi avaliado de maneira concentrada comparando os hidrogramas observados e simulados, por meio do coeficiente de eficiência de Nash-Sutcliffe (*Eff*) (NASH e SUTCLIFFE, 1970) e do coeficiente de determinação R^2 , conforme sugerido em Moriasi *et al.* (2007). O desempenho da previsão espacial (distribuída) do modelo foi feita por meio da avaliação da distribuição espaço-temporal das áreas saturadas durante as simulações.

3 RESULTADO E DISCUSSÕES

De maneira geral a comparação entre os hidrogramas simulados e observados demonstra um bom ajuste para um conjunto de eventos de baixa umidade antecedente, com vazão no início do evento de até 1 L/s, com *Eff* superiores a 0,65 e R^2 superiores a 0,8. Porém, para os eventos com vazão inicial superiores a 1 L/s, observa-se que os indicadores de qualidade do modelo diminuem significativamente, com *Eff* entre -3,89 e 0,8 e R^2 entre 0,36 e 0,87 (Figura 3A e Figura 3B).

Estes valores demonstram que, apesar de uma exceção, o modelo não foi capaz de representar adequadamente o comportamento médio da bacia quando o volume de água armazenado na bacia, no início dos eventos, é relativamente maior.

Caracteriza-se assim uma distinção entre os tipos de evento simulados pelo modelo em função da umidade antecedente na bacia. Denominam-se “Eventos de menor umidade antecedente” aqueles cuja vazão no início da simulação é igual ou inferior a 1 L/s. Por outro lado, denominam-se “Eventos de maior umidade antecedente” nos quais a vazão inicial no evento é superior a este limiar, independentemente da magnitude ou intensidade da precipitação efetiva dos eventos.

Ainda sobre a avaliação do conjunto de hidrograma simulados, verifica-se que o nível de desempenho do modelo também é superior nos “eventos de menor umidade antecedente” quando analisado sob outros aspectos.

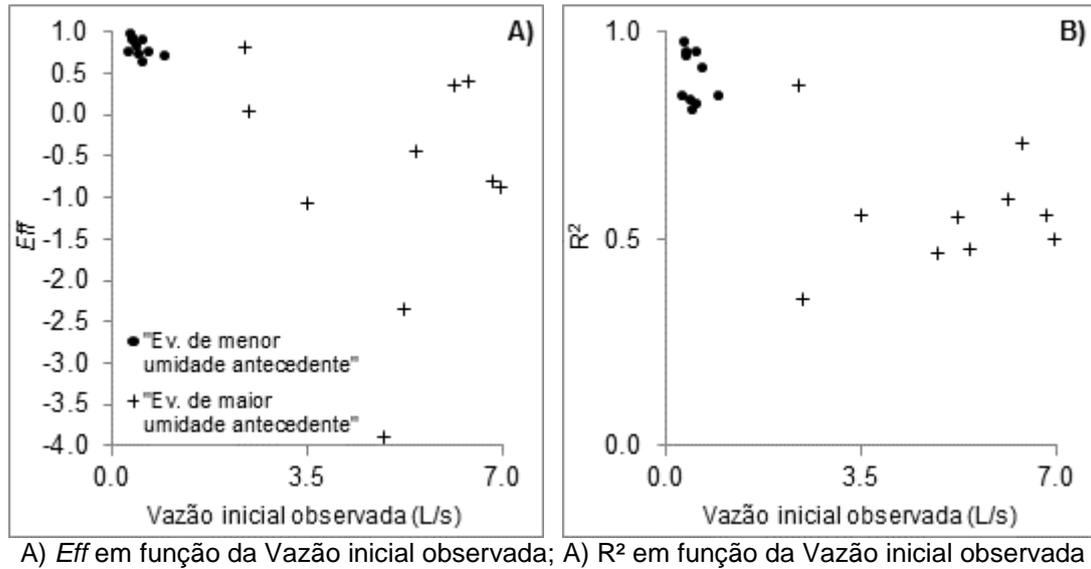
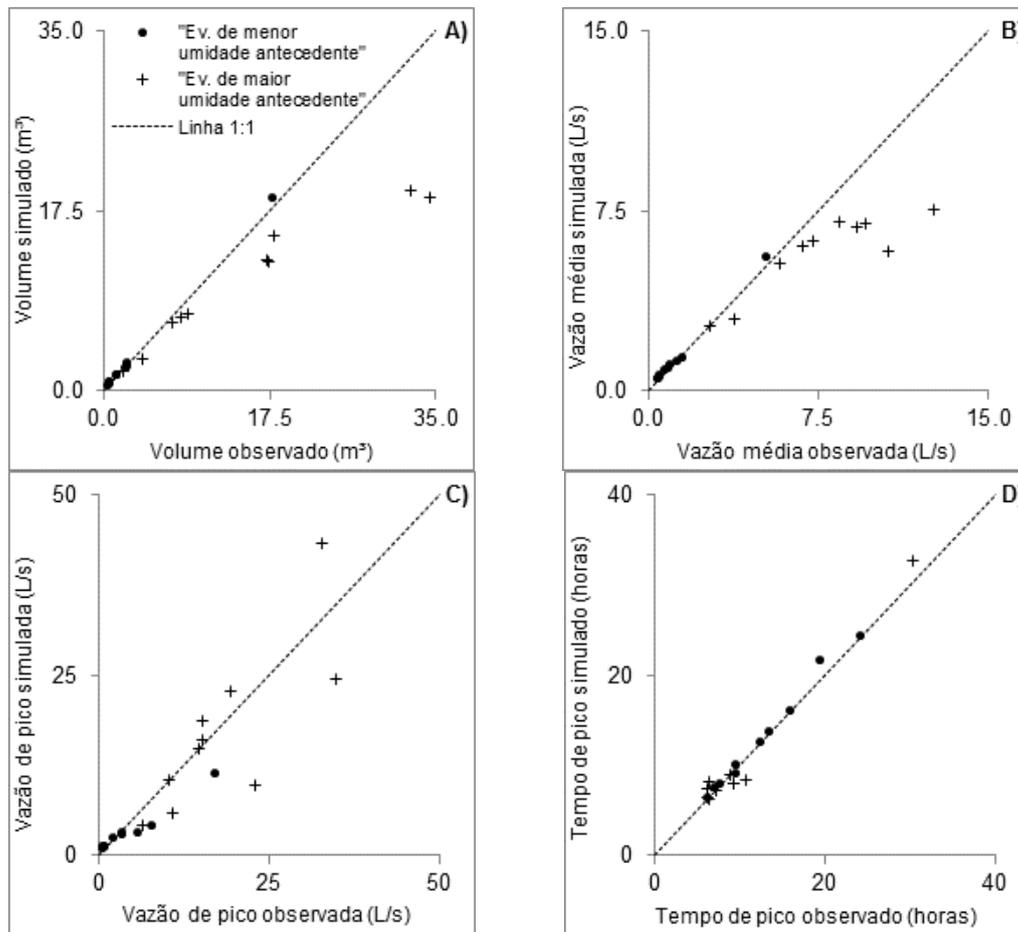


Figura 3 - Coeficientes de avaliação dos hidrogramas simulados

A Figura 4 fornece uma visão mais ampla sobre as características dos hidrogramas simulados pelo modelo. É possível observar nas Figura 4A e Figura 4B, que o modelo simulou adequadamente os volumes escoados nos “eventos de menor umidade antecedente”, nos quais os pontos se aproximam da reta 1:1. Entretanto, o modelo subestimou os volumes escoados nos “eventos de maior umidade antecedente”, apresentando valores assimétricos à reta 1:1. Em relação aos picos dos hidrograma (Figura 4C), observa-se que o modelo simulou adequadamente apenas os picos inferiores a 4 L/s. Assim, somente os eventos pequenos foram representados adequadamente sob este ponto de vista. Observa-se também que nos eventos mais úmidos não houve uma tendência clara a subestimação dos valores, tal como ocorre para os volumes totais e médios. Porém, as vazões de pico apresentam-se dispersas, se demonstrarem boa similaridade aos dados observados.

Quanto ao tempo dado entre o início do evento e o momento de maior pico do hidrograma, denominado tempo de pico, o modelo apresentou bons resultados num contexto geral (Figura 4D). Os resultados de ambos os tipos de evento simulados se situam próximos a linha 1:1, demonstrando, portanto, que apesar de, em linhas gerais, o modelo subestimar o volume escoado nos eventos úmidos, ainda é capaz de prever adequadamente as ascensões dos hidrogramas de cheia.



A) Volume; B) Escoamento médio; C) Vazão no pico; e D) Tempo de pico.

Figura 4 - Avaliação dos hidrogramas simulados sob diferentes aspectos

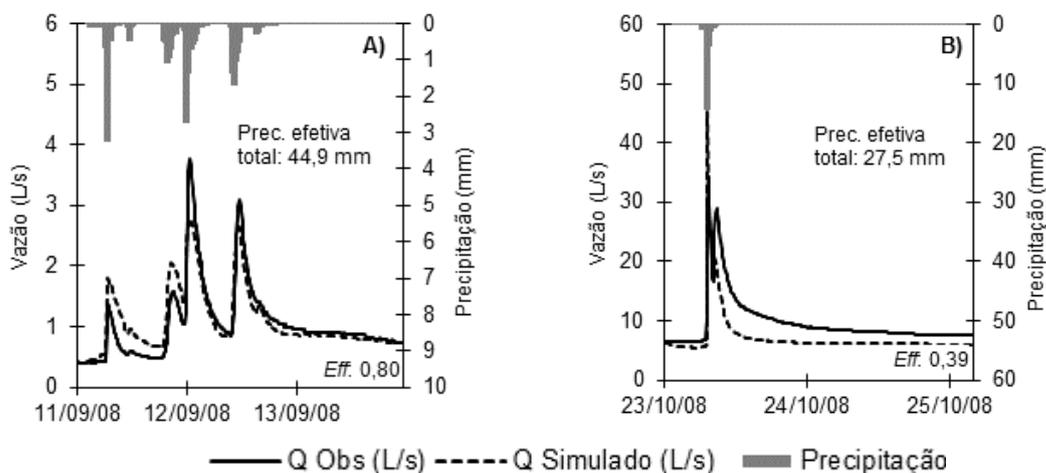
De maneira geral os resultados encontrados se assemelham aos obtidos por Vertessy e Elsenbeer, (1999). Estes autores simularam 34 eventos com o modelo TOPOG_SBM em uma pequena bacia experimental também recoberta por floresta na região amazônica do Peru. Segundo os autores, os resultados obtidos nesta bacia de clima úmido também demonstraram que o modelo subestimou os volumes escoados em parte dos eventos. Salienta-se ainda que assim como verificado na bacia do rio Saci, o pior desempenho do modelo foi registrado na comparação das vazões de pico dos hidrogramas simulados e observados.

A Figura 5 apresenta dois hidrogramas comparando as vazões observadas e simuladas para um exemplo de “evento de menor umidade antecedente” (evento 7) e um exemplo (evento 14) de “evento de maior umidade antecedente” (Figura 5A e Figura 5B respectivamente). Estes hidrogramas foram selecionados para

ilustrar os casos nos quais o modelo tem desempenho aceitável e não satisfatório de acordo com as características de umidade de cada tipo de evento simulado. Ressalta-se que os eventos simulados exemplificados são representativos em relação a condição geral dos resultados das demais simulações para cada tipo de evento. Ou seja, os demais eventos simulados apresentam respostas semelhantes às apresentadas adiante.

Nas simulações dos “eventos de menor umidade antecedente”, o modelo apresentou bons resultados nos hidrogramas simulados, indicando assim, que o volume de água escoado na bacia do rio Saci está próximo da realidade.

No exemplo de “evento de maior umidade antecedente” simulado pelo modelo o hidrograma simulado não apresenta semelhança satisfatória com o hidrograma observado. O momento do primeiro pico foi previsto adequadamente, tal como demonstrado na Figura 4D, porém, fica demonstrada sua inabilidade em simular a recessão neste evento. A recessão simulada pelo modelo se apresenta de forma abrupta, em discordância com os valores observados. Além disso, a vazão após o pico permanece aquém da observada até o final do evento.



A) Exemplo de simulação de “evento de menor umidade antecedente”; e B) Exemplo de simulação de “evento de maior umidade antecedente”.

Figura 5 – Exemplos de eventos simulados

Esta característica de recessões abruptas em eventos maiores e escoamento abaixo do esperado após os eventos também foi verificada por Grayson *et al.*, (1992) utilizando o modelo THALES, que possuiu o mesmo tipo de representação espacial que o TOPOG_SBM.

Para estes autores, o motivo da incoerência do hidrograma simulado se deve a baixos valores de condutividade hidráulica saturada, fato que limita o escoamento de base, justificando assim os baixos valores observados ao final dos hidrogramas simulados.

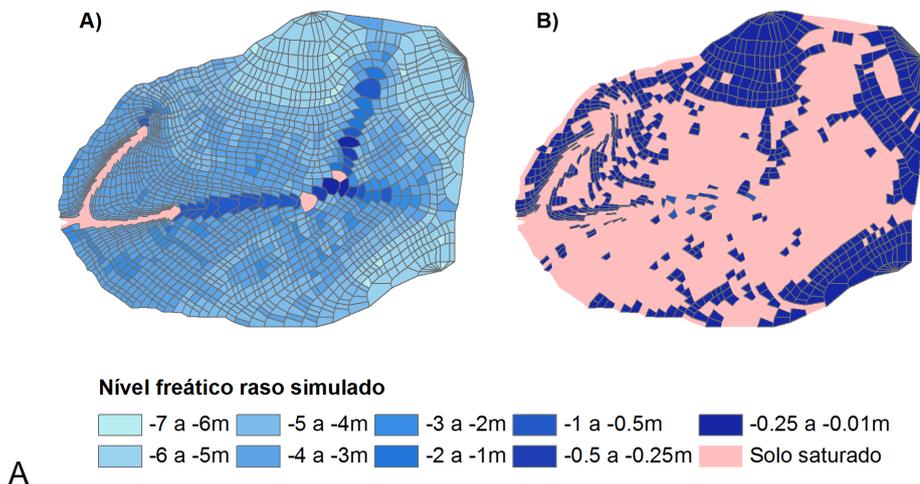


Figura 6A apresenta a distribuição espacial da superfície freática simulada no momento do pico do hidrograma simulado pelo modelo no “evento de menor umidade antecedente” apresentado na Figura 5. De maneira geral o modelo prevê a presença de áreas saturadas concentradas junto à rede de drenagem, limitando-as aos solos com espessura de 0,5m, que correspondem à zona ripária.

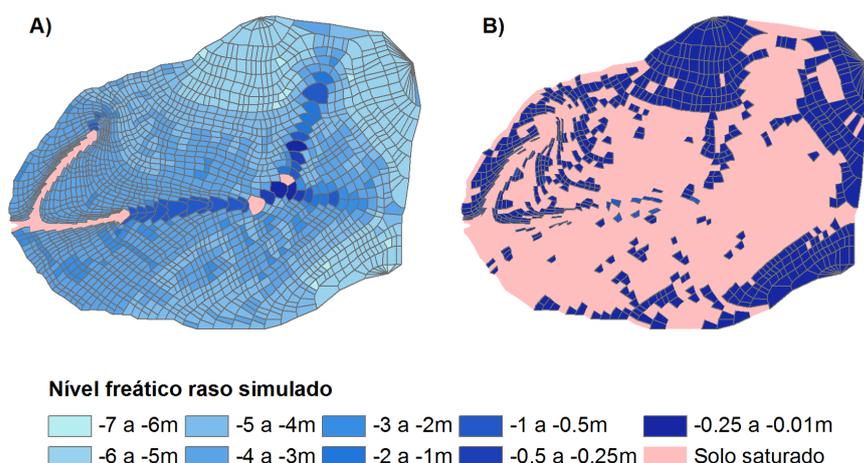
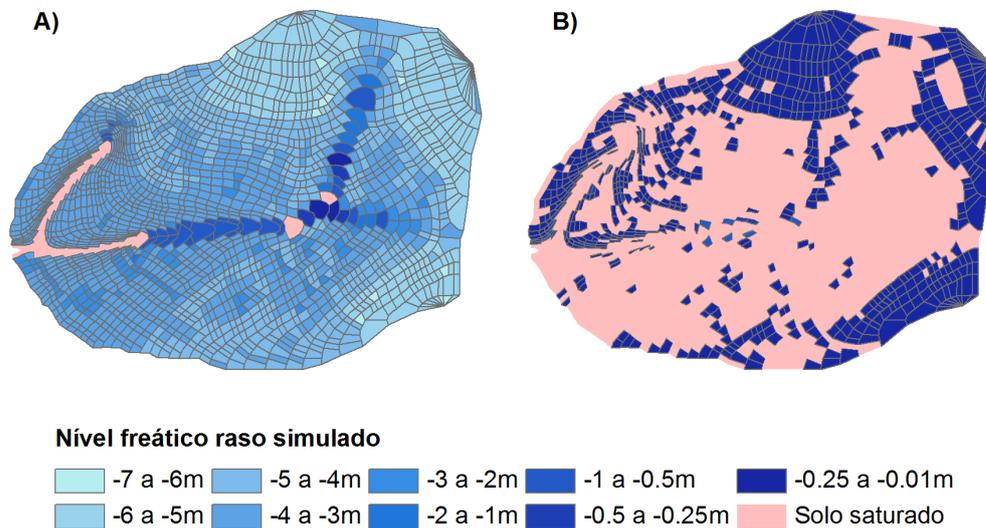


Figura 6 - Distribuição espacial da superfície freática simulada.

A) Momento do pico simulado para o “evento seco”; e B) Momento do pico simulado para o “evento úmido”.

Em virtude de o modelo simular o processo de reinfiltração no solo, é possível concluir que o escoamento superficial oriundo das pequenas zonas saturadas a montante não atinge o canal. Desta forma, infere-se que todo o escoamento superficial simulado deste evento é proveniente de uma pequena área saturada ao longo dos canais, independentemente do momento analisado.

Este resultado é compatível com os obtidos por Santos, (2009), para o qual, nos eventos de menor magnitude, o escoamento superficial da bacia do rio Saci é oriundo exclusivamente de uma porção saturada correspondente a zona ripária da bacia, representando aproximadamente 2% da área total.



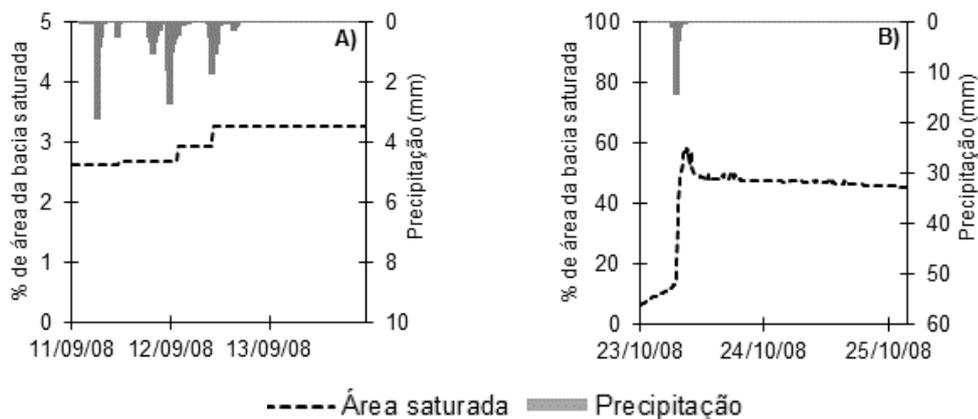
A Figura 5B apresenta a distribuição espacial da superfície freática simulada no momento do pico do hidrograma simulado pelo modelo no “evento de maior umidade antecedente” apresentado na Figura 5B. Observa-se que no momento do pico do hidrograma simulado a maior parte de bacia encontra-se saturada segundo a previsão do modelo.

Para Santos, (2009), neste tipo de evento, adicionalmente a zona ripária que permanece saturada todo o tempo, existe uma área saturada a montante, localizada no talvegue da bacia. Segundo o autor, neste evento a porcentagem de área saturada da bacia não ultrapassa 6% da área total. Tal fato ocorre em virtude da presença de uma rede de caminhos preferenciais de escoamento presentes a montante da área saturada na Figura 5A. Segundo o autor, apenas nestes

eventos de maior magnitude esses caminhos preferenciais são ativados, sendo responsáveis por drenar o escoamento até o canal por subsuperfície.

A presença destes caminhos preferenciais de escoamento aumenta significativamente a condutividade hidráulica do solo, potencializando a sua capacidade de transmitir água à jusante, diminuindo sua probabilidade de saturação (BEVEN e GERMANN, 1982).

Como o TOPOG_SBM simula a variação de K_s no solo com um decaimento uniforme, estes caminhos preferenciais de escoamento ainda não foram implementados no modelo. Assim, os solos localizados no talvegue tenham sua capacidade de drenagem diminuída quando comparados com a realidade nos eventos de maior umidade. Ou seja, na configuração atual o modelo tem uma capacidade reduzida de propagar o escoamento por subsuperfície, o que resulta na saturação de uma área maior do que a observada na realidade, conforme pode ser verificado na Figura 7.



A) Dinâmica de áreas saturadas em "evento seco"; e B) Dinâmica de áreas saturadas em "evento úmido".

Figura 7 - Evolução da proporção de áreas saturadas simuladas

Observa-se que no "evento de menor umidade antecedente" a ocorrência de áreas saturadas apresenta magnitude compatível com a realidade da bacia. Entretanto, no evento mais úmido tomado como exemplo, conclui-se que a simulação realizada pelo modelo TOPOG_SBM apresenta um volume de escoamento abaixo da realidade e que os mecanismos de geração de escoamento não estão sendo representados adequadamente.

Desta maneira, verifica-se que para a simulação adequada das condições demonstradas neste trabalho na bacia do rio Saci é necessário incluir o

escoamento por caminhos preferenciais, os quais são acionados a partir de determinadas condições de umidade da bacia. Esta conclusão é corroborada por autores que reconhecem a influência destes elementos que controlam os mecanismos de escoamento em bacias de clima úmido e com uso florestal (REFSGAARD, 1997; SANTOS, 2009; VERTESSY; ELSENBEEER, 1999).

4 CONCLUSÃO

O resultado deste trabalho está de acordo com publicações recentes que reconhecem a importância das condições antecedentes de umidade na ocorrência de mecanismos de geração de escoamento em bacias de clima úmido e uso florestal (ALI *et al.*, 2011; MCDONNELL, 1990; MEERVELD e MCDONNELL, 2006; SANTOS, 2009; WESTERN *et al.*, 2004).

Observa-se que para eventos de menor magnitude e vazão inicial de até 1 L/s a configuração de modelagem aplicada neste trabalho é capaz de reproduzir adequadamente os processos hidrológicos que ocorrem na bacia do rio Saci. As características do hidrograma foram simuladas adequadamente e a espacialização das áreas saturadas se mostrou coerente com a realidade.

Entretanto, verificou-se que em eventos nos quais a vazão inicial era superior a 1 L/s, ou seja, com condições de umidade antecedente mais elevadas, as simulações não foram capazes de reproduzir de maneira aceitável os hidrogramas observados. Além disso, verificou-se também que a dinâmica espaço-temporal das áreas saturadas neste tipo de evento não está de acordo com a realidade da bacia.

A análise conjunta dos hidrogramas e distribuição das áreas saturadas simuladas demonstra que a configuração de modelagem utilizada (dados + modelo + calibração) não representa adequadamente os processos internos da bacia do rio Saci em todas as situações.

Conclui-se que para o incremento da qualidade da atividade de modelagem aqui proposta se faz necessário a implementação dos caminhos preferenciais de escoamento que atuam como limiares entre os mecanismos de geração de escoamento presentes em bacias úmidas e florestadas.

REFERÊNCIAS

- ABBOTT, M. B.; BATHURST, J. C.; CUNGE, J. A.; O'CONNELL, P. E.; RASMUSSEN, J. An introduction to the European Hydrological System - Systeme Hydrologique Europeen, "SHE", 1: History and philosophy of a physically-based, distributed modelling system. **Journal of Hydrology**, v. 87, p. 45-59, 1986.
- ALI, G.; L'HEUREUX, C.; ROY, A. G.; TURMEL, M.; COURCHESNE, F. Linking spatial patterns of perched groundwater storage and stormflow generation processes in a headwater forested catchment. **Hydrological Processes**, v. 25, n. 25, p. 3843-3857, 2011.
- BEVEN, K. Changing ideas in hydrology: The case of physically-based models. **Journal of Geophysical Research**, v. 105, p. 157-172, 1989.
- BEVEN, K. TOPMODEL: A CRITIQUE. **Hydrological Processes**, v. 11, p. 1069-1085, 1997.
- BEVEN, K. **Rainfall-runoff modelling : the primer**: Wiley, 2001. v. 15p. 360
- BEVEN, K. Towards an alternative blueprint for a physically based digitally simulated hydrologic response modelling system. **Hydrological Processes**, v. 16, n. 2, p. 189-206, 2002.
- BEVEN, K.; GERMANN, P. Macropores and Water Flow in Soils. **Water Resources Research**, v. 18, n. 5, p. 1311-1325, 1982.
- BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. **Hydrological Sciences Bulletin**, v. 24, n. 1, p. 43-69, 1979.
- CAUDURO, F. A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre, RS: PRONI/ IPH-UFRGS, 1986. p. 216
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R.; MAYS, L. W. **Applied Hydrology**. 1. ed. Boston, Massachusetts: McGraw-Hill, Inc, 1988. p. 572
- CSIRO (ED.). **TOPOG User Guide**. Canberra: CSIRO Land and Water, 1999. p. 208
- DAVIS, S. H.; VERTESSY, R. A.; SILBERSTEIN, R. P. The sensitivity of a catchment model to soil hydraulic properties obtained by using different measurement techniques. **Hydrological Processes**, v. 13, p. 677-688, 1999.
- DAWES, W. R.; ZHANG, L.; HATTONA, T. J. *et al.* Evaluation of a distributed parameter ecohydrological model (TOPOG_IRM) on a small cropping rotation catchment. **Journal of Hydrology**, v. 191, n. 96, p. 64-86, 1997.
- FRANKENBERGER, J. R.; BROOKS, E. S.; WALTER, M. T.; WALTER, M. F.; STEENHUIS, T. S. A GIS-based variable source area hydrology model. **Hydrological Processes**, v. 13, p. 805-822, 1999.
- FREEZE, R. A.; HARLAN, R. L. Blueprint for a physically-based, digitally-simulated hydrologic response model. **Journal of Hydrology**, v. 9, p. 237-258, 1969.
- GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. Spatial Modelling of Catchment Dynamics. In: GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. (Eds.). **Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modelling**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. p. 51-81.

- GRAYSON, R.; MOORE, I. D.; MCMAHON, T. Physically based hydrologic modeling: 1. A terrain-based model for investigative purposes. **Water Resources Research**, v. 28, n. 10, p. 2639-2658, 1992.
- MARANGON, F. H. S.; SANTOS, I.; KOBAYAMA, M. **Aplicação do topog na bacia experimental do rio saci**. (ANAIS, Ed.)XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. **Anais...** Campo Grande: ABRH. , 2009
- MCDONNELL, J. J. A rationale for old water discharge through macropores in a steep, humid catchment. **Water Resources Research**, v. 26, n. 11, p. 2821-2832, 1990.
- MEERVELD, H. J. T.; MCDONNELL, J. J. Threshold relations in subsurface stormflow: 1. A 147-storm analysis of the Panola hillslope. **Water Resources Research**, v. 42, p. 1-11, 2006.
- MORIASI, D. N.; ARNOLD, J. G.; LIEW, M. W. VAN; *et al.* Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations. **American Society of Agricultural and Biological Engineers**, 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.
- REFSGAARD, J. C. Parameterisation, calibration and validation of distributed hydrological models. **Journal of Hydrology**, v. 198, n. 1-4, p. 69-97, 1997.
- SANTOS, I. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: Mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica**. (Tese de doutorado): Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC, SC), 2009.
- SANTOS, I.; KOBAYAMA, M.; BRAGA, S. M. *et al.* **Monitoramento geobiohidrológico em microbacia experimental de segunda ordem, no município de Rio Negrinho-SC, Brasil**. (Dinâmica e Diversidade de Paisagens, Ed.)VII Simpósio Nacional de Geomorfologia e II Encontro Sul-Americano de Geomorfologia. **Anais...** Belo Horizonte: UFMG. , 2008
- VERTESSY, R. A.; ELSENBEER, H. Distributed modeling of storm flow generation in an Amazonian rain forest catchment: Effects of model parameterization. **Water Resources Research**, v. 35, n. 7, p. 2173-2187, 1999.
- VERTESSY, R. A.; ELSENBEER, H.; BESSARD, Y.; LACK, A. Storm Runoff Generation at La Cuenca. In: GRAYSON, R.; BLÖSCHL, G. (Eds.). **Spatial patterns in catchment hydrology: observations and modelling**. 1. ed. Cambridge: Cambridge University Press, 2000. p. 247-271.
- VERTESSY, R. A.; HATTON, T. J.; BENYON, R. G.; DAWES, W. R. Long-term growth and water balance predictions for a mountain ash (*Eucalyptus regnans*) forest catchment subject to clear-felling and regeneration. **Tree physiology**, v. 16, n. 1-2, p. 221-232, 1996.
- WESTERN, A. W.; ZHOU, S.; GRAYSON, R. *et al.* Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes. **Journal of Hydrology**, v. 286, n. 1-4, p. 113-134, 2004.