

Modelagem Hidrológica da Bacia do Riacho Gameleira (Pernambuco) Utilizando TOPSIMPL, uma Versão Simplificada do Modelo TOPMODEL

Paulo Frassinete de Araújo Filho

Empresa Pernambucana de Pesquisa Agropecuária – IPA
pfa@ipa.br

Jaime Joaquim S. P. Cabral, Antonio Celso D. Antonino

Departamento de Engenharia Civil – UFPE
jcabral@ufpe.br, acda@ufpe.br

Georges-Marie Saulnier

Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Environnement – Grenoble – França
georges-marie.saulnier@hmg.inpg.fr

Recebido: 20/05/04 revisado: 05/01/05 aceito: 17/05/05

RESUMO

O modelo hidrológico TOPSIMPL apresenta as mesmas características básicas do TOPMODEL, mas utiliza apenas 4 (quatro) parâmetros. A simulação hidrológica com o TOPSIMPL utiliza o modelo digital do terreno, leva em consideração a declividade da célula e a área de contribuição a montante, incorporando-os no índice topográfico que representa a potencialidade da célula em saturar. Assim, de acordo com a precipitação pluviométrica, com o estado de saturação do solo e com o déficit hídrico das células, calcula-se a vazão na seção exutória da bacia estudada. O TOPSIMPL foi aplicado à bacia do riacho Gameleira, afluente do rio Tapacurá, em Pernambuco. Para isto foi elaborado o modelo digital de terreno, instalado um sistema de aquisição automática de dados e, ao longo de 32 (trinta e dois) meses, armazenados os dados de precipitação pluviométrica e vazão a cada minuto. Foi realizada a calibração e validação do TOPSIMPL com alguns eventos chuvosos na bacia do riacho Gameleira e os resultados mostraram um bom ajuste das vazões de saída.

PALAVRAS-CHAVE: TOPSIMPL, TOPMODEL, Modelo Digital do Terreno, Monitoramento Hidrológico.

INTRODUÇÃO

A modelagem computacional de bacias hidrográficas já vem sendo feita no Brasil há bastante tempo, sendo que gradativamente vêm sendo implantados aperfeiçoamentos para uma melhor representação dos processos físicos. Inicialmente, os modelos consideravam a bacia como homogênea ou no máximo a dividiam em regiões homogêneas, mas com o aumento da capacidade dos computadores, a modelagem de bacias hidrográficas tomou um grande impulso, através da introdução de algumas técnicas que possibilitaram uma melhor representatividade do comportamento dos processos ao longo da bacia.

Nas duas últimas décadas, diversos modelos desenvolvidos no Brasil, ou aqui adaptados, apresentaram um grande refinamento dos processos de cálculo dos componentes do ciclo hidrológico, inclusive com uso do geoprocessamento, que possibilitou que os modelos passassem a utilizar células (pi-

xels) com tamanhos bastante reduzidos em relação ao da bacia e que possuem um comportamento próprio, podendo ser diferenciado dependendo da sua localização espacial na bacia, podendo ainda agrupar uma maior quantidade de informações sobre cada célula, que podem ser consideradas como camadas de informações e depois ser combinadas entre si.

Beven e Kirkby (1979) desenvolveram o modelo TOPMODEL (TOPography based MODEL) utilizando relações físicas para representar os processos hidrológicos e introduziram um índice topográfico que representa o potencial que uma célula tem de atingir a saturação. Este índice leva em consideração a influência da topografia da bacia e considera o escoamento sobre superfícies contribuintes. O modelo TOPMODEL teve uma grande aceitação em diversos países (Datin, 1998; Beaujouan et al, 2001; Engel et al, 2002; Takata et al, 2003; Pellenq et al, 2003; Saulnier e Datin, 2004) e no Brasil já foram feitas algumas aplicações, em bacias do estado

do Paraná (Mine e Clarke, 1996; Zakia, 1998; Santos, 2001), São Paulo (Schuler, 1998; Moraes et al., 2003), Distrito Federal (Varella, 1998) e Minas Gerais (Machado, 2000; Maia, 2001).

O TOPMODEL considera a idéia de que o estado hídrico de um ponto não depende somente da característica local do ponto, mas depende igualmente da posição dos pontos na organização geral do escoamento sobre a bacia, organização espacial do escoamento geral é aproximada através do índice topográfico. O índice topográfico difere dos parâmetros hidrológicos habituais pela sua característica dinâmica. Ele resume a dinâmica dos pontos, independente das características físicas que podem explicar esta dinâmica.

O TOPMODEL foi recebendo várias contribuições ao longo dos anos, de modo que já se pode dizer atualmente que é uma família de modelos, onde cada versão segue a mesma filosofia do TOPMODEL clássico, mas é adaptada para as necessidades e os objetivos que se pretende na modelagem.

No presente trabalho foi realizado o monitoramento e uma modelagem hidrológica do tipo chuva-vazão na microbacia do riacho Gameleira, afluente do rio Tapacurá em Pernambuco, utilizando o TOPSIMPL (Saulnier, 1996), versão simplificada do TOPMODEL, com apenas 4 parâmetros, mas garantindo precisão no cálculo das vazões e um detalhamento refinado da localização das zonas saturada e não saturada.

Com o melhor entendimento dos processos hidrológicos no riacho Gameleira, pretende-se ter mais condições de avaliar as respostas do rio Tapacurá, de grande importância para o Recife, em função de abastecimento público, controle de inundações e irrigação de policultura por pequenos agricultores.

A metodologia da pesquisa incluiu inicialmente a implantação do sistema de aquisição automática da distribuição temporal da precipitação e da vazão na calha fluvial. Incluiu também a elaboração do modelo digital do terreno e a instalação computacional do TOPSIMPL. A partir daí foi realizada a calibração e a validação do modelo, e por último realizada a simulação de alguns cenários.

A seguir se descreve o modelo TOPSIMPL, o sistema de aquisição de dados, a bacia do riacho Gameleira e a calibração e simulações realizadas.

TOPSIMPL

Existem várias versões do modelo TOPMODEL. A versão aqui adotada foi desenvolvida pelo "Laboratoire d'étude des Transferts en Hydrologie et Envi-

ronnement" - LTHE na França, e chama-se TOPSIMPL (TOPmodel SIMPLifié).

Nas seções que se seguem, será mostrada a condição necessária para dar sustentabilidade às hipóteses do modelo, será realizada a enumeração das hipóteses do modelo básico e depois as condições específicas do TOPSIMPL.

Parâmetros do modelo

A versão adotada possui 4 parâmetros para serem calibrados, os quais podem ser divididos em dois grupos:

- Parâmetros do perfil de condutividade saturada: a condutividade saturada na superfície do solo (K_0) e a taxa de decréscimo da condutividade com o déficit (m);
- Parâmetros do reservatório radicular: a profundidade (SR_{Max}) e a componente que engloba a evapotranspiração e interceptação ($Inter$).

Índice topográfico

O TOPSIMPL, semelhante ao modelo básico, adota um índice chamado índice topográfico, que traduz o potencial de um ponto da bacia em se saturar, definido como

$$IT_i = \ln \left(\frac{a_i}{tg \beta_i} \right) \quad (1)$$

sendo IT_i o índice topográfico, a_i a área de drenagem da área de contribuição para o ponto i e $tg \beta_i$ o gradiente hidráulico.

Esta relação entre o fluxo que entra num ponto (depende da área de drenagem) e o fluxo que sai do mesmo (depende do gradiente gravitacional) proporciona a elevação ou o rebaixamento da zona saturada no ponto. Pode-se dizer que este índice representa a dinâmica do ponto face à saturação, enquanto que os parâmetros clássicos só quantificam as considerações estáticas do mesmo.

Os pontos com índice elevado correspondem àqueles onde existe um fluxo de entrada bem maior do que o de saída, conseqüentemente apresentando uma maior tendência para atingir a saturação.

Os parâmetros clássicos de caracterização do meio, que foram esquematicamente qualificados de estáticos, dão uma idéia vertical dos processos, en-

quanto que o índice topográfico introduz a noção de escoamento lateral sobre a área de contribuição.

Regime permanente

Admitindo um ponto i dentro da área de contribuição, supondo que não existe escoamento superficial e que o regime é permanente, pode-se dizer que a quantidade de água na unidade de tempo que alimenta a zona saturada situada a montante do ponto é igual à quantidade de água na unidade de tempo que sai a jusante do mesmo.

Adota-se a lei de Darcy e a equação da continuidade. O gradiente da carga hidráulica é aproximado pela inclinação da superfície do lençol em aquífero livre.

$$LS_{i,t} = T_{i,t} \text{grad}(h_{i,t}) \quad (2)$$

sendo $LS_{i,t}$ a lâmina de água que passa pelo elemento de contorno, $T_{i,t}$ a transmissividade da espessura de solo sobre o qual a água escoar e $\text{grad}(h_{i,t})$ o gradiente da carga hidráulica (declividade da superfície do lençol em aquífero livre).

A transmissividade lateral é expressa como uma função da profundidade do solo. Isto parte do pressuposto de que a condutividade decresce da superfície (zona aerada pela vegetação, pela vida biológica) na direção dos horizontes subjacentes (cada vez mais compactos e menos alterados).

Gradiente hidráulico invariante no tempo

Admitindo-se que o gradiente hidráulico local não varia ao longo do tempo, pode-se dizer que

$$\text{grad}(h_{i,t}) = \text{tg } \beta_i \quad \forall i \quad (3)$$

Geralmente, aproxima-se o gradiente $\text{tg } \beta_i$ para a declividade da superfície do solo (declividade topográfica), mas isto não é absolutamente necessário. Esta aproximação é bem satisfatória no caso de bacias íngremes (declividades consideráveis) ou onde a zona saturada ativa em relação à dinâmica de geração de cheia é próxima da superfície do solo (como no caso de lençol freático elevado).

Vale salientar que esta simplificação não significa que a zona saturada seja globalmente paralela à superfície do solo. Esta simplificação diz respeito ao efeito local.

Taxa constante de recarga da zona saturada

A lâmina de água que alimenta a zona saturada a montante da área de contribuição é o somatório das recargas pontuais (percolação vertical, em um ponto da bacia, da zona não saturada para a zona saturada) sobre a superfície da área de contribuição.

Devido ao estado quase estacionário, a recarga média da área de contribuição é suposta constante sobre a bacia. Esta hipótese é muito pouco provável, mas o não atendimento da hipótese induz erro muito pequeno.

Se a área de contribuição é suficientemente grande, terá uma boa amostragem dos diferentes valores possíveis de recarga pontual observada sobre a bacia por inteiro.

Com esta hipótese, tem-se

$$LE_{i,t} = a_i R_t \quad (4)$$

Sendo $LE_{i,t}$ a lâmina de água que alimenta a zona saturada e R_t a média das recargas elementares a montante.

Perfil exponencial da transmissividade

Beven e Kirkby (1979) e Beven e Germann (1982), citados por Saulnier (1996), utilizaram um perfil exponencial para a transmissividade:

$$T(d_{i,t}) = T_o e^{-\frac{d_{i,t}}{m}} \quad (5)$$

sendo $T(\)$ a transmissividade da espessura de solo sobre o qual a água escoar, T_o a transmissividade média do perfil de solo e m o parâmetro de decréscimo da condutividade em função do déficit hídrico. Beven e Germann (1982) justificaram este perfil teórico depois de medidas do perfil exponencial decrescente da condutividade na saturação com o déficit hídrico.

Estimativa dos déficits locais e de sua distribuição espacial

A profundidade do solo pode ser expressa em termos do déficit local de água em vez da altitude real. O déficit de água local é definido como sendo a lâmina de água que será infiltrada para que a zona saturada aflore na superfície do solo.

Portanto, a transmissividade da zona saturada até a profundidade passa a ser expressa em função do déficit local ($d_{i,t}$) do elemento da área de contribuição considerado.

Simplificadamente, considera que a relação entre a transmissividade e o déficit não depende do ponto da bacia. Portanto supõe o solo homogêneo. Isto não quer dizer que para dois pontos da bacia, que apresentam o mesmo déficit em um instante t eles, obrigatoriamente, tenham a mesma profundidade real da zona saturada. Eles só terão a mesma profundidade caso a função do déficit, que é uma função da profundidade real da zona saturada, seja igual para os dois pontos.

Igualando a equação 2 com a 4, introduzindo a equação 5 e explicitando o déficit, tem-se

$$d_{i,t} = -m \ln \left(\frac{a_i}{T_o \lg \beta_i} R_t \right) \quad (6)$$

Esta equação é muito importante pois formaliza a idéia principal dos modelos da família do TOPMODEL, que considera a função topografia na variabilidade espacial dos estados hídricos do solo. Portanto, dois pontos da bacia que apresentam o mesmo $a/\lg \beta$ terão a cada passo de tempo o mesmo valor de déficit local (sob reserva da hipótese de recarga espacialmente uniforme). Com isto, introduz-se a noção de pontos hidrológicamente semelhantes.

Hipóteses

Com a base conceitual descrita nos itens anteriores, pode-se enumerar as seguintes hipóteses adotadas pelos modelos da família do TOPMODEL:

- A dinâmica da zona saturada pode ser representada por sucessivos estados estacionários;
- A transmissividade do perfil de solo pode ser expressa como uma função do déficit de água;
- O fluxo subsuperficial segue a lei de Darcy;
- O gradiente hidráulico da zona saturada pode ser considerado constante no tempo, mas variável no espaço;
- A lâmina da recarga média da zona saturada de cada área de contribuição pode ser aproximada pela recarga média de todas as recargas pontuais sobre a bacia.

Relação entre o déficit local e o déficit médio da bacia

O déficit médio da bacia é calculado como sendo

$$\bar{D}_t = \frac{1}{A} \int_A d_{i,t} da \quad (7)$$

sendo $\bar{D}_t$ o déficit hídrico médio da bacia e A a área da bacia.

Para os pontos saturados tem-se o déficit local nulo e para os pontos não saturados o déficit é representado pela equação 6.

Portanto a equação 7 pode ser escrita como

$$\bar{D}_t = -\frac{A - A_{sat,t}}{A} \left[\frac{1}{A - A_{sat,t}} \int_{A - A_{sat,t}} m \ln \left(\frac{a_i}{T_o \lg \beta_i} R_t \right) da \right] \quad (8)$$

sendo $A_{sat,t}$ a área saturada.

Substituindo o perfil exponencial, e supondo que a área não saturada é muito próxima da área total, tem-se

$$\bar{D}_t = -m \bar{IT} + m \ln(T_o) - m \ln(R_t) \quad (9)$$

sendo $\bar{IT}$ o índice topográfico médio da bacia.

Subtraindo o déficit local do déficit médio, e simplificando em T_o ,

$$\bar{D}_t - d_{i,t} = -m(\bar{IT} - IT_i) \quad (10)$$

Pela equação 10 pode-se concluir que:

- A distribuição espacial do déficit local num dado instante depende essencialmente da topografia;
- Existe uma variável topográfica que permite prever a repartição do estado hídrico dos solos;
- O déficit local é relacionado com o déficit médio da bacia através de uma equação que utiliza o índice topográfico local e médio da bacia. Considerando isto, conhecendo-se o déficit médio da bacia é possível determinar o déficit local em qualquer ponto da bacia.
- A cada passo de tempo, é possível predizer quais os pontos da bacia que irão saturar por afluência da zona saturada à superfície do solo.

O ponto saturado possui déficit local nulo. Pode-se observar que

$$d_{i,t} = 0 \Rightarrow IT_i \geq \overline{IT} + \frac{\overline{D}_t}{m} \quad (11)$$

Portanto, pela equação 11 tendo-se o déficit médio da bacia, pode-se a cada passo de tempo saber quais os pontos da bacia que estão saturados, através do índice topográfico. Os pontos com índice topográfico igual ou maior que o limite estarão saturados e os pontos com índice menor que o limite não estarão saturados.

Para um dado valor limite do índice topográfico, os pontos saturados sempre serão os mesmos, pois o índice topográfico não varia no tempo. É uma característica geométrica da bacia.

Infiltração

O modelo considera que a infiltração se efetua à taxa da condutividade saturada à superfície do solo.

Para taxa de precipitação menor que a taxa da condutividade saturada, a infiltração potencial será igual à taxa de precipitação. Caso contrário, a infiltração potencial será igual à taxa da condutividade saturada.

A infiltração potencial é o valor máximo que pode alcançar a infiltração real. Caso a lâmina disponível para infiltração seja maior que a infiltração potencial, o excedente irá para o escoamento superficial.

Evaporação e interceptação

Não existe uma formulação explícita para calcular a evaporação no TOPSIMPL.

A modelagem da bacia ocorre essencialmente no período de grandes vazões, pois o modelo trabalha com eventos. Por este motivo, o modelo TOPSIMPL considera a evaporação constante durante os episódios. A evaporação é utilizada na zona radicular, reservatório radicular.

O TOPSIMPL para modelar a componente de evaporação considera a zona radicular com uma profundidade constante (parâmetro SRMax).

A taxa constante de evaporação, acrescida da interceptação, e da transpiração das plantas será um dos parâmetros do modelo (Inter).

O TOPSIMPL não considera a reinfiltração local do escoamento superficial, mesmo havendo

déficit local. O modelo considera que toda a superfície saturada contribui para a vazão da rede hidrográfica.

Afloramento da zona saturada

A rede hidrográfica supõe drenar totalmente as zonas saturadas.

Para estimar a contribuição a cada instante o modelo estima Qb_t , que é o somatório dos fluxos subsuperficiais que atingem a rede hidrográfica. O fluxo subsuperficial se exprime segundo a lei de Darcy, portanto Qb_t será calculado como

$$Qb_t = AT_o \exp\left(-\frac{\overline{D}_t}{m}\right) \exp(-\overline{IT}) \quad (12)$$

Portanto, a equação 12 estima a vazão aflorada da zona saturada através do déficit médio da bacia, não sendo necessário calcular esta vazão em cada trecho da rede de drenagem.

Através da equação 12 pode-se também estimar o estado hídrico médio da bacia no início da simulação, se considerar o início da simulação num período de recessão, então a vazão medida na seção exutória é constituída unicamente pela vazão de afloramento do lençol freático, Qb_o .

MICROBACIA DO RIACHO GAMELEIRA

O riacho Gameleira situa-se na sub-bacia do rio Tapacurá, que por sua vez é o principal afluente da margem direita do rio Capibaribe, localizado na porção sul-oriental da bacia do rio Capibaribe, figura 1. A bacia do rio Tapacurá está situada parte na Zona da Mata pernambucana e parte no Agreste.

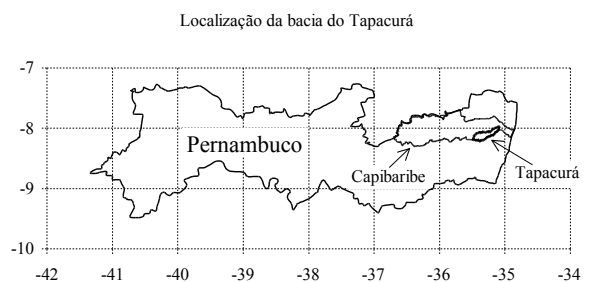


Figura 1 - Localização da bacia do rio Tapacurá.

A bacia do riacho Gameleira tem uma área de drenagem equivalente a 3,5 % da bacia do rio Tapacurá, 16,5 km². O riacho Gameleira possui um

comprimento de 33,5 km. O riacho principal é perene, tornando-se intermitente próximo de sua nascente, devido os barramentos de acumulação de água para a irrigação.

Devido aos barramentos existentes ao longo do riacho, que provocam modificações consideráveis no comportamento hidrológico da bacia, optou-se por escolher uma área onde a interferência do homem fosse a menor possível. O local onde se conseguiu essa menor interferência, aliada a razões técnicas, foi no limite da fazenda Gameleira.

Assim, a área de estudo corresponde ao segmento superior do riacho Gameleira (Alto Gameleira), que será chamada de microbacia do riacho Gameleira.

A seção exutória da microbacia escolhida está localizada na seguinte coordenada: 244.747 E e 9.105.848 N no meridiano 25.

O relevo na microbacia possui uma declividade elevada, seu ponto mais alto situa-se na cota 431 m e a seção exutória na cota 218 m.

A microbacia em estudo possui uma área de drenagem de 6,5 km². O comprimento do riacho principal é de 3,1 km, sendo a rede hidrográfica formada pelo riacho principal e 4 afluentes perenes e alguns intermitentes.

A bacia do riacho Gameleira, é ocupada principalmente por pastagem, horticultura, granjas e florestas secundárias.

Na microbacia, a ocupação do solo é devido a: mata, pastagem e horticultura.

Monitoramento

Para o monitoramento do nível do riacho foi projetada e instalada uma seção de controle na seção exutória da microbacia em abril/2001.

A maior cheia ocorreu em 1975, mas não se tem registro do nível atingido. Segundo moradores locais, em setembro/2000 ocorreu outra cheia e o nível alcançou aproximadamente 1,8 m, ocasião em que a seção de controle ainda não havia sido construída.

A seção de controle possui 3,5 m de largura, 2,4 m de altura e 1,0 m de comprimento. O fundo da seção tem um declive para o centro e o desnível das margens para o centro é de 9 cm.

Nas proximidades foi instalado o “datalogger” para armazenar as informações. O conjunto, aqui chamado de Plataforma de Coleta de Dados - PCD tem sua alimentação via bateria recarregada por um painel solar. O “datalogger” foi instalado num poste telefônico, em cota elevada para evitar que a cheia atinja o mesmo.

Foi conectado à PCD o sensor de precipitação e o de nível, que armazena os dados com intervalo de 1 minuto. O sensor de precipitação ficou no mesmo poste do “datalogger” e do painel solar. O sensor de nível ficou dentro do poço tranquilizador construído na margem direita ao lado da parede da seção, logo a jusante do sangradouro.

Na seção de controle, também foi instalado lance de régua limnimétrica para que o observador pudesse realizar a leitura 3 vezes ao dia. Esta observação foi bastante útil para verificar o bom ou mau funcionamento do sensor de nível, integrante da PCD.

Monitoramento pluviométrico

O monitoramento foi realizado de maio /2001 a dezembro/2003 e o comportamento pluviométrico mensal é mostrado na figura 2.

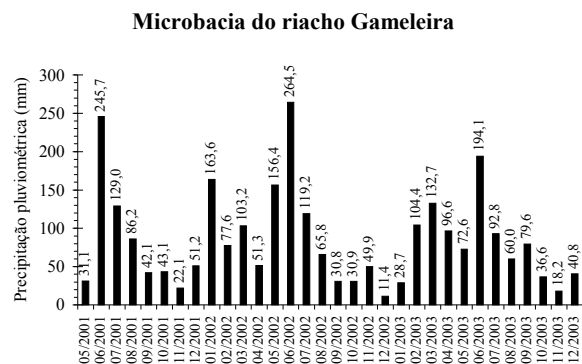


Figura 2 - Pluviometria mensal na microbacia do riacho Gameleira.

Monitoramento fluviométrico

A seção de controle serve para medir o nível do riacho e também como seção de medição para elaboração da curva chave, cota-vazão.

Devido ao formato da seção, a mesma apresenta três comportamentos distintos. No trecho inicial, a seção se comporta como um vertedouro triangular de parede espessa ($Q=\alpha(h-h_0)^{2,5}$), com cotas baixas. No último trecho, a seção se comporta como um vertedouro retangular de parede espessa ($Q=\alpha(h-h_0)^{1,5}$), com cotas altas. E no trecho intermediário, só as medições podem especificar o tipo de curva, cotas médias.

Para a elaboração da curva chave foram realizadas 58 medições de vazão a partir de 23/04/2001 até 11/07/2003. As medições cobriram da cota

5,4 cm até a cota de 34,2 cm, conforme figuras 7 e 8. O restante da curva chave foi estimada através da extrapolação dos dados das medições. No período de maio/2001 a dezembro/2003 ocorreram 23 picos de cheia que ultrapassaram a cota de 50 cm com a cota máxima em 107,3 cm.

A curva na íntegra está mostrada na figura 7. Devido à mudança de forma da seção, em cotas baixas a curva possui uma declividade diferente da obtida em cotas altas, explicado anteriormente, conforme figura 8.

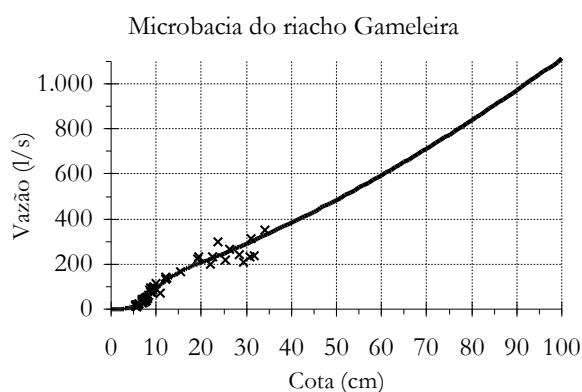


Figura 7 - Curva chave da seção de controle.

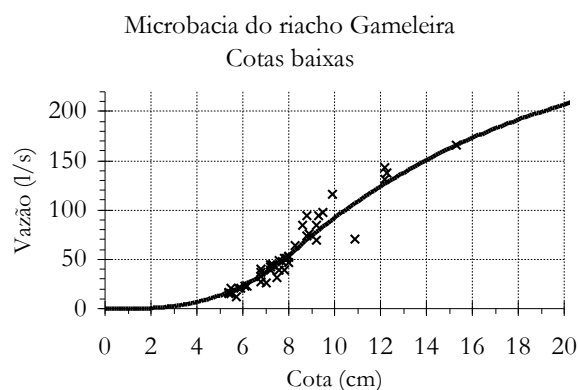


Figura 8 - Curva chave da seção em cotas baixas.

Análise do comportamento da microbacia

Para realizar a modelagem hidrológica da microbacia é de fundamental importância conhecer algumas de suas características.

Assim, a forma do hidrograma da microbacia irá nortear qual o melhor intervalo de tempo que se deve utilizar nas simulações para que todos os processos hidrológicos sejam contemplados. En-

quanto isso, o escoamento de base irá definir quantos intervalos de simulação deve-se ter para obter uma boa simulação do comportamento hidrológico da microbacia.

Hidrograma

Para caracterizar o hidrograma da microbacia do riacho Gameleira tomou-se por base alguns valores de tempo (Tucci, 1993), são eles, conforme figura 9:

- Tempo de ascensão (t_m);
- Tempo do pico (t_p);
- Tempo de concentração (t_c);
- Tempo de recessão (t_e).

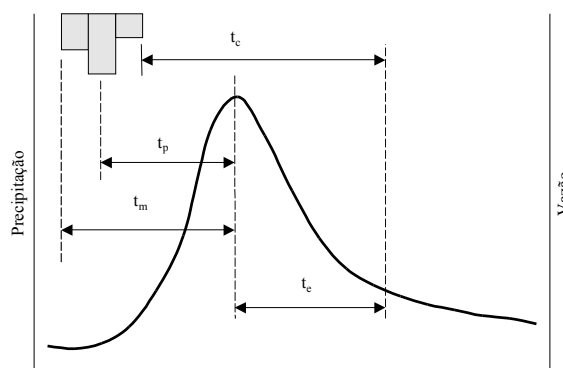


Figura 9 - Tempos que caracterizam o hidrograma.

Foram escolhidos 3 (três) eventos no período seco e 3 (três) no período chuvoso, para caracterizar o hidrograma da microbacia do riacho Gameleira.

Na tabela 2 são mostrados os tempos que caracterizam o hidrograma da microbacia. O tempo de concentração ficou entre 5 e 8 h, sendo que a média foi de 7:25 h.

Tabela 2 - Características do hidrograma.

Data	Precipitação		Pico m ³ /s	t_m (h)	t_p (h)	t_c (h)	t_e (h)
	(h)	(mm)*					
15/12/01	0:49	14,9	0,3336	1:16	0:59	7:25	6:44
06/01/02	3:59	36,5	1,4234	0:56	0:39	7:58	11:01
10/02/02	1:16	20,9	0,3074	1:58	1:21	7:06	6:24
23/03/02	0:51	14,7	0,3325	1:37	1:22	5:41	4:36
09/06/02	2:17	17,6	1,2188	1:05	0:48	8:21	9:33
24/03/03	0:20	16,3	1,0641	0:47	0:38	8:01	7:34

* Até o pico de vazão.

Para os eventos de grande magnitude, o tempo de ascensão ficou em torno de 0:56 h e o de pico, 0:41 h. Enquanto que para os eventos de pequena magnitude foi de 1:37 h e 1:14 h, respectivamente.

No período chuvoso o tempo de recessão foi acima de 7 h, enquanto que no período seco não ultrapassou este limite.

Escoamento subterrâneo

O escoamento subterrâneo tem um importante papel nesta bacia. Durante os 34 meses aqui descritos, o riacho sempre apresentou vazão na seção de controle. Reforçando assim a informação de moradores da área, de que o riacho nunca secou. No período de pesquisa, mesmo nos meses de 11/01, 12/02 e 11/03 com 22,1, 11,4 e 18,2 mm, respectivamente, o riacho não secou.

Como o período chuvoso de 2002 foi acima da média, pode-se observar que no dia 05/06/02 a cota era de 5,6 cm antes da chuva e só veio a retornar a este patamar no dia 25/11/02, portanto foram mais de 5 meses para a cota voltar ao ponto inicial. Fazendo uma análise deste comportamento pode-se ressaltar dois pontos:

- O período chuvoso terminou em julho e a cota retornou ao patamar em que se encontrava no início do período chuvoso em novembro, portanto pode-se concluir que a precipitação do período chuvoso contribuiu para o aumento da vazão na calha até 4 meses após o final do período chuvoso.
- Nas precipitações fora do período chuvoso e no início do mesmo, março e maio, verifica-se uma influência da precipitação no escoamento subterrâneo por cerca de 7 dias.

Com isto, pode-se concluir que o escoamento subterrâneo é influenciado por precipitações que ocorrem até 7 dias antes, no mínimo.

Foi constatado na bacia a existência de algumas cacimbas que são utilizadas pelos moradores para o abastecimento humano e/ou animal, possuindo profundidade entre 50 cm e 1 m. Elas são construídas fazendo-se um corte no talude com pouca profundidade (em torno de 1,5 m) e depois é colocado uma manilha de 80 cm de diâmetro, por exemplo, passando a uns 20 cm acima do corte. Estas cacimbas passam vários meses vertendo, confirmando a indicação do nível de saturação do solo.

MODELAGEM DA MICROBACIA

Para a calibração do modelo TOPSIMPL na microbacia do riacho Gameleira foram escolhidas 4 cheias, Tabela 3. A escolha destas cheias deveu-se ao fato delas não terem tanta influência das chuvas anteriores que fazem com que exista um escoamento de base durante muito tempo. Com isto evitou-se utilizar métodos empíricos para a separação do escoamento de base anterior ao evento e o escoamento ocorrido devido ao evento chuvoso em estudo. Outro fator que influenciou esta decisão, foi que as medições realizadas abrangem as cheias escolhidas, garantido uma melhor representação da forma da cheia.

O ajuste da vazão simulada pelo modelo e a vazão observada, vão depender do objetivo que se deseja dar a calibração do modelo. Para isso foram utilizadas duas funções objetivos, a função chamada de FO3 e o coeficiente Nash, Tabela 4.

Tabela 3 - Característica dos eventos.

	Intervalos	Período		Prec. (mm)	Escoam.	
		Início	Final		Total (mm)	Pico (l/s)
1	258	15/12/01 07:45	17/12/01 24:00	24,6	1,1	314
2	111	03/02/02 20:30	04/02/02 24:00	22,9	0,8	256
3	92	10/02/02 11:15	11/02/02 10:00	21,6	0,6	293
4	248	23/03/02 10:15	25/03/02 24:00	15,2	1,3	316

O coeficiente de Nash e Sutcliffe, medida de eficiência, considera o erro percentual em relação à média e a função FO3 dá pesos iguais às vazões altas e baixas.

Tabela 4 - Função objetivo.

Função objetivo	Fórmula	Valor
Coef. Nash	$1 - \sum \frac{(Q_c - Q_o)^2}{(Q_o - \bar{Q}_o)^2}$	0,8802
FO3	$\frac{1}{n} \sum \ln Q_c - \ln Q_o $	0,1448

Para um bom ajuste a função FO3 deve ser próxima de zero e o coeficiente Nash, próximo de 1. Os parâmetros encontrados para cada calibração são mostrados na tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros calibrados.

Tipo de função	Parâmetro				Valor da função
	m (m)	Ko (m/h)	Inter (m/h)	SRMax (m)	
FO3	0,0197	29,5	0,00021	0,0084	0,1448
Nash	0,0265	36,5	0,00016	0,0063	0,8802

Além disso, calculou-se o coeficiente de correlação. Nas duas calibrações o coeficiente de correlação de cada evento foi maior que 0,93, mostrando uma boa correlação entre as vazões.

As figuras 10 a 13 mostram o ajuste da vazão simulada com a observada. Verifica-se que o instante do pico de vazão foi calculado com precisão e os valores da vazão foram obtidos com razoável precisão.

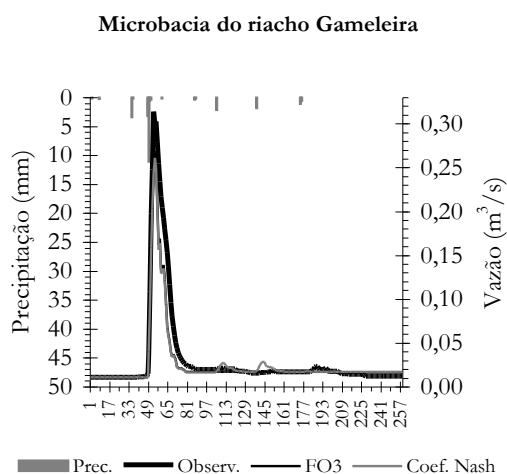


Figura 10 - Ajuste do evento 1 com os valores calibrados.

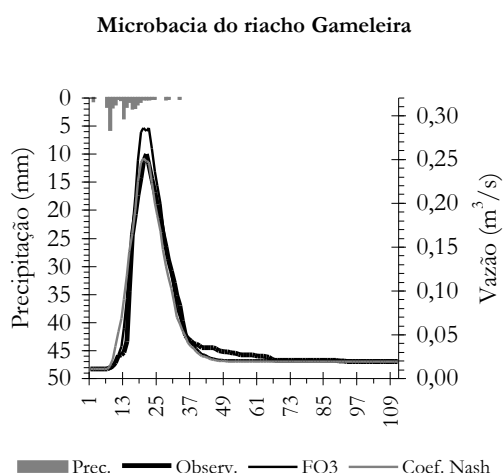


Figura 11 - Ajuste do evento 2 com os valores calibrados.

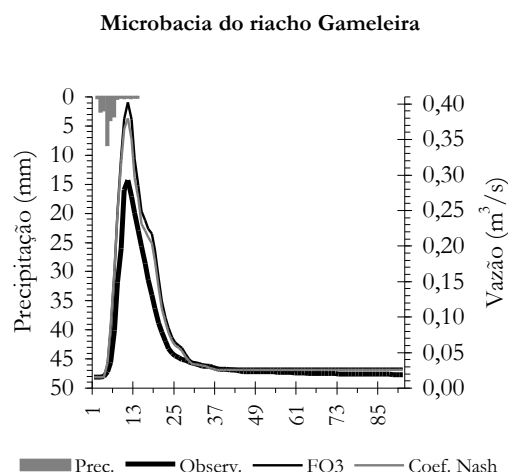


Figura 12 - Ajuste do evento 3 com os valores calibrados.

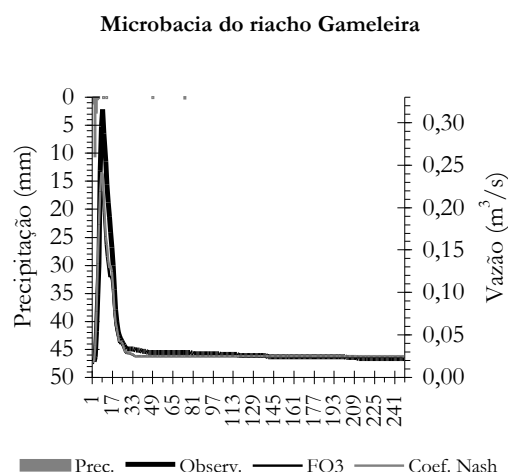


Figura 13 - Ajuste do evento 4 com os valores calibrados.

Para a validação foram escolhidos 3 (três) conjuntos formados por vários eventos chuvosos. O primeiro inicia em 08/01/02 08:30 a 13/01/02 24:00 (evento 5), 63,5 mm; o segundo de 26/06/01 03:30 a 29/06/01 24:00 (evento 6), 52,4 mm, e o terceiro, de 06/02/02 00:30 a 09/06/02 07:30 (evento 7), 71,6 mm, figura 14 a 16.

Tanto os parâmetros calibrados para as funções objetivos FO3 e coeficiente Nash mostraram um bom ajuste da hidrógrafa simulada em relação à observada, no entanto o escoamento de base não ficou bem ajustado.

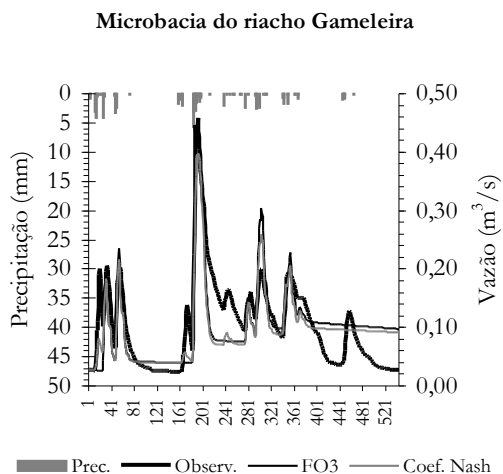


Figura 14 - Simulação com os parâmetros calibrados, validação com os dados do evento 5.

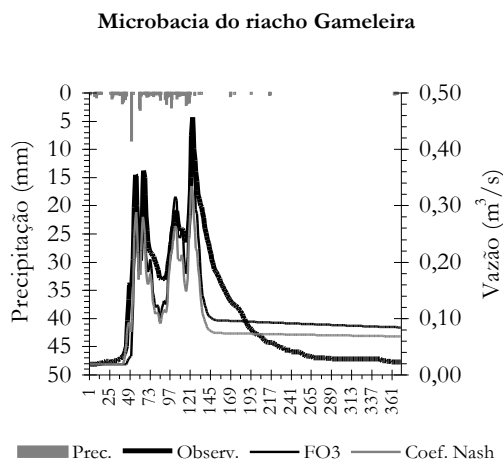


Figura 15 - Simulação com os parâmetros calibrados, validação com os dados do evento 6.

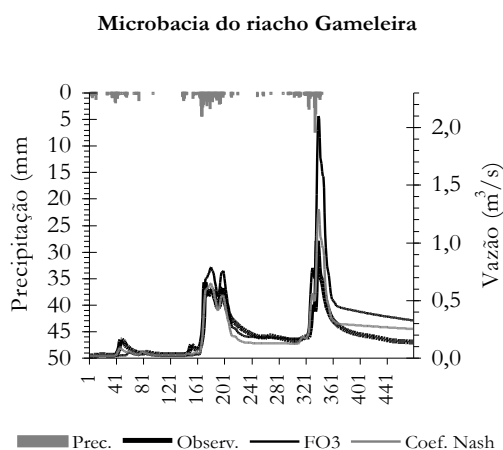


Figura 16 - Simulação com os parâmetros calibrados, validação com os dados do evento 7.

Na validação a forma da hidrógrafa foi bem representada tanto no conjunto de eventos chuvosos no período seco (evento 5) como no período chuvoso (eventos 6 e 7).

CONCLUSÕES

Os resultados do TOPSIMPL, versão simplificada do TOPMODEL, aplicado à microbacia do riacho Gameleira, ajustaram-se bem ao hidrograma medido, quanto à forma da resposta da bacia a um evento pluviométrico. O horário do pico de vazão foi calculado com precisão, a vazão máxima foi obtida com boa precisão, no entanto para as vazões de base após a recessão o ajuste não foi muito bom.

Levando em conta a experiência obtida durante o planejamento, construção e operação do sistema de aquisição de dados, incluindo o conjunto de decisões e de tarefas essenciais para o desempenho completo do estudo, podem ser feitas as seguintes considerações:

- A bacia em estudo no riacho Gameleira se mostrou adequada para a aplicação do modelo TOPSIMPL, levando-se em conta que a mesma apresenta topografia ondulada, cobertura vegetal diversificada, possui área de bom tamanho (6,4 km²) e o riacho é pere-ne;
- As medições de nível com intervalos de 1 minuto, precisão de $\pm 0,35$ cm (equivalente a 0,05 lb/pol² no transdutor de pressão) e com armazenamento no “datalogger” ao longo de 34 meses, forneceram uma massa de dados de grande confiabilidade e com muita riqueza de detalhes as variações da superfície livre do riacho; as leituras de nível na régua, realizadas pelo observador, três vezes ao dia ao longo desse tempo, foram bastante úteis para a verificação do funcionamento adequado do transdutor de pressão e conseqüentemente da medição automática dos níveis;
- As medições de vazão utilizando molinete no total de mais de 58 medições de vazão em diferentes épocas do ano, abrangendo uma grande faixa de vazões, asseguraram uma boa calibração da curva cota-vazão;
- A forma da seção de controle (triangular nas cotas baixas e retangular em cotas médias e altas) se mostrou adequada e favoreceu a precisão da leitura dos níveis e cálculo das vazões em cotas baixas;

- O dispositivo montado com o “datalogger” e o painel solar armazenou de maneira satisfatória os dados digitais obtidos pelos sensores. A altura em que os equipamentos foram colocados evitou as ações de vandalismo que têm ocorrido em outros locais.

Como um futuro ramo de pesquisa sugere-se alguns aspectos que devem ser mais estudados:

- 1) considerar que a área de contribuição possa ter um limite máximo de superfície, para que toda a área contribua no mesmo intervalo de tempo de simulação, com isto o índice topográfico passa a ser uma função do intervalo de simulação;
- 2) Em uma bacia com cobertura vegetal diferenciada, incluir uma distribuição espacial da capacidade de armazenamento da zona radicular em função da cobertura vegetal.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da FINEP para a montagem do sistema de aquisição dos dados e ao CT-Hidro pelo apoio para operação e manutenção do sistema. O primeiro autor agradece o apoio do IPA, da CAPES e do LTHE que possibilitaram o estágio sanduíche na França para o desenvolvimento da parte computacional. Agradecimento especial também ao professor Ricardo Braga pelo fornecimento de importantes informações sobre a bacia do Tapacurá.

REFERÊNCIAS

- BEAUJOUAN, V.; DURAND, P.; RUIZ, L. Modelling the effect of the spatial distribution of agricultural practices on nitrogen fluxes in rural catchments. *Ecological modelling*, v. 137, p. 93-105. 2001.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Scienc Bulletin*, v. 24, p. 43-69. 1979.
- BEVEN, K. J.; GERMANN, P. Macropores and water flow in soils. *Water Research Researches*, v. 18, p. 1311-1325. 1982.
- DATIN, R. *Outils opérationnels pour la prévision des crues rapides: traitement des incertitudes et intégration des prévisions météorologiques. Développements de TOPMODEL pour la prise en compte de la variabilité spatiale de la pluie. Application au bassin versant de l'Ardèche*. 1998. 369 f. Tese, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble - França, 1998.
- ENGEL, V. C.; STIEGLITZ, M.; WILLIAMS, M.; GRIFFIN, K. L. Forest canopy hydraulic properties and catchment water balance: observations and modeling. *Ecological Modelling*, v. 154, p. 263-288. 2002.
- MACHADO, M. L. *Modelagem hidrológica de fluxo na bacia representativa de Juatuba*. 2000. 240 f. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2000.
- MAIA, A. L. *Comparação de modelos geradores de função de produção com base no método DPFT: um estudo de caso para a bacia representativa de Juatuba*. 2001. 250 f. Dissertação, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte - MG, 2001.
- MINE, M. R.; CLARKE, R. O uso do TOPMODEL em condições brasileiras: resultados preliminares. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 1, n. 2, p. 89-105. 1996.
- MORAES, J. M.; SCHULER, A. E.; GUANDIQUE, M. E. G.; MILDE, L. C.; GROPPPO, J. D.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Propriedades físicas dos solos na parametrização de um modelo hidrológico. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 1, p. 61-70. 2003.
- PELLENQ, J.; KALMA, J.; BOULET, G.; SAULNIER, G.-M.; WOOLDRIDGE, S.; KERR, Y.; CHEHBOUNI, A. A disaggregation scheme for soil moisture based on topography and soil depth. *Journal of Hydrology*, v.276, p. 112-127. 2003.
- SANTOS, I. *Modelagem geobiohidrológica como ferramenta no planejamento ambiental: estudo da bacia hidrográfica do rio Pequeno, São José dos Pinhais*. 2001. 92 f. Dissertação, Universidade Federal do Paraná, Curitiba - SP, 2001.
- SAULNIER, G.-M. *Information pédologique spatialisée et traitements topographiques améliorés dans la modélisation hydrologique par TOPMODEL*. 1996. 275 f. Tese, Institut National Polytechnique de Grenoble, Grenoble - França, 1996.
- SAULNIER, G.-M.; DATIN, R. Analytical solving of a bias in the TOPMODEL framework water balance. *Hydrological Processes*, v. 18, n. 7, p. 1195-1218. 2004.
- SCHULER, A. E. *Aplicação do TOPMODEL em uma bacia de mesoescala situada na cabeceira do rio Corumbataí*. 1998. 122 f. Dissertação, Universidade de São Paulo, São Paulo - SP, 1998.
- TAKATA, K.; EMORI, S.; WATANABE, T. Development of the minimal advanced treatments of surface interaction and runoff. *Global and Planetary Change*, v. 38, p. 209-222. 2003.

- TUCCI, C. E. M. Escoamento superficial. In: *Hidrologia ciência e aplicação*. Porto Alegre - RS: Ed. da Universidade: ABRH: EDUSP, 1993. c. 11, p. 391-441.
- VARELLA, R. F. *Simulação matemática do processo de transformação chuva em vazão: estudo do modelo TOPMODEL*. 1998. Dissertação, Universidade de Brasília, Brasília - DF, 1998.
- ZAKIA, M. J. B. *Identificação e caracterização da zona ripária em uma microbacia experimental: implicações no manejo de bacias hidrográficas e na recomposição de matas nativas*. 1998. 99 f. Tese, Universidade de São Paulo, Piracicaba - SP, 1998.

Hydrological Modeling of Gameleira stream (Pernambuco, Brazil) using TOPSIMPL, a simplified version of TOPMODEL

ABSTRACT

The hydrological model TOPSIMPL presents similar characteristics to TOPMODEL, but uses only 4 parameters. Hydrological modeling with TOPSIMPL uses the Digital Elevation Model and takes into account the effective upstream contributing area of each cell and the soil slope to calculate a topographical index that represents the potential for saturating each cell. River basin flow is calculated based on rainfall, state of water saturation and water deficit for each cell. TOPSIMPL was applied to the Gameleira river basin, a tributary of Tapacurá river in Pernambuco (Brazil). A Digital Elevation Model was calculated, a data acquisition system was installed, rainfall and flow rate were recorded minute-by-minute for 34 months. Calibration and validation of TOPSIMPL were performed for a few rainfall periods in the Gameleira basin and the results showed a good representation of output flow.

Key words: TOPSIMPL, TOPMODEL, Digital Model of the Terrain, Hydrologic Monitoring