



Simulação do deflúvio e vazão de pico em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero¹

Carlos R. Mello², José M. Lima³ & Antônio M. da Silva²

RESUMO

A predição da resposta hidrológica em microbacias hidrográficas a partir de diferentes usos do solo é de fundamental importância para nortear ações de manejo ambiental, razão por que se objetivou, neste trabalho, desenvolver, em primeira mão, uma modelagem hidrológica para prever o deflúvio total e a vazão de pico em uma microbacia hidrográfica experimental, de escoamento efêmero, ocupada por eucalipto e pastagem, e após esta etapa, aplicá-la a diferentes cenários de ocupação da microbacia por ambas as coberturas vegetais, estimando-se as respostas hidrológicas das situações simuladas. O monitoramento hidrológico foi realizado entre novembro/02 e abril/03, por meio de estação meteorológica e calha Parshall, conjugada a linígrafo automático. A umidade do solo foi monitorada a cada 2 dias, em 3 profundidades (20, 50 e 80 cm), em 8 pontos na área ocupada por pastagem e 4 na área com eucalipto. A modelagem mostrou-se precisa e eficaz aos objetivos propostos de predição em diferentes cenários de uso e ocupação do solo. Verificou-se que, se a microbacia for ocupada por 80% de eucalipto, haverá redução do deflúvio em 29%, constatando-se ainda, redução substancial da vazão de pico; verificou-se também que a umidade do solo é fundamental no processo, especialmente para pequenas vazões, no início e no final do período chuvoso e após veranicos e que, para vazões mais elevadas, as características da precipitação são determinantes.

Palavras-chave: hidrologia, uso do solo, umidade do solo

Surface runoff and peak discharge simulation in ephemeral watershed

ABSTRACT

The prediction of hydrological responses in a microbasin from different soil uses is of fundamental importance to develop actions to minimize environmental impacts. This work aimed to develop and to apply hydrological modeling for predicting surface runoff and peak discharge in experimental tropical ephemeral watershed occupied by eucalyptus and grasses, creating different soil use scenarios. Hydrological monitoring was performed between November/2002 and April/2003, using, respectively, gauge and climatologically stations. Soil moisture was monitored every 2 days, at 3 depths (20, 50 and 80 cm), at 8 distributed spatial points in the grass area and 4 points in the eucalyptus area. The modeling has presented a high precision, thereby showing to be very effective for application for the proposed goals. In scenarios which eucalyptus area is larger than the grass area there will be surface runoff reduction of up to 29%, when the microbasin would be occupied by 80% of this vegetable cover. Also, a substantial reduction in peak discharge was verified. The modeling showed itself to be precise and effective in relation to the proposed prediction objectives in different scenarios of soil use and occupation. It was verified that, if the microbasin was occupied by 80% eucalyptus, there would be a reduction in surface runoff of 29%, and furthermore, a substantial reduction in peak discharge. Also verified was that soil water is fundamental in the process, especially for small flows, at the beginning and end of the rainy period and after short dry seasons and that, for higher flows the rainfall characteristics are determinant.

Key words: hydrology, soil use, soil moisture

¹ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor, apresentada à UFPA

² DEG/UFPA, CP 3037, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3829-1386. E-mail: crmello@ufpa.br, bolsista CNPq; E-mail: marciano@ufpa.br

³ DCS/UFPA, Fone: (35) 3829-1332. E-mail: jmlima@ufpa.br, bolsista CNPq

INTRODUÇÃO

O uso e manejo do solo formam um conjunto de atividades fundamentais para o desenvolvimento agrícola, em especial para regiões tropicais; essas atividades têm caracterizado e norteado o comportamento de todo o ecossistema da bacia hidrográfica. Entender o comportamento do ciclo hidrológico nessas unidades fisiográficas, em função de diferentes usos e manejos do solo, é um dos grandes desafios da hidrologia, sobretudo em microbacias hidrográficas que possuem comportamento hidrológico efêmero, ou seja, a presença do escoamento somente é verificada durante ou logo após a ocorrência da precipitação. O comportamento hidrológico de microbacias hidrográficas efêmeras constitui-se de um ambiente pouco explorado uma vez que sua existência vem aumentando nos últimos anos, especialmente nas regiões tropicais e subtropicais, dentre outras o Sudeste e Sul do Brasil e da Austrália, e algumas regiões ao Sul de Portugal e Espanha, fruto dos seguintes aspectos: uso e manejo inadequados do solo e fenômenos climáticos globais, que alteram o regime das chuvas, comprometendo a recarga de aquíferos e impossibilitando a existência de escoamento subterrâneo (Castillo et al., 2003; Tucci, 2003; Croker et al., 2003).

Desta forma, emerge a importância do desenvolvimento de modelos físico-matemáticos que sejam capazes de prever as respostas hidrológicas da microbacia, mediante diferentes cenários de uso e ocupação do solo, para nortear ações ambientais visando à minimização de impactos (Ashby, 1999; Bonell & Balek, 1993).

Segundo Tucci (1998) e Fendrich (1984) os modelos hidrológicos são divididos em conceituais, semi-conceituais e empíricos; todos apresentam vantagens e desvantagens, sendo essas últimas associadas à elevada quantidade de parâmetros calibráveis, além de alta variabilidade natural dos mesmos em escala de bacias hidrográficas, para os modelos conceituais e essencialmente físicos; as desvantagens se relacionam à dificuldade de aplicação para outros cenários de uso do solo e clima, para os essencialmente empíricos, os quais não contemplam parâmetros ligados à gênese do escoamento superficial.

Propõe-se, portanto, com este trabalho: i) desenvolver uma modelagem híbrida físico-matemática, com base no ajuste de modelos lineares obtidos por regressão múltipla, cujas variáveis independentes são fundamentais para explicação do fenômeno de escoamento (deflúvio e vazão de pico); ii) uma vez constatada sua aplicabilidade, simular o comportamento do escoamento superficial de uma microbacia hidrográfica experimental, mediante diferentes cenários de uso do solo, uma vez que, modificando-se a proporção de uso do solo por uma cobertura vegetal, haverá modificação das condições de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação e ocorrendo diferentes influências na interceptação pelo dossel.

MATERIAL E MÉTODOS

Características morfométricas e monitoramento hidrológico da microbacia

A microbacia hidrográfica experimental monitorada está

localizada a 11 km da cidade de Lavras, sul de Minas Gerais, entre as coordenadas UTM 496817E – 496982E e 7658285N – 7658440N, cuja área é de 1,30 ha, dos quais 20% ocupados por eucalipto (*Eucalyptus grandis*), com idade aproximada de 7 anos e 80% por braquiária (*Brachiaria decumbens*). Os solos da microbacia se constituem de Cambissolo Háptico Tb Distrófico, em aproximadamente 90% da área e Gleissolo Háptico Tb Distrófico, nos outros 10%. A microbacia não possui curso d'água perene e/ou intermitente, sendo hidrologicamente caracterizada como de escoamento efêmero; sua rede de drenagem apresenta comprimento do curso d'água principal igual a 156 m, com talvez de 147,6 m, produzindo um curso d'água pouco sinuoso e declividade média de 17,31%, com drenos de 3ª ordem, pela classificação de Horton. A declividade média da microbacia é de 17,44%, variando de 5,86 a 32,64%. O clima da região, pela classificação de Köppen, é uma transição Cwb para Cwa (Nimer, 1989). Esta microbacia é uma unidade física que representa, tanto em termos fisiográficos (solo, cobertura vegetal e topografia) quanto de sua ocupação e uso atual, a realidade das pequenas propriedades rurais da região Sul de Minas Gerais.

Os dados climatológicos foram monitorados por uma Estação Meteorológica programada para obtenção dos dados a cada 10 min. Este intervalo de tempo das leituras foi adotado pelo fato do tempo de concentração da microbacia se constituir de um valor entre 5 e 20 min, conforme análise prévia do mesmo por meio de hidrógrafas. Esta estação foi, primeiro, testada e calibrada com dados do posto meteorológico do 5º Distrito de Meteorologia, indicando boa aproximação dos resultados. Consideraram-se, como eventos chuva – vazão, todas as precipitações que produziram resposta da microbacia em termos de geração e produção do deflúvio, sem estabelecer duração específica entre uma chuva e outra.

O deflúvio superficial foi monitorado por uma calha Parshall, em cujo ponto de leitura foi construído um poço tranquilizador para instalação de um linógrafo automático, programado para fornecer um nível d'água a cada 10 min. Foram geradas as hidrógrafas de cada evento e, a partir delas, o deflúvio total e vazão de pico. O monitoramento dos dados foi feito entre novembro/02 e abril/03, totalizando 50 eventos. Para monitoramento da umidade do solo foram instalados blocos de resistência elétrica, que fornecem leituras de tensão da água no solo (Irmak & Haman, 2001), em 12 pontos na microbacia, nas profundidades de 20, 50 e 80 cm, sendo 8 na área ocupada por pastagem e 4 na área plantada com eucalipto. Amostras em cada ponto e profundidade foram coletadas para determinação das respectivas curvas características; os dados de tensão também o foram a cada 2 dias, convertidos em umidade volumétrica e transformados em umidade relativa do perfil do solo, segundo Brandes & Wilcox (2000):

$$\theta = \frac{(\theta_v - \theta_r)}{(\theta_s - \theta_r)} \quad (1)$$

em que: θ_r é a umidade residual (PMP), θ_s , a umidade de saturação e θ_v a umidade volumétrica média no perfil do solo.

Modelagem hidrológica baseada no método CN-SCS

O parâmetro abstração inicial da precipitação, de acordo com Suarez (1995), é definido como sendo o total precipitado entre o início da precipitação e o início do escoamento superficial, fundamental para aplicação do Método CN-SCS (Mello et al., 2003); assim, para cada evento monitorado foi possível determiná-lo diretamente da combinação hidrógrafa-hietograma. A equação geral do método CN-SCS para determinação do deflúvio, é a seguinte:

$$ES = \frac{(P - Ai)^2}{(P - Ai + S)} \tag{2}$$

em que ES é o deflúvio superficial (mm), P a precipitação (mm), Ai a abstração da precipitação (mm) e S o armazenamento potencial do solo (mm). Dispondo-se do deflúvio, da precipitação e da abstração inicial, é possível se obter, pela Eq. 2, o armazenamento potencial (S). Com os valores de S, os respectivos números da curva (CN) foram gerados para cada um dos eventos hidrológicos, com base na Eq. 3:

$$CN = \frac{25400}{S + 254} \tag{3}$$

A partir de então, foi possível estabelecer relações de causa-efeito entre Ai e CN e as variáveis hidrológicas precipitação total (P), intensidade média da precipitação (I), intensidade máxima de 10 min (I10), tempo em que a intensidade máxima da precipitação ocorreu (ti), duração da precipitação (Dc) e umidade média do solo, na microbacia antecedente à ocorrência da precipitação (θ̄). A vazão de pico foi modelada com base nos modelos gerados para o deflúvio (Ai e CN, aplicados à Eq. 2) e nas concepções do Hidrograma Unitário Triangular (HUT/SCS).

O parâmetro tr/ta, que expressa a relação entre o tempo de recessão e o tempo de ascensão da hidrógrafa, foi determinado aproximando-se as hidrógrafas monitoradas a um triângulo, conforme previsto pelo método. Pela Figura 1 avalia-se que, combinando as áreas dos triângulos ABC e BCD,

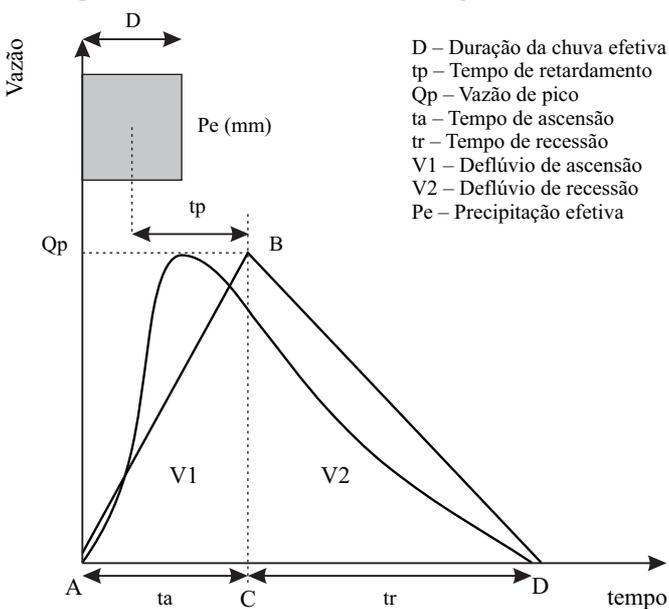


Figura 1. Representação do HUT/SCS

pode-se fazer tr/ta igual a V2/V1. O deflúvio de ascensão da hidrógrafa (V1) foi calculado com base nos valores de ta e vazão de pico medidos a partir da respectiva hidrógrafa monitorada. O deflúvio V2 foi calculado pela diferença entre o deflúvio total observado e V1.

A estrutura geral da modelagem está representada pelo fluxograma da Figura 2, cuja vazão de pico é obtida a partir da seguinte dedução:

$$\frac{tr}{ta} = \frac{V2}{V1} \tag{4}$$

$$\frac{tr}{ta} = \frac{(ES - V1)}{V1} = \frac{ES}{V1} - 1 \tag{5}$$

$$\frac{ES}{V1} = \frac{tr}{ta} + 1 \tag{6}$$

$$V1 = \frac{(ta \cdot Qp)}{2} \tag{7}$$

$$Qp = \frac{2 \cdot ES}{\left(\frac{tr}{ta} + 1\right) \cdot ta} \tag{8}$$

Ajustaram-se modelos matemáticos lineares semi-conceituais para abstração inicial, número da curva, tr/ta e ta, com base na umidade relativa antecedente aos eventos de precipitação do perfil do solo e características da precipitação, mencionadas anteriormente, trabalhando-se com o Programa SAS for Windows (Statistical Analyses System, 1985), com o procedimento “ProcReg” (regressão múltipla por mínimos quadrados) e rotina “Backward”, a qual seleciona as variáveis significativamente diferentes de zero de acordo com o nível de significância adotado que, no caso, foi de 10%. Para avaliação dos modelos individualmente, foram considerados o coeficiente de determinação e a significância dos

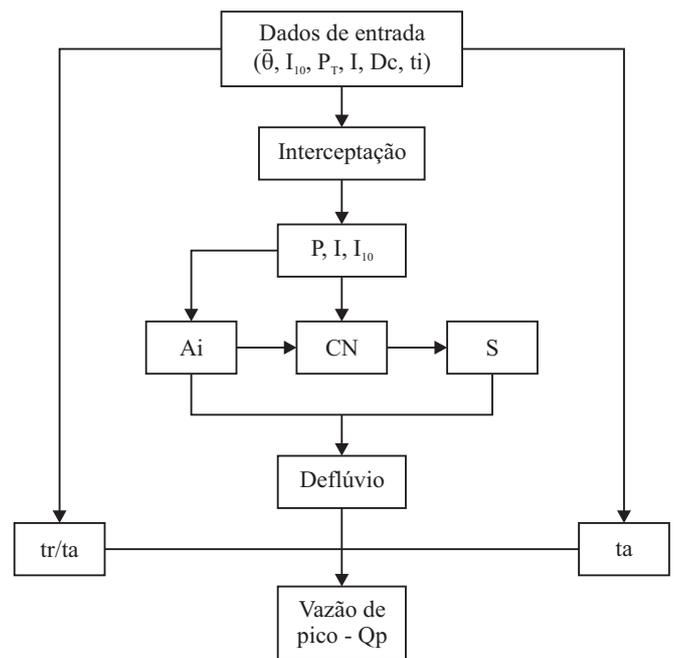


Figura 2. Fluxograma da modelagem desenvolvida para previsão do deflúvio e vazão de pico

parâmetros estimados para cada variável e a modelagem foi avaliada com base no Coeficiente de Nash e dispersão dos valores preditos e medidos em torno da reta 1:1.

$$R2 = 1 - \frac{\sum(Q_{obsi} - Q_{esti})^2}{\sum(Q_{obsi} - \bar{Q}_{obsi})^2} \quad (9)$$

em que Q_{obsi} corresponde à vazão ou deflúvio observado, Q_{esti} se refere à vazão ou deflúvio estimado e \bar{Q}_{obsi} à vazão ou deflúvio observado médio. Se R2 entre 0,36 e 0,75, o modelo é classificado aceitável; acima de 0,75 adequado e igual a 1, modelo perfeito (Gottschalk & Motovilov, 2000).

O módulo de interceptação foi incorporado ao modelo trabalhando-se com uma equação desenvolvida por Lima (1996), específica para eucalipto na região de Piracicaba, SP, cujos classificação climática e regime pluviométrico são semelhantes aos do local de realização deste trabalho; desta forma, a precipitação interna (PI) nas áreas com eucalipto foi calculada por:

$$PI = 0,89 \times P_T - 0,53 \quad (10)$$

em que P_T corresponde à precipitação total incidente no dossel, monitorada pela estação climatológica instalada na área de pastagem. Obteve-se a precipitação total incidente na microbacia ponderando-se as respectivas áreas de ocupação de cada cobertura vegetal:

$$P = \frac{A_{Euc} \times PI + A_{Past} \times P_T}{A_{BH}} \quad (11)$$

Cenários projetados e aplicação do modelo

Cenários de ocupação da microbacia foram projetados combinando-se as áreas de ocupação por eucalipto e pastagem, em relação ao cenário atual. A idéia central é de que alterações na cobertura vegetal promovem modificações no comportamento da umidade do solo, influenciando a geração do escoamento; além disto, haverá alteração na interceptação pelo dossel à medida que a área ocupada por eucalipto aumente; desta forma, a umidade média do solo na microbacia foi calculada em função das áreas de ocupação de cada cobertura vegetal, a qual proporciona um comportamento de umidade do solo média de cada situação, posteriormente aplicadas ao modelo:

$$\bar{\theta} = \frac{A_{Euc} \times \frac{\sum_{i=1}^n \theta_{ei}}{n} + A_{Past} \times \frac{\sum_{i=1}^m \theta_{pi}}{m}}{A_{BH}} \quad (12)$$

em que θ_{ei} e θ_{pi} são, respectivamente, a umidade relativa média no perfil do solo, no ponto i, da área de eucalipto e pastagem (Eq. 1), e n e m, correspondem ao número de tensiômetros da área de eucalipto e pastagem, respectivamente.

Os cenários trabalhados, foram: microbacia com 100% de pastagem e 0% de eucalipto (cenário 1); 50% de pastagem e 50% de eucalipto (cenário 2); 30% de pastagem e 70% de eucalipto (cenário 3) e 20% de pastagem e 80% de eucalipto (cenário 4). Não foi possível criar um cenário com área ocupada por eucalipto superior a 80%, devido aos baixos

valores de umidade do solo na microbacia nesta situação, com a modelagem não respondendo, de forma coerente, a esses valores. As comparações foram feitas em função das condições atuais de uso do solo, analisando-se as respostas hidrológicas e alguns comportamentos específicos. Desenvolveram-se gráficos relacionando-se as vazões de pico atuais e as diferenças relativas absolutas para uma análise melhor das respostas hidrológicas da microbacia aos cenários projetados (Brath & Montanari, 2003). As diferenças absolutas foram calculadas da seguinte forma:

$$E = \frac{|Q_C - Q_{atual}|}{Q_{atual}} \quad (13)$$

em que Q_C corresponde à vazão de pico prevista em cada cenário projetado e Q_{atual} a seus valores na situação de uso atual do solo.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de consistência da modelagem

Os modelos desenvolvidos são do tipo semi-conceituais, de acordo com as definições de Fendrich (1984) e Tucci (1998). A variável de entrada fundamental neste contexto é a umidade do solo, na forma relativa, como se observa pelos estudos de correlação constantes da Tabela 1, verificando-se a importância que esta variável exerce na geração do deflúvio e vazão de pico, sendo significativa em todas as profundidades analisadas e sua aplicação à modelagem desenvolvida se torna fundamental.

Tabela 1. Correlações entre as variáveis associadas ao escoamento e à umidade média do solo, em cada profundidade e no perfil do solo

Variáveis	θ_{20cm}	θ_{50cm}	θ_{80cm}	θ_{perfil}
Deflúvio	0,437*	0,439*	0,520**	0,478*
Qp	0,421*	0,444*	0,497*	0,467*
CN	0,530**	0,480*	0,534**	0,530**
Ai	-0,320*	-0,430*	-0,490*	-0,430*

* Significativo a 10%; *Significativo a 5%; **Significativo a 1%

A variável que obteve correlações mais significativas foi o Número da Curva (CN), sendo esta fundamental para o sucesso na aplicação do método, havendo significância estatística a 1% de probabilidade. A correlação positiva significa que ocorrerá menor valor de S (armazenamento potencial do solo) e, por sua vez, maior deflúvio (Eq. 2), mostrando forte relação de causa-efeito entre as variáveis e que um modelo estatístico pode ser desenvolvido. A abstração da precipitação apresentou correlação negativa e significativa a 5% de probabilidade significando que, quanto maior a umidade do solo, menor a abstração, pois haverá menor capacidade do solo em absorver água e, por consequência, menor abstração, uma vez que a geração desta está intimamente ligada à capacidade do solo em absorver água.

Os modelos ajustados estão apresentados na seqüência. Observam-se coeficientes de determinação elevados (> 0,87), com as variáveis testadas, significativas a 5% de probabilidade

pelo teste “t”, com poucas exceções, as quais produziram melhoria do coeficiente de determinação, apesar da baixa significância estatística, não se recomendando sua retirada (Charney et al., 1999). Apresentam-se, na Figura 3, gráficos de dispersão do deflúvio e vazão de pico, estimados em relação aos observados, notando-se pequena dispersão em torno da reta 1:1, significando alta precisão das estimativas; outrossim, os Coeficientes de Nash também permitem classificá-los como de elevada precisão, uma vez que são superiores a 0,75.

- Abstração Inicial (Ai)

$$Ai = 3,7207 + 0,2602 \cdot \bar{\theta} \cdot Dc - 1,544 \cdot \bar{\theta} \cdot P - 0,008778 \cdot I \cdot I_{10} + 0,0276 \cdot I \cdot P - 0,2159 \cdot Dc + 1,579 \cdot P - 0,2804 \cdot \bar{\theta} \cdot ti + 0,03402 \cdot I \cdot ti + 0,000453 \cdot ti \cdot Dc - 0,0071 \cdot ti \cdot I_{10} + 0,1641 \cdot ti - 0,954 \cdot I + 0,001923 \cdot Dc \cdot I_{10} - 0,003931 \cdot Dc \cdot P$$

Intercepto: não significativo a 5% de probabilidade; $ti \cdot Dc$ = significativo a 10%; $R^2 = 0,9178$

- Número da Curva (CN)

$$CN = -88,909 - 0,7052 \cdot Ai \cdot P + 1,1114 \cdot Ai \cdot I + 0,0681 \cdot Ai \cdot Dc + 186,44 \cdot \bar{\theta}^3 - 56,443 \cdot I + 1,7229 \cdot \bar{\theta} \cdot ti - 461,28 \cdot \ln(\bar{\theta}) + 83,438 \cdot \ln(I) + 330,403 \cdot \ln(\bar{\theta}) \cdot \ln(I) - 0,8941 \cdot \bar{\theta} \cdot D - 1,22 \cdot ti + 31,77 \cdot I + 4,7151 \cdot P + 0,4483 \cdot I_{10}$$

Intercepto: não significativo a 5% de probabilidade; I_{10} : significativo a 10%; $R^2 = 0,905$

- Relação tr/ta

$$Tr/ta = -6,648 - 0,807 \cdot \theta \cdot I + 0,1083 \cdot \theta \cdot I_{10} - 0,5161 \cdot \theta \cdot P + 0,01186 \cdot I \cdot ti - 0,002144 \cdot ti \cdot I_{10} - 0,001863 \cdot ti \cdot P + 10,706 \cdot \theta + 0,6346 \cdot P$$

Todas as variáveis significativas a 5% de probabilidade; $R^2 = 0,874$

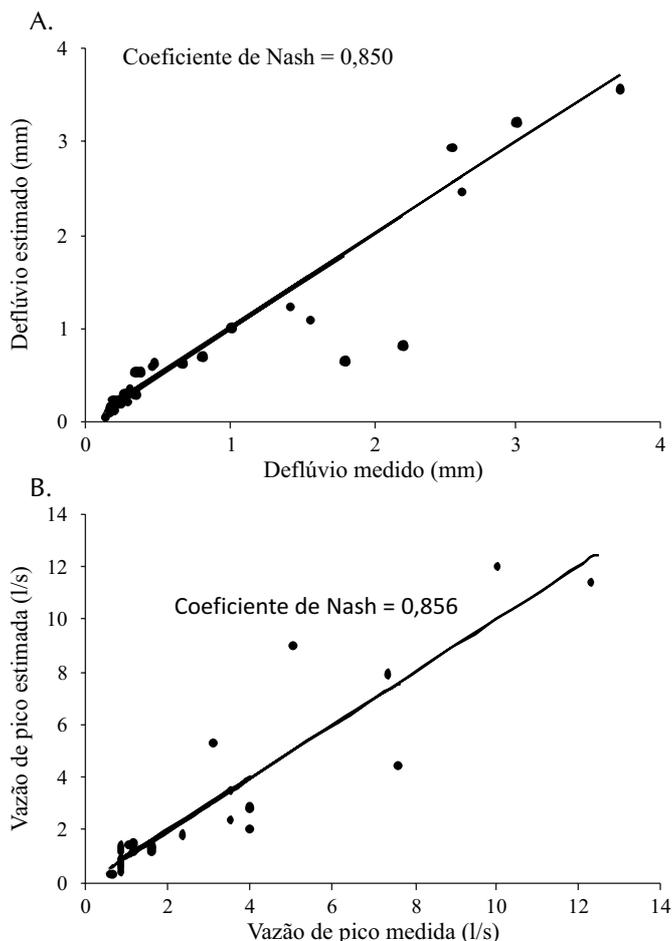


Figura 3. Dispersão do deflúvio (A) e vazão de pico (B) observados e estimados e respectivo coeficiente de Nash

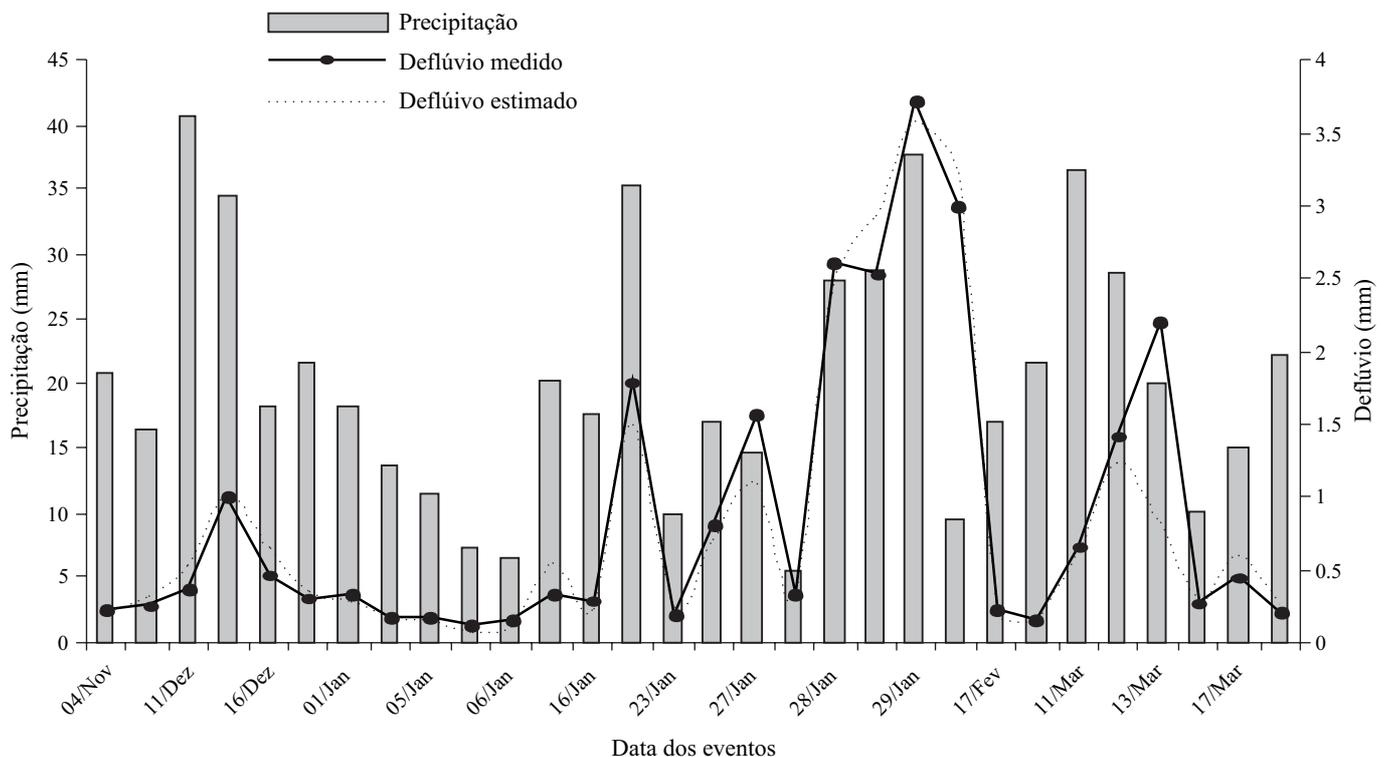


Figura 4. Comportamento da precipitação e deflúvio observados e estimados

- Tempo de ascensão (ta)

$$\begin{aligned}
 ta = & -223,5 - 0,391 \cdot \bar{\theta}^2 - P^2 - 48,24 \cdot I - 1,50 \cdot \bar{\theta} \cdot Dc - 33,69 \cdot \bar{\theta} \cdot P \\
 & - 2,93 \cdot \bar{\theta}^2 \cdot I^2 - 0,0189 \cdot \bar{\theta}^2 \cdot ti^2 + 0,3098 \cdot \bar{\theta}^2 \cdot I_{10}^2 - 0,2247 \cdot I_{10}^2 \\
 & - 351,46 \cdot \bar{\theta}^3 - 5,46 \cdot \bar{\theta}^2 - ti + 49,36 \cdot \bar{\theta}^2 \cdot P + 0,0467 \cdot I^2 \cdot ti \\
 & - 0,0044 \cdot I^2 \cdot I_{10} + 23,602 \cdot I_{10} + 596,53 \cdot \bar{\theta} + 7,602 \cdot P + 64,17 \cdot \bar{\theta} \cdot I \\
 & + 10,07 \cdot \bar{\theta} \cdot ti - 31,35 \cdot \bar{\theta} \cdot I_{10} + 0,672 \cdot I^2 - 0,9804 \cdot I \cdot ti + 0,3626 \cdot I \cdot I_{10} \\
 & + 0,0871 \cdot ti \cdot P
 \end{aligned}$$

Todas as variáveis significativas a 5% de probabilidade; R² = 0,937.

Comparativamente, o ajuste para o deflúvio é ligeiramente inferior ao obtido para vazão de pico, o que pode ser notado não apenas pelo Coeficiente de Nash mas também pela maior dispersão dos valores. Observa-se que na estimativa do deflúvio ocorreram duas situações em que o erro de estimativa está em torno de 100% e, para a vazão de pico, não se observam erros desta magnitude. Apresentam-se, na Figura 4, o comportamento da precipitação ocorrida no período e o deflúvio observado e estimado pela modelagem. Este gráfico é oportuno também para mostrar o desempenho da modelagem proposta, não apenas em valores absolutos mas sua sensibilidade e aderência aos valores observados em cada um dos eventos de precipitação efetiva.

A Figura 5 apresenta os comportamentos da umidade média do solo antecedente aos eventos de precipitação, para as camadas de 0-20, 20-50 e 50-80 cm; referidos gráficos são importantes para subsidiar as previsões para o deflúvio e vazão de pico, mediante os cenários de ocupação da microbacia, uma vez que, fundamentalmente, a alteração das proporções da cobertura vegetal influenciará nas condições de umidade do solo e na interceptação pelo dossel. Verificam-se diferenças consideráveis de umidade do solo, tanto em profundidade quanto no perfil, cujo ambiente da microbacia, constituído de pastagem, é quase sempre mais úmido que sob eucalipto, principalmente nas profundidades de 50 e 80 cm, refletindo um perfil médio mais úmido; a 20 cm é possível verificar oscilações, inclusive com a umidade do solo sob pastagem inferior àquela sob eucalipto devido, provavelmente, às maiores taxas de evaporação direta do solo; ante isto, conclui-se que são de fundamental importância os gráficos apresentados a seguir, haja vista que auxiliam as previsões geradas pela modelagem, para os cenários projetados.

Respostas hidrológicas da microbacia aos cenários de uso do solo projetados

A Figura 6 expõe os comportamentos do deflúvio para a microbacia, em função dos diferentes cenários de ocupação da mesma, em comparação com a situação atual. Analisando-se o cenário em que não há presença de eucalipto (Figura 6A), é possível notar um ligeiro aumento no deflúvio o qual, pela Tabela 2, é de apenas 4,54% em relação ao cenário atual; este comportamento seria devido ao pequeno aumento da umidade do solo na microbacia se esta fosse inteiramente ocupada por pastagem uma vez que, no cenário atual (constituída de 80% de pastagem) é razoavelmente próximo do cenário 1.

Para as análises sobre os cenários de uma ocupação maior da microbacia por eucalipto, dá-se redução do deflúvio

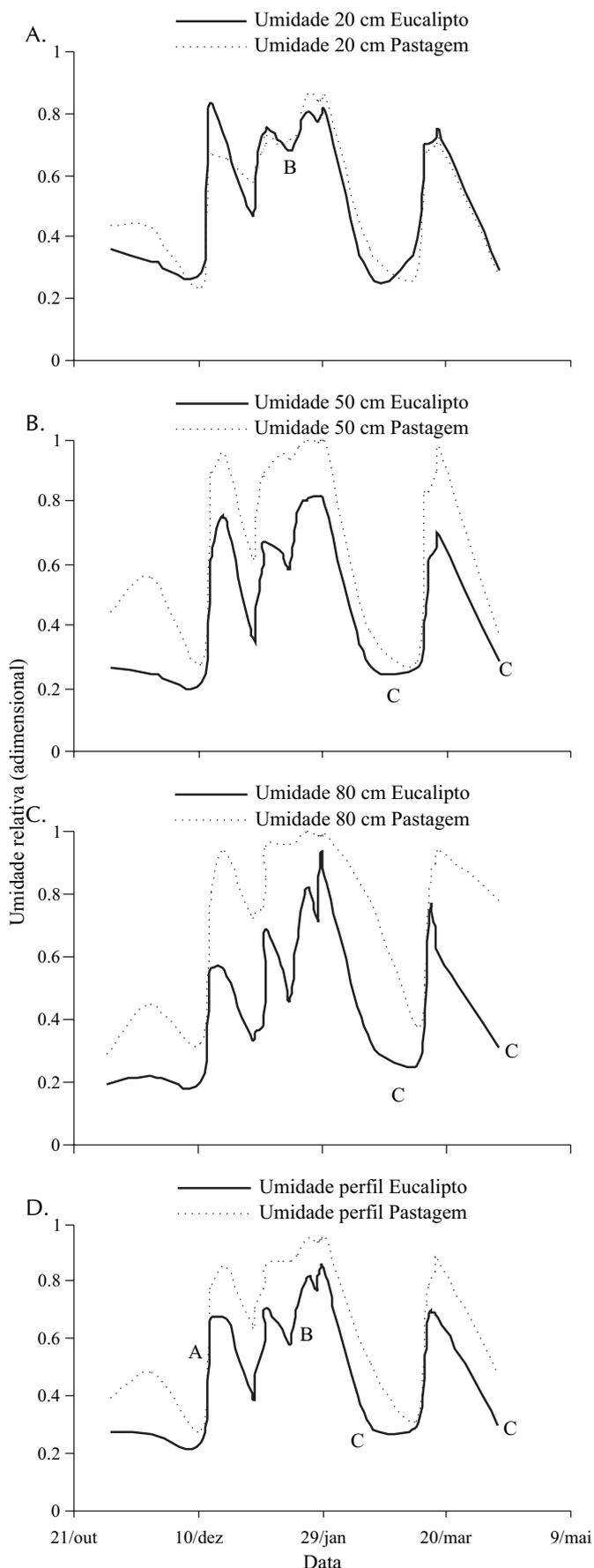


Figura 5. Umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação sob influência das coberturas vegetais presentes na microbacia

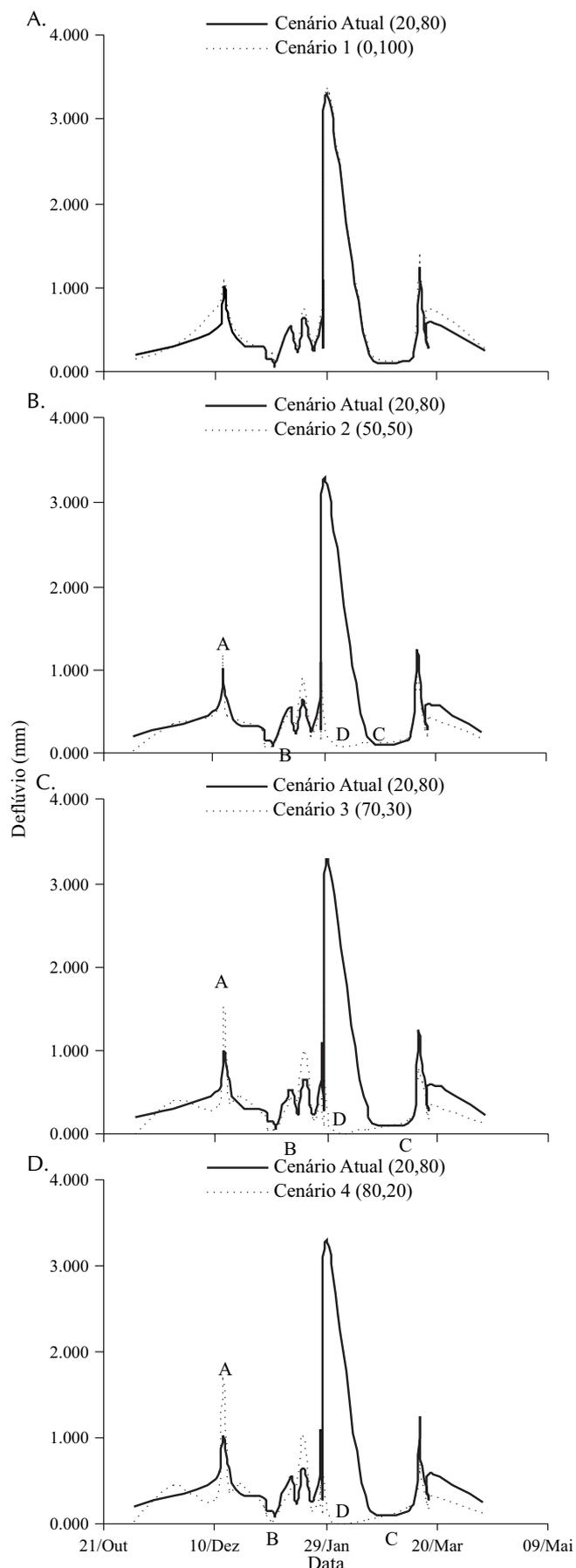


Figura 6. Estimativa do deflúvio gerado pela microbacia sob diferentes cenários de ocupação em comparação com o cenário atual

Tabela 2. Deflúvio estimado e respectiva variação em relação ao uso atual do solo na microbacia

% Área eucalipto	Deflúvio previsto (mm)	Varição (%)
0	25,142	+4,54
10	24,442	+1,63
20 (atual)	24,051	0
30	20,095	-16,45
40	18,861	-21,58
50	18,421	-23,41
70	17,644	-26,64
80	17,121	-28,81

com aumento progressivo da área ocupada por eucalipto. Pela Tabela 2, observa-se que aumentos na área de eucalipto produzem redução substancial do deflúvio, atingindo um valor próximo a 29% se a microbacia estiver 80% ocupada por este, significando atenuação de cheias na mesma; além da redução da umidade do solo, provocada pela presença do eucalipto, incrementos na sua área de ocupação produzem considerável efeito de interceptação pelo dossel, especialmente para eventos de menor magnitude, conforme Soares & Almeida (2001) e Schuler (2003), que compararam o comportamento do escoamento em duas microbacias hidrográficas na Amazônia, uma ocupada por pastagem e outra por floresta, constatando deflúvios até 4 vezes menor para a microbacia florestada.

Analisando-se o comportamento do deflúvio de forma mais específica nota-se, pela letra A marcada na Figura 6A, 6B e 6C, que para o evento que ocorreu próximo a 10/dez, ligeiro aumento do deflúvio, sempre que se dá aumento da área coberta por eucalipto. Reportando-se à Figura 5 é notório, nesta data, que a umidade do solo na área com eucalipto foi, da mesma forma, ligeiramente superior à umidade da área de pastagem, refletindo um provável aumento do deflúvio à medida que a área coberta por eucalipto foi aumentada.

Nos eventos de deflúvio marcados pela letra B observa-se comportamento semelhante ao cenário atual, pelo fato de que a umidade do solo estava, nesta época, elevada na microbacia, independentemente da cobertura vegetal e, neste período, especificamente nos dias 28 e 29/jan, ocorreu um total precipitado elevado, apesar de distribuído no tempo, de 100,04 mm (Figura 4); neste caso, a umidade pouco interferiu no processo e o comportamento do deflúvio teria ocorrido independentemente da ocupação da microbacia. A partir desta data (29/jan), há redução substancial do deflúvio (letras C e D), sendo a umidade do solo a responsável por tal situação uma vez que, neste caso, a mesma se encontra em níveis muitos baixos (< 0,300 – Figura 5), em especial para o evento marcado pela letra D (evento do dia 17/02), verificando-se combinação de umidade antecedente na microbacia muito baixa com aumento da área ocupada por eucalipto (próximo a 0,200, fruto de veranico, comum na região nesta época do ano), com conseqüente aumento da interceptação da precipitação pelo dossel, o que é mais significativo para eventos de baixa intensidade, como nesta data (Figura 4). Tem-se, então, que a remoção da cobertura de eucalipto na

microbacia pode provocar seu aumento do deflúvio superficial e, conseqüentemente, cheias mais significativas.

Efeitos hidrológicos semelhantes foram citados por Tucci (2003), em que houve aumento das enchentes em microbacias hidrográficas cuja vegetação de grande porte tinha sido removida e substituída por culturas anuais e pastagem. Da mesma forma, Burch et al. (1987), trabalhando com duas microbacias na Austrália, uma florestada e outra sem vegetação de grande porte constataram, para os mesmos eventos de precipitação, maior deflúvio e vazões máximas, na segunda microbacia, com enchentes mais vultuosas. Basicamente, a cobertura vegetal na microbacia florestada promove redução da precipitação que atinge o solo, mostrando que a cobertura de pastagem não produz a mesma magnitude de redução da precipitação por interceptação.

A Figura 7 mostra o comportamento da vazão de pico gerada como resposta hidrológica da microbacia, em função dos diferentes cenários de uso do solo, em comparação com o cenário atual. Ao se analisar o cenário 1, observa-se aumento considerável das vazões de pico das hidrógrafas, produzidas pelos eventos de precipitação, em relação ao cenário atual, caso em que a modelagem gerada foi mais sensível que para o estudo do deflúvio, possivelmente por depender da estimativa deste último para realização de suas previsões; no entanto, como se verificou, um deflúvio maior para este cenário e a vazão de pico são sensíveis à umidade antecedente (Tabela 1), essas variáveis hidrológicas tenderão a ser maiores nesta situação, porém, a vazão de pico ocorrida próxima a 10/dez, prevista com cenários de aumento da área coberta por eucalipto, condiz com o comportamento do deflúvio, apesar de ter havido, nesta data, maior umidade do solo para a cobertura vegetal de eucalipto o que, sem dúvida, aumenta a umidade média na microbacia e a modelagem respondeu também com aumento da vazão de pico, saindo de um valor próximo ao cenário atual para o cenário 2, ou seja, 5,5 e 9 L s⁻¹ para o cenário 3 e 14 L s⁻¹ para o cenário 4.

A identificação dos eventos com a letra C na Figura 7, diz respeito a todos os eventos que ocorreram pouco depois de 10/dez até 29/jan, verificando-se pequena diferenciação da vazão de pico entre os cenários, provocada pelo efeito de interceptação pelo dossel, já que a umidade do solo pouco interferiu nos eventos durante este período. Da mesma forma que para o deflúvio, os eventos do dia 29/jan apresentaram pequena alteração em relação ao cenário atual, situação esta devida à elevada influência dos eventos de precipitação que ocorreram nesta data, quando a intensidade máxima de 10 min foi de 97,56 mm h⁻¹, a maior verificada durante o ano hidrológico 2002/2003. Os eventos assinalados com a letra D demonstram a importância que a umidade do solo exerce no comportamento da hidrógrafa, com redução das vazões de pico sempre que a área ocupada por eucalipto aumenta.

Na Figura 8 se apresentam os comportamentos das diferenças relativas absolutas em função da vazão de pico atual e se verifica, de maneira geral, que as vazões de pico previstas para a situação de aumento da área com eucalipto são inferiores às produzidas com o cenário atual, sobretudo para

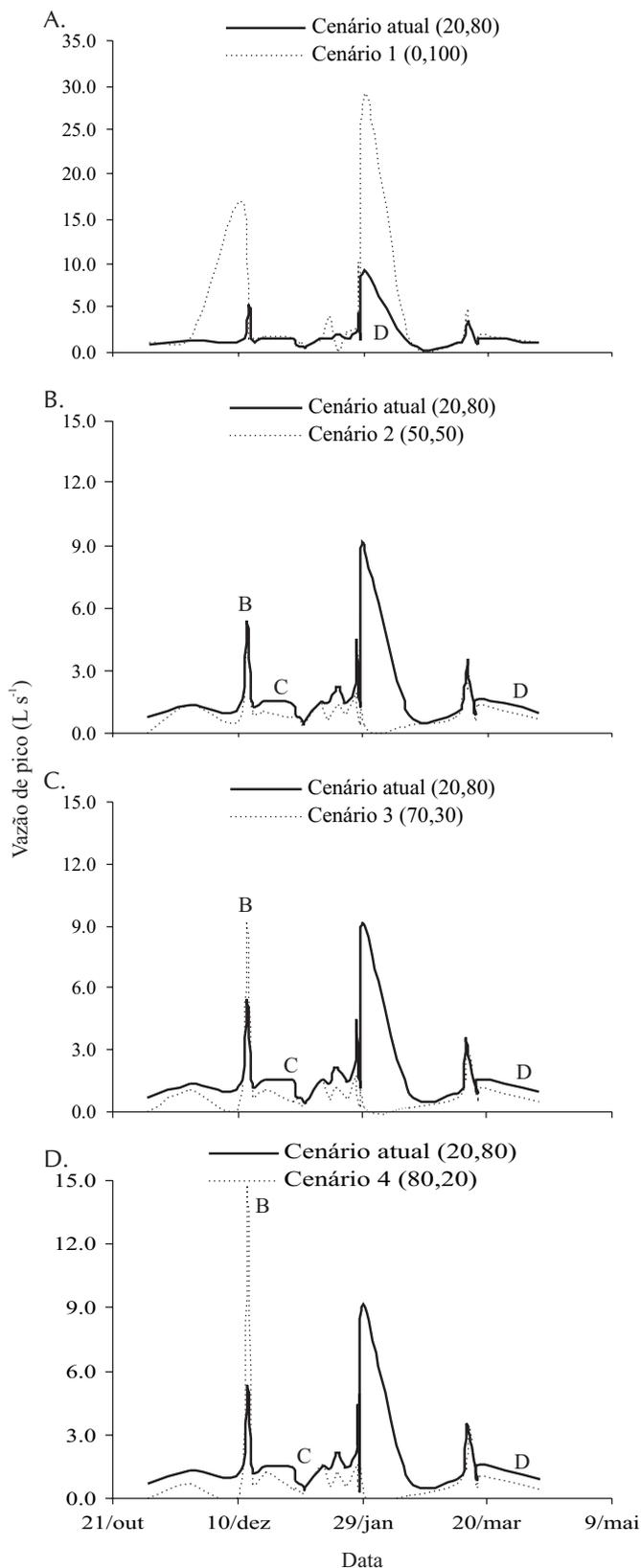


Figura 7. Vazão de pico prevista para a microbacia, em função dos diferentes cenários de uso do solo

as vazões menores, uma vez que as diferenças relativas absolutas estão em torno de 0,60 em especial para os cenários de aumento da área ocupada por eucalipto. Para o cenário 1

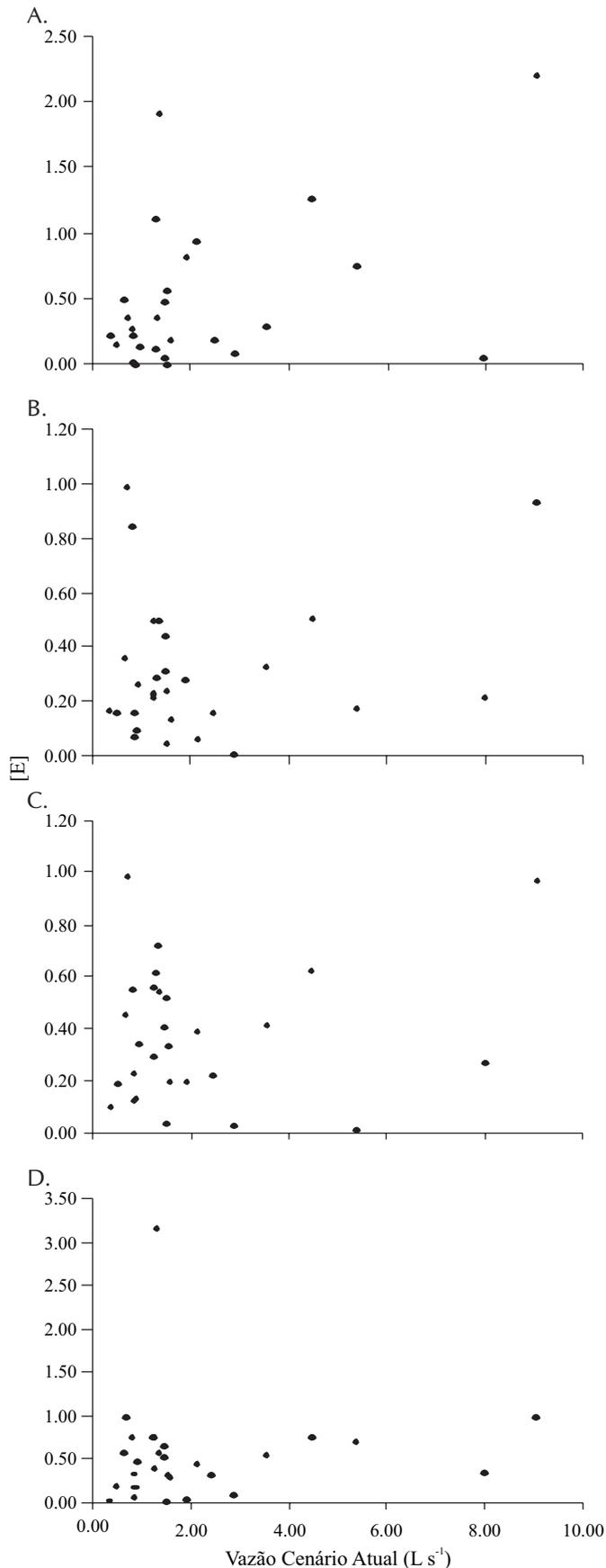


Figura 8. Diferença absoluta relativa em função da vazão de pico atual, para os cenários 1(A), 2 (B), 3 (C) e 4 (D) de uso do solo simulados na microbacia

verificam-se diferenças relativas maiores que 1, numa frequência superior à dos cenários com eucalipto, especialmente para vazões de menor magnitude, significando que haverá aumento da vazão de pico para este último cenário.

Constata-se, também, tendência geral de que, para vazões maiores, os valores de E são menores, independentemente dos cenários projetados significando que, sem dúvida, a umidade do solo pouco influi no comportamento de vazões mais elevadas, sendo estas mais sensíveis às características da precipitação. Brath & Montanari (2003) analisando a sensibilidade de vazões de pico à capacidade de infiltração do solo, encontraram resultados semelhantes para as condições de uma bacia hidrográfica inserida em uma região de clima temperado.

Avalia-se que a umidade do solo foi fundamental para previsão do comportamento da vazão de pico e do deflúvio, sendo ambos os fenômenos hidrológicos em microbacias com escoamento efêmero, muito sensíveis às condições de umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, conforme concluído por outros trabalhos, especialmente o de Castillo et al. (2003). Com relação ao comportamento desses atributos hidrológicos e mediante alteração do regime pluviométrico, a modelagem proposta também pode ser aplicada conforme se verifica na sua estruturação; no entanto, é de fundamental importância que seu processo de calibração seja realizado periodicamente à medida em que mais informações, oriundas do monitoramento hidrológico, sejam agregadas, sendo esta uma das vantagens do processo de modelagem estatística semi-conceitual, que é a atualização do modelo em tempo real (Tucci, 1998).

CONCLUSÕES

1. As variáveis hidrológicas deflúvio e vazão de pico são bastante sensíveis à umidade do solo antecedente aos eventos de precipitação, devendo ser incorporadas à modelagem hidrológica para previsão do impacto de mudanças no uso do solo em microbacias hidrográficas.

2. A ocupação da microbacia por eucalipto provocaria redução da umidade do solo antecedente, interceptação pelo dossel, produzindo menores deflúvio e vazão de pico, amenizando problemas relacionados a enchentes, prevendo-se uma redução de até 29% do deflúvio, caso a microbacia seja ocupada por eucalipto em 80% de sua área.

3. A situação em que a microbacia estivesse 100% ocupada por pastagem, produziria aumento da umidade do solo e esta situação aumentaria a geração de deflúvio com, provavelmente, vazões de pico mais elevadas e cheias mais significativas.

LITERATURA CITADA

Ashby, M. Modelling the water and energy balances of Amazonian rainforest and pasture using Anglo-Brazilian Amazonian climate observation study data. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.94, n.1, p.79-101, 1999.

- Bonell, M.; Balek, J. Recent scientific developments and research needs in hydrological processes of the Humid Tropics. In: Bonell, M.; Hu, F. W.; Schmidt, M. M.; Gladwell, J. S. Hydrology and water management in the Humid Tropics: Hydrological research and strategies for water management. Cambridge: Cambridge University Press and UNESCO. 1993, p.167-260.
- Brandes, D.; Wilcox, B. P. Evapotranspiration and soil moisture dynamics on a semiarid ponderosa pine hillslope. *Journal of the American Water Resources Association*, Middleburg, v.36, n.5, p.965-974, 2000.
- Brath, A.; Montanari, A. Sensitivity of the peak flows to the spatial variability of the soil infiltration capacity for different climatic scenarios. *Physics and Chemistry of the Earth*, Amsterdam, v.28, p.247-254, 2003.
- Burch, G. J.; Bath, R. K.; Moore, I. D.; O'Loughlin, E. M. Comparative hydrological behavior of forested and cleared catchments in southeastern Australia. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.90, n.1, p.19-42, 1987.
- Castillo, V. M.; Gómez-Plaza, A.; Martínez-Mena, M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.284, p.114-130, 2003.
- Charnet, R.; Freire, C. A. D. L.; Charnet, E. M. R.; Bonvino, H. Análise de modelos de regressão linear com aplicações. Campinas: UNICAMP, 1999. 356p.
- Crocker, K. M.; Young, A. R.; Zaidman, M. D.; Rees, H. G. Flow duration curve estimation in ephemeral catchments in Portugal. *Hydrological Science Journal*, Wallingford, v.48, n.3, p.427-440, 2003.
- Fendrich, R. Modelação de hidrogramas multi-modais. São Carlos: EESC/USP, 1984. 174p. Dissertação Mestrado
- Gottschalk, L.; Motovilov, Y. Macro-scale hydrological modelling – a scandinavian experience. In: International Symposium on: 'Can science and society save the water crisis in the 21st century – reports from the World', 2000, Tokyo. Anais...Tokyo: Japan Society of Hydrology and Water Resources, 2000. p.38-45.
- Irmak, S.; Haman, D. Z. Performance of the watermark granular matrix sensor in sandy soils. *Applied Engineering in Agriculture*, St. Joseph, v.17, n.6, p.787-796, 2001.
- Lima, W. P. Impacto ambiental do eucalipto. 2.ed. São Paulo: USP, 1996. 301p.
- Mello, C. R. de; Lima, J. M.; Silva, A. M.; Lopes, D. Abstração inicial da precipitação em microbacia hidrográfica com escoamento efêmero. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, Campina Grande, v.7, n.3, p.494-500, 2003.
- Nimer, E. *Climatologia do Brasil*. Rio de Janeiro: FIBGE, 1989. 421p.
- Schuler, A. E. Fluxos hidrológicos em microbacias com floresta e pastagem na Amazônia Oriental, Paragominas, Pará. Piracicaba: CENA/USP, 2003. 118p. Tese Doutorado
- Soares, J. V.; Almeida, A. C. Modelling the water balance and soil water fluxes in a fast growing Eucalyptus plantation in Brazil. *Journal of Hydrology*, Amsterdam, v.253, n.1/4, p.130-147, 2001.
- Statistical Analyses System. Language guide for personal computers. 6.ed. Cary: SAS Instituto, 1985. 429p.
- Suarez, G. A. Abstração inicial de uma bacia hidrográfica de floresta natural na região de Viçosa, MG. Viçosa: UFV, 1995. 54p. Dissertação Mestrado
- Tucci, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998. 669p.
- Tucci, C. E. M. Variabilidade climática e o uso do solo na bacia brasileira do Prata. In: Tucci, C. E. M.; Braga, B. (org.) *Clima e recursos hídricos no Brasil*. Porto Alegre: ABRH, 2003. p.163-208.