

Estudo do processo chuva-vazão na bacia do rio das Pedras, Guarapuava, Estado do Paraná, com o modelo *HYCYMODEL*

Paulo Eugênio Pachechenik e Jorge Luiz Moretti de Souza*

Departamento de Solos e Engenharia Agrícola/SCA, Universidade Federal do Paraná. Rua dos Funcionários, no. 1540, 80035-050, Curitiba, Paraná, Brasil. *Autor para correspondência. e-mail: jmoretti@ufpr.br

RESUMO. Os objetivos do presente trabalho consistiram em testar um modelo denominado *HYCYMODEL* para realizar o estudo do processo chuva-vazão da bacia do Rio das Pedras, região de Guarapuava, Estado do Paraná, Brasil, e obter índices de evapotranspiração relativa (ET_r/ET_p), a partir das estimativas da evapotranspiração potencial (ET_p) com o método de Thornthwaite e evapotranspiração real (ET_r) obtidas com o *HYCYMODEL*, na referida bacia. Os ajustes entre as vazões observadas e estimadas com o *HYCYMODEL* foram considerados bons quando contrastados com os valores apresentados por outros autores, porém a estimativa da evapotranspiração real (ET_r) e, conseqüentemente do balanço hídrico pelo modelo, não foi considerada adequada no presente trabalho.

Palavras-chave: *HYCYMODEL*, processos chuva-vazão, índice de evapotranspiração.

ABSTRACT. Study of the rainfall-runoff process in Rio das Pedras watershed, Guarapuava, State of Paraná, with the *HYCYMODEL* model. The aim of the present work was to characterize the rainfall-runoff process in Rio das Pedras watershed, located in Guarapuava, state of Paraná, Brazil, applying the *HYCYMODEL*, and get relative evapotranspiration indexes (ET_r/ET_p), based on the estimations of potential evapotranspiration (ET_p), using Thornthwaite method and the real evapotranspiration (ET_r) with the application of the *HYCYMODEL*, in the above mentioned watershed. The adjustments between the observed and estimated runoffs with the *HYCYMODEL* were considered optimum when compared to the values presented by other authors. However, the valuation of ET_r and consequently of the water balance by the model was not considered adequate in this work.

Key word: *HYCYMODEL*, rainfall-runoff processes, evapotranspiration index.

Introdução

A bacia hidrográfica consiste em uma área delimitada topograficamente, drenada por um curso de água ou um sistema conectado de cursos de água, tal que toda a vazão efluente seja descarregada através de uma simples saída (Viessman *et al.*, 1972, citado por Villela e Mattos, 1975). Dentro do sistema de bacia hidrográfica, está inserido o ciclo hidrológico que é o processo de recirculação contínua e infinita da água entre a atmosfera, continentes e oceanos (Honberger *et al.*, 1998). O ciclo hidrológico não é um fenômeno isolado, ele resulta de uma interação entre processos hidrológicos, geomorfológicos e biológicos, tendo como agentes dinâmicos a água e o clima. Cada processo interfere e sofre a interferência dos demais processos interagidos (Kobiyama *et al.*, 1998).

Oliveira (1999) acrescenta que o processo chuva-vazão de uma bacia é complexo e engloba não somente a influência hidrológica, mas também a influência da geologia e da biologia, o que demonstra as relações ambientais que compõem o meio. A água distribui-se de maneira irregular no tempo e no espaço e, em função desta distribuição, observa-se que a vazão média de uma bacia hidrográfica sofre variações sazonais ou multianuais significativas. A autora acrescenta que a modelagem matemática é uma ferramenta importante para a compreensão e manejo de bacias hidrográficas.

O conhecimento do processo chuva-vazão pode ser determinado através de modelos de simulação hidrológica, que são classificados conforme a necessidade e profundidade do estudo (Tucci, 1998). Como exemplos, podem-se citar o método do Hidrograma Unitário (Sherman, 1932) e modelos

como *STANFORD WATERSHED MODEL* (Linsley et al., 1958), *TANQUE* (Sugawara, 1961), *TOPMODEL* (Beven e Kirkby, 1979) e *HYCYMODEL* (Fukushima, 1988). As condições primordiais para o uso de um modelo matemático são que este seja de fácil execução, baixo custo, rápida obtenção dos resultados e possibilite a simulação de experimentos inviáveis na prática (Fukushima, 1988; Oliveira, 1999).

O modelo *HYCYMODEL* foi desenvolvido por Fukushima (1988), que o utilizou na cadeia de montanhas Kiryu, no Japão, para estimar a variação mensal da evapotranspiração em um balanço hídrico para um curto período (um ano) e medir a interceptação da precipitação, entre outros. O modelo já foi aplicado também para avaliar a influência do aquecimento global sobre o ciclo hidrológico em períodos anuais na bacia do Vale de Langtang, no Nepal (Fukushima et al., 1991); quantificar o volume de água da chuva que escoava sobre as encostas de áreas vulcânicas para áreas não vulcânicas (Kubota et al., 1996); calcular o balanço hídrico anual, a taxa de transpiração potencial e a vazão na bacia do rio Julianshan, na China (Tanaka et al., 1998); e, avaliar os efeitos do desmatamento ao longo do tempo sobre o escoamento superficial. A vazão em bacias que possuem cobertura florestal (Ariyakanon, 2000; Kubota et al., 1996; Tanaka et al., 1998) obtiveram excelentes resultados de ajustamento no processo chuva-vazão em bacias hidrográficas com o modelo *HYCYMODEL*.

Mediante os resultados verificados na literatura, observa-se que o modelo *HYCYMODEL* apresenta-se como uma boa opção a ser utilizado em estudos de quantificação do volume de água disponível. Apenas com os parâmetros de chuva e vazão é possível obter informações para simular o balanço hídrico de uma bacia hidrográfica.

Dentro desse contexto, justifica-se a realização de estudos que permitam caracterizar os processos hidrológicos (chuva-vazão, evapotranspiração) da bacia do rio das Pedras. A bacia está situada em uma Área de Proteção Ambiental (APA) e constitui-se em um manancial para a captação de água para o município de Guarapuava, pois a água e o solo são explorados por moradores do local, seja para moradia, atividades agrícolas ou reflorestamento. Estas explorações e atividades interferem diretamente ou indiretamente nas relações de equilíbrio ambiental existentes na bacia. Assim, a obtenção de informações sobre o processo hidrológico da região tem um importante papel na identificação de problemas e no planejamento futuro para racionalizar a exploração dos recursos naturais da região.

Os objetivos do presente trabalho consistiram em: (a) testar o modelo *HYCYMODEL* para realizar o estudo do processo chuva-vazão na bacia do Rio das Pedras, região de Guarapuava, Estado do Paraná; e (b) obter índices de evapotranspiração relativa (E_{Tr}/E_{Tp}), a partir das estimativas da evapotranspiração potencial (E_{Tp}) com o método de Thornthwaite (1948) e evapotranspiração real (E_{Tr}) obtidas com o *HYCYMODEL*, na referida bacia.

Material e métodos

A bacia do rio das Pedras localiza-se no município de Guarapuava, região Centro-Sul do Estado do Paraná, entre as latitudes 25° 12' S e 25° 26' S e entre as longitudes 51° 13' W e 51° 28' W. A bacia possui área total de 327,88 km², sendo que 198,92 km² são cobertos por mata nativa e 14,27 km² cobertos por reflorestamento. A extensão do rio principal é de 57 km, sua nascente está a 1280 m de altitude, na Serra da Esperança, e a sua foz está 950 m de altitude. A classificação climática do município de Guarapuava, segundo Köppen, classifica-se como Cfb, o que significa que o clima é pluvial, sempre úmido, com verões chuvosos e frescos (Maack, 1981).

O modelo utilizado no presente estudo para estimar o processo chuva-vazão da bacia do rio das Pedras denomina-se *HYCYMODEL* e foi idealizado por Fukushima (1988), o qual apresenta em seu trabalho grande parte de todo o equacionamento matemático utilizado na sua estruturação e desenvolvimento. Digitalmente, o *HYCYMODEL* foi elaborado no *software Fortran PowerStation* e a sua estrutura é constituída basicamente por cinco tanques (I a V) principais, conforme está apresentado na Figura 1. O modelo necessita ser alimentado apenas com dados de precipitação e vazão da bacia em estudo.

No *HYCYMODEL* (Figura 1), a precipitação divide-se em um sistema de canais e um sistema de rampas florestadas. A água da chuva no sistema de canais compõe a precipitação de canais $R_c(t)$, que abastece o tanque V com capacidade de armazenamento $S_c(t)$. Ao atingir a capacidade de armazenamento $S_c(t)$, inicia-se a partir do tanque V o escoamento direto de canal $Q_c(t)$. No sistema de rampas florestadas, a água precipitada compõe a chuva acumulada $R_g(t)$, que foi interceptada parcialmente pelo tanque I. O tanque I, que representa a cobertura vegetal da bacia, divide-se em dois compartimentos que representam a água interceptada

pelas folhas e pelos talos e troncos. No tanque I,

ocorre a evaporação de interceptação $E_i(t)$.

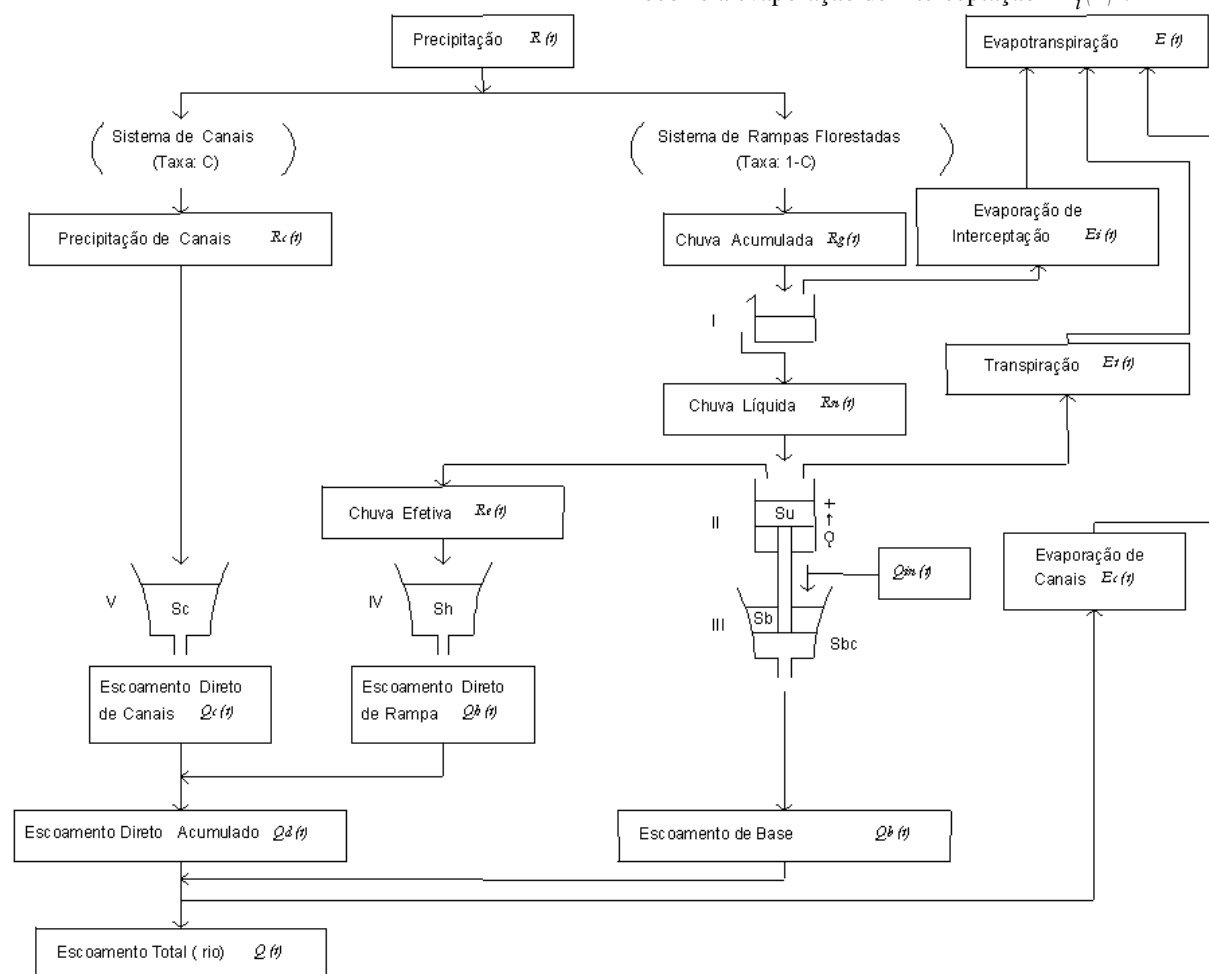


Figura 1. Representação metodológica esquemática das principais partes do modelo *HYCYMODEL*

O excesso de água do tanque I corresponde à chuva líquida $R_n(t)$.

A chuva líquida $R_n(t)$ atinge a superfície do solo, que é representada pelos tanques II e III. No tanque II, ocorre a transpiração $E_t(t)$. Entre os tanques II e III, ocorre a infiltração ou percolação da água $Q_{in}(t)$ no solo. A água que não infiltra, origina a chuva efetiva $R_e(t)$ e a que infiltra no solo forma o escoamento de base $Q_b(t)$.

A chuva efetiva $R_e(t)$, ao atingir o tanque IV, forma o escoamento direto de rampa $Q_h(t)$. O escoamento direto de rampa $Q_h(t)$ junta-se ao escoamento direto do canal $Q_c(t)$, constituindo o escoamento direto acumulado $Q_d(t)$, que flui em direção ao rio. No entanto, parte da $Q_d(t)$ evapora,

o que origina a evaporação de canais $E_c(t)$, que juntamente com a transpiração $E_t(t)$ e a evaporação de interceptação $E_i(t)$, compõem a evapotranspiração $E(t)$.

A água infiltrada ou o escoamento de base $Q_b(t)$, desloca-se até o rio através das camadas sub-superficiais do solo. A soma do escoamento de base $Q_b(t)$ e do escoamento direto acumulado $Q_d(t)$ resulta no escoamento total do rio $Q(t)$.

Para o cálculo do processo chuva-vazão, o *HYCYMODEL* relaciona a vazão com o armazenamento de água no solo e evapotranspiração. Essa relação ocorre no sistema dos cinco tanques descritos anteriormente. Para tanto, o *HYCYMODEL* possui uma série de parâmetros (desconhecidos), que necessitam ser ajustados para permitir a obtenção da estimativa adequada dos resultados. Esses parâmetros são apresentados na Tabela 1.

Os parâmetros de ajustamento K_c , K_h , K_{in} e K_b relacionam-se, respectivamente, com o movimento mais rápido da água da chuva para o mais

lento. Somente o parâmetro K_{in} relaciona-se com a distribuição da vazão direta porque determina a diminuição do armazenamento do tanque II. Os parâmetros K_c e K_h podem ser determinados com

Tabela 1. Parâmetros de ajustamento (desconhecidos) do modelo *HYCYMODEL*

Parâmetro	Especificação
C	Relação de área do canal
j	Relação de taxa de evaporação de canal para taxa de transpiração
$D16, D50$	Profundidade efetiva do solo na qual a relação da área de contribuição da inclinação da rampa é 16% e 50%, respectivamente.
K_c	Parâmetro da função de armazenamento do tanque V
K_h	Parâmetro da função de armazenamento do tanque IV
K_{in}	Parâmetro da função de armazenamento do tanque II
K_b	Parâmetro da função de armazenamento do tanque III
P_{ta}	Coefficiente do valor médio da distribuição mensal da transpiração
P_{tb}	Coefficiente de variação da distribuição mensal da transpiração
P_{tc}	Coefficiente de retardo da distribuição mensal da transpiração
Q_{ac}	Escoamento crítico para ocorrer a redução da transpiração
<i>STAD</i>	Coefficiente de evaporação da chuva interceptada para cálculo diário
<i>STOR</i>	Coefficiente de evaporação da chuva interceptada para cálculo diário em mm

dados de intervalos horários e os outros parâmetros devem ser determinados com dados de intervalos diários. No presente trabalho, K_c e K_h foram determinados em intervalos diários.

A calibração do modelo é realizada fazendo-se alterações nos parâmetros desconhecidos e a sensibilidade é verificada por meio dos resultados apresentados por dois fatores (F_1 e F_2) de avaliação do erro. Estes dois fatores são determinados pelas equações,

$$F_1 = \frac{1}{N} \cdot \sum \frac{|QO(t) - QC(t)|}{QO(t)} \quad (1)$$

$$F_2 = \frac{|\sum QO(t) - \sum QC(t)|}{\sum QO(t)} \quad (2)$$

sendo:

F_1 o erro relativo;

F_2 o erro do balanço de água;

$QO(t)$ a vazão observado;

$QC(t)$ a vazão calculada;

N o número de dados observados.

Para o estudo do processo chuva-vazão da bacia do rio das Pedras com o *HYCYMODEL*, os seguintes dados foram necessários: (a) dados diários de precipitação, obtidos junto ao Instituto Meteorológico

Simepar, na Estação Iapar 2551010; e (b) dados diários de vazão, obtidos na Superintendência de Desenvolvimento de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental (SUDERHSA), na Estação de Captação Sanepar 65809000, situados no município de Guarapuava. Os dados de precipitação e vazão utilizados compreendem o período entre 14 de março de 1985 a 31 de dezembro de 2002.

Os índices de evapotranspiração relativa foram calculados pela expressão,

$$I_{(ETr/ETp)} = \frac{ETr}{ETp} \quad (3)$$

sendo:

$I_{(ETr/ETp)}$: o índice de evapotranspiração relativa (adimensional);

ETr : a evapotranspiração real mensal ou anual obtida no *HYCYMODEL* (mm·mês⁻¹ ou mm·ano⁻¹);

ETp : a evapotranspiração potencial mensal ou anual obtida com o método de *Thornthwaite* (mm·mês⁻¹ ou mm·ano⁻¹).

A evapotranspiração real (ETr) na bacia hidrográfica é estimada no modelo *HYCYMODEL*, fazendo-se a diferença entre os somatórios mensais da precipitação e vazão calculada nos anos avaliados. Dessa forma, a ETr é um valor que resultante do balanço hídrico que é realizado pelo modelo.

A estimativa dos valores de evapotranspiração

potencial (ETp) foi realizada com o método Thornthwaite, baseando-se nos dados de temperatura coletados na bacia do rio das Pedras, pelo Simepar, entre os anos de 1985 a 1997. Métodos mais elaborados para estimar a ETp não foram utilizados devido à deficiência de dados climáticos da região. O método de Thornthwaite (1948) foi escolhido devido à sua rapidez e à sua simplicidade nos cálculos e por apresentar bons resultados nas estimativas da ETp em diversas situações, conforme relatado em Souza (1992, 2001) e Pereira *et al.* (1997). Para utilização do método, seguiram-se as recomendações de cálculo sugeridas por Pereira *et al.* (1997).

$$ETp = 16 \cdot \left(10 \cdot \frac{Ti}{I} \right)^a \cdot Fc \quad (4)$$

sendo $Ti > 0^\circ C$

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \quad (5)$$

$$I = \sum_{m=1}^{12} (0,2 \cdot T_m)^{1,514} \quad (6)$$

sendo $T_m > 0^\circ C$

sendo;

ETp : a evapotranspiração potencial ($mm \cdot mês^{-1}$);

Ti : temperatura média mensal do ar ($^\circ C$);

a : função cúbica do índice de calor (I) da região;

I : índice de calor da região;

T_m : temperatura média climatológica do m -ésimo mês. Obs.: T_m foi calculada com valores de temperatura média de 13 anos (1985 a 1997);

Fc : fator de correção da evapotranspiração tabular diária para ajustá-la ao fotoperíodo (N_f) e ao número de dias do mês.

O cálculo da evapotranspiração potencial anual foi obtido pela expressão,

$$ETp_{anual} = \sum_{i=1}^{12} ETp_i \quad (7)$$

sendo:

ETp_{anual} a evapotranspiração potencial anual ($mm \cdot ano^{-1}$);

ETp_i : a evapotranspiração potencial do i -ésimo mês ($mm \cdot mês^{-1}$).

Resultados e discussão

Na Tabela 2, encontram-se apresentados os valores dos parâmetros ótimos de ajustamento e erros F_1 e F_2 , que foram determinados a partir das simulações realizadas com o modelo *HYCYMODEL* para os dados da bacia do rio das Pedras, entre os anos de 1985 a 2002.

Os parâmetros ideais de ajustamento foram obtidos após inúmeras simulações, que foram finalizadas somente quando os erros F_1 e F_2 não apresentavam mais a redução de seus valores. É importante observar que F_1 e F_2 são considerados ideais ao atingirem valores iguais e próximos a zero. Kubota *et al.* (1996), utilizando o *HYCYMODEL* para estudar o escoamento superficial em uma área vulcânica, interromperam as análises quando F_1 ficou entre 0,146 e 0,328 e o F_2 foi menor que 0,07. Tanaka *et al.* (1998), utilizando o *HYCYMODEL* nos estudos do balanço hídrico e vazão em uma bacia de clima subtropical e de monções, finalizaram as análises quando o valor de F_1 ficou próximo de 0,2.

Na realização das análises de sensibilidade com o *HYCYMODEL*, verificou-se para os dados de chuva e vazão da bacia do rio das Pedras que é mais fácil obter valores de erro F_2 próximos de zero do que o erro F_1 . Essa constatação deve-se, provavelmente, ao fato de que F_1 leva em consideração o somatório das diferenças diárias entre as vazões observadas e calculadas (Equação 1), ao passo que F_2 considera uma diferença entre os somatórios das vazões observadas e calculadas no período (Equação 2). Junto com a análise do valor dos erros (F_1 e F_2), considerou-se também nas análises de sensibilidade os resultados do cálculo da vazão e da evapotranspiração, que somados originam o balanço hídrico.

A visualização das vazões observadas e calculadas foi feita graficamente em uma planilha eletrônica, considerando o valor observado e calculado em cada dia. No entanto, as alternâncias dos picos de vazão apresentados no gráfico dificultavam a visualização e verificação dos melhores ajustes. Para contornar este problema, optou-se por uma análise gráfica, considerando-se uma média móvel de 10 dias (Figuras 2 e 3), que possibilitou visualizar e interpretar melhor os dados.

Tabela 2. Valores ótimos dos parâmetros do *HYCYMODEL* e os respectivos ajustes dos erros de vazão (F_1 e F_2), obtidos com os dados compreendidos entre os anos de 1985 a 2002

Ano	Parâmetros de ajustamento do <i>HYCYMODEL</i>													Erros	
	C	D_{16}	D_{50}	K_c	K_h	K_m	K_b	P_m	P_{tb}	P_{tc}	Q_{sc}	$STAD$	$STOR$	F_1	F_2
1985	0,017	12	97	9	7	150	217	85	18	0,01	77	0,646	2,600	0,244	0,244
1986	0,005	29	56	9	20	285	1193	86	30	0,90	25	0,685	1,630	0,296	0,224
1987	0,045	16	56	9	30	297	1130	79	49	0,001	30	0,690	1,710	0,285	0,285
1988	0,012	19	58	9	175	310	805	85	16	2,650	32	0,772	1,200	0,340	0,340

1989	0,076	13	51	1	101	625	1350	115	40	2,700	40	0,890	1,579	0,331	0,192
1990	0,032	21	81	1	11	160	270	85	60	0,01	77	0,819	1,500	0,275	0,210
1991	0,017	7	87	1	58	200	1191	83	15	10	1,3	0,956	1,772	0,563	0,038
1992	0,032	21	81	9	9	160	1170	85	60	0,011	77	0,955	1,169	0,409	0,049
1993	0,047	5	32	9	68	625	3500	115	39	2,700	43	0,978	1,578	0,395	0,085
1994	0,024	21	81	1	6	160	380	61	13	0,170	51	0,654	1,433	0,369	0,205
1995	0,027	22	38	1	16	176	410	55	44	0,120	51	0,658	1,434	0,240	0,162
1996	0,027	18	36	9	14	120	790	83	50	2,536	38	0,886	1,648	0,278	0,074
1997	0,014	12	38	9	8	230	500	60	45	0,080	51	0,853	1,120	0,387	0,084
1998	0,004	30	44	9	12	121	235	74	35	0,070	59	1,071	1,136	0,348	0,074
1999	0,032	1	80	35	500	70	240	20	45	10,30	17	0,986	1,850	0,832	0,159
2000	0,009	19	40	9	15	116	320	83	50	2,489	27	0,972	1,675	0,387	0,074
2001	0,0007	28	44	9	20	293	450	79	60	2,521	27	0,979	1,729	0,391	0,034
2002	0,020	27	58	1	37	250	700	85	47	2,525	32	0,902	1,661	0,295	0,130
Período entre 1985 e 2002															
	0,032	16	30	9	30	297	1110	67	50	0,01	30	0,920	1,700	0,589	0,000

As Figuras 2 e 3 apresentam, respectivamente, o ano em que foram obtidos o melhor (1985) e o pior ajuste (1999) do processo chuva-vazão, empregando o *HYCYMODEL*. A Figura 4 apresenta a média móvel de 365 dias da vazão observada (*QO*) e calculada (*QC*) no *HYCYMODEL*, para o período total entre os anos de 1985 a 2002. Todas as figuras contendo os gráficos de média móvel de 10 dias para os ajustes de vazão calculada (*QC*) e observada (*QO*), entre os anos 1985 a 2002, poderão ser encontradas em Pachechenik (2004).

O ajustamento das vazões observadas (*QO*) e calculadas (*QC*) com o modelo *HYCYMODEL* apresentou bons resultados para períodos de um ano, ou seja, períodos curtos. O bom ajustamento pode ser confirmado avaliando-se os erros F_1 e F_2 obtidos nas análises com os valores ideais indicados por Kubota *et al.* (1996) e Tanaka *et al.* (1998). No entanto quando o *HYCYMODEL* foi utilizado na simulação de um período maior de anos (Figura 4), a visualização e obtenção dos ajustes entre a vazão observada (*QO*) e calculada (*QC*) foi mais complicada e houve menor exatidão, devido às dificuldades de calibrar os parâmetros desconhecidos.

Para o período entre 1985 e 2002, que totalizaram 6.434 dias, a vazão total observada (*QO*) foi de 16.462 mm e a vazão total calculada (*QC*) no *HYCYMODEL* foi de 16.460 mm. Os erros F_1 e F_2 foram iguais a 0,589 e 0,000, respectivamente. Conforme se verifica na Figura 4, o ajustamento entre as curvas das vazões calculadas e observadas não apresentaram exatidão na maior parte do período analisado, embora os valores observados e calculados tenham sido praticamente iguais. Nas análises de sensibilidade realizadas ano a ano, a dificuldade em ajustar as vazões calculadas e observadas também existiu, mas com menor discrepância. Dessa forma, verifica-se uma limitação do modelo em processar um número elevado de dados, como o período compreendido entre 1985 a 2002.

Entre todos os parâmetros de ajustamento do modelo, os que correspondem à evaporação (*STAD* e *STOR*) mostraram ser a base para calibrar o

HYCYMODEL, pois influenciaram bastante na obtenção dos valores ótimos dos erros F_1 e F_2 , bem como nos valores de vazão calculada e evapotranspiração. Os demais parâmetros avaliados (C , D_{16} , D_{50} , K_h , K_{in} , K_b , P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac}) contribuem nos ajustamentos mais finos, porém interferem menos na obtenção dos erros F_1 e F_2 . O parâmetro K_c foi o único que não apresentou interferência nos resultados.

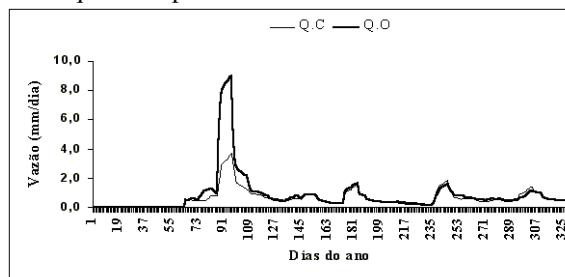


Figura 2. Média móvel de 10 dias da vazão observada (*QO*) e calculada (*QC*) no *HYCYMODEL*, para o ano de 1985 (melhor ajuste com o *HYCYMODEL*).

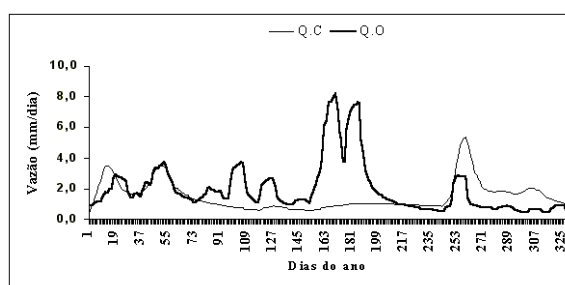


Figura 3. Média móvel de 10 dias da vazão observada (*QO*) e calculada (*QC*) no *HYCYMODEL*, para o ano de 1999 (pior ajuste com o *HYCYMODEL*).

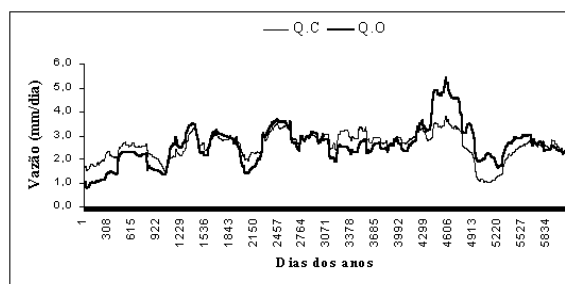


Figura 4. Média móvel de 365 dias da vazão observada (QO) e calculada (QC) no *HYCYMODEL*, para os anos de 1985 a 2002.

Os parâmetros de transpiração (P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac}) influenciaram menos que os parâmetros de evaporação ($STAD$ e $STOR$) na obtenção dos valores de F_1 e F_2 . Possivelmente, este fato ocorreu porque o modelo considera que a evaporação ocorre de forma acentuada na água das chuvas interceptada pela vegetação, pelo solo e também na água que atinge o leito dos rios da bacia. Já a água transpirada provém dos vegetais, que a absorvem do solo através das raízes e a perdem pelas folhas, devido a fatores como a radiação solar, temperatura do ar, umidade e vento. Assim, nas avaliações da transpiração, pequenos ajustes nos parâmetros P_{ta} , P_{tb} , P_{tc} e Q_{ac} foram suficientes para a obtenção do resultado final nas simulações com o modelo. Nas análises de sensibilidade, verificou-se, inicialmente, que é melhor ajustar os parâmetros C , D_{16} e D_{50} e depois ajustar os parâmetros de armazenamento (K_h , K_{in} e K_b). As alterações nos parâmetros C , D_{16} e D_{50} influenciaram na aproximação dos valores da vazão (calculada e observada) e na evapotranspiração. Posteriormente, alterações nos parâmetros de coeficientes de armazenamento (K_h , K_{in} e K_b) permitiram um ajustamento nos resultados da vazão calculada.

Para cada período analisado, de 1985 a 2002, o modelo *HYCYMODEL* possibilitou (a) ajustar razoavelmente as curvas de vazão calculada (QC) e observada (QO); (b) obter os valores de evapotranspiração real (ETr) diária e anual; e (c) estabelecer o balanço hídrico diário e anual. Apesar de não serem considerados neste trabalho, o modelo fornece também resultados diários e anuais do escoamento inicial dos canais, escoamento total direto, escoamento total de base, evaporação da precipitação interceptada e transpiração.

Um ponto negativo a ser ressaltado no uso do modelo *HYCYMODEL* refere-se ao número de simulações e análises de sensibilidade necessárias para se obter o valor final do balanço hídrico. É importante observar que o modelo não faz estas análises automaticamente e todos os parâmetros tiveram de ser alterados manualmente. Para os períodos analisados, por exemplo, de 1985 a 2002, foram necessárias aproximadamente 50.000 simulações o que demandou um tempo muito grande no processamento dos resultados. Cada parâmetro de ajustamento (Tabela 2) necessitou de uma análise individual para verificar se estava influenciando ou não nos resultados do balanço hídrico. Nos trabalhos realizados com o modelo, sentiu-se falta de um

módulo que possibilitasse alterar os parâmetros de ajustamento e ao mesmo tempo permitisse a visualização destes resultados graficamente na tela do computador.

Outro ponto negativo verificado no modelo refere-se à inexistência de ferramentas que permitissem uma análise diferente da unidade dos dados de entrada, ou seja, o modelo não faz agrupamento dos dados em períodos (pêntadas, decêndios, semanas, quinzenas, meses) e não possibilita fazer uma suavização dos dados de saída, como por exemplo, a realização de uma média móvel para um determinado período considerado.

Observou-se também grande amplitude nos valores de alguns parâmetros, que a princípio, não deveriam apresentar alterações desta magnitude ao longo dos anos para a obtenção de valores ótimos dos erros F_1 e F_2 . O parâmetro identificado como a relação da área de um sistema de canais (parâmetro C), por exemplo, variou entre um valor mínimo de 0,0007, em 2001, a um máximo de 0,076, em 1989. Por se tratar da área de canais superficiais, essa situação somente ocorreria com grande alteração no solo da bacia e variações consideráveis do tamanho da área dos canais ano a ano, o que provavelmente não ocorreu.

Como se verificou nos parágrafos anteriores, o modelo *HYCYMODEL* apresentou qualidades no que se refere à sua lógica e processamento de cálculo. No entanto, devido à versão do modelo (disponível e utilizada) ser muito antiga, datada desde 1988, a interface computador-usuário se encontra desatualizada. Talvez, esse seja o ponto mais vulnerável do modelo e que necessite ser melhorado em trabalhos futuros.

Apesar de ter obtido valores de F_1 e F_2 (Tabela 2) próximos dos indicados por Kubota *et al.* (1996) e Tanaka *et al.* (1998), principalmente devido aos resultados de evapotranspiração relativa apresentados na Tabela 3 e Figura 5, considerou-se, no presente trabalho, que não foi possível obter resultados de balanço hídrico (precipitação, vazão e evapotranspiração) consistentes nas simulações em todos os períodos analisados da bacia do rio das Pedras, no período entre 1985 a 2002.

A Tabela 3 e Figura 5 apresentam os valores de evapotranspiração potencial (ETp), estimados com o método de Thornthwaite (1948) para o período entre os anos de 1985 e 1997, evapotranspiração real (ETr) determinada para o mesmo período através do modelo matemático *HYCYMODEL* (Fukushima, 1988). A Tabela 3 apresenta ainda os respectivos valores de índices de evapotranspiração relativa ($I_{ETr/ETp}$).

Os resultados apresentados na Tabela 3 e na Figura 5 evidenciam que a evapotranspiração real anual (ETr) obtida no *HYCYMODEL* superestimaram, em média, 44,2% os valores de ETp estimados com o

método de Thornthwaite. Tal resultado representa um absurdo, visto que o método de Thornthwaite não subestima geralmente

Tabela 3. Valores da evapotranspiração potencial (ETp), real (ETr) e índice de evapotranspiração relativa ($I_{(ETr/ETp)}$), obtidos entre os anos de 1985 a 1997

Ano	Unidade	Anos analisados												
		1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
ETp	mm/ano	504	781	764	771	724	682	766	763	772	793	790	753	781
ETr	mm/ano	649	1.444	1.312	802	1.339	944	967	982	1.142	1.299	1.221	883	965
$I_{(ETr/ETp)}$	—	1,287	1,849	1,723	1,041	1,850	1,383	1,262	1,287	1,478	1,639	1,546	1,172	1,236

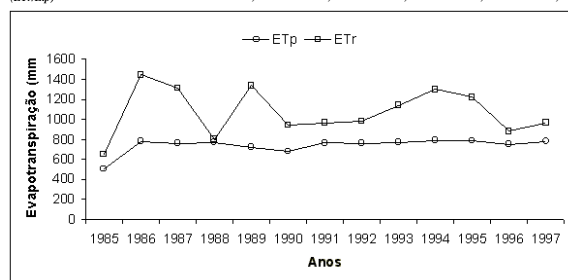


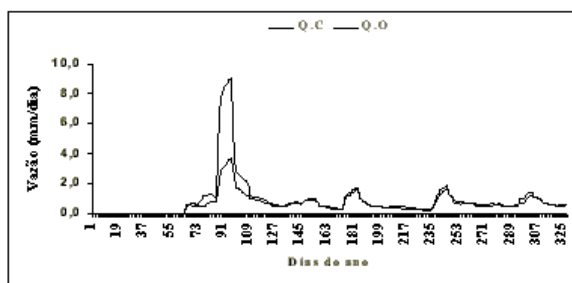
Figura 5. Valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr), obtidos entre os anos de 1985 a 1997.

nesta magnitude os valores de evapotranspiração potencial, conforme foi verificado por Fukushima (1988), Souza (1992, 2001).

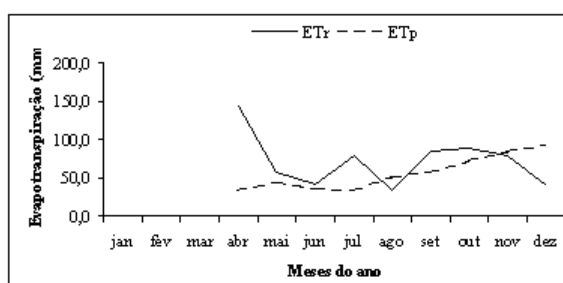
A Tabela 4 apresenta os resultados do índice de evapotranspiração relativa ($I_{(ETr/ETp)}$) mensal e anual para a região da bacia do rio das Pedras, entre os anos 1985 a 1997. Como exemplo, para entender melhor como o modelo *HYCYMODEL* procedeu a estimativa da evapotranspiração real (ETr), os valores de vazão calculada (QC) com o referido modelo e observada (QO), apenas para os anos de 1985 e 1997, foram dispostos, respectivamente, ao lado dos valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr) (Figuras 6 e 7). Todas as figuras, apresentando um contraste entre as vazões (QC e QO) e as evapotranspirações (ETp e ETr), entre os anos de 1985 e 1997, poderão ser encontradas em Pachechenik (2004).

Tabela 4. Índice mensal e anual de evapotranspiração relativa ($I_{(ETr/ETp)}$), obtidos entre os anos de 1985 a 1997.

Meses	Anos analisados												
	1985	1986	1987	1988	1989	1990	1991	1992	1993	1994	1995	1996	1997
Jan	—	2,08	0,74	0,63	1,97	—	0,81	1,00	1,11	1,49	2,54	1,11	1,49
Fev	—	2,14	1,62	1,18	1,72	0,65	0,84	0,99	1,43	1,85	2,02	1,16	1,58
Mar	—	1,16	0,67	0,67	1,34	0,98	0,99	1,53	1,42	0,73	0,86	1,75	0,92
Abr	4,34	2,10	1,62	1,94	1,57	1,73	1,35	1,64	1,37	1,18	1,24	0,69	0,85
Mai	1,30	3,29	6,58	3,87	2,42	1,88	1,45	2,56	2,77	2,24	0,44	0,47	1,18
Jun	1,17	0,79	2,79	3,09	1,66	3,15	2,51	1,42	1,81	3,65	1,90	1,96	2,66
Jul	2,37	0,73	1,36	0,47	2,87	3,30	2,42	2,22	3,20	2,93	1,83	1,70	1,17
Ago	0,66	2,17	1,51	0,24	2,99	1,78	1,52	1,49	0,59	0,43	0,29	0,85	1,05
Set	1,48	1,79	1,58	0,38	3,02	1,86	1,09	0,92	1,94	0,64	2,05	1,77	0,98
Out	1,24	1,70	1,83	1,04	2,19	1,24	1,47	0,85	1,56	1,88	1,96	1,60	1,47
Nov	0,94	1,51	1,61	0,43	1,28	1,07	1,02	1,11	0,88	2,16	0,99	0,58	0,97
Dez	0,43	2,11	1,90	0,61	1,04	0,77	1,46	0,83	1,20	1,64	1,82	1,05	0,97
ANO	1,287	1,847	1,723	1,041	1,850	1,383	1,262	1,287	1,478	1,639	1,546	1,172	1,235



(a)



(b)

Figura 6. Valores obtidos para o ano de 1985: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr)

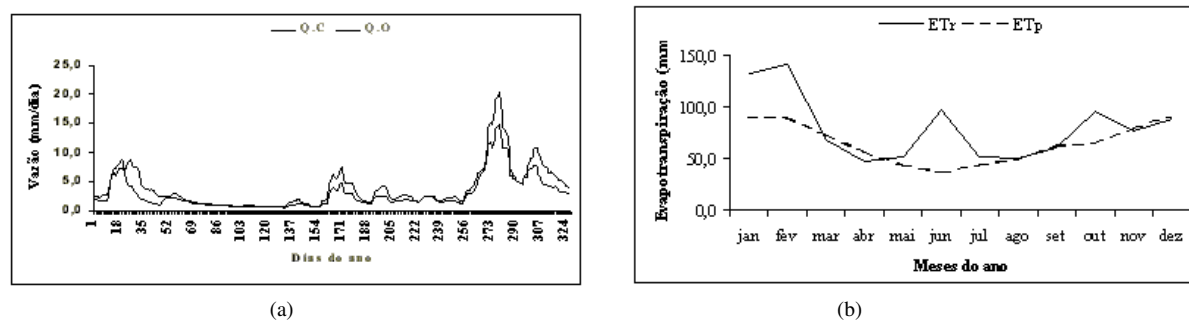


Figura 7. Valores obtidos para o ano de 1997: (a) Média móvel de 10 dias da vazão calculada (QC) no *HYCYMODEL* e observada (QO); e (b) Valores da evapotranspiração potencial (ETp) e real (ETr)

A vazão calculada (QC) pelo modelo *HYCYMODEL* foi subestimada na maior parte dos períodos, quando comparada com a vazão observada (QO), especialmente nos picos de vazão. Observou-se também, principalmente para os anos de 1986, 1991, 1994, 1999, 2001 e 2002, que os ajustes entre as vazões calculadas (QC) e observadas (QO) não foram adequados, visto que houve dificuldade de se obter valores de F_1 e F_2 próximos dos sugeridos ou recomendados como ideais por Kubota *et al.* (1996) e Tanaka *et al.* (1998). Conforme mencionado anteriormente, somente com a obtenção de valores de erros F_1 e F_2 próximos de zero, os ajustamentos entre as vazões observadas (QO) e calculadas (QC) ficariam mais estreitos e os valores de ETr calculados nas análises diminuiriam. O problema maior consiste em fazer com que os valores de F_1 e F_2 fiquem próximos de zero, pois em mais de 50.000 simulações realizadas com o modelo não se chegou a este resultado, principalmente para o erro F_1 .

Outro importante fator a ser observado refere-se à representatividade dos dados disponíveis para processar as análises em modelos do tipo *HYCYMODEL*. Especificamente para os dados de precipitação, verifica-se que a utilização de dados de apenas um posto meteorológico para representar toda uma bacia como a do rio das Pedras, contida em uma área total de 327,88 km², pode estar interferindo acentuadamente nos resultados do balanço hídrico da mesma. Este ponto é falho, pois precipitações em outras regiões da bacia podem ter ocorrido no período analisado e não foram computadas na modelagem do processo chuva-vazão. O ideal seria a existência de postos de coleta de dados distribuídos uniformemente sobre a área da bacia e trabalhar com um valor médio ponderado, em função das metodologias apresentadas na literatura.

O uso do modelo *HYCYMODEL* no presente trabalho e o entendimento do processo chuva-vazão

na bacia do rio das Pedras apresentou algumas dificuldades. Desta forma, os itens dispostos a seguir têm a função de esclarecer pontos considerados importantes e que de certa forma impossibilitaram a obtenção de melhores resultados com o referido modelo:

- o *HYCYMODEL* foi criado a partir de cinco modelos básicos, que foram desenvolvidos a partir de uma série de experimentos realizados desde a década de 1970. A composição destes cinco modelos gerou um trabalho que foi publicado no ano de 1988 (Fukushima, 1988), e por melhor que tenha sido a sua apresentação no periódico, não contém todos os detalhes para um entendimento aprofundado e adequado do modelo *HYCYMODEL*;

- as potencialidades que o *HYCYMODEL* oferece não puderam ser alcançadas em toda a plenitude, visto que faltou a proximidade com os seus idealizadores, o contado com disciplinas ministradas pelos mesmos, material didático e exemplos, que permitissem identificar mais facilmente os pontos vulneráveis e possibilitasse a sugestão de alternativas para o seu aperfeiçoamento;

- o modelo foi desenvolvido em um local com clima temperado, tendo somente cobertura vegetal característica para este tipo climático em áreas montanhosas. No presente estudo, a área avaliada está em uma região de clima subtropical, com relevo ondulado, vegetação característica de clima subtropical, além de reflorestamentos com espécies de clima temperado e culturas agrícolas. Essas condições distintas podem ter interferido na calibração dos parâmetros do modelo, dificultando a obtenção de melhores resultados no local de estudo.

- a utilização de modelos matemáticos como o *HYCYMODEL*, que teve o seu desenvolvimento baseado em condições ambientais específicas (Ásia), distintas das condições presentes no Brasil, pode gerar problemas quanto ao uso e obtenção de

resultados confiáveis. Na adoção de um modelo deste tipo, é importante observar a necessidade e disponibilidade de informações detalhadas sobre o seu funcionamento e reais limitações, principalmente no que se refere às relações entre os parâmetros de ajustes.

Conclusão

Conforme as informações obtidas e analisadas no presente trabalho, concluiu-se para a bacia do Rio das Pedras que:

- o modelo chuva-vazão denominado *HYCYMODEL* apresentou bons ajustes para períodos curtos (um ano) entre os valores respectivos de vazão observada e calculada. Porém, a estimativa da evapotranspiração real (*ET_r*) e conseqüentemente do balanço hídrico pelo modelo não são adequados;
- os índices de evapotranspiração relativa (*ET_r* / *ET_p*) evidenciam que a evapotranspiração real (*ET_r*) calculada no balanço hídrico com o *HYCYMODEL* superestimou, em média, 44,2% dos valores de evapotranspiração potencial (*ET_p*) calculada com o método de Thornthwaite;
- a utilização de dados de chuva de apenas um posto meteorológico para representar toda uma bacia hidrográfica, como a do rio das Pedras (327,88 km² de área), interfere e prejudica acentuadamente os resultados do balanço hídrico obtido com o modelo chuva-vazão *HYCYMODEL*.

Referências

- ARIYAKANON, N. *Studies on long-term trend in discharge characteristics in forested watersheds*. Tokyo: Laboratory of Forest Hydrology and Erosion Control Engineering Department of Forest Science, Graduate School of Agricultural and Live Sciences. University of Tokyo, 2000. 161p.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M. J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sci. Bull.*, Oxford, n. 24, p. 43-69, 1979.
- FUKUSHIMA, Y. *et al.* Estimation of streamflow change by global warming in a glacier – covered high mountain area of the Nepal Himalaya. *Snow, Hydrology and Forest in High Alpine Areas. IAHS Publ.*, n. 205, p. 181-189, 1991.
- FUKUSHIMA, Y. A Model of river flow forecasting for a small forested mountain catchment. *Hydrol. Process.*, Chichester, v. 2, p. 167-185, 1988.
- HORNBERGER, G. M. *et al.* *Elements of physical hydrology*. Baltimore: The John Hopkins University Press, 1998.
- KOBYAMA, M. *et al.* Geo-Bio-Hidrologia. In: FÓRUM GEO – BIO – HIDROLOGIA: ESTUDO EM VERTENTES E MICROBACIAS HIDROGRÁFICAS, 1, 1998, Curitiba. *Anais...* Curitiba: Universidade Federal do Paraná, 1998, p. 1-25.
- KUBOTA, J. *et al.* An analysis of runoff characteristics on volcanic areas using the *HYCYMODEL*. *Journal of the Japan Society of Erosion Control Engineering*, Tokyo, v. 48, p. 77-89, 1996.
- LINSLEY, R. K. JR. *et al.* *Hydrology for engineers*. 2 ed. New York: McGraw-Hill, 1958.
- MAACK, R. *Geografia física do estado do Paraná*. 2 ed. Rio de Janeiro: J. Olympio, 1981.
- OLIVEIRA, S. M. de. *Análise do processo chuva-vazão de duas bacias hidrográficas na região litorânea do estado do Paraná, através do modelo de tanque*. 1999. Dissertação (Mestrado em Agronomia)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1999.
- PACHECHENIK, P. E. *Caracterização hidrológica e da fragilidade ambiental na bacia do rio das pedras, Guarapuava – PR*. 2004. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo)-Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.
- PEREIRA, A. R. *et al.* *Evapo(transpi)ração*. Piracicaba: Fealq, 1997.
- SHERMAN, L. K. Streamflow from rainfall by unit-graf method. *Eng. News-Rec.*, New York, v. 108, p. 501-505, 1932.
- SOUZA, J. L. M. de. *Evapotranspiração e coeficiente de cultura do algodoeiro (G. hirsutum L.) submetido a diferentes profundidades do lençol freático*. 1992. Dissertação (Mestrado)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 1992.
- SOUZA, J. L. M. de. *Modelo de análise de risco econômico aplicado ao planejamento de projetos de irrigação para cultura do caféiro*. 2001. Tese (Doutorado)-Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, USP, Piracicaba, 2001. Disponível em <<http://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/11/11143/tde-11102001-180056/>>
- SUGAWARA, M. On the analysis of runoff struture about several Japanese rivers. *Japanese Journal Geophysics*, Tokyo, v. 2, p. 1-76, 1961
- TANAKA, H. *et al.* Water discharge property of evergreen broad-leaved forest river basin Juliashan, Jiangxi province, China. *Journal of Japan Society of Hydrology and Water Resources*, Tokyo, v. 11, n. 3, p. 240-252, 1998.
- THORNTHWAITTE, C. W. An approach toward a rational classification of climate. *Geogr. Rev.*, New York, v. 38, n. 1, p. 55-94. 1948.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 1998.
- VISSMAN Jr. *et al.* *Introduction to hydrology*. New York, Intext Educational, 1972
- VILLELA, S. M.; MATTOS, A. *Hidrologia aplicada*. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

Received on January 20, 2005.

Accepted on October 6, 2005.