

Análise comparativa dos modelos de gash e de rutter para a estimativa da interceptação por floresta ombrófila mista

A comparative analysis of the gash and the rutter models for the estimation of rainfall interception by mixed ombrophilous forest

João Henrique Macedo Sá, Pedro Luiz Borges Chaffe e Debora Yumi de Oliveira

Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, Brasil.

joao.h.sa@posgrad.ufsc.br; pedro.chaffe@ufsc.br; debora.ydo@gmail.com

Recebido: 12/01/15 - Revisado: 01/04/15 - Aceito: 01/07/15

RESUMO

A interceptação é o primeiro processo pelo qual a água da chuva passa na bacia hidrográfica. O monitoramento e modelagem desse processo são importantes para se quantificar qual a parcela da chuva realmente chega ao solo. O objetivo deste trabalho foi fazer análise comparativa dos modelos de Gash e de Rutter para a estimativa da perda por interceptação (I) na bacia experimental do rio Araponga. A área de estudo está localizada no planalto Norte Catarinense. É uma área completamente coberta por Floresta Ombrófila Mista secundária. Foi utilizado um pluviômetro para o monitoramento da chuva externa (P), para o monitoramento de chuva interna (I_f) foi utilizado uma calha interligada com pluviômetro e para o monitoramento de escoamento pelos troncos (S_f) foi utilizado um sistema de 4 árvores interligadas a outro pluviômetro. Todos os parâmetros foram monitorados entre 26/02/2014 e 04/10/2014. A P total foi de 1.352 mm, distribuídos em 60 eventos; a I_f total foi de 1.006 mm e o S_f somou 18 mm. A I obtida nas medidas de campo foi de 328 mm, correspondendo a 24% da precipitação total incidente acima do dossel. O erro relativo da simulação com o modelo de Gash esparsa foi de 81% para a I acumulada utilizando os parâmetros obtidos a partir de relações empíricase 6% utilizando os parâmetros calibrados. O modelo de Rutter esparsa teve erro relativo de I acumulada de 77% utilizando os parâmetros obtidos a partir de relações empíricase diminui para 0% utilizando os parâmetros calibrados.

Palavras Chave: Interceptação. Floresta Ombrófila Mista. Modelo de Gash. Modelo de Rutter.

ABSTRACT

Monitoring and modeling interception is important to quantify how much water actually arrives at the soil surface. The objective of the present work was to perform a comparative analysis of the Gash and Rutter models for the estimation of loss by interception (I) in the Araponga river catchment. The study area is localized in the Northern Santa Catarina State plateau. The catchment is completely covered by secondary Mixed Ombrophilous Forest. Total rainfall (P) was measured using a tipping bucket rain gauge, throughfall (I_f) was measured using a trough connected to a rain gauge and stemflow (S_f) was measured from 4 different trees. It was all recorded automatically every 5 min from 26/02/2014 to 04/10/2014. P, I_f and S_f during the period were 1352 mm, 1006 mm and 18 mm, respectively. Total Interception loss was 328 mm, corresponding to 24% of total rainfall. The total relative error for I of the Gash model was 81% when using parameters derived from measured data and 6% for calibrated parameters. The total relative error of I for the Rutter model was 77% when using parameters derived from measured data and 0% for calibrated parameters.

Keywords: Interception. Mixed Ombrophilous Forest. Gash Model. Rutter Model.

INTRODUÇÃO

A interceptação é o processo hidrológico pelo qual a precipitação que cai sobre a superfície do terreno fica retida, é redistribuída ao solo ou evapora posteriormente. Ela pode influenciar outros processos hidrológicos como a infiltração da água no solo, a erosão e o escoamento superficial (KEIM et al., 2005; TSIKO et al., 2012). Em áreas de floresta, a perda por interceptação pode chegar a 50% do total precipitado, tendo um papel importante no balanço hídrico e reciclagem da umidade (RUTTER, 1963; ZINKE, 1967; KLAASSEN; BOSVELD; WATER, 1998; CHAFFE et al., 2010).

A água interceptada na superfície da vegetação é a porção de água da bacia que está mais disponível para evaporação (HEWLETT, 1982). Em climas quentes, a evaporação da água interceptada é uma parcela significativa da evaporação total (SAVENIJE, 2004). A interceptação da chuva é influenciada por fatores relacionados à vegetação (densidade de cobertura, formato das folhas), às características do evento (intensidade da precipitação, volume total precipitado) e às condições meteorológicas (intensidade de vento, umidade e temperatura do ar).

Como grande parte do sucesso da modelagem chuva-vazão depende das condições antecedentes de umidade, deve-se separar a chuva em duas parcelas: (1) a que contribui para a umidade do solo da bacia; e (2) a que não contribui. O desprezo ou o erro na estimativa das perdas por interceptação introduzem erros na modelagem chuva-vazão (SAVENIJE, 2004; FENICIA et al., 2008; CHAFFE et al., 2010). Por esta razão, o monitoramento e a modelagem desse processo são importantes para se quantificar a contribuição da interceptação em diferentes ambientes (RUTTER, 1963; ZINKE, 1967; KLAASSEN; BOSVELD; WATER, 1998; CHAFFE et al., 2010; GIGLIO, 2013).

A primeira tentativa de se estimar as perdas por interceptação foi utilizando um modelo de regressão linear proposto por Horton (1919). Até a década de 70, os modelos de interceptação utilizavam relações empíricas derivadas da chuva externa, como a equação de Zinke (1967). Diversos outros modelos foram propostos para estimativa de perdas por interceptação (RUTTER; MORTON; ROBINS, 1975; SUZUKI et al., 1979; GASH, 1979; VALENTE; DAVID; GASH, 1997). Devido às dificuldades de medição, a maneira mais comum de se tratar a interceptação é por um balanço hídrico. Muzylo et al. (2009) constatou que os modelos mais aplicados são os modelos originais e esparsos de Gash e de Rutter.

Rutter et al. (1971 e 1975) apresentaram um modelo contínuo baseado na física simplificada da interceptação com a partição da precipitação entre os componentes de copa e de tronco. Este modelo tem sido aplicado em diversos tipos de florestas.

O modelo de Gash (GASH, 1979) é uma simplificação do modelo de Rutter e não requer como entrada uma série de dados de alta resolução temporal. No modelo de Gash a derivação é feita a partir de uma equação de regressão. Gash (1979) separa a fase pré e pós-saturação de copa e a partir do uso de intensidade de precipitação e taxa de evaporação médias para os eventos de precipitação.

Os estudos sobre o processo de interceptação em flo-

restas nativas brasileiras foram realizados predominantemente na região Amazônica e na Mata Atlântica (GIGLIO; KOBIYAMA 2013). O bioma da Mata Atlântica abriga uma parcela significativa da biodiversidade do Brasil. Muitas de suas espécies estão ameaçadas de extinção, pois originalmente a Mata Atlântica cobria 13% do território brasileiro, mas com a urbanização e o desmatamento foi reduzida a menos de 0,3% de sua área original (GIGLIO, 2013). Em florestas da Mata Atlântica, a perda por interceptação de copa varia de 8,4 a 20,6% (CASTRO et al., 1983; COELHO et al., 1986; FRANKEN et al., 1992; ARCOVA et al., 2003; FERREIRA et al., 2005; OLIVEIRA e DIAS, 2005; VIEIRA e PALMIER, 2006; MOURA et al., 2009; OLIVEIRA et al., 2008).

Dos trabalhos contemplados na revisão bibliográfica sobre estudos de interceptação no Brasil, apresentada em Giglio e Kobiyama (2013), apenas um foi realizado em Floresta Ombrófila Mista. Thomaz (2005) monitorou em Guarapuava, durante 2002, a chuva interna e estimou a perda por interceptação como sendo igual a 52,4% em área com capoeira e 23% em floresta secundária.

O processo de interceptação em Floresta Ombrófila Mista ainda é pouco conhecido. O objetivo deste estudo foi fazer uma análise comparativa dos modelos esparsos de Gash e de Rutter para a estimativa da perda por interceptação (I) na bacia experimental do rio Araponga.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de Estudo

A bacia experimental do rio Araponga (5,3 ha) está situada na zona rural do município de Rio Negrinho-SC, no Planalto Norte catarinense (Figura 1). Esta é uma bacia de segunda ordem inserida em uma região coberta por Floresta Ombrófila Mista secundária. A altimetria da bacia varia de 1.006 m a 880 m com relação ao nível do mar (MOTA, 2012; GIGLIO, 2013).

Dados Hidrometeorológicos

Na bacia experimental do rio Araponga foram instalados um pluviógrafo para monitoramento de chuva externa – P (Figura 2b), uma calha (0,2 x 3 metros) interligada a um pluviógrafo para o monitoramento da chuva interna – Tf (Figura 2c) e um sistema de 4 árvores conectadas a um pluviógrafo para o monitoramento do escoamento pelos troncos – Sf (Figura 2d). A estação pluviométrica, localizada na cabeceira da bacia, realizou o monitoramento de chuva externa com pluviógrafo de balsa com resolução de 0,24 mm, e os dados foram registrados em um datalogger a cada 5 min. Os monitoramentos da Tf e do Sf também foram registrados por um datalogger a cada 5 min.

Os dados de radiação solar, direção e velocidade do vento, umidade relativa e temperatura do ar foram obtidos da estação meteorológica do rio Feio, localizada a aproximadamente 3 km da bacia em estudo. O registro dos dados foi realizado a cada 10 min.

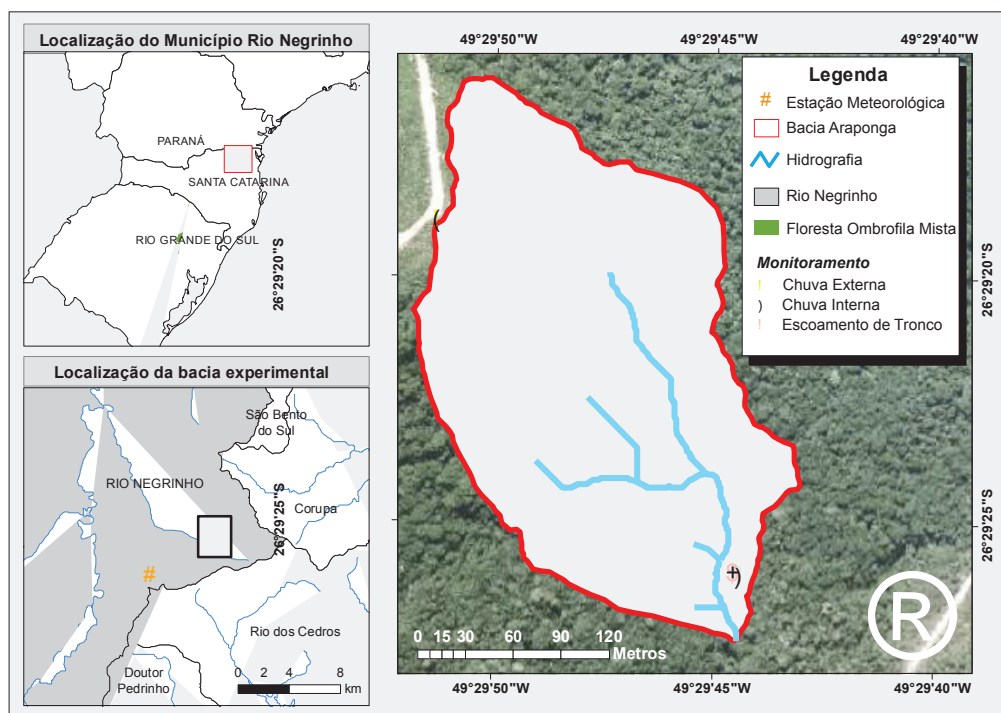


Figura 1 – Mapa de localização da bacia e dos pontos de monitoramento



Figura 2 – Fotografias dos pontos de monitoramento: (a) estação meteorológica do rio Feio; (b) pluviógrafo de medição da chuva externa (P); (c) calha para coleta da chuva interna (Tf); e (d) mangueiras da coleta do escoamento pelos troncos (Sf)

Estimativa da Perda por Interceptação

Estudos de perda por interceptação (I) em florestas resultam frequentemente em equações empíricas na forma de regressão entre I e P, isto é, como funções do tipo:

$$I = aP + b \quad (1)$$

sendo I a quantidade de água da chuva interceptada e perdida por evaporação; P o total de chuva acima do dossel; e a e b os coeficientes de regressão.

A perda por interceptação total fraciona-se em dois componentes: a perda pela copa e pelo chão florestal (HEWLETT, 1982), conforme a Equação (2).

$$I = I_c + I_f \quad (2)$$

onde I é o total de perdas por interceptação (mm); I_c é a perda por interceptação pela copa (mm); e I_f é a perda por interceptação pelo chão florestal (mm).

A estimativa da perda por interceptação pela copa pode ser feita de maneira indireta através da medição da chuva externa, da chuva interna e do escoamento pelos troncos, conforme a Equação (3):

$$I_c = P - (Tf + Sf) \quad (3)$$

onde P é a chuva externa (mm); Tf é a chuva interna – through-fall (mm); e Sf é o escoamento pelos troncos – stemflow (mm).

A medição da perda por interceptação pelo chão florestal (I_f) se resume em coletar e pesar amostras do chão florestal calculando a diferença entre o peso úmido e o peso seco (HELVEY; PATRIC, 1965).

Desta forma, a partir dos dados medidos em campo, a perda por interceptação total pode ser estimada por:

$$I = P - (Tf + Sf) + I_f \tag{4}$$

Nesse estudo não foi considerada a perda por interceptação pelo chão florestal (If).

Estimativa de Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial na bacia foi estimada com o método de Penman modificado (DOORENBOS; PRUITT, 1977), a partir dos dados de temperatura, umidade relativa do ar, radiação solar incidente e velocidade do vento monitorados na estação meteorológica do rio Feio.

$$E_p = F \left[W \cdot Rad_n + (1 - W) \cdot f(u) \cdot (e_a - e_d) \right] \tag{5}$$

onde E_p é a evapotranspiração potencial (mm d^{-1}); F é o fator de correção para a região em questão; W é o fator de ponderação relacionado com temperatura e altitude; Rad_n é a radiação líquida expressa em evaporação equivalente (mm d^{-1}); $f(u)$ é a função relacionada com o vento; e_a é a pressão de vapor de água no ar saturado (mbar); e e_d é a pressão de vapor de água na condição real (mbar).

O método de Penman modificado resulta em médias diárias de evapotranspiração potencial. Essas médias foram transformadas em valores de evapotranspiração potencial com resolução temporal de 5 minutos, seguindo a transformação proposta por Chaffe (2009). Essa transformação supõe que, nas horas de sol (06h00min às 18h00min), a evapotranspiração segue uma função senoidal e corresponde a 90% da evapotranspiração potencial total; nas horas sem sol (18h00 min às 06h00 min), a evapotranspiração é uniforme e seu total corresponde a 10% da evapotranspiração potencial diária.

Modelo de Rutter

O modelo de Rutter (RUTTER et al., 1971; 1975) trata a árvore como um tanque de armazenamento de água, que possui como entrada a precipitação e como saídas a evaporação, a drenagem de copa e o escoamento pelos troncos. Os balanços hídricos para copa e tronco podem ser calculados através das Equações (6) e (7), respectivamente.

$$(1 - p - p_t) \int R dt = \int D dt + \int E dt + \Delta C \tag{6}$$

$$p_t \int R dt = Sf + \int E_t dt + \Delta C_t \tag{7}$$

onde p é o coeficiente de chuva interna livre (proporção da chuva que chega diretamente ao solo, sem colidir com os elementos florestais); p_t é o coeficiente de água desviada para os troncos; R é a intensidade da chuva externa; D é a taxa de drenagem de copa; E é a taxa de evaporação da água interceptada pela copa;

C é o armazenamento na copa; E_t é a taxa de evaporação de tronco; e C_t é o armazenamento no tronco.

A intensidade de chuva externa (R , mm h^{-1}) é dividida em taxa de precipitação interna livre (pR), taxa de entrada de tronco (p_tR) e taxa de entrada da copa ($(1-p-p_t)R$). A saída do compartimento de armazenamento copa é a evaporação da copa (E) e a taxa de drenagem da copa (D); a chuva interna é assim dada por $pR+D$. A saída do compartimento de armazenamento tronco é devido à taxa de evaporação do tronco (E_t) e escoamento pelos troncos (S_f).

O modelo de Rutter foi adaptado para considerar espaços abertos entre as copas das árvores (VALENTE; DAVID; GASH, 1997), aqui chamado modelo de Rutter esparso. A principal diferença é que neste modelo o balanço é realizado para a área coberta e para a área descoberta separadamente (Figura 3). A evaporação é considerada apenas na fração em que há cobertura florestal. Na formulação original do modelo de Rutter em florestas esparsas, a taxa de evaporação poderia ser superior à $(1-p-p_t)R$ (fração da chuva externa que chega à copa), ou seja, seria considerado que a copa não estaria sendo molhada. Outra modificação em relação ao modelo de Rutter original é que a água chega aos troncos somente após saturação da copa.

Modelo de Gash

O modelo de Gash (1979) foi o primeiro modelo analítico de interceptação, sendo uma solução simplificada do modelo de Rutter. O modelo representa a precipitação como

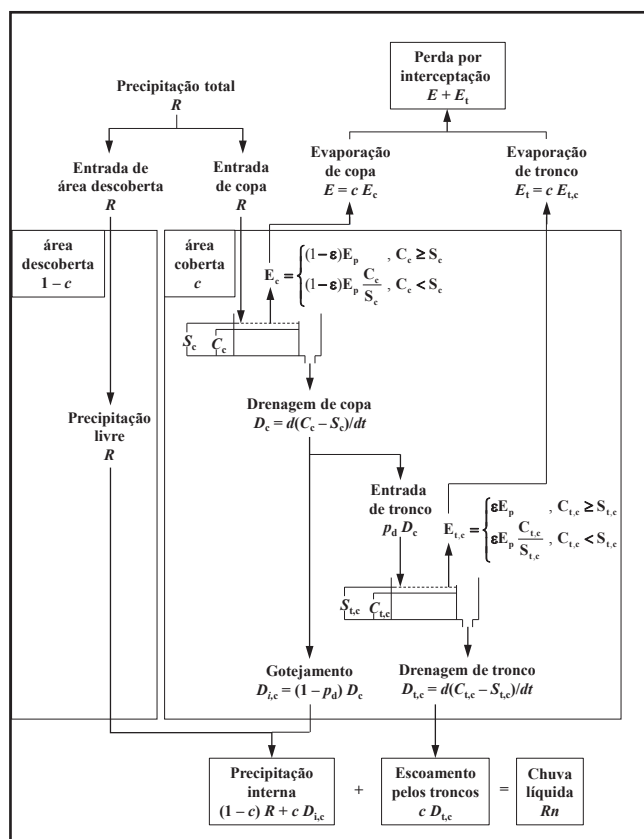


Figura 3 - Fluxograma do modelo de Rutter esparso. (Modificado de Valente et al.(1997) e Chaffe(2009))

entrada de uma série de eventos que são separados por intervalo de tempo suficiente para a secagem completa da copa. Este modelo, assim como o de Rutter, foi reformulado para considerar o caso de copa esparsa, dividido em dois componentes: o do dossel e dos espaços abertos entre as copas (GASH; LLOYD; LACHAUD, 1995).

O modelo de Gash separa o processo de interceptação em três fases: a molhagem ou umedecimento do dossel, a saturação e por final a secagem. Nas duas primeiras fases (molhagem e saturação do dossel) as taxas reais de evaporação são substituídas por suas taxas médias para todo o período que está sendo modelado.

A perda por interceptação para os m eventos que são insuficientes para saturação do dossel ($P < P_g$, sendo P_g o menor volume para a saturação do dossel), é calculada a partir da seguinte equação:

$$I_m = c \sum_{j=1}^m P_j \quad (8)$$

sendo c a proporção de cobertura florestal; e P_j o total de precipitação no evento j.

Para os n eventos que são suficientes para saturar a copa ($P \geq P_g$), a seguinte equação é utilizada:

$$I_n = c \left[nP_g + \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}}{\bar{R}} \sum_{j=1}^n (P_j - P_g) \right] \quad (9)$$

onde ε é a relação entre taxa de evaporação de tronco e taxa de evaporação de copa; \bar{E} a taxa média de evaporação (mm/h); e \bar{R} a intensidade média da chuva externa (mm/h).

A perda por interceptação para os q eventos que são suficientes para saturar os troncos é calculada por:

$$I_q = qS_t \quad (10)$$

onde S_t é a capacidade de armazenamento de tronco.

Para os n - q eventos que não chegam a saturar os troncos, a perda por interceptação é:

$$I_{n-q} = p_t c \left[1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}}{\bar{R}} \right] \sum_{j=1}^n (P_j - P_g) \quad (11)$$

sendo p_t a proporção de chuva externa desviada para os troncos.

A perda por interceptação total é então calculada pela Equação (12).

$$I = I_m + I_n + I_q + I_{n-q} \quad (12)$$

Cálculo de Erro dos Modelos

Para o cálculo do erro foram utilizados o coeficiente Nash (Equação (13)) (NASH; SUTCLIFFE, 1970) e o erro relativo (Equação (14)). O coeficiente Nash foi calculado para a I simulada pelo modelo de Rutter.

$$Nash(\Theta) = \left(1 - \frac{\sum_{t=1}^N (I(t) - I(t|\Theta))^2}{\sum_{t=1}^N (I(t) - \bar{I})^2} \right) \quad (13)$$

sendo $Nash(\Theta)$ o coeficiente de Nash & Sutcliffe (1970) para o conjunto de parâmetros Θ ; $I(t)$ a perda por interceptação observada no tempo t; $I(t|\Theta)$ a perda por interceptação calculada no tempo t usando o conjunto de parâmetros Θ ; o valor médio da perda por interceptação observada; e N o número de passos no tempo.

O erro relativo foi calculado para cada evento considerando a I acumulada simulada pelos modelos de Gash e de Rutter, sendo utilizado para comparar a estimativa da perda por interceptação pela copa dos dois modelos.

$$Erro(\Theta) = \frac{\left| \sum_{t=1}^N I_c(t) - \sum_{t=1}^N I_c(t|\Theta) \right|}{\sum_{t=1}^N I_c(t)} \times 100\% \quad (14)$$

onde $Erro(\Theta)$ é o erro relativo absoluto para o conjunto de parâmetros Θ .

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração potencial diária foi calculada com o método de Penman modificado para o período de 26/02/2014 a 04/10/2014 (Figura 4). Quando a evapotranspiração potencial diária resultou em um valor negativo, devido à ausência de déficit de umidade do ar (umidade relativa igual ou superior a 100%), os valores foram substituídos por zero. A média da série calculada é 1,09 mm/dia.

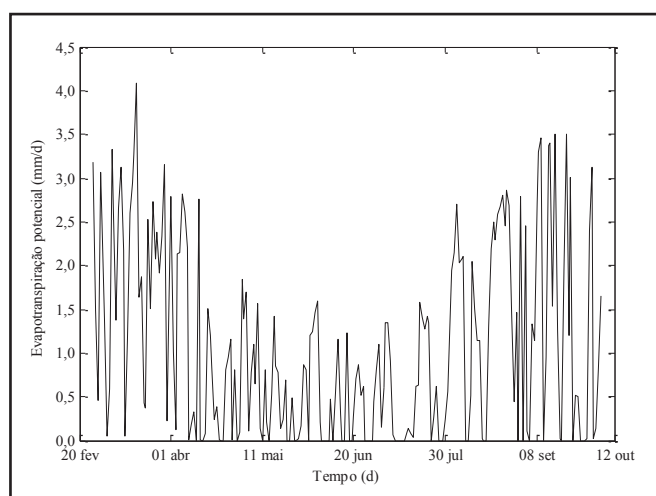


Figura 4 – Evapotranspiração potencial diária calculada com o método de Penman modificado

Intercepção

A chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelos troncos (Sf) foram monitorados de 26/02/2014 a 04/10/2014 (Figura 5). A P foi 1.352 mm, a chuva interna e escoamento pelos troncos corresponderam a 74,4 % (1.006 mm) e 1,3 % (18 mm) da chuva externa, respectivamente. A proporção de chuva interna em relação à chuva externa foi próxima ao valor encontrado por Thomaz (2005) para floresta secundária (77%).

As máximas intensidades de P, Tf e Sf registradas foram de 8,4 mm/5min, 4,7 mm/5min e 0,05 mm/5min, respectivamente (Figura 5).

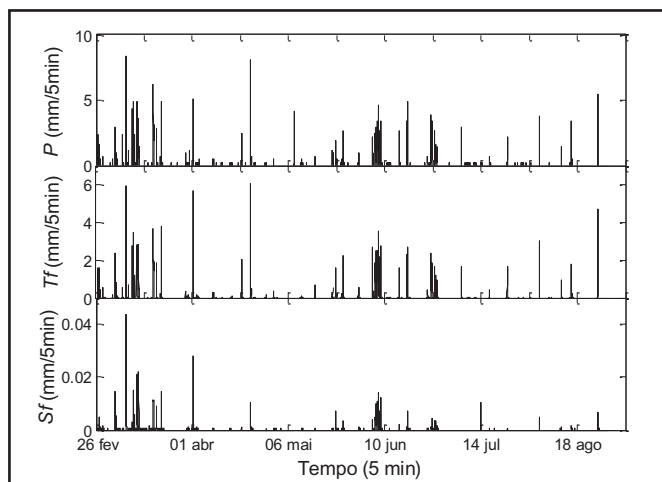


Figura 5 – Série de dados monitorados da chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelos troncos (Sf)

Considerando que um evento tem início com registro de precipitação e final marcado pela ocorrência de pelo menos 6 horas sem registro de P, foram identificados 60 eventos durante o período monitorado (Figura 6). Eventos com chuva externa inferior a 1 mm ou com falhas no monitoramento foram desconsiderados.

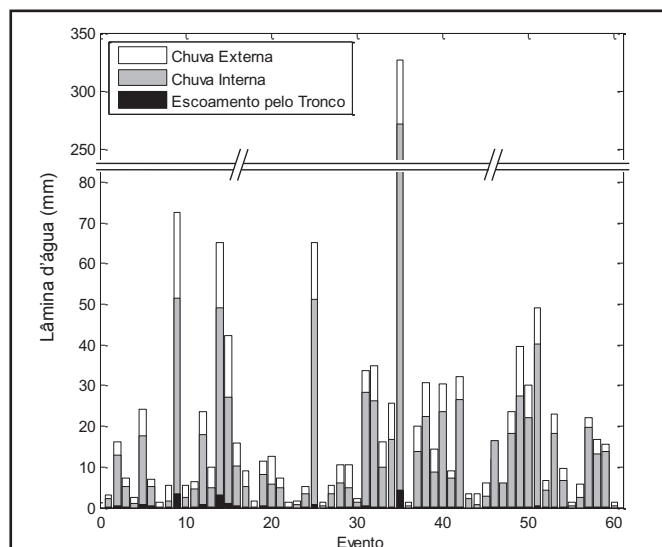


Figura 6 – Lâmina d'água de chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelos troncos (Sf) registrados em cada evento

O maior evento ocorreu entre os dias 05 e 08 de junho de 2014, somando 326 mm de P (Figura 6). A máxima intensidade do evento foi de 55,2 mm/h e a intensidade média foi de 6,0 mm/h.

A estimativa da capacidade de armazenamento da copa (Sc) e do coeficiente de chuva interna livre (p) é realizada através de um gráfico de dispersão entre as lâminas de chuva externa e chuva interna.

O ponto de inflexão dos dados foi de 5 mm, que seria o valor de chuva externa necessária para saturar a copa (LEYTON; REYNOLDS; THOWPSON, 1967). A inclinação da reta de regressão entre P e Tf, para os valores de chuva externa menores que 5 mm, equivale ao coeficiente de chuva interna livre p ou (1 - c).

No ponto de monitoramento da chuva interna o p foi estimado como 0,63 (Figura 7). Para a estimativa da capacidade de armazenamento da copa (Sc) foi traçada uma curva nos pontos de envoltória, que equivalem a condições mínimas de evaporação.

A estimativa da Sc foi realizada utilizando 3 pontos

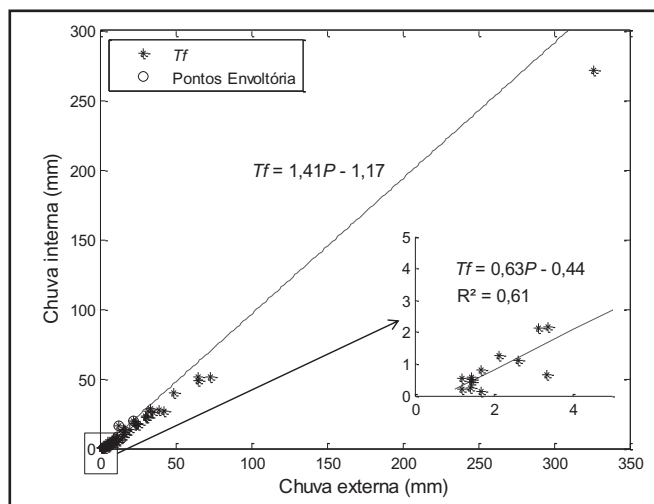


Figura 7 – Relação entre chuva externa e chuva interna. No gráfico menor é apresentada a relação entre P e Tf para eventos abaixo do ponto de inflexão (P<5mm)

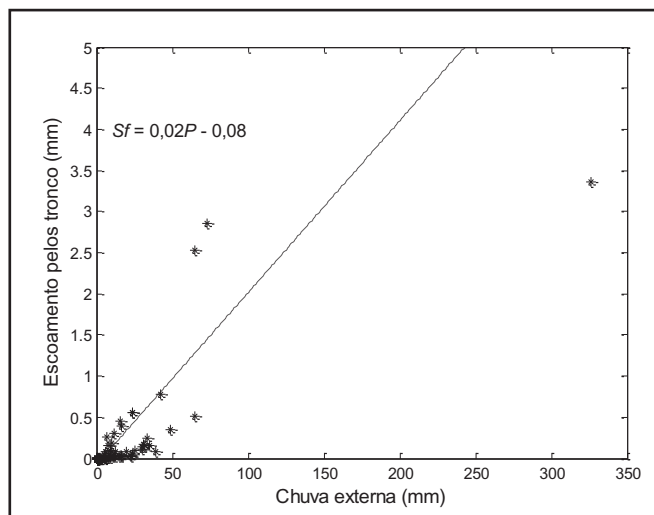


Figura 8 – Relação entre escoamento pelos troncos e chuva externa

para a curva envoltória, sendo obtido um valor de 1,17 mm, conforme pode ser observado na Figura 7.

A Figura 8 apresenta o gráfico para a obtenção de S_t , que corresponde ao oposto do coeficiente linear da reta de regressão entre os valores de escoamento pelos troncos e de chuva externa, ou seja, $S_t = -(-0,08) = 0,08$.

A reta de regressão entre S_f e $T_f - (1 - c)P_g$ fornece uma estimativa do valor de p_d , que corresponde a (inclinação da reta)/(1 + inclinação da reta) (VALENTE; DAVID; GASH., 1997). Neste estudo, p_d foi estimado como 0,04 (Figura 9).

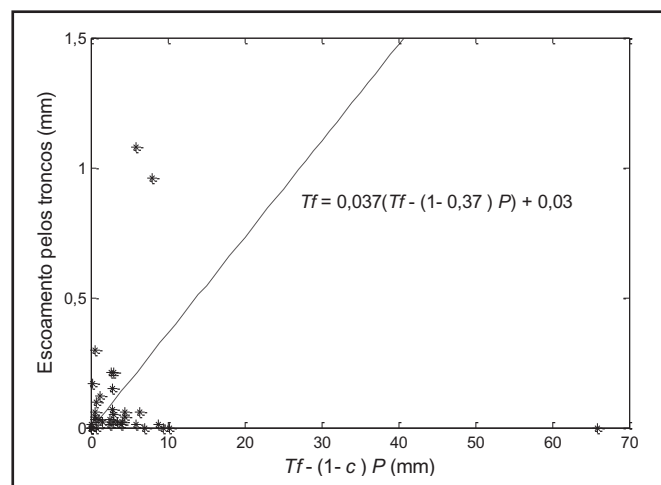


Figura 9 – Relação entre escoamento pelos troncos e $T_f - (1 - c)P$

Modelagem

Os valores dos parâmetros dos modelos foram determinados de duas formas: usando relações empíricas e através de calibração.

Foram feitas 10.000 simulações variando aleatoriamente os valores dos parâmetros dos modelos para encontrar o conjunto de parâmetros que resultasse em um menor erro relativo da I acumulada ao final de todo período monitorado. Os intervalos dos parâmetros foram definidos a partir dos valores encontrados na literatura e são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Intervalo dos parâmetros usados na simulação.

Proporção de cobertura florestal (c), capacidade de armazenamento da copa (S_c), capacidade de armazenamento do tronco (S_t), proporção de água desviada da copa para os troncos (p_d) e proporção da taxa de evaporação de tronco em relação à taxa de evaporação de copa (ϵ)

Parâmetro	Intervalo		Unidade
	mín.	máx.	
c	0,25	0,95	-
S_c	1,00	4,00	mm
S_t	0,10	3,00	mm
p_d	0,05	0,60	-
ϵ	0,05	0,50	-

Os valores calculados encontram-se na Tabela 2. A proporção da taxa de evaporação de tronco em relação à taxa

de evaporação de copa (ϵ) foi estipulada como sendo 0,10 (CHAFFE et al., 2010).

Tabela 2 – Parâmetros estimados dos modelos de interceptação. Proporção de cobertura florestal (c), capacidade de armazenamento da copa (S_c), capacidade de armazenamento do tronco (S_t), proporção de água desviada da copa para os troncos (p_d) e proporção da taxa de evaporação de tronco em relação à taxa de evaporação de copa (ϵ)

	Parâmetros				
	c	S_c [mm]	S_t [mm]	p_d	ϵ
Monitorado	0,37	1,17	0,08	0,04	0,10
Rutter c	0,80	3,96	2,98	0,46	0,17
Gash c	0,88	3,65	2,87	0,54	0,05

A Figura 10 mostra os resultados da simulação com o modelo de Rutter usando o maior evento ($P=326$ mm). A duração do evento foi de 60 horas e 42 minutos (728 dados), e a intensidade máxima de 5,4 mm/h. Nessa simulação o valor de Nash foi de 0,85 e do erro relativo foi de 20%.

O erro relativo por evento variou de 7 a 98% com o modelo de Rutter e de 21 a 92% com o modelo de Gash (Figura 11). Erros relativos muito elevados (acima de 100%) ocorreram predominantemente em eventos com baixo valor de chuva externa. O evento que obteve o maior erro relativo foi no evento n°59, em que a chuva externa foi de 15 mm, a perda por interceptação monitorada foi de 1,86 mm e o modelo de Rutter com os parâmetros calibrados simulou uma perda de 6,97 mm, resultando em um erro relativo de 275%.

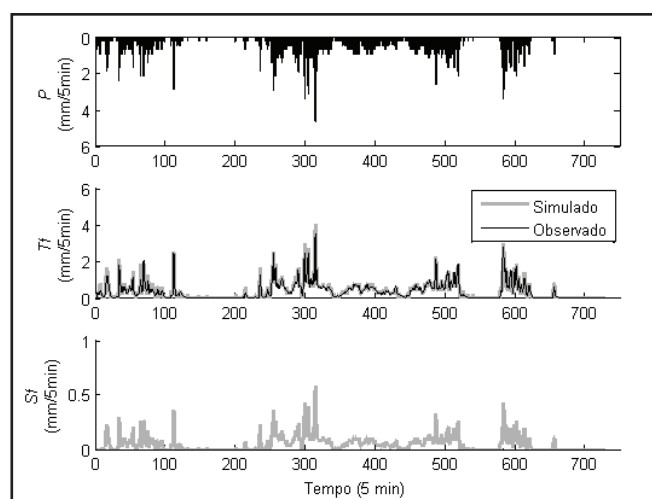


Figura 10 – Simulação do modelo de Rutter de chuva interna (T_f) e escoamento pelos troncos (S_f) para o maior evento (n°35), chuva externa (P) de 326 mm com o valor de Nash de 0,85

As simulações com o modelo de Rutter utilizando os parâmetros calibrados resultaram em valores de erro relativo por evento acima de 200%, o que não ocorreu ao se utilizar os parâmetros obtidos a partir de relações empíricas. A variância do erro relativo para a I acumulada por evento das simulações

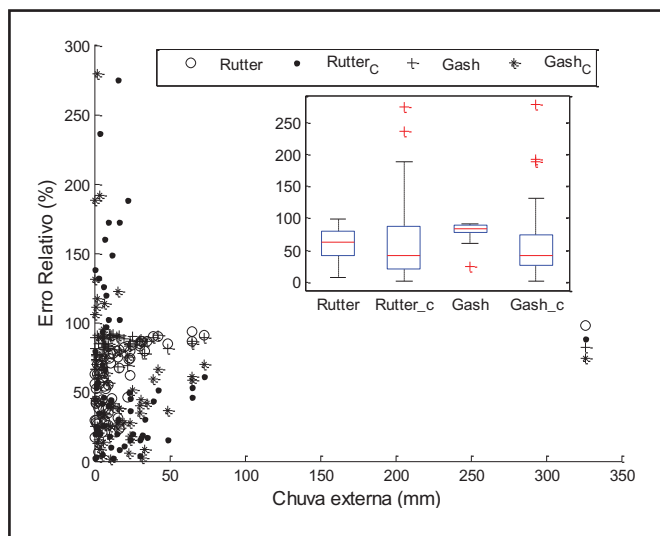


Figura 11 – Erro relativo para a I acumulada por evento pelo modelo de Gash e pelo modelo de Rutter e boxplot do erro relativo por evento dos dois modelos. GashC e RutterC é a simulação dos modelos utilizando os parâmetros de entrada calibrado

com o modelo de Gash foi menor com os parâmetros obtidos a partir de relações empíricas do que com o emprego os parâmetros calibrados, como pode ser observado na Figura 11.

Nos dois modelos, as simulações com os parâmetros calibrados resultaram em menores erros relativos para a perda por interceptação (I) acumulada durante todo o período. O erro relativo da perda por interceptação (I) acumulada do modelo de Rutter foi de 77% utilizando os parâmetros obtidos a partir de relações empíricas e de 0% com os parâmetros calibrados. O modelo de Gash resultou em uma maior variação nas duas

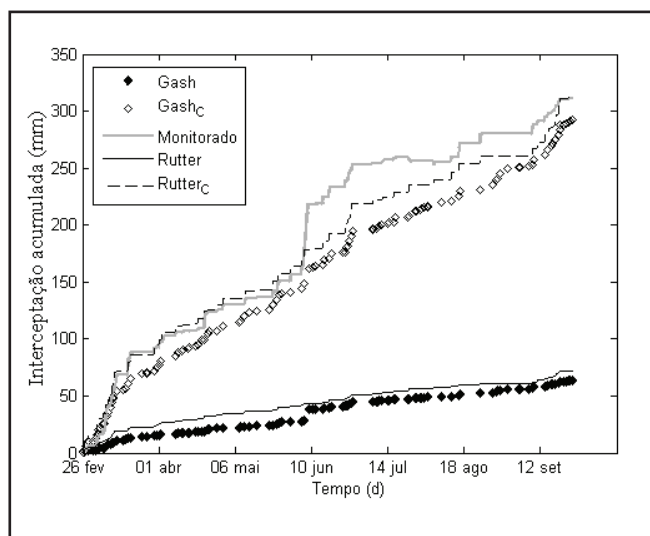


Figura 12 – Perda por interceptação acumulada monitorada, estimativa pelo modelo de Gash e estimativa pelo modelo de Rutter. GashC e RutterC é a simulação dos modelos utilizando os parâmetros de entrada calibrado

simulações consideradas, sendo que o erro relativo das simulações realizadas com os parâmetros obtidos a partir de relações empíricas foi de 81% e com os parâmetros calibrados foi de 6%. Apesar dos melhores resultados obtidos com a utilização do modelo de Rutter, este possui uma aplicabilidade limitada, pois requer dados com maior resolução temporal em relação ao modelo de Gash.

Verifica-se que, nas simulações utilizando os valores dos parâmetros encontrados a partir de relações empíricas, os dois modelos subestimaram a I acumulada (Figura 12). Com a

Tabela 3 - Coeficientes de correlação de Spearman. *Int_{máx}P* é a intensidade máxima da chuva externa, *Int_{máx}Tf* é a intensidade máxima da chuva interna, *Int_{med}P* é a intensidade média da chuva externa, *P* é a chuva externa, *Tf* é a chuva interna e *Sf* é o escoamento pelos troncos. Os dados em negrito indicam que há correlação significativa ($pS < 0,05$)

	Duração [h]	Período seco total [h]	Período seco máx. [h]	<i>Int_{máx}P</i> [mm/5min]	<i>Int_{máx}Tf</i> [mm/5min]	<i>Int_{med}P</i> [mm/h]	Erro Relativo Rutter _C	Erro Relativo Gash _C	<i>P</i> [mm]	<i>Tf</i> [mm]	<i>Sf</i> [mm]
Duração [h]	1	0,95	0,66	-0,05	-0,02	-0,32	0,26	0,04	0,44	0,38	0,04
Período seco total [h]		1	0,74	-0,20	-0,20	-0,50	0,16	0,09	0,22	0,16	-0,10
Período seco máx. [h]			1	-0,19	-0,10	-0,41	0,14	0,28	0,10	0,06	-0,13
<i>Int_{máx}P</i> [mm/5min]				1	0,83	0,84	0,35	0,23	0,71	0,77	0,48
<i>Int_{máx}Tf</i> [mm/5min]					1	0,84	0,30	0,25	0,72	0,79	0,52
<i>Int_{med}P</i> [mm/h]						1	0,25	0,31	0,61	0,67	0,51
Erro Relativo Rutter _C							1	-0,02	0,67	0,25	0,38
Erro Relativo Gash _C								1	0,01	0,10	0,22
<i>P</i> [mm]									1	0,97	0,61
<i>Tf</i> [mm]										1	0,63
<i>Sf</i> [mm]											1

utilização dos parâmetros calibrados, os dois modelos apresentaram uma melhoria significativa no valor final de I acumulada, porém isso não implica em uma melhor ajuste dos modelos à série observada ao longo do período monitorado.

Para verificar a existência de correlação entre as características dos eventos e os erros relativos dos resultados das simulações, foram calculados os coeficientes de correlação de Spearman (pS), apresentados na Tabela 3. Os valores que estão em negrito indicam que os pares das variáveis têm correlação significativa ($pS < 0,05$).

O erro relativo da simulação com o modelo de Gash não teve correlação com as características dos eventos, portanto o erro relativo não é necessariamente determinado pelo tipo, duração ou intensidade máxima e média do evento. O erro relativo da simulação com o modelo de Rutter teve correlação com a P, Tf, Sf, duração do evento e o período sem chuva no evento.

CONCLUSÃO

No presente trabalho o processo de interceptação em uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista foi monitorado e simulado com os modelos de Rutter esparsos e de Gash esparsos. O período de monitoramento foi de 26/02/2014 a 04/10/2014, sendo obtidos 62.116 dados de P, Tf e Sf, divididos em 60 eventos de precipitação. A perda por interceptação observada foi de 24%. Neste estudo foi verificada a viabilidade da utilização dos modelos de Rutter e de Gash para simular as perdas por interceptação pela vegetação para a região.

O modelo de Gash gerou uma subestimativa de I da ordem de 81% do total acumulado para o período monitorado. Porém, na simulação com os parâmetros calibrados o erro relativo baixou para 6%.

A aplicação do modelo de Rutter com os parâmetros obtidos a partir de relações empíricas produziu uma subestimativa dos valores medidos de I acumulada durante o período analisado.

Entre os dois modelos, a melhor simulação foi com o emprego do modelo de Rutter, com o qual foi obtido o menor valor de erro relativo para a I acumulada ao final do período monitorado. O menor erro relativo da I acumulada utilizando o modelo de Rutter foi de 0% e com o modelo de Gash de 6%.

Os modelos de perda por interceptação utilizados nesse trabalho tiveram como limitação identificada a representação não adequada do processo de interceptação em eventos pequenos. Isto também pode ocorrer pela dificuldade de amostragem da chuva interna e escoamento pelos troncos em florestas mistas, que são mais variáveis do que em florestas temperadas.

AGRADECIMENTOS

Parte deste estudo foi financiada pela Financiadora de Estudos e Projetos – FINEP, por meio dos projetos Manejo de águas pluviais em meio urbano –

MAPLU (projeto nº17457) e Rede de Pesquisa em Monitoramento e Modelagem de Processos Hidrossedimentológicos em Bacias Representativas Rurais e Urbanas do Bioma

Mata Atlântica – RIMA (projeto nº3.07.0058). Os autores agradecem ao Prof. Masato Kobiyama da UFRGS e a Ma. Joana Nery Giglio pelas primeiras instalações de equipamentos para monitoramento de interceptação na bacia e aos membros do Laboratório de Hidrologia da UFSC pelo auxílio no campo. Os autores agradecem também ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPQ e à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES pelas bolsas de estudo.

REFERÊNCIAS

ARCOVA, F.C.S.; CICCIO, V.; ROCHA, P.A.B. Precipitação efetiva e interceptação das chuvas por floresta de Mata Atlântica em uma microbacia experimental em Cunha – São Paulo. *Rev. Árvore*, Viçosa, v.27, n.2, p.257-262, 2003.

CASTRO, P.S.; VALENTE, O.F.; COELHO, D.T.; RAMALHO, R.S. Interceptação da chuva por mata natural secundária na região de Viçosa, MG. *Rev. Árvore*, Viçosa, v.7, n.1, p.76-89, 1983.

CHAFFE, P.L.B. *Monitoramento e modelagem do processo chuva-vazão de uma pequena bacia florestal com ênfase em interceptação*. 2009. 100 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2009.

CHAFFE, P.L.B.; KOBİYAMA, M.; YAMASHIKI, Y.; TAKARA, K. Is interception information important for rainfall-runoff modeling? *Annual Journal of Hydraulic Engineering*. *JSCE*, Tokyo, v.54, p.73-78, 2010.

COELHO NETTO, A. L.; SANCHE, M.; PEIXOTO, M. N. O. Precipitação e interceptação florestal em ambiente tropical montanhoso, Rio de Janeiro. *Rev. Bra. Eng.*, v.4, n.2, p.55-71, 1986.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. *Crop water requirement*. Roma: FAO, 1977. 144p.

FENICIA, F.; SAVENIJE, H.H.G.; MATGEN, P.; PFISTER, L. Understanding catchment behavior through stepwise model concept improvement. *Water Resour. Res.*, Washington, v.44, 2008.

FERREIRA, S.J.F.; LUIZÃO F.J.; DALLAROSA, R.L.G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida à extração seletiva de madeira na Amazônia Central. *Acta Amaz.*, v.35, n.1, p.55-62, 2005.

FRANKEN, W.; LEOPOLDO, P.R.; MATSUI, E.; RIBEIRO, M.N.G. Estudo da interceptação da água da chuva em cobertura florestal Amazônica do tipo terra firme. *Acta Amaz.*, v.12, n.2, p.327-331, 1992.

GASH, J. H. C. An analytical model of rainfall interception in forests. *Q. J. R. Meteorol. Soc.*, v.105, p.43-55, 1979.

GASH, J.H.C.; LLOYD, C.R.; LACHAUD, G. Estimating sparse

- forest rainfall interception with an analytical model. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.170, p.79-86, 1995.
- GERRITS, A.M.J.; SAVENIJE, H.H.G. Interception. In: WILDERER, P. Treatise on Water Science. *Oxford: Academic Press*, v.2, p.89-101, 2011.
- GIGLIO, J.N. *Interceptação da chuva em pequena bacia experimental coberta por Floresta Ombrófila Mista*. 2013. 194 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.
- GIGLIO, J.N.; KOBAYAMA, M. Interceptação da Chuva: Uma Revisão com Ênfase no Monitoramento em Florestas Brasileiras. *Rev. Bra. Recur. Híd.*, v.18, n.2, p.297-317, 2013.
- HELVEY, J.D.; PATRIC, J.H. Canopy and litter interception of rainfall by hardwoods of eastern United States. *Water Resour. Res.*, Washington, v.1, n.2, 1965.
- HEWLETT, J.D. Principles of Forest Hydrology. Athens: *The University of Georgia Press*, 1982. 183p.
- HORTON, R.E. Rainfall interception. *Mon. Weather Rev.*, v.47, n.9, p.603-623, 1919.
- KEIM, R.F.; SKAUGSET, A.E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.314, p.263-274, 2005.
- KLAASSEN, W.; BOSVELD, F.; WATER, E. D. Water storage and evaporation as constituents of rainfall interception. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.213, p.36-50, 1998.
- LEYTON, L.; REYNOLDS, E.R.C.; THOMPSON, F.B. Rainfall Interception in Forest and Moorland. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W. Forest Hydrology. *Oxford: Pergamon Press*, 1967. p.163-178.
- MOTA, A.A. *Tempo de concentração em pequena bacia experimental*. 2012. 131 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.
- MOURA, A.E.S.S.; CORREA, M.M.; DA SILVA, E.R.; FERREIRA, R.L.C.; FIGUEIREDO, A.C.; POSSAS, J.M.C. Interceptação das chuvas em um fragmento de floresta da Mata Atlântica na Bacia do Prata, Recife, PE. *Rev. Árvore*, Viçosa, v.33, n.3, p.461-469, 2009.
- MUZYLO, A.; LLORENS, P.; VALENTE, F.; KEIZER, J.J.; DOMINGO, F.; GASH, J.H.C. A review of interception modelling. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.370, p.191-206, 2009.
- NASH, J.E.; SUTCLIFFE, J.V. River flow forecasting through conceptual models, Part I – A discussion of principles. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.10, p.282-290, 1970.
- OLIVEIRA, L.L.; COSTA, R.F.; SOUSA, F.A.S.; COSTA, A.C.L.; BRAGA, A.P. Precipitação efetiva e interceptação em Caxiuana, na Amazônia Oriental. *Acta Amaz.*, v.38, n.4, p.723-732, 2008.
- OLIVEIRA JR., J.C.; DIAS, H.C.T. Precipitação efetiva em fragmento secundário da Mata Atlântica. *Rev. Árvore*, Viçosa, v.29, n.1, p.9-15, 2005.
- RUTTER, A.J. Studies in the water relations of *Pinus sylvestris* in plantation conditions: Measurements of rainfall and interception. *J. Ecol.*, v.51, p.191-203, 1963.
- RUTTER, A.J.; KERSHAW, K.A.; ROBINS, P.C.; MORTON, A.J. A predictive model of rainfall interception in forests, I. Derivation of the model from observations in a plantation of Corsican Pine. *Agric. Meteorol.*, v.9, p.367-384, 1971.
- RUTTER, A.J.; MORTON, A.J.; ROBINS, P.C. A predictive model of rainfall interception in forests, II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *J. Appl. Ecol.*, v.12, p.367-380, 1975.
- SAVENIJE, H.H.G. The importance of interception and why we should delete the term evapotranspiration from our vocabulary. *Hydrol. Process.*, v.18, p.1507-1511, 2004.
- SUZUKI, M.; KATO, H.; TANI, M.; FUKUSHIMA, Y. Throughfall, stemflow and rainfall interception in Kiryu experimental catchment (1) Through fall and stem flow. *J. Jap. For. Soc.*, v.61, p.202-210, 1979.
- THOMAZ, E.L. Avaliação de interceptação e precipitação interna em capoeira e floresta secundária em Guarapuava-PR. *Geografia*, Curitiba, v.14, n.1, p.47-60, 2005.
- TSIKO, C.T.; MAKURIRA, H.; GERRITS, A.M.J.; SAVENIJE, H.H.G. Measuring forest floor and canopy interception in a savannah ecosystem. *Physics and Chemistry of the Earth*, v.47, p.122-127, 2012.
- VALENTE, F.; DAVID, J.S.; GASH, J.H.C. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.190, p.141-162, 1997.
- VIEIRA, C.P.; PALMIER, L.R. Medida e Modelagem da Interceptação da Chuva em uma Área Florestada na Região Metropolitana de Belo Horizonte, Minas Gerais. *Rev. Bras. Recur. Híd.*, Porto Alegre, v.11, n.3, p. 101-112, 2006.
- ZINKE, P.J. Forest interception studies in the United States. In: SOPPER, W.E.; LULL, H.W. Forest Hydrology. *Oxford: Pergamon Press*, 1967. p.137-161.

Contribuição dos autores:

João Henrique Macedo Sá, Pedro Luiz Borges Chaffe: Projetaram o experimento e o formato do artigo.

João Henrique Macedo Sá: Instalou equipamentos e foi responsável pelo monitoramento em campo.

João Henrique Macedo Sá, Pedro Luiz Borges Chaffe e Debora Yumi de Oliveira: Implementaram os modelos, discutiram os resultados e escreveram o texto.