

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA
AMBIENTAL**

João Henrique Macedo Sá

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DO PROCESSO DE
INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA DE UMA BACIA COBERTA POR
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

Florianópolis-SC
2015

JOÃO HENRIQUE MACEDO SÁ

**MONITORAMENTO E MODELAGEM DO PROCESSO DE
INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA DE UMA BACIA COBERTA POR
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Engenharia
Ambiental da Universidade Federal de
Santa Catarina para a obtenção do Grau
de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador:

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.

Florianópolis-SC
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Sá, João Henrique Macedo
Monitoramento e modelagem do processo de interceptação
da chuva de uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista
/ João Henrique Macedo Sá ; orientador, Pedro Luiz Borges
Chaffe - Florianópolis, SC, 2015.
129 p.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental.

Inclui referências

1. Engenharia Ambiental. 2. Hidrologia. 3. Interceptação
da chuva. 4. Floresta Ombrófila Mista. 5. Monitoramento e
Modelagem. I. Borges Chaffe, Pedro Luiz. II. Universidade
Federal de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Ambiental. III. Título.

**“MONITORAMENTO E MODELAGEM DO PROCESSO DE
INTERCEPTAÇÃO DA CHUVA DE UMA BACIA COBERTA POR
FLORESTA OMBRÓFILA MISTA”**

JOÃO HENRIQUE MACEDO SÁ

Dissertação submetida ao corpo docente do Programa de Pós – Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina como parte dos requisitos necessários para obtenção do grau de

MESTRE EM ENGENHARIA AMBIENTAL

na Área de Engenharia Ambiental.

Aprovado por:

Valdir de Cicco, Dr.

Prof. Davide Franco, Dr.

Profa. Nadia Bernardi Bonumá, Dra.

Prof. Pedro Luiz Borges Chaffe, Dr.
(Orientador)

**Dedico esse trabalho à minha família,
por todo o apoio que tive durante
todos os anos de minha vida.**

AGRADECIMENTO

Ao Professor Pedro Chaffe, pela amizade, paciência, orientação e dedicação no desenvolvimento da pesquisa.

Ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de realizar o mestrado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento Pessoal de Nível Superior (CAPES) por ter financiado a pesquisa através da bolsa de mestrado.

Aos meus pais João Sá e Valquíria Macedo e meus irmãos João Daniel e Ana Laura, se sou o que sou, devo a eles que dedicaram muito de suas vidas à minha formação profissional e como pessoa.

Aos Professores Davide Franco, Nadia Bonuma e Valdir Cicco, pelo tempo dispensado como banca deste trabalho e pela contribuição na melhoria da qualidade do mesmo.

Aos colegas e amigos do LabHidro da UFSC, Albert, Aline, Camyla, Debora, Fernando, Gustavo, Joana, Matthieu, Priscila, Roberto e Tassia.

Aos meus velhos amigos Davi e Jason que sempre torceram por mim.

Aos meus colegas de mestrado, turma 2013, especialmente ao Milton e Vicente.

A todos que me auxiliaram a cumprir mais essa etapa dessa aventura chamada vida.

RESUMO

A interceptação é o processo pelo qual a precipitação que cai sobre a superfície do terreno fica retida, é redistribuída ao solo ou evapora posteriormente. Esse processo é importante especialmente em áreas florestais, pois influencia na reciclagem da umidade do ar e também na quantidade de água que efetivamente chega ao solo. A maioria dos estudos de interceptação nas florestas brasileiras foi feita na região Amazônica e Mata Atlântica, mas poucos foram os estudos realizados na Mata Atlântica do tipo Floresta Ombrófila Mista. O objetivo deste trabalho foi compreender e estimar os processos de interceptação da chuva em uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista por meio de monitoramento e modelagem. A perda por interceptação (I) foi estimada por meio da medição de chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelo tronco (Sf). O monitoramento da chuva externa foi feito com três pluviômetros e um pluviógrafo instalados fora da bacia. Nove pluviômetros e uma calha interligada a um pluviógrafo foram instalados para o monitoramento da chuva interna. O monitoramento do escoamento pelo tronco foi realizado em dez árvores interligadas a um recipiente de armazenamento e mais quatro árvores interligadas a um pluviógrafo. Os índices de cobertura do dossel foram estimados a partir de fotografias do dossel. Os dados hidrometeorológicos foram monitorados na estação meteorológica do Rio Feio. A chuva externa nos três anos de monitoramento somou 5.309 mm distribuídos em 321 eventos e houve 489 dias sem ocorrência de chuva. Os modelos de Rutter esparso e de Gash esparso foram utilizados para a modelagem do processo de interceptação. A chuva interna variou de 61 a 83% da chuva externa, o que demonstrou que a chuva interna é heterogênea na bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista. O volume de escoamento de tronco variou de 0,1 a 22,9 litros, com média de 2,92 litros e no período monitorado os volumes tenderam a crescer com o aumento do diâmetro do tronco e da área da copa. O índice de cobertura do dossel na bacia variou de 45 a 94%, com média de 80% e não apresentou correlação com a distribuição da chuva interna. Os dados automatizados da chuva interna e escoamento pelo tronco foram distribuídos em 60 eventos, a chuva externa foi 1.303 mm, a chuva interna e escoamento pelo tronco corresponderam a 75% (981 mm) e 2% (19 mm) da chuva externa. A média da evapotranspiração potencial da série calculada foi de 1,09 mm dia⁻¹. O erro relativo por evento dos modelos de interceptação variou de 2 a 400% para o modelo de Rutter e de 0 a 350% para o modelo de Gash. O modelo de Gash subestimou a I acumulada enquanto que o modelo de Rutter a superestimou. A simulação com o modelo de Rutter foi a que obteve os menores valores do erro relativo (4%) em relação a I acumulada. Os dois modelos tiveram limitações para representar o processo de interceptação em eventos extremos, possivelmente devido aos erros associados à estrutura dos modelos assim como ao conjunto de dados medidos e estimados.

Palavras-Chave – Interceptação de chuva; Floresta Ombrófila Mista; Monitoramento e Modelagem.

ABSTRACT

The interception is the process by which the precipitation that falls on the ground surface is retained, it is redistributed to the ground or evaporate later. This process is important especially in forested areas since it influences recycling of moisture from the air and also the amount of water that effectively reaches the ground. Most of the interception studies in Brazilian Forests were carried out in the Amazon and Atlantic Forest, but few have been conducted in the Atlantic Forest Mixed Ombrophilous Forest type. The objective of this work was to understand and estimate the process of interception of rain in an experimental catchment covered by Mixed Ombrophilous Forest through monitoring and modeling. The interception loss will be estimated by measuring rainfall (P), throughfall (Tf) and stemflow (Sf). The monitoring consists of three rain gauges and automatic rain gauge installed outside the basin for rainfall monitoring. Nine gauges and one trough-type collectors coupled to a rain gauge for throughfall monitoring. The stemflow monitoring was conducted in ten trees connected to a storage container and four trees connected to a rain gauge. The canopy cover fraction was estimated using photographs taken of the canopy. Hydrometeorological data were acquired with a meteorological station of Rio Feio. The Rutter and Gash models were used to model the interception process. The total rainfall monitoring of the complete 3 years was 5.309 mm, from 321 rainfall events and in 489 days there was no rainfall. The throughfall ranged from 61 to 83% the rainfall, which showed the throughfall heterogeneity. The stemflow ranged from 0,1 to 22,9 liters, averaging 2,92 liters and the volumes tend to increase with the diameters at breast height and crown area increases. The canopy cover fraction ranged from 45 to 94 %, averaging 80%. The calculation of the interception loss using automated data rail and stemflow were distributed in 60 events. The rainfall (P) was 1303 mm, Tf and Sf corresponded to 75% (981 mm) and 2% (19 mm) of P . The mean potential evapotranspiration was 1.09 mm day^{-1} . The relative error in the models for the events ranged from 2 to 400% for the Rutter model and 0 to 350% for the Gash model. The Gash model underestimated I while the simulation of the Rutter model overestimated. The simulation with the Rutter model was the one with the lowest values of relative error (4%) for I accumulated. Both models have limitations to identify the process of interception.

Keywords – Rainfall Interception; Mixed Ombrophilous Forest; Monitoring and Modeling.

LISTA DE FIGURAS

Figura 2-1 Representação do processo de interceptação, onde P é a chuva externa; Tf é a chuva interna; Sf é o escoamento pelo tronco; Ic é a perda por interceptação da copa; If é a perda por interceptação do chão da floresta...	33
Figura 2-2 Fluxograma do modelo Rutter (Chaffe, 2009).	43
Figura 3-1 Mapa de localização da bacia experimental do rio Araponga e dos pontos de monitoramento	53
Figura 3-2 Monitoramento da chuva externa. (a) pluviógrafo e pluviômetro localizado no ponto PLUV e (b) pluviômetro localizado no ponto E1.	54
Figura 3-3 Monitoramento da chuva interna: (a) calha ligada ao pluviógrafo; (b) garrafas ligada ao pluviógrafo; (c) pluviômetro e (d) pluviômetro próximo do tensiômetro.	57
Figura 3-4 Monitoramento do escoamento pelo tronco: (a) recipiente de armazenamento cheio; (b) recipiente de armazenamento; (c) coletor do tipo espiral; e (d) ligação das árvores para o pluviógrafo.....	58
Figura 3-5 Estimativa das áreas da copa de coleta do escoamento pelo tronco. A área da copa (polígono verde) e área da copa das árvores que tem o monitoramento do escoamento pelo tronco (polígono vermelho).....	59
Figura 3-6 Instrumentos para aquisição de fotografias da cobertura florestal(a) e (b) Câmera fotográfica em cima da base para aquisição de fotografias da cobertura florestal.	60
Figura 3-7 Mapa de localização dos pontos de monitoramento da cobertura florestal.	61
Figura 3-8 Fotografias capturadas em 13/09/14. (a) Ponto A1-2; (b) Ponto A3; (c) Ponto A4; (d) Ponto B1-2; (e) Ponto B3; (f) Ponto B4; (g) Ponto Z1-2; (h) Ponto Z3 e (i) Ponto Z4.....	62
Figura 3-9 Análise espacial da distribuição da chuva interna na parcela A3.	63

Figura 3-10 Croqui da localização dos pontos de monitoramento (pluviômetros – círculo preto), com a área do dossel (polígono verde) e área da parcela (círculo vermelho).....	63
Figura 3-12 - Estação Meteorológica do Rio Feio. (a) Estação meteorológica e (b) Pluviógrafo.....	64
Figura 3-11 Fotografias dos pontos de monitoramento do índice do dossel.	65
Figura 4-1 Mostrando os dados de chuva externa para cada ano do período estudo.	67
Figura 4-2 Histograma da chuva externa do período monitorado.	68
Figura 4-3 Altura da chuva externa medida nos pluviômetros em relação aos registros do pluviógrafo.	69
Figura 4-4 Relação da chuva interna pela chuva externa no período monitorado. Cada simbologia representa uma parcela diferente e cada cor representa um ponto de monitoramento da parcela.	71
Figura 4-5 Relação entre chuva externa (P) e chuva interna (Tf) da calha. Curva pontilhada representa a regressão dos pontos envoltória. O gráfico menor é a relação da $P \times Tf$ nos pontos de inflexão (<5 mm).	72
Figura 4-6 Relação entre chuva externa e chuva interna de cada período para o cálculo da capacidade de armazenamento. Os pontos com círculos foram utilizados para a curva envoltória.	73
Figura 4-7 Pontos de inflexão (<30mm) da relação entre chuva externa e chuva interna de cada período para o cálculo do coeficiente de chuva interna livre.	74
Figura 4-8 Relação entre chuva interna (Tf) e chuva externa (P) de cada evento para o cálculo da capacidade de armazenamento da copa (S_c). Os pontos com círculos foram os pontos utilizados na curva envoltória.	76

Figura 4-9 Relação da chuva interna (Tf) e chuva externa (P) considerando o ponto de inflexão (<5mm) da relação entre chuva externa e chuva interna para o cálculo do coeficiente de chuva interna livre.	77
Figura 4-10 Gráficos dos valores de chuva externa acumulada com a chuva interna acumulada, separados por eventos.	79
Figura 4-11 Relação entre chuva interna por chuva externa (Tf/P) e o coeficiente de chuva interna livre (p).	79
Figura 4-12 Distribuição dos volumes de escoamento pelo tronco por árvore e relação dos volumes de escoamento pelo tronco por diâmetro na altura do peito.	80
Figura 4-13 Distribuição das alturas de escoamento pelo tronco por árvore para cada método.	81
Figura 4-14 Relação do escoamento pelo tronco com a chuva externa para cada ponto.	82
Figura 4-15 Relação entre escoamento pelo tronco e chuva externa do monitoramento automatizado.	83
Figura 4-16 Relação entre escoamento pelo tronco e precipitação interna descontada de precipitação na parte descoberta ($Tf-(1-c)P$).	84
Figura 4-17 Gráficos dos valores de chuva externa acumulada com o escoamento pelo tronco acumulado, separados por eventos.	84
Figura 4-18 Distribuição dos ICD por ponto de monitoramento. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os <i>outliers</i> são exibidos com um sinal vermelho +.	85
Figura 4-19 Relação entre a perda por interceptação relativa ao total da chuva externa e chuva externa para cada período.	86
Figura 4-20 Série de dados monitorados automatizados da chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelo tronco (Sf).	87

Figura 4-21 Volumes totais de escoamento pelo tronco (S_f), chuva interna (T_f) e chuva externa (P) registrados em cada um dos 60 eventos.....	88
Figura 4-22 Intensidade máxima registrada de chuva externa (P), chuva interna (T_f) e escoamento pelo tronco (S_f).	88
Figura 4-23 Relação entre a chuva externa (P) e chuva interna (T_f).	89
Figura 4-24 <i>Boxplot</i> do Índice da Cobertura do Dossel. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os outliers são exibidos com um sinal vermelho +. .	90
Figura 4-25 <i>Boxplot</i> da Chuva Interna. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os outliers são exibidos com um sinal vermelho +. .	90
Figura 4-26 Relação da regressão entre a chuva externa e chuva interna que foi baseada em valores médios de 28 pluviômetros.	91
Figura 4-27 Relação entre ICD e T_f (a) ICD e chuva interna (mm) e (b) ICD e a porcentagem da T_f por P . As cores representam cada ponto de monitoramento. Simbologia cores diferentes	91
Figura 4-28 Interpolação: (a) Média do índice de abertura do dossel; e (b) média da Chuva Interna.....	92
Figura 4-29 Evapotranspiração potencial diária calculada com o método de Penman modificado.....	93
Figura 4-30 Simulação do modelo de Rutter de chuva interna (T_f) e escoamento pelo tronco (S_f).	95
Figura 4-31 Erros relativos para cada evento dos modelos de Gash e de Rutter e o <i>boxplot</i> do erro relativo.	97
Figura 4-32 Gráfico entre a perda por interceptação (I) estimado e medido acumulado entre os modelos calibrados.....	97
Figura 7-1 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 12/08/2014 e (b) 22/10/2014;.....	122

Figura 7-2 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 28/07/2014 e (b) 22/05/2014.....	123
Figura 7-3 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 05/06/2014 e (b) 11/11/2014.....	124
Figura 7-4 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 08/05/2014 e (b) 14/07/2014.....	125
Figura 7-5 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 07/10/2014 e (b) 09/09/2014.....	126

LISTA DE TABELAS

Tabela 2-1 Componentes de interceptação do modelo de Gash (1979) e do modelo revisado (dossel esperso) de Gash et al., (1995). (Modificado de Valente et al., 1997 e Gerrits e Savenije, 2011).	52
Tabela 3-1 Data das medições do período de monitoramento de 2012 - 2014.	55
Tabela 4-1 Resultados dos dados da chuva externa (P) e chuva interna (Tf).	70
Tabela 4-2 Capacidade de armazenamento da copa (S_c) e o coeficiente livre de chuva interna (p) para cada local e separação de monitoramento.	78
Tabela 4-3 Valores de chuva interna e perda por interceptação da copa.....	86
Tabela 4-4 Valores de chuva externa, chuva interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação.	87
Tabela 4-5 Parâmetros estimados do modelo de interceptação de Gash. Proporção de cobertura florestal (c), capacidade de armazenamento da copa (S_c), capacidade de armazenamento do tronco (S_t) e proporção desviada da copa para o tronco (p_d).	94
Tabela 4-6 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) e proporção desviada da copa para o tronco (p_d).....	94
Tabela 4-7 Entrada dos parâmetros que obtiveram o menor erro relativo da perda por interceptação (I).	96
Tabela 7-1 Resultados do monitoramento da chuva externa.	117
Tabela 7-2 Resultados do monitoramento da chuva interna.....	118
Tabela 7-3 Resultados do monitoramento do Escoamento pelo tronco (Litros)	120
Tabela 7-4 Índices de cobertura do dossel (%).	121

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

A1-2 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

A3 – Local de monitoramento de chuva interna, cobertura florestal e escoamento pelo tronco

A4 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

ARA – Bacia experimental do rio Araponga

B1-2 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

B3 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

B4 – Local de monitoramento de chuva interna, cobertura florestal e escoamento pelo tronco

CA N.N – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal para análise da distribuição espacial

CAP – Comprimento à altura do peito

DAP – Diâmetro à altura do peito

E1 – Local de monitoramento de chuva externa com pluviômetro

E2 – Local de monitoramento de chuva externa com pluviômetro

E3 – Local de monitoramento de chuva externa com pluviômetro

FOM – Floresta Ombrófila Mista

IAF – Índice de área foliar

ICD – Índice de cobertura do dossel

PET – Politereftalato de etileno

PLUV – Local de monitoramento de chuva externa com pluviômetro e pluviógrafo

T1 – Tronco n°01, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T2 – Tronco n°02, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T7 – Tronco n°07, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T21 – Tronco n°21, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T28 – Tronco n°28, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T50 – Tronco nº50, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T57 – Tronco nº57, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T59 – Tronco nº59, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T65 – Tronco nº65, com monitoramento de escoamento pelo tronco

T69 – Tronco nº69, com monitoramento de escoamento pelo tronco

UFSC – Universidade Federal de Santa Catarina

Z1-2 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

Z3 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

Z4 – Local de monitoramento de chuva interna e cobertura florestal

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Descrição	Unidade
a	Coefficiente angular de regressão	-
A_{copa}	Área da projeção da copa	m^3
b	Coefficiente linear de regressão	mm
c	Proporção de cobertura florestal	-
C	Volume de água na copa	mm
C_c	Volume de água na copa por unidade de cobertura	mm
C_t	Volume de água no tronco	mm
D	Taxa de drenagem de copa	mm
D_c	Drenagem de copa por unidade de cobertura	mm
D_s	Taxa de drenagem de copa quando $C=S$	mm
E	Taxa de evaporação média para copa saturada	$mm\ h^{-1}$
e_a	Pressão de saturação do vapor da água	kPa
E_c	Taxa de evaporação por unidade de cobertura	$mm\ h^{-1}$
e_d	Pressão de saturação real do vapor no ar	kPa
E_p	Evapotranspiração potencial	mm
E_t	Taxa de evaporação pelo tronco	$mm\ h^{-1}$
E_{ii}	Evaporação no tempo i	mm
$E_{t,c}$	Taxa de evaporação pelo tronco por unidade de cobertura	$mm\ h^{-1}$
E_{ic}^i	Evaporação do dossel	mm
E_{ic}^t	Evaporação do tronco	mm
Erro Θ	Erro relativo para o conjunto de parâmetros Θ	-
F	Fator de ajuste	-
I	Perda por interceptação	mm
$I\%$	Interceptação relativa ao total chuva externa	%
I_c	Perda por interceptação da copa	mm
I_f	Perda por interceptação do chão da floresta	mm
I_{ii}	Interceptação no tempo i	mm
$I_{máx}$	Intensidade máxima de chuva do período	$mm\ h^{-1}$
Nb	Número de pixels brancos	-

<i>Nda</i>	Número de dias entre um evento e o anterior	-
<i>Nds</i>	Número de dias sem chuva do período	-
<i>Np</i>	Número de pixels preto	-
<i>p</i>	Coefficiente livre de chuva interna	-
<i>p_t</i>	Coefficiente de escoamento pelo tronco	-
<i>P</i>	Chuva externa	mm
<i>P'_c</i>	Quantidade de chuva necessária para saturar o dossel	mm
<i>P'_t</i>	Quantidade de chuva necessária para saturar o tronco	mm
<i>R</i>	Intensidade da precipitação	mm h ⁻¹
<i>R²</i>	Coefficiente de determinação	-
<i>R_s</i>	Radiação solar incidente	mm d ⁻¹
<i>Rn</i>	Chuva líquida	mm
<i>Rnl</i>	Radiação solar líquida de ondas longas	mm dia ⁻¹
<i>Rns</i>	Radiação solar líquida de ondas curtas	mm dia ⁻¹
<i>Rad_n</i>	Radiação líquida	MJ m ⁻² h ⁻¹
<i>S</i>	Capacidade de armazenamento máximo da copa	mm
<i>S_c</i>	Capacidade de armazenamento por unidade de cobertura	mm
<i>S_{c,max}</i>	Capacidade de armazenamento máximo da copa	mm
<i>S_{ti}</i>	Armazenamento de interceptação no tempo <i>i</i>	mm
<i>Sf</i>	Escoamento pelo tronco (do inglês <i>stemflow</i>)	mm
<i>Sf_L</i>	Volume de escoamento pelo tronco da árvore	L
<i>S_t</i>	Capacidade de armazenamento do tronco	mm
<i>S_{t,c}</i>	Capacidade de armazenamento pelo tronco por cobertura	mm h ⁻¹
<i>T</i>	Duração do evento de precipitação	h
<i>t</i>	Tempo	h
<i>t'</i>	Tempo de saturação da copa	h
<i>Tf</i>	Chuva interna (do inglês <i>throughfall</i>)	mm
<i>W</i>	Fator de ponderação relacionado com a temperatura e altitude	-
<i>U₂</i>	Velocidade média diária do vento	km dia ⁻¹
<i>c</i>	Relação entre a taxa de evaporação pelo tronco e pela copa	mm h ⁻¹

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	vii
RESUMO.....	ix
ABSTRACT.....	xi
LISTA DE FIGURAS.....	xiii
LISTA DE TABELAS.....	xix
LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS.....	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xxiii
1 INTRODUÇÃO.....	27
1.1 Objetivos	30
1.2 Objetivos específicos.....	30
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	31
2.1 Interceptação	31
2.2 Chuva Interna	35
2.3 Escoamento pelo tronco	36
2.4 Cobertura Florestal	37
2.5 Evapotranspiração	38
2.6 Modelagem de Interceptação.....	40
2.6.1 Modelo de Rutter e de Rutter esparso	41
2.6.2 Modelo de Gash e de Gash esparso.....	45
3 MATÉRIAS E MÉTODOS.....	53
3.1 Área de Estudo	53
3.2 Monitoramento	54
3.2.1 Chuva Externa	54
3.2.2 Chuva Interna	56
3.2.3 Escoamento pelo tronco	56
3.2.4 Cobertura Florestal	60
3.2.5 Distribuição espacial da chuva interna.....	62
3.2.6 Estação Meteorológica	64

3.3	Estimativa da Evapotranspiração Potencial.....	64
3.4	Modelagem da Interceptação.....	66
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	67
4.1	Análise da chuva externa, chuva interna e escoamento pelo tronco	67
4.2	Análise da cobertura florestal.....	85
4.3	Análise das perdas e dos parâmetros de interceptação	85
4.4	Análise da distribuição espacial da chuva interna	89
4.5	Modelagem da Interceptação.....	93
4.5.1	Cálculo da Evapotranspiração Potencial.....	93
4.5.2	Interceptação.....	94
5	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	99
6	REFERÊNCIAS	103
7	ANEXOS.....	117
8	APÊNDICE.	127

1 INTRODUÇÃO

A interceptação é o processo pelo qual a precipitação que cai sobre a superfície do terreno fica retida, é redistribuída ao solo ou evapora posteriormente. A chuva quando atinge as superfícies de plantas e fica temporariamente retida evapora (perda por interceptação) ou faz o caminho para o piso florestal, podendo cair como gota (gotejamento) ou descer pelo caule das árvores (escoamento pelo tronco). Algumas gotas atingem o solo diretamente através da abertura do dossel das árvores.

A chuva que chega ao solo e que contribuirá efetivamente para o escoamento e infiltração não é a chuva externa, mas sim a chuva líquida (R_n). A chuva líquida é a chuva externa (P) descontada da perda por interceptação (I). A chuva interna (*throughfall* - T_f), o escoamento pelo tronco (*stemflow* - S_f) e a perda por interceptação são variáveis no espaço e no tempo e dependem de fatores relacionados tanto com a vegetação quanto com as condições climáticas nas quais a floresta está inserida (Rutter et al., 1975; Ward e Robinson, 2000). Além das características principais das chuvas (intensidade e volume precipitado), condições climáticas como chuva anteriores e tipo e densidade da vegetação também influenciam na interceptação (David et al., 2005; Dingman, 2002; Brutsaert, 2005).

O processo de interceptação na maioria das vezes é estimado utilizando dados de monitoramento em campo, mas a obtenção desses dados tem um custo elevado, por isto, muitas vezes a estimativa dos diversos componentes do processo de interceptação é realizada através de modelos de interceptação, como os modelos de Rutter e de Gash. O desprezo ou o erro na estimativa da interceptação introduzem erros na modelagem chuvavazão (Savenije, 2004; Fencia et al., 2008; Chaffe et al., 2010).

A primeira tentativa de se estimar a perda por interceptação por meio de um modelo foi realizada por Horton (1919). Até a década de 70 a

perda por interceptação foi estimada utilizando o modelo empírico da chuva externa, a perda da interceptação é uma função linear da regressão entre a chuva externa e chuva interna.

Atualmente existem diversos modelos hidrológicos que permitem estimar a perda por interceptação. Os principais modelos de interceptação foram propostos por Rutter et al. (1971), Rutter et al. (1975), Gash (1979), Massman (1983), Mulder (1985), Calder (1986), Liu (1988), Xiao et al. (2000), Zeng et al. (2000) e Murakami (2007). Outros são modificações dos modelos descritos anteriormente, como Sellers e Lockwood (1981), Gash et al. (1995), Calder (1996), Valente et al. (1997) e van Dijk e Bruijnzeel (2001).

Os modelos mais utilizados são os de Gash e de Rutter (Muzylo et al., 2009). O modelo de Rutter et al. (1971) foi o primeiro a apresentar um modelo conceitual, baseado na física. O modelo representa a interceptação por um balanço de massa e tendo os parâmetros de entrada a chuva externa e o armazenamento e tendo os parâmetros de saída a drenagem e a evaporação.

O modelo de Gash é uma simplificação do modelo de Rutter, com o acréscimo de alguns conceitos de regressão linear. Este modelo é mais simples e de mais fácil uso quando comparado ao modelo de Rutter, pois não requer como entrada uma série contínua de alta resolução temporal.

Segundo Giglio e Kobiyama (2013) poucos estudos de medição da interceptação foram realizados em florestas nativas brasileiras, os estudos existentes são predominantemente na região Amazônica e em Mata Atlântica. Na Mata Atlântica a perda por interceptação 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; Moura et al., 2009; Oliveira et al., 2008; Chaffe et al., 2010).

A Mata Atlântica abriga uma parcela significativa da biodiversidade do Brasil e possui 60% da população brasileira vivendo em seus limites, sendo importante a existência de estudos nesse Bioma (Giglio e Kobiyama, 2013). 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). As florestas do bioma da Mata Atlântica nas quais existem estudos são: Floresta Ombrófila Densa e Mista, Floresta Seca, Floresta Paludosa e Floresta Estacional Semidecidual.

O processo de interceptação em Floresta Ombrófila Mista foi pouco estudado. Giglio (2013) estudou o processo de interceptação em uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista secundária e mostrou que a redistribuição da água da chuva está intrinsecamente ligada à vegetação. A proporção da chuva externa convertida em chuva interna não se relaciona linearmente com a chuva externa e as duas variáveis não apresentaram qualquer tipo de correlação estatística com índice de cobertura do dossel, mas a perda por interceptação na bacia se relacionou linearmente com a chuva externa (Giglio, 2013).

1.1 Objetivos

O objetivo deste trabalho foi analisar o processo de interceptação da chuva por meio de monitoramento e modelagem em uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista.

1.2 Objetivos específicos

- Quantificar a chuva interna, o escoamento pelo tronco e a perda por interceptação em Floresta Ombrófila Mista;
- Verificar a relação entre os componentes da interceptação e as características da chuva;
- Analisar a distribuição espacial da chuva interna e da cobertura florestal;
- Verificar o desempenho do modelo de Gash esparsos e do modelo de Rutter esparsos para esse tipo de floresta.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Intercepção

A intercepção é o primeiro processo pelo qual a água da chuva passa na bacia hidrográfica, influenciando todos os outros processos hidrológicos (Tsiko et al., 2012). A intercepção pode ser definida de diferentes formas, como um armazenamento, um fluxo ou como um processo, o mais apropriado (Savenije, 2004).

O armazenamento (S) é definido como a capacidade de retenção de água, a partir do qual em seguida a água interceptada evapora ao longo de um período. Quando a intercepção (I_i) é considerada como um processo, parte do fluxo da precipitação interceptada pela superfície molhada volta para a atmosfera através da evaporação. O processo de intercepção é igual à soma da mudança de armazenamento de intercepção (S_i) e da perda por evaporação (E_i) da superfície molhada (Gerrits e Savenije, 2011).

$$I_i = \frac{dS_i}{dt} + E_i \quad (1)$$

A escala de tempo do processo de intercepção (Equação (1)) é de aproximadamente 1 dia, pois na maioria dos climas esse é o tempo que a variável dS_i/dt se aproxima de zero e $I_i = E_i$ (Gerrits e Savenije, 2011). Esse processo pode levar mais tempo em casos de clima temperado.

A intercepção é um processo importante pois influencia nos demais processos hidrológicos, como a infiltração, a erosão, a umidade do solo, o escoamento e a geração de inundação (Keim et al., 2005; Tsiko et al., 2012). Nas áreas florestais a intercepção tem importância para o equilíbrio da água de captação e reciclagem da umidade. Vários trabalhos

tem demonstrado a importância da interceptação da chuva em diferentes florestas (Gash et al., 1980; Carlyle-Moses e Price, 1999; Xiao et al., 2000; Herbst et al., 2008; Tsiko et al., 2012).

Segundo Klaassen et al. (1998) a perda por interceptação pode representar de 10 a 50% da precipitação, sendo influenciada por muitos fatores, como intensidade e duração da chuva e a velocidade do vento (Horton, 1919).

Metade da quantidade de evaporação a partir da interceptação ocorre durante o evento (Shuttleworth, 1983). A interceptação é um fator importante na redução da erosão do solo, pois diminui o impacto da gota da chuva na superfície influenciando indiretamente o ciclo hidrológico, porque através da conservação do solo superficial a infiltração é mantida (Hormann et al., 1996; Gerrits e Savenije, 2011).

A perda por interceptação pode ser fracionada em dois componentes (Hewlett, 1982), e é tratada como um simples balanço hídrico, conforme a equação (2).

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

onde I é o total das perdas por interceptação (mm), I_c é a perda por interceptação da copa (mm) e I_f é a perda por interceptação do chão florestal (mm).

A medição da perda por interceptação do piso florestal (I_f) se resume em coletar e pesar amostras do piso florestal calculando a diferença entre o peso úmido e o peso seco da coleta (Helvey e Patric, 1965). A estimativa da interceptação da copa é mais complexa e indireta, sendo realizada através da medição da chuva externa, chuva interna e do escoamento pelo tronco, conforme a equação (3).

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

onde P é a chuva total (mm); Tf é a chuva interna (mm) e Sf é o escoamento pelo tronco (mm).

Juntando as equações (2) e (3) tem-se a Equação (4) para a estimativa da interceptação.

$$I = [P - (Tf + Sf)] + I_f \quad (4)$$

A Figura 2-1 ilustra os processos de interceptação da chuva na floresta.

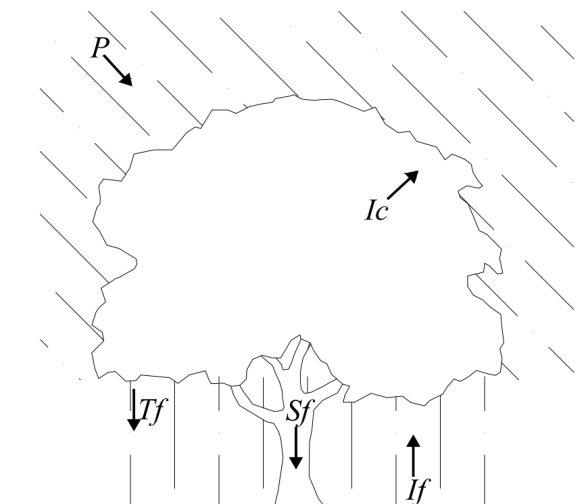


Figura 2-1 Representação do processo de interceptação, onde P é a chuva externa; Tf é a chuva interna; Sf é o escoamento pelo tronco; I_c é a perda por interceptação da copa; I_f é a perda por interceptação do chão da floresta.

Há uma grande diferença na interceptação da copa de árvores caducifólias e coníferas, não só porque as árvores caducifólias perdem as folhas no inverno, mas também, pois a área foliar das árvores coníferas é

maior do que das árvores caducifólias, portanto, as árvores coníferas conseguem armazenar mais água na superfície de suas copas (Kittredge, 1948; Zinke, 1967; Breuer et al., 2003; Bryant et al., 2005; Toba e Ohta, 2005). Por outro lado, as taxas de evaporação encontradas foram mais altas em árvores caducifólias no inverno, causado pela aerodinâmica mais áspera da copa nua e penetração mais profunda do vento (Herbst et al., 2008).

A interceptação do solo é o armazenamento temporário de água na camada superior do solo da floresta que em seguida evapora durante algumas horas ou dias, durante e após o evento de precipitação. Esse armazenamento se dá pela vegetação que fica em cima do solo, como gramíneas, folhas, galhos e pequenos ramos (de Groen e Savenije, 2006).

A vegetação não intercepta só chuva, mas também umidade a partir do ar, que seria chamado de neblina. A interceptação de nevoeiro acontece geralmente em montanha com ambiente tropical (Bruijnzeel et al., 2005). O principal problema em estudos de interceptação de nevoeiro é a medição da precipitação e da quantidade interceptada, porque a deposição do nevoeiro pode ser duas vezes mais elevada do que a precipitação normal.

O armazenamento de neve sobre a copa é diferente do armazenamento de água da chuva. Enquanto a capacidade de armazenamento de chuva é principalmente função da área da superfície da folha, a interceptação da neve se dá pela força e forma da copa (Ward e Trimble, 2004). O armazenamento de neve também é dependente da temperatura. Se a neve cai com temperatura próxima do ponto de congelamento, sua coesão é maior, e assim mais neve é acumulada sobre o dossel (Ward e Trimble, 2004). Outra diferença é que a neve armazenada só pode ser removida do dossel pela sublimação, remoção mecânica (deslizamento em massa) e gotejamento de água após o derretimento (Miller, 1966).

2.2 Chuva Interna

Geralmente, os modelos de interceptação utilizam dois tipos de parâmetros: os relacionados às condições meteorológicas e os que estão relacionados à vegetação. Segundo Lloyd e Marques (1988), a distribuição dos valores de chuva interna era muito mais ampla em planície de floresta amazônica, cerca de 0-200% da chuva externa, do que em uma floresta de pinus em clima temperado, cerca de 0-100% da chuva externa. Essa diferença entre as áreas indica que a chuva interna é concentrada em certos pontos (pontos de gotejamento), nos quais o volume de chuva interna coletado é maior do que em outros lugares (Shuttleworth, 1989).

Devido a essa grande variação espacial as medições da chuva interna em florestas tropicais são mais propensas a erros de amostragem, principalmente caso se limitem a um número de medidores fixos (Lloyd e Marques, 1988). Recomenda-se que a localização dos medidores seja aleatória, aumentando a área de amostragem e assim reduzindo o erro.

A redistribuição espacial da precipitação na floresta é influenciada por fatores meteorológicos e biológicos. Dentre os fatores meteorológicos podem ser citados: a quantidade de chuva e sua intensidade, a taxa de evaporação, a velocidade do vento, e os intervalos de tempo entre eventos sucessivos (Aussenac, 1970; Crockford e Richardson, 2000; Gash, 1979). Fatores biológicos correspondem à estrutura do dossel florestal, que é afetada pela densidade de posição e composição de espécies. De fato, as características da folha, distribuição espacial e densidade, arquitetura do ramo, textura da casca e, no caso das espécies de caducifólias, fenofase são fatores que influenciam a interceptação da chuva e a redistribuição espacial em floresta (Aussenac, 1970; Herwitz, 1987; Návar, 1993).

A redistribuição espacial da precipitação pela copa das árvores tem potenciais efeitos sobre os processos biológicos dentro da floresta. Por

exemplo, ao influenciar a distribuição das raízes finas no solo (Ford e Deans, 1978), é susceptível de afetar o uso da água pelas árvores. Além disso, quantidades elevadas de escoamento pelo tronco canalizado em uma pequena área na base do tronco de algumas espécies podem modificar as propriedades físicas e químicas dos solos florestais, bem como a composição de espécies da vegetação (Falkengren-Grerup, 1989; Gesper e Holowaychuck, 1970).

A variabilidade espacial da precipitação e interceptação pela copa da floresta tem efeitos sobre a distribuição de umidade do solo (Eschner, 1967), um parâmetro que afeta a decomposição (Cortez, 1998; Jonard et al., 2007; Jonard et al., 2008) e nitrificação em solos florestais (Killham, 1990). Além disso, uma compreensão detalhada do processo de redistribuição das chuvas na floresta é de primordial importância para estudos sobre deposição atmosférica em tais ecossistemas (André et al., 2008; Whelan et al., 1998; Zirlewagen e von Wilpert, 2001).

O volume, a duração e a intensidade de precipitação, bem como a velocidade e a direção do vento influenciam tanto a variabilidade espacial quanto temporal dos fluxos de água sob a floresta (Bouten et al., 1992; Llorens et al., 2003; Robson et al., 1994; Staelens et al., 2008; Vrugt et al., 2003).

2.3 Escoamento pelo tronco

O escoamento pelo tronco representa a parcela da chuva externa que, depois de retida pelo dossel da floresta é canalizada pelos galhos para descer ao longo do tronco e do caule. Horton (1919) observou que o escoamento pelo tronco representa uma proporção muito pequena da chuva externa. Este resultado pode estar associado à dificuldade de se medir e estimar o volume escoado pelos troncos.

O escoamento pelo tronco varia de 0 a 10% da chuva externa em florestas brasileiras heterogêneas (Giglio e Kobiyama, 2013). Esses valores também são encontrados em regiões ecológicas tropicais nas quais o escoamento pelo tronco varia de 1 a 14% (Levia Jr. e Frost, 2003). Em dados globais a estimativa do escoamento pelo tronco varia de 1 a 45% da chuva externa. Essa variabilidade se deve às diferentes condições meteorológicas e composições florestais de cada região estudada.

A água que escoar pelos troncos possui alta concentração de macronutrientes, como nitrogênio, fósforo e potássio, enfatizando a importância do escoamento pelo tronco para o desenvolvimento das espécies arbóreas e para ciclagem dos nutrientes do solo (Perez-Marin e Menezes, 2008). Há indícios da existência de relação da concentração de nutrientes do escoamento pelo tronco com a estação do ano e com características da casca (Levia e Frost, 2003).

Os fatores que influenciam no volume de escoamento pelo tronco podem estar relacionados ao tamanho da árvore, textura da casca, ângulo do tronco, área da copa e sobreposição das copas (Helvey e Patrick, 1965; Helvey, 1967; Lloyd e Marques, 1988; Crockford e Richardson, 1990; Návar, 1993; Peterson e Rolfe, 1979; Tobón Marin et al., 2000).

2.4 Cobertura Florestal

Cobertura florestal é a vegetação que recobrem uma determinada área e funciona como uma espécie de telhado protegendo o solo contra erosão, resguardando a fauna e a flora e equilibra a temperatura. Os índices de cobertura do dossel (ICD) é uma variável importante para a estimativa do fator de cobertura c dos modelos de Gash e de Rutter.

O índice de cobertura do dossel (ICD) pode ser alterado por mudança na fração de abertura, na distribuição horizontal e vertical da

folhagem e por mudanças na composição das espécies (Ishii e Wilson, 2001; Ishii e McDowell, 2002). Devido à influência da estrutura do dossel, a precipitação interceptada tem uma variação espacial significativa, e é calculado como a diferença entre a precipitação externa e a chuva líquida. Mesmo uma pequena incerteza das chuvas externa ou líquida pode gerar grandes erros na perda de interceptação.

A fração de cobertura do dossel pode ser estimada a partir de análises de fotografias, da área da copa projetada sobre o chão, da relação entre a fração de cobertura do dossel e do índice de área foliar (IAF) com base na equação de Beer-Lambert (van Dijk e Buijnzeel, 2001).

Cesar et al. (1990) e Llorens e Galart (2000) utilizaram fotografias em preto e branco para medir a fração da cobertura da copa. A cada fotografia foi ajustada a velocidade da abertura para as condições de luminosidade. Germer et al. (2006) também estimou a fração da cobertura da copa utilizando fotografias do dossel, mas com método diferente.

A fração de cobertura do dossel utilizando fotografias com lentes hemisféricas, e pós-processadas para pixels pretos e brancos é uma boa estimativa da abertura da copa podendo ser obtida a partir da quantidade de pixels brancos da fotografia (Tobón Marin et al., 2000). Também observou que o índice de abertura da copa não controla sempre a distribuição da chuva interna. Os maiores índices de abertura da copa coincidiram com grandes percentuais de chuva interna, mas pequenos valores dos índices corresponderam a uma grande variação de percentuais da chuva interna.

2.5 Evapotranspiração

A evapotranspiração é um parâmetro importante para estimativa da perda por interceptação, pois é um processo que transforma em vapor a água da superfície do solo e da vegetação. O processo de evapotranspiração

pode ser dividido em duas categorias: o potencial e a real. A evapotranspiração potencial é o total de água que seria transferido para a atmosfera por evaporação e transpiração, caso a água não fosse limitado. A evapotranspiração real é a perda de água para a atmosfera por evaporação e transpiração nas condições atmosféricas e de umidade do solo existentes (Thornthwaite, 1948).

O método de Penman combina os efeitos de balanço de energia e aerodinâmicos, tendo como dados diários necessários a temperatura, insolação, umidade relativa do ar média, velocidade média de vento (Doorenbos e Pruitt, 1977). A estimativa da evapotranspiração potencial diária (mm/dia) é realizada a partir da equação (5).

$$E_p = F[W.Rad_n + (1-W).f(u).(e_a - e_d)] \quad (5)$$

onde E_p é a evapotranspiração potencial diária (mm dia⁻¹); F é o fator de ajuste (adimensional); W é o fator de ponderação relacionado com a temperatura e a altitude (adimensional); Rad_n é a radiação líquida (mm dia⁻¹); $f(u)$ é a função relacionada a vento; e_a é a pressão de saturação do vapor da água (mbar); e e_d é a pressão de saturação real do vapor no ar (mbar).

A variável $f(u)$ é estimada a partir da Equação (6).

$$f(u) = 0,27 \left(1 + \frac{U_2}{100} \right) \quad (6)$$

onde U_2 é a velocidade média diária do vento (km dia⁻¹) a 2 metros acima da superfície do solo.

A estimativa da radiação solar líquida de ondas curtas normalmente é calculada por:

$$Rad_n = Rns - Rnl \quad (7)$$

em que Rns é a radiação solar líquida de ondas curtas (mm dia^{-1}) e Rnl é a radiação solar líquida de ondas longas (mm dia^{-1}). A radiação solar líquida de ondas curtas e a radiação solar líquida de ondas longas podem ser estimadas por meio das equações (8) e (9), respectivamente.

$$Rns = (1 - \alpha)Rs \quad (8)$$

$$Rnl = f(T)f(e_d)f\left(\frac{n}{N}\right) \quad (9)$$

em que Rs é a radiação solar incidente (mm dia^{-1}), α é o coeficiente de refletância (albedo) (adimensional), $f(T)$ é uma função relacionada à temperatura, n é a insolação (hora dia^{-1}) e N é a insolação máxima possível (hora dia^{-1}). A continuação do cálculo da evapotranspiração utilizando o método Penman modificado encontra-se no APÊNDICE.

2.6 Modelagem de Intercepção

A primeira tentativa de se estimar a perda por intercepção por meio de um modelo foi realizada por Horton (1919). Até a década de 70, os modelos de intercepção utilizavam relações empíricas derivadas da chuva externa como as equações de Merriam (1960) e Zinke (1967). As desvantagens dos modelos empíricos é que são usados conjuntos específicos de dados que não podem ser aplicados com confiança onde as condições são bastante diferentes, principalmente com dados de chuva e o tipo de vegetação (Massman, 1983; Digman, 2002).

Atualmente existem diversos modelos propostos para estimativa de perdas por interceptação. Ao todo são quinze modelos físicos, dez sendo designados como modelos originais, e cinco como modelos melhorados dos modelos originais. Em ordem cronológica, os modelos originais são: Rutter (Rutter et al., 1971, 1975), Gash (1979), Massman (1983), Mulder (1985), Calder de uma camada (Calder, 1986), Liu J. (Liu, 1988), Liu S. (Liu, 1997), Xiao (Xiao et al., 2000), Zeng (Zeng et al., 2000) e Murakami (2007). Os modelos melhorados são: Sellers and Lockwood (1981), Gash esperso (Gash et al., 1995), Calder de duas camadas (Calder, 1996), Rutter esperso (Valente et al., 1997) e van Dijk Bruijnzeel (2001)

Devido às dificuldades de medição, a maneira mais comum de se tratar a interceptação é por um simples balanço hídrico. Dois dos modelos mais usados são o modelo de Rutter (Rutter et al., 1975) e o modelo de Gash (Gash, 1979). Rutter et al. (1971 e 1975) apresentaram um modelo fisicamente fundamentado baseado em dados horários, tendo surgido como sendo o modelo mais apropriado para descrever o processo de interceptação, e tem sido aplicado em diversos tipos de florestas. É executado através da entrada de variáveis controladoras do processo de evaporação e parâmetros morfológicos da vegetação. Gash (1979) testou e descreveu o modelo de Rutter como sendo o mais confiável para se estimar os valores interceptados.

2.6.1 Modelo de Rutter e de Rutter esperso

O modelo de Rutter et al. (1971) foi o primeiros a apresentar um modelo conceitual fisicamente fundamentado. O modelo representa o processo de interceptação por um balanço entre chuva externa, o armazenamento na copa e a drenagem da copa e a evaporação. A drenagem da copa e a evaporação dependem da quantidade de água armazenada no

dossel, variando ao longo do evento de precipitação (Muzylo et al., 2009). Rutter et al. (1975) desenvolveu a versão definitiva do modelo, adicionando um módulo de escoamento pelo tronco, em que uma fração da entrada de precipitação é desviada para os troncos.

A diferença do modelo de Massman (1983) para o modelo de Rutter (1975) está em suas equações de saída, drenagem da copa e evaporação. Já Liu e Liu (2008) desenvolveram um modelo para lidar com os dosséis heterogêneos, minimizando os requisitos de entrada dos dados, incluindo múltiplas camadas do dossel. Neste modelo, ocorre a molhagem progressiva do dossel, sendo que a chuva que chega a uma camada é a que passou pela camada anterior.

O modelo conceitual de Rutter trata a árvore como um tanque de armazenamento de água, tendo como entrada a precipitação e como saída evaporação e drenagem de copa, assumindo que a árvore tem uma capacidade de saturação ou armazenamento (S_c) (Zinke, 1967; Leyton et al., 1967). O modelo de Rutter é descrito pela Equação (10):

$$(1-p) \int_{t_i}^{t_f} R dt = \int_{t_i}^{t_f} D dt + \int_{t_i}^{t_f} E dt + \Delta C \quad (10)$$

onde p é o coeficiente de chuva interna livre; t_i é o tempo que começa o evento; t_f é o tempo que termina o evento; R é a intensidade da chuva externa; D é a taxa de drenagem de copa; E é a taxa de evaporação da água interceptada; e ΔC é a mudança no armazenamento da copa. Em 1975 o modelo foi adaptado para considerar a parte da precipitação que é desviada para os troncos (Rutter et al., 1975), cujo fluxograma é mostrado na Figura 2-2.

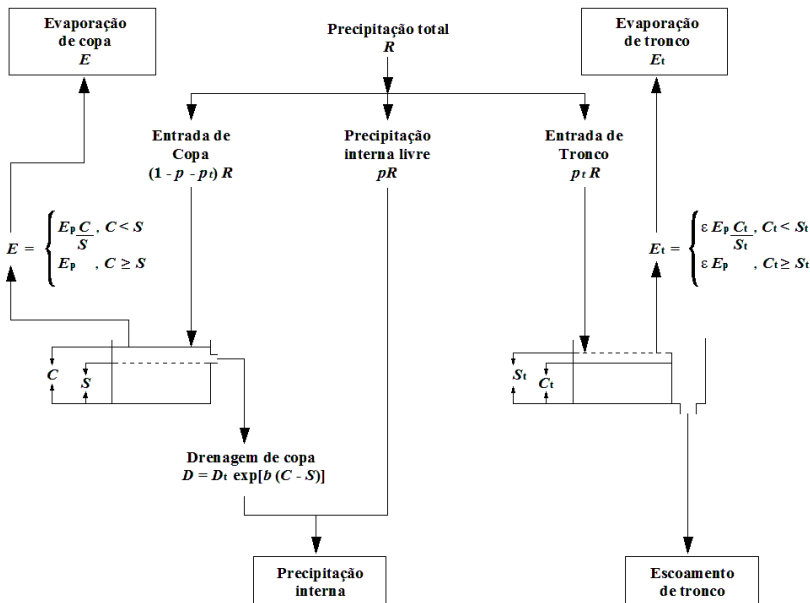


Figura 2-2 Fluxograma do modelo Rutter (Chaffe, 2009).

O balanço hídrico para tronco e copa é calculado com as seguintes equações:

$$(1-p-p_t) \int_{t_i}^{t_f} R dt = \int_{t_i}^{t_f} D dt + \int_{t_i}^{t_f} E dt + \Delta C \quad (11)$$

e

$$p_t \int_{t_i}^{t_f} R dt = S_f + \int_{t_i}^{t_f} E_t dt + \Delta C \quad (12)$$

onde p_t é o coeficiente de água desviada para o tronco; S_f é o escoamento pelo tronco; E_t é a taxa de evaporação pelo tronco; e ΔC_t é a mudança no armazenamento pelo tronco.

Os volumes de água na copa e no tronco são representados por C_c e C_t respectivamente. Relacionando esses valores com a capacidade de armazenamento de copa (S_c) e tronco (S_t) pode-se ter uma noção do grau de saturação da copa e tronco. O grau de saturação influencia na evaporação dos mesmos da seguinte maneira:

$$E_c = \begin{cases} E_p & \text{se } C_c \geq S_c \\ E_p \frac{C_c}{S_c} & \text{se } C_c < S_c \end{cases} \quad (13)$$

e

$$E_t = \begin{cases} \varepsilon E_p & \text{se } C_t \geq S_t \\ \varepsilon E_t \frac{C_t}{S_t} & \text{se } C_t < S_t \end{cases} \quad (14)$$

onde E_p é a taxa de evaporação potencial quando toda a copa está molhada; e ε é a proporção da taxa de evaporação pelo tronco em relação à taxa de evaporação de copa.

A taxa de drenagem da copa é calculada por:

$$D = \begin{cases} D_s \exp [b(C_c - S_c)] & \text{se } C_c \geq S_c \\ 0 & \text{se } C_c < S_c \end{cases} \quad (15)$$

onde D_s é a taxa de drenagem de copa quando $C_c = S_c$; e b é um coeficiente empírico de regressão cujo valor deve ser determinado de acordo com Rutter et al. (1975). Enquanto nesse modelo a drenagem de copa é determinada por uma relação linear, a drenagem pelo tronco é simplesmente o excedente da capacidade de armazenamento pelo tronco:

$$S_f = \begin{cases} C_t - S_t & \text{se } C_t \geq S_t \\ 0 & \text{se } C_t < S_t \end{cases} \quad (16)$$

2.6.2 Modelo de Gash e de Gash esparsos

O modelo de Gash original foi baseado no modelo de Rutter, mas requer dados com maior resolução temporal e tem se mostrado válido para as florestas de coníferas (Gash et al., 1980), florestas mistas verdes (Pearce e Rowe, 1981), florestas de faias verdes (Rowe, 1983), comunidade de plantas do semi-árido (Návar e Bryan, 1990), e florestas tropicais (Lloyd et al., 1988).

O modelo original de Gash previu a evaporação global ao invés da evaporação por área de dossel, e com isso obteve resultados superestimados para as florestas esparsas (Valente et al., 1997). Em 1995 Gash reformulou o modelo original introduzindo a fração de cobertura do dossel (Tabela 2-1).

Os estudos de perda por interceptação (I) e evapotranspiração (E) em florestas resultaram frequentemente em equações empíricas na forma de regressão entre I e P , isto é, como funções do tipo:

$$I = aP + b \quad (17)$$

sendo I a quantidade de água interceptada e perdida por evaporação; P é a chuva externa; e a e b são os coeficientes de regressão.

Essa equação pode ser usada para descrever conjuntos de dados de P , ou, assumindo que há apenas um evento de P por dia, para descrever a I diária como uma função da P . Considerando a evaporação em dois

períodos diferentes, antes da saturação da copa e após a saturação da copa, temos:

$$I = \int_0^{t'} E dt + \int_{t'}^t E dt + S_c \quad (18)$$

em que t' é o tempo necessário para a saturação da copa.

A taxa de evaporação média \bar{E} e a A intensidade média de chuva de uma copa saturada durante a chuva pode ser expressa por:

$$\bar{E} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t E dt \quad (19)$$

e

$$\bar{R} = \frac{1}{t-t'} \int_{t'}^t R dt \quad (20)$$

Quando não existe gotejamento da copa antes da saturação, P' pode ser determinado por:

$$(1-p-p_t)P' = S_c + \int_0^{t'} E dt \quad (21)$$

Onde, p é o coeficiente de precipitação interna livre e p_t é a proporção de chuva que é desviada para os troncos.

Juntando as Equações (19) e (20) na Equação (18), teremos:

$$I = \int_0^{t'} E dt + \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) (P-P') + S_c \quad (22)$$

Substituindo a chuva externa e considerando que não há gotejamento do dossel antes da saturação, teremos:

$$I = \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) P + \left(S_c + \int_0^t E dt \right) \left\{ 1 - \frac{\bar{E}}{\bar{R}(1-p-p_t)} \right\} \quad (23)$$

onde \bar{E} é a taxa de evapotranspiração média para copa saturada; S_c é a capacidade de armazenamento da copa; E é a evapotranspiração; p é o coeficiente de precipitação que cai no solo sem atingir a vegetação; p_t é a proporção de precipitação que é desviada para os tronco (Rutter et al., 1975; Gash e Morton, 1978).

Os coeficientes a e b da equação de regressão podem ser definidos igualando os coeficientes das Equações (17) e (23), como:

$$a = \left(\frac{\bar{E}}{\bar{R}} \right) \quad b = \left(S_c + \int_0^t E dt \right) \left\{ 1 - \frac{\bar{E}}{\bar{R}(1-p-p_t)} \right\} \quad (24)$$

O modelo de Gash considera que as condições meteorológicas que prevalecem durante o umedecimento da copa são suficientemente similares a aquelas que prevalecem para o resto dos eventos, e então as condições médias de chuva e evaporação, sobre todos os eventos no período, podem ser consideradas aplicáveis nesta situação transiente.

Considerando uma série de n eventos grandes o suficiente para saturar a copa e separados por um período suficiente para a copa secar. Se a Equação (18) é aplicada a cada evento, a perda por interceptação é determinada por:

$$\sum_{j=1}^n I_j = \sum_{j=1}^n \left(\int_0^{t_j} E dt + \left(\frac{\bar{E}}{R} \right) (P_j - P_j) \right) + n S_c \quad (25)$$

O umedecimento da copa para o período antes da saturação é

$$\int_0^{t'} E dt = (1 - p - p_t) P' - S_c. \text{ Substituindo esta na Equação (25) para todos os}$$

n eventos, tem-se:

$$\sum_{j=1}^n I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P_j + \left(\frac{\bar{E}}{R} \right) \sum_{j=1}^n (P_j - P_j) \quad (26)$$

Para pequenos eventos (m) insuficientes para saturar a copa, $I = (1 - p - p_t) P$ o total da perda por interceptação na copa é:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^n P_j + \dots \quad (27)$$

$$\left(\frac{\bar{E}}{R} \right) \sum_{j=1}^n (P_j - P_j) + (1 - p - p_t) \sum_{j=1}^m P_j$$

A evaporação dos troncos é consideravelmente pequena quando comparada com a evaporação da copa. A perda por interceptação dos troncos é a quantidade de água que permaneceu nos troncos após escoamento ter cessado. Supondo que o intervalo entre eventos é suficiente para evaporar toda a água armazenada no tronco, então a perda por interceptação dos troncos é dada por:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_j \quad (28)$$

O total dos eventos de chuva ($n+m$), o eventos acima da chuva crítica (q) para encher (S_t/p_t) e preencher o tronco, a Equação (27) pode ser escrita como:

$$\begin{aligned} \sum_{j=1}^{n+m} I_j &= (1-p-p_t) \sum_{j=1}^n P_j + \left(\frac{\bar{E}}{R}\right) \sum_{j=1}^n (P_j - P_j) + \dots \\ &(1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_j + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{n+m-q} P_j \end{aligned} \quad (29)$$

Supõe-se que a evaporação da copa é descrita por $E = (C_c/S_c)E_p$, em que E_p é a evaporação que deverá ocorrer de uma copa totalmente úmida e C_c é a quantidade de água na copa. Isto é aplicado para as condições de copa antes da saturação, com posterior suposição de que a taxa média de evaporação e a intensidade de chuva média também se aplica.

A evaporação durante este período é então dada por $E = (C_c/S_c)\bar{E}$. Assumindo que não há gotejamento de água antes da saturação, a taxa de mudança de água na copa pode ser descrita por $dC_c/dt = (1-p-p_t)R - E$, ou $dC_c/dt = (1-p-p_t)R - (\bar{E}/S_c)C_c$, cuja a solução é:

$$C_c = (1-p-p_t) \left(\frac{RS_c}{\bar{E}}\right) \left\{1 - \exp\left(-\frac{\bar{E}t}{S_c}\right)\right\} \quad (30)$$

Conseqüentemente, o tempo necessário para que ocorra a saturação é:

$$t' = - \left(\frac{S_c}{\bar{E}} \right) \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{E}}{R(1-p-p_t)} \right\} \quad (31)$$

Supondo que a intensidade de chuva média se aplica durante toda a duração do evento, no momento que a copa chega à saturação a chuva necessária para saturar a copa é dada por $P' = Rt'$, conseqüentemente:

$$P' = \left(\frac{-RS_c}{\bar{E}} \right) \ln \left\{ 1 - \frac{\bar{E}}{R(1-p-p_t)} \right\} \quad (32)$$

Então a equação (29) pode então ser reescrita com P' como uma constante para todo o período:

$$\sum_{j=1}^{n+m} I_j = n(1-p-p_t)P' + \left(\frac{\bar{E}}{R} \right) \sum_{j=1}^n (P_j - P_j) + \dots \quad (33)$$

$$(1-p-p_t) \sum_{j=1}^n P_j + qS_t + p_t \sum_{j=1}^{m=n-q} P_j$$

O modelo requer parâmetros climáticos e da copa para cálculos de interceptação, que incluem a capacidade de armazenamento da copa (S_c), cobertura do dossel (c , assumido como sendo um menos coeficiente de precipitação interna livre p), fração de precipitação desviada para os troncos (p_t), capacidade de armazenamento do tronco (S_t), intensidade de precipitação média (R), e a taxa de evaporação média (\bar{E}) durante a chuva.

As quantidades de água da chuva necessária para saturar completamente o dossel (P'_c) e o tronco (P'_t) foram calculadas usando as equações abaixo:

$$P' = -\frac{\bar{R}}{E_c S_c \ln\left(1 - \frac{\bar{E}_c}{\bar{R}}\right)} \quad (34)$$

onde S_c é a capacidade de armazenamento do dossel por unidade de área de cobertura do dossel, calculado como $S_c = S/c$; e E_c é a taxa de evaporação média durante chuvas aprimoradas para cobertura do dossel, definida como $E_c = E/c$.

Tabela 2-1 Componentes de interceptação do modelo de Gash (1979) e do modelo revisado (dossel esparso) de Gash et al., (1995). (Modificado de Valente et al., 1997 e Gerrits e Savenije, 2011).

	Gash (1979)	Revisado (dossel esparso) Gash et al. (1995)
Quantidade de precipitação bruta necessária para saturar o dossel (P'_c) e tronco (P'_t)	$P'_c = -\frac{\bar{P}S_{c,\max}}{\bar{E}_p} \ln \left[1 - \frac{\bar{E}_p}{(1-p-p_t)\bar{P}} \right]$ $P'_t = S'_{c,\max} / p_t$	$P'_c = -\frac{\bar{P}S_{c,\max}}{(1-\varepsilon)\bar{E}_p c} \ln \left[1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_p}{\bar{P}} \right]$ $P'_t = -\frac{\bar{P}S'_{c,\max}}{\bar{P} - (1-\varepsilon)\bar{E}_p p_t c} + P'_c$
Evaporação do dossel ($E'_{i,c}$):		
1. para m eventos ($P < P'_c$)	$(1-p-p_t) \sum_{j=1}^m P_j$	$c \sum_{j=1}^m P_j$
2. para n eventos ($P \geq P'_c$)	$n(1-p-p_t)P'_c + \frac{\bar{E}_p}{P} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_c)$	$c = \left[nP + \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_p}{P} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_c) \right]$
Evaporação do tronco ($E'_{t,c}$):		
1. para q eventos ($P \geq P'_t$)	qS'_c	qS'_c
2. para $m+n-q$ eventos ($P < P'_t$)	$p_t \sum_{j=1}^{m+n-q} P_j$	$p_t c \left[1 - \frac{(1-\varepsilon)\bar{E}_p}{P} \sum_{j=1}^n (P_j - P'_c) \right]$

$S_{c,\max}$ é a capacidade de armazenamento máximo da copa; p é o coeficiente livre de chuva interna; p_t é o coeficiente de escoamento pelo tronco; ε é a relação entre a taxa de evaporação pelo tronco e taxa de evaporação de copa ; c é a proporção de cobertura florestal

3 MATÉRIAS E MÉTODOS

3.1 Área de Estudo

A bacia experimental do rio Araponga (ARA) está localizada na zona rural do município de Rio Negrinho-SC e fica 25 km ao sul do centro urbano. A bacia tem esse nome em homenagem à ave Araponga presente na região (Mota, 2012).

A bacia é de segunda ordem, está inserida em uma região coberta por Floresta Ombrófila Mista secundária e possui área de 5,3 ha. As coordenadas geográficas da exutória são 49°29'44'' oeste e 26°29'27'' sul (Figura 3-1). A altimetria da bacia varia de 880 m a 1006 m com relação ao nível do mar.

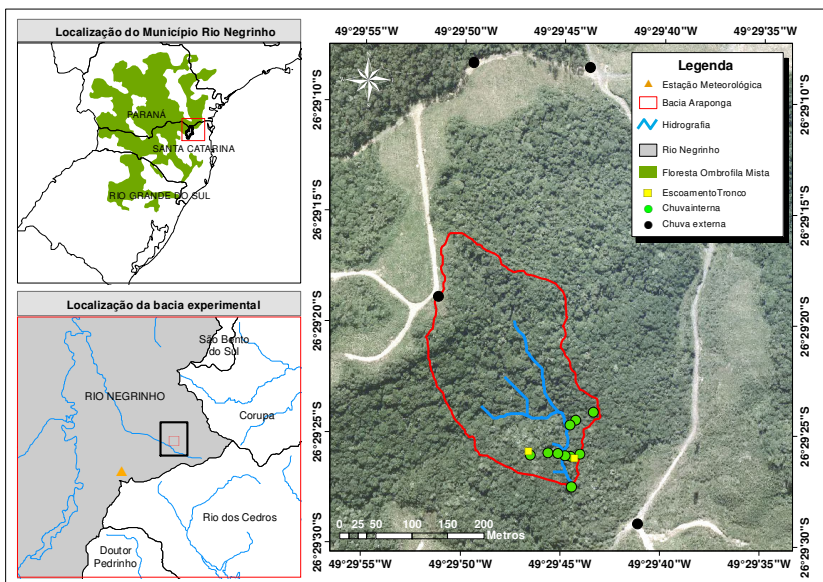


Figura 3-1 Mapa de localização da bacia experimental do rio Araponga e dos pontos de monitoramento

3.2 Monitoramento

O monitoramento realizado com pluviômetros foi dividido em períodos, de duração igual ao intervalo entre uma medição e outra (aproximadamente 15 dias). O monitoramento de 2012 ficou dividido em 26 períodos, de 2013 em 17 períodos e 2014 ficou dividido em 17 períodos, totalizando 60 períodos de monitoramento de 2012 a 2014 (Tabela 3-1).

3.2.1 Chuva Externa

A série de dados de chuva externa foi obtida por meio de um pluviógrafo e quatro pluviômetros, todos localizados em volta da bacia ARA (Figura 3-1). O pluviógrafo está instalado na cabeceira da bacia, com uma configuração para registrar os dados a cada 5 minutos, possui diâmetro de abertura de 20 cm e resolução de 0,24 mm.

Os quatro pluviômetros estão instalados para fornecer o volume acumulado de chuva externa, sendo um localizado ao lado do pluviógrafo para comparar os valores entre eles (Figura 3-2a), e os outros para verificar se a chuva na bacia é homogênea ou heterogênea (Figura 3-2b). Esse modelo foi utilizado por Giglio (2013), com os pluviômetros calibrados com uma abertura de 221 cm² e resolução de 0,24 mm. A leitura foi realizada quinzenalmente.

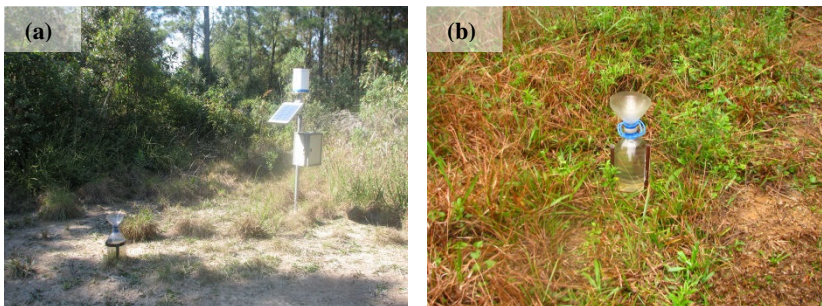


Figura 3-2 Monitoramento da chuva externa. (a) pluviógrafo e pluviômetro localizado no ponto PLUV e (b) pluviômetro localizado no ponto E1.

Tabela 3-1 Data das medições do período de monitoramento de 2012 - 2014.

n	Período		n° de dias	n	Período		n° de dias	n	Período		n° de dias
	Início	Fim			Início	Fim			Início	Fim	
1	11/01/12	20/01/12	9	21	10/10/12	25/10/12	15	41	22/11/13	04/12/13	12
2	20/01/12	01/02/12	12	22	25/10/12	06/11/12	12	42	04/12/13	17/12/13	13
3	01/02/12	16/02/12	15	23	06/11/12	20/11/12	14	43	17/12/13	08/01/14	22
4	16/02/12	02/03/12	15	24	20/11/12	06/12/12	16	44	08/01/14	22/01/14	14
5	02/03/12	17/03/12	15	25	06/12/12	20/12/12	14	45	22/01/14	29/01/14	7
6	17/03/12	30/03/12	13	26	20/12/12	15/01/13	26	46	29/01/14	20/02/14	22
7	30/03/12	12/04/12	13	27	15/01/13	24/01/13	9	47	20/02/14	21/03/14	29
8	12/04/12	28/04/12	16	28	24/01/13	21/02/13	28	48	21/03/14	02/04/14	12
9	28/04/12	10/05/12	12	29	21/02/13	06/04/13	44	49	02/04/14	15/04/14	13
10	10/05/12	26/05/12	16	30	06/04/13	14/07/13	99	50	15/04/14	08/05/14	23
11	26/05/12	13/06/12	18	31	14/07/13	19/07/13	5	51	08/05/14	22/05/14	14
12	13/06/12	28/06/12	15	32	19/07/13	25/07/13	6	52	22/05/14	05/06/14	14
13	28/06/12	17/07/12	19	33	25/07/13	13/08/13	19	53	05/06/14	26/06/14	21
14	17/07/12	19/07/12	2	34	13/08/13	27/08/13	14	54	26/06/14	14/07/14	18
15	19/07/12	04/08/12	16	35	27/08/13	14/09/13	18	55	14/07/14	28/07/14	14
16	04/08/12	16/08/12	12	36	14/09/13	27/09/13	13	56	28/07/14	12/08/14	15
17	16/08/12	31/08/12	15	37	27/09/13	10/10/13	13	57	12/08/14	09/09/14	28
18	31/08/12	14/09/12	14	38	10/10/13	01/11/13	22	58	09/09/14	07/10/14	28
19	14/09/12	28/09/12	14	39	01/11/13	08/11/13	7	59	07/10/14	22/10/14	15
20	28/09/12	10/10/12	12	40	08/11/13	22/11/13	14	60	22/10/14	11/11/14	20

3.2.2 *Chuva Interna*

Assim como a chuva total, a chuva interna foi monitorada com os dois tipos de dispositivos, sendo que a medição automática foi realizada utilizando um sistema de calha ligada ao pluviógrafo (Figura 3-3a). A calha possui uma área total de captação de 0,6 m², composta por 1 unidade de 3 m de comprimento e 0,2 m de largura. Uma garrafa PET foi ligada ao pluviógrafo para o monitoramento do volume coletado pela calha (Figura 3-3b). O fundo da calha possui formato triangular, de forma a minimizar os respingos, seguindo a configuração utilizada por Chaffe (2009).

Os pluviômetros são do mesmo modelo dos usados para monitorar a chuva total e foram instalados 10 distribuídos pela bacia. A localização de nove pluviômetros (Figura 3-3d) coincide com os pontos existentes de medição de tensão da água no solo (A1-2, A3, A4, B1-2, B3, B4, Z1-2, Z3 e Z4), e um ponto está localizado no vertedor da bacia (VERT).

3.2.3 *Escoamento pelo tronco*

O monitoramento do escoamento pelo tronco foi realizado em 14 árvores, com a utilização de mangueiras de PVC, transparentes e flexíveis, de 3/4" e de 1/2" de diâmetro, cortadas a meia seção. Dez das árvores foram ligadas a garrafas PET para o monitoramento do volume do escoamento pelo tronco (Figura 3-4a) e outras 4 árvores foram ligadas ao pluviógrafo para o monitoramento da intensidade do escoamento pelo tronco (Figura 3-4d).

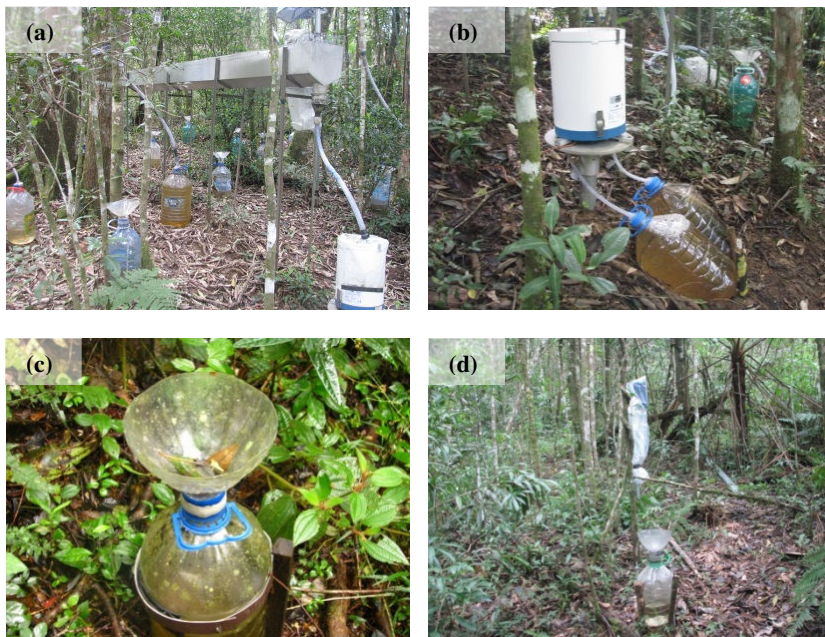


Figura 3-3 Monitoramento da chuva interna: (a) calha ligada ao pluviógrafo; (b) garrafas ligada ao pluviógrafo; (c) pluviômetro e (d) pluviômetro próximo do tensiômetro.

A partir desses volumes, a altura de escoamento pelo tronco gerada em cada evento foi estimada com dois métodos. O primeiro método foi utilizando a somatória de todas as áreas da copa das árvores que fazem interseção com as copas das árvores monitoradas, a área da copa formada pelas copas das árvores que fazem interseção com as copas das árvores monitoradas e o volume do escoamento pelo tronco, conforme a Equação (35).

$$Sf_1 = \frac{Sf_L}{A_{copa}} \left(\frac{\sum A_{c.Total}}{A_{c.TotalInt}} \right) \quad (35)$$

onde S_{fl} é a altura de escoamento pelo tronco das árvores (mm); Sf_L é o volume de escoamento pelo tronco das árvores (Litros); A_{copa} é a área da copa de coleta do escoamento pelo tronco (m^2); $A_{c.Total}$ é a área da copa formada pelas copas das árvores que fazem interseção com as copas das árvores monitoradas (m^2); $A_{c.TotalInt}$ é a área da copa que faz interseção com as árvores monitoradas (m^2). Observa-se na Figura 3-5 como foram definidas as áreas das copas utilizadas para a estimativa do escoamento pelo tronco através deste método.



Figura 3-4 Monitoramento do escoamento pelo tronco: (a) recipiente de armazenamento cheio; (b) recipiente de armazenamento; (c) coletor do tipo espiral; e (d) ligação das árvores para o pluviógrafo.

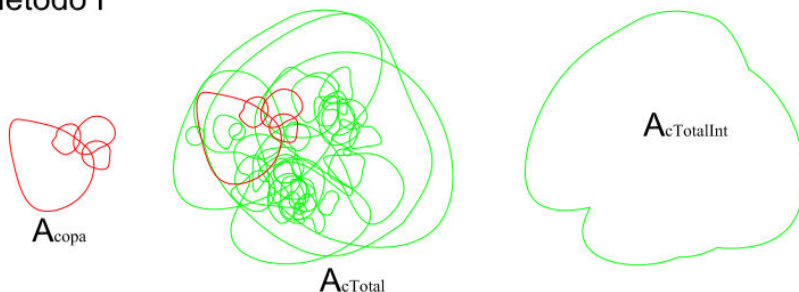
O segundo método foi utilizando a somatória das áreas de interseção entre as copas e a área da copa de coleta do escoamento pelo

tronco, a área da copa de coleta do escoamento pelo tronco e o volume do escoamento pelo tronco, conforme a Equação (35).

$$Sf_2 = \frac{Sf_L}{A_{copa}} \left(\frac{\sum A_{Int}}{A_{copa}} \right) \quad (36)$$

onde Sf_2 é a altura de escoamento pelo tronco das árvores (mm); Sf_L é o volume de escoamento pelo tronco das árvores (litros); A_{copa} é a área da copa de coleta do escoamento pelo tronco (m^2); A_{Int} é a área de interseção com A_{copa} da copa das árvores que fazem interseção com as árvores monitoradas (m^2).

Método I



Método II

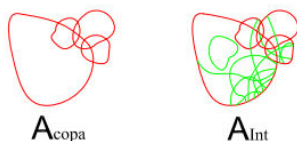


Figura 3-5 Estimativa das áreas da copa de coleta do escoamento pelo tronco. A área da copa (polígono verde) e área da copa das árvores que tem o monitoramento do escoamento pelo tronco (polígono vermelho).

3.2.4 Cobertura Florestal

O monitoramento da cobertura florestal foi realizado a partir de fotografias tiradas do dossel das árvores (Figura 3-6), para em seguida serem processadas para classificação dos pixels de cobertura (pixels pretos) e abertura (pixels brancos). Essa metodologia foi continuação do trabalho realizado por Giglio (2013).

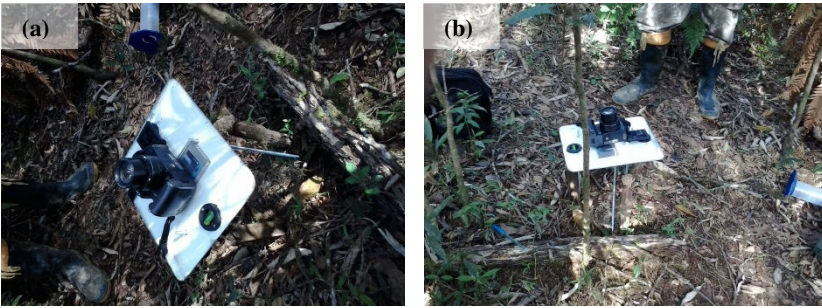


Figura 3-6 Instrumentos para aquisição de fotografias da cobertura florestal(a) e (b) Câmera fotográfica em cima da base para aquisição de fotografias da cobertura florestal.

As fotografias foram capturadas a partir do centro de cada ponto do pluviômetro instalado no interior da bacia (Figura 3-7). A Figura 3-8 apresenta uma fotografia de cada ponto de monitoramento da cobertura florestal. Observa-se que é evidente a heterogeneidade entre os pontos antes mesmo de qualquer processamento digital da imagem.

Para cada fotografia foi considerada apenas a imagem contida no círculo de diâmetro igual a 45% da diagonal da fotografia, para minimizar os efeitos de distorção radial das fotografias. As fotografias foram então classificadas em duas classes: cobertura (vegetação, folhas, galhos e troncos) e abertura (intervalos do dossel livres de vegetação).

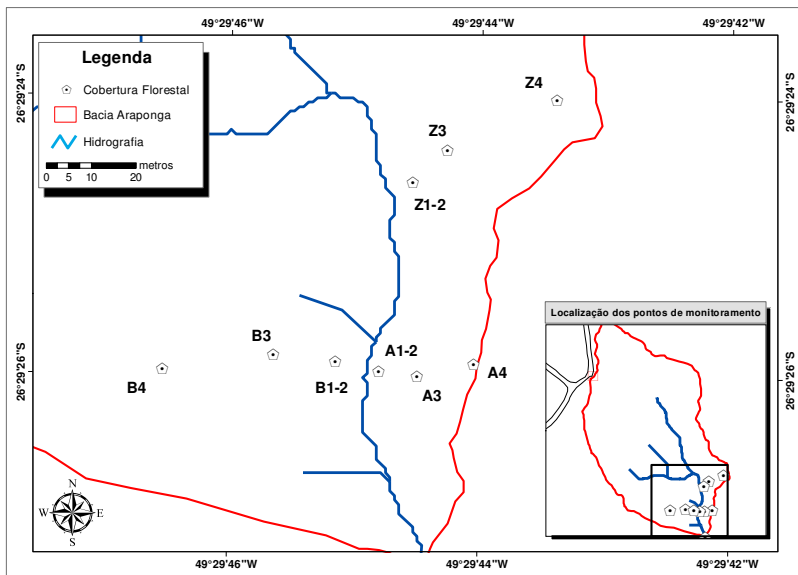


Figura 3-7 Mapa de localização dos pontos de monitoramento da cobertura florestal.

As fotografias foram convertidas em escala de cinza e em seguida foram transformadas em imagens binárias, em preto e branco. Os pixels brancos (Nb) representam a classe aberta e os pixels pretos (Np) representam a classe coberta. Depois de classificados, os pixels foram contados e foi determinado, para cada fotografia, o índice de cobertura do dossel (Equação (37)).

$$ICD = 100 \frac{Np}{Np + Nb} \quad (37)$$

onde ICD é o índice de cobertura do dossel; Np é número de pixels pretos; Nb é número de pixels brancos.

3.2.5 Distribuição espacial da chuva interna

Para análise espacial da distribuição da chuva interna, foram instalados 28 pluviômetros distribuídos uniformemente em uma área circular de 3 metros de raio centrada no ponto A3, conforme mostra a Figura 3-10. O monitoramento foi realizado seguindo os mesmos critérios do escoamento pelo tronco (3.2.4) e chuva interna (Figura 3-9).

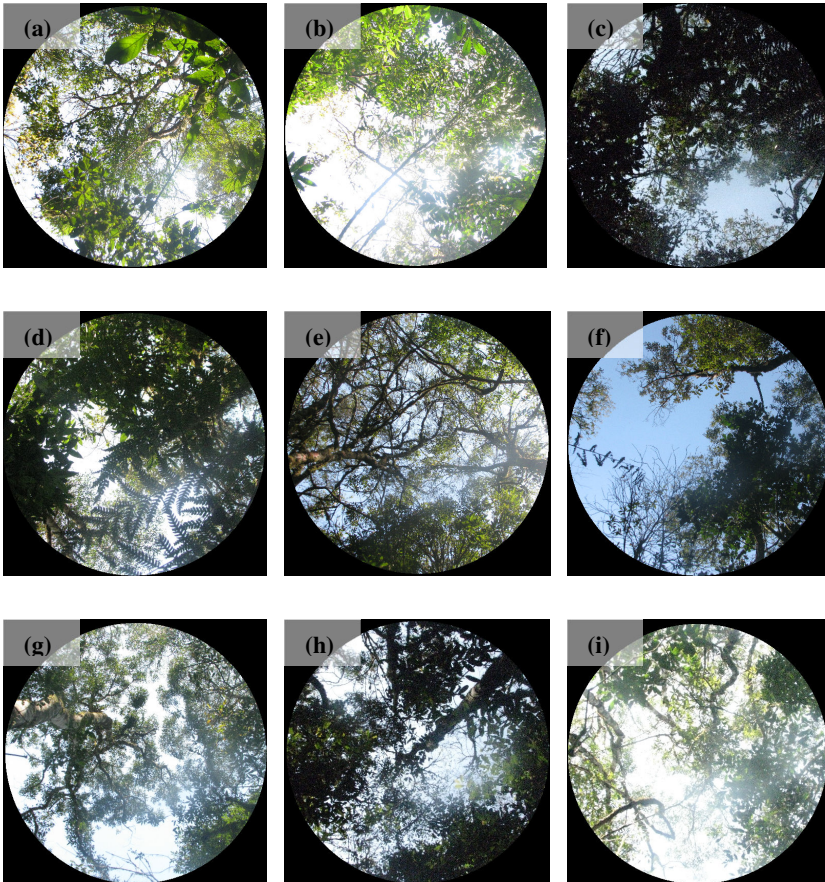


Figura 3-8 Fotografias capturadas em 13/09/14. (a) Ponto A1-2; (b) Ponto A3; (c) Ponto A4; (d) Ponto B1-2; (e) Ponto B3; (f) Ponto B4; (g) Ponto Z1-2; (h) Ponto Z3 e (i) Ponto Z4.

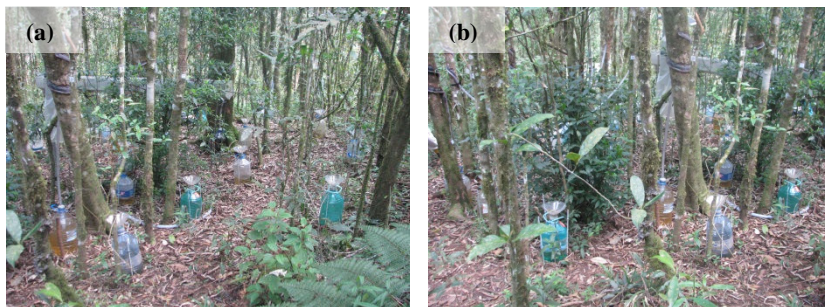


Figura 3-9 Análise espacial da distribuição da chuva interna na parcela A3.

Os pluviômetros foram numerados de acordo com sua posição na parcela, sendo que o primeiro número representa a linha e o número após o ponto sendo a coluna, a linha 1 é a mais de baixo, por exemplo, o ponto 1.2 está localizado na linha 1 e coluna 2 da parcela.

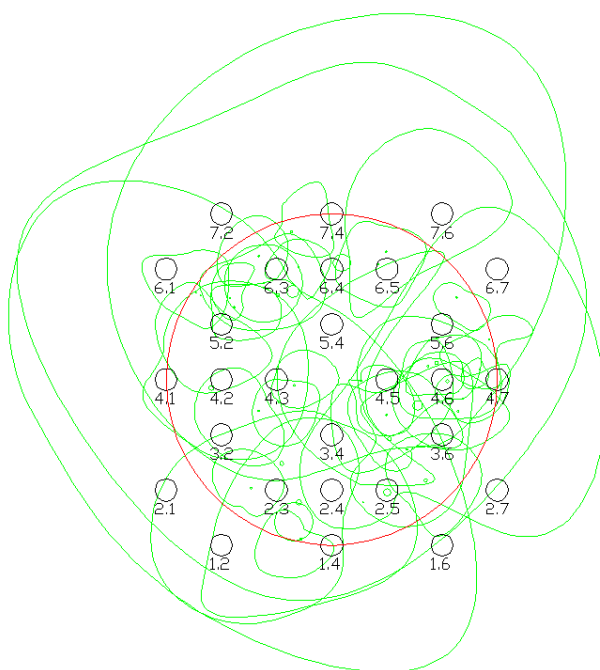


Figura 3-10 Croqui da localização dos pontos de monitoramento (pluviômetros – círculo preto), com a área do dossel (polígono verde) e área da parcela (círculo vermelho).

A Figura 3-12 apresenta as fotografias de cada ponto de monitoramento da cobertura florestal. É evidente a heterogeneidade entre os pontos antes mesmo de qualquer processamento digital da imagem. Outro fator importante é a luminosidade de cada ponto, verifica-se que os pontos acima da linha 5 tem maior luminosidade que os outros pontos.

3.2.6 Estação Meteorológica

Os dados horários da estação meteorológica do rio Feio foram utilizados para o cálculo da evapotranspiração. A estação (Figura 3-1) está localizada a 3 km de distância da bacia ARA e fica a 951 m acima do nível do mar. Esta estação realiza o monitoramento dos seguintes parâmetros: chuva, umidade, radiação incidente e refletida, direção e velocidade do vento e temperatura atmosférica.

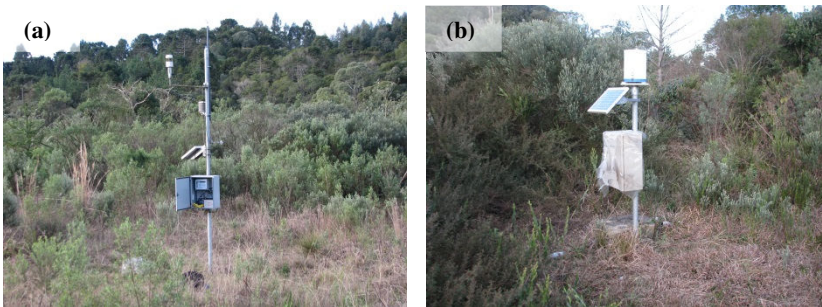


Figura 3-11 - Estação Meteorológica do Rio Feio. (a) Estação meteorológica e (b) Pluviógrafo.

3.3 Estimativa da Evapotranspiração Potencial

A estimativa da evapotranspiração potencial foi feita usando os dados da estação meteorológica do rio Feio, que conforme o item 3.2.6 está localizada a aproximadamente 3 km da bacia.

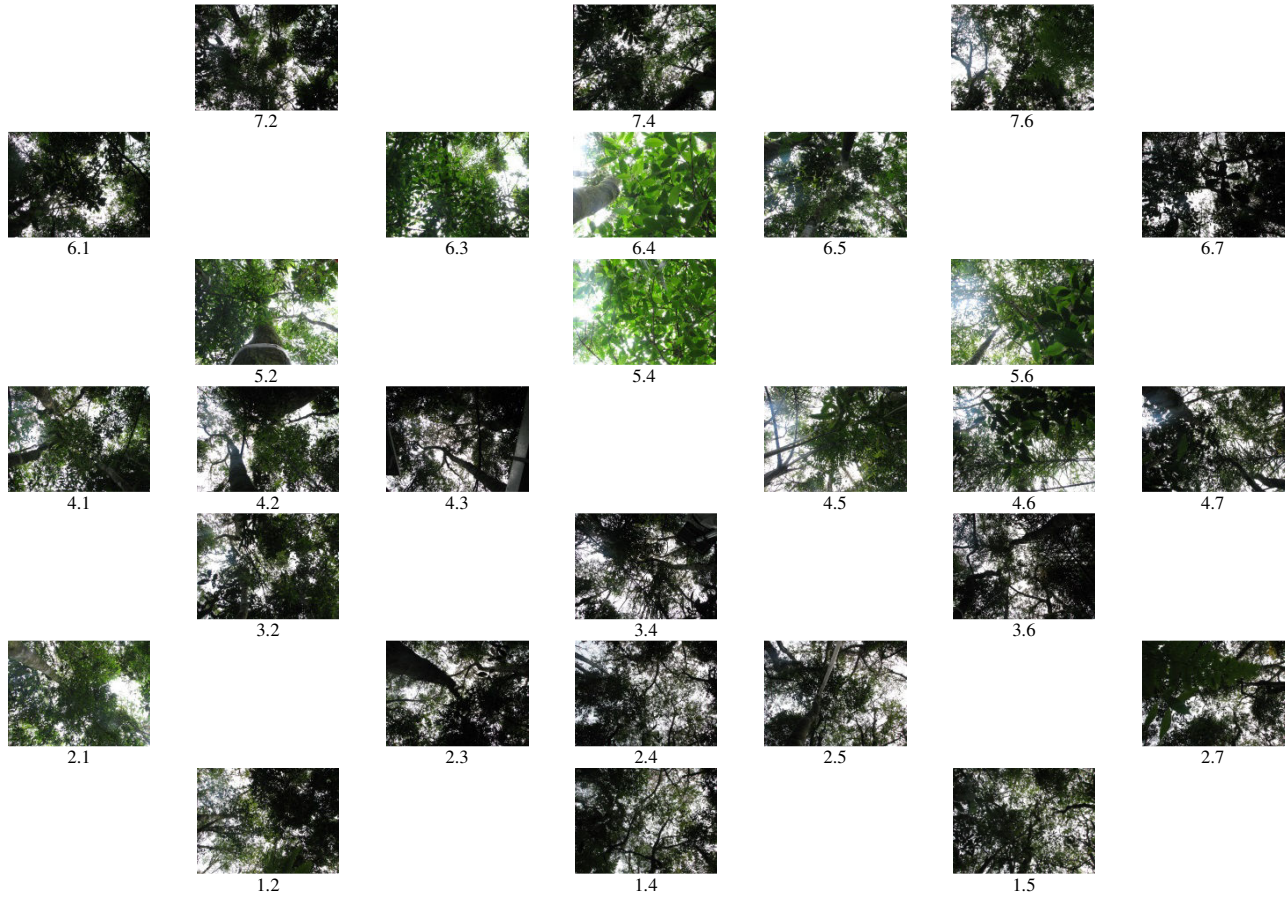


Figura 3-12 Fotografias dos pontos de monitoramento do índice do dossel.

Os dados da estação foram transformados em médias diárias para o cálculo da evapotranspiração potencial diária empregando o método de Penman modificado. As médias diárias 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 (18h00min às 06h00min), a evapotranspiração é uniforme e seu total corresponde a 10% da evapotranspiração potencial diária.

3.4 Modelagem da Interceptação

As estimativas de interceptação foram realizadas utilizando dois modelos de interceptação, o de Rutter e o de Gash. Os modelos baseiam-se essencialmente nos cálculos dinâmicos dos balanços hídricos do dossel e dos troncos. Como entrada, foram utilizados os dados de P , Tf e Sf oriundos do monitoramento automatizado, com resolução temporal de 5 minutos (26/02/2014 – 06/10/2014).

Estes modelos também requerem como entrada o fator de cobertura (c), capacidade de armazenamento de copa (S_c), capacidade de armazenamento pelo tronco (S_t), coeficiente de proporção de água desviada para o tronco (p_t) e relação entre a taxa de evaporação pelo tronco e taxa de evaporação de copa (ϵ). O parâmetro c foi obtido utilizando a média das fotos da copa e análise de regressão da P e Tf . O valor de S foi obtido através da curva envoltória da dispersão entre Tf e P tanto para os dados da calha quanto para os dados dos pluviômetros e o S_t foi estimado através da regressão da P e Sf .

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Análise da chuva externa, chuva interna e escoamento pelo tronco

No ano de 2012, a chuva externa foi de 1.651 mm, distribuídos em 107 eventos. Neste ano houve 168 dias sem chuva. A chuva em 2013 somou 1.653 mm distribuídos em 117 eventos e houve 150 dias sem ocorrência de chuva. Em 2014 até o dia 11/11/2014 a chuva total foi de 2.005 mm, distribuídos em 97 eventos. O total de dias sem chuva neste período foi de 171 dias (Figura 4-1).

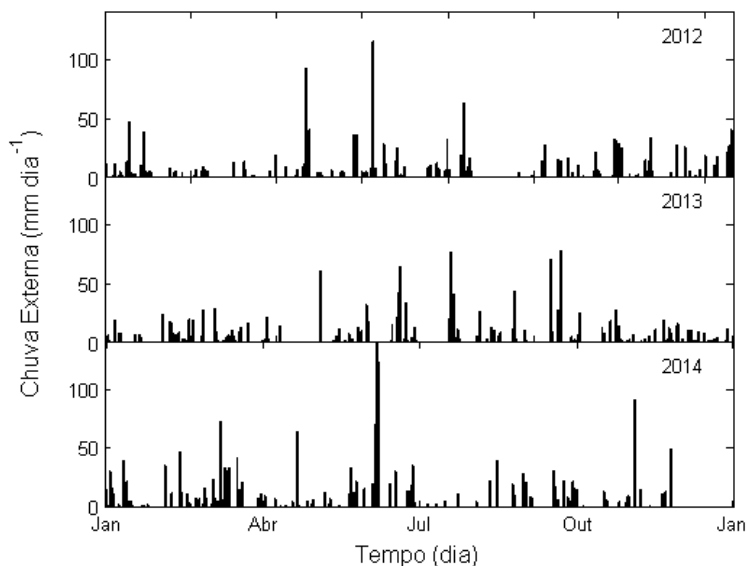


Figura 4-1 Mostrando os dados de chuva externa para cada ano do período estudado.

A distribuição de frequências do total de chuva externa acumulado em cada período é apresentada na Figura 4-2. Observa-se que o maior número de observação aconteceu entre os intervalos 50 e 75 mm.

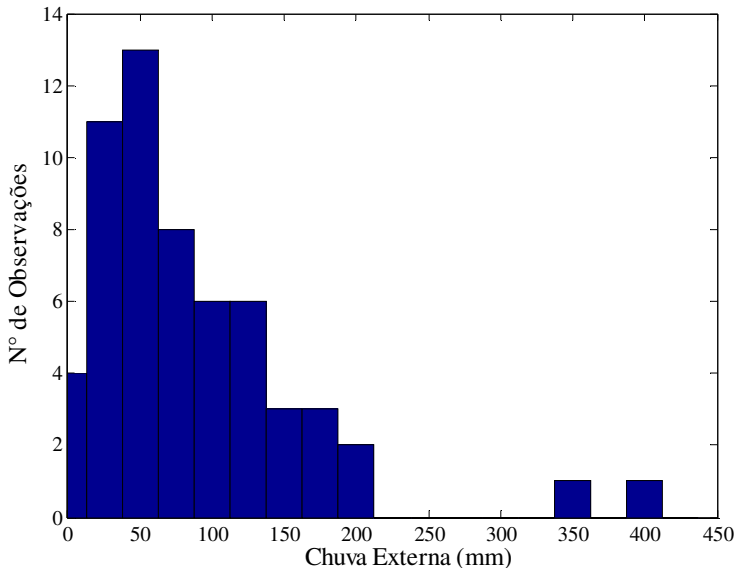


Figura 4-2 Histograma da chuva externa do período monitorado.

Giglio (2013) questionou a possibilidade de se considerar a chuva externa precipitada sobre a bacia como sendo homogênea e, por isso, foram instalados mais 3 pluviômetros (E1, E2 e E3) em volta da bacia a partir do dia 13/09/2012 (período n°20).

A variabilidade dos dados de chuva externa obtidos a partir dos pluviômetros em relação aos dados do pluviógrafo pode ser verificada na Figura 4-3. Verifica-se que os dados dos pluviômetros se aproximam da linha 1:1 em relação ao pluviógrafo, mas em eventos acima de 300 mm os valores dos pluviômetros foram subestimados em relação ao monitoramento com o pluviógrafo, porque o volume máximo medido dos pluviômetros é de 300 mm.

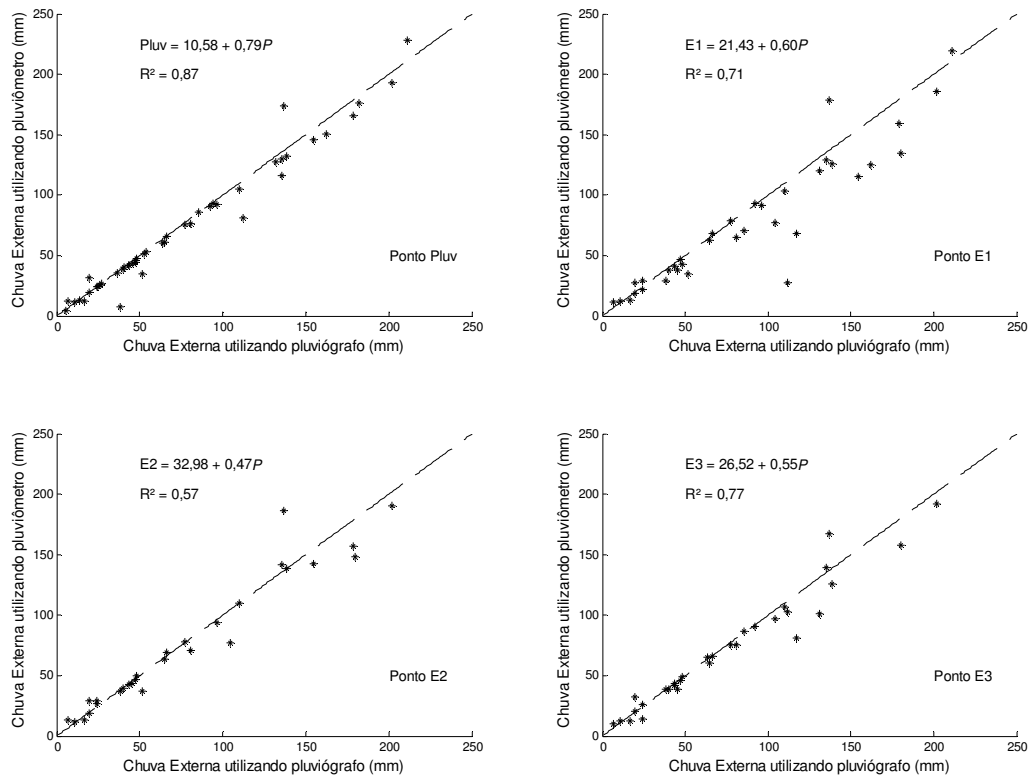


Figura 4-3 Altura da chuva externa medida nos pluviômetros em relação aos registros do pluviógrafo.

As séries de dados foram separadas em eventos de precipitação de duas formas: considerando-se um período seco (sem registro de chuva externa) entre um evento e outro de 6 e 12 horas (Tabela 4-1). Os eventos com precipitação total acumulada abaixo de 1 mm foram descartados, considerando-se que nesses eventos 100% da água precipitada foi evaporada ou ficou armazenada na vegetação.

Tabela 4-1 Resultados dos dados da chuva externa (P) e chuva interna (Tf).

	6 horas			12 horas			
	Eventos	P total	Tf (%)	Eventos	P total	Tf (%)	
2012		204	1.652	86	146	1.652	86
	P>1 mm	107	1.614	88	89	1.629	87
2013		218	1.653	83	137	1.653	83
	P>1 mm	117	1.617	85	88	1.634	84
2014		176	2.005	66	138	2.005	66
	P>1 mm	97	1.877	67	82	1.883	66

A partir da relação entre Tf e P (Figura 4-4), pode-se observar que a dispersão entre os pontos aumenta com o aumento da P . O maior valor de P foi de 397 mm, tendo sido registrado para este período um valor de Tf de 200 mm. O maior valor identificado de Tf foi de 270 mm com P de 351 mm. Os dois casos ocorreram no ponto B3. Observa-se que aumentando a chuva externa aumenta a dispersão entre os pontos da chuva interna, aumentando a diferença.

A chuva externa (P), durante o período de monitoramento com pluviógrafo, somou 5.310 mm distribuídos em 596 (período seco de 6 horas) ou 421 (período seco de 12 horas) eventos. Assim como Giglio (2013) foi verificado que a P é mais homogênea que a chuva interna (Tf), pois na Tf a presença da vegetação faz com que a distribuição seja mais heterogênea.

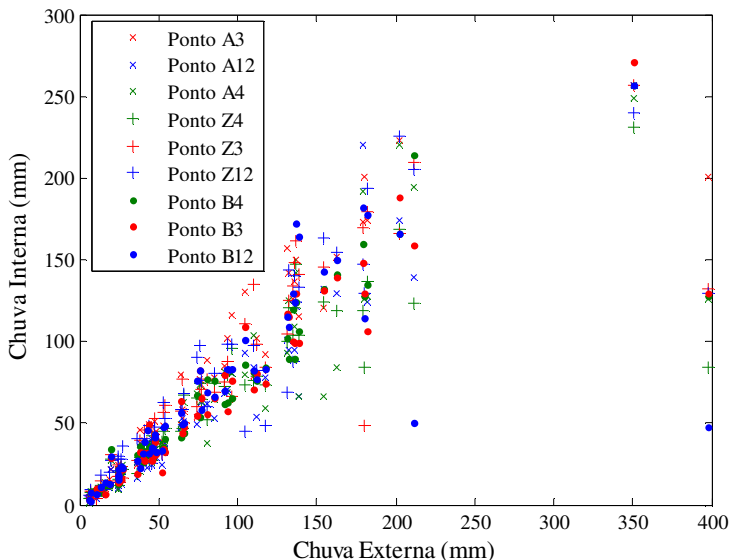


Figura 4-4 Relação da chuva interna pela chuva externa no período monitorado. Cada simbologia representa uma parcela diferente e cada cor representa um ponto de monitoramento da parcela.

A estimativa da capacidade de armazenamento da copa (S_c) e do coeficiente de chuva interna livre (p) é realizada a partir de um gráfico de dispersão entre os volumes de chuva externa e chuva interna. Para os dados provenientes do monitoramento automático, o ponto de inflexão foi de 5 mm, que seria o valor de chuva externa necessária para saturar a copa (Leyton et al., 1967). O coeficiente angular 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 $(1 - c)$. Para a estimativa da capacidade de armazenamento da copa S_c foi feita uma curva nos pontos de envoltória, que equivalem a condições mínimas de evaporação.

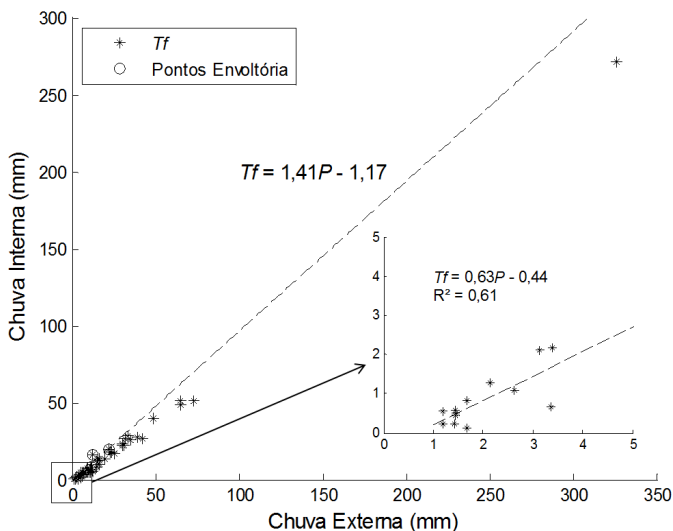


Figura 4-5 Relação entre chuva externa (P) e chuva interna (T_f) da calha. Curva pontilhada representa a regressão dos pontos envoltória. O gráfico menor é a relação da $P \times T_f$ nos pontos de inflexão (<5 mm).

No ponto da calha foi estimado o coeficiente de chuva interna livre (p) como 0,63, e a estimativa da capacidade de armazenamento da copa (S_c) foi realizada utilizando 3 pontos para a curva envoltória, sendo obtido um valor de 1,17 mm, conforme pode ser observado na Figura 4-5.

A partir dos dados provenientes do monitoramento com pluviômetros (divididos em períodos), foi obtido um ponto de inflexão de 30 mm, que seria o valor necessário para saturar a copa. O coeficiente de chuva interna livre variou de 0,59 a 0,88 e a capacidade de armazenamento variou de 0,8 a 20,0 mm.

Nas Figura 4-6 e Figura 4-7 são apresentados gráficos dos dados por períodos, para a obtenção dos valores de S_c e c .

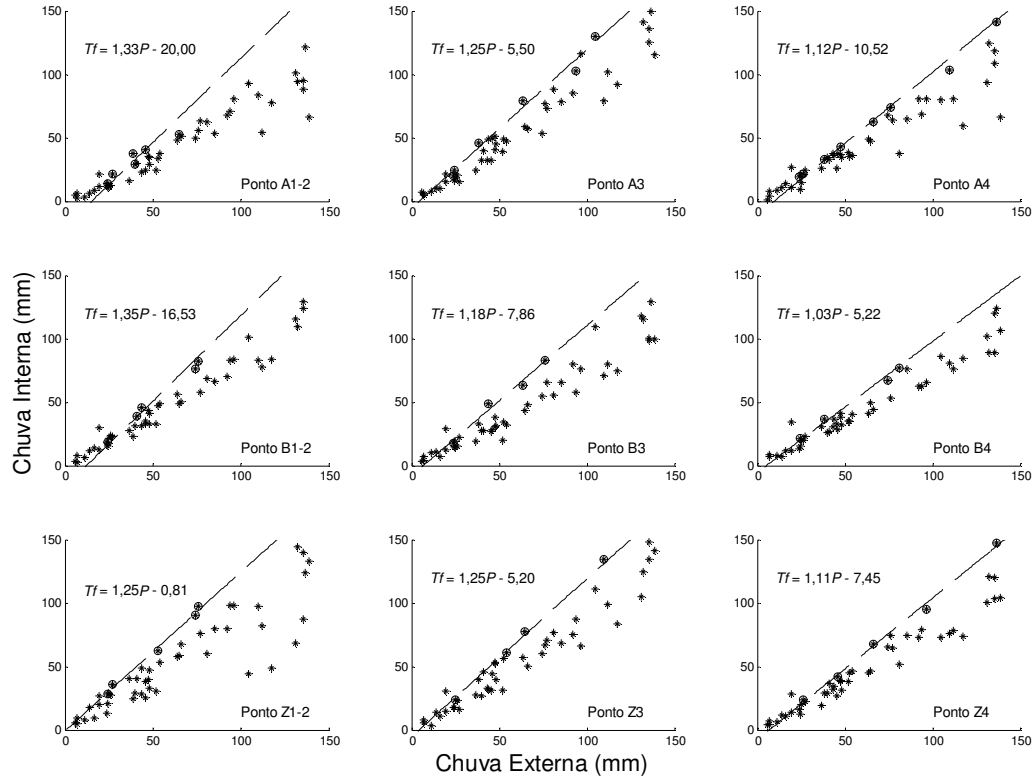


Figura 4-6 Relação entre chuva externa e chuva interna de cada período para o cálculo da capacidade de armazenamento. Os pontos com círculos foram utilizados para a curva envoltória.

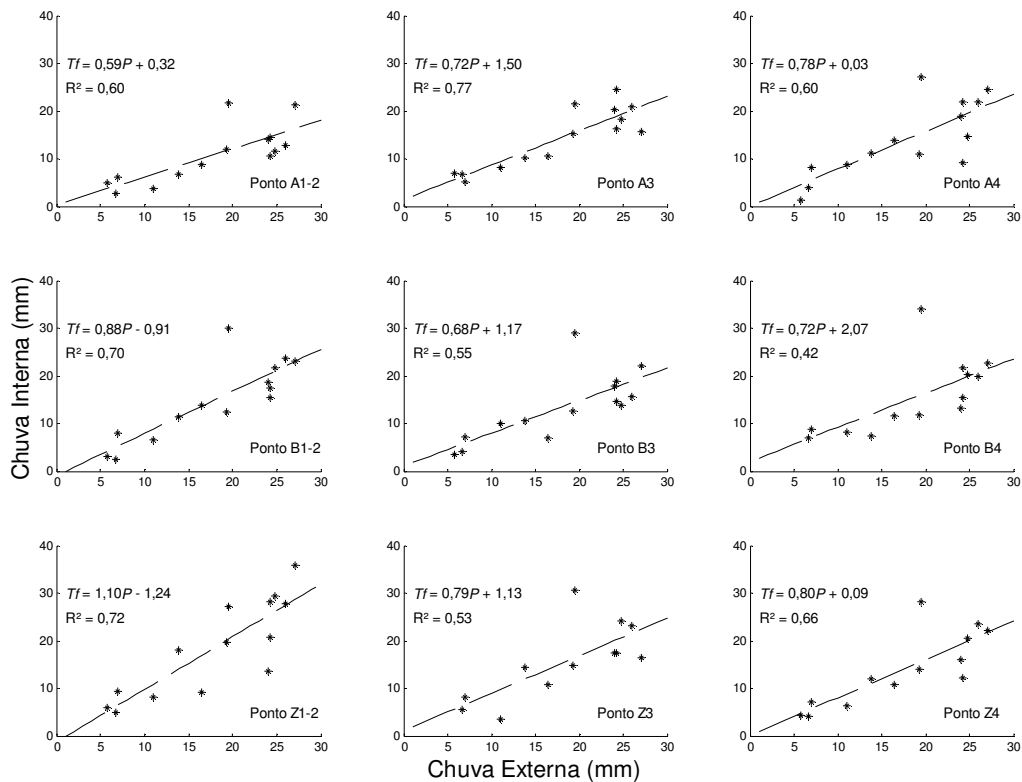


Figura 4-7 Pontos de inflexão (<30mm) da relação entre chuva externa e chuva interna de cada período para o cálculo do coeficiente de chuva interna livre.

No cálculo da capacidade de armazenamento da copa (S_c) utilizando os dados de monitoramento com pluviômetro (por período), os valores de S_c ficaram muito elevados, sendo obtido um valor máximo de 20 mm. Por este motivo, foi necessário repartir o total de chuva interna registrado em cada período entre os eventos nele contidos, para que cada ponto no gráfico de Tf em função de P representasse um evento, e não o total associado a um período.

Para cada evento, foi calculada a proporção do total de chuva externa do evento (obtido a partir do monitoramento automático com pluviógrafo) em relação ao total de chuva externa do período:

$$F_{P_{evento}} = \frac{\sum P_{evento}}{P_{periodo}} \quad (38)$$

onde $F_{P_{evento}}$ é o fator de chuva externa para o cálculo da chuva interna em cada evento do período; P_{evento} é o total de chuva externa do evento obtido por meio do monitoramento automático com pluviógrafo (mm); e $P_{periodo}$ é o total de chuva externa do período em que o evento se encontra (mm).

A chuva interna para cada evento foi então calculada conforme equação abaixo:

$$Tf_{evento} = F_{P_{evento}} \times Tf_{periodo} \quad (39)$$

sendo Tf_{evento} é a chuva interna estimada para o evento (mm); e $Tf_{periodo}$ é o total de chuva interna do período obtido a partir do monitoramento com os pluviômetros (mm).

Nas Figura 4-8 e Figura 4-9 são apresentados os gráficos com os dados divididos por evento (6 horas sem chuva) para a obtenção dos valores de S_c e p . A capacidade de armazenamento variou de 0,04 a 2,94 mm e o coeficiente de chuva interna livre de 0,74 a 0,94 e

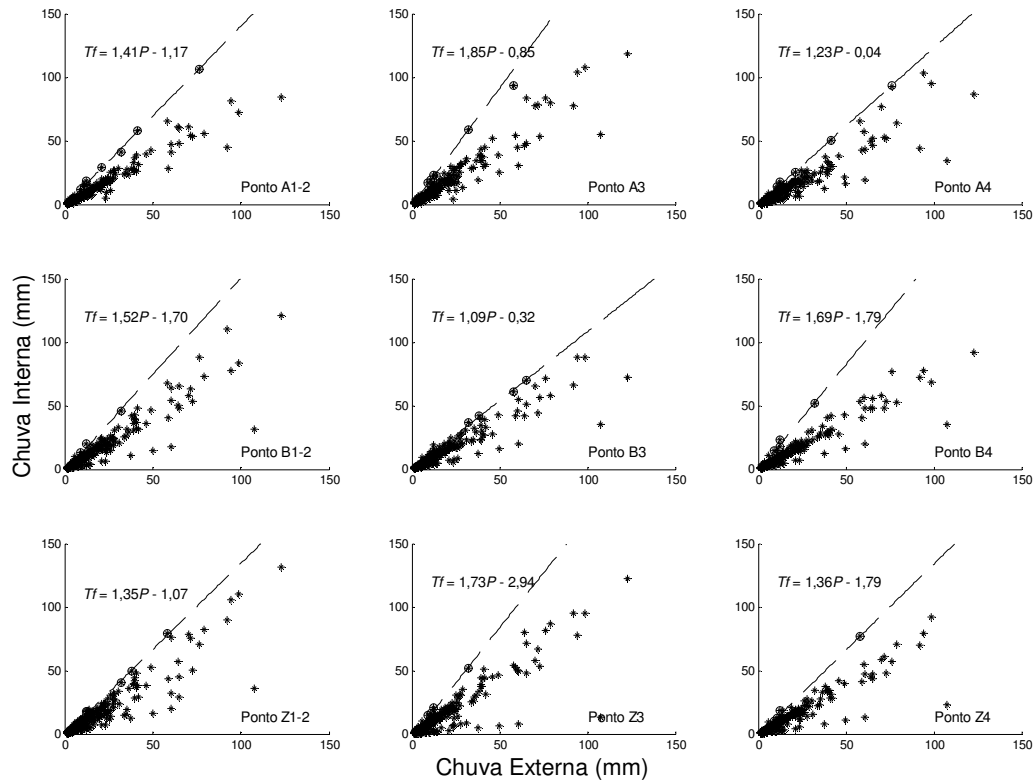


Figura 4-8 Relação entre chuva interna (T_f) e chuva externa (P) de cada evento para o cálculo da capacidade de armazenamento da copa (S_c). Os pontos com círculos foram os pontos utilizados na curva envoltória.

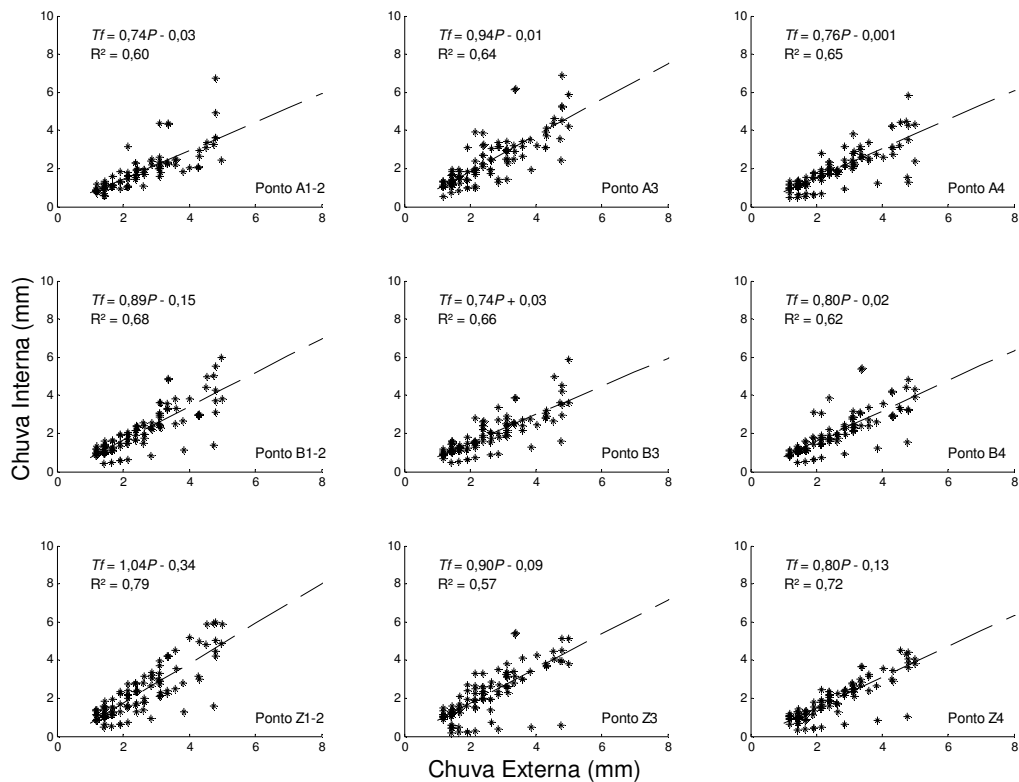


Figura 4-9 Relação da chuva interna (Tf) e chuva externa (P) considerando o ponto de inflexão (<5mm) da relação entre chuva externa e chuva interna para o cálculo do coeficiente de chuva interna livre.

Na Tabela 4-2 são apresentados os valores de capacidade de armazenamento da copa (S_c) e o coeficiente livre de chuva interna (p) obtidos com os dados divididos em períodos e por eventos. Observa-se que não foi possível calcular o p no ponto Z1-2, porque o ângulo da regressão da equação foi acima de 1, e o coeficiente varia de 0 a 1.

Tabela 4-2 Capacidade de armazenamento da copa (S_c) e o coeficiente livre de chuva interna (p) para cada local e separação de monitoramento.

Monitoramento		A1-2	A3	A4	B1-2	B3	B4	Z1-2	Z3	Z4
Período	S_c (mm)	20,0	5,5	10,5	16,5	7,9	5,2	0,8	5,2	7,5
	p	0,59	0,72	0,78	0,88	0,68	0,72	*	0,79	0,80
Evento	S_c (mm)	1,17	0,85	0,04	1,7	0,32	1,79	1,07	2,94	1,79
	p	0,74	0,94	0,76	0,89	0,74	0,8	*	0,9	0,80

* não foi possível estimar

Na análise dos eventos da chuva interna e chuva externa observou que somente no evento 46 a relação entre chuva interna e chuva externa ficou acima da relação de 1:1 (Figura 4-10). Esse evento teve mais chuva interna do que chuva externa, talvez devido ao efeito de afunilamento ou gotejamento da copa.

Para tentar explicar o comportamento distinto da chuva interna entre os pontos de monitoramento, foram realizadas comparações entre os percentuais de chuva interna e o coeficiente de chuva interna (Figura 4 11). Entretanto essas duas variáveis não apresentaram correlação linear.

Na Figura 4-12 é apresentado o box-plot entre o volume de escoamento pelo tronco por árvore. Observa-se que o tronco 28 se destaca com os maiores valores de volume. Também são apresentadas as relações entre o volume de escoamento pelo tronco com uma das características das árvores (área da copa). No período monitorado os volumes de escoamento pelo tronco tenderam a crescer com o aumento do diâmetro do tronco e da área da copa.

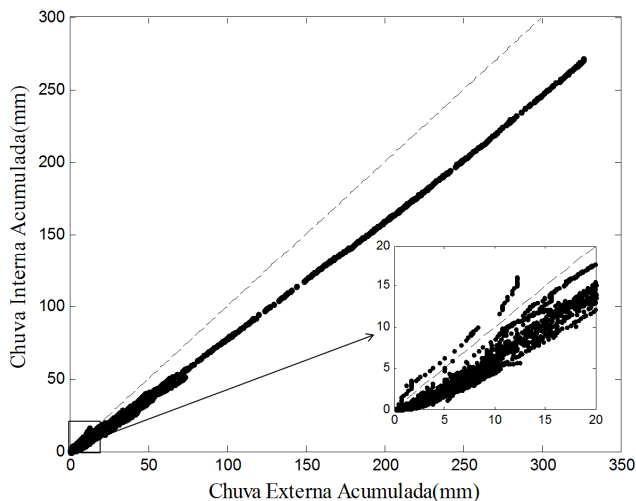


Figura 4-10 Gráficos dos valores de chuva externa acumulada com a chuva interna acumulada, separados por eventos.

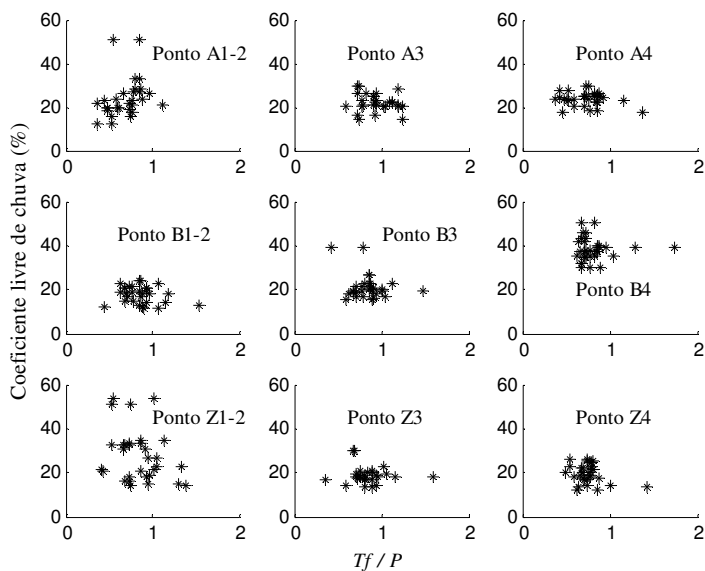


Figura 4-11 Relação entre chuva interna por chuva externa (Tf/P) e o coeficiente de chuva interna livre (p).

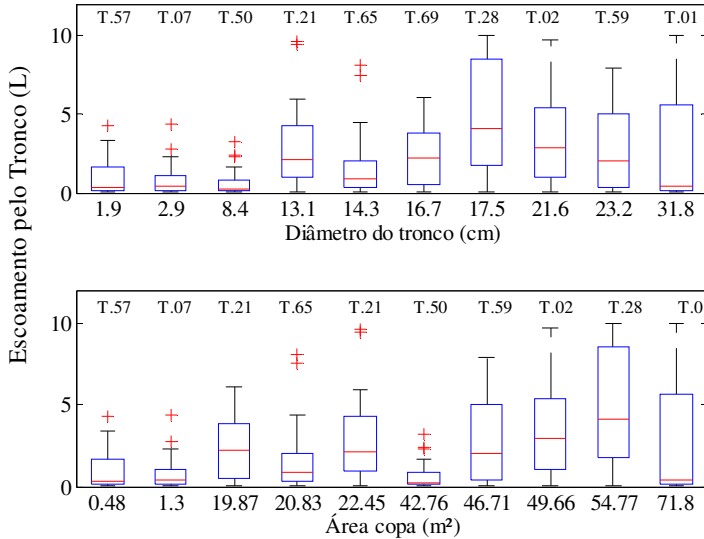


Figura 4-12 Distribuição dos volumes de escoamento pelo tronco por árvore e relação dos volumes de escoamento pelo tronco por diâmetro na altura do peito.

Para estimar a produção de escoamento pelo tronco na bacia a partir das medidas de volume de escoamento pelo tronco nas árvores, foram utilizados os dois métodos (Equações (35) e (36)). Os resultados das alturas de escoamento pelo tronco são apresentados na Figura 4-13.

Observa-se que as árvores 57 e 07 obtiveram os maiores valores de altura do escoamento pelo tronco, isso ocorreu porque a área da copa destas árvores é muito menor que a área total das copas das árvores que fazem interseção com suas copas. Portanto os valores de escoamento pelo tronco da árvore 57 e 07 foram descartados.

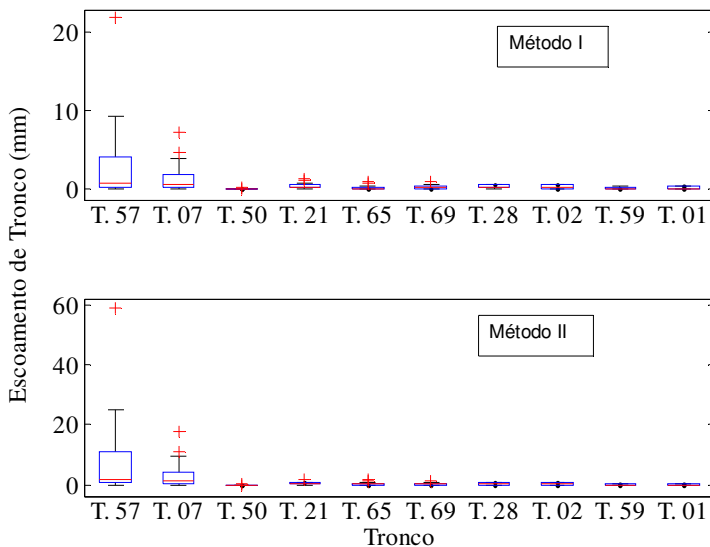


Figura 4-13 Distribuição das alturas de escoamento pelo tronco por árvore para cada método.

A Figura 4-14 apresenta os gráficos da relação entre escoamento pelo tronco com a chuva externa de cada árvore, que serve para a obtenção do valor de S_r . O maior valor obtido foi para a árvore 57 com capacidade de armazenamento no tronco de 0,28 mm.

A Figura 4-15 apresenta o gráfico para a obtenção do valor de S_r (0,08 mm) pelo oposto do coeficiente linear da reta de regressão entre os dados de escoamento pelo tronco e da chuva externa medida do monitoramento automatizado.

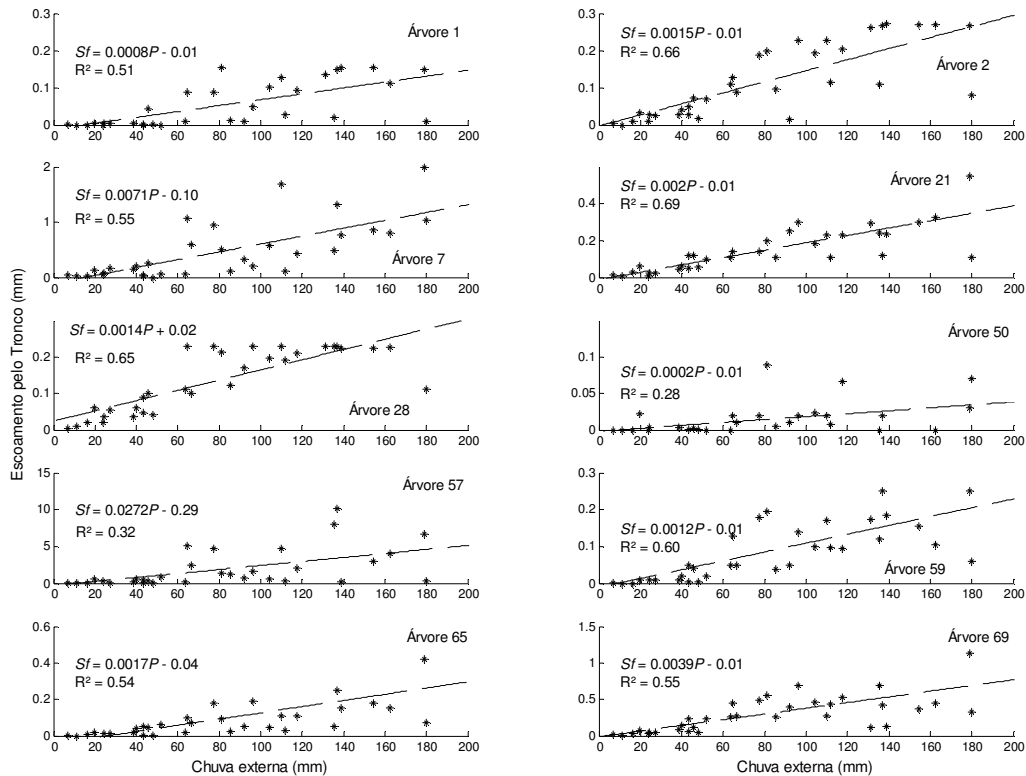


Figura 4-14 Relação do escoamento pelo tronco com a chuva externa para cada ponto.

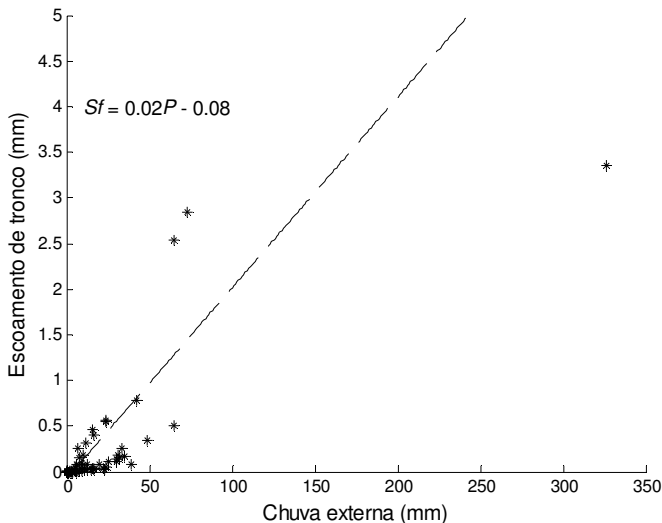


Figura 4-15 Relação entre escoamento pelo tronco e chuva externa do monitoramento automatizado.

O cálculo da proporção de água desviada da copa para o tronco (p_d) foi determinado pela inclinação da reta de regressão da relação entre escoamento pelo tronco e a precipitação interna descontada de precipitação na parte descoberta ($Tf - (1-c)P$), esse método foi proposto por Valente et al. (1997). Conforme a Figura 4-16 foi calculado o p_d utilizando a proporção de cobertura florestal (c) pelo método da regressão entre chuva interna e chuva externa (0,37) e também foi utilizando o c estimado pela média das fotos de cobertura do dossel (0,80), conforme demonstrado na Figura 4-4.

Na análise dos eventos do escoamento pelo tronco e a chuva externa (Figura 4-17) observou que entre os eventos obtiveram uma variação muito grande, essas variações pode ser devido as variáveis meteorológicas, incluindo a quantidade de chuva, duração e intensidade, período seco antecedente, tempo entre eventos, ciclos de umedecimento, secagem e velocidade média do vento.

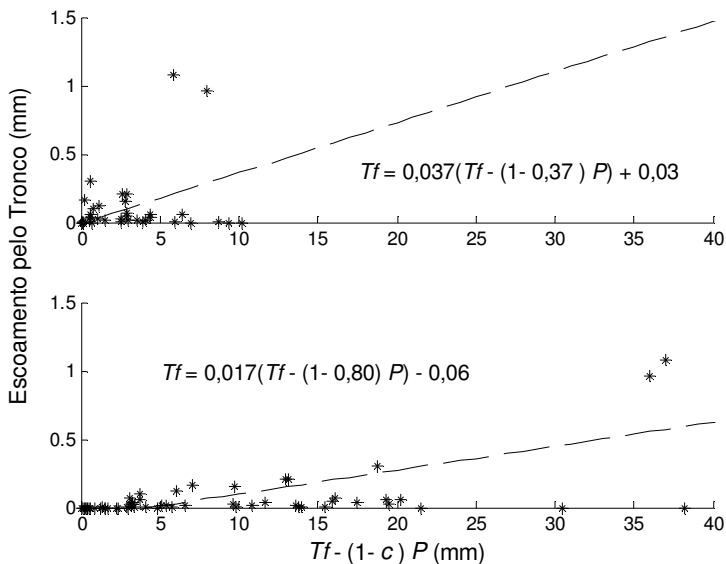


Figura 4-16 Relação entre escoamento pelo tronco e precipitação interna descontada de precipitação na parte descoberta ($Tf - (1-c)P$)

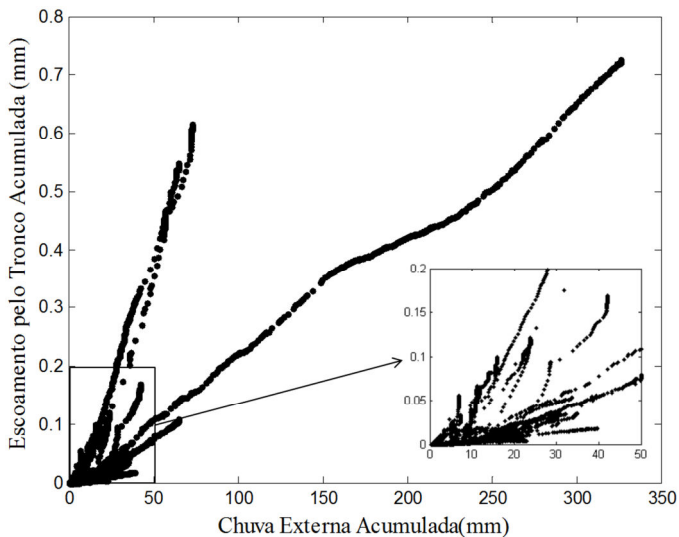


Figura 4-17 Gráficos dos valores de chuva externa acumulada com o escoamento pelo tronco acumulada, separados por eventos.

4.2 Análise da cobertura florestal

O índice de cobertura do dossel (ICD) médio foi de 75%. O ICD do ponto B4 é muito diferente dos outros pontos (Figura 4-18). Este ponto está localizado numa região mais plana da bacia, próximo ao topo, onde as árvores são mais esparsas em relação aos outros pontos de monitoramento. Essa observação também foi realizada por Giglio (2013).

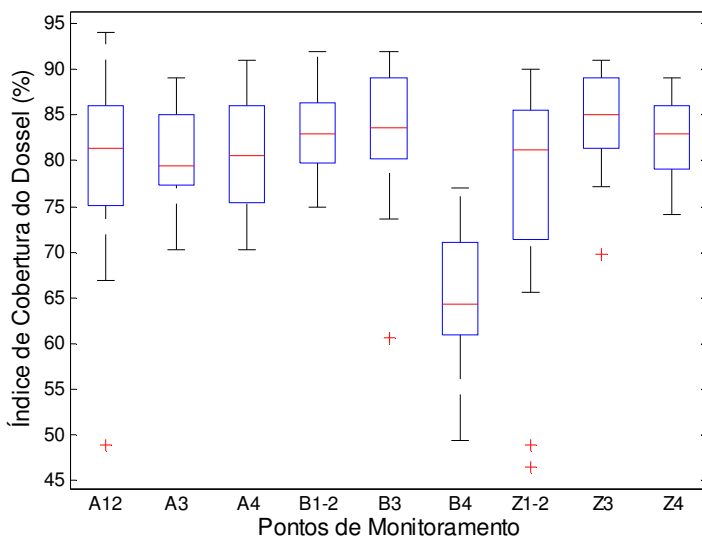


Figura 4-18 Distribuição dos ICD por ponto de monitoramento. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os *outliers* são exibidos com um sinal vermelho +.

4.3 Análise das perdas e dos parâmetros de interceptação

Os valores totais de P , Tf e I dos pluviômetros encontram-se na Tabela 4-3. A Figura 4-19 mostra a relação entre $I\%$ e a chuva externa total de cada ponto monitorado com pluviômetro. A chuva externa foi de 5.310 mm e o escoamento pelo tronco foi de 437 mm.

O cálculo da perda por interceptação utilizando os dados automatizados da calha e do escoamento pelo tronco foi realizado entre 26/02/2014 e 06/10/2014 (Figura 4-20). O monitoramento automático resultou em 62.212 dados de chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelo tronco (Sf). Os valores totais encontram-se na Tabela 4-3.

Tabela 4-3 Valores de chuva interna e perda por interceptação da copa.

Ponto de monitoramento	Chuva Interna		Perda por Interceptação	
	mm	%	mm	%
A1-2	3.221	61	1.652	31
A3	4.237	80	636	12
A4	3.831	72	1.042	20
B1-2	3.789	71	1.084	21
B3	3.780	71	1.093	21
B4	3.784	71	1.089	21
Z1-2	4.388	83	485	9
Z3	4.157	78	716	14
Z4	3.714	70	1.159	22

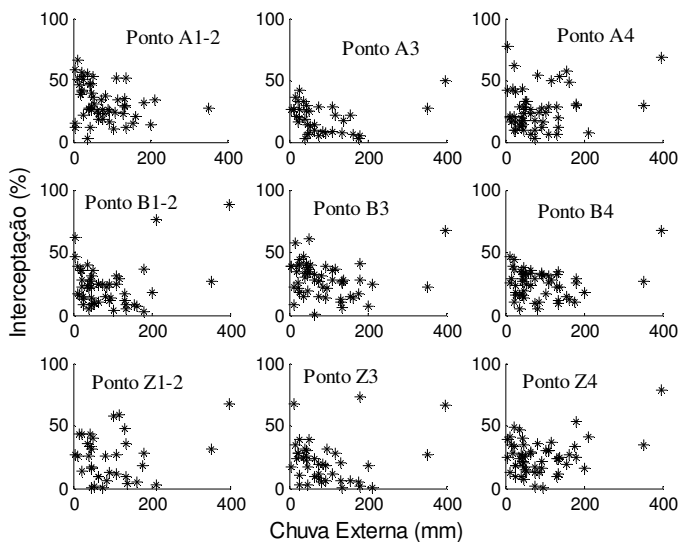


Figura 4-19 Relação entre a perda por interceptação relativa ao total da chuva externa e chuva externa para cada período.

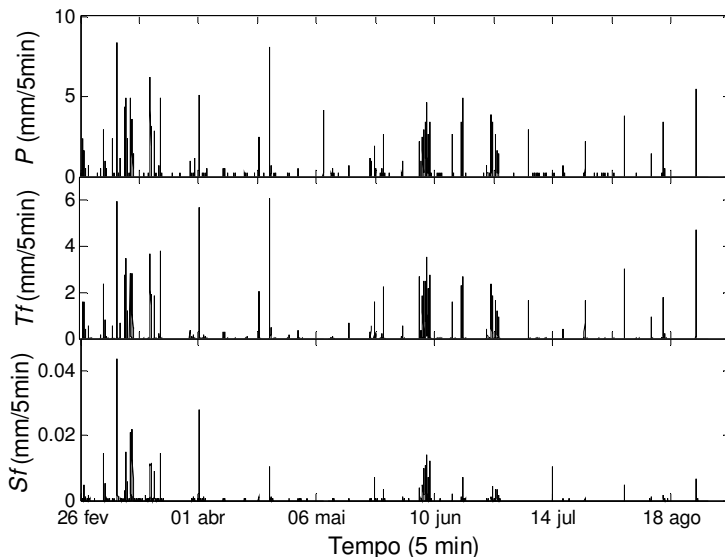


Figura 4-20 Série de dados monitorados automatizados da chuva externa (P), chuva interna (Tf) e escoamento pelo tronco (Sf)

Tabela 4-4 Valores de chuva externa, chuva interna, escoamento pelo tronco e perda por interceptação.

Chuva Externa		Chuva Interna		Escoamento pelo Tronco		Perda por Interceptação	
mm	%	mm	%	mm	%	mm	%
1.303	100	981	75	19	2	303	23

Foram identificados 60 eventos (Figura 4-21), considerando que cada evento tem início com registro de precipitação e final marcado pela ocorrência de pelo menos 6 horas sem registro de P . O maior volume registrado de P foi 326 mm (evento n°35), que teve também o maior volume de Sf , 271 mm. A máxima intensidade de P , Tf e Sf registrada foi de 8,37 mm/5min, 6,10 mm/5min e 0,25 mm/5min, respectivamente (Figura 4-22).

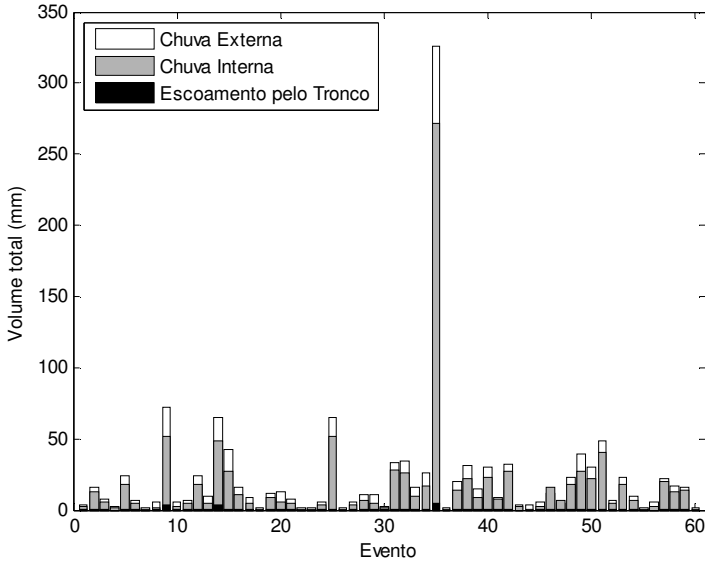


Figura 4-21 Volumes totais de escoamento pelo tronco (S_f), chuva interna (T_f) e chuva externa (P) registrados em cada um dos 60 eventos.

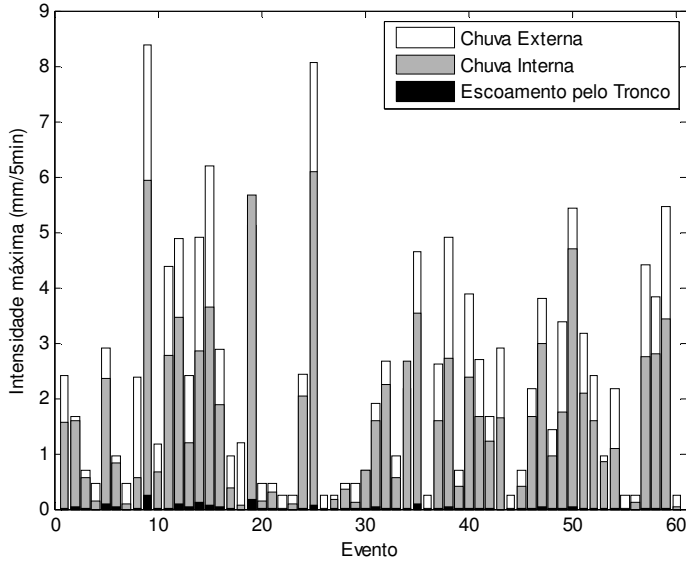


Figura 4-22 Intensidade máxima registrada de chuva externa (P), chuva interna (T_f) e escoamento pelo tronco (S_f).

4.4 Análise da distribuição espacial da chuva interna

O período de monitoramento da análise espacial foi de 08 de maio de 2014 até 11 de novembro de 2014, com um total de 10 períodos de monitoramento de chuva externa e chuva interna.

A quantidade de total chuva externa (P) foi de 850 milímetros. Em muitos casos a chuva interna (Tf) foi maior que a chuva externa, variando de 0 a 171,6 mm. Os Índices de Cobertura do Dossel (ICD) variaram de 68 a 88 %.

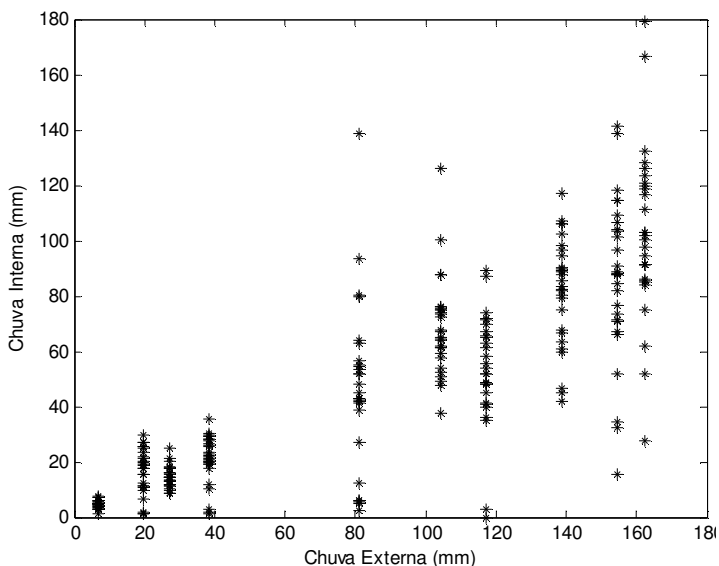


Figura 4-23 Relação entre a chuva externa (P) e chuva interna (Tf).

A Figura 4-24 e Figura 4-25 mostra o gráfico de *boxplot* onde se visualiza mais claramente a variação do ICD e da Tf entre os pontos de monitoramento. O ponto 4-2 e 4-6 foram os pontos que mais obtiveram a chuva interna maior que a chuva externa.

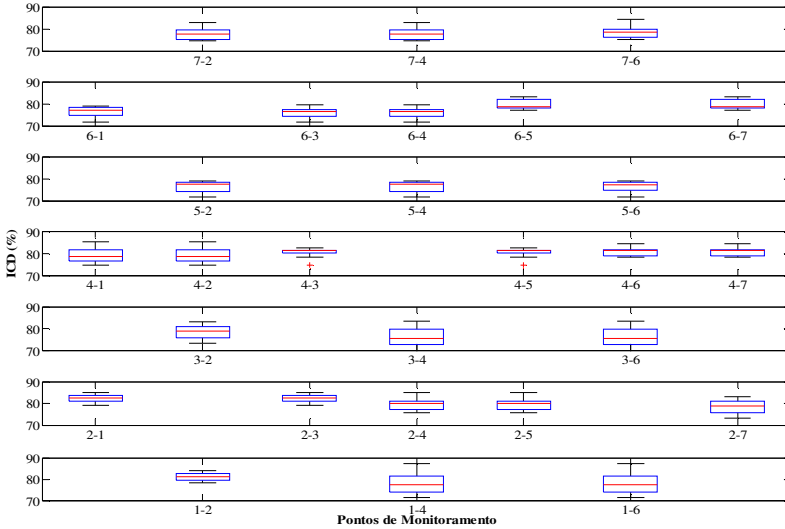


Figura 4-24 *Boxplot* do Índice da Cobertura do Dossel. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os outliers são exibidos com um sinal vermelho +.

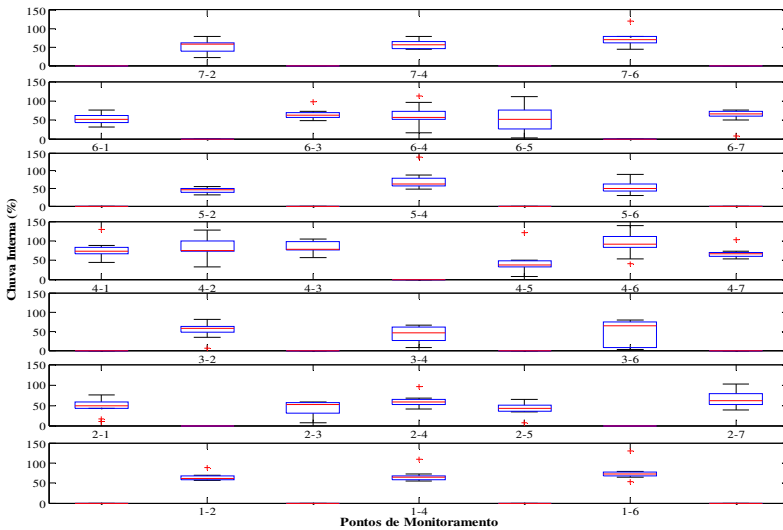


Figura 4-25 *Boxplot* da Chuva Interna. Topo e o fundo da caixa azul representam 25 e 75% da amostra, a linha vermelha de cada caixa representa a mediana, os outliers são exibidos com um sinal vermelho +.

Como pode ser observado na Figura 4-26, houve uma relação linear significativa entre a chuva externa e a média de chuva interna medida nos 28 coletores ($R^2 = 0,96$).

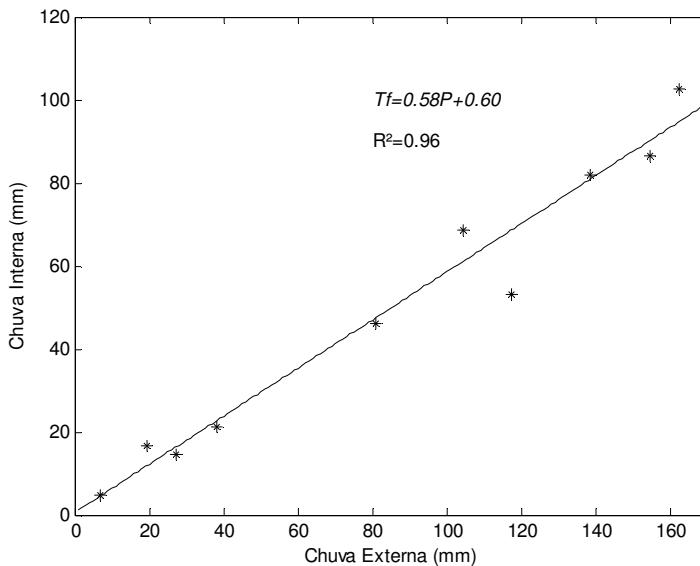


Figura 4-26 Relação da regressão entre a chuva externa e chuva interna que foi baseada em valores médios de 28 pluviômetros.

Os padrões de distribuição espacial também mostraram que o ICD e a chuva interna têm uma distribuição desigual dentro da parcela.

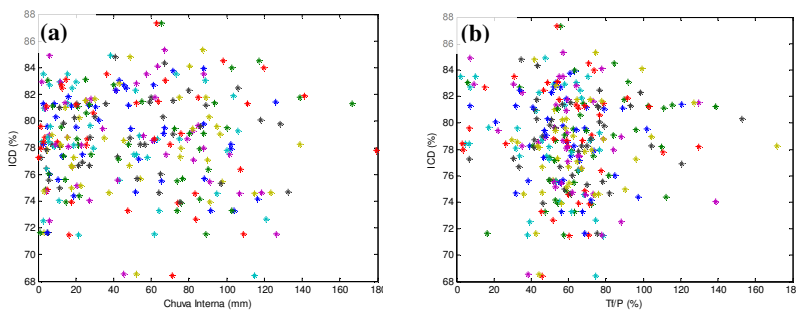


Figura 4-27 Relação entre ICD e Tf (a) ICD e chuva interna (mm) e (b) ICD e a porcentagem da Tf por P . As cores representam cada ponto de monitoramento. Simbologia cores diferentes

A distribuição espacial da Tf não é homogênea e típica para os 10 eventos de chuva de diferentes magnitudes (Figura 7-1 a Figura 7-5). A inspeção das figuras indica que a distribuição espacial é heterogênea, mas o padrão de distribuição parece ser invariante com grande precipitação. No entanto, não foi possível encontrar qualquer relação com o ICD (Figura 4-27).

Acima do pluviômetro que recebeu consistentemente muito mais água do que a média de chuva não interceptada observou-se um ramo com curva descendente que atuou efetivamente como um funil, e foi o fator que levou aos altos valores de Tf coletados. Este tipo de característica do dossel não é fácil de parametrizar mas pode afetar fortemente a distribuição espacial da chuva interna.

Os resultados indicam que a distribuição de chuva interna não é homogênea, sua variação espacial não está ligada ao índice de abertura do dossel, e há variáveis estruturais de pequena escala indefinidas no dossel, conforme a Figura 4-28.

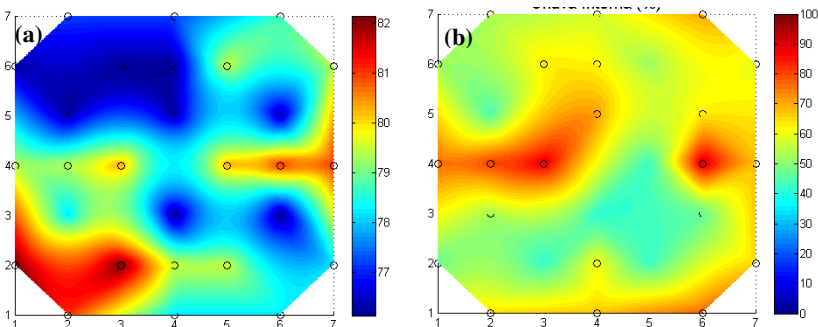


Figura 4-28 Interpolação: (a) Média do índice de abertura do dossel; e (b) média da Chuva Interna.

4.5 Modelagem da Interceptação

4.5.1 Cálculo da Evapotranspiração Potencial

Na estação meteorológica do rio Feio a temperatura média registrada foi de 16,8 °C, a mínima foi de 5,6 °C e a máxima até 12/10/2014 foi de 23,9 °C. A evapotranspiração potencial diária foi calculada com o método de Penman modificado. A média da série calculada foi de 1,09 mm/dia. Verifica-se que entre 07 de abril e 05 de agosto a evapotranspiração foi menor, já que nesse período estão compreendidos os meses mais frios do ano (Figura 4-29).

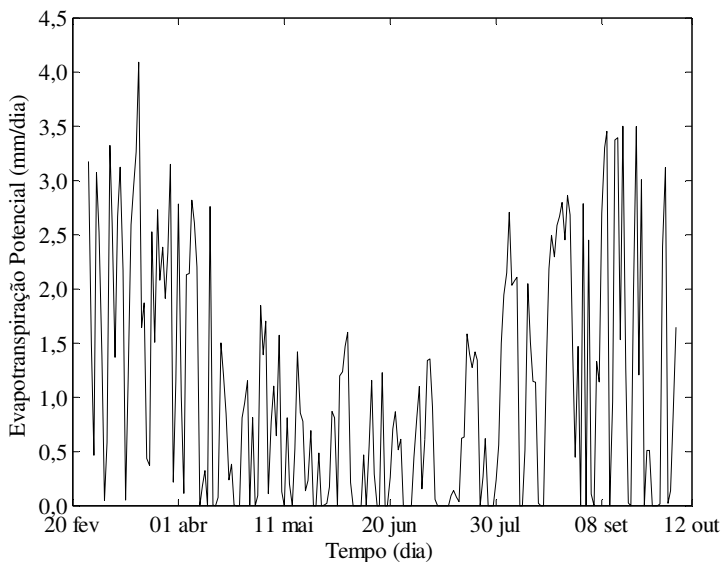


Figura 4-29 Evapotranspiração potencial diária calculada com o método de Penman modificado.

4.5.2 Intercepção

Os valores calculados para os parâmetros dos modelos encontram-se na Tabela 4-5. A proporção da taxa de evaporação pelo tronco em relação à taxa de evaporação de copa (ϵ) foi estipulada como sendo 0,10 (Chaffe et al., 2010). Foram realizadas 16 simulações com cada modelo para verificar o erro relativo de cada uma das combinações.

Tabela 4-5 Parâmetros estimados do modelo de intercepção de Gash. Proporção de cobertura florestal (c), capacidade de armazenamento da copa (S_c), capacidade de armazenamento do tronco (S_t) e proporção desviada da copa para o tronco (p_d).

Parâmetros				
c	S_c	S_t	p_d	ϵ
-	[mm]	[mm]	-	-
0,80 ¹	1,17 ²	0,08 ³	0,04 ⁵	0,10
0,37 ²	1,30 ⁴	0,06 ⁵	0,02 ⁵	-

¹ Obtido pela média das fotos da copa (Figura 4-18)

² Obtido através da regressão (Figura 4-5)

³ Obtido através da regressão (Figura 4-15)

⁴ Obtidos pela média dos evento (Tabela 4-2)

⁵ Obtidos através da regressão (Figura 4-16)

Após a simulação com as diferentes combinações foram feitas 10.000 simulações variando os valores dos parâmetros de entrada dos modelos para encontrar o menor erro relativo. Os intervalos dos parâmetros utilizados encontram-se na Tabela 4-6.

Tabela 4-6 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) e proporção desviada da copa para o tronco (p_d).

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

As simulações resultaram em um erro muito elevado, isso pode ser justificado porque o modelo não conseguiu estimar adequadamente a perda por interceptação no evento n° 57, que foi um evento muito grande, tendo uma chuva externa de 326 mm. Outro motivo foi a entrada dos dados de escoamento pelo tronco, que ficaram muito abaixo em relação ao encontrado. em outros trabalhos de interceptação

A Figura 4-30 mostra a série de dados observados de chuva externa e a série observada e simulada de chuva interna e escoamento pelo tronco. As intensidades simuladas na chuva interna algumas vezes ultrapassaram a intensidade observada. Os resultados simulados de escoamento pelo tronco em toda a simulação foram maiores que os dados monitorados.

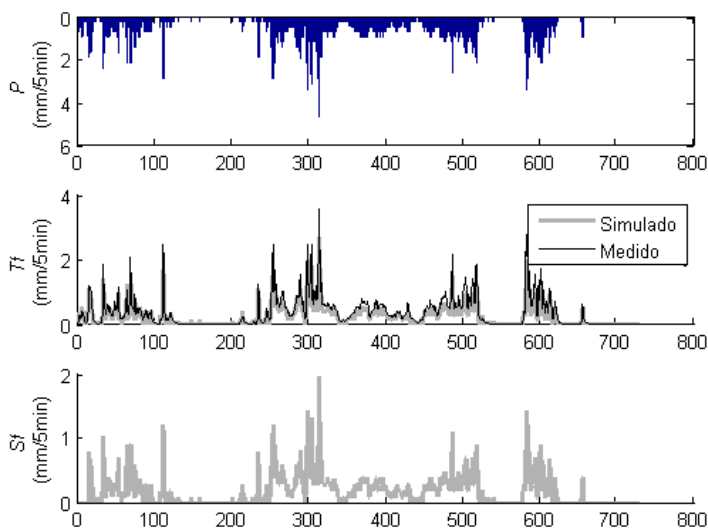


Figura 4-30 Simulação do modelo de Rutter de chuva interna (Tf) e escoamento pelo tronco (Sf).

A combinação do modelo de Rutter calibrado foi a única simulação que superestimou a perda por interceptação acumulada. A Tabela

4-7 é apresentada os valores de entrada onde se resultaram em um erro relativo da perda por interceptação dos parâmetros monitorados e calibrados de cada modelo.

Tabela 4-7 Entrada dos parâmetros que obtiveram o menor erro relativo da perda por interceptação (*I*).

	Parâmetros					Erro relativo	
	<i>c</i> -	<i>S_c</i> [mm]	<i>St</i> [mm]	<i>p_d</i> -	<i>ε</i> -	<i>Gash</i> (%)	<i>Rutter</i> (%)
Monitorado	0,37	1,17	0,08	0,20	0,10	81,6	9,7
Rutter calibrado	0,65	3,17	1,37	0,56	0,18	58,2	4,2
Gash calibrado	0,88	3,65	2,87	0,54	0,05	28,4	14,8

O erro relativo variou de 2 a 400% com o modelo de Rutter e de 0 a 350% com o modelo de Gash (Figura 4-31). Para os dois modelos empregados neste estudo, os resultados das simulações utilizando os valores dos parâmetros calibrados tiveram pequena variação em relação aos resultados das simulações realizadas com os parâmetros estimados empiricamente. Em $P < 50$ mm obteve-se mais valores de erro com o modelo de Gash acima de 100%, mas os maiores valores foram com o modelo de Rutter (100%).

Na simulação com os modelos de Rutter e de Gash utilizando os valores dos parâmetros encontrados empiricamente, o modelo de Gash subestimou a *I* acumulada e a simulação com o modelo de Rutter foi a que mais se aproximou dos dados monitorados, também foi a simulação que superestimou a *I* acumulada comparando a estimativa realizada a partir dos valores monitorados. Nesse período o modelo de Rutter foi mais coerente com os dados observados do que o modelo de Gash (Figura 4-32).

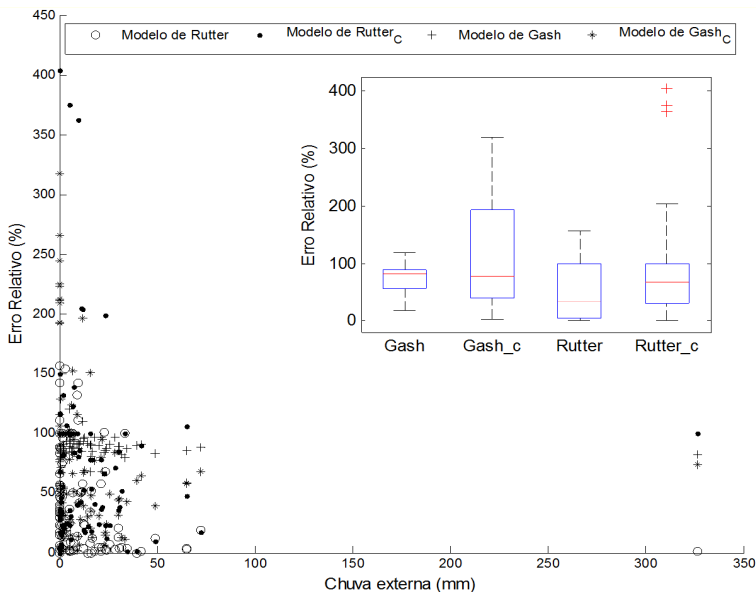


Figura 4-31 Erros relativos para cada evento dos modelos de Gash e de Rutter e o boxplot do erro relativo.

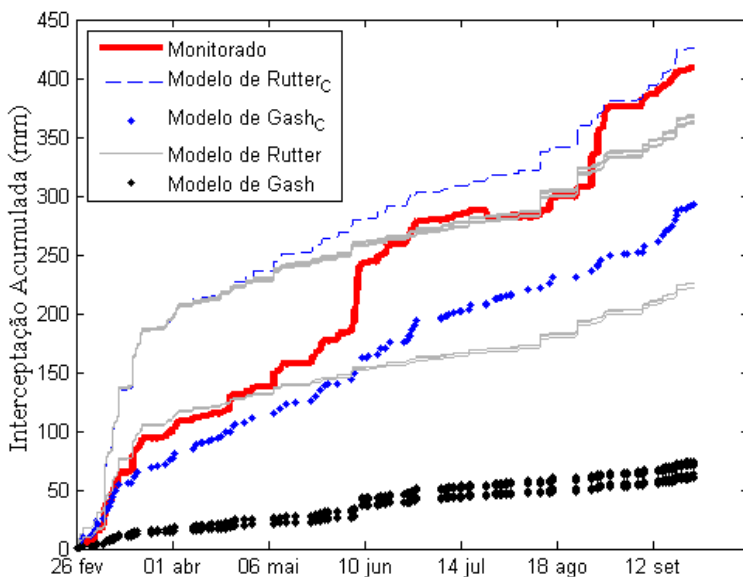


Figura 4-32 Gráfico entre a perda por intercepção (I) estimado e medido acumulado entre os modelos calibrados.

O conjunto de dados medidos e estimados com as saídas dos modelos têm erros associados. Segundo Lloyd et al. (1988) os erros nos modelos são resultados de erros inerentes à descrição física desses modelos, junto com incertezas nas medidas dos parâmetros e das variáveis.

O monitoramento e as estimativas das perdas por interceptação estão decisivamente sujeitas a erros relativos. Isto é reforçado pelo problema de amostragem da chuva interna e escoamento pelo tronco em florestas mistas, que são mais variáveis do que em florestas temperadas.

5 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho monitorou e estimou o processo de interceptação em uma bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista. Foi instalado um sistema de monitoramento de chuva externa, chuva interna, escoamento pelo tronco e cobertura florestal com intuito de estudar o processo de interceptação.

Também foi instalado um sistema automatizado utilizando calhas e pluviógrafos para analisar o processo de interceptação na mesma escala temporal e para fazer a análise comparativa entre os modelos de Rutter e de Gash na estimativa da I na bacia Araponga.

O índice de cobertura do dossel (ICD) foi monitorado em 38 pontos dentro da bacia, através de fotografias, variando de 45 a 94%, enquanto, que na análise espacial o ICD variou de 68 a 88 %. Na média, os dois monitoramentos foi de 80%.

A chuva interna (Tf) total variou de 3.221 a 4.388 mm, ou 61 a 83% da chuva externa, o que demonstra que a Tf é bastante heterogênea em bacia coberta por Floresta Ombrófila Mista. A análise entre a P e Tf ressalta que a dispersão entre os pontos internos aumenta com o aumento da P .

Tanto no monitoramento na bacia quanto na distribuição espacial o índice de cobertura do dossel (ICD) e a chuva interna têm uma distribuição desigual, não apresentando correlação entre as variáveis.

Os dados provenientes do monitoramento por período resultaram em uma estimativa da capacidade de armazenamento (S) variando de 0,8 a 20,0 mm. Como estes valores são muito elevados, foi necessário repartir o total de chuva interna registrado em cada período entre os eventos nele contidos, para que cada ponto no gráfico de Tf em função de P representasse um evento, e não o total associado a um período. Com este procedimento, a capacidade de armazenamento variou de 0,04 a 2,94 mm com média de 1,30

mm, valor próximo da estimativa de S (1,17 mm) realizada a partir dos dados de monitoramento pela calha.

A perda por interceptação calculada utilizando os dados automatizados da calha e do escoamento pelo tronco no período entre 26/02/2014 e 06/10/2014 foi de 303 mm (23%). Distribuídos em 60 eventos a chuva externa foi de 1.303 mm, a chuva interna e escoamento pelo tronco corresponderam a 75% (981 mm) e 2 % (19 mm) da chuva externa. A máxima intensidade de P , Tf e Sf registrados foram de 8,37 mm/5min, 6,10 mm/5min e 0,25 mm/5min, respectivamente.

Na análise comparativa entre os modelos de Rutter e de Gash para a estimativa da perda por interceptação (I), foi constatado que o modelo de Gash superestimou a I acumulada enquanto que a simulação com o modelo de Rutter a subestimou. Os resultados obtidos com o modelo de Rutter foram os que mais se aproximaram dos dados monitorados obtendo os menores valores do erro relativo.

A estimativa do escoamento pelo tronco ainda tem uma incerteza elevada, associada à dificuldade em medir e estimar características (DAP e tamanho da copa) e estruturas (espessura do tronco) diferentes para cada árvore. Recomenda-se que o monitoramento seja realizado em árvores de mesma espécie mas de forma separada, e se possível com DAPs e tamanho de copa diferentes.

Devem ser investigados os efeitos da perda por interceptação do chão da floresta, pois é uma parte do processo de interceptação que em Florestas Ombrófila Mista ainda não foi estudado.

A estimativa da evapotranspiração dentro e fora da floresta foi bastante limitada. Recomenda-se que instalem estações meteorológicas dentro e fora da bacia, com monitoramento da evapotranspiração para que a estimativa fique mais confiável.

Os modelos de perda por interceptação utilizados nesse trabalho tiveram como limitação a representação não adequada do processo de interceptação em eventos extremos, portanto, sugere-se uma investigação mais detalhada do processo nessas situações.

6 REFERÊNCIAS

ANDRÉ, F.; JONARD, M.; PONETTE, Q. Precipitation water storage capacity in a temperate mixed oak–beech canopy. *Hydrol. Process.* v.22, p. 4130–4141, 2008.

ARCOVA, F.C.S.; CICCO, V. Fluxo de nutrientes através da precipitação, precipitação interna e escoamento pelo tronco em floresta natural secundária no Parque Estadual da Serra do Mar – Núcleo Cunha-SP. *Bol. Técn. IF. São Paulo*, v.41, n.1, p.37–58, 1987.

ARCOVA, F.C.S.; CICCO, V.; ROCHA, P.A.B. Chuva 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.

AUSSENAC, G. Action du couvert forestier sur la distribution au sol des précipitations. *Ann. Forest Sci.* v. 27 (4), p. 383–399., 1970.

BOUTEN, W.; HEIMOVAARA, T.J.; TIKTAK, A. Spatial patterns of throughfall and soil water dynamics in a Douglas fir stand. *Water Resour. Res.* v. 28, p. 3227–3233, 1992.

BREUER L.; ECKHARDT K.; FREDE H-G. Plant parameter values for models in temperate climates. *Ecological Modelling* 169(2–3): 237—293, 2003.

BRUIJNZEEL, L.A. EUGSTER, W. BURKARD, R. Fog as a hydrologic input. In: Anderson MG (ed.) Encyclopedia of Hydrological Sciences, pp. 559--582. Chichester: Wiley 2005.

BRUTSAERT, W. Hydrology: An Introduction. Cambridge University Press, New York. 605 pp, 2005.

BRYANT ML, BHAT S., JACOBS, JM. Measurements and modeling of throughfall variability for five forest communities in the southeastern US. Journal of Hydrology 312: 95-108, 2005.

CALDER, I. A stochastic model of rainfall interception. Journal of Hydrology, v. 89, p. 65--71. 1986.

CALDER, I. Dependence of rainfall interception on drop size: 1. Development of the two-layer stochastic model. Journal of Hydrology, v. 185, p. 363--378, 1996.

CARLYLE-MOSES, D.; PRICE, A. An evaluation of the Gash interception model in a northern hardwood stand. Journal of Hydrology, v. 214, p. 103--110, 1999.

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

CHAFFE, P.L.B.; KOBIYAMA, 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.

CICCO, V.; ARCOVA, F.C.S. Pesquisas em microbacias hidrográficas no Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, Cunha-SP. I - Quantidade de água. In: FÓRUM DE GEOBIOHIDROLOGIA, 1., 1998, Curitiba. Anais... Curitiba: Universidade Federal do Paraná, p.30–38, 1998.

CICCO, V.; ARCOVA, F.C.S.; RANZINI, M.; SANTOS, J.B.A.; FORTI, M.C. Recursos hídricos na Mata Atlântica: estudo de caso do Laboratório de Hidrologia Florestal Walter Emmerich, Cunha – SP. In: Seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico, 1., Taubaté, 2007. Anais.IPABHi, p.25–33, 2007.

CORTEZ, J. Field decomposition of leaf litters: relationships between decomposition rates and soil moisture, soil temperature and earthworm activity. Soil Biol. Biochem. v. 30, p. 783–793, 1998.

CROCKFORD, R.; RICHARDSON, D. Partitioning of rainfall into throughfall, stemflow and interception: effect of forest type, ground cover and climate. Hydrological Processes, v. 14, p. 2903–2920, 2000.

DAVID, J.; VALENTE, F.; GASH, J. Evaporation of intercepted rainfall. In: Anderson, M. (Ed.), Encyclopedia of Hydrological Sciences. John Wiley and Sons. Ltd., pp. 627–634 (Chapter 43), 2005.

DE GROEN MM; SAVENIJE H.H.G. A monthly interception equation based on the statistical characteristics of daily rainfall. *Water Resources Research* 42: W12417, 2006.

DEGUCHI, A.; HATTORI, S.; PARK, H.T. The influence of seasonal changes in canopy structure on interception loss: Application of the revised Gash Model. *J. hydrol.* 318, 80-102, 2006.

DINGMAN, S. *Physical Hydrology*. Prentice Hall, Upper Saddle River. 646 p. 2002.

ESCHNER, A.R. Interception and soil moisture distribution. In: Sopper, W.E., Lull, H.W. (Eds.), *Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology, August 29–September 10*. Pergamon Press, New York, pp. 191–200, 1967.

FALKENGREN-GRERUP, U. Effect of stemflow on beech forest soils and vegetation in Southern Sweden. *J. Appl. Ecol.* v. 26, p. 341–352, 1989.

FORD, E.D.; DEANS, J.D. The effects of canopy structure on stemflow, throughfall and interception loss in a young Sitka Spruce plantation. *J. Appl. Ecol.* v. 15, p. 905–917, 1978.

GASH, J. An analytical model of rainfall interception by forest. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, v. 105, p. 43–55, 1979.

GASH, J.; LLOYD, C.; LACHAUD, G. Estimating sparse forest rainfall interception with an analytical model. *Journal of Hydrology*, v. 170, p. 79–86, 1995.

GASH, J.; MORTON, A. Application of the Rutter model to the estimation of the interception loss from Thetford forest. *Journal of Hydrology*, v. 38, p. 49–58, 1978.

GASH, J.; WRIGHT, I.; LLOYD, C. Comparative estimates of interception loss from three coniferous forests in Great Britain. *Journal of Hydrology*, v. 48, p. 89–105, 1980.

GERRITS, A.M.J.; PFSTER, L.; SAVENIJE, H.H.G. Spatial and temporal variability of canopy and forest floor interception in a beech forest. *Hydrol. Process.* v. 24, p. 3011–3025, 2010.

GESPER, P.L.; HOLOWAYCHUCK, N. Effects of stemflow water on a Miami soil under a beech tree. I. Morphological and physical properties. *Soil Sci. Soc. Am. J.* v. 34, p. 779–786, 1970.

GIGLIO, J. N.; KOBİYAMA, M. Interceptação da chuva: uma revisão com ênfase no monitoramento em florestas brasileiras. *Rev. Bras. Recur. Híd.*, 2013.

GIGLIO, J. N. Interceptação da chuva em pequena bacia experimental coberto por floresta ombrófila mista. 2013. 178f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013.

HELVEY J.D. Interception by eastern white pine. *Water Resources Research*, 3, 723–729, 1967.

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.

HERBST, M.; ROSIER, P.; MCNEIL, D.D.; HARDING, R.; GOWING, D.J. Seasonal variability of interception evaporation from the canopy of a mixed deciduous forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 148, p. 1655–1667, 2008.

HERWITZ, S.R. Raindrop impact and water flow on the vegetative surfaces of trees and the effects on stemflow and throughfall generation. *Earth Surf. Process. Land.* v. 12, p. 425–432, 1987.

HEWLETT, J.D. *Principles of Forest Hydrology*. Athens: The University of Georgia Press, 1982. 183p.

HORMANN, G.; BRANDING, A.; CLEMEN, T.; HERBST, M.; HINRICHS, A.; THAMM, F. Calculation and simulation of wind controlled canopy interception of a beech forest in northern Germany. *Agricultural and Forest Meteorology*, v. 79, p. 131–148, 1996.

HORTON, R.E. Rainfall interception. *Mon. Weather Rev.*, Washington, v.47, n.9, 1919.

ISHII, H.; MCDOWELL, N. Age-related development of crown structure in coastal Douglas-fir trees. *Forest Ecol. Manage.* 169, 257-270, 2002.

ISHII, H.; WILSON, M.E. Crow structure of old-growth Douglas-fir in the western Cascade Range, Washington. *Can. J. Forest Res.* 31, 1250-1261, 2001.

JONARD, M.; ANDRÉ, F.; JONARD, F.; MOUTON, N.; PROCÈS, P.; PONETTE, Q. Soil carbon dioxide efflux in pure and mixed stands of oak and beech. *Ann. Forest Sci.* v. 64, p. 141–150, 2007.

JONARD, M.; ANDRÉ, F.; PONETTE, Q. Tree species mediated effects on leaf litter dynamics in pure and mixed stands of oak and beech. *Can. J. Forest Res.* v. 38, p. 528–538, 2008.

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.

KEIM, R.F.; SKAUGSET, A.E.; WEILER, M. Temporal persistence of spatial patterns in throughfall. *J. Hydrol., Amsterdam*, v.314, p.263–274, 2005.

KILLHAM, K. Nitrification in forest soils. *Plant Soil*, v. 128, p. 31–44, 1990.

KITTREDGE, J. *Forest Influences*. New York: McGraw-Hill Book, 394p. 1948.

LEVIA JR., D.F.; FROST, E.E. A review and evaluation of stemflow literature in the hydrologic and biogeochemical cycles of forested and agricultural ecosystems. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.274, p.1–29, 2003.

LEYTON, L.; REYNOLDS, E. R. C.; THOWPSON, F. B. Rainfall Interception in Forest and Moorland. In: Sopper, W. E.; Lull, H. W. (Eds.). *Forest Hydrology*. Oxford: Pergamon Press, 1967. p.163-178.

LIU, J. A theoretical model of the process of rainfall interception in forest canopy. *Ecological Modelling* 42, 111–123, 1988.

LLORENS, P.; GALLART, F. A simplified method for forest water storage capacity measurement. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.240, p.131–144, 2000.

LLORENS, P.; OLIVERAS, I.; POYATOS, R. Temporal variability of water fluxes in a *Pinus sylvestris* forest patch in Mediterranean mountain conditions. In: Servat, E., Najem, W., Leduc, C., Shakeel, A. (Eds.), *Hydrology in Mediterranean and Semi-Arid Regions*, IAHS Publications No. 278, Wallingford, pp. 101–105, 2003.

LLOYD C.R. e MARQUES A.D.O. Spatial variability of throughfall and stemflow measurements in amazonian rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology* 42(1): 63—73, 1988.

MASSMAN, W. The derivation and validation of a new model for the interception of rainfall by forest. *Agricultural Meteorology* 28, 261–286, 1983.

MILLER H.D. Transport of intercepted snow from trees during snowstorms US Forest Service–Research Paper, vol. 33, pp. 1–30. Berkeley, CA: US department of Agriculture, Forest Service, Pacific Southwest Forest e Range Experiment Station, 1966.

MOTA, A.A. Tempo de concentração em pequena bacia experimental. 2012. 131p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2012.

MULDER, J. Simulating interception loss using standard meteorological data. In: Hutchison, B., Hicks, B. (Eds.), *The Forest–Atmosphere Interaction*. Reidel Publishing Company, Dordrecht, pp. 77–196, 1985.

MURAKAMI, S. Application of three canopy interception models to a young stand of Japanese cypress and interpretation in terms of interception mechanism. *Journal of Hydrology* 342, 305–319, 2007.

MUZYLO, A. LLORENS, P. VALENTE, F. KEIZER, J.J. DOMINGO, F. GASH, J.H.C. A review of rainfall interception modelling, *Journal of Hydrology*, Volume 370, Pages 191-206, 2009.

NÁVAR, J. The causes of stemflow variation in three semi-arid growing species of northeastern Mexico. *J. Hydrol.* 115, 51–63, 1993.

NÁVAR, J.; BRYAN, R. Interception loss and rainfall redistribution by three semi-arid growing shrubs in northeastern Mexico. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.115, p. 51–63, 1990.

ROBSON, A.J., NEAL, C., RYLAND, G.P., HARROW, M. Spatial variations in throughfall chemistry at the small plot scale. *J. Hydrol.* 158, 107–122, 1994.

RUTTER, A., KERSHAW, K., ROBINS, P., MORTON, A. A predictive model of rainfall interception in forest. I. Derivation of the model from observation in a plantation of Corsican pine. *Agricultural Meteorology* 9, 367–384, 1971.

RUTTER, A., MORTON, A., ROBINS, P. A predictive model of rainfall interception in forests. II. Generalization of the model and comparison with observations in some coniferous and hardwood stands. *Journal of Applied Ecology* 12, 367–380, 1975.

PETERSON, D.L.; ROLFE, G.L. Determining sample size in throughfall studies. *Forest Sci.* 25, 582-584, 1979.

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.

SELLERS, P., LOCKWOOD, J. A computer simulation of the effects of differing crop types on the water balance of small catchments over a long time periods. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society* 107, 395–414, 1981.

SHUTTLEWORTH W.J. Evaporation models in the global water budget. In *Variations in the Global Water Budget*, StreetPerrott A. and Beran M. (Eds.), D. Reidel: Hingham, pp. 147–171, 1983.

SOUSA, R.C.; RANZINI, M.; ARCOVA, F.C.S.; CICCO, V.CÂMARA, C.D. Redistribuição das chuvas em plantio de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze (Araucariaceae) no Parque Estadual da Serra do Mar, Cunha – SP. *IF Sér. Reg.*, São Paulo, v.40, p.203–208, jul. 2009.

SPENCER, J.W. Fourier series representation of the position of the sun. *Search*, v.2, n.5, p.172-172, 1971.

STAELENS, J., DE SCHRIJVER, A., VERHEYEN, K., VERHOEST, N.E.C. Rainfall partitioning into throughfall, stemflow, and interception within a single beech (*Fagus sylvatica* L.) canopy: influence of foliation, rain event characteristics, and meteorology. *Hydrol. Process.* 22, 33–45, 2008.

TESKE, M.E., THISTLE, H.W. A library of forest canopy structure for use in interception modeling. *Forest Ecol. Manage.* 198, 341-350, 2004

THORNTHWAITE C.W. An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38, 55, 1948.

TOBÓN MARIN, C.; BOUTEN, W.; SEVINK, J. Gross rainfall and its partitioning into throughfall, stemflow and evaporation of intercepted water in four forest ecosystems in western Amazonia. *J. Hydrol.*, Amsterdam, v.237, p.40–57, 2000.

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, Parts A/B/C, Volumes 47–48*, Pages 122-127, 2012.

TOBA T. e OHTA T. An observational study of the factors that influence interception loss in boreal and temperate forests. *Journal of Hydrology* 313: 208—220, 2005.

VALENTE, F., DAVID, J., GASH, J. Modelling interception loss for two sparse eucalypt and pine forests in central Portugal using reformulated Rutter and Gash analytical models. *Journal of Hydrology* 190, 141–162, 1997.

VAN DIJK, A., BRUIJNZEEL, L. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model, part 1. Model description. *Journal of Hydrology* 247, 230–238, 2001a.

VAN DIJK, A., BRUIJNZEEL, L. Modelling rainfall interception by vegetation of variable density using an adapted analytical model. Part 2. Model validation for a tropical upland mixed cropping system. *Journal of Hydrology* 247, 239– 262, 2001b.

VRUGT, J.A., DEKKER, S.C., BOUTEN, W. Identification of rainfall interception model parameters from measurements of throughfall and forest canopy storage. *Water Resour. Res.* 39 (9), 1251, 2003.

WARD, A.D. e TRIMBLE, S. W. *Environmental hydrology*, 2nd edn. Boca Raton, FL: CRC Press, 2004.

WARD, R.C e ROBINSON, M. Principles of Hydrology, Fourth Edition, McGraw-Hil: London, p. 450, 2000.

WHELAN, M.J., SANGER, L.J., BAKER, M., ANDERSON, J.M. Spatial patterns of throughfall and mineral ion deposition in a lowland Norway spruce (*Picea abies*) plantation at the plot scale. *Atmos. Environ.* 32, 3493–3501, 1998.

XIAO, Q., MCPERSON, E., USTIN, S., GRISMER, M. A new approach to modeling tree rainfall interception. *Journal of Geophysical Research* 105, 173–188, 2000.

ZENG, N., SHUTTLEWORTH, J., GASH, J. Influence of temporal variability of rainfall on interception loss. Part 1. Point analysis. *Journal of Hydrology* 228, 228–241, 2000.

ZINKE P.J. Forest interception studies in the United States. In *International Symposium on Forest Hydrology*, Sopper W.E. and Lull H.W. (Eds.), Pergamon Press: Oxford, pp. 137–161, 1967.

ZIRLEWAGEN, D., VON WILPERT, K. Modeling water and ion fluxes in a highly structured, mixed-species stand. *Forest Ecol. Manage.* 143, 27–37, 2001.

7 ANEXOS

Tabela 7-1 Resultados do monitoramento da chuva externa.

Período	Pluv	E1	E2	E3	Período	Pluv	E1	E2	E3
5	35	*	*	*	33	166	160	157	*
6	13	*	*	*	34	34	35	37	*
7	25	*	*	*	35	93	91	94	*
8	26	*	*	*	36	12	13	14	13
9	128	*	*	*	37	193	186	190	192
10	51	*	*	*	38	42	41	43	43
11	93	*	*	*	39	90	93	*	91
12	177	*	*	*	40	12	12	12	12
13	53	*	*	*	41	42	*	*	42
14	41	*	*	*	42	60	*	*	65
15	44	*	*	*	43	47	43	50	49
16	116	*	*	*	44	81	28	*	103
17	0,3	*	*	*	45	86	71	*	86
18	5	*	*	*	46	*	*	*	*
19	46	*	*	*	47	*	120	*	101
20	45	47	46	46	48	185	262	*	*
21	20	19	19	20	49	13	38	43	38
22	105	104	110	107	50	*	22	26	26
23	61	62	64	61	51	*	77	77	97
24	75	78	78	75	52	*	29	37	38
25	66	68	69	66	53	*	68	*	81
26	39	38	39	39	54	76	65	71	75
27	174	178	186	168	55	32	28	29	33
28	25	29	29	14	56	12	11	13	10
29	130	129	142	139	57	151	125	*	*
30	*	134	148	158	58	146	115	143	*
31	*	134	81	158	59	27	*	*	*
32	228	219	*	*	60	132	126	139	126

* Não teve medição

Tabela 7-2 Resultados do monitoramento da chuva interna.

Período	A1-2	A3	A4	B1-2	B3	B4	Z1-2	Z3	Z4	Média
1	92	119	115	122	102	108	150	98	119	114
2	49	54	68	76	55	67	90	60	65	65
3	56	77	74	82	83	54	97	67	75	74
4	11	16	22	15	15	22	28	*	*	18
5	16	24	26	28	19	31	40	27	19	26
6	7	10	11	11	11	7	18	14	12	11
7	12	18	15	22	14	20	29	24	20	19
8	13	21	22	24	16	20	28	23	23	21
9	94	142	125	109	115	89	144	125	120	118
10	34	49	35	48	34	35	62	56	45	44
11	71	102	69	83	58	62	98	88	79	79
12	124	174	128	177	106	135	193	180	137	150
13	37	47	36	49	32	40	53	61	47	45
14	30	40	33	39	27	27	41	46	37	36
15	40	50	38	36	28	28	38	45	42	38
16	95	136	109	124	99	89	140	148	120	118
17	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,5	0,1	0,1	0
18	5	7	1	3	4	*	6	*	4	4
19	35	51	37	41	30	38	47	53	38	41
20	35	41	43	44	38	41	40	53	39	41
21	12	15	11	13	13	12	20	15	14	14
22	104	79	84	83	71	81	98	135	76	90
23	53	59	48	49	44	50	59	77	47	54
24	63	73	64	58	65	*	76	71	64	67
25	51	57	62	50	48	44	68	50	67	55
26	29	32	35	31	28	26	29	27	29	30
27	121	150	142	172	129	124	124	162	148	141
28	14	20	19	19	18	13	14	17	16	17
29	88	126	119	129	101	120	88	134	104	112
30	*	200	126	114	129	128	130	49	84	120

Período	A1-2	A3	A4	B1-2	B3	B4	Z1-2	Z3	Z4	Média
31	*	200	126	48	129	128	130	132	84	122
32	139	*	195	50	159	214	205	209	123	162
33	221	173	192	182	148	159	147	169	119	168
34	24	39	38	33	20	35	31	31	38	32
35	81	116	81	84	76	66	98	67	95	85
36	9	11	14	14	7	12	9	11	11	11
37	174	223	220	166	188	166	226	166	169	189
38	114	49	36	32	49	36	49	32	34	48
39	68	85	81	70	80	62	80	75	73	75
40	4	8	9	7	10	8	8	4	6	7
41	23	32	37	46	*	31	29	33	32	33
42	48	79	49	57	64	41	58	57	45	55
43	29	45	34	33	32	32	33	40	32	34
44	54	102	81	77	80	76	82	99	78	81
45	53	78	65	66	66	76	80	69	74	70
46	3	7	4	3	4	7	5	6	4	5
47	101	157	93	115	117	102	69	105	101	107
48	*	*	249	*	271	256	239	256	231	250
49	24	32	26	33	27	33	26	32	27	29
50	14	25	9	17	19	15	21	17	12	17
51	93	130	80	101	109	86	45	111	73	92
52	37	46	23	33	36	25	39	29	33	33
53	78	92	59	84	74	84	49	84	74	75
54	62	88	37	69	55	77	60	77	52	64
55	22	22	27	30	29	34	27	31	28	28
56	6	5	8	8	7	9	9	8	7	7
57	129	152	84	150	139	141	154	*	119	134
58	132	121	66	143	132	132	163	145	124	129
59	21	16	25	23	22	23	36	16	22	23
60	67	115	66	164	99	107	133	141	104	111

* Não teve medição

Tabela 7-3 Resultados do monitoramento do Escoamento pelo tronco (Litros).

Tronco 1	Arv 2	Arv 7	Arv 21	Arv 28	Arv 50	Arv 57	Arv 59	Arv 65	Arv 69
4,7	2,7	1,3	1,8	4,7	0,5	1,5	7,4	2,0	5,8
3,2	2,3	1,1	1,3	14,6	0,2	2,5	7,2	2,5	7,1
9,7	2,8	0,8	1,2	14,1	0,4	1,0	6,6	1,2	3,9
1,7	3,2	2,1	6,0	19,8	0,2	1,7	6,9	0,8	6,9
1,7	1,3	0,4	2,1	16,3	0,1	0,2	3,2	0,5	4,9
10,0	10,0	3,7	5,3	10,0	0,2	9,3	10,0	13,8	10,7
0,1	0,2	0,1	0,5	3,1	*	0,1	0,1	0,1	1,0
1,3	2,5	2,2	4,6	2,9	0,2	1,9	22,9	1,6	6,7
0,4	1,7	1,2	0,9	2,0	0,1	2,0	11,0	1,9	11,0
13,1	10,1	4,6	15,4	1,9	1,0	10,0	10,0	8,6	10,0
10,0	10,0	2,9	10,0	*	0,9	1,0	10,0	5,2	10,8
0,1	1,4	0,1	1,8	11,8	0,1	0,3	0,8	1,1	1,8
1,7	2,5	0,2	4,0	10,0	0,6	0,7	1,0	3,7	11,6
*	0,4	*	1,5	0,9	1,0	*	0,1	0,2	0,2
10,0	10,0	1,9	4,2	*	0,9	1,2	10,0	10,0	10,0
0,3	1,0	0,0	2,0	2,8	0,1	0,2	1,0	1,0	2,7
0,8	2,4	0,4	2,2	4,4	0,3	0,3	0,9	0,9	1,0
*	1,9	*	2,1	5,4	*	*	*	*	0,5
0,1	2,0	0,1	3,9	6,0	*	*	2,0	0,1	1,5
0,4	2,8	0,1	3,9	4,9	0,2	0,1	1,1	0,4	1,4
0,1	2,3	0,0	4,9	3,9	*	*	1,1	*	2,3
1,2	2,2	0,1	3,3	4,0	1,3	0,2	3,7	0,6	1,9
0,8	1,2	0,1	1,9	2,0	0,2	0,5	2,0	0,4	1,0
6,9	3,0	*	5,7	7,3	0,8	*	5,1	*	1,0
5,8	2,6	1,0	3,4	6,4	0,8	1,1	5,3	*	*
3,9	1,4	0,3	2,9	4,8	0,1	0,1	1,8	0,8	1,0
0,2	1,1	0,1	0,4	1,0	1,0	*	0,4	0,2	0,4
2,8	4,7	0,7	2,7	7,3	0,9	0,3	2,1	0,9	2,7
0,2	0,8	0,2	0,8	1,9	0,1	0,1	0,4	0,4	0,8
7,0	3,2	0,5	2,0	6,7	1,9	0,9	2,3	2,9	2,6
10,0	2,7	0,6	2,1	13,7	1,8	0,6	3,4	2,8	1,8
0,2	1,1	0,2	1,0	2,1	0,8	0,3	0,4	0,3	0,7
0,1	0,4	0,1	0,4	0,2	*	*	0,1	*	0,1
3,1	10,0	0,9	3,3	10,0	*	1,0	2,2	2,9	3,7
3,3	3,8	1,0	2,3	3,1	*	0,9	2,9	2,1	3,6
0,2	0,9	0,2	0,4	1,9	*	*	0,3	0,3	0,4
3,4	3,3	0,9	4,0	1,5	*	0,1	3,5	2,5	1,0

* Não teve medição

Tabela 7-4 Índices de cobertura do dossel (%).

A12	A3	A4	B1-2	B3	B4	Z1-2	Z3	Z4
49	*	77	76	61	54	47	70	*
81	77	74	79	77	49	66	81	75
78	84	75	81	79	57	67	83	77
87	70	74	77	84	65	67	22	74
85	86	82	88	80	58	70	79	83
80	79	75	79	81	68	84	80	78
81	75	70	85	78	70	82	83	83
77	79	79	88	84	65	49	86	82
83	72	75	82	81	62	67	83	81
76	80	76	82	83	65	79	81	80
74	79	77	83	82	63	78	82	88
79	78	83	87	80	61	86	82	86
72	74	77	86	80	61	85	82	86
67	77	72	79	74	60	73	81	75
73	80	76	80	77	63	77	86	79
82	73	76	82	83	70	81	77	80
49	*	77	76	61	54	47	70	*
81	77	74	79	77	49	66	81	75
78	84	75	81	79	57	67	83	77
87	70	74	77	84	65	67	22	74
85	86	82	88	80	58	70	79	83
80	79	75	79	81	68	84	80	78
81	75	70	85	78	70	82	83	83
77	79	79	88	84	65	49	86	82
83	72	75	82	81	62	67	83	81
76	80	76	82	83	65	79	81	80
74	79	77	83	82	63	78	82	88
79	78	83	87	80	61	86	82	86
72	74	77	86	80	61	85	82	86
67	77	72	79	74	60	73	81	75
73	80	76	80	77	63	77	86	79
82	73	76	82	83	70	81	77	80

* não foi possível estimar

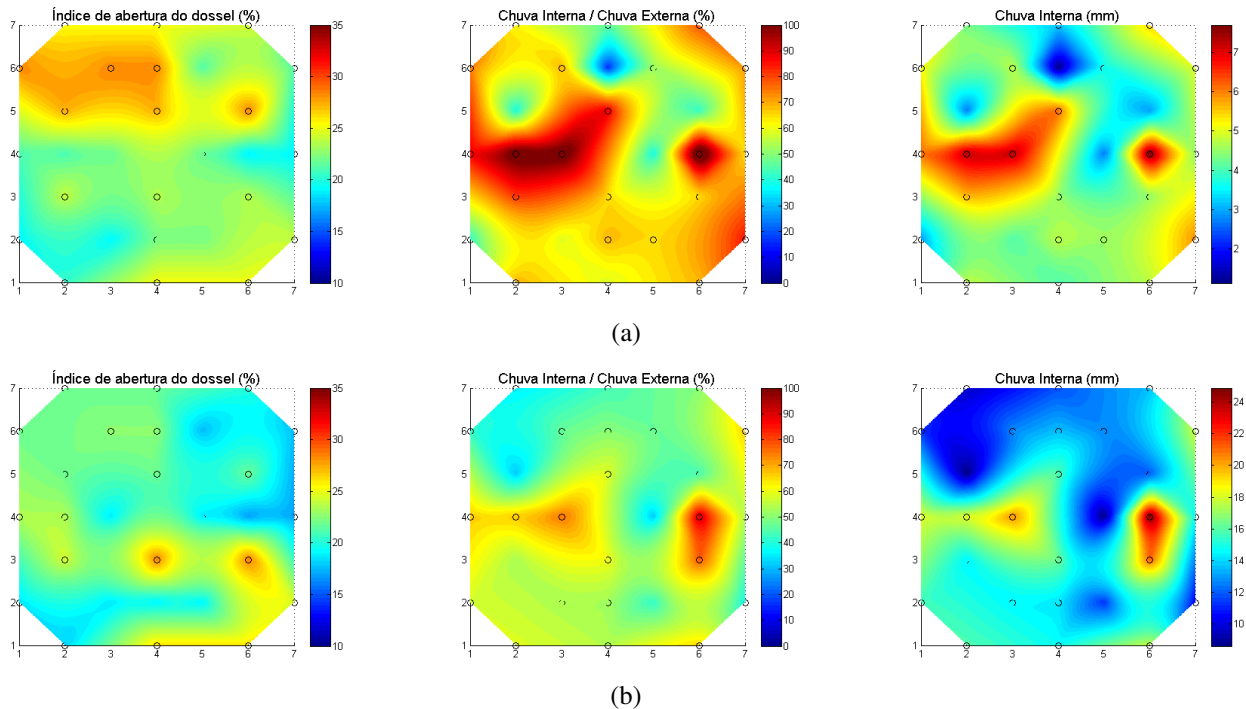


Figura 7-1 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 12/08/2014 e (b) 22/10/2014;

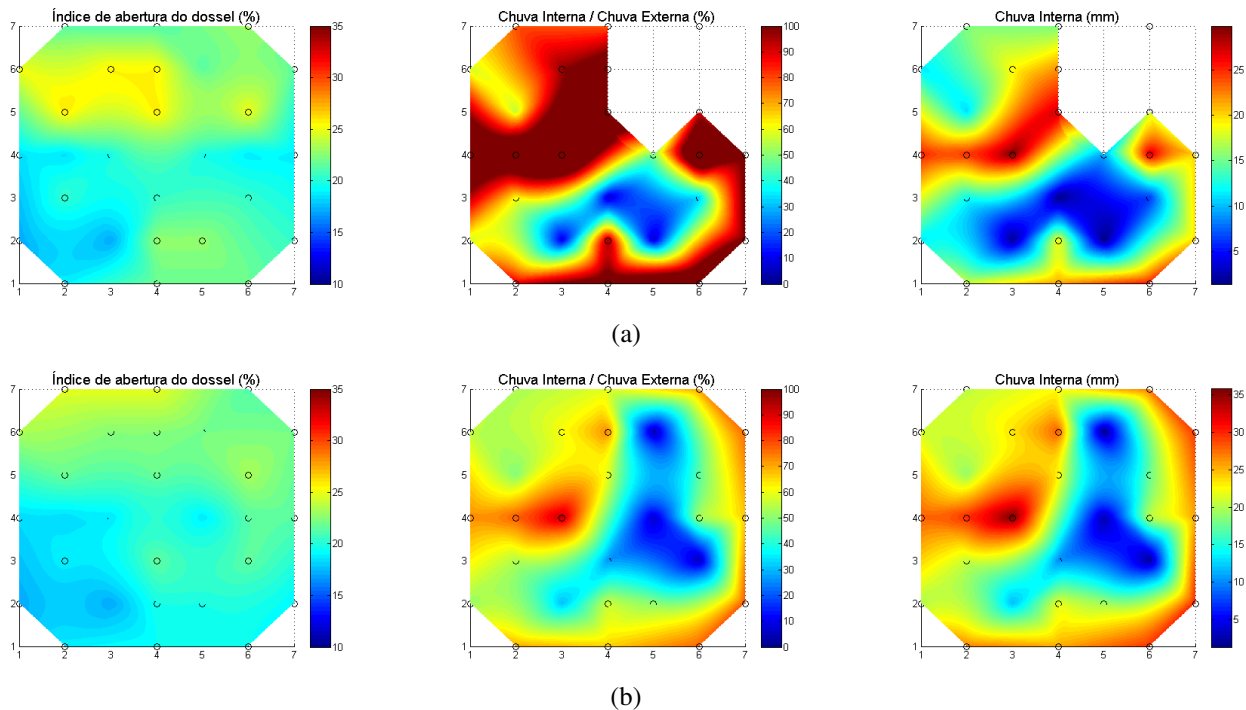


Figura 7-2 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 28/07/2014 e (b) 22/05/2014.

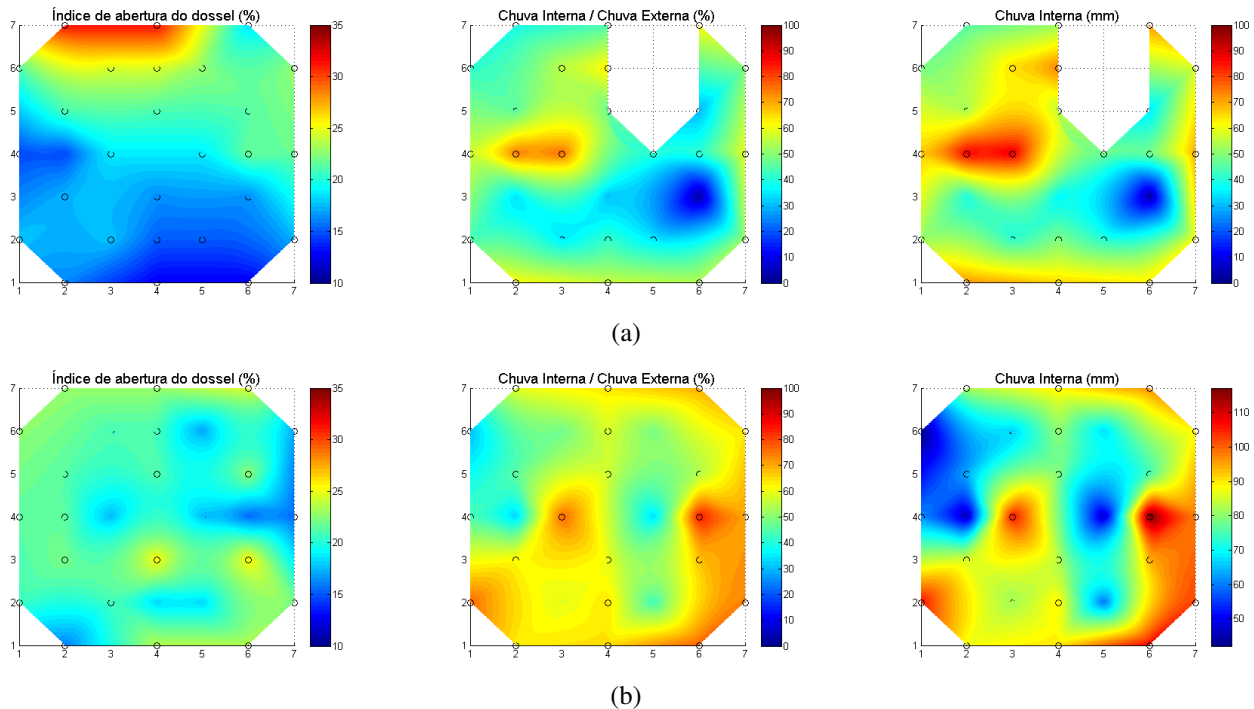


Figura 7-3 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 05/06/2014 e (b) 11/11/2014.

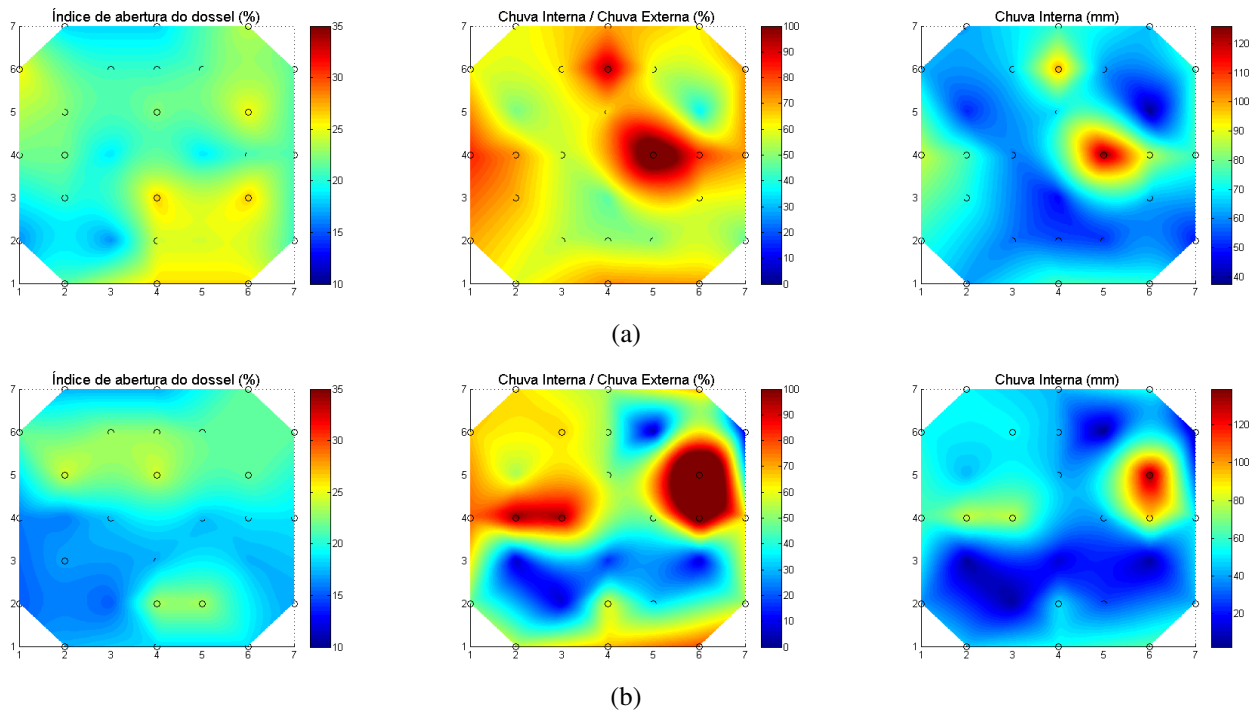
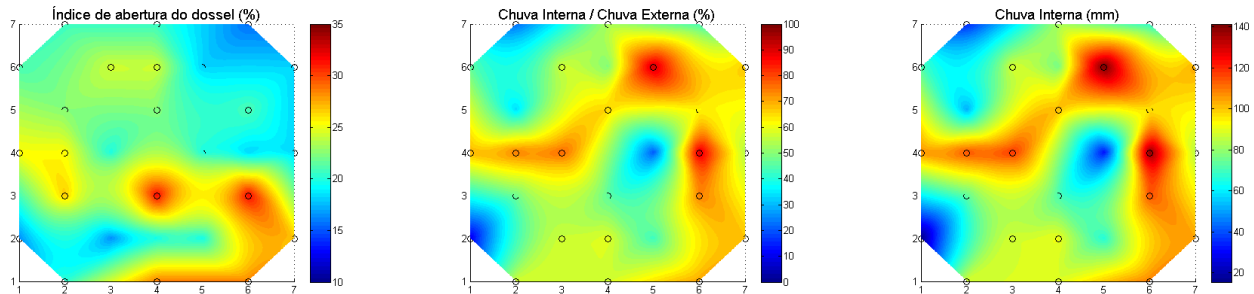
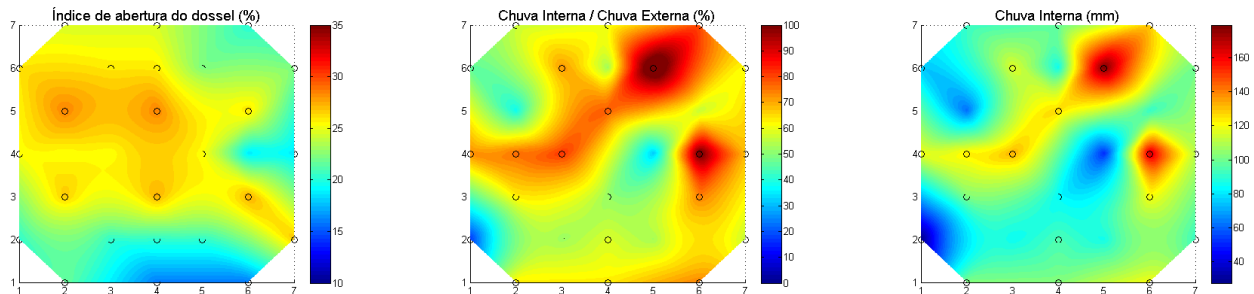


Figura 7-4 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 08/05/2014 e (b) 14/07/2014.



(a)



(b)

Figura 7-5 Interpolação do Grau de abertura da copa, Porcentagem da chuva interna em relação a chuva externa e valor absoluto da chuva interna: (a) 07/10/2014 e (b) 09/09/2014.

8 APÊNDICE

Foi utilizada a equação (40) para o cálculo de radiação solar líquida de ondas curtas (mm d^{-1}).

$$Rns = (1 - \alpha)Rs \quad (40)$$

Adotou-se um valor de albedo de 0,23 (superfície com vegetação). A função relacionada à temperatura é calculada por:

$$f(T) = \sigma T^4 \quad (41)$$

em que σ é a constante de Stefan-Boltzmann ($5,67 \times 10^{-8} \text{ W m}^{-2} \text{ K}^{-4}$) e T é a temperatura média do ar (K).

$$f(e_d) = 0,34 - 0,044\sqrt{e_d} \quad (42)$$

em que e_d é a pressão de vapor do ar na condição real (mbar).

$$f(n/N) = 0,1 + 0,9\frac{n}{N} \quad (43)$$

A insolação máxima possível N é calculada para cada dia do ano e função da latitude do local.

Ângulo do dia (I), em radianos, pode ser estimado por meio da seguinte equação:

$$\Gamma = \frac{2\pi(d_n - 1)}{365} \quad (44)$$

em que d_n é o dia do ano, sendo igual a 1 no dia 1° de janeiro e 365 no dia 31 de dezembro (assumindo que fevereiro possui 28 dias). A declinação solar δ , em radianos, é calculada por (SPENCER, 1971):

$$\delta = 0,006918 - 0,399912 \cos \Gamma + 0,070257 \sin \Gamma - 0,006758 \cos 2\Gamma + 0,000907 \sin 2\Gamma - 0,002692 \cos 3\Gamma + 0,001480 \sin 3\Gamma \quad (45)$$

Esta equação estima a declinação solar δ com um erro máximo de 0,0006 rad (inferior a 3 minutos). A insolação máxima possível N pode ser então calculada para o local em questão por:

$$N = \frac{2}{15} \cos^{-1}(-\tan \phi \tan \delta) \quad (46)$$

em que ϕ é a latitude local (graus), sendo positiva no hemisfério norte e negativa no hemisfério sul. O nascer e do pôr do sol ocorrem a uma mesma distância do sol ao meio dia, ou seja:

$$NS = MD - \frac{N}{2} \quad (47)$$

$$PS = MD + \frac{N}{2} \quad (48)$$

em que NS é o horário do nascer do sol, PS é o horário do pôr do sol e o MD é o horário do meio dia .

Para estimativa do verdadeiro horário do meio dia, duas correções em relação ao meio-dia devem ser feitas: uma delas está relacionada às características da órbita da Terra ao redor do sol (órbita elíptica e inclinação do eixo da Terra), sendo descrita pela equação do tempo, e outra em função da longitude do local, uma vez que todos os locais de um mesmo fuso possuem um mesmo horário, que se refere ao meridiano central do fuso. O valor de meio dia, em minutos, pode ser obtido pela equação abaixo:

$$MD = 720 + 4(L_s - L_e) + E_t \quad (49)$$

em que L_s é a longitude do meridiano central do fuso, L_e é a longitude do local e E_t é a equação do tempo (min) calculada por (SPENCER, 1971):

$$E_t = \left(\begin{array}{l} 0,000075 + 0,001868 \cos \Gamma - 0,032077 \sin \Gamma \\ -0,014615 \cos 2\Gamma - 0,04089 \sin 2\Gamma \end{array} \right) (229,18) \quad (50)$$