

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA NORMAL SUPERIOR**  
**LICENCIATURA EM MATEMÁTICA**

**Anne Cristiny Santos de Mendonça**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA TAXA DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA EM ÁREA DE FLORESTA DA AMAZÔNIA**

**MANAUS, 2018**

**UNIVERSIDADE DO ESTADO DO AMAZONAS**  
**ESCOLA NORMAL SUPERIOR**  
**LICENCIATURA EM MATEMÁTICA**

**MODELAGEM MATEMÁTICA DA TAXA DE ARMAZENAMENTO DE  
ENERGIA EM ÁREA DE FLORESTA DA AMAZÔNIA**

**Anne Cristiny Santos de Mendonça**

Trabalho de conclusão de curso para obtenção do título de graduação em Licenciatura em Matemática apresentado à Universidade do Estado do Amazonas.

Orientador: Prof. Dr. Alessandro A. dos S. Michiles.

**MANAUS, 2018**

## ATA DE DEFESA DE TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

Ata de Defesa do Trabalho de Conclusão de Curso em Licenciatura em Matemática da Escola Normal Superior – UEA de **ANNE CRISTINY SANTOS DE MENDONÇA**.

Aos 28 dias do mês de novembro de 2018, às 17:50 horas, em sessão pública na Sala Odaléa Frazão da Escola Normal Superior na presença da Banca Examinadora presidida pelo professor da disciplina de Trabalho de Conclusão do Curso Helisângela Ramos da Costa e composta pelos examinadores: **Dr. ALESSANDRO AUGUSTO DOS SANTOS MICHILLES**, **Dr. ALMIR CUNHA DA GRAÇA NETO** e **Me. JEAN ANTUNES CUSTODIO DA COSTA** a aluna **ANNE CRISTINY SANTOS DE MENDONÇA** apresentou o Trabalho: **“MODELAGEM MATEMÁTICA DA TAXA DE ARMAZENAMENTO DE ENERGIA EM ÁREA DE FLORESTA DA AMAZÔNIA.”** Como requisito curricular indispensável para a integralização do Curso de Licenciatura em Matemática. Após reunião em sessão reservada, a Banca Examinadora deliberou e decidiu pela A PROVAÇÃO do referido trabalho, com o conceito 10,0 à monografia divulgando formalmente ao aluno e demais presentes e eu, na qualidade de Presidente da Banca, lavrei a presente ata que será assinada por mim, pelos demais examinadores e pelo aluno.

Helisângela Ramos da Costa

Presidente da Banca Examinadora

Almir Cunha da Graça Neto

Orientador (a)

Almir Cunha da Graça Neto

Avaliador 1

Jean Cunha C. da Costa

Avaliador 2

Anne C. Santos de Mendonça

Aluno

Dedico este trabalho a minha família que muito me apoiou e me incentivou a realizá-lo.

## AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Dr. Alessandro Augusto dos Santos Michiles, pela orientação de forma objetiva e criteriosa, pela obtenção e disponibilização dos dados necessários para o desenvolvimento deste estudo, pelo suporte essencial, principalmente na compreensão e familiarização com os dados experimentais utilizados, pela empatia com que recebeu minhas ideias, pelos valiosos ensinamentos e discussões e, sobretudo, pela confiança, conselhos e amizade dedicada.

À Prof. Msc. Helisângela Ramos da Costa, pelas colaborações e pela análise crítica do texto, pela paciência dispensada e pela cordial amizade.

À Universidade do Estado do Amazonas, pela oportunidade, pelo ambiente criativo e amigável.

A todo corpo docente do Curso de Licenciatura em Matemática, pelo conhecimento transmitido, pela dedicação, pelo incentivo e por servirem de modelo para o sucesso nesta importante etapa da minha vida, especialmente: Geraldine Silveira, Neide Alves, Kelly Marães e Nadime Mustafa.

Aos colegas e amigos da Escola Normal Superior, pelo diálogo, pela amizade e pelo apoio indispensáveis ou até mesmo pelo simples fato de compartilhar a alegria de bons e inesquecíveis momentos de descontração.

E, em especial, aos meus pais e irmãos, pelo amor e apoio em todas as circunstâncias, sobretudo por entender os momentos de minha ausência, ao meu querido avô Osmar (*in memoriam*) que esteve sempre presente em pensamentos, e ao meu adorador noivo, pelo companheirismo, amor e incentivo nas ocasiões mais difíceis.

Muito obrigada!

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1	Ilustração esquemática das trocas de energia no sistema solo-vegetação-atmosfera que ocorrem num volume de controle, durante o ciclo diurno em períodos sem a ocorrência de precipitação pluviométrica.....	15
Figura 2	Localização da Reserva Biológica do Cuieiras.....	18
Figura 3	Torre micrometeorológica da floresta Rebio Cuieiras.....	20
Figura 4	Instrumentos instalados na Rebio Cuieiras: (a) Termo-Higrômetro (b) Placa de fluxo (c) Termopares.....	22
Figura 5	Perfil médio do dia 06/09/2003 referente aos (a) saldos de radiação observados e (b) temperaturas do ar observadas e modeladas, para intervalos de meia hora.....	31
Figura 6	Ajuste linear entre valores horários de temperaturas do ar observados e modelados, coletados na altura de 5,2 m, do dia 06 de setembro de 2003, na Rebio Cuieiras.....	32
Figura 7	Perfil médio do dia 06/09/2003 referente a: (a) Relação de fase e amplitude entre temperaturas do ar e do tronco observadas. (b) Temperaturas do tronco observadas e modeladas (c) Ajuste linear entre valores horários de temperaturas do tronco observadas e modeladas, na altura de 9,0 m e profundidade radial de 0,5 cm.....	33
Figura 8	Perfis médios diários de (a) temperatura e umidade relativa do ar, na altura de 51,0 m (b) temperatura de tronco medidas nas profundidades de 0,5, 3,0 e 10,0 cm, na altura de 9,0 m, referente ao conjunto de dias selecionados.....	38
Figura 9	Perfis médios diários das densidades de fluxo de energia dos componentes do balanço de energia ( $RN$ , $LE$ , $H$ e $G$ )....	39
Figura 10	(a) Perfis médios diários de $S$ no ar, numérico ( $ST Num$ ) e modelado ( $ST Mod$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia no ar, modelada $ST Mod$ e numérica $ST Num$ , causada pela variação de temperatura.....	40
Figura 11	(a) Perfis médios diários de $S$ no ar, numérico ( $Sq Num$ ) e modelado ( $Sq Mod$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia no ar, modelada $Sq Mod$ e numérica $Sq Num$ , resultante das mudanças de umidade específica.....	41

Figura 12	(a) Perfis médios diários de $S$ nos troncos, numérico ( $Str Num$ ) e modelado ( $Str Mod$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia nos troncos, modelada $Str Mod$ e numérica $Str Num$ para o conjunto de dias selecionados.....	43
Figura 13	(a) Perfis médios diários de $S$ na copa das árvores, numérico ( $Scr Num$ ) e modelado ( $Scr Mod$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia $Scr Mod$ e $Scr Num$ para o conjunto de dias selecionados.....	44
Figura 14	(a) Perfis médios diários de $S$ no estrato inferior, numérico ( $Sll Num$ ) e modelado ( $Sll Mod$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia $Sll Mod$ e $Sll Num$ para o conjunto de dias selecionados.....	45
Figura 15	Perfis médios diários das taxas de armazenamento de energia numérico $S Num$ , modelado $S Mod$ e observado $S Obs$ .....	46
Figura 16	Regressões lineares diárias entre $S Obs$ e $S Num$ (à esquerda) assim como por $S Mod$ e $S Num$ (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.....	47
Figura 17	Regressões lineares diurnas entre $S Obs$ e $S Num$ (à esquerda) assim como por $S Mod$ e $S Num$ (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.....	48
Figura 18	Regressões lineares noturnas entre $S Obs$ e $S Num$ (à esquerda) assim como por $S Mod$ e $S Num$ (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.....	48

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1	Lista de variáveis meteorológicas e suas unidades de medida, instrumentos, seus respectivos modelos e fabricantes, e altura em que foram realizadas as medições da AWS.....	21
Tabela 2	Como na Tabela 1, para as medições da SPCD.....	21
Tabela 3	Como na Tabela 1, para as medições do sistema que emprega o MCVT.....	22
Tabela 4	Lista de variáveis radiais $r_i$ , raio do tronco médio $R_i$ , fator de correção $U_{fi}$ , e suas respectivas profundidades radiais $P_{ri}$ e alturas de referência $z_{tr}$ estimadas para Rebio Cuieiras.....	27
Tabela 5	Componentes de $S$ na biomassa calculados, as temperaturas de referência usadas ( $T$ para o ar e $T_{tr}$ para o tronco da árvore representativa), as alturas e as profundidades em que foram medidas.....	28
Tabela 6	Valores do calor específico ( $c_{bc}$ ) e da massa fresca por unidade de área de solo ( $m_{bc}$ ) para cada componente da biomassa da floresta da Rebio Cuieiras.....	29
Tabela 7	Dias selecionados representando a estação seca de 2003, com datas, valores médios diários de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e de tronco ( $T_{tr}$ ), saldo de radiação ( $RN$ ), e densidades de fluxo turbulento de calor sensível ( $H$ ), de calor latente ( $LE$ ), e de calor no solo ( $G$ ).....	37
Tabela 8	Erros médios (em $W m^{-2}$ e %) de $S$ e suas componentes $S_T$ , $S_q$ , $S_{ll}$ , $S_{cr}$ e $S_{tr}$ , obtidos por meio da diferença entre os resultados, modelados e numéricos.....	49
Tabela 9	Razões % envolvendo $S$ , $S_T$ , $S_q$ , $S_{ar}$ , $S_{tr}$ , $S_{cr}$ , $S_{ll}$ e $S_{bio}$ para o conjunto de dias selecionados.....	50

## LISTA DE SÍMBOLOS

$A$	- área para integração, $m^2$
$A_G$	- área de solo, $m^2$
$c_{br}$	- calor específico dos ramos, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{dw}$	- calor específico da madeira morta, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{lv}$	- calor específico das folhas, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{lt}$	- calor específico da liteira, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{oc}$	- calor específico dos componentes de pequeno porte da vegetação, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_p$	- calor específico à pressão constante do ar, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{sl}$	- calor específico das mudas, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{st}$	- calor específico das árvores pequenas, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{tr}$	- calor específico dos troncos, $J kg^{-1} K^{-1}$
$c_{tw}$	- calor específico dos galhos, $J kg^{-1} K^{-1}$
$e$	- pressão atual de vapor, $Pa$
$e_s$	- pressão de saturação de vapor, $Pa$
$F$	- fluxo de calor, $W$
$G$	- densidade de fluxo, por condução, de calor no solo, $W m^{-2}$
$H$	- densidade de fluxo turbulento vertical de calor sensível, $W m^{-2}$
$L$	- calor latente de vaporização da água, $J kg^{-1}$
$LE$	- densidade de fluxo turbulento vertical de calor latente, $W m^{-2}$
$m_{br}$	- massa fresca de ramos por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{dw}$	- massa fresca de madeira morta por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{lv}$	- massa fresca de folhas por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{lt}$	- massa fresca de liteira por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{oc}$	- massa fresca de dos componentes de pequeno porte por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{sl}$	- massa fresca de mudas por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{st}$	- massa fresca de pequenas árvores por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{tr}$	- massa fresca de troncos por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$m_{tw}$	- massa fresca de galhos por unidade de área de solo, $kg m^{-2}$
$N$	- número total de árvores na floresta
$P$	- profundidade radial, $m$

$P_{atm}$	- pressão atmosférica, $Pa$
$q$	- umidade específica, $kg\ kg^{-1}$
$Q$	- valor líquido de calor transferido para o sistema
$r^2$	- coeficiente de determinação
$r$	- variável radial, $m$
$R$	- raio de tronco, $m$
$R_N$	- saldo de radiação, $W\ m^{-2}$
$S$	- taxa de armazenamento térmico de energia acima do solo, $W\ m^{-2}$
$S_{air}$	- taxa de armazenamento térmico de energia no ar, $W\ m^{-2}$
$S_{bio}$	- taxa de armazenamento térmico de energia na biomassa, $W\ m^{-2}$
$S_{br}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nos ramos, $W\ m^{-2}$
$S_{cr}$	- taxa de armazenamento térmico de energia na copa, $W\ m^{-2}$
$S_{dw}$	- taxa de armazenamento térmico de energia na madeira morta, $W\ m^{-2}$
$S_{ll}$	- taxa de armazenamento térmico de energia no estrato inferior da floresta, $W\ m^{-2}$
$S_{lv}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nas folhas, $W\ m^{-2}$
$S_{lt}$	- taxa de armazenamento térmico de energia na liteira, $W\ m^{-2}$
$S_{oc}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nos componentes de pequeno porte, $W\ m^{-2}$
$S_q$	- taxa de armazenamento térmico de energia no ar causada pelas variações de umidade específica, $W\ m^{-2}$
$S_{sl}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nas mudas, $W\ m^{-2}$
$S_{st}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nas árvores pequenas, $W\ m^{-2}$
$S_T$	- taxa de armazenamento térmico de energia no ar causada pelas variações de temperatura, $W\ m^{-2}$
$S_{tr}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nos troncos, $W\ m^{-2}$
$S_{tw}$	- taxa de armazenamento térmico de energia nos galhos, $W\ m^{-2}$
$t$	- tempo, $s$
$T$	- temperatura do ar, $^{\circ}C$
$T_m$	- temperatura média, $^{\circ}C$
$T_{tr}$	- temperatura de tronco, $^{\circ}C$
$UR$	- umidade relativa, %
$V$	- volume para integração, $m^3$
$W$	- valor líquido de trabalho efetuado pelo sistema, $J$

$z$	- eixo coordenado vertical retangular, $m$
$z_r$	- altura de referência, $m$
$z_{tr}$	- altura de tronco de referência, $m$
$\alpha$	coeficiente de ajuste, adimensional
$\Delta T$	amplitude térmica, $^{\circ}C$
$U_f$	fator de correção, adimensional
$\pi$	- 3,1415
$\theta$	- ângulo para integração, $rad$
$\omega$	- frequência angular, $rad\ s^{-1}$
$\varphi$	- ângulo de fase, $rad$
$\tau$	- período do movimento, $h$
$\rho_a$	- massa específica do ar, $kg\ m^{-3}$
$\rho_{tr}$	- massa específica dos troncos, $kg\ m^{-3}$

### Índices

$i$	- camadas horizontais da floresta
$j$	- anéis concêntricos de tronco
$k$	- passo de tempo
$l$	- número de camadas horizontais de ar
$l_{tr}$	- número de camadas horizontais de tronco
$n_{tr}$	- número de anéis concêntricos de tronco

# SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>8</b>
<b>1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</b> .....	<b>11</b>
1.1 Fluxo de Energia em uma Superfície Ideal .....	11
1.2 Balanço de Energia em uma Superfície.....	13
1.3 Taxa de Armazenamento de Energia .....	15
<b>2 METODOLOGIA DA PESQUISA</b> .....	<b>17</b>
2.1 Abordagem da Pesquisa.....	17
2.2 Sítio Experimental, Características da Floresta e Climatologia Local .....	17
2.3 Instrumentação e Medidas.....	19
2.4 Cálculo da Taxa de Armazenamento de Energia na Floresta.....	23
2.4.1 Taxa de Armazenamento de Energia no Ar.....	25
2.4.2 Taxa de Armazenamento de Energia nos Troncos.....	26
2.4.3 Taxa de Armazenamento de Energia na Copa e no Estrato Inferior. ....	27
2.5 Cálculo da Umidade Específica .....	29
2.6 Modelagem Matemática das Séries de Temperatura .....	30
2.7 Métodos Numéricos .....	34
<b>3 RESULTADOS</b> .....	<b>36</b>
3.1 Seleção de Dados.....	36
3.2 Taxa de Armazenamento de Energia no Ar .....	40
3.3 Taxa de Armazenamento de Energia nos Troncos.....	42
3.4 Taxa de Armazenamento de Energia na Copa e no Estrato Inferior.....	43
3.5 Taxa de Armazenamento Total de Energia .....	45
<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	<b>51</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>54</b>

## INTRODUÇÃO

As florestas tropicais desempenham um papel fundamental no funcionamento do clima regional e global, devido a sua proximidade à linha do Equador e a sua imensa extensão, já que cobrem em torno de 60 % das áreas florestadas, encerrando 17,6 milhões de  $km^2$ , o que equivale a cerca de 13 % da totalidade da área de superfície continental. Desta área, aproximadamente 40 % é correspondente à Floresta Amazônica, a qual hospeda o mais extenso bloco de floresta tropical úmida do mundo (CARSWELL ET AL., 2002; DIXON ET AL., 1994; MALHI E GRACE, 2000).

No campo de estudos sobre vegetação e clima, Marques Filho et al. (2005), retrata que as trocas de energia e de massa entre coberturas vegetais e a atmosfera têm reguladores próprios na vegetação associados aos aspectos estruturais e fisiológicos que a caracterizam. As relações energéticas que originam e sustentam esses intercâmbios são dirigidas por uma fonte primária de radiação solar externa e independente, complementada pela radiação interna de ondas longas dos elementos vegetais e do solo subjacente à cobertura. Dessa forma, destaca-se a intensa evapotranspiração e a liberação de calor latente, como dois fatores essenciais relativos à região Amazônica. De acordo com Marengo (2009), as florestas bombeiam o calor latente para a atmosfera, com o intuito de equilibrar o intenso aquecimento da superfície por radiação. O vapor de água liberado é uma das principais fontes de umidade, contribuindo para geração de precipitação regional e, durante o verão do Hemisfério Sul, a extensa convecção tropical transporta o calor latente para a troposfera, distribuindo-o para as zonas temperadas, fornecendo uma forte fonte de calor troposférico para a circulação global atmosférica.

A Floresta Amazônica, conhecida também como Bacia Amazônica ou Amazônia, é coberta por uma vasta porção de floresta tropical, a qual Ayres (1995) divide em três importantes e principais grupos: matas de terra firme, florestas inundáveis e savanas. A vegetação dominante na Amazônia são as florestas densas (matas primárias) que correspondem às florestas inundáveis, sujeitas a alagação anual ou diária, e florestas de terra firme, localizadas em terras mais altas. As áreas de terra firme (campinaranas, floresta seca, floresta

de montanha, mata primária alta e matas de cipós) ocupam cerca de 80% a 90% da área total, enquanto que 5% a 10% representam as floretas inundáveis (manguezais, várzeas de maré, pântanos, igapós e várzeas). Existem ainda, algumas regiões onde trechos extensos de savanas (áreas abertas) são comuns. Estas florestas são situadas geralmente em terrenos ondulados, a baixas altitudes, raramente indo além de 250 m acima do nível do mar, e detêm as árvores mais altas, algumas atingindo cerca de 50 m de altura. Além disso, a umidade, as chuvas e a luz solar abundante favorecem o alargamento da copa das árvores, formando um “forro” que confere a densidade desse bioma.

O clima da região é o resultado da combinação de vários fatores, sendo que a disponibilidade de energia solar, por meio do balanço de energia em superfície (BES), é o elemento de maior importância. Portanto, segundo Michiles e Gielow (2008), a análise deste balanço em florestas é necessária para a compreensão dos processos climáticos envolvidos com os componentes da vegetação e de seus efeitos em diversas escalas espaciais e temporais, e merecida consideração, deve ser dirigida à taxa de armazenamento de energia no volume ocupado pelas partes constituintes da vegetação e pelo ar adjacente, pois a mesma pode aparecer como um termo importante para o fechamento deste balanço, particularmente em curtos períodos de tempo, menores que um dia.

Entretanto, é particularmente difícil, e suscetível a muitos erros, medir as trocas de energia numa floresta tropical, em circunstância da notável heterogeneidade em espécies e tamanhos de árvore (MONTENY ET AL., 1985). Neste contexto, a importância da Floresta Amazônica no controle do clima tem estimulado diversos estudos nas últimas décadas, mediante desenvolvimento de modelos físico-matemáticos e de experimentos de campo, com o intuito de se obterem informações mais precisas sobre as contribuições da região para as trocas de energia com a atmosfera e, sobretudo, de identificar as mudanças derivadas de atividades humanas sobre esses processos.

Neste sentido, o principal objetivo deste trabalho é determinar as variações de energia interna do sistema termodinâmico solo-vegetação-atmosfera, para dias com **pouca perturbação atmosférica e sem**

**precipitação pluviométrica**, por meio de modelagem matemática simplificada, cálculo numérico, e pelo saldo dos fluxos de calor medidos em floresta de terra firme, especificamente, na Reserva Biológica do Cuieiras.

Os objetivos específicos são:

- a) Calcular as taxas de armazenamento de energia nos diferentes componentes da floresta, a partir de séries de temperatura do ar e do tronco modeladas via funções harmônicas simples;
- b) Determinar as taxas de armazenamento de energia nos diferentes componentes da floresta via cálculo numérico, utilizando medidas de temperatura do ar e do tronco coletadas na Reserva Biológica do Cuieiras;
- c) Computar a taxa de armazenamento de energia utilizando medidas diretas, de densidades de fluxo de calor e saldo de radiação, coletadas na Reserva do Cuieiras, durante a estação seca de 2003;
- d) Analisar as relações e comparar os resultados alcançados pelo modelo matemático proposto e por meio de medições diretas, com aqueles obtidos via método numérico.

# 1 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

## 1.1 Fluxo de Energia em uma Superfície Ideal

O fluxo de uma grandeza é a quantidade dessa grandeza transferida por unidade de tempo por meio de uma superfície perpendicular à direção de propagação da grandeza, enquanto a densidade de fluxo é o fluxo dessa grandeza por unidade de área (POHLMANN, 2004). Quando somente as densidades de fluxos verticais de energia são consideradas, e a superfície é relativamente suave, horizontal, homogênea, extensiva e opaca para radiação, Arya (2001) classifica-os em quatro tipos, de maneira simplificada, como: fluxos de calor sensível e de calor latente, saldo de radiação e fluxo de calor no submeio (solo ou água).

O processo de troca de calor sensível é determinado pelo estado da camada limite da atmosfera e pelas propriedades da superfície (ALVALÁ, 1993). De acordo com Arya (2001), o fluxo de calor sensível na superfície ou acima dela surge como resultado da diferença de temperatura entre a superfície e o ar próximo a ela. Na interface entre a superfície e a camada de ar, o primeiro modo de transferência de calor no ar é condução. No entanto, nas camadas mais distantes da interface ar-superfície, o modo de troca de calor torna-se convecção, envolvendo movimentos de ar. Durante o dia, o fluxo de calor sensível é direcionado para fora da superfície, quando a superfície está mais quente que o ar, e vice-versa durante períodos da noite.

O mecanismo de transferência de calor por condução se caracteriza pela transferência de energia térmica em um meio material sólido ou fluido, causada pela existência de um gradiente de temperatura, afirma Pohlmann (2004). Deve-se imediatamente visualizar conceitos das atividades atômicas e moleculares, pois são processos nesses níveis que mantêm este modo de transferência de calor. Incropera et al. (2017) definem que a condução pode ser vista como a transferência de energia das partículas mais energéticas para as menos energéticas de uma substância devido às interações entre partículas. Já a advecção, segundo Pohlmann (2004), se caracteriza pela transferência de calor causada pelo deslocamento de massa fluida. Num fluido em movimento,

onde existe uma distribuição não uniforme de temperatura, o calor é transferido pelo transporte de massa fluida e, também, por condução devido aos gradientes de temperatura.

O fluxo de calor latente é o resultado da evaporação, evapotranspiração, ou condensação na superfície e é obtido pelo produto entre o calor latente de evaporação ou condensação e a taxa de evaporação ou condensação (ARYA, 2001). A evaporação acontece sempre que o ar livre está mais seco, ou seja, quando a umidade relativa do ar está mais baixa que o ar na camada próxima à superfície, podendo ocorrer geralmente durante o dia, tanto a partir de superfícies líquidas como a partir de superfícies de solo úmido e vegetais (folhas, por exemplo). Por outro lado, a condensação decorre de áreas relativamente mais frias durante a noite, sob a forma de orvalho. Alvalá (1993) define que a transferência de calor latente ocorre quando há uma diferença na concentração de vapor de água entre a superfície vegetada e o ar livre.

A radiação é o processo mais importante de propagação de calor, pois por intermédio dela o calor do Sol chega até a Terra. Durante o dia, quando exposta à radiação solar, a superfície aquece, enquanto esfria em períodos noturnos, especialmente sob o céu claro e condições meteorológicas não perturbadas. Segundo Michiles (2009), a radiação solar pode ser refletida, absorvida ou transmitida. À radiação que chega à superfície dá-se um sinal positivo, em circunstância da mesma adicionar energia, e à radiação que deixa a superfície atribui-se um sinal negativo, por esta retirar energia. Quando se somam todas as radiações que chegam e que deixam a superfície, o resultado é a radiação absorvida, chamada de saldo de radiação. O saldo de radiação é a principal forçante meteorológica, provocando o aquecimento e o resfriamento do ambiente florestal e, fisicamente, representa a densidade de fluxo superficial de energia radiante disponível para a partição em outras formas de energia, que guiam os processos que ocorrem em superfície (FINNIGAN ET AL., 2001; HARTMANN, 1994). A radiação térmica é emitida pela matéria que se encontra a uma temperatura diferente de zero. Ainda que imaginamos a radiação a partir de superfícies sólidas, a emissão também ocorre a partir de gases e líquidos (INCROPERA ET AL, 2017), ou seja, a radiação independe da forma da

matéria, e pode ser atribuída a mudanças nas configurações eletrônicas dos átomos ou moléculas que constituem a matéria.

Quando a radiação solar alcança a superfície do solo ou a temperatura do ar das cercanias está mais alta que desta superfície, a mesma aquece e, se estiver mais quente que as camadas inferiores, há condução vertical de calor para o subsolo (FINNIGAN ET AL., 2001). Portanto, a transferência de calor no solo decorre principalmente devido à condução se a região é constituída por terra, rocha ou concreto. Entretanto, quando se trata de água, Arya (2001) esclarece que o calor é transferido da mesma maneira como é transferido pelo ar, ou seja, primeiro por condução na camada próxima à superfície e depois por convecção nas porções mais profundas, a partir de movimentos da água.

## 1.2 Balanço de Energia em uma Superfície

O balanço de energia em superfície (BES) constitui um dos alicerces mais fundamentais da micrometeorologia de florestas moderna, evidenciando a chegada, a saída e o armazenamento de energia no volume ocupado pela vegetação e suas circunvizinhanças (FINNIGAN ET AL., 2001). Segundo Incropera et al. (2017), a termodinâmica pode ser usada para determinar a quantidade de energia requerida na forma de calor por um sistema para passar de um estado para outro, enquanto que a transferência de calor quantifica a taxa na qual o calor é trocado. A primeira lei da termodinâmica indica as formas nas quais a energia pode cruzar as fronteiras de um sistema: transferência de calor por meio das fronteiras e trabalho realizado pelo, ou sobre o sistema. Isso leva ao seguinte enunciado da primeira lei:

$$\Delta E_{acu}^{tot} = Q - W \quad (\text{Eq.2.1})$$

na qual  $\Delta E_{acu}^{tot}$  é a variação da energia total acumulada no sistema,  $Q$  é o valor líquido do calor transferido para o sistema e  $W$  é o valor líquido do trabalho efetuado pelo sistema.

Em muitas situações é mais conveniente focalizar a atenção numa determinada região do espaço, por entre a qual o fluido escoar, e descrever o movimento à medida que o fluido cruza essa região. Esse é o método do

volume de controle. De acordo com Pohlmann (2004), a superfície do contorno geométrico do volume de controle é chamada de superfície de controle, e pode ser real ou imaginária, indeformável ou deformável, estacionária ou em movimento, conforme a conveniência para o problema em estudo.

A energia disponível para os processos físico-biológicos provém do Sol, porém, é por meio da superfície terrestre (floresta tropical, pastagem e/ou água), que ela é redistribuída para a atmosfera. Este processo denomina-se “partição de energia”. Portanto, é necessário conhecer e avaliar o balanço de energia, que é a contabilidade dos termos de troca energética sobre uma superfície de suficiente extensão horizontal (floresta ou pastagem) (GALVÃO, 1999).

Para obter uma equação simplificada para o balanço de energia em uma superfície ideal, quando não há advecção e fazendo uso do conceito de volume de controle, Arya (2001) assumiu que essa superfície se refere a uma interface muito pequena entre dois meios, não considerando massa e capacidade térmica. Os fluxos de energia devem fluir para dentro e para fora de tal superfície sem que ocorra perda ou ganho devido à superfície. Assim, baseada no princípio de conservação da energia, a equação do balanço de energia pode ser escrita, de maneira simplificada, como:

$$S = R_N - H - LE - G \quad (\text{Eq.2.2})$$

na qual  $S$  é a taxa de armazenamento de energia no interior da vegetação;  $R_N$  é o saldo de radiação;  $H$  e  $LE$  são os fluxos turbulentos verticais de calor sensível e de calor latente devido à evapotranspiração, com  $L$  e  $E$  representando, respectivamente, o calor latente de vaporização da água e densidade de fluxo de massa de vapor de água;  $G$  é o fluxo, por condução, de calor no solo. Todos os termos da equação acima são dados em  $W m^{-2}$ , sendo que, separadamente,  $L$  e  $E$  são dados, respectivamente, em  $J kg^{-1}$  e  $kg m^{-2} s^{-1}$ . Sob condições ideais, os principais termos referentes às trocas de energia que acontecem no sistema solo-vegetação-atmosfera, mediante um volume de controle, estão ilustrados esquematicamente na Figura 1.

Quando ambos os membros da Equação 2.2 se igualam, sob condições ideais, acontece o fechamento do balanço de energia, porém, isso não ocorre quando os componentes deste balanço são medidos separadamente em campo e algumas causas deste não-fechamento incluem desde erros de medição associados a instrumentos individuais e suas respectivas incertezas, a aproximações e métodos inadequados para medir ou calcular alguns dos componentes do BES (CULF ET AL., 2004; WILSON ET AL., 2002).

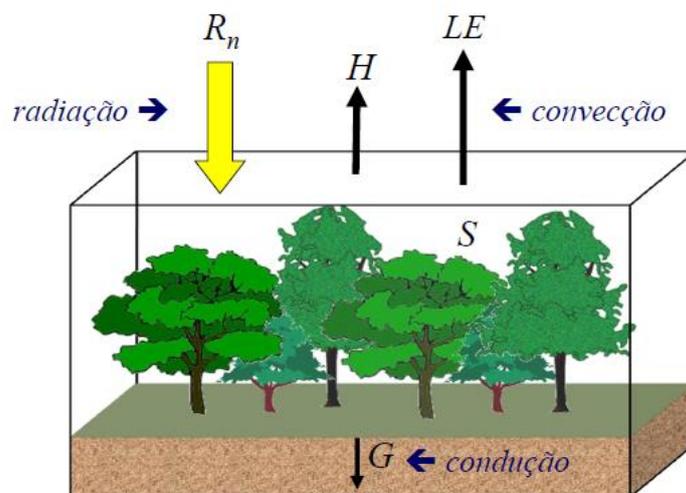


Figura 1. Ilustração esquemática das trocas de energia no sistema solo-vegetação-atmosfera que ocorrem num volume de controle, durante o ciclo diurno em períodos sem a ocorrência de precipitação pluviométrica.

Fonte: MICHILES, 2009.

De acordo com Arya (2001), as magnitudes dos componentes do balanço de energia dependem de muitos fatores, tais como o tipo de superfície e suas características (umidade do solo, textura, vegetação, etc), localização geográfica, mês ou estação do ano, hora do dia e condições do tempo meteorológico.

### 1.3 Taxa de Armazenamento de Energia

A taxa de armazenamento de energia  $S$  é definida, de acordo com Michiles (2009), como a taxa de variação temporal de energia (dada em  $J m^{-3}$ ) armazenada num volume  $V$ , causada pelo fluxo de calor  $F$  que ocorre através da superfície externa desse volume, por unidade de área de solo  $A_G$ :

$$S = \frac{F}{A_G} = \frac{1}{A_G} \int_V \frac{\partial}{\partial t} \rho c T dV \quad (\text{Eq.2.3})$$

na qual  $\rho$  é a massa específica,  $c$  é o calor específico, e  $T$  é a temperatura da substância que compõe o volume  $V$ . Quando a energia que entra na superfície do volume de controle excede a energia que sai, existe um fluxo convergente ( $S > 0$ ) que resulta no aquecimento da superfície. Por outro lado, quando a energia que sai excede a energia que entra, a superfície esfria como resultado do fluxo divergente ( $S < 0$ ).

## **2 METODOLOGIA DA PESQUISA**

### **2.1 Abordagem da Pesquisa**

Segundo Prodanov (2013), a pesquisa é a atividade nuclear da ciência. Ela possibilita uma aproximação em um entendimento da realidade a investigar. A pesquisa é um processo permanentemente inacabado. Processa-se mediante de aproximações sucessivas da realidade, fornecendo subsídios para uma intervenção no real. Neste sentido, a fonte de investigação deste estudo é de natureza quantitativa, tendo em vista que a realidade pode ser entendida por intermédio da análise de dados numéricos, obtidos com o auxílio de instrumentos padronizados, e então descrita por meio da linguagem matemática, tomando os resultados de maneira a constituir um retrato real de todo objeto da pesquisa.

### **2.2 Sítio Experimental, Características da Floresta e Climatologia Local**

Em uma extensa área de platô (150 m acima do nível do mar) inserida numa grande floresta primária, localiza-se o sítio de floresta de terra firme onde os dados utilizados neste trabalho foram coletados. Trata-se da Reserva Biológica do Cuieiras (Rebio Cuieiras), também conhecida como ZF-2, do Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), e está situada cerca de 50 km a noroeste da cidade de Manaus-AM (Figura 2), na Amazônia central.

O acesso à reserva é feito por via rodoviária, ao longo de uma estrada de terra vicinal (ZF-2), localizada à esquerda do km 50 da BR-174. O relevo da região é constituído por diversos platôs intercalados por vales em que aparecem vários igarapés, compondo uma rica rede de escoamento; o solo é do tipo latossolo amarelo álico, de textura argilosa, poroso, fortemente micro agregado e com boa drenagem (CHAUVEL, 1982). A vegetação é típica de floresta tropical primária não-perturbada, bastante diversificada no aspecto florístico, com uma quantidade considerável de árvores relativamente altas e delgadas que, conforme Oliveira et al. (2008), apresentam, em sua maioria, alturas entre 14 e 25 metros, com emergentes ocasionais estimadas em até 44

metros. O dossel é uniforme e possui aspecto rugoso, com copas globosas, próximas umas das outras, resultando em apenas cerca de 7% de radiação de ondas curtas alcançando o solo (OLIVEIRA ET AL., 2008; MALHI ET AL., 2002).

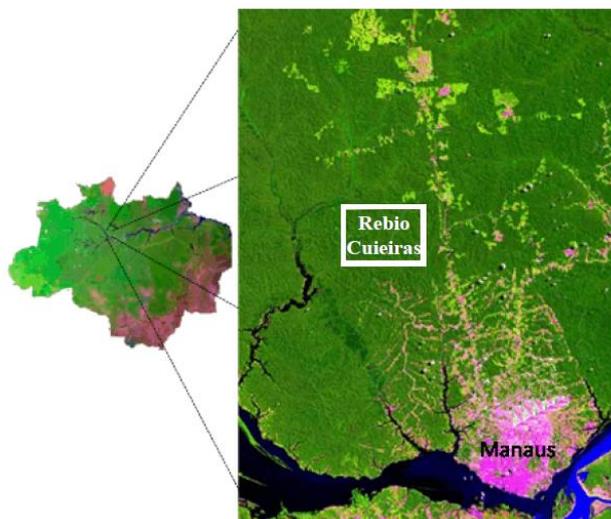


Figura 2. Localização da Reserva Biológica do Cuieiras.  
Fonte: Adaptada de PELD (2013).

Em 2002, Oliveira et al. (2008) realizaram um inventário, em área de platô da floresta de terra firme da Rebio Cuieiras, de todas as árvores, lianas e palmeiras que apresentavam “diâmetro na altura do peito” (DAP – medidos em aproximadamente 1,5 m de altura) maior ou igual a 10 cm, encontrando 670 árvores, distribuídas entre 48 famílias, 133 gêneros e 245 espécies. Usando o conjunto completo de dados deste levantamento, Michiles (2009) avaliou as massas específicas, os parâmetros espaciais e a distribuição de biomassa para cada árvore a fim de obter os valores dessas grandezas para um tronco “médio” teórico e posteriormente escolher uma árvore “representativa”.

O clima da região é do tipo “Am” na classificação de Köppen (RADAMBRASIL, 1978), com temperatura média anual do ar em torno de 26 °C. A precipitação total anual varia de 1400 a 2800 mm, com uma estação úmida de dezembro a maio e uma estação seca de junho a novembro. Com base em um conjunto de dados, citado por Marques Filho et al. (2005), coletado em uma estação climatológica do tipo principal, localizada no km 14 da Rebio Cuieiras, os índices pluviométricos registram totais médios mensais

superiores a 150 mm em pelo menos nove meses do ano (entre outubro e junho), sendo março e abril os meses mais chuvosos (> 300 mm) e o mês de agosto apresentando o menor índice (< 100 mm). A umidade relativa média é sempre superior a 80% e segue o comportamento sazonal da precipitação, e as temperaturas médias mensais variam entre 25 °C (julho) e 27 °C (novembro). As máximas médias oscilam entre 31 °C em fevereiro e 33 °C em setembro, enquanto as mínimas médias estão entre 21 °C em julho e 23 °C em março.

### **2.3 Instrumentação e Medidas**

Com a finalidade de obter informações mais precisas sobre as interações entre a Floresta Amazônica e as condições atmosféricas e climáticas em escala regional e mundial, têm-se produzido diversos experimentos e estudos. Em 1998, para responder a este desafio global, o Governo Brasileiro, liderou o Experimento de Larga Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (“Large Escala Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazônia” – LBA), um dos maiores projetos de cooperação científica internacional já criado, visando explicar o funcionamento da Amazônia como uma biosfera regional, como as mudanças nos usos da terra afetam o clima regional e global, e como as mudanças climáticas globais afetam o funcionamento biológico, químico e físico da floresta e sua sustentabilidade.

A partir dos dados coletados durante o LBA, um número crescente de resultados observacionais e de modelagem tem sido produzido, mostrando que a região desempenha um papel crucial no sistema climático regional e global (COX ET AL., 2008; VON RANDOW ET AL., 2004). Os dados usados neste trabalho, fornecidos por Michiles (2009), foram coletados no decorrer do programa LBA, entre 1º de setembro de 2003 e 31 de maio de 2004, por meio de quatro sistemas instalados numa torre micrometeorológica de alumínio (Figura 3), de 54 m de altura, montada em 1999 numa área de platô médio (130 m acima do nível médio do mar) da floresta da Reserva Biológica de Cuieiras, descrita como torre K34 por Araújo et al. (2002).



Figura 3. Torre micrometeorológica da floresta Rebio Cuieiras.  
Fonte: INPA, 2015.

O primeiro destes sistemas trata-se de uma estação meteorológica automática (“automatic weather station” – AWS) que realizou medições de saldo de radiação, temperatura do ar e precipitação pluviométrica. Os instrumentos e alturas em que se realizaram as medições são detalhados na Tabela 1. Para as medições de saldo de radiação, umidade relativa do ar, velocidade do vento e pressão atmosférica foi utilizado um segundo sistema, chamado “super” plataforma de coleta de dados (SPCD). Na Tabela 2, mostram-se os instrumentos, seus respectivos modelos, fabricantes, alturas em que foram instalados.

Tabela 1. Lista de variáveis meteorológicas e suas unidades de medida, instrumentos, seus respectivos modelos e fabricantes, e altura em que foram realizadas as medições da AWS.

<b>Variável Meteorológica</b>	<b>Instrumento, Modelo, Fabricante</b>	<b>Altura (m)</b>
Saldo de radiação ( $W m^{-2}$ )	Saldo-radiômetro, DRN30, DIDCOT	44,6
Temperatura do ar ( $^{\circ}C$ )	Resistores, PT100, DIDCOT	15,6: 28,0: 35,5: 42,5: 51,1
Precipitação pluviométrica (mm)	Pluviômetro de balança, ARG-100, EM	51,4

Fonte: MICHILES, 2009.

Tabela 2. Como na Tabela 1, para as medições da SPCD.

<b>Variável Meteorológica</b>	<b>Instrumento, Modelo, Fabricante</b>	<b>Altura (m)</b>
Saldo de radiação ( $W m^{-2}$ )	Saldo-radiômetro, NR-LITE, Kipp & Zonen	48,0
Umidade relativa do ar (%)	Termohigrômetro, HMP35C, Vaisala	51,0
Velocidade do vento ( $m s^{-1}$ )	Anemômetro, 18000 RM, Young	51,0
Pressão atmosférica (hPa)	Barômetro, S105, Vaisala	30,0

Fonte: MICHILES, 2009.

Outro sistema, diferente do SPCD citado anteriormente, obteve as medições referente à densidade de fluxo de calor no solo por meio de uma placa de fluxo (modelo HFP01, fabricante Hukseflux Thermal Sensors), enterrada 5 cm abaixo da superfície do solo (Figura 4b). Todos os sensores, ligados nos sistemas descritos até aqui, efetuavam medições a cada minuto, no entanto, os sistemas armazenavam as médias das variáveis meteorológicas a cada 30 minutos.

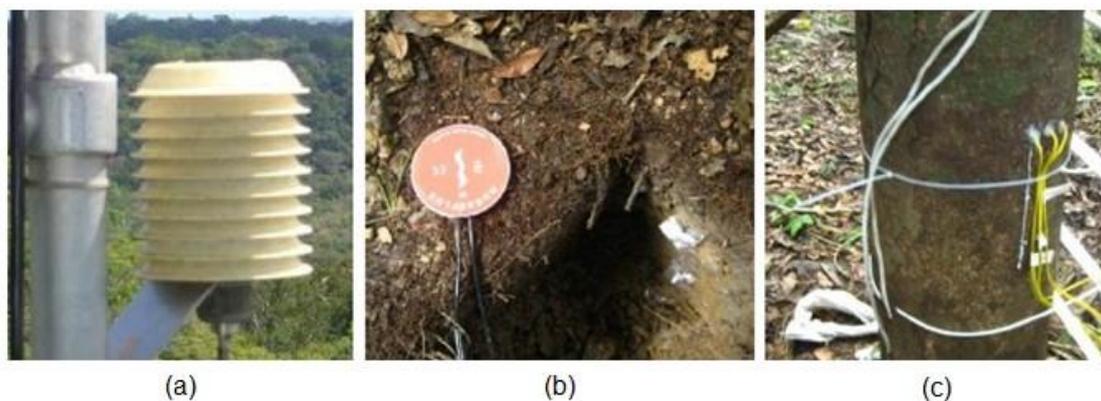


Figura 4. Instrumentos instalados na Rebio Cuieiras: (a) Termo-Higrômetro (b) Placa de fluxo (c) Termopares.

Fonte: MICHILES, 2009.

Enfim, o quarto sistema realizou medições dos três componentes da velocidade do vento, da temperatura do ar e da concentração de vapor de água, detalhados na Tabela 3. Tais medidas foram utilizadas para obtenção das densidades de fluxo turbulento de calores latente e sensível e da velocidade de fricção, mediante utilização do método da covariância dos vórtices turbulentos (MCVT), descrito por Montgomery (1948) e Swinbank (1951). Os valores de saída foram calculados para intervalos de 30 minutos.

Tabela 3. Como na Tabela 1, para as medições do sistema que emprega o MCVT.

Variável Meteorológica	Instrumento, Modelo, Fabricante	Altura (m)
Componente da velocidade do vento ( $\text{m s}^{-1}$ )	Anemômetro sônico tridimensional, solent 1012R2A, Gill	53,1
Temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ )	Anemômetro sônico tridimensional, solent 1012R2A, Gill	53,1
Concentração de vapor de água ( $\text{g m}^{-3}$ )	Analisador de gás por infravermelho de caminho fechado, LI-6262, Licor	53,1

Fonte: MICHILES, 2009.

As temperaturas de tronco foram aferidas por meio de termopares (Figura 4c) do tipo K, compostos de cromo e alumínio, inseridos em três árvores características da área levantada por Oliveira et al. (2008), situada na ZF-2. De acordo com Michiles (2009), tais instrumentos foram instalados nas alturas de 1,5; 9,0 e 18,0 m e nas profundidades radiais de 0,5; 3,0 e 10,0 cm, na qual se mediram as temperaturas, uma vez por minuto, com médias calculadas e armazenadas a cada 10 minutos em “dataloggers” (modelo CR-10, fabricante Campbell Scientific Inc.).

## 2.4 Cálculo da Taxa de Armazenamento de Energia na Floresta

Neste trabalho utilizar-se-ão três métodos para determinação da taxa de armazenamento de energia na floresta. O primeiro será realizado a partir da equação 2.2, empregando os valores do saldo de radiação, dos fluxos turbulentos verticais de calor sensível e de calor latente, e do fluxo de calor no solo medidos diretamente na floresta de interesse. Os outros dois processos terão como base a equação 3.1 descrita nesta Seção, entretanto um deles trata-se de uma abordagem analítica, na qual as séries de temperatura do ar e dos troncos serão obtidas mediante modelagem matemática detalhadas na Seção 2.6 e, por fim, a variação da energia interna também será lograda por meio de métodos numéricos discriminados na Seção 2.7.

De acordo com sua definição termodinâmica, calor é uma forma de energia em trânsito que ocorre mediante uma diferença de temperatura entre a fonte da qual a energia está vindo e o sumidouro para o qual ela está indo. Assim sendo, calor é uma forma de energia cinética. A energia não é calor antes de começar a fluir ou após o fluxo ter cessado (PARKER, 1984, p.839-842; SEARS E SALINGER, 1975).

Desse modo, Michiles (2009) estabelece que a taxa de armazenamento de energia  $S$  em uma floresta, definida na Seção 1.3, é composta por termos que representam os armazenamentos acima do solo: térmico no ar ( $S_{air}$ ) e térmico na biomassa ( $S_{bio}$ ), Portanto:

$$S = S_{air} + S_{bio} \quad (\text{Eq.3.1})$$

O termo  $S_{air}$  possui dois componentes que resultam das mudanças de temperatura no ar  $S_T$ , e de umidade específica  $S_q$ , como segue:

$$S_{air} = S_T + S_q \quad (\text{Eq.3.2})$$

e a taxa de armazenamento de energia na biomassa da floresta  $S_{bio}$  é segmentada em três partes principais, a saber:

$$S_{bio} = S_{tr} + S_{cr} + S_{ll} \quad (\text{Eq.3.3})$$

na qual  $S_{tr}$ ,  $S_{cr}$  e  $S_{ll}$  são respectivamente, a taxa de armazenamento de energia nos troncos, na copa das árvores e no estrato inferior da floresta. A componente  $S_{cr}$  pode ser fracionada em três parcelas, ou seja:

$$S_{cr} = S_{br} + S_{tw} + S_{lv} \quad (\text{Eq.3.4})$$

em que  $S_{br}$ ,  $S_{tw}$  e  $S_{lv}$ , é, nessa ordem, a taxa de armazenamento de energia nos ramos, nos galhos e nas folhas. Por sua vez, a  $S_{ll}$  é estabelecida por meio de cinco elementos da biomassa, isto é:

$$S_{ll} = S_{st} + S_{sl} + S_{dw} + S_{lt} + S_{oc} \quad (\text{Eq.3.5})$$

na qual  $S_{st}$  é a taxa de armazenamento de energia nas árvores pequenas (com diâmetros menores que 10 cm),  $S_{sl}$  e  $S_{dw}$  representam, respectivamente, a taxa nas mudas e na madeira morta (em pé ou caída sobre o solo),  $S_{lt}$  é a taxa nas raízes externas e na liteira fina, que se compõe essencialmente de folhas mortas depositadas sobre o solo da floresta, e  $S_{oc}$  é a taxa nos componentes de pequeno porte da biomassa, incluindo palmáceas, trepadeiras e outras partes não lenhosas.

### 2.4.1 Taxa de Armazenamento de Energia no Ar

A partir da equação 2.3, na qual o calor flui verticalmente através de um volume elementar de ar cuja altura é  $dz$  e a área superficial é  $dA$ , causando alterações nos valores de massa específica, calor específico à pressão constante e na temperatura do volume de ar, a taxa de armazenamento de energia resultante das variações de temperatura  $S_T$ , é dada de acordo com Michiles (2009), como:

$$S_T = \frac{1}{A_G} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \int_0^{z_r} \rho_a c_p T dA dz \quad (\text{Eq.3.6})$$

Como o valor da área  $A$  em que ocorre o fluxo vertical de calor é, aproximadamente, igual ao da área do solo  $A_G$  ocupada pela floresta, e assumindo que  $\rho_a$  (igual a  $1,225 \text{ kg m}^{-3}$ ) e  $c_p$  (igual a  $1004 \text{ J kg}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) são constantes no tempo e no espaço, até o nível de referência  $z_r$ , a equação 3.6 reduz-se a:

$$S_T = \rho_a c_p \int_0^{z_r} \frac{dT}{dt} dz \quad (\text{Eq.3.7})$$

De maneira análoga à  $S_T$ , a taxa de armazenamento de energia no ar, causada pelas mudanças nos valores de umidade específica  $S_q$ , é dada por:

$$S_q = \frac{1}{A_G} \frac{\partial}{\partial t} \int_S \int_0^{z_r} \rho_a L q dA dz \quad (\text{Eq.3.8})$$

na qual  $L$  (igual a  $2,44 \times 10^6 \text{ J kg}^{-1}$ ) e  $q$  são, respectivamente, o calor latente de vaporização da água e a umidade específica do ar. Aplicando o mesmo raciocínio utilizado para o termo  $S_T$ , e admitindo que  $\rho_a$  e  $L$  não variam com  $z_r$ , a equação 3.8 torna-se:

$$S_q = \rho_a L \int_0^{z_r} \frac{dq}{dt} dz \quad (\text{Eq.3.9})$$

### 2.4.2 Taxa de Armazenamento de Energia nos Troncos

As medidas de temperatura de tronco necessárias para realização dos cálculos serão tomadas a partir de um tronco representativo, que apresenta, entre as espécies dominantes, as características médias dos  $N$  indivíduos encontrados na área  $A_G$  da floresta, em termos de massa específica, calor específico e dimensões espaciais (diâmetro e altura). Portanto, Michiles (2009) define que o cálculo aproximado da taxa de armazenamento de energia nos troncos  $S_{tr}$ , é dado pela equação 2.3, escrita em coordenadas cilíndricas, ou seja:

$$S_{tr} = \frac{N}{A_G} \frac{\partial}{\partial t} \int_0^{z_r} \int_0^{2\pi} \int_0^R \rho_{tr} c_{tr} T_{tr} r dr d\theta dz \quad (\text{Eq.3.10})$$

na qual  $\rho_{tr}$ ,  $c_{tr}$ ,  $r$  e  $R$  são, respectivamente, a massa específica (ou verde), o calor específico, a variável radial e o raio do tronco médio,  $T_{tr}$  é a temperatura medida no tronco da árvore representativa, e  $z_{tr}$  é a altura de referência onde os sensores serão instalados no tronco. Não obstante, é necessário incluir na equação 3.10, um fator de correção  $U_f$ , que relacione o volume entre duas seções retas de um cone (tronco de cone) com o volume cilíndrico considerado, em virtude da geometria natural dos troncos ser relativamente cônica (BLANKEN ET AL., 1997). Desse modo, integrando a equação 3.10 em  $\theta$ , a taxa de armazenamento de energia nos troncos pode ser obtida por meio de:

$$S_{tr} = \frac{N}{A_G} 2\pi \rho_{tr} c_{tr} \int_0^{z_r} \left( \int_0^R \frac{\partial T_{tr}}{\partial t} r dr \right) U_f dz \quad (\text{Eq.3.11})$$

admitindo que  $T_{tr}$  não varia com o ângulo, e que  $\rho_{tr}$  e  $c_{tr}$  são constantes radialmente e verticalmente (MICHILES, 2009). Na Tabela 4, encontram-se os valores de variável radial, raio do tronco médio, fator de correção, e suas respectivas profundidades radiais e alturas de referência.

Tabela 4. Lista de variáveis radiais  $r_i$ , raio do tronco médio  $R_i$ , fator de correção  $U_{fi}$ , e suas respectivas profundidades radiais  $P_{ri}$  e alturas de referência  $z_{tr}$  estimadas para Rebio Cuieiras.

$z_{tr}$	1,5 m			9,0 m			18,0 m
$P_{ri}$ (cm)	0,5	3,0	10,0	0,5	3,0	10,0	10,0
$r_i$ (m)	0,118	0,093	0,023	0,102	0,077	0,007	0,008
$R_i$ (m)	0,123	0,123	0,123	0,107	0,107	0,107	0,091
$U_{fi}$	1,000	1,000	1,000	1,153	1,153	1,153	1,182

Fonte: MICHILES, 2009.

#### 2.4.3 Taxa de Armazenamento de Energia na Copa e no Estrato Inferior.

Com base na equação 2.3, Michiles (2009) destaca que a taxa de armazenamento de energia na copa das árvores (ramos, galhos e folhas) e também no estrato inferior da floresta (árvores pequenas, mudas, madeira morta, liteira e em componentes de pequeno porte da biomassa) pode ser expressa por:

$$S_{bc} = \frac{\rho_{bc} c_{bc} V_{bc}}{A_G} \frac{\partial T_{rc}}{\partial t} \quad (\text{Eq.3.12})$$

sendo  $\rho_{bc}$  e  $c_{bc}$ , respectivamente, a massa específica e o calor específico estimados para cada um dos componentes da biomassa citados anteriormente, e  $T_{rc}$  é a temperatura de referência usada para o cálculo de  $S$  em cada um desses componentes.

Assumindo que  $\rho_{bc}$ ,  $c_{bc}$  e  $T_{rc}$  são constantes em todo volume individual dos componentes e que a massa fresca por unidade de área do solo é  $m_{bc} = \rho_{bc} V_{bc} / A_G$ , os termos  $S_{br}$ ,  $S_{tw}$ ,  $S_{lw}$ ,  $S_{st}$ ,  $S_{sl}$ ,  $S_{dw}$ ,  $S_{lt}$  e  $S_{oc}$  podem, de acordo com Michiles (2009), ser conjecturados por intermédio da seguinte equação:

$$S_{bc} = m_{bc}c_{bc} \frac{\partial T_{rc}}{\partial t} \quad (\text{Eq.3.13})$$

Os termos calculados, as temperaturas de referência (pode ser do ar ou do tronco da árvore representativa), as alturas e as profundidades em que estas temperaturas foram medidas estão detalhados na Tabela 5. Os valores utilizados neste trabalho, referente ao conteúdo dos calores específicos e da massa fresca por unidade de área do solo, para cada componente da biomassa da floresta da Rebio Cuieiras, encontram-se na Tabela 6.

Tabela 5. Componentes de  $S$  na biomassa calculados, as temperaturas de referência usadas ( $T$  para o ar e  $T_{tr}$  para o tronco da árvore representativa), as alturas e as profundidades em que foram medidas.

<b>Componente de <math>S</math></b>	<b>Temperatura de Referência</b>	<b>Altura (Profundidade)</b>
$S_{br}$ (ramos)	$T_{tr}$	9,0 m (0,5 cm)
$S_{tw}$ (galhos)	$T$	28,0 m
$S_{lv}$ (folhas)	$T$	28,0 m
$S_{st}$ (árvores pequenas)	$T_{tr}$	1,5 m (0,5 cm)
$S_{sl}$ (mudas)	$T$	15,6 m
$S_{dw}$ (madeira morta)	$T_{tr}$	1,5 m (0,5 cm)
$S_{lt}$ (liteira)	$T$	15,6 m
$S_{oc}$ (pequeno porte)	$T$	15,6 m

Fonte: MICHILES, 2009.

Tabela 6. Valores do calor específico ( $c_{bc}$ ) e da massa fresca por unidade de área de solo ( $m_{bc}$ ) para cada componente da biomassa da floresta da Rebio Cuieiras.

<b>Componente da Biomassa</b>	$c_{bc}$ (J kg <sup>-1</sup> °C <sup>-1</sup> )	$m_{bc}$ (kg <sup>-2</sup> )
Troncos	2410,7	43,79
Ramos	2401,3	11,88
Galhos	2460,6	9,75
Folhas	2771,1	1,34
Árvores Pequenas	2401,3	4,27
Mudas	2460,6	2,87
Madeira Morta	1731,0	6,28
Liteira	2506,2	2,74
Pequeno Porte	2460,6	3,68

Fonte: MICHILES, 2009.

## 2.5 Cálculo da Umidade Específica

Conforme descrito na Seção 2.3 (Tabela 2), as medições de umidade relativa do ar ocorreram apenas na altura de 51 metros na torre micrometeorológica da Rebio Cuieiras. Entretanto para o cálculo mais preciso do componente  $S_q$  da taxa de armazenamento de energia no ar da floresta (Secção 3.4.1), faz-se necessário o uso de medidas nas outras alturas consideradas (5,2; 15,6; 28,0; 35,5; e 42,5 m). Segundo Michiles (2009), é possível mensurar os perfis de umidade relativa, tomando-se como base os dados de temperatura do ar nos respectivos níveis, por meio da seguinte expressão, lograda para estação seca:

$$UR_i = -0,17T_i^2 + 4,88T_i + 71,03 \quad (\text{Eq.3.14})$$

nas quais  $UR_i$  e  $T_i$  representam, respectivamente, as umidades relativas e temperaturas do ar em cada nível de altura  $i$ .

Com base nos valores de  $UR$  calculados, será determinada a pressão de vapor  $e_i$ , utilizando a relação simples:

$$e_i = \frac{UR \cdot e_{si}}{100} \quad (\text{Eq.3.15})$$

com  $e_{si}$  denotando a pressão de saturação de vapor, na qual contabilizou-se mediante dados de temperatura absoluta do ar, de temperatura e pressão de vapor do ponto de ebulição da água em cada nível de altura  $i$ . Para maiores detalhes, consultar Michiles (2009).

Dessa forma, considerando as medições horárias de pressão atmosférica  $p_{atm}$ , as umidades específicas  $q_i$  para cada nível de altura  $i$ , podem ser conjecturadas por meio de:

$$q_i = \frac{0,622e_i}{p_{atm} - 0,378e_i} \quad (\text{Eq.3.16})$$

## 2.6 Modelagem Matemática das Séries de Temperatura

A interface solo-vegetação-atmosfera foi dividida em camadas de espessuras diferentes, onde os níveis em que se realizaram as medições das temperaturas do ar foram 5,2; 15,6; 28,0; 35,5; 42,5 e 51,1 metros. Já as temperaturas dos troncos foram coletadas em 1,5; 9,0 e 18,0 metros, porém em cada altura, instalaram-se sensores em três profundidades radiais do tronco: que foram 0,5; 3,0 e 10,0 cm (Seção 2.3).

Conforme detalhado nas Seções anteriores, as componentes da taxa de armazenamento de energia podem ser calculadas por meio dos fluxos de calor que ocorrem no ar e na biomassa. Tais fluxos podem ser estimados a partir do uso das séries de temperatura do ar e dos troncos, medidas em área de florestas da Amazônia.

Seja  $T(t)$  a temperatura no instante  $t$  (dado em horas, por exemplo), observa-se que para dois dias diferentes, obter-se-á duas curvas que não são, em geral, as mesmas. Estas curvas são chamadas trajetórias do processo físico que está sendo observado, no qual cada trajetória denomina-se série temporal (parte de uma trajetória dentre muitas que poderiam ter sido observadas). Portanto, para dias **sem precipitação pluviométrica e pouca perturbação atmosférica** (Figura 5a), é possível aproximar as séries de temperatura do ar e dos troncos por meio da função harmônica, dada por:

$$T(t) = T_m + \Delta T \cos(\omega t + \varphi) \quad (\text{Eq.3.17})$$

na qual  $T_m$ ,  $\Delta T$  e  $\varphi$  são respectivamente, a temperatura média, a amplitude (diferença entre os valores máximo e mínimo da temperatura), e o ângulo de fase. A grandeza  $\omega$  é chamada frequência angular, e possui a dimensão do inverso do tempo, ou seja,  $\omega = 2\pi/\tau$ , com  $\tau$  correspondente ao período do movimento (24 horas).

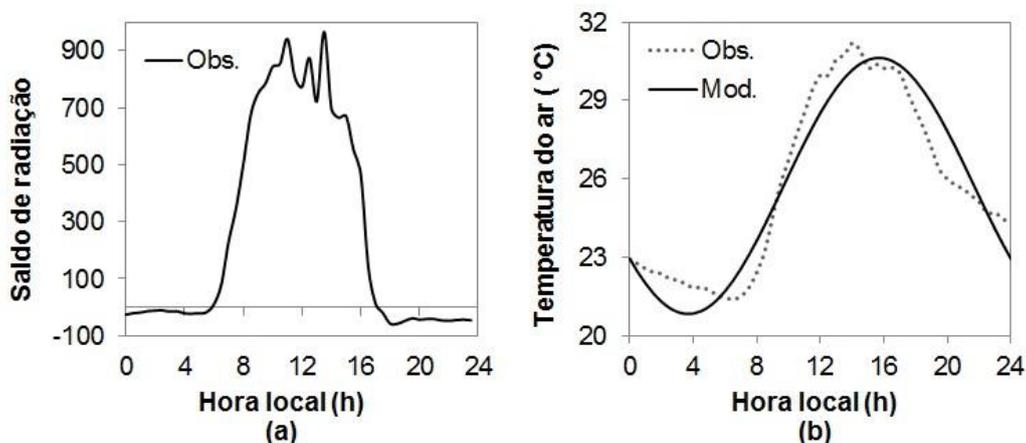


Figura 5. Perfil médio do dia 06/09/2003 referente aos (a) saldos de radiação observados e (b) temperaturas do ar observadas e modeladas, para intervalos de meia hora.  
Fonte: AUTOR, 2018.

A partir da Figura 5b, nota-se que a série de temperatura do ar observada (dados medidos) por diferentes instrumentos (ver Seção 2.3), na Rebio Cuieiras, correlaciona-se melhor durante períodos com baixa perturbação atmosférica, esta conjuntura, confirma-se por meio do ajuste linear entre os dados, e o coeficiente de determinação  $r^2$  relacionado (Figura 6),

onde este último, conforme Barroso et al. (1987), é utilizado para medir a qualidade do ajuste linear simples, sendo  $0 \leq r^2 \leq 1$ . Logo, quanto mais próximo o coeficiente de determinação estiver da unidade, melhor será o ajuste.

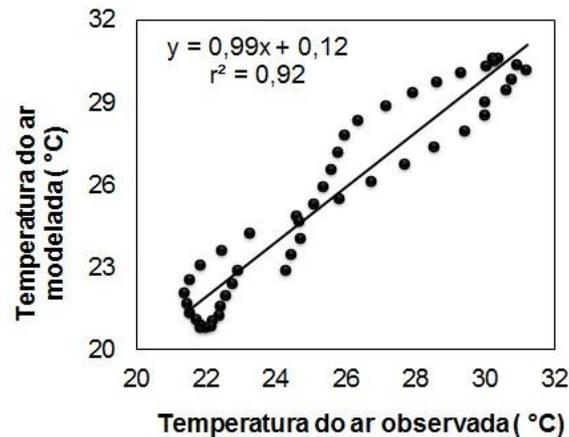


Figura 6. Ajuste linear entre valores horários de temperaturas do ar observados e modelados, coletados na altura de 5,2 m, do dia 06 de setembro de 2003, na Rebio Cuieiras. Fonte: AUTOR, 2018.

Seja  $T'(t) = dT/dt$ , para realização do cálculo da variação da energia interna dos termos acima do solo a partir da equação 3.1, e de dados de temperatura do ar e do tronco modelados via equação 3.17, faz-se necessário obter regressões polinomiais pelo método dos quadrados mínimos, entre as funções  $T'(t)$  obtidas mediante modelo matemático e os níveis de referência  $z_r$  relacionados, com o objetivo de encontrar coeficientes  $\alpha, \alpha_1, \alpha_2 \dots \alpha_n$  tais que a função  $f(z)$  se aproxime ao máximo de  $T'(t)$  no intervalo  $[0, z_r]$ . Ou seja:

$$\int_0^{z_r} T'(t) dz \cong \int_0^{z_r} f(z) dz \quad (\text{Eq.3.18})$$

com  $f(z) = \alpha + \alpha_1 z + \alpha_2 z^2 + \dots + \alpha_p z^p$ . Dentro do critério dos quadrados mínimos, segundo Ruggiero (1997), os coeficientes  $\alpha_k$  são os que minimizam a função. Geometricamente, isto significa que a área entre as curvas  $T'(t)$  e  $f(z)$  é mínima.

Entretanto, dentre as componentes de S na biomassa, a taxa de armazenamento de energia nos troncos é a mais difícil de estimar visto que

esta depende de medições de temperatura verticais e radiais, e exigem-se informações a respeito da distribuição das espécies e de sua biomassa, das propriedades térmicas e das dimensões dos troncos que compõem a floresta. Além disso, em florestas naturais, há um grande número de espécies de árvores que reverte numa larga banda de dimensões espaciais e propriedades térmicas de tronco.

Desta maneira, quando não se dispõem de medidas de perfil de temperatura nos troncos, o método mais simples é aproximar a  $T_{tr}$  usando diretamente a temperatura do ar. Observando o perfil diário apresentado na Figura 7a, nota-se que há uma relação de fase e amplitude entre as medições de temperaturas dos troncos e temperaturas do ar na Rebio Cuieiras. Portanto, a partir dessas relações, será modelada, conforme ilustrado na Figura 7b, a série temporal de  $T_{tr}$  para cada dia selecionado. Observa-se a eficiência dessa aproximação por meio do ajuste linear entre os valores de temperatura do tronco observados (medidos) e os valores de  $T_{tr}$  modelados, e da obtenção do coeficiente de determinação igual a 0,90 (Figura 7c).

Com o intuito de encontrar as séries de temperaturas do tronco nas alturas específicas e nas respectivas profundidades radiais (0,5; 3,0 e 10,0 cm), empregar-se-á, como referência, as séries de temperatura do ar na altura de 5,2 metros (para altura de tronco 1,5 e 9,0 m) e 15,6 metros (para altura de tronco de 18,0 m).

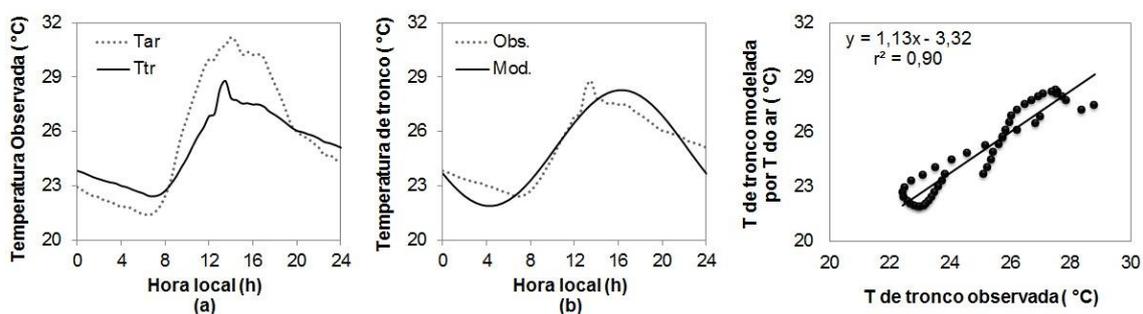


Figura 7. Perfil médio do dia 06/09/2003 referente a: (a) Relação de fase e amplitude entre temperaturas do ar e do tronco observadas. (b) Temperaturas do tronco observadas e modeladas (c) Ajuste linear entre valores horários de temperaturas do tronco observadas e modeladas, na altura de 9,0 m e profundidade radial de 0,5 cm.

Fonte: AUTOR, 2018.

## 2.7 Métodos Numéricos

Ao tentar representar um evento do mundo físico por meio de um método matemático, raramente se tem uma descrição correta desse fenômeno. Normalmente, são necessárias várias simplificações do mundo físico para que se tenha um modelo. Assim, neste estudo, serão utilizados recursos numéricos para encontrar soluções “aproximadas” das componentes de  $S$  a fim de comparar os resultados com aqueles obtidos via modelagem matemática simplificada (ver Seção 2.6). A avaliação do modelo será realizada por intermédio da obtenção dos coeficientes linear (ponto de interceptação do eixo das ordenadas), angular (inclinação da reta) e de determinação ( $r^2$ ), de regressões lineares entre os valores de meia hora das densidades de fluxos de calor, modelados e numéricos. O ajuste ideal é representado pelos valores 0, 1 e 1 para os coeficientes linear, angular e de determinação, respectivamente.

Nesta conjuntura, a partir de medições das séries de temperatura do ar e do tronco, coletadas na floresta de interesse, será calculada a aproximação de derivadas por meio de diferenças finitas centradas, isto é:

$$T'(t) \cong \frac{dT_k}{dt} \cong \frac{T_{k+1} - T_{k-1}}{2(t_k - t_{k-1})} \quad (\text{Eq.3.19})$$

em que  $T_{k+1} - T_{k-1}$  é a diferença entre as temperaturas subsequente e antecedente, em um intervalo de tempo  $(t_k - t_{k-1})$ .

Em situações práticas, geralmente não se dispõe de um modelo analítico, de uma função a ser integrada, mas sim de uma tabela de pontos, tornando-se necessária a aplicação de procedimentos numéricos. Destarte, com base nos resultados das derivações estimadas em cada instante  $t$ , lograr-se-ão as integrais utilizando a regra dos trapézios composta, como a seguir:

$$\int_0^{z_r} \frac{dT_k}{dt} dz \cong \sum_{i=1}^l \left[ \left( \frac{dT_{i+1}}{dt} + \frac{dT_i}{dt} \right) \frac{(z_{i+1} - z_i)}{2} \right] \cong \sum_{i=1}^l A_{z_r} \quad (\text{Eq.3.20})$$

ou seja, a integral de  $T'(t)$  no intervalo  $[0, z_r]$  pode ser aproximada pelas áreas dos trapézios de base menor  $dT_i/dt$ , base maior  $dT_{i+1}/dt$  e alturas das camadas horizontais  $l$  de espessuras variáveis  $(z_{i+1} - z_i)$ .

Entretanto, tendo em vista que a temperatura do tronco se altera com os níveis de profundidade radiais  $r_{ij}$  e com os níveis de altura  $z_{tr}$  em que foram instalados os instrumentos na árvore, baseado na equação 3.11, a derivada aproximada, fazendo uso de diferenças finitas centradas, torna-se:

$$T_{tr}'(t) \cong \frac{dT_{tr(k)}}{dt} \cong \left( \frac{T_{tr(k+1)} - T_{tr(k-1)}}{2(t_k - t_{k-1})} \right) r_{ij} \quad (\text{Eq.3.21})$$

Por conseguinte, têm-se primeiramente a integração em cada raio de tronco  $r_{ij}$ , no intervalo  $[0, R]$ , e seus respectivos níveis de altura na qual serão encontradas as áreas  $A_{ij}$  referentes a cada anel concêntrico de tronco  $n_{tr}$ , obtidas pelo método dos trapézios, por meio da equação:

$$\int_0^R \frac{dT_{tr}}{dt} r_{ij} dr \cong \sum_{ij=1}^{n_{tr}} A_{ij} \quad (\text{Eq.3.22})$$

em que,

$$A_{ij} = \left[ \left( \frac{dT_{tr(ij+1)}}{dt} r_{ij+1} \right) + \left( \frac{dT_{tr(ij)}}{dt} r_{ij} \right) \right] \frac{(r_{ij+1} - r_{ij})}{2} \quad (\text{Eq.3.23})$$

Em seguida, com o processo de integração, análogo ao anterior, e a partir de cada área  $A_{ij}$  determinada, tomando o intervalo  $[0, z_r]$ , e seus respectivos fatores de correção  $U_{f(i)}$ , lograr-se-ão os volumes de tronco relativos a cada camada horizontal de tronco  $l_{tr}$ , na qual  $z_{tr(i+1)} - z_{tr(i)}$  é a variação de altura dessa camada. Assim:

$$\int_0^{z_r} \left( \sum_{ij=1}^{n_{tr}} A_{ij} \right) U_{f(i)} dz \cong \sum_{ij=1}^{l_{tr}} \left[ (A_{ij+1} + A_{ij}) U_{f(i)} \frac{(z_{tr(i+1)} - z_{tr(i)})}{2} \right] \quad (\text{Eq.3.24})$$

### 3 RESULTADOS

Para os resultados observados (medidas diretas das densidades de fluxo de energia), numéricos e modelados, utilizar-se-ão as abreviações “Obs”, “Num” e “Mod”, respectivamente, todos referentes ao conjunto de dias selecionados, descritos na Seção 3.1.

As soluções obtidas serão retratadas de duas maneiras, no primeiro momento serão mostrados os perfis médios diários de  $S$  causados pelas variações de temperatura e umidade específica do ar, nos troncos, na copa das árvores e no estrato inferior da floresta, nessa ordem,  $\overline{S_T}$ ,  $\overline{S_q}$ ,  $\overline{S_{tr}}$ ,  $\overline{S_{cr}}$  e  $\overline{S_{ll}}$ , modeladas e numéricas, nas quais as barras (–) denotam as médias diárias. Posteriormente, apresentar-se-ão o comportamento médio diário da taxa de armazenamento total de energia,  $S$ , obtida por meio dos três métodos ( $\overline{S Obs}$ ,  $\overline{S Num}$  e  $\overline{S Mod}$ ), assim como a obtenção das regressões lineares para períodos diurno (entre 6h30min e 18h), noturno (entre 18h30min e 6h) e diário, do conjunto total de dias designados, construídas a partir de dois cenários, compostos pelas combinações entre  $S Obs$  e  $S Num$ , assim como por  $S Mod$  e  $S Num$ , a fim de verificar como essas variáveis se relacionam e qual a qualidade do ajuste entre elas. Adicionalmente, denotar-se-ão as contribuições percentuais totais de cada componente para  $S$ , modelada e numérica, calculadas como a razão média entre os somatórios diurnos do componente em particular e de  $S$ .

#### 3.1 Seleção de Dados

Os dados disponibilizados para realização deste trabalho foram coletados durante um total de 274 dias, entre 1º de setembro de 2003 e 31 de maio de 2004, conforme descrito na Seção 2.3. Considerando que os dias com pouca perturbação atmosférica é uma das premissas deste trabalho, designou-se, conforme Michiles (2009), os meses de setembro e outubro de 2003, para descrever a estação seca para a Rebio Cuieiras. Contudo, durante estes dois meses ocorreu uma precipitação acumulada de 168,2 mm, com 28 dias

(45,9 %) apresentando alguma quantidade de chuva. Além disso, ocorreram falhas no conjunto de dados coletados, em razão de frequentes problemas de funcionamento dos instrumentos instalados no sítio da Rebio Cuieiras, ou seja, alguns intervalos de dados não estavam completos.

Diante disso, em virtude das falhas detalhadas acima, levando em conta o conjunto completo de grandezas físicas necessárias para a efetivação dos cálculos e mantendo-se o rigor indispensável às análises realizadas nesta pesquisa, optou-se pelo não preenchimento artificial de falhas, reduzindo-se assim, o número de dias selecionados. Destarte, foram eleitos 10 dias típicos não necessariamente consecutivos, cujos dados estão completos, ou seja, dos 61 dias de medições da estação seca, apenas 10 dias apresentaram condições de **pouca perturbação atmosférica nos quais não houve precipitação pluviométrica e/ou falha nos dados coletados.**

Tabela 7. Dias selecionados representando a estação seca de 2003, com datas, valores médios diários de temperatura do ar ( $T_{ar}$ ) e de tronco ( $T_{tr}$ ), saldo de radiação ( $R_N$ ), e densidades de fluxo turbulento de calor sensível ( $H$ ), de calor latente ( $LE$ ), e de calor no solo ( $G$ ).

<b>Data</b>	$T_{ar}$ (°C)	$T_{tr}$ (°C)	$R_N$ ( $Wm^{-2}$ )	$H$ ( $Wm^{-2}$ )	$LE$ ( $Wm^{-2}$ )	$G$ ( $Wm^{-2}$ )
06/09/03	27,0	25,0	256	48,0	115	0,57
09/09/03	28,1	25,3	235	26,4	136	1,08
10/09/03	28,3	26,0	243	32,9	140	1,04
22/09/03	26,7	24,5	189	32,4	77,8	0,75
24/09/03	29,2	25,9	169	26,8	94,2	1,12
29/09/03	28,5	25,2	133	28,8	129	1,41
11/10/03	28,3	25,7	97	45,3	107	0,17
23/10/03	28,5	25,3	208	33,4	122	0,46
25/10/03	29,0	26,1	200	27,3	132	0,28
31/10/03	25,9	24,5	134	33,8	81,5	-0,80

Fonte: AUTOR, 2018.

O conjunto de dias selecionados apresentam-se na Tabela 7, com as datas, e valores médios diários de temperatura do ar (em 51,0 m) e de tronco (na altura de 9,0 m e profundidade radial 3,0 cm), ambos em  $^{\circ}\text{C}$ , saldo de radiação (em 48,0 m) e densidades de fluxo turbulento de calor (em 53,1 m), todos em  $\text{Wm}^{-2}$ . Essas grandezas fazem parte de um conjunto de variáveis meteorológicas que determinam o clima de uma região, dessa forma apresentam-se a seguir, os ciclos médios diários de alguns desses elementos, a fim de demonstrar as condições atmosféricas predominantes na Rebio Cuieiras, durante o período utilizado nesta pesquisa.

O perfil médio diário de temperatura do ar apresentou valores máximos e mínimos, respectivamente, no período da tarde e durante a madrugada. Entretanto, a umidade relativa, razão entre pressão de vapor atual e saturado, atingiu seu percentual máximo diário, em torno de 91 %, no mesmo instante em que se registrou a menor temperatura diária,  $23,8^{\circ}\text{C}$  às 6h, como mostra a Figura 8a. Assim, com o aumento da temperatura, a umidade relativa alcançou valores mínimos, próximos de 52 %, denotando que as características apresentadas por estes perfis são inversamente proporcionais. Além disto, como a água possui um elevado calor específico, observou-se uma menor amplitude térmica em horários nos quais o percentual de umidade relativa foram superiores.

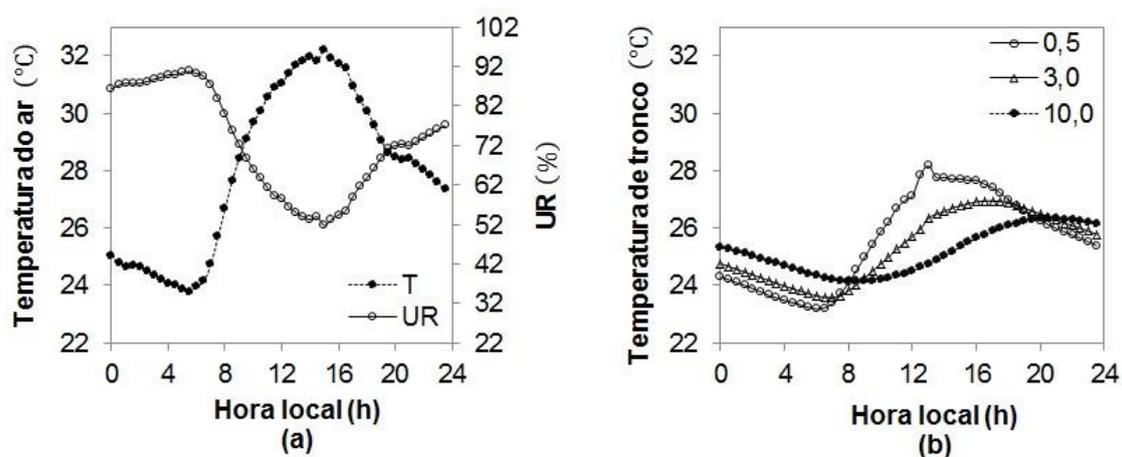


Figura 8. Perfis médios diários de (a) temperatura e umidade relativa do ar, na altura de 51,0 m (b) temperatura de tronco medidas nas profundidades de 0,5, 3,0 e 10,0 cm, na altura de 9,0 m, referente ao conjunto de dias selecionados.

Fonte: AUTOR, 2018.

Na Figura 8b, demonstram-se os perfis médios diários das temperaturas de tronco, na altura 9,0 m, nas quais observa-se amplitudes e fases diferentes entre as profundidades de 0,5 cm, 3,0 cm e 10,0 cm, denotando que a variação térmica diminuiu de fora para o centro do tronco, com uma diferença em torno de 2,0 °C, entre a temperatura mais interna (10,0 cm) e a temperatura externa (0,5 cm).

A radiação solar,  $R_N$ , alcançou máximos e mínimos médios, em torno de  $650 \text{ Wm}^{-2}$  e  $-31,0 \text{ Wm}^{-2}$ , nessa ordem, como ilustra a Figura 9, obtendo um saldo de radiação médio diário, de aproximadamente  $13,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ . Esta variável, aliada à precipitação pluviométrica, está diretamente relacionada com as densidades de fluxos de calor, pois a variação da temperatura provoca o aumento de  $G$  e  $H$  e, em conjunto com o déficit de pressão de vapor, amplia a demanda evaporativa. No entanto, a densidade de fluxo de calor no solo ( $G$ ), apresentou um saldo médio diário de  $0,05 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , medida bastante inferior em comparação às demais densidades, no qual o saldo médio diário foi de  $8,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e  $2,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , para os fluxos turbulentos de calores, latente ( $LE$ ) e sensível ( $H$ ), respectivamente.

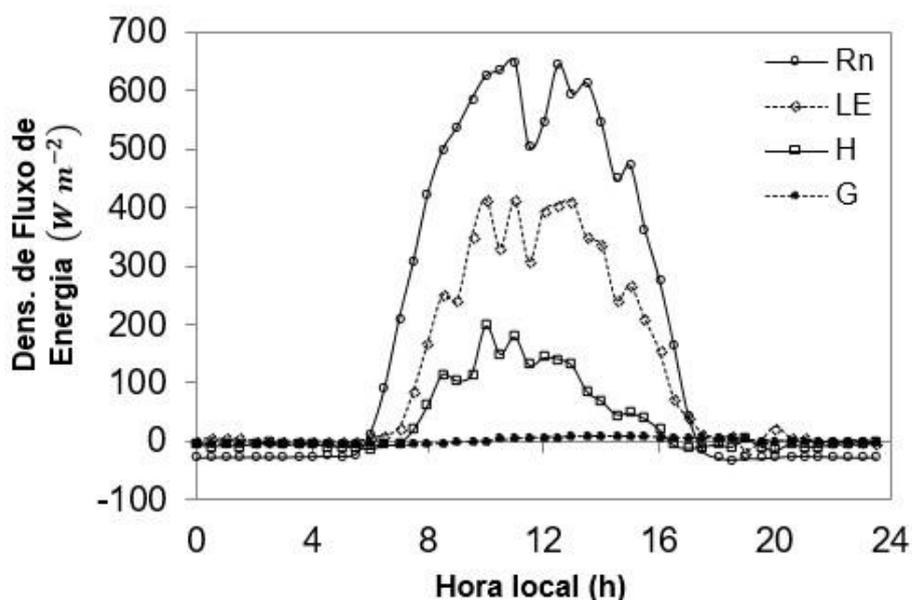


Figura 9. Perfis médios diários das densidades de fluxo de energia dos componentes do balanço de energia ( $R_N$ ,  $LE$ ,  $H$  e  $G$ ).

Fonte: AUTOR, 2018.

### 3.2 Taxa de Armazenamento de Energia no Ar

A partir das séries de temperatura do ar, coletadas na floresta de interesse, utilizaram-se os métodos numéricos descritos na Seção 2.7 para estimar as taxas de armazenamento térmico de energia no ar, causada pela variação de temperatura,  $S_T Num$ , assim como, obtiveram-se as temperaturas máxima, média e mínima do ar e empregou-se a metodologia descrita na Seção 2.6 para calcular  $S_T Mod$ . O perfil médio diário, numérico ( $\overline{S_T Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_T Mod}$ ), referente ao conjunto de dias selecionados, apresentam-se na Figura 10a. Nota-se que  $\overline{S_T Mod}$  apresentou um perfil semelhante à  $\overline{S_T Num}$ , com valores positivos durante a manhã, atingindo seus máximos médios diários entre 8h30min e 9h30min, tornando-se negativo no final da tarde, por volta de 15h, mantendo-se assim durante todo período noturno, porém a amplitude máxima de  $\overline{S_T}$  modelado, mostrou-se inferior, cerca de  $16 W m^{-2}$  em relação a  $\overline{S_T}$  numérico, exatamente no momento após o amanhecer.

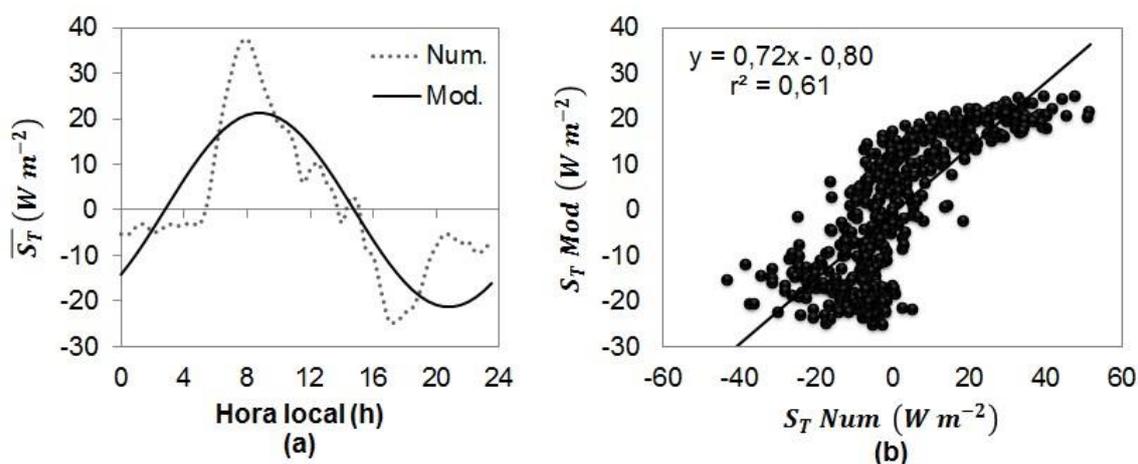


Figura 10. (a) Perfis médios diários de  $S$  no ar, numérico ( $\overline{S_T Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_T Mod}$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia no ar, modelada ( $S_T Mod$ ) e numérica ( $S_T Num$ ), causada pela variação de temperatura.

Fonte: AUTOR, 2018.

Adicionalmente, mostra-se mediante Figura 10b, a relação entre a variável resposta,  $S_T Mod$ , e a variável independente,  $S_T Num$ , por intermédio de regressões lineares, na qual o coeficiente de determinação obtido foi de  $r^2 = 0,61$ . Neste caso, pode-se afirmar que cerca de 60 % da variabilidade de

$S_T Mod$  é explicada pela variável independente, sendo o restante explicado por fatores não incluídos no modelo.

A fim de se obter o comportamento horário médio de  $S$  no ar, resultante das mudanças de umidade específica, via cálculo numérico ( $\overline{S_q Num}$ ) e modelo simplificado ( $\overline{S_q Mod}$ ), fez-se necessário o uso de valores horários de pressão atmosférica e de temperatura do ar, seguindo a metodologia descrita na Seção 2.5. O ciclo médio diário obtido,  $\overline{S_q Mod}$ , apresentou uma combinação de duas funções harmônicas, evidenciando dois máximos médios diários, o primeiro por volta de 7h, e o outro às 17h30min, mantendo o perfil correspondente ao do ciclo médio diário,  $\overline{S_q Num}$  (Figura 11a). Muito provavelmente, isso se deve ao fato de que, as umidades específicas, numérica e modelada, terem sido obtidas por meio de cálculo de pressão de vapor atual do ar, que é diretamente proporcional as variações de umidade relativa e pressão de vapor saturado do ar, na qual ambas foram estimadas por intermédio das séries de temperatura medidas na floresta e modeladas.

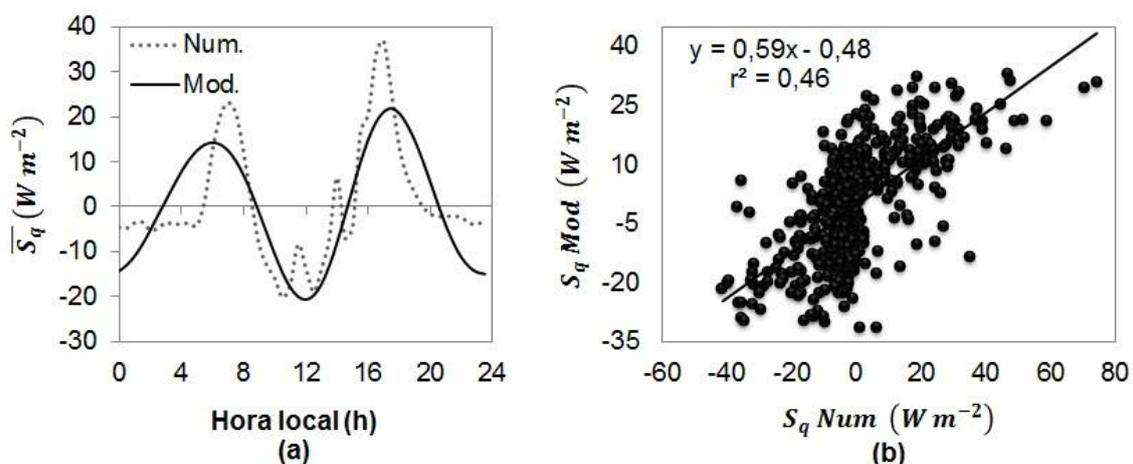


Figura 11. (a) Perfis médios diários de  $S$  no ar, numérico ( $\overline{S_q Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_q Mod}$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia no ar, modelada ( $S_q Mod$ ) e numérica ( $S_q Num$ ), resultante das mudanças de umidade específica.

Fonte: AUTOR, 2018.

O ajuste linear, por mínimos quadrados, entre todos os dados horários de  $S_q Mod$  e  $S_q Num$ , destaca-se na Figura 11b, a qual se percebe claramente, que há uma relação linear positiva entre as variáveis, de modo que maiores

taxas de  $S_q Num$  tendem a corresponder a maiores números de  $S_q Mod$ . Entretanto, há uma dispersão de pontos em torno da linha reta de regressão, sugerindo que alguma variação de  $S_q Mod$  não é dependente de  $S_q Num$ , com coeficientes de determinação em torno de  $r^2 = 0,46$ .

### 3.3 Taxa de Armazenamento de Energia nos Troncos

Os perfis diários das temperaturas de tronco medidas na Rebio Cuieiras, na altura de 18,0 m e profundidades radiais 3,0 cm e 10,0 cm, apresentaram diferenças entre as séries de temperatura, com picos elevados, por volta de 14h, que não se observaram em outras profundidades. Dessa forma optou-se por excluir esses dados coletados, nos cálculos de  $S$  nos troncos,  $S_{tr}$ , a fim de evitar superestimativas em seus valores. Provavelmente, esta variação de temperatura observada, se deva a erros de leitura instrumental ou ainda, a um breve aumento de radiação solar causada pela movimentação do dossel ou mudança de posição do sol durante o dia.

Na Figura 12a e Figura 12b, apresentam-se os ciclos médios diários do componente de armazenamento de energia nos troncos,  $\overline{S_{tr} Num}$  e  $\overline{S_{tr} Mod}$ , e a representação gráfica do conjunto de dias selecionados, respectivamente. Nota-se que a média das séries de temperatura, modelada e numérica, conduzem-se de maneira equivalente, com valores positivos durante o dia e negativos a partir de 16h. Entretanto, na solução analítica, temos a amplitude de temperatura espelhada, variando em torno de  $10 Wm^{-2}$ , enquanto que o resultado numérico apresenta taxas máximas entre 8h30min e 13h, denotando uma diferença de amplitude superior, aproximadamente 100% maior, nesse intervalo. Ainda assim, pela regressão linear entre o conjunto de dias estimados, observa-se que  $S_{tr Mod}$  correlaciona-se bem com  $S_{tr Num}$ , correspondendo aproximadamente a 70 % ( $r^2 = 0,69$ ) dos valores de  $S_{tr Num}$ . Além disso, para cada aumento de uma unidade na variável explicativa,  $S_{tr Num}$ , aumenta-se em 1,12 a variável resposta,  $S_{tr Mod}$ , coeficiente considerado aceitável.

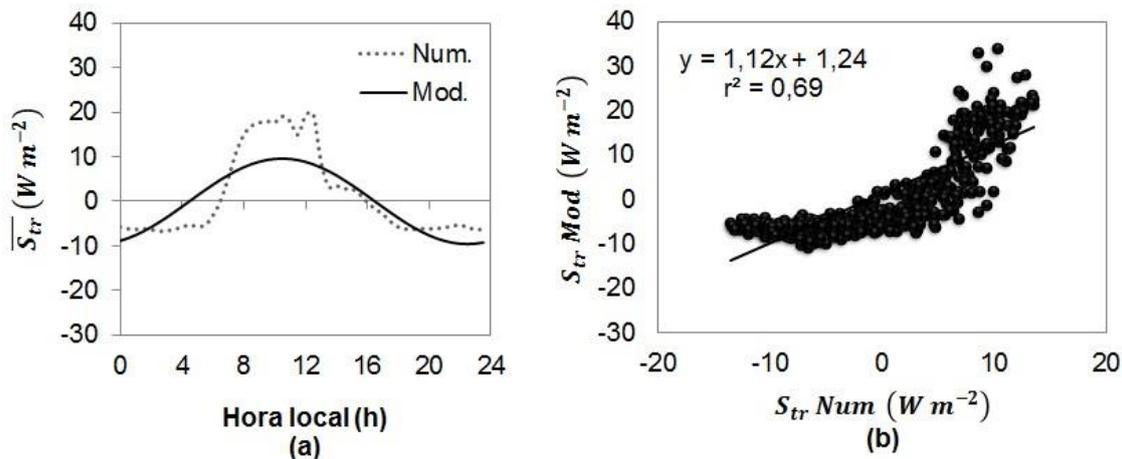


Figura 12. (a) Perfis médios diários de  $S$  nos troncos, numérico ( $\overline{S_{tr} Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_{tr} Mod}$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia nos troncos, modelada ( $S_{tr} Mod$ ) e numérica ( $S_{tr} Num$ ) para o conjunto de dias selecionados.

Fonte: AUTOR, 2018.

### 3.4 Taxa de Armazenamento de Energia na Copa e no Estrato Inferior

No segmento do raciocínio feito nas seções anteriores, apresentam-se os perfis médios diários dos demais componentes de  $S$  na biomassa. O comportamento horário dos termos  $S_{tw}$ ,  $S_{lv}$ ,  $S_{sl}$ ,  $S_{lt}$  e  $S_{oc}$  segue aquele apresentado por  $S_T$ , no entanto com magnitudes diferentes, uma vez que se empregaram séries de temperatura do ar para o cálculo destes (Seção 2.4.3). De maneira análoga, se fez uso de medidas de temperatura de tronco como referência para o cálculo dos componentes  $S_{br}$ ,  $S_{st}$  e  $S_{dw}$ , assim o perfil horário apresentado por estes termos acompanham o perfil horário de  $S_{tr}$ , não obstante com diferentes dimensões. Desta forma, optou-se por apresentar os perfis médios diários concernentes ao somatório destes elementos (Eq. 3.4 e Eq. 3.5), ou seja, as variações de energia interna na copa das árvores,  $S_{cr}$ , e no estrato inferior da floresta,  $S_{ll}$ .

Na Figura 13a, mostram-se os perfis médios diários de  $S$  na copa das árvores, numérico ( $\overline{S_{cr} Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_{cr} Mod}$ ), nos quais os mínimos médios diários alcançados ficaram em torno de  $-16 W m^{-2}$ . Já os valores máximos médios diários, numérico e modelado, foram de  $24 W m^{-2}$  e  $16 W m^{-2}$ , respectivamente, com uma diferença de aproximadamente 30%. Para quantificar a capacidade explicativa do modelo, apresentam-se por meio

da Figura 13b, a regressão linear entre,  $S_{cr} Mod$  e  $S_{cr} Num$ , nos quais os coeficientes angular e de determinação obtidos foram de 0,81 e 0,61, nessa ordem, representando um ajuste admissível.

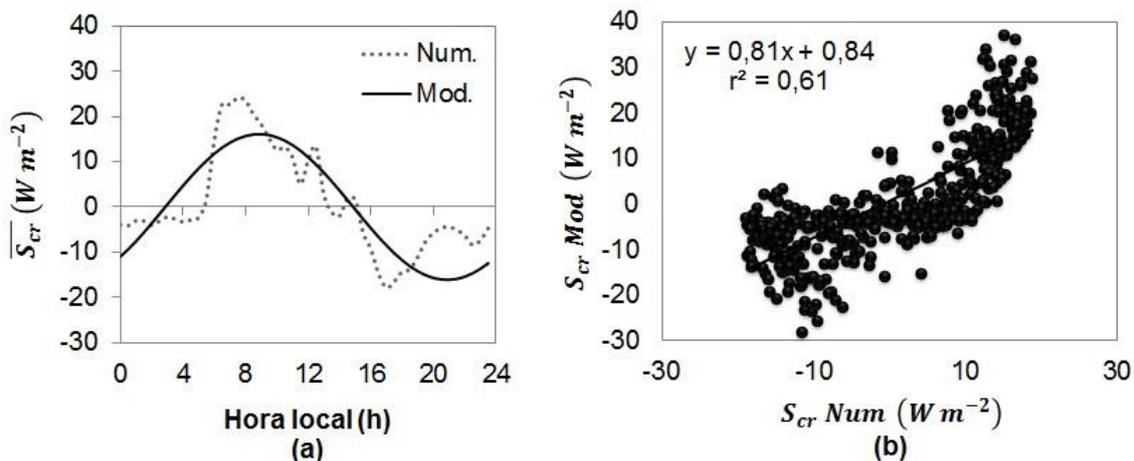


Figura 13. (a) Perfis médios diários de  $S$  na copa das árvores, numérico ( $\overline{S_{cr} Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_{cr} Mod}$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia  $S_{cr} Mod$  e  $S_{cr} Num$  para o conjunto de dias selecionados. Fonte: AUTOR, 2018.

Os perfis médios diários do somatório dos componentes de  $S$  no estrato inferior, obtidos via modelagem numérica e analítica, ou seja,  $\overline{S_{II} Num}$  e  $\overline{S_{II} Mod}$ , mostram-se na Figura 14a. Similarmente ao comportamento médio horário dos demais termos de  $S$  na biomassa, ambos os ciclos apresentaram valores positivos pela manhã, e negativos no período noturno. Dentre os componentes de  $S$  na biomassa, os perfis que compõem  $\overline{S_{II} Mod}$  ( $S_{tw}$ ,  $S_{lv}$ ,  $S_{sl}$ ,  $S_{lt}$  e  $S_{oc}$ ) foram os que encerraram as menores magnitudes individuais, variando em geral,  $\pm 3 W m^{-2}$ , para os dez dias analisados. É possível observar, a partir da Figura 14b que a regressão, entre  $S_{II} Mod$  e  $S_{II} Num$ , é significativa. O modelo  $y = 0,84x + 0,49$  pode ser considerado de boa qualidade para realizar previsões de  $S_{II} Mod$ , com coeficiente de determinação de 0,61, representando um poder razoável de explicação dos valores de  $S_{II} Mod$  por  $S_{II} Num$ .

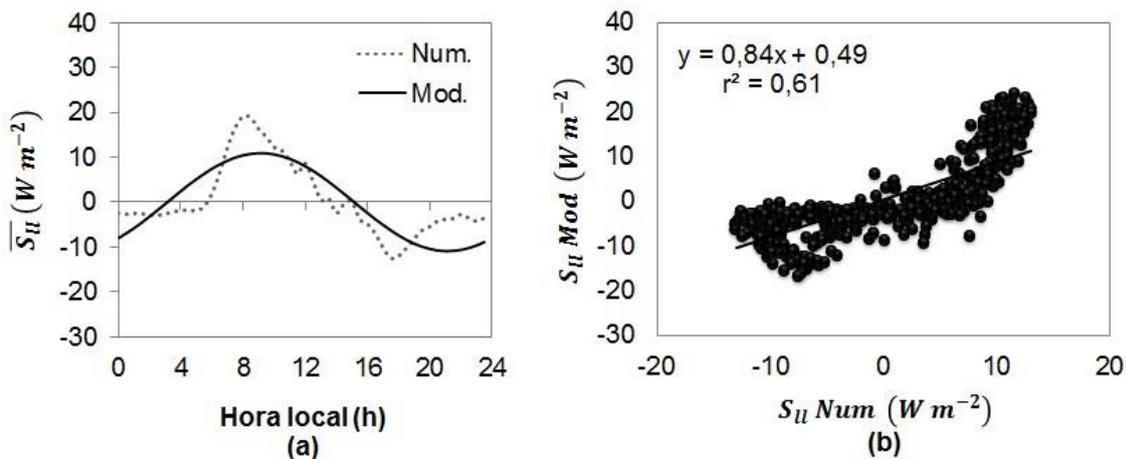


Figura 14. (a) Perfis médios diários de  $S$  no estrato inferior, numérico ( $\overline{S_U Num}$ ) e modelado ( $\overline{S_U Mod}$ ), calculados para intervalos de meia hora. (b) Regressão linear entre as taxas de armazenamento térmico de energia  $S_{U Mod}$  e  $S_{U Num}$  para o conjunto de dias selecionados. Fonte: AUTOR, 2018.

### 3.5 Taxa de Armazenamento Total de Energia

Por meio da lei de conservação da energia e da utilização de dados das densidades de fluxos de calor, empregou-se a equação 2.2, com a finalidade de se obter a taxa de armazenamento total de energia observada,  $S_{Obs}$ , para intervalos de meia hora, correspondente aos 10 dias selecionados. Assim, fez-se uso de medidas diretas do saldo de radiação ( $R_N$ ) e das densidades de fluxo turbulento de calor sensível ( $H$ ), de calor latente ( $LE$ ), e de calor no solo ( $G$ ), coletadas na Reserva Biológica do Cuieiras. Quanto ao cômputo da variação total de energia interna, modelada ( $S_{Mod}$ ) e numérica ( $S_{Num}$ ), empregou-se o somatório, das taxas de armazenamento de energia no ar e na biomassa, conforme equação 3.1, referente aos valores horários, obtidos nas Seções 3.2, 3.3 e 3.4.

Apresentam-se os perfis médios diários das variações de energia interna,  $\overline{S_{Num}}$ ,  $\overline{S_{Mod}}$  e  $\overline{S_{Obs}}$ , na Figura 15. Em geral, observa-se que  $\overline{S_{Mod}}$  se comporta de uma maneira similar a  $\overline{S_{Num}}$ , com exceção do fluxo de energia ter sido invertido aproximadamente 3h antes de  $\overline{S_{Num}}$ , ainda durante o ciclo noturno, e que a magnitude mínima de  $\overline{S_{Mod}}$  teve um acréscimo em torno de 40 %, ao passo que a amplitude máxima foi reduzida cerca de 50 % em relação à  $\overline{S_{Num}}$ . À vista disso, no que concerne ao saldo diário de energia

absorvida pela floresta,  $\bar{S} Mod$  alcançou valores próximos de zero, indicando que, praticamente toda energia retida foi liberada, enquanto que  $\bar{S} Num$ , denotou um fluxo convergente, com saldo diário em torno de  $0,4 MJ m^{-2} dia^{-1}$ , ou melhor, a energia armazenada excedeu a energia liberada. Este fato ocorre normalmente, em dias com elevados valores de saldo de radiação solar.

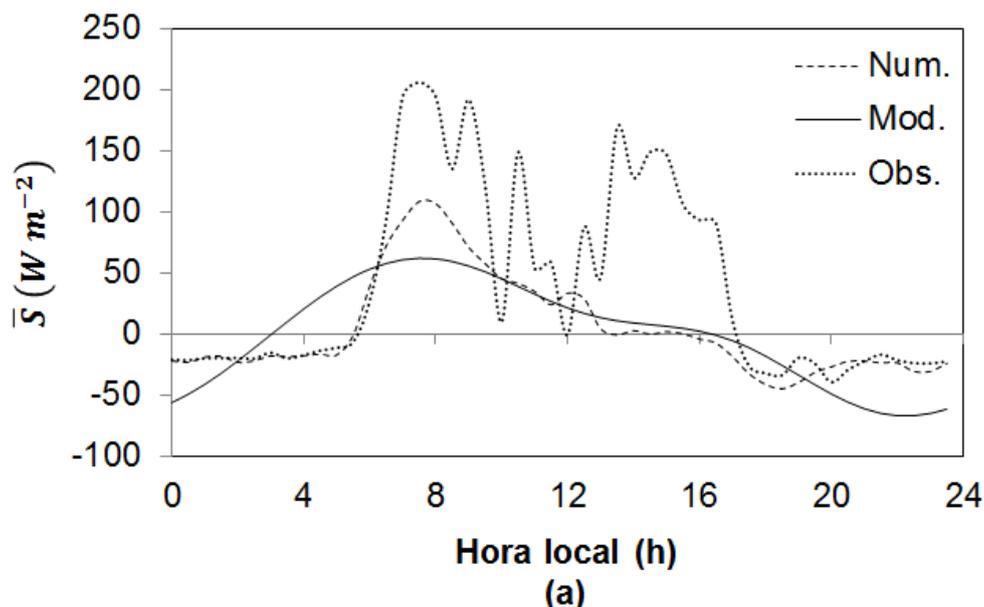


Figura 15. Perfis médios diários das taxas de armazenamento de energia numérico ( $\bar{S} Num$ ), modelado ( $\bar{S} Mod$ ) e observado ( $\bar{S} Obs$ ).  
Fonte: AUTOR, 2018.

A variação média de energia interna observada,  $\bar{S} Obs$ , apresenta valores positivos durante o dia, invertendo o sentido do fluxo durante a noite, com um desempenho equivalente a  $\bar{S} Num$ , apesar de possuir amplitudes diferentes, especialmente no período diurno. Entretanto, denota valores extremos entre 8h e 14h, variando cerca de  $200 W m^{-2}$  (Figura 15), ou seja, percebem-se diversos picos, indicando um acelerado processo de armazenamento e liberação de energia em um curto intervalo de tempo.

Muito provavelmente, as variações apresentadas por  $\bar{S} Obs$ , se deva ao fato de seus componentes ( $R_N$ ,  $H$ ,  $LE$  e  $G$ ) terem sido medidos separadamente em campo, podendo manifestar: i) medições ineficazes relacionadas aos instrumentos, haja vista que alguns dispositivos tendem a subestimar as densidades de fluxo energia; ii) aplicação de métodos inadequados, como o

MCVT (expostos na literatura corrente), usado para obter indiretamente as densidades de fluxo turbulento verticais de calor sensível e latente (Seção 2.3); iii) heterogeneidade da superfície, visto que esta pode causar trocas de energia mediante escoamento giratório e deslocamento de massa no sentido horizontal; iv) compreensão incompleta do sistema físico, ao desconsiderar certos termos de armazenamento de energia, como fluxos advectivos, em consequência de limitações experimentais em campo.

Nas Figuras 16, 17 e 18, têm-se as regressões entre  $S_{Obs}$  e  $S_{Num}$ , assim como por  $S_{Mod}$  e  $S_{Num}$ , nas quais se utilizou valores diário, diurno e noturno, a fim de evidenciar particularidades entre os modelos em diferentes momentos do dia. Diante disto, nota-se nos gráficos de dispersão, à esquerda, que os pontos do diagrama estão mais afastados da reta de regressão, ou seja, os valores de  $S_{Obs}$  estão distantes dos valores de  $S_{Num}$ . De fato, os coeficientes de determinação obtidos foram de 0,23, 0,07, e 0,11, respectivamente, para valores diários, matutinos e noturnos, sugerindo que apenas uma pequena parcela da taxa de armazenamento total de energia observada, pode ser compreendida por  $S_{Num}$ , sendo que a parcela restante refere-se a elementos não considerados em  $S_{Obs}$ .

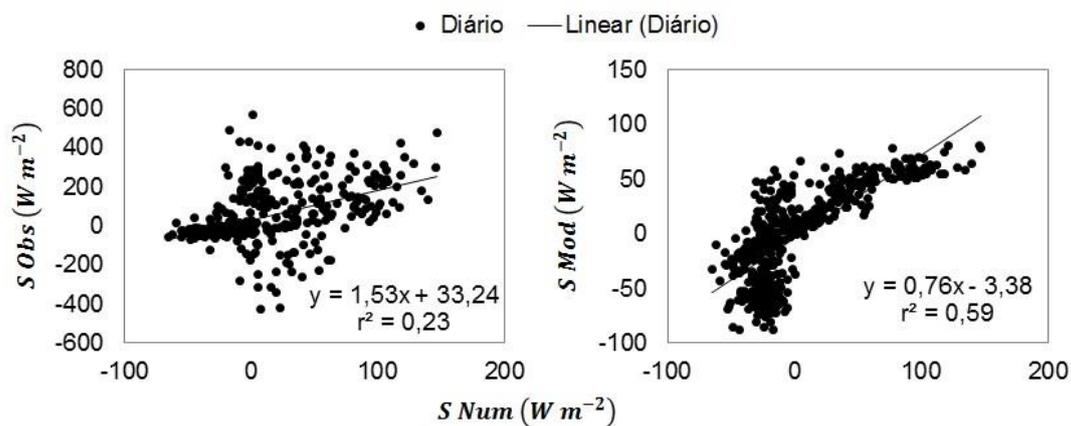


Figura 16. Regressões lineares diárias entre  $S_{Obs}$  e  $S_{Num}$  (à esquerda) assim como por  $S_{Mod}$  e  $S_{Num}$  (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.

Fonte: AUTOR, 2018.

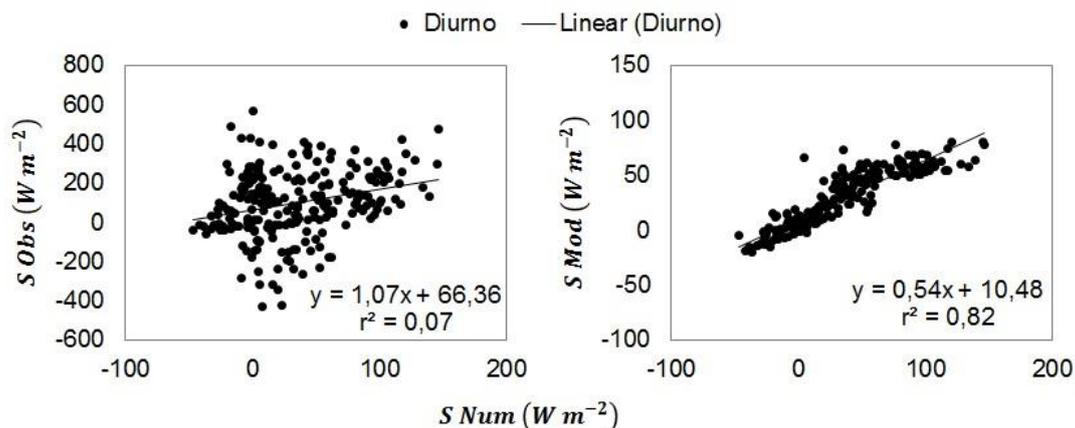


Figura 17. Regressões lineares diurnas entre  $S Obs$  e  $S Num$  (à esquerda) assim como por  $S Mod$  e  $S Num$  (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.  
Fonte: AUTOR, 2018.

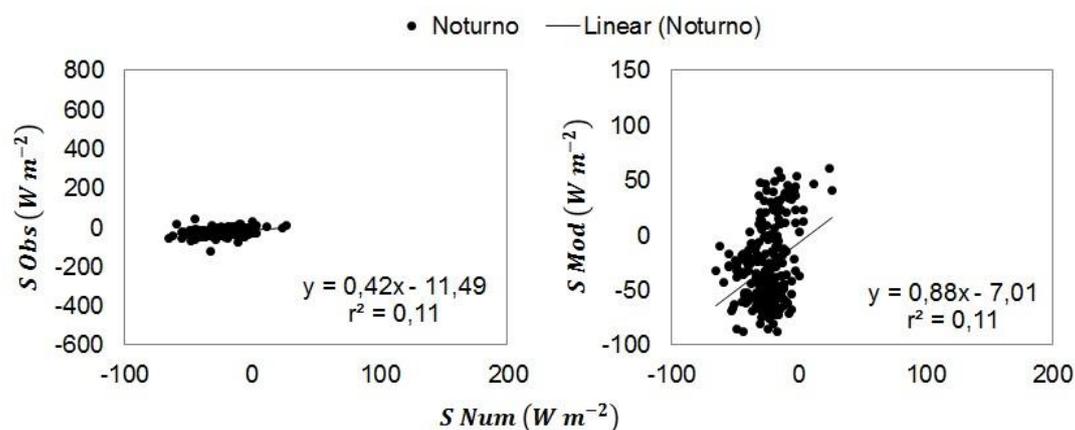


Figura 18. Regressões lineares noturnas entre  $S Obs$  e  $S Num$  (à esquerda) assim como por  $S Mod$  e  $S Num$  (à direita) referente ao conjunto de dias selecionados.  
Fonte: AUTOR, 2018.

Nos resultados apresentados nas figuras acima, verificou-se que valores de  $S$  modelados são mais adequados para descrever as variações de energia interna em comparação à  $S Obs$ , visto que as variações de  $S Mod$  foram explicadas por, aproximadamente, 60 % de  $S Num$ , durante o período diário, ou seja, houve uma melhor correspondência entre as taxas de armazenamento de energia, modeladas e numéricas.

Ao se comparar valores do coeficiente de determinação das regressões lineares entre  $S Mod$  e  $S Num$ , no ciclo diário ( $r^2 = 0,59$ ) e diurno ( $r^2 = 0,82$ ), observou-se uma correlação cerca de 20 % maior nos ciclos diurnos. Todavia, as regressões noturnas apresentam dispersões de pontos muito altas, de forma que se obtiveram valores insatisfatórios de  $r^2$ , apesar do coeficiente angular

obtido (0,88) ter sido aceitável. Entretanto, por meio de  $S_{Mod}$ , é possível obter um melhor entendimento dos processos físicos que ocorrem na floresta, em comparação à  $S_{Obs}$ , uma vez que a variação da energia interna observada tende a ser superestimada.

Adicionalmente, na Tabela 8, detalham-se o erro médio absoluto ( $W m^{-2}$ ) e relativo (%) de  $\bar{S}$ ,  $\bar{S}_T$ ,  $\bar{S}_q$ ,  $\bar{S}_{ll}$ ,  $\bar{S}_{cr}$  e  $\bar{S}_{tr}$  do modelo matemático, obtido por meio da diferença entre os somatórios médios diurnos, modelados e numéricos. Em geral, no método simplificado, verificaram-se divergências entre os valores, tanto positivas quanto negativas, em relação ao método numérico. Os saldos diurnos de  $\bar{S}_T Mod$ ,  $\bar{S}_{ll} Mod$  e  $\bar{S}_{cr} Mod$  apresentaram-se maiores, em torno de 10 %, com erro absoluto entre  $7 W m^{-2}$  e  $14 W m^{-2}$ , enquanto  $\bar{S}_q Mod$  e  $\bar{S}_{tr} Mod$  mostraram-se inferiores, em média 100 % e 32 %, respectivamente. Entretanto, no que concerne ao somatório médio diurno da taxa de armazenamento total de energia,  $\bar{S} Mod$  evidenciou uma diferença de densidade de fluxo de apenas  $-113 W m^{-2}$ , denotando um erro relativo de aproximadamente 14 %, em comparação à  $\bar{S} Num$ .

Tabela 8. Erros médios (em  $W m^{-2}$  e %) de  $\bar{S}$  e suas componentes  $\bar{S}_T$ ,  $\bar{S}_q$ ,  $\bar{S}_{ll}$ ,  $\bar{S}_{cr}$  e  $\bar{S}_{tr}$ , obtidos por meio da diferença entre os resultados, modelados e numéricos.

Erro médio	$\bar{S}_T$	$\bar{S}_q$	$\bar{S}_{ll}$	$\bar{S}_{cr}$	$\bar{S}_{tr}$	$\bar{S}$
Absoluto ( $W m^{-2}$ )	7,1	-81,3	10,9	14,0	-63,8	-113
Relativo (%)	3,0	-100	9,0	8,0	-32,0	-14,0

Fonte: AUTOR, 2018.

Com intuito de demonstrar em valores percentuais, as contribuições totais de cada um dos principais componentes para  $S$ , apresentam-se na Tabela 9, as razões médias, modelada e numérica, envolvendo os somatórios diurnos de  $S$ ,  $S_T$ ,  $S_q$ ,  $S_{ll}$ ,  $S_{cr}$  e  $S_{tr}$ , assim como de  $S_{ar}$  e  $S_{bio}$ , para o conjunto de dias selecionados.

Nota-se de um modo geral, que em termos percentuais, as razões de  $S$  calculadas por intermédio da modelagem matemática proposta, tiveram diferenças, de aproximadamente 5 %, em comparação com aquelas alcançadas via método numérico. Contudo, em particular, do total de  $S_{Mod}$  absorvida, cerca de 21 % foi retida pelos troncos e nenhum armazenamento de energia ocorreu no ar devido a mudanças nos valores de umidade específica, enquanto que estas mesmas componentes, obtidas pelo cálculo numérico, representaram respectivamente, em torno de 26 % e 10 %, do total de  $S_{Num}$ . Além disso,  $S_{tr, Num}$  foi a variável mais representativa dentre os componentes da biomassa ( $S_{ll}, S_{cr}, S_{tr}$ ), fato este, não validado em  $S_{tr, Mod}$ .

Tabela 9. Razões (%) envolvendo  $S$ ,  $S_T$ ,  $S_q$ ,  $S_{ar}$ ,  $S_{tr}$ ,  $S_{cr}$ ,  $S_{ll}$  e  $S_{bio}$  para o conjunto de dias selecionados.

<b>Método</b>	$\frac{S_T}{S}$	$\frac{S_q}{S}$	$\frac{S_{ll}}{S}$	$\frac{S_{cr}}{S}$	$\frac{S_{tr}}{S}$	$\frac{S_{ar}}{S}$	$\frac{S_{bio}}{S}$
Modelado	34,1	0,00	19,0	26,4	20,4	34,1	65,9
Numérico	28,4	10,2	15,0	20,9	25,5	38,6	61,4

Fonte: AUTOR, 2018.

Ainda assim, as taxas de armazenamento de energia no ar e na biomassa, modeladas e numéricas, representaram cerca de 36 % ( $S_{ar}$ ) e 63 % ( $S_{bio}$ ) do total de  $S$ , nessa ordem, com uma variação de  $\pm 4,5$  % entre os métodos. Destarte, comparando-se o somatório de  $S_{ar}$  e  $S_{bio}$  modelados, isto é, o armazenamento total de energia,  $S_{Mod}$  representou 86 % de  $S_{Num}$ , ratificando que o modelo proposto oferece um bom indicativo quando se quer quantificar a variação interna total de energia em uma floresta. Vale ressaltar, que o modelo é simplificado e satisfaz apenas as condições em que se apresentam pouca perturbação atmosférica, e que os cálculos das componentes individuais de  $S$ , são suscetíveis a erros.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em consequência da necessidade de compreender as contribuições da Floresta Amazônica para as trocas de energia com a atmosfera, assim como os processos e efeitos climáticos envolvidos com os componentes da vegetação, estimaram-se as taxas de armazenamento de energia ( $S$ ) sobre uma área de Floresta de terra firme da Amazônia, por meio de medições diretas de saldos dos fluxos de calor ( $S_{Obs}$ ) assim como por metodologias (Seção 2.4) logradas por Michiles (2009), nas quais empregaram-se cálculo numérico ( $S_{Num}$ ) e funções harmônicas simples ( $S_{Mod}$ ), esta última, em consequência da heterogeneidade e biodiversidade da Floresta Amazônica, dos erros e das dificuldades inerentes às medições, aplicou-se uma quantidade reduzida de dados. Para atingir os objetivos da pesquisa, fizeram-se uso de um conjunto de informações florestais e de variáveis meteorológicas coletadas durante a estação seca de 2003, no decorrer do programa LBA, mediante sistemas instalados numa torre micrometeorológica de alumínio, K34, montada na Reserva Biológica do Cuieiras, também conhecida como ZF-2. Outrossim, selecionaram-se dias com pouca perturbação atmosférica e sem precipitação pluviométrica.

Em termos máximos médios diários,  $\bar{S}_{Obs}$  apresentou as maiores magnitudes, chegando até  $200 \text{ W m}^{-2}$ , enquanto que  $\bar{S}_{Mod}$  e  $\bar{S}_{Num}$  permaneceram com valores mais baixos, cerca de  $62 \text{ W m}^{-2}$  e  $108 \text{ W m}^{-2}$ , respectivamente. Por volta de 17h e 18h, iniciou-se o processo de liberação de energia, com todas as taxas tornando-se negativas, alcançando magnitudes mínimas diárias entre  $-45$  e  $-67 \text{ W m}^{-2}$ . Verificou-se também, um fluxo convergente de energia em,  $\bar{S}_{Num}$  e  $\bar{S}_{Obs}$ , com saldos médios diários em torno de  $0,4 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$  e  $2,8 \text{ MJ m}^{-2} \text{ dia}^{-1}$ , nessa ordem, com  $\bar{S}_{Obs}$  relativamente maior, visto que manifestou diversos picos ao longo do ciclo diário. Já  $\bar{S}_{Mod}$ , denotou amplitudes espelhadas, evidenciando que praticamente toda energia absorvida pela floresta foi liberada, isto é, atingiu um saldo médio diário de energia próximo de zero.

Para o cálculo de  $S_{Mod}$ , determinaram-se, em termos horários, as taxas de armazenamento de energia nos diferentes componentes da floresta,  $S_T$ ,  $S_q$ ,

$S_{ul}$ ,  $S_{cr}$  e  $S_{tr}$ , por meio de séries de umidade relativa do ar, e temperatura do ar e de tronco. Visto que as medições numa floresta tropical são particularmente difíceis de obter e suscetíveis a erros, estimaram-se os perfis citados anteriormente, por intermédio de modelagem matemática (Seção 2.6) nas quais se utilizaram metodologias mais simples e informações diárias de temperatura máxima, média e mínima do ar, medidas nas alturas 5,2; 15,6; 28,0; 35,5; 42,5 e 51,1 da Floresta. Em valores médios diurnos, constatou-se que não houve variação de energia interna causada pelas mudanças nos valores de umidade específica do ar ( $S_q$ ), todavia obteve-se que em torno de 34 % de  $S$  foi devido ao armazenamento de energia do ar, resultante das variações de temperatura ( $S_T$ ), 27 % à  $S$  na copa das árvores ( $S_{cr}$ ) e o restante à soma de  $S$  nos troncos e no estrato inferior da floresta ( $S_{tr} + S_{ul}$ ).

Com o propósito de determinar  $S_{Num}$  e seus componentes, empregaram-se recursos numéricos (Seção 2.7) e fez-se uso de um conjunto de dados mensurados diretamente na Rebio Cuieiras, em intervalos de meia hora, tais como temperatura do ar logradas em cinco alturas da torre K34 e temperaturas de tronco, obtidas nas profundidades radiais de 0,5; 3,0 e 10,0 cm e alturas de 1,5; 9,0 e 18,0 m, concernentes a uma árvore representativa, a qual apresenta as características médias da floresta. Observou-se que, 10 % e 28 % de  $S$  foram causadas em razão das mudanças nos valores de umidade específica ( $S_q$ ) e das variações de temperatura ( $S_T$ ) do ar, respectivamente. Ao passo que 25 % de  $S$  foi em virtude ao armazenamento de energia nos troncos ( $S_{tr}$ ), e os demais 37 % à soma de  $S$  na copa das árvores ( $S_{cr}$ ) e no estrato inferior ( $S_{ul}$ ).

Por meio de dados das densidades de fluxo turbulento verticais de calores sensível e latente, do fluxo de calor no solo e do saldo de radiação, medidos na Floresta, a uma altura de 51,0 m, obtiveram-se a taxa de armazenamento total de energia observado,  $S_{Obs}$ , mediante aplicação da equação simplificada do balanço energia em superfície (Eq. 2.2). Verificou-se que em média, durante o período diurno, em torno de 56 % da energia proveniente do saldo de radiação ( $R_N$ ) foi utilizada no processo de evapotranspiração ( $LE$ ), 20 % para o aquecimento da atmosfera ( $H$ ) e um

pouco menos de 1 % para armazenamento no solo ( $G$ ). Assim, aproximadamente 24 % referem-se ao armazenamento na floresta ( $S_{Obs}$ ).

Para analisar as relações e comparar as saídas alcançadas pelo modelo matemático proposto e por meio de medições diretas, aplicaram-se regressões lineares simples, considerando  $S_{Num}$  como variável independente, para períodos diurno, noturno e diário. Verificaram-se coeficientes de determinação insatisfatórios em  $S_{Obs}$  para todos os ciclos, e que este foi superestimado, com relação à  $S_{Num}$ , correspondendo aproximadamente ao triplo do armazenamento médio diurno de energia, enquanto  $S_{Mod}$  equiparou-se a 85 % de  $S_{Num}$ , no mesmo período. Os resultados obtidos entre  $S$ , modelado e numérico, foram bem correlacionados no ciclo diário ( $r^2 = 0,59$ ) e diurno ( $r^2 = 0,82$ ), com exceção do período noturno em consequência da inversão do fluxo de energia. À vista disso, constatou-se que, na disposição de informações reduzidas de temperatura do ar, e na ausência de perturbações atmosféricas e de dados de temperaturas de tronco, o modelo matemático citado mostrou-se eficiente para o cálculo da taxa de armazenamento total de energia na Rebio Cuieiras, uma vez que, em totais diários e diurnos,  $S$  modelado apresentou-se mais adequado à  $S$  numérico, enquanto somente uma pequena parte de  $S$  observado pôde ser explicada por  $S_{Num}$ .

Para aperfeiçoamento e extensão deste trabalho, sugere-se:

- a) Aplicação do modelo proposto em outras coberturas vegetais, como em Florestas inundáveis;
- b) Melhorar as estimativas dos componentes individuais de  $S$  por meio de série de Fourier.
- c) Utilização de outras metodologias para o cálculo de  $S$ , como as descritas por Haverd et al. (2007), empregando o método matemático proposto.

## REFERÊNCIAS

ALVALÁ, R. C. S. **Estudo da partição de energia em terrenos complexos (áreas desflorestadas e florestas)**. (INPE-5522-TDI/519). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1993.

ARAÚJO, A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; CULF, A. D.; GASH, J. H. C.; VALENTINI, R.; KABAT, P. Comparative measurements of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: the Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 58-1–58-20, Sep./Oct. 2002.

ARYA, S. P. 2001. **Introduction to micrometeorology**. San Diego: Academic Press, 2001. 307 p.

AYRES, J. **As matas de várzea do Mamirauá**. Brasília: CNPq, 1995. 123 p.

BARROSO, L. C. et al. **Cálculo Numérico: com aplicações**. 2ª ed. São Paulo: Harbra, 1987.

BLANKEN, P.D.; BLACK, T. A.; YANG, P. C.; NEUMANN, H. H.; NESIC, Z.; STAEBLER, R.; DEN HARTOG, G.; NOVAK, M. D.; LEE, X. Energy balance and canopy conductance of a boreal aspen forest: partitioning overstory and understory components. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D24, p. 28915-28927, Dec. 1997.

CARSWELL, F. E.; COSTA, A. L.; PALHETA, M.; MALHI, Y.; MEIR, P.; COSTA, P. R.; RUIVO, M. L.; LEAL, L. S. M.; COSTA, J. M. N., CLEMENT, R. J.; GRACE, J. Seasonality in CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O flux at an eastern Amazonian rainforest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, n. D20, p. 43-1–43-16, Sep./Oct. 2002.

CHAUVEL, A. Os latossolos amarelos, álicos, argilosos, dentro dos ecossistemas das bacias experimentais do INPA e da região vizinha. **Acta Amazonica**, v. 12, n. 3, p. 47-60, set. 1982.

COX, P. M.; HARRIS, P. P.; HUNTINGFORD, C.; BETTS, R. A.; COLLINS, M.; JONES, C. D.; JUPP, T. E.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Increasing risk of Amazonian drought due to decreasing aerosol pollution. **Nature**, v. 453, n. 8, p. 212-215, May 2008.

CULF, A. D.; FOKEN, T.; GASH, J. H. C. The energy balance closure problem. In: KABAT, P.; CLAUSSEN, M.; DIRMEYER, P. A.; GASH, J. H. C.; GUENNI, L. B.Ç MEYBECK, H.; PIELKE, R. A.; VÖRÖSMARTY, C.; HUTJES, R. W. A.; LÜTKEMEIER, S. (Ed.). **Vegetation, water, humans and the climate: a new perspective on an interactive system**. Berlin: Springer, 2004. cap. B.2, p. 159-166.

DIXON, R. K.; BROWN, S.; HOUGHTON, R. A.; SOLOMON, A. M.; TREXLER, M. C.; WISNIEWSKI, J. Carbon pools and flux of global forest ecosystems. **Science**, v.263, n. 5144, p. 185-190, Jan. 1994.

FINNIGAN, J.; PAW U, K. T.; SHAW, R. H.; SNYDER, R. L. **Advanced Short Course on Agricultural, Forest and Micrometeorology**. Bologna: Consiglio Nazionale delle Ricerche, 2001. 286 p.

GALVÃO, J.A.C. 1999. **Estudo do balanço de radiação em áreas de floresta e pastagem na Amazônia**. Dissertação de Mestrado, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo.

HARTMANN, D. L. **Global physical climatology**. New York: Academic Press, 1994. 411 p.

HAVERD, V.; CUNTZ, M.; LEUNING, R.; KEITH, H. Air and biomass heat storage fluxes in a forest canopy: calculation within a soil vegetation atmosphere transfer model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 147, n. 3-4, p. 125-139, Dec. 2007.

INCROPERA, FRANK P.; BERGMAN, THEODORE L.; LAVINE, ADRIENNE S.; DEWITT, DAVID P. **Fundamentos de transferência de calor e de massa**. 7ª ed. Rio de Janeiro: LTC, 2017.

Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia (INPA). Rede de torres LBA. Publicado em out, 2015. Disponível em: <<http://lba2.inpa.gov.br>>. Acesso em: jul. 2018.

MALHI, Y.; GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Trends in Ecological & Evolution**, v. 15, n. 8, p. 332-337, Aug. 2000.

MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. OBREGÓN, G. O. **Characteristics of Amazonian Climate: Main Features**, 2009.

MARQUES FILHO, A. O.; DALLAROSA, R. G.; PACHÊCO, V. B. Radiação solar e distribuição vertical de área foliar em floresta: Reserva Biológica do Cuieiras – ZF2, Manaus. **Acta Amazônica**, v. 35, n. 4, p. 427-436, out./dez. 2005.

MICHILES, A. A. S.; GIELOW, R. Above-ground thermal energy storage rates, trunk heat fluxes and surface energy balance in a central Amazonian rainforest. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 148, n.6-7, p. 917-930, Jun, 2008.

MICHILES, A. A. S. **Taxas de armazenamento térmico na biomassa e balanço de energia em superfície para áreas de floresta de terra firme na Amazônia**. 2009. 184 f. (INPE-15771-TDI/1514). Tese (Doutorado em Meteorologia) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

MONTENY, B. A.; BARBIER, J. M.; BERNOS, C. M. Determination of the energy exchanges of a forest-type culture: Hevea brasiliensis. In: Hutchison, B. A.; Hicks, B. B. (Ed.) **The forest-atmosphere interaction**. Dordrecht: D. Reidel Publishing Company, 1985. cap. 14, p. 211-233.

MONTGOMERY, R. B. Vertical eddy flux of heat in the atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 5, n. 6, p. 265-274, 1948.

OLIVEIRA, A. N.; AMARAL, I. L.; RAMOS, M. B. P.; NOBRE, A. D.; COUTO, L. B.; SAHDO, R. M. Composição e diversidade florístico-estrutural de um hectare de floresta densa de terra firme na Amazônia central, Amazonas, Brasil. **Acta Amazônica**, v. 38, n. 4, p. 627-642, out./dez. 2008.

PARKER, S. P. **McGraw-Hill concise encyclopedia of science & technology**. New York: McGraw-Hill, 1984. 2065 p.

PELD. Pesquisas Ecológicas de Longa Duração. 2013. Disponível em <http://peld.inpa.gov.br/sitios/>. Acesso: 05/09/2018.

POHLMANN, C. L. **Fundamentos de fenômenos de transporte: um texto para cursos básicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2004.

PRODANOV, C. C.; FREITAS, E. C. DE. **Metodologia do trabalho científico: métodos e técnicas da pesquisa e do trabalho acadêmico**. 2ª ed. Novo Hamburgo: Feevale, 2013.

PROJETO RADAMBRASIL. Folha SA. 20 Manaus: geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação, uso potencial da terra. Rio de Janeiro: IBGE, 1978. (Levantamento de Recursos Naturais, 18).

RUGGIERO, MARCIA. A. G; LOPES, VERA L. R. **Cálculo Numérico: aspectos teóricos e computacionais**. 2ª ed. São Paulo: Makron Books, 1997.

SEARS, F. W.; SALINGER, G. L. **Thermodynamics, Kinetic Theory, and Statistical Thermodynamics**. New York: Addison-Wesley, 1975. 404 p.

SWINBANK, W. C. The measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal of Meteorology**, v. 8, n. 3, p. 135-145, 1951.

VON RANDOW, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERTS, J. A.; WATERLOO, M. J.; CARDOSO, F. L.; KABAT, P. Comparative measurements and seasonal variations in energy and carbon exchange over forest and pasture in South West Amazonia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, n. 1-3, p. 5-26, 2004.

WILSON, K.; GOLDSTEIN, A.; FALGE, E.; AUBINET, M.; BALDOCCHI, D.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; CEULEMANS, R.; DOLMAN, H.; FIELD, C.; GRELLÉ, A.; IBROM, A.; LAW, B. E.; KOWALSKI, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, n. 1-4, p. 223-243. Dec, 2002.