UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FLUXOS DE ENERGIA EM ÁREA DE FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA – CERRADO MODELADOS PELO *SITE*

NARA LUÍSA REIS DE ANDRADE

Orientadora: Profª. Drª. LUCIANA SANCHES

Cuiabá, MT
Fevereiro de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO

INSTITUTO DE FÍSICA

PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FLUXOS DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA – CERRADO MODELADOS PELO *SITE*

NARA LUÍSA REIS DE ANDRADE

Dissertação apresentada junto ao programa de Pós-graduação em Física Ambiental da Universidade Federal de Mato Grosso, como parte dos requisitos para obtenção do título de Mestre em Física Ambiental.

Orientadora: Profª. Drª. LUCIANA SANCHES

Cuiabá, MT

Fevereiro de 2009.

UNIVERSIDADE FEDERAL DE MATO GROSSO
INSTITUTO DE FÍSICA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA AMBIENTAL

FOLHA DE APROVAÇÃO

Título: **FLUXOS DE ENERGIA EM ÁREAS DE FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA**

NARA LUISA REIS DE ANDRADE

Prof.ª Dr.ª Luciana Sanches
Universidade Federal de Mato Grosso-FAET/UFMT
Orientadora

Prof. Dr. Marcos Heil Costa
Programa de Pós Graduação em Meteorologia Agrícola – Viçosa, MG
Examinador Externo

Prof. Dr. Peter Zeilhofer
Universidade Federal de Mato Grosso-ICHS/UFMT
Examinador Interno

Prof. Dr. José de Souza Nogueira
Universidade Federal de Mato Grosso-ICET/UFMT
Examinador Interno- Suplente

DEDICATÓRIA

A minha amada família, pela força e carinho incondicionais dispensados em todos os momentos, em especial a minha querida mãe, Rosângela Reis.

AGRADECIMENTOS

À minha orientadora profª. Dr.ª Luciana Sanches, pelo apoio, compreensão, amizade e conhecimentos compartilhados ao longo desses anos, tornando este trabalho possível;

À minha querida família, que, mesmo distante, sempre se fez presente em minha formação, demonstrando amor, carinho e me dando incentivos – fonte da minha força de vontade e dedicação. Em especial: minha mãe, Rosângela e meus avós Raimunda Reis e Carlos Reis;

A João Gilberto, que surgiu em um momento difícil, e me deu apoio fundamental nos instantes finais dessa dissertação;

Ao João Areis Jr., pelo apoio e carinho de sempre;

Ao coordenador prof. Dr. José de Souza Nogueira (Paraná), sempre pronto para ajudar, aconselhar, incentivar, e, que, com seu sorriso amigo, sempre me fez sentir em casa;

A prof.ª Dr.ª Marta Nogueira, pelo apoio e acolhimento;

Aos membros da banca, Prof. Dr. Peter Zeilhofer e Prof. Dr. Marcos Heil, pelas importantes considerações e pelos conhecimentos adicionados a esta dissertação, e também pela compreensão no decorrer de todo o processo de qualificação e defesa;

Aos colegas do grupo de Pós-graduação em Física Ambiental, pelo apoio e amizade ao longo desses anos, em especial: Édina Cristina, Osvaldo Júnior, Ângela Santana, Flávia Maria, Guilherme Seixas, Durval Rezende, a Maricéia Vilani e Mariele Pinheiro, que além da amizade auxiliaram diretamente em minha dissertação, e ao Denilton Gaio, que, além dos itens acima citados, contribuiu com seu grande conhecimento em modelagem;

Aos bolsistas, Ricardo e Daiany (ESA) e Bernardo e Breno (ENE), pelo socorro de última hora;

Aos professores do Programa de pós Graduação em Física Ambiental, por compartilhar seus conhecimentos e experiências;

Ao Cnpq, órgão financiador da minha bolsa de pesquisa;

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS VII

LISTA DE TABELAS IX

LISTA DE SÍMBOLOS XII

LISTA DE ABREVIATURAS XV

RESUMO XVI

ABSTRACT XVII

1. INTRODUÇÃO 1

1.1. PROBLEMÁTICA 1
1.2. JUSTIFICATIVA 4

2. REVISÃO DA LITERATURA 5

2.1. OS ECOSSISTEMAS MATO GROSSENSES 5
2.1.1. Floresta de Transição Amazônia - Cerrado 5
2.2. MUDANÇAS NA COBERTURA E USO DO SOLO NA REGIÃO AMAZÔNICA 6
2.3. O MÉTODO DE COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS 9
2.4. BALANÇO DE ENERGIA 12
2.4.1. Fluxos de energia em ecossistemas tropicais 16
2.4.2. Partição de energia em ecossistemas tropicais 17
2.5. MODELAGEM DE ECOSSISTEMAS FLORESTAIS 18
2.5.1. O Modelo SITE 19

3. MATERIAL E MÉTODOS 23

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL 23
3.2. INSTRUMENTAÇÃO 24
3.2.1. Medidas micrometeorológicas 24
3.2.2. Medidas dos fluxos 25
3.3. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS 25
3.4. MODELAGEM 26
3.4.1. Variáveis de entrada 26
3.2.2. Preenchimento de falhas dos dados de entrada 27
3.2.3. Parâmetros adotados e calibrados 29
3.2.4. Variáveis de saída do modelo 29
3.2.5. Calibração e validação do modelo 30
3.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO 30

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO 32

4.1. CARACTERIZAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA 32

4.1.1. Dados de entrada do modelo: análise das falhas na série temporal 32
4.1.2. Dados de entrada do modelo: padrões de variabilidade sazonal e ciclo diurno 34
4.1.2.1. Precipitação 36
4.1.2.2. Umidade relativa do ar 37
4.1.2.3. Temperatura do ar 38
4.1.2.4. Radiação solar incidente 39
4.1.2.5. Velocidade horizontal do vento 41
4.1.3. Dados de saída do modelo e partição de energia: padrões de variabilidade sazonal e ciclo diurno 42
4.1.3.1. Radiação solar líquida 43
4.1.3.2. Fluxo de calor latente 46
4.1.3.3. Fluxo de calor sensível 47
4.2. ANÁLISE DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO PREENCHIDOS VERSUS NÃO PREENCHIDOS 48
4.3. ANÁLISE DO MODELO SITE APLICADO AO ECOSSISTEMA DE FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA-CERRADO 51
4.3.1. Parâmetros calibrados 51
4.3.2. Validação dos dados de saída do modelo 52
4.3.2.1. Média a cada meia hora 52
4.3.2.1. Dados do ciclo diurno médio 60
4.4. ANÁLISE DAS MÉDIAS E DE VARIÂNCIA ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS DADOS CALIBRADOS 64
5. CONCLUSÕES 68
6. RECOMENDAÇÕES 70
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS 71

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Região da Amazônia Legal. 6

Figura 2: Arco do fogo ou do desmatamento na região da Amazônia Legal. 7

Figura 3: Fluxograma do modelo SITE, em que Ta é a temperatura do ar, qa é a umidade específica do ar, ua é a velocidade horizontal do vento, Sin é a radiação de onda curta incidente, Lin é a radiação de onda longa incidente e P é a precipitação. 20

Figura 4: Representação esquemática do modelo. *u*, *s*, *g*, *d*, referem-se às folhas, galhos, camada superficial e camada profunda do solo, respectivamente. 21

Figura 5: Localização da área em estudo. 23

Figura 6:Média a cada meia hora de umidade relativa do ar (RH), temperatura do ar (T), radiação solar global (Rsd) e velocidade do vento (u), para o período de 2001 a 2007. 32

Figura 7: Média a cada meia hora dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e radiação solar líquida (Rn), para o período de 2001 a 2007. 33

Figura 8: Médias mensais da precipitação (Ppt), umidade relativa do ar (RH), velocidade do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), de 2001 a 2007. 35

Figura 9: Ciclo diário da média a cada meia hora da umidade relativa do ar (RH) de 2001 a 2007. 38

Figura 10: Ciclo diário da média a cada meia hora da temperatura do ar (T), de 2001 a 2007. 39

Figura 11: Ciclo diário da média a cada meia hora da radiação solar global (Rsd) de 2001 a 2007. 41

Figura 12: Ciclo diário da média a cada meia hora da velocidade horizontal do vento (u) de 2001 a 2007. 42

Figura 13: Média mensal do fluxo de calor sensível (H), calor latente (LE) e radiação solar líquida (Rn), de 2001 a 2007. 43

Figura 14: Sazonalidade do ciclo diário da radiação solar líquida (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H), nas estações úmida (u), úmida seca (us), seca (s) e seca úmida (su)..... 45

Figura 15: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação úmida, anos 2001 (a), n =1824 e 2002 (b), n = 1118. 54

Figura 16: Média a cada meia hora da radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação úmida seca (2001) (n = 3097). 55

Figura 17: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação seca (2002) (n = 1118). 57

Figura 18: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (Le) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação seca úmida (2003) (n = 1440). 59

Figura 19: Ciclos diurnos da radiação solar líquida, fluxo do calor latente e fluxo de calor sensível, nas estações úmida (a), úmida seca (b), seca (c) e seca úmida(d). 61

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores limites adotados para filtragem das variáveis de entrada..... 25

Tabela 2: Descrição das séries de dados utilizadas como entrada do modelo SITE..... 27

Tabela 3: Parâmetros adotados em floresta de transição Amazônia-Cerrado para a utilização do modelo SITE..... 29

Tabela 4: Porcentagens de dados medidos e falhas referentes às variáveis umidade relativa do ar (RH), velocidade do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), para o período de 2001 a 2007 (n = 122640)..... 33

Tabela 5: Média estacional, anual (±DP), mínimo e máximo mensal da precipitação (Ppt), de 2001 a 2007. 36

Tabela 6: Média estacional, anual (±DP), mínimo e máximo de média mensal da umidade relativa do ar (RH), velocidade horizontal do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), de 2001 a 2007. 37

Tabela 7: Médias sazonais, anuais, mínimos, máximos e desvio padrão das variáveis fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), radiação solar líquida (Rn) e partição de energia para o período de 2001 a 2007. 43

Tabela 8: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação úmida, anos 2001 e 2002. 49

Tabela 9: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação úmida seca, ano 2001..... 49

Tabela 10: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007. 50

Tabela 11: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação seca úmida, ano 2003..... 50

**Tabela 12: Parâmetros inicial e calibrados capacidade térmica dos galhos ($C_{HS,}$ J m^{-2} °C^{-1}) e das folhas ($C_{HU,}$ J m^{-2} °C^{-1}), coeficiente de condutância estomática (*m,*

adimensional), e capacidade máxima da enzima rubisco (*Vmáx,* µmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), sendo um valor apenas para todo o ano, e frações de umidade no solo (*θg*/*θd*, adimensionais), com valores variando nas estações úmida, úmida seca, seca e seca úmida..... 51

Tabela 13: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação(*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados, estação úmida, anos 2001 e 2002..... 54

Tabela 14: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida seca, ano 2001. 56

Tabela 15: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação(*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007. 57

Tabela 16: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca úmida, ano 2003..... 59

Tabela 17: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação (*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida, anos 2001 e 2002. 62

Tabela 18: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação (*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida seca, ano 2001..... 62

Tabela 19: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação (*ρ*), inclinação da reta de regressão (*α*), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração,estação seca, anos 2002, 2003 e 2007. 62

Tabela 20: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca úmida, ano 2003. 63

Tabela 21: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação úmida, anos 2001 e 2002. 65

Tabela 22: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação úmida seca, ano 2001. 65

Tabela 23: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007. 66

Tabela 24: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação seca úmida, ano 2003. 66

LISTA DE SÍMBOLOS

Ag - Assimilação de CO_2 bruta

Am - Clima de monção

An - Assimilação de CO_2 líquida

PAR - Radiação fotossinteticamente ativa

b - expoente da curva de retenção

C_{HL} - Capacidade térmica de folhas e galhos no dossel inferior

C_{HS} - Capacidade térmica dos galhos no dossel superior

C_{HU} - Capacidade térmica das folhas no dossel superior

Ci - Valores calculados

Mi - Valores medidos

CO_2 - Dióxido de Carbono

c_p - Calor específico do ar a pressão constante

da - Deslocamento do plano zero

dP/dz - Gradiente da propriedade considerada

Er - Energia emitida por um corpo

fl - Fluxo

Fc - Densidade de fluxo do escalar

G - Fluxo de calor no solo

gs - Condutância estomática

H - Fluxo de calor sensível

Jc - Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco

Je - Taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz

k - Coeficiente de difusão turbulenta

Ks - Condutividade hidráulica de saturação

LE - Fluxo de calor latente

Lin - Radiação de onda longa incidente

m - Coeficiente relacionado à condutância estomática

n - número total de observações

NO_x - Óxido de nitrogênio

Ppt - Precipitação

P - Processo de fotossíntese

qa - Umidade específica do ar

Ra - Radiação longa refletida pelas nuvens

Rl - Radiação de ondas longas

Rn - Radiação líquida

Rs – Radiação devolvida ao espaço devido ao albedo

Rsd - Radiação solar global

S - Energia armazenada na biomassa e no dossel

Sin - radiação de onda curta incidente

SO_2 - Dióxido de Enxofre

T - temperatura do ar

θg/θd - Frações de umidade no solo

u - Velocidade do vento

UR - Umidade relativa do ar

Vmáx - Capacidade máxima da enzina rubisco a 15 ºC

w - Velocidade vertical do vento

w' - Variação da componente vertical da velocidade do vento em relação a sua média

Xi **-** Valor a ser preenchido

Xp - Antecessor da falha

***Xp*+*f*+1** - Sucessor da falha

z - Altura dos equipamentos

$\mathbf{z_1}$ - Altura superior do dossel

$\mathbf{z_2}$ - Altura inferior do dossel

$\mathbf{z_a}$ - Altura de coleta de dados

$\mathbf{z_h}$ - Rugosidade acima do dossel

$\boldsymbol{\alpha}$ - Inclinação da reta de regressão

$\boldsymbol{\beta 2}$ - Distribuição das raízes finas

$\boldsymbol{\varepsilon}$ - Emissividade do corpo (≈1)

$\boldsymbol{\theta_{CC}}$ - Teor de umidade à capacidade de campo

$\boldsymbol{\theta_{PM}}$ - Teor de umidade ao ponto de murcha permanente

$\boldsymbol{\theta_s}$ - Ponto de saturação do solo

$\boldsymbol{\lambda}$ - Calor latente de evaporação.

$\boldsymbol{\rho}$ - Coeficientes de determinação

$\boldsymbol{\rho}$ - Densidade do ar seco a 20° C

$\boldsymbol{\rho'_c}$ - Variação da concentração do escalar *c* em relação a sua média

$\boldsymbol{\rho_c}$ - Densidade do escalar

$\boldsymbol{\sigma}$ - Constante de Stefan-Boltzmann

$\boldsymbol{\Phi}$ - Porosidade total do solo

$\overline{w}$ - Média da velocidade vertical do vento

LISTA DE ABREVIATURAS

BATS - Modelo de Transferência Biosfera-Atmosfera

BGC - Biogeogemical cicles

BOC - Balanço de Ondas Curtas

BOL - Balanço de Ondas Longas

IBIS - Modelo Integrado da Biosfera

LAI - Índice de Área Foliar

LSM - Modelo de Superfície da Terra

LSX - Modelo de Superfície da Terra

RMSE - Raiz do erro quadrado médio

RSD - Radiação Solar Global

SiB - Modelo Simplificado da Biosfera

SITE - Simple Tropical Ecosystem Model

RESUMO

ANDRADE, N.L.R. **Fluxos de energia em área de floresta de Transição Amazônia – Cerrado modelados pelo SITE.** 2009. 99f. Dissertação (Mestrado em Física Ambiental), Instituto de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

Devido à importância das trocas de energia entre um ecossistema tropical e a atmosfera, e as dificuldades inerentes às medidas destas, o presente trabalho visou o estudo da aplicabilidade do modelo simplificado de ecossistema tropical (Simple Tropical Ecossistem Model – SITE) para simulação dos fluxos de energia em uma área de floresta de Transição Amazônia - Cerrado, localizada no norte do estado de Mato Grosso. Foram realizadas quatro etapas: primeiramente, foi feita a caracterização do micro clima da área em estudos, utilizando dados do período de 2001 a 2007 referentes às variáveis precipitação (Ppt), umidade relativa do ar (UR), temperatura do ar (T), radiação solar global (Rsd) – dados de entrada do modelo – e radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) – dados de saída do modelo - sendo esses dois últimos medidos pelo método de covariância dos vórtices turbulentos. A seguir, toda a série de dados foi analisada, afim de identificar os períodos que dispunham de todos os dados necessários para a modelagem e validação dos dados simulados. Posteriormente, o modelo foi rodado com dados representativos das estações úmida, úmida seca, seca e seca úmida, e foi calibrado, quando necessário, de acordo com as características inerentes a cada estação. Para finalizar, os dados de saída do modelo calibrados (Rn, LE e H) foram comparados com os dados observados em campo, para sua validação. O ecossistema apresentou forte sazonalidade, com períodos de umidade elevada e estiagem bem definidos, o que reflete no comportamento dos fluxos LE e H e, consequentemente, na partição de Rn. Maiores valores de LE foram observados na estação úmida seca, onde a parcela LE/Rn foi maior (0,64), e de H, na estação seca (H/Rn = 0,26). Para modelagem, os melhores ajustes dos parâmetros coeficiente de condutância estomática (m), capacidade máxima da enzima rubisco ($Vmáx$), frações de umidade no solo ($\theta g/\theta d$) e capacidade térmica das folhas (C_{HU}) e galhos (C_{HS}) foram os seguintes: m =7,0 , $Vmáx$ = 85 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, C_{HU} = 2,109x10^3 J m^{-2} °C^{-1} e C_{HS} = 2,109x10^4 J m^{-2} °C^{-1}, ao longo de todo o ano, e (a) estação úmida, $\theta g/\theta d$ = 0,36, (b) estação úmida-seca, $\theta g/\theta d$ = 0,17, (c) estação seca, $\theta g/\theta d$ = 0,165, e (d) estação seca úmida, $\theta g/\theta d$ = 0,185.

O modelo SITE apresentou melhor aplicabilidade para simular as variações do ciclo diário, em relação à simulação dos dados de meia em meia hora, apresentando melhores ajustes entre os dados simulados e observados, com melhores ρ e α, e menores valores de RMSE. Apresentou também excelente simulação do saldo de radiação, com leve tendência a subestimativas, uma boa simulação de LE e uma maior dificuldade de ajuste de H.

Palavras-Chave: Modelagem de ecossistemas, fluxos de energia, floresta tropical.

ABSTRACT

ANDRADE, N.L.R. **Fluxos de energia em área de floresta de Transição Amazônia – Cerrado modelados pelo SITE.** 2009. 99f. Dissertation (Master in Environmental Physics), Institute of Physics, Federal University of Mato Grosso, Cuiabá, 2009.

Due the importance of energy changes between a tropical ecosystem and the atmosphere, and the difficulties inherent to these measures, this work aimed to study the applicability of the simple tropical ecosystem model – SITE- for simulation of energy fluxes in an Transitional Amazonian Cerrado forest, located in the north of the Mato Grosso state. Studies were conducted in four stages: first, the characterization of the micro climate of the study area, using data from 2001 to 2007 for the variable precipitation (Ppt), relative humidity (RH), air temperature (T), solar radiation (Rsd) - input data of the model - and net radiation (Rn), latent heat flux (LE) and sensible heat flux (H) - output data of the model. Then, the entire set of data was analyzed in order to identify the periods that had all the necessary data for modeling and validation of simulated data. Subsequently, the model was run with data representing the stations wet, wet dry, dry dry and wet, and was calibrated, if necessary, according to the characteristics of each station. Finally, the output data of the calibrated model (Rn, LE and H) were compared with observed data in the field, for its validation. The ecosystem showed strong seasonality, with periods of high humidity and drought well defined, which reflects in the behavior of LE and H fluxes and hence on the partition of Rn. Higher values of LE were observed in the wet season drought, where the plot LE / Rn was higher (0.64), and H, in the dry season (H / Rn = 0.26). For modeling, the best fit parameters of coefficient of stomatal conductance (*m*), maximum capacity of the enzyme rubisco (*Vmax*), fraction of soil moisture (θg / θd) and thermal capacity of the leaves (C_{HU}) and steams (C_{HS}) were following: m =7,0 , $Vmáx$ = 85 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, C_{HU} = 2,109x10^3 J m^{-2} °C^{-1} and C_{HS} = 2,109x10^4 J m^{-2} °C^{-1}, for all the year, and (a) wet season, $\theta g/\theta d$ = 0,36, (b) wet dry season, $\theta g/\theta d$ = 0,17, (c) dry season, $\theta g/\theta d$ = 0,165, and (d) dry wet season, $\theta g/\theta d$ = 0,185. The SITE model is best applicable to simulate changes in the daily cycle than for the simulation of data every half hour, giving the best fit between simulated and observed data, the best ρ and α, and lower values of *RMSE*. Also presented an excellent simulation of net radiation, with slight tendency to underestimate, a good simulation of LE and greater difficulty in adjusting H.

Keywords: Ecosystem models, energy fluxes, tropical forest.

1. INTRODUÇÃO

1.1. PROBLEMÁTICA

Os efeitos das ações antrópicas têm sido amplamente discutidos no meio científico, devido às alterações que estas podem vir a causar nos ciclos biogeoquímicos naturais, alterando, dentre outros fatores, os balanços de massa – especialmente os balanços de carbono e vapor d´água – e de energia.

A nível global tem-se observado um crescente aumento de temperatura, denominado "agravamento do aquecimento global", que tem como principal causa as emissões de gases de efeito estufa, como por exemplo CO_2, NO_x, SO_2, dentre outros. Destes gases, o que tem causado maiores preocupações é o CO_2, originado essencialmente pela queima de combustíveis fósseis e queimadas, o que elevou a sua concentração de 280 ppmv no período pré-industrial para 380 ppmv na atualidade.

Outro fenômeno que tem sido observado globalmente e vem sendo atribuído às ações antrópicas é a mudança nos regimes de chuvas, ocasionando ondas de seca e de cheias mais acentuadas devido às alterações das concentrações de vapor d´água na atmosfera.

O Brasil tem ganhado destaque nesse cenário de mudanças globais por possuir aproximadamente 60% de seu território como área de Amazônia Legal (THÉRY, 2005), uma vasta região que apresenta diversos ecossistemas, com destaque para a floresta tropical úmida, onde se encontra a maior biodiversidade do planeta. Existem, ainda, outros ecossistemas na região, como o Cerrado, os manguezais e, recentemente, têm crescido em importância os ecossistemas agrícolas.

Essa região desempenha importante papel no clima regional e global. Com uma extensa área de floresta tropical úmida, influencia no clima principalmente através da emissão ou retenção de gases e da evapotranspiração - isto é, transpiração

das plantas e evaporação da água retida nas folhas, caules, na serrapilheira e no solo. Assim, a Floresta Amazônica é fornecedora de vapor de água (calor latente) para a atmosfera e possui importante papel no ciclo do gás carbônico atmosférico, desempenhando função de sorvedouro de carbono, provendo um serviço para o ambiente global removendo CO_2 da atmosfera e assim reduzindo as taxas de CO_2 que induzem ao aquecimento (GRACE et al., 1995; ARAÚJO et al., 2002; MILLER et al., 2004).

Tem-se verificado uma expressiva substituição de florestas nativas, na região Amazônica, por áreas agrícolas e pastagem, com grandes ocorrências de desflorestamento e queimadas, fazendo do Brasil, embora um país em desenvolvimento, um grande contribuinte às mudanças dos ciclos naturais (MALHI & GRACE, 2000; RUSTAD, 2001).

O entendimento e a quantificação dos processos relacionados ao balanço de energia e ao ciclo de carbono da Amazônia são, portanto, relevantes para a formulação de políticas ambientais e climáticas (BALDOCHI et al., 1996; FALKOWSKI et al., 2000), visto que desempenham importante papel no funcionamento do clima e da biologia na terra, e as transferências de energia, água e carbono são as mais importantes interações entre a biosfera e a atmosfera. A existência das muitas formas de vida e, particularmente, da vida vegetal, é amplamente dependente de uma troca vigorosa de massa e energia entre a biosfera e a atmosfera.

Alguns estudos já foram realizados na Amazônia com o objetivo de entender esses processos por meio de técnicas micrometeorológicas (GRACE et al., 1995; MALHI et al., 2002; CARSWELL et al., 2002). O método de determinação de vórtices turbulentos é usado para estimar as trocas líquidas de carbono, água e calor sensível entre a atmosfera e os ecossistemas. No entanto, a heterogeneidade da ampla área de terra que a Amazônia ocupa faz com que alguns parâmetros não se comportem da mesma maneira em áreas com diferentes taxas de nutrientes, precipitação e radiação solar, por exemplo.

Desta forma, devido à pequena cobertura geográfica de sistemas para quantificar as funções ambientais das florestas tropicais, as estimativas são passíveis

de erros e polêmicas, como por exemplo, a incerteza da sua função de fonte ou sumidouro de CO_2, sendo assim necessário um maior número de medidas, em um maior intervalo de tempo, para que os dados coletados possam ser considerados representativos (FEARNSIDE, 2003; AGUIAR et al., 2006).

Tendo em vista o exposto, a disponibilidade de dados climatológicos em diferentes escalas (diária, mensal e anual) tem sido fundamental para se discutir a origem e manutenção de diferentes ecossistemas florestais, para compreender aspectos de sua dinâmica e também para prever efeitos de perturbações. Por isso há um direcionamento das pesquisas ambientais para o desenvolvimento e utilização de modelos dinâmicos que representem a interação biosfera-atmosfera, e que possam ser amplamente utilizados em áreas florestais, para simular o comportamento dos fluxos de carbono, água e energia nos ecossistemas (DICKINSON et al., 1984; SELLERS et al., 1986; POLLARD & THOMPSON, 1995; BONAN, 1996; FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000; SANTOS & COSTA, 2004; NUNES et al., 2007). O desenvolvimento destes modelos permitiu que diversos autores discutissem os prováveis efeitos da alteração da cobertura vegetal sobre os processos climáticos regionais e globais, concentrando-se na evolução dinâmica dos processos ecológicos, biofísicos, biogeoquímicos e biogeográficos que ocorrem em diferentes escalas de tempo (HURTT et al., 1998).

A complexidade e o custo de instalar experimentos para avaliar o impacto potencial de mudanças ambientais no funcionamento de um ecossistema, fazem da modelagem uma alternativa viável para responder às questões mencionadas anteriormente. Modelos baseados nos principais processos que controlam o funcionamento de um ecossistema, e validados em diferentes condições de campo, podem representar adequadamente o ecossistema em outras situações, notadamente naquelas de mudança ambiental que se deseja estudar (SANTOS, 2001).

Existe uma série de modelos consolidados para utilização em áreas de Florestas Tropicais, como por exemplo, o LSX, o LSM e o IBIS. Porém, estes exigem uma grande quantidade de dados de entrada, fazendo com que haja o direcionamento de pesquisas para a busca por modelos mais simples, que possam ser aplicados, sem detrimento da qualidade do modelo, à áreas de Floresta tropical, como

é o caso da área de estudos em questão, uma Floresta de Transição madura e intacta, ecótono entre a Floresta Amazônica e o Cerrado, pertencente à Amazônia Legal, localizada ao norte do estado de Mato Grosso, próximo à cidade de Sinop.

1.2. JUSTIFICATIVA

Por ter impacto fundamental no balanço de energia, além de fazer papéis críticos no balanço de carbono e efeito estufa, projetos de pesquisa vêm sendo desenvolvidos em áreas de florestas tropicais amazônicas, com a finalidade, dentre outras, de compreender sua relação nos efeitos climáticos globais.

A quantificação das taxas de fluxos de energia em diferentes regiões da Amazônia pode contribuir para facilitar a construção de modelos válidos para prognosticar mudanças que podem ocorrer na Terra.

Entretanto, o conhecimento atual do funcionamento dos ecossistemas é ainda bastante limitado, o que faz com que se busquem modelos cada vez mais simples e abrangentes, capazes de representar de modo satisfatório o funcionamento dos ecossistemas.

Nesse contexto, o presente trabalho tem como objetivo geral testar um modelo simplificado de ecossistema tropical – SITE, para estimativa de fluxos de energia em uma região de transição Amazônia - Cerrado.

De forma específica, esse trabalho tem como objetivos:

a) caracterizar o microclima da floresta tropical de transição Amazônia - Cerrado, utilizando uma série de dados de 2001 a 2007;

b) avaliar a variação temporal dos fluxos de energia em uma floresta tropical de Transição Amazônia – Cerrado, com base em dados medidos em campo;

c) simular os fluxos de energia usando o modelo SITE;

d) calibrar e validar o modelo SITE

Deste modo, pretende-se dar uma contribuição quanto à aplicabilidade de um modelo simplificado para estudos da interação biosfera-atmosfera em áreas de florestas tropicais.

2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. OS ECOSSISTEMAS MATO GROSSENSES

O estado de Mato Grosso possui uma extensão territorial de 906.806 km², por onde se distribuem três biomas distintos: a Floresta Amazônica, ao norte do estado, com predominância de terras baixas sedimentares em 52,16% do território, o Cerrado ao sul e a leste, abrangendo 40,80%, sendo composto por planaltos com chapadões sedimentares e o pantanal a sudoeste, com predomínio de terras úmidas em 7,04% do território (ALMEIDA, 2005).

2.1.1. Floresta de Transição Amazônia - Cerrado

No estado de Mato Grosso, existe uma área florestada, que se subdivide em:

- Floresta Perenifólica Higrófita Heleiana Amazônica: é uma extensão da vegetação encontrada nas áreas úmidas da Amazônia, ocorrendo na região noroeste do estado.

- Floresta Subcaducifólia Amazônica: ocorre na maior parte do norte de Mato Grosso, conta com árvores altas de 15 a 20 m de altura, troncos finos e copas pouco desenvolvidas que tem a capacidade de perderem suas folhas nos períodos de pouca disponibilidade hídrica (caducifólia) (FABRIS, 2001).

Pela caracterização de Köppen, o tipo climático é o "Am", com clima quente e úmido com chuvas de monções. A precipitação pluviométrica média anual da região varia entra 2000 e 2500 mm ano^{-1}.

As temperaturas médias anuais nas florestas mato-grossenses são elevadas, ficando ente 23 e 25 °C, sendo os meses de primavera-verão os mais quentes, coincidindo com o período mais chuvoso (ALMEIDA, 2005).

A temperatura no interior de florestas tropicais pode ser de 7 a 10 °C menor do que fora dela, o que representa um fator relevante biologicamente. O dossel arbóreo, a vegetação do sub-bosque e a serrapilheira reduzem os extremos de temperatura, devido à interceptação de ondas longas de radiação, e mantém um maior conteúdo de umidade na superfície do solo (JACOBS, 1988). Ao longo do perfil vertical da floresta, observa-se alteração da temperatura, luminosidade e umidade do ar. Grande parte da energia luminosa recebida no ecossistema amazônico é utilizada para a produção de biomassa.

2.2. MUDANÇAS NA COBERTURA E USO DO SOLO NA REGIÃO AMAZÔNICA

A Amazônia Legal, com extensão de aproximadamente cinco milhões de quilômetros quadrados (59% do território brasileiro), engloba, além dos estados da região norte, os estados de Mato Grosso, parte do Maranhão e uma pequena porção de Goiás (Figura 1). Constitui a maior reserva de floresta pluvial do planeta, onde a maior parte da cobertura vegetal é florestal (64%), 24% é constituído de Cerrados e campos e 12% está alterada pela ação antrópica (LENTINI et al, 2003).

Figura 1: **Região da Amazônia Legal.**
Fonte: IBGE (1997).

A alteração do uso e cobertura do solo na região amazônica é fruto do modelo de desenvolvimento econômico adotado pelo Brasil, que, por meio de intervenção

estatal praticada desde os anos 60, através da construção de rodovias que servem de eixos de penetração para frentes de povoamento e de expansão das atividades econômicas, estimulou a ocupação da região. Este movimento de abertura de estradas cortando a floresta, que se intensificou nos anos 70 (I e II Planos Nacionais de Desenvolvimento), com abertura da Transamazônica, da Cuiabá - Santarém e da Cuiabá - Porto Velho, associada à conquista dos Cerrados Centrais pelas agroindústrias de grãos nos anos 80 (EGLER, 2001), foi responsável pela expansão do arco do fogo ou do desmatamento (Figura 2), pela concentração fundiária e pela implantação de novas cidades na Amazônia Meridional, o que indica que a tendência secular de devastação das florestas segue inexorável no Brasil.

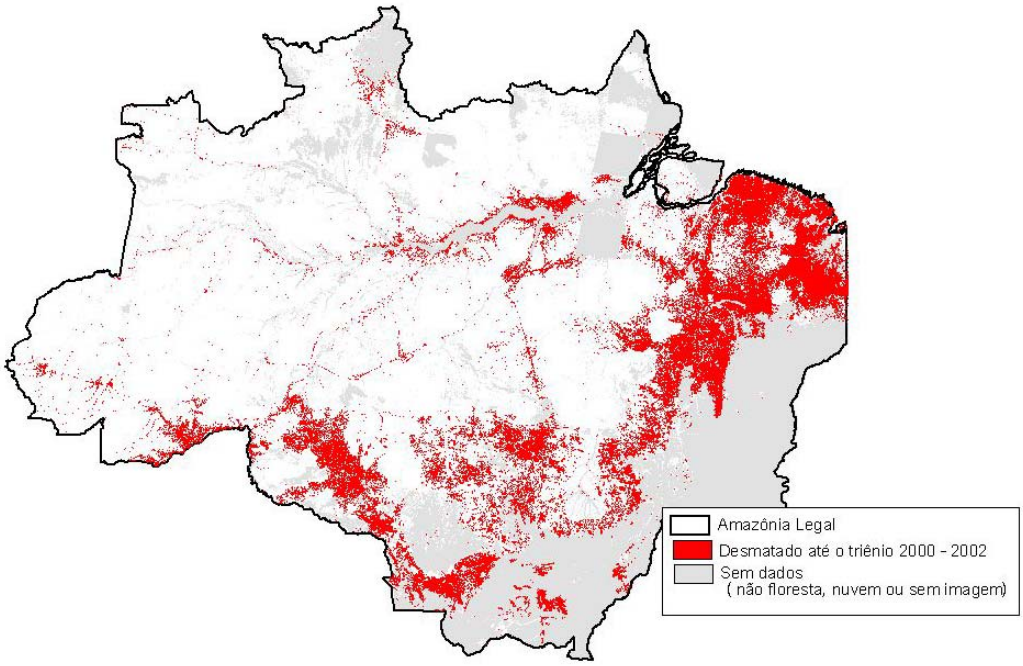

Figura 2: Arco do fogo ou do desmatamento na região da Amazônia Legal.

Fonte: INPE, 2004.

As principais atividades econômicas desenvolvidas na Amazônia são a pecuária e a extração madeireira (que geralmente atuam em simbiose), além das monoculturas de grãos, o que tem como fatores inerentes o desmatamento e queimada de florestas densas, os principais problemas ecológicos da região.

Essa elevada ação antrópica que causa alterações nos ecossistemas naturais por meio do desflorestamento e das queimadas, em conjunto com o crescente aumento da queima de combustíveis fósseis são os maiores responsáveis por mudanças climáticas ocorridas no mundo (MALHI & GRACE, 2000; RUSTAD, 2001). Isso se deve principalmente à elevada emissão de CO_2 por essas atividades, provocando inúmeros distúrbios climáticos e ecológicos.

Além disso, a Floresta Amazônica desempenha importante papel no clima regional e global. Com uma extensa área de floresta tropical úmida, influi no clima principalmente através da emissão ou retenção de gases e da evapotranspiração - isto é, transpiração das plantas e evaporação da água retida nas folhas, caules, na serrapilheira e no solo. Assim, de um lado a Floresta Amazônica é grande fornecedora de vapor de água (calor latente) para a atmosfera e de outro atua como importante seqüestradora do excesso de gás carbônico atmosférico, e o seu desmatamento implicaria em alterações como o aumento da temperatura do solo e do ar, redução da evapotranspiração e aumento do escoamento superficial (SENNA, 2004).

O entendimento e a quantificação dos processos relacionados ao balanço de energia e ao ciclo de carbono da Amazônia são, portanto, relevantes para a formulação de políticas ambientais e climáticas (BALDOCHI et al., 1996; FALKOWSKI et al., 2000), visto que desempenham importante papel no funcionamento do clima e da biologia na terra.

Alguns estudos já foram realizados na Amazônia com o intuito de entender esses processos (GRACE et al., 1995; MALHI et al., 2002; CARSWELL et al., 2002; REAE et al., 2002). Devido, porém à heterogeneidade da ampla extensão de terra que a Amazônia ocupa alguns parâmetros não se comportam da mesma maneira em áreas com diferentes taxas de nutrientes, precipitação e radiação solar, por exemplo. Assim, é necessário um maior número de medidas para que os dados coletados possam ser considerados representativos (FEARNSIDE, 2003), sendo de igual importância que estas medidas sejam feitas por um longo intervalo de tempo.

Por isso, são importantes mais estudos e com séries mais longas de dados, para o entendimento dos processos biológicos desta complexa região, facilitando a

construção de modelos de balanço de carbono e de energia válidos para toda a Floresta amazônica. (AGUIAR, 2006).

2.3. O MÉTODO DE COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS

Para medidas de fluxos de massa e de energia de longa duração nos ecossistemas da Amazônia, uma das técnicas mais comumente empregadas é o método de correlação de vórtices turbulentos (BALDOCCHI, et al., 1988, PAW et al., 2000, VOURLITIS & OECHEL, 1997, 1999; GRACE et al., 1995; GRACE, 1992; MCWILLIAM et al.,1996, VOURLITIS et al., 2001 e 2002). Esse método se baseia em medidas de flutuações da velocidade do vento e das concentrações de CO_2 e de vapor d'água, geralmente efetuadas em 10Hz (McMILLEN, 1988; LEUNING & MONCRIEFF, 1990).

Uma vez que estudos prolongados de trocas entre a biosfera e a atmosfera requerem medições diretas e contínuas da transferência de vapor d'água e dióxido de carbono entre os sistemas, técnicas micrometeorológicas, como o método da correlação de vórtice turbulento, revelam-se uma ferramenta extremamente eficaz para monitoração dessa troca entre a biosfera e a atmosfera (MONCRIEFF et al., 1997).

A técnica de correlação de vórtice turbulento (eddy covariance) está sendo habitualmente usada para medidas diretas de fluxos de momentum, energia, CO_2, vapor d'água e outros gases que se colocam entre a superfície e a atmosfera (MASSMAN, 2000). Trata-se de uma técnica que permite estudar a interação entre a superfície da Terra e a atmosfera. É usada também, na biometeorologia, em processos atmosféricos e biológicos (BALDOCCHI & MEYER, 1998).

A interação da atmosfera com a superfície resulta no aparecimento de turbilhões, que se movem aleatoriamente, mudando constantemente de posição, misturando-se com turbilhões de outros níveis (PEREIRA et al., 1997). A difusão do vapor d'água ocorre sob ação de pequenos turbilhões, que o transportam para níveis mais elevados. Tal deslocamento ocorre ao acaso com trajetórias irregulares. Segundo MONTEITH (1981), o transporte aos níveis superiores na camada limite ocorre dentro das características de um processo de difusão turbulenta e pode ser expressa de acordo com a Equação 1.

$$fl = -\rho.k\,\frac{dP}{dz} \qquad \text{Eq.1}$$

Em que, *fl* é o fluxo, ρ é a densidade do ar atmosférico, *k* é o coeficiente de difusão turbulenta e *dP*/*dz* é o gradiente da propriedade considerada.

O fluxo turbulento de qualquer escalar pode ser escrito como na Equação 2.

$$F_c = \overline{w\rho_c} \qquad \text{Eq. 2}$$

Em que, F_c é a densidade de fluxo do escalar, *w* é a velocidade vertical do vento e ρ_c é a densidade do escalar e a barra representa a média do produto sobre o intervalo da amostragem.

A turbulência cria vórtices na atmosfera que se movem constantemente e que são os principais responsáveis pelo transporte das propriedades desses volumes de ar (BALDOCCHI et al., 1988). As equações que se seguem usam a decomposição de Reynolds, em que cada variável é igual à soma da média com uma das partes flutuantes, conforme Equações 3 e 4.

$$w = \overline{w} + w' \qquad \text{Eq. 3}$$

$$\rho = \overline{\rho_c} + \overline{\rho'_c} \qquad \text{Eq. 4}$$

Resultando na Equação 5.

$$Fc = \overline{(\overline{w} + w')(\overline{\rho_c} + \rho_{c'})} \qquad \text{Eq. 5}$$

Pela lei de conservação de massa, a média da velocidade vertical do vento $\overline{w}$ é nula, o fluxo turbulento de uma grandeza escalar *c* pode ser descrita pela Equação 6.

$$F_c = \overline{w'\,\rho'_c} \qquad \text{Eq. 6}$$

Em que, *w'* representa a variação da componente vertical da velocidade do vento em relação a sua média, ρ'_c representa a variação da concentração do escalar *c* em relação a sua média e a barra horizontal sobre o produto dos desvios caracteriza a covariância entre *w'* e ρ'_c.

Desta forma, os fluxos turbulentos de calor latente, calor sensível e CO_2 podem ser descritos, respectivamente, nas Equações 7, 8 e 9.

$$\lambda E = \rho\lambda\overline{w'q'} \qquad \text{Eq. 7}$$

$$H = \rho c_p \overline{w'\mathrm{T}'} \qquad \text{Eq. 8}$$

$$Fc = \rho\overline{w'C'} \qquad \text{Eq. 9}$$

Em que, *q* é a umidade específica do ar, T é a temperatura média do ar, *C* é a concentração de CO_2, c_p é o calor específico do ar a pressão constante, ρ é a densidade do ar seco a 20° C e λ é o calor latente de evaporação.

É freqüentemente impossível orientar o sensor de velocidade vertical de maneira que a velocidade não desejada seja zero, ou achar um lugar absolutamente plano. A influência de inclinação do sensor ou a irregularidade do terreno pode alterar a informação do fluxo de vórtice turbulento, causando aparente média da velocidade vertical não nula (KAIMAL & HAUGEN, 1969, HYSON et al., 1981).

Se medidas de fluxos com a técnica de correlação de vórtices turbulentos forem realizadas em terrenos que se inclinam suavemente, recomenda-se girar o sistema de captação de velocidade do vento em três direções a um ângulo que faça as velocidades vertical e lateral se igualarem a zero, para proceder à medida dos dados do fluxo turbulento vertical (HYSON et al., 1977). Como uma regra de dedo polegar, é assumido que podem ser feitas medidas de fluxo turbulentas seguras, depois de rotação de coordenada apropriada, quando o declive do terreno está compreendida entre 8% e 15%. Detalhes deste procedimento descritos por WESELY (1969) são esboçados por BUSINGER (1986) e BALDOCCHI et al. (1988).

O método de vórtices turbulentos é mais exato quando o vento, a temperatura, a umidade e o CO_2 forem constantes e a vegetação subjacente for homogênea e situada em terreno plano e de grande extensão. Quando o método é aplicado sobre paisagens naturais e complexas, ou durante as condições atmosféricas que variam com o tempo a quantificação da troca do CO_2 entre a biosfera-atmosfera, devem-se incluir medidas do armazenamento atmosférico (BALDOCCHI, 2003, apud ARRUDA, 2005).

Segundo BALDOCCHI (2003), calcular as médias dos períodos longos do excesso das medidas do fluxo de CO_2 reduz o erro da amostragem aleatória a valores muito pequenos. Infelizmente, as lacunas nos períodos de aquisição dos dados são inevitáveis ao construir registros de dados durante longos intervalos de tempo. As lacunas são preenchidas geralmente com valores produzidos por modelos estatísticos e empíricos para produzir dados diários e anuais. As lacunas preenchidas por tais modelos não introduzem erros significativos porque os algoritmos empíricos são derivados de populações estatísticas grandes. Por outro lado, os erros de medidas de fluxo podem ser influenciados na noite em que os ventos são fracos e intermitentes.

Os erros de conceito noturno tendem a produzir redução na medida de respiração do ecossistema. A verificação da estratificação turbulenta em camada limite atmosférica é complicada por uma multiplicidade de influências físicas, incluindo clara divergência no fluxo de radiação atmosférica, elevado corte associado com baixo nível de sinal, movimento sinuoso, vibrações gravitacionais, escoamento do fluido, e aumento sensível da heterogeneidade da superfície (MAHRT et al., 1998, FINNIGAN, 2000, KATUL et al., 2002).

Além utilização da técnica de vórtice turbulento, as medidas de fluxos de massa e energia se fundamentam em outras definições, como por exemplo, o balanço de massa e o balanço de energia.

2.4. BALANÇO DE ENERGIA

A principal fonte de energia da Terra é o Sol. Essa energia é responsável por todo processo natural que ocorre na superfície terrestre. O resultado final entre a energia que chega até a superfície e a que sai pode ser representado por meio do balanço de energia.

A Terra, ao receber radiação solar, direta ou difusa (ondas curtas), terá sua temperatura aumentada, emitindo conseqüentemente radiação de ondas longas, obedecendo à Lei de Stefan-Boltzmann: "a energia emitida por um corpo E_r (W m^{-2}) é proporcional a quarta potência de sua temperatura absoluta T (K)", conforme Equação 10.

$$E_r = \varepsilon \sigma \mathrm{T}^4 \qquad \text{Eq. 10}$$

Em que, ε é a emissividade do corpo (≈1) e σ é a constante de Stefan-Boltzmann (5,67 10^{-8}W/m^2 K^4). Na floresta, a emissividade é aproximadamente 0,9 (AYOADE, 1998).

A quantidade de radiação solar incidente sobre o topo da atmosfera da Terra depende de três fatores, principalmente do período do ano, do período do dia e da latitude. A quantidade total de radiação recebida em determinado local é afetada pela duração do dia. A duração do dia, geralmente, aumenta ou diminui com o aumento da latitude, a depender da estação. No verão, por exemplo, a duração do dia aumenta do Equador em direção ao pólo Norte e diminui em direção ao pólo Sul (AYOADE, 1998).

Segundo SELLERS (1965), a distribuição da radiação solar não é simétrica. Isto ocorre porque a Terra, em seu movimento de rotação e translação, encontra-se em janeiro em sua posição mais próxima do Sol, de modo que em todas as latitudes se recebe mais radiação durante o inverno no hemisfério norte que durante o verão. O balanço de radiação, que é característico da superfície e que representa a radiação líquida (Rn), é definido como sendo igual à soma do balanço de ondas curtas (BOC) e balanço de ondas longas (BOL), Equação 11.

$$\mathrm{Rn} = \mathrm{BOC} + \mathrm{BOL} \qquad \text{Eq. 11}$$

Em função dos valores de cada um desses fluxos, Rn poderá ter valor positivo ou negativo. Durante o período diurno, o BOC é positivo, sendo nulo no período noturno. De acordo com PEREIRA (2002), normalmente o valor diário do BOL em uma superfície natural é negativo. Isso faz com que, nas superfícies naturais, o valor diurno do BOC (maior do que o do BOL) torne Rn positivo nesse período do dia e negativo no período noturno. Esse é um modo da superfície eliminar parte da energia solar absorvida e que se transformou em calor sensível.

O balanço energético é uma aplicação da primeira lei da termodinâmica, em que deve existir uma igualdade entre o balanço de energia recebida pelo ecossistema e a soma da energia liberada sob forma de calor sensível e latente, e da energia armazenada pelo ecossistema, isto é, solo e biomassa (ROBINSON, 1966).

No período diurno o solo recebe radiação solar em forma de ondas curtas. Parte dessa radiação é devolvida ao espaço devido ao albedo (Rs). O solo aquecido ira emitir radiação longa (Rl) e parte é retransmitida pelas nuvens (Ra). A superfície do solo, quando aquecida, cede energia para aquecimento do ar (H), para evaporação da água (LE), e para aquecimento do solo (G).

Durante a noite, devido à ausência do sol, a Terra continua perdendo rapidamente energia resfriando mais que o ar adjacente e que camadas mais profundas do solo. Consequentemente, no balanço de energia noturno, a Terra emite radiação longa (Rl), a atmosfera emite para a Terra radiação longa refletida pelas nuvens (Ra). Como o solo está mais frio que o ar adjacente, o vapor d'água ao atingi-lo é condensado, dessa forma, a Terra recebe calor latente (LE) de condensação.

A superfície com temperatura baixa faz com que a condução de calor das camadas mais profundas do solo (G) seja dirigida para cima em direção a ela e finalmente o ar mais aquecido imediatamente acima da superfície do solo (H) transfira energia por meio de condução para a superfície do solo.

A essência do conceito de balanço de energia está na afirmação de que a diferença entre a energia que entra e a energia que sai de um sistema é a energia captada ou utilizada por ele. Da energia que chega à superfície da Terra, parte é utilizada para aquecer o ambiente na forma de calor sensível (H), parte para evaporar a água na forma de calor latente (LE), parte para aquecer a terra, fluxo de calor no

solo (G), e parte é utilizada na fotossíntese (P) (PEREIRA, 2002). O saldo de radiação líquida (Rn) é dado pela Equação 12.

$$Rn + H + LE + G + P = 0 \qquad \text{Eq. 12}$$

Como a quantidade de energia usada para a fotossíntese é muito pequena, em relação à radiação líquida, a Equação 2 pode ser escrita desprezando-se o valor de P, (AYOADE, 1998). Segundo AYOADE (1998), nos continentes, o fluxo de calor latente (LE) é mais alto no equador, diminuindo em direção aos pólos, e o fluxo de calor sensível (H) ou troca turbulenta de calor é maior nas zonas subtropicais, diminuindo tanto em direção aos pólos quanto em direção ao equador.

Toda vez que a superfície estiver bem umedecida, a maior parte da energia disponível será utilizada na evapotranspiração, o que representa 70% a 80% da Rn. O estante de energia disponível será utilizado no aquecimento das plantas, do ar e do solo (PEREIRA, 2002). Quando existe boa disponibilidade de água no solo, a relação LE/Rn se mantém dentro da faixa acima considerada, desde que não haja advecção de calor sensível (H) de áreas adjacentes.

Para condições onde há advecção de calor sensível, a relação LE/Rn passa de 100%. Essa situação foi observada em cultura de melão por ALVES et al. (1998), em que LE/Rn chegou a 182% (PEREIRA, 2002). Se a superfície não estiver bem suprida de água, a fração de Rn destinada a LE diminui, aumentando assim a fração para H + G.

Para o sistema Terra-atmosfera como um todo, o balanço de energia é positivo entre as latitudes 30º S e 40º N, e negativo no restante (AYOADE, 1998). Diversos métodos micrometeorológicos de medidas de fluxos de energia, foram descritos por VERMA (1990). Segundo esse trabalho, os fluxos de calor sensível, latente e de momentum, podem ser calculados em função dos gradientes médios de temperatura, da umidade específica e da velocidade do vento no interior da camada limite.

2.4.1. Fluxos de energia em ecossistemas tropicais

A partição de energia na superfície é uma complexa função das interações de longo prazo entre o ciclo biogeoquímico, o clima, e as interações de pequeno prazo entre a fisiologia das plantas e o desenvolvimento da camada limite atmosférica. A partição entre fluxos de calor latente (evapotranspiração) e calor sensível é decisiva na determinação do ciclo hidrológico, desenvolvimento da camada limite, tempo e clima (WILSON et al., 2002).

Simulações de modelos climáticos mostram que florestas tropicais mantêm altas taxas de evapotranspiração, diminuição da temperatura do ar à superfície e aumento de precipitação comparados a áreas de pastagem. E, a região mais estudada nesse sentido é a Amazônia, onde conversões em grande escala de florestas a pastagens passam a ocasionar um clima mais quente e seco (BONAN, 2008).

O padrão regional de precipitação dentro da Amazônia está ligado aos padrões de grande escala da evaporação da superfície da terra (ROCHA et al., 2004), de modo que a redução da precipitação é uma conseqüência das mudanças no balanço de energia e de água (FOLEY et al., 2003).

Existem vários tipos de vegetação no ecossistema e os componentes do balanço de energia são diferentes para cada ecossistema, com diferentes condições fenológicas e meteorológicas (HARAZONO et al., 1998). Assim, em vegetações de terra úmida a evapotranspiração consome maior parte da radiação incidente e tem uma boa influência não somente na distribuição de energia, mas também nas condições hídricas (BURBA et al., 1999).

Parâmetros e processos no ecossistema, como o conteúdo de água no solo, produção da vegetação, nutrientes no ecossistema e balanço de água são influenciados pela evapotranspiração (WEVE, 2002). Segundo MALHI et al. (2002) simulações de modelo do clima global sugerem que desflorestamento em grande escala na Amazônia pode levar a aumentos na temperatura da superfície regional em até 2 ºC, e reduções de 25% na evaporação e na precipitação. O entendimento do controle das variações dos fluxos de evaporação nos territórios tropicais continua pobre, e depende crucialmente de como as vegetações tropicais usam energia e água.

As trocas de energia na interface vegetação-atmosfera, que ocorrem por meio dos componentes do balanço de radiação e dos fluxos de calor sensível e calor latente à superfície, são essenciais para modelagem climática, sendo as magnitudes desses fluxos, e suas variações em períodos menores que um dia, muito importantes na calibração de modelos climáticos e hidrológicos (BALDOCCHI & MEYERS, 1998). Em intervalos maiores, essas grandezas também são utilizadas em modelos de impactos climáticos globais resultantes de interações fisiográficas da superfície.

2.4.2. Partição de energia em ecossistemas tropicais

Partindo do princípio de que a diferença entre a energia que entra e a energia que sai de um sistema é a energia captada ou utilizada por ele, pode-se dizer que o saldo de radiação líquida (Rn), será partido em: calor sensível (H), calor latente (λE), parte será o fluxo de calor no solo (G), parte ficará armazenada na biomassa e no dossel (S) e outra parcela será utilizada no processo de fotossíntese (P), conforme Equação 13.

$$Rn = H + \lambda E + G + S + P \qquad \text{Eq.13}$$

A qualidade das medidas dos fluxos de calor latente e sensível é avaliada pelo fechamento do balanço de energia. Devido à falta de dados referentes aos componentes G, S e P no período em questão, essas variáveis não serão consideradas no presente trabalho, devido à falta de dados referentes a essas variáveis nesse período, ficando o balanço considerado como na Equação 14.

$$Rn = H + \lambda E \qquad \text{Eq. 14}$$

Tipicamente, a soma dos componentes do balanço de energia medidos representa de 70 a 90% da radiação solar líquida medida (HEUSINKVELD et al., 2004). Várias explicações têm sido propostas, como as incertezas na instrumentação, a não inclusão de componentes que são importantes para alguns tipos de vegetação e certain time scale (MICHILES & GIELOW, 2008).

No entanto, um prejuízo do balanço devido à falta desses dados não é

presumido, uma vez que os termos que dizem respeito à estocagem podem ser ignorados porque a energia estocada durante o dia é balanceada pela perda noturna (FALGE et al., 2001).

2.5. MODELAGEM DE ECOSSISTEMAS FLORESTAIS

Como citado anteriormente, a Amazônia é uma vasta região que apresenta diversos ecossistemas, com destaque para a floresta tropical úmida, onde se encontra a maior biodiversidade do planeta. Existem, ainda, outros ecossistemas na região, como o Cerrado, os manguezais e, recentemente, têm crescido em importância os ecossistemas agrícolas.

As recentes alterações da cobertura vegetal têm evidenciado a importância da elaboração de estudos dos ecossistemas regionais, resultando no desenvolvimento de uma variedade de modelos numéricos para simular o comportamento dos fluxos de carbono, água e energia nos ecossistemas (DICKINSON et al., 1984; SELLERS et al., 1986; POLLARD & THOMPSON, 1995; BONAN, 1996; FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000). O desenvolvimento destes modelos permitiu que diversos autores discutissem os prováveis efeitos da alteração da cobertura vegetal sobre os processos climáticos regionais e globais, concentrando-se na evolução dinâmica dos processos ecológicos, biofísicos, biogeoquímicos e biogeográficos que ocorrem em diferentes escalas de tempo (HURTT et al., 1998).

Os modelos terrestres desenvolvidos para estudar mudanças globais podem ser agrupados de acordo com os seus objetivos, apresentando a seguinte classificação (HURTT et al., 1998): modelos do tipo I (biogeoquímicos) como os modelos BGC (RUNNING et al., 1991), TEM (RAICH et al., 1991; MELILLO et al., 1993) e CENTURY (PARTON et al., 1988), do tipo II (biofísicos) como o BATS (DICKINSON et al., 1984), SiB (SELLERS et al., 1986) e LSX (POLLARD & THOMPSON, 1995) e modelos do tipo III (biogeográficos) como o MAPSS (NEILSON, 1995), DOLY (WOODWARD, 1987) e BIOME (PRENTICE et al., 1992; HAXELTINE et al., 1996). Entretanto, existem modelos integrados que se encaixam em mais de uma categoria, como o IBIS (FOLEY et al., 1996), que seria do tipo I + II + III.

O modelo SITE (SANTOS, 2001), a ser aplicado neste trabalho, pode ser classificado como tipo I + II, mesma categoria em que encaixa o modelo LSM (BONAN, 1996).

Ao acoplarem mais de um processo, esses modelos permitem estudar com mais profundidade as interações entre a biosfera e a atmosfera, principalmente os diversos mecanismos de retroalimentação envolvidos (SANTOS, 2001).

Assim, o estudo dos fluxos de energia, água e carbono entre a atmosfera e um ecossistema, em vários locais e por um período de tempo significativo, permitirá que se identifique e analise o impacto de eventuais mudanças ambientais nesse ecossistema, incluindo mudanças no uso do solo, na variabilidade climática e no aumento da concentração de CO_2 na atmosfera, uma vez que tais mudanças podem afetar a estrutura e o funcionamento total de um ecossistema natural, o que irá refletir diretamente nos fluxos anteriormente citados.

2.5.1. O Modelo SITE

Com o objetivo de estudar o funcionamento dos ecossistemas tropicais em relação às condições ambientais foi desenvolvido por SANTOS (2001) um modelo simplificado de ecossistema tropical (Simple Tropical Ecosystem Model - SITE), com a finalidade principal de simular os fluxos de massa e energia entre o ecossistema e a atmosfera, que visou conciliar a simplicidade com o rigor no tratamento dos processos físicos, químicos e biológicos envolvidos: balanço de radiação solar e infravermelha no dossel, processos aerodinâmicos, fisiologia vegetal e transpiração, balanço de água no dossel, transporte de massa e energia, fluxo de calor e água no solo e balanço de carbono (SANTOS, 2001).

Desse modo, o modelo SITE foi desenvolvido com base em modelos anteriores, principalmente o LSX (POLLARD & THOMPSON, 1995), o LSM (BONAN, 1996) e o IBIS (FOLEY et al., 1996), porém, buscando uma maior simplicidade. O modelo incorpora vários processos: balanço de radiação solar e infravermelha, processos aerodinâmicos, fisiologia vegetal e transpiração do dossel, balanço de água interceptada pelo dossel, transporte de massa e energia na atmosfera, fluxo de calor e água no solo e balanço de carbono, mas que possui a complexidade

necessária para representar os processos fisiológicos envolvidos com o ciclo do carbono (Figura 3).

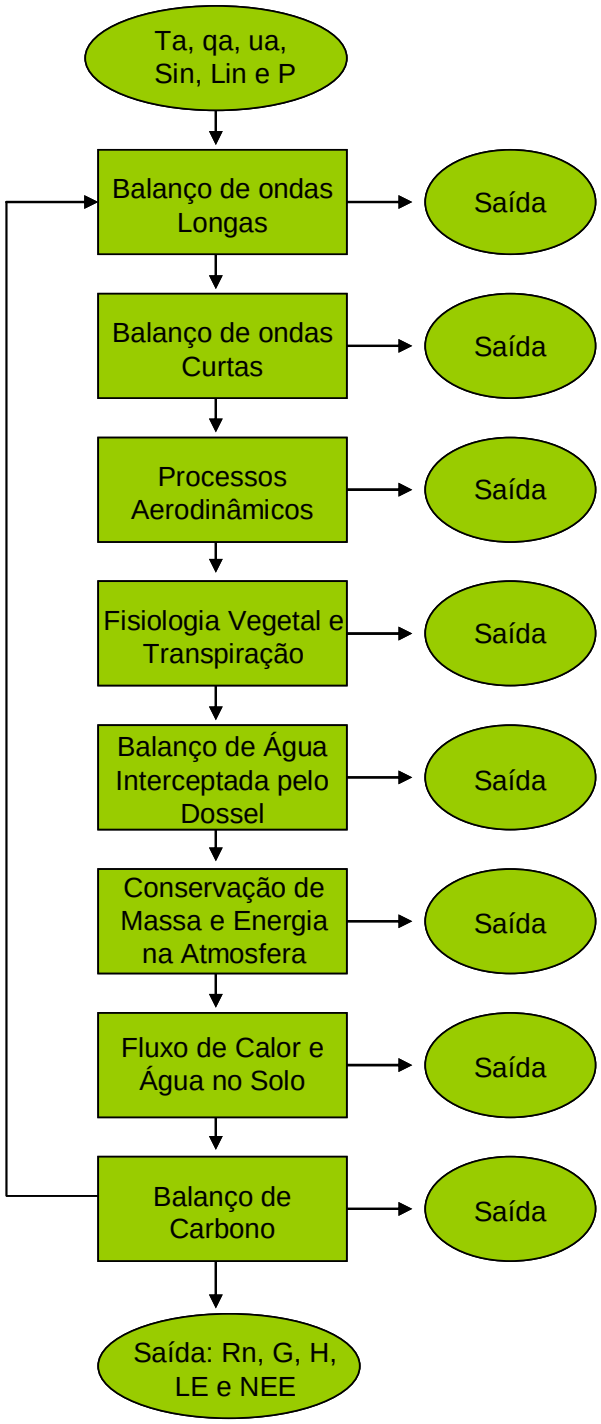

Figura 3: **Fluxograma do modelo SITE, em que Ta é a temperatura do ar, qa é a umidade específica do ar, ua é a velocidade horizontal do vento, Sin é a radiação de onda curta incidente, Lin é a radiação de onda longa incidente e P é a precipitação.**

Fonte: NUNES (2008).

A versão atual do modelo SITE (Site1.1-0d) foi codificado em Fortran 77, apresentando aproximadamente 1450 linhas de código. É um modelo pontual, que usa um intervalo de integração (dt) de uma hora, representando um ponto de terreno totalmente coberto por uma floresta tropical perene de folhas largas. Pequenas modificações podem ser necessárias para representar outros ecossistemas tropicais.

O modelo é estruturado com uma camada de dossel e duas camadas no solo, onde a primeira camada é próxima à superfície do solo e a segunda até uma profundidade de aproximadamente 3,5 m (Figura 4). Em comparação, o módulo da superfície terrestre do IBIS apresenta duas camadas de vegetação (árvores e gramíneas), oito camadas de solo e três de neve (SENNA, 2004).

Na Figura 4, a altura de coleta de dados (z_a) é igual a 42 m, e as profundidades do centro das camadas g e d são 0,15 e 0,50 m, respectivamente. As forçantes atmosféricas devem ser medidas acima do dossel.

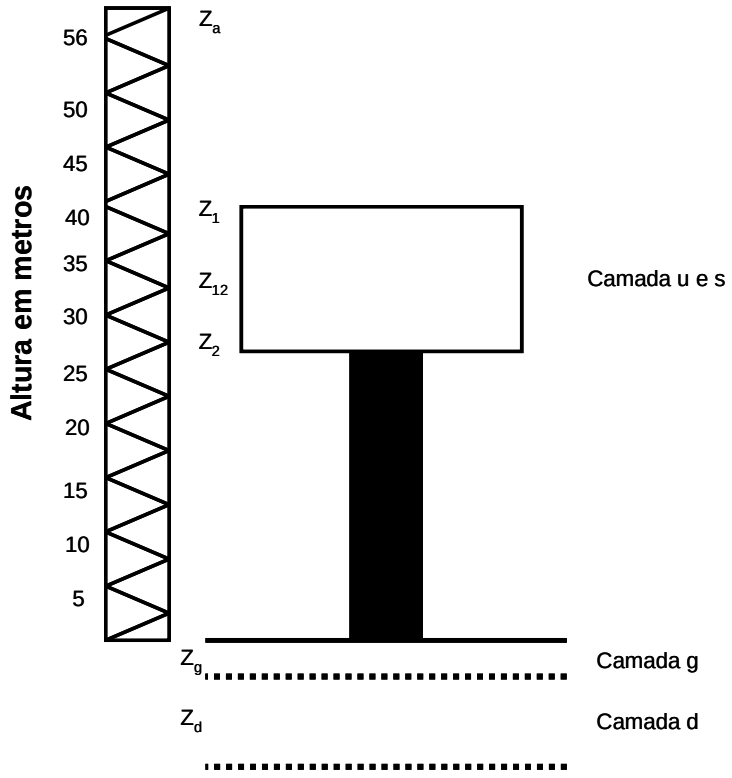

Figura 4: Representação esquemática do modelo. *u*, *s*, *g*, *d*, referem-se às folhas, galhos, camada superficial e camada profunda do solo, respectivamente.

FONTE: Adaptado de Santos (2001).

Os dados de entrada do modelo são referentes às forçantes atmosféricas (temperatura do ar, umidade relativa do ar, precipitação, velocidade horizontal do vento, radiação solar de onda curta incidente, saldo de radiação de ondas longas, albedo do dossel e pressão atmosférica). Além desses dados, o modelo utiliza ainda parâmetros referentes à biofísica da vegetação, constantes físicas, parâmetros fisiológicos e características de duas camadas de solo, conforme descrito por SANTOS (2001).

O modelo SITE simula o balanço de radiação da vegetação e do solo, e o particiona em fluxos difusos e turbulentos de calor sensível e latente. Em geral, essa partição depende principalmente da condutância estomática (*gs*): quanto maior *gs,* maior será a fração LE/Rn.

Por sua vez, *gs* depende principalmente da taxa de assimilação de CO_2 líquida, controlada pela PAR (radiação fotossinteticamente absorvida) e por *Vmáx* (capacidade máxima da enzina rubisco a 15 ºC), o que inclui estressores térmicos e de umidade do solo. A assimilação de CO_2 líquida (*An*) é sensível principalmente aos parâmetros *Vmáx* e *β2* (distribuição das raízes finas), enquanto *gs* (condutância estomática) responde também ao parâmetro m (coeficiente relacionado àcondutância estomática) . Em geral, quanto maior *Vmáx*, maior será *Jc* (taxa de assimilação de CO2 limitada pela Rubisco), *Ag* (assimilação de CO_2 bruta), *An*, *gs* e LE/Rn, desde que $Jc < Je$, onde Je é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz . Seguindo o mesmo raciocínio, quanto maior *β2*, mais profundas as raízes, menor o estresse hídrico, maior *Vmáx*, *Jc*, *Ag*, *An*, *gs* e LE/Rn, novamente respeitada a condição $Jc < Je$. E, quanto maior *m*, maior *gs* e LE/Rn. Por outro lado, a capacidade térmica do dossel influencia a amplitude térmica do dossel durante o dia e afeta a amplitude diária de H: quanto menor a capacidade térmica dos galhos no dossel superior (C_{HS}), maior será a amplitude de H (IMBUZEIRO, 2005).

O modelo SITE já vem sendo empregado, e tem apresentado bons resultados, não só para a área para a qual foi desenvolvido (SANTOS & COSTA, 2004), como também para um sítio experimental em ecossistema de Mata Atlântica (NUNES et al., 2007). Também foram feitas calibrações e alterações no código do modelo inicial (NUNES et al., 2006; NUNES, 2008), e os resultados obtidos nos diversos sítios em estudo foram considerados satisfatórios.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA EXPERIMENTAL

A área em estudo, inserida na bacia Amazônica, localiza-se a aproximadamente 60 km ao norte da sede municipal de Sinop, na Fazenda Maracaí, Mato Grosso (55°19'O; 11°25'S), conforme Figura 5.

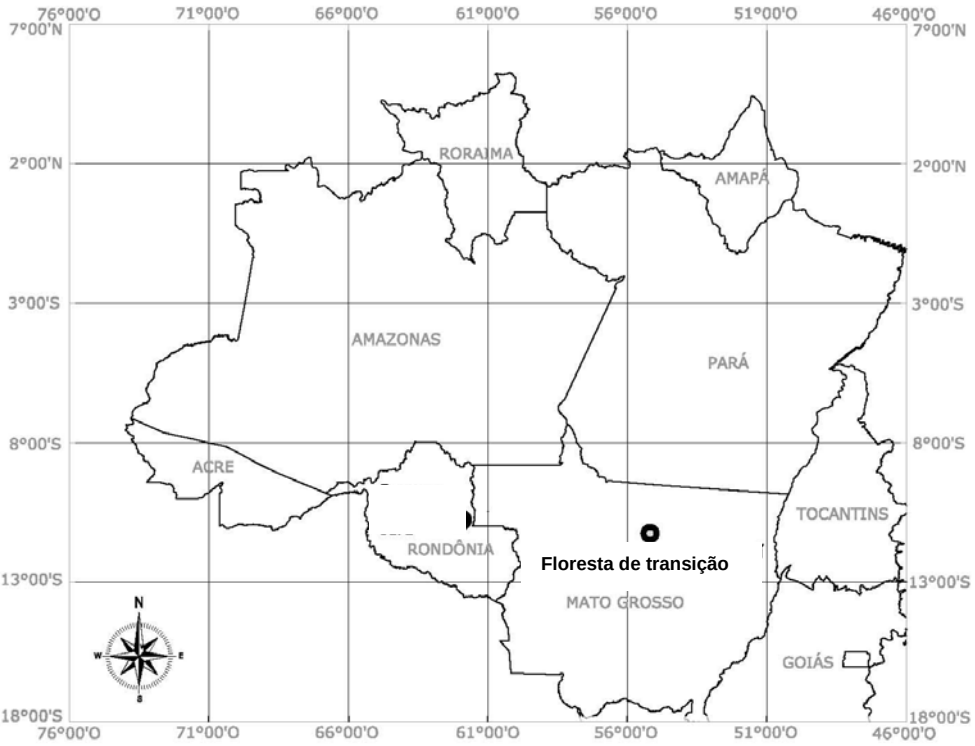

Figura 5: **Localização da área em estudo.**

O sítio experimental é composto por uma área de floresta tropical de transição entre Amazônia e Cerrado, com altura média do dossel de 28 m e algumas árvores emergentes alcançando 42 m. Nos últimos 30 anos, a temperatura média anual foi de 24 ºC com pequena variação sazonal (PRIANTE FILHO et al., 2004).

O solo é classificado como um neossolo quartzarênico órtico típico A moderado álico, sendo um solo extremamente arenoso, que apresenta na profundidade de 50 cm uma textura com 84% de areia, 4% de silte e 12% de argila (PRIANTE FILHO et al., 2004). Este solo tem elevada porosidade e drena rapidamente a água após a precipitação (i.e., dentro de 4-7 dias) (VOURLITIS et al., 2002).

No presente trabalho foram consideradas quatro estações, com 3 meses de estação seca (J-J-A), três meses de estação de transição seca-úmida (S-O-N), 3 meses de estação úmida (D-J-F) e três meses de estação de transição úmida-seca (M-A-M) de acordo com o adotado anteriormente em estudos de VOURLITIS et al. (2004), e PRIANTE FILHO et al. (2004).

3.2. INSTRUMENTAÇÃO

Para caracterização do microclima da área em estudo, foi utilizada uma série de dados coletada de 2001 a 2007, referente às variáveis temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, radiação solar global incidente, radiação solar líquida, precipitação e fluxos de calor latente e sensível.

Desta série de dados foram selecionados períodos para serem utilizados na modelagem que serão descritos no item 3.4.1.

3.2.1. Medidas micrometeorológicas

Na floresta de transição foi instalado um piranômetro (LI-200SA Pyranometer Sensor) a 42 m de altura em uma torre micrometeorológica, para medição da radiação solar global (Rsd). As medidas de temperatura (T) e umidade do ar (UR) foram realizadas por psicrômetro (HMP-35, Vaisala, Inc., Helsinki, Finland), instalado a 41 m de altura.

Os dados micrometeorológicos obtidos foram armazenados por um sistema de aquisição de dados, um Datalogger (CR10 -X, Campbell Scientific, Inc., UT, USA), programado para fazer leituras das medidas a cada 30 segundos e armazenar uma média a cada 30 minutos.

3.2.2. Medidas dos fluxos

Foi instalada uma torre micrometeorológica com um sistema de correlação de vórtices turbulentos a 42 m (12-14 m acima do dossel da floresta) que origina as medidas dos fluxos de calor sensível (LE), calor latente (H) e velocidade do vento (u), medidos em 10Hz usando um analisador de gás infravermelho de caminho aberto (NOAA-ATDD, Oak Ridge, TN, USA; Modelo LI-7500, LI-COR, Inc. Lincoln, NE,USA). Esses sensores estavam conectados a um microcomputador tipo "palmtop" que fazia a leitura dos sensores com uma freqüência de 10,4 Hz e armazenava os dados brutos em arquivos a cada 30 minutos.

Os analisadores de gás infravermelho de caminho aberto foram calibrados no intervalo de duas a quatro semanas, usando um gás padrão de 300 e 400 μmol mol^{-1} e um gerador portátil de ponto de orvalho (LI-610; LI-COR, Lincoln, Nebraska, USA).

3.3. ANÁLISE E TRATAMENTO DOS DADOS

Para a análise dos dados, a princípio foi realizada uma análise da porcentagem de dados faltantes (falhas), uma vez que, na série de dados utilizada, foi comum a ocorrência de falhas, variando de algumas horas a quase um ano.

Foram adotados valores limites mínimos e máximos para as variáveis que estão descritos na Tabela 3.

Tabela 1: Valores limites adotados para filtragem das variáveis de entrada.

Variável	Valor mínimo	Valor máximo	Unidade de medida
Velocidade do vento (u)	0	20	$m\ s^{-1}$
Temperatura do ar (T)	15	50	C
Umidade relativa do ar (UR)	25	105	%
Saldo de radiação (Rn)	-100	1.000	$W\ m^{-2}$
Radiação solar incidente (Rsd)	0	1.300	$W\ m^{-2}$

Na seqüência, analisou-se a variação temporal (sazonalidade), e as médias mensais das variáveis. Também foi avaliada a qualidade das medidas dos fluxos de calor latente e sensível pelo fechamento do balanço de energia (conforme Equação 11). Devido à falta de dados referentes aos componentes: fluxo de calor no solo (G), energia armazenada no dossel (S) e energia armazenada na biomassa (P) utilizada no processo de fotossíntese, essas variáveis não foram consideradas no presente trabalho, considerando o balanço como na Equação 12.

3.4. MODELAGEM

3.4.1. Variáveis de entrada

As variáveis do conjunto de dados de entrada utilizado para modelagem dos fluxos de energia foram: velocidade horizontal do vento (u), temperatura do ar (T), umidade específica do ar (qa), radiação de onda curta incidente (Sin), radiação de onda longa incidente (Lin) e precipitação (Ppt).

Os dados de Lin foram estimados por meio da Equação (15), sugerida por NUNES et al. (2007).

$$\mathrm{Lin} = \mathrm{Rn} - \mathrm{Sin} + \lambda\sigma \mathrm{T}a^4 \qquad \text{Eq. 15}$$

Em que, se supõe que a temperatura efetiva da emissão do dossel é igual à temperatura absoluta do ar, em que λ é a emissividade do dossel e σ é a constante de Stephan-Boltzmann (5,67 x 10^{-8} W m^{-2} K^{-4}). O valor de λ para o sítio de Sinop (0,997521) foi determinado pela Equação 16 (VILANI, 2007).

$$\lambda = 1 - e^{-LAI} \qquad \text{Eq. 16}$$

Em que, LAI é o índice de área foliar (m^2 m^{-2}).

Da série de dados de 2001 a 2007 foram selecionadas sete intervalos de séries das variáveis meteorológicas tendo como critério para seleção, que o período em questão apresentasse pouca ou nenhuma falha e possuísse medidas de todas as variáveis de entrada do modelo, ou para estimativa das mesmas. Também buscou-se representar, nas séries determinadas, dados referentes as estações seca, seca-úmida, úmida e úmida seca.

As séries de dados utilizadas estão descritas na Tabela 1.

Tabela 2: Descrição das séries de dados utilizadas como entrada do modelo SITE.

Série	Ano	Mês	Dia juliano	Estação
Série 1	2001	Janeiro a fevereiro	22 a 59	Úmida
Série 2	2001	Março a maio	60 a 152	Úmida seca
Série 3	2002	Julho a agosto	213 a 236	Seca
Série 4	2002	Dezembro	336 a 363	Úmida
Série 5	2003	Julho a agosto	213 a 244	Seca
Série 6	2003	Setembro	245 a 274	Seca úmida
Série 7	2007	Junho e julho	182 a 213	Seca

3.2.2. Preenchimento de falhas dos dados de entrada

Os dados de entrada do modelo SITE tiveram as falhas preenchidas por um modelo desenvolvido em código Fortran, por interpolação, de acordo com as seguintes condições propostas por SENNA (2004):

Se a falha (f) for menor ou igual a 3 horas, aplica-se a Equação 17.

$$X_i = X_p + \frac{(X_{p+f+1} - X_{p'})}{f+1} \times (i - p) \qquad \text{Eq. 17}$$

Em que X_i é o valor a ser preenchido, X_p é o antecessor da falha e X_{p+f+1} é o sucessor da falha.

Se a falha for maior que 3 horas e menor que 24 horas, aplica-se a equação 18.

$$X_i = X_{i-48} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \times (X_P - X_{P-48}) + \frac{(i-p)}{f+1} \times (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-48}) \quad \text{Eq.18}$$

Se a falha for maior ou igual a 24 horas, aplica-se a equação 19.

$$X_i = X_{i-48mm} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \times (X_P - X_{P-48mm}) + \frac{(i-p)}{f+1} \times (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-48mm})$$

Eq.19

Em que, mm é a parte inteira de (*f*/48)+1.Utiliza-se 48, ao invés de 24, pois os dados são de meia em meia hora. Essas equações de interpolação fazem com que o período sem dados siga o mesmo comportamento de um período similar com dados, preenchendo as falhas de forma mais realística do que uma interpolação linear, uma vez que as fórmulas em questão diferem basicamente quanto ao intervalo dos dados de preenchimento – na Equação 17, são utilizados para o preenchimento das falhas dados imediatamente anteriores e posteriores à falha, na Equação 18, são utilizados dados referentes aos mesmos horários das falhas, porém referentes a 24 horas anteriores, e, na Equação 19, são utilizados dados referentes aos mesmos horários das falhas, porém em intervalos de dias que variam de acordo com o tamanho da falha.

O modelo de preenchimento de falhas delimitou no conjunto de dados os valores máximos e mínimos de cada variável preenchida (filtragem), substituindo valores espúrios pelo valor médio horário, também calculado pelo modelo.

A fim de evitar qualquer interferência do preenchimento de dados no resultado final do modelo, foi realizada uma análise dos dados preenchidos versus não preenchidos.

3.2.3. Parâmetros adotados e calibrados

Os parâmetros adotados para a floresta de transição Amazônia - Cerrado foram a altura dos equipamentos (z), altura superior do dossel (z_1), altura inferior do dossel (z_2), deslocamento do plano zero (da) e rugosidade acima do dossel (z_h), porosidade total do solo (Φ), teor de umidade à capacidade de campo (θ_{CC}), teor de umidade ao ponto de murcha permanente (θ_{PM}), condutividade hidráulica de saturação (Ks), ponto de saturação do solo (θ_s) e expoente da curva de retenção (b), cujos valores estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 3: Parâmetros adotados em floresta de transição Amazônia - Cerrado para a utilização do modelo SITE.

Variável	Valor adotado	Unidade
Altura dos equipamentos (z)	42	m
Altura superior do dossel (z_1)	28	m
Altura inferior do dossel (z_2)	20	m
Deslocamento do plano zero (da)	22,5	m
Rugosidade acima do dossel (z_h)	2,35 (igual)	m
Porosidade total do solo (Φ)	0,46	$m^3\ m^{-3}$
Teor de umidade a capacidade de campo (θ_{CC})	0,21	$m^3\ m^{-3}$
Teor de umidade ao ponto de murcha permanente (θ_{PM})	0,13	$m^3\ m^{-3}$
Expoente da curva de retenção (b)	4,26	-

3.2.4. Variáveis de saída do modelo

As variáveis de saída utilizadas para a avaliação do modelo foram H, LE e Rn.

3.2.5. Calibração e validação do modelo

Calibrar um modelo significa ajustar seus parâmetros e muitas vezes alguns de seus valores iniciais, não alterando a sua estrutura ou equações básicas, de modo que os resultados do modelo se ajustem melhor aos dados observados (SANTOS, 2001). A qualidade do modelo pode ser definida de acordo com os parâmetros estatísticos descritos no item 3.3, comparando dados medidos e modelados. No processo de calibração, foram considerados como melhores valores para as variáveis os casos em que apresentavam menor RMSE (root mean square error) e r^2 mais próximo a unidade, entre os dados observados e simulados.

Após análise dos dados medidos versus modelados, foi realizada a calibração dos parâmetros do modelo SITE para as séries de dados em que os resultados encontrados não se apresentaram satisfatórios. A calibração foi realizada a partir da obtenção dos valores biofísicos que aperfeiçoam as estatísticas anteriormente citadas (item 3.3), priorizando o melhor ajuste possível para todas as variáveis de saída em questão (H, LE e Rn).

Os parâmetros do modelo testados para a calibração foram aqueles aos quais o modelo apresenta maior sensibilidade, sendo estes: a distribuição de raízes finas ($\beta 2$); capacidade da enzima Rubisco a 15°C (*Vmáx*); o coeficiente angular relacionado à condutância estomática (*m*); a capacidade térmica das folhas (C_{HU}) e galhos (C_{HS}) no dossel superior, e frações iniciais de umidade no solo ($\theta g/\theta d$) (SANTOS, 2001; IMBUZEIRO, 2005; NUNES, 2008).

Foi verificado que, para o conjunto de dados da floresta de transição, o modelo se mostrou mais sensível a cinco desses parâmetros: *Vmáx*, *m,* C_{HS}, C_{HU} e $\theta g/\theta d$, parâmetros estes utilizados na calibração.

3.5. AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DO MODELO

Vários critérios estatísticos para avaliação podem ser utilizados para testar o desempenho dos modelos e quantificar quanto os valores calculados se aproximam dos dados medidos (WHISLER et al., 1986).

Dentre os indicadores estatísticos que são amplamente utilizados como medidas de desempenho de modelos destacam-se a raiz do erro quadrado médio

(RMSE - root mean square error) e o erro sistemático ou tendenciosidade (JACOVIDES & KONTOYIANNIS, 1995).

O RMSE descreve o desvio médio entre os valores medidos e calculados (no caso, valores simulados pelo modelo e medidos pelo método de covariância de vórtices turbulentos), e pode ser calculado conforme Equação 20.

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(Ci - Mi\right)^2} \qquad \text{Eq.20}$$

Em que, *Ci* e *Mi* são os valores calculados (simulados) e medidos, respectivamente, e *n* é o número total de observações.

Adicionalmente às análises de RMSE, a análise de regressão, com determinação dos coeficientes de determinação (ρ) e de inclinação da reta de regressão (α) entre os dados medidos e simulados foi utilizada como um indicativo do desempenho dos modelos. Para a obtenção da equação, as variáveis observadas foram consideradas como eixo X, e as variáveis simuladas, como eixo Y. Deste modo, $\alpha>1$ representa tendência do modelo a superestimar as variáveis em questão, e $\alpha<1$, tendência a subestimar.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. CARACTERIZAÇÃO MICROMETEOROLÓGICA

4.1.1. Dados de entrada do modelo: análise das falhas na série temporal

Um panorama do total de dados medidos no período de 2001 a 2007, após a filtragem dos dados conforme limites máximos e mínimos descritos na Tabela 3, pode ser observado nas Figuras 6 e 7, e a porcentagem dos dados existente e faltantes, na Tabela 4.

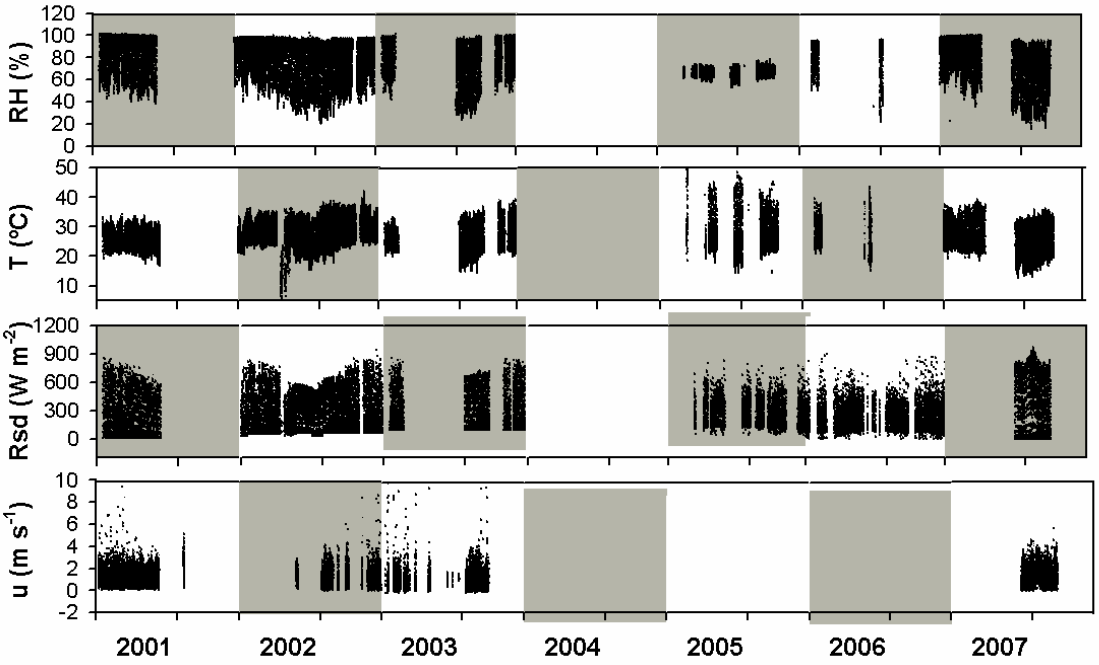

Figura 6:Média a cada meia hora de umidade relativa do ar (RH), temperatura do ar (T), radiação solar global (Rsd) e velocidade do vento (u), para o período de 2001 a 2007.

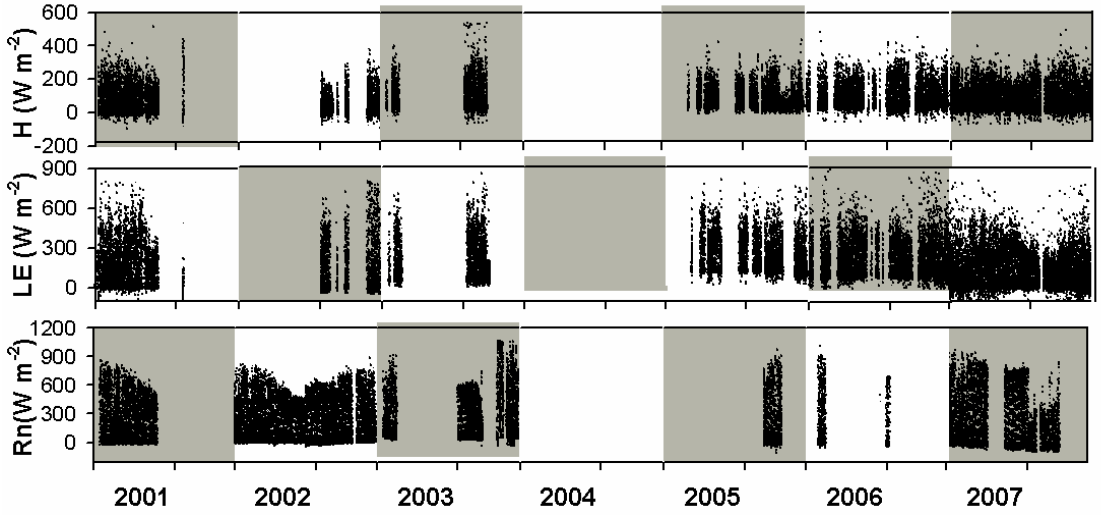

Figura 7: Média a cada meia hora dos fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e radiação solar líquida (Rn), para o período de 2001 a 2007.

Tabela 4: Porcentagens de dados medidos e falhas referentes às variáveis umidade relativa do ar (RH), velocidade do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), para o período de 2001 a 2007 (n = 122640).

		VARIÁVEIS						
	Ano	**RH (%)**	**T (°C)**	**Rsd (W m^{-2})**	**u (m s^{-1})**	**Rn (W m^{-2})**	**LE (W m^{-2})**	**H (W m^{-2})**
% de dados	**2001**	38,32	38,32	37,77	41,20	38,32	40,72	40,94
	2002	94,80	90,4	90,20	23,00	94,80	16,67	20,20
	2003	40,43	39,90	23,50	28,10	38,05	21,35	21,50
	2004	0	0	0	0	0	0	0
	2005	29,90	23,20	0	0	11,20	42,01	50,70
	2006	7,17	7,18	0	0	7,17	67,67	69,23
	2007	56,44	56,44	25,14	25,48	52,43	95,06	96,91
	Média	38,15	36,50	25,23	16,82	34,57	40,50	42,78
% de falhas	**Média**	61,85	63,50	74,77	83,18	65,43	59,50	57,22

Os dados apresentaram vulnerabilidade do sistema de medidas contínuo a falhas, uma vez que, para todas as variáveis observadas, foram verificadas falhas superiores a 50%, sendo a falha mínima observada para H (57,22%), e a máxima (83,18%), para velocidade do vento (u). Essas falhas podem ocorrer devido às mais variadas causas, por exemplo por falha dos equipamentos, pela ocorrência de eventos externos, por falha humana, dentre outros.

Mesmo após tratamento dos dados – calibração e filtragem de valores espúrios- erros sistemáticos persistiram, como por exemplo, o desvio dos dados de LE, em 2005 e 2006 (conforme Figura 7).

Dados referentes a esses anos não se mostraram confiáveis, não sendo, portanto, utilizados na modelagem.

Em estudos de modelagem em que houve o preenchimento de falhas, foram encontrados valores de falhas em sítios do projeto LBA que variaram entre 0,3 % - Floresta Amazônica, Cuieiras, km 34 - e 59% - Floresta Amazônica, Caxiuanã de fevereiro de 1999 a novembro de 2002 (IMBUZEIRO, 2005).

A existência de métodos alternativos que permitam estimar adequadamente variáveis climáticas, tanto em valores médios, quanto a variação de seu comportamento temporal, em casos de falhas nas medidas das mesmas é importante.

A representação da série de dados completa também explica a escolha dos períodos utilizados para a modelagem, onde foram utilizados apenas os períodos que dispunham de dados de todas as variáveis necessárias para rodar o modelo SITE.

4.1.2. Dados de entrada do modelo: padrões de variabilidade sazonal e ciclo diurno

Os padrões de variabilidade mensais e as médias anuais das variáveis microclimáticas utilizadas como dados de entrada para a modelagem – precipitação (Ppt), umidade relativa do ar (RH), temperatura do ar (T) radiação solar global (Rsd) e velocidade horizontal do vento (u) – estão representados na Figura 8, e correspondem as médias dos anos 2001 a 2007.

Nas Figuras 9 a 12, estão representados os ciclos diurnos médios do período para as variáveis umidade relativa do ar, temperatura do ar, radiação solar global e velocidade horizontal do vento.

A variável radiação solar global líquida, que é tanto dado de entrada indireto como de saída do modelo, teve sua análise juntamente com os dados de fluxos, com a finalidade de facilitar o entendimento do balanço e da partição de energia.

Vale ressaltar que, para o cálculo dos ciclos diurnos médios, foram realizadas médias a cada meia hora utilizando os dados disponíveis apresentados na Fig. 6, onde

se observa a inexistência de dados medidos nos últimos meses do ano, o que pode fazer com que os ciclos diários apresentados não representem fielmente a média local.

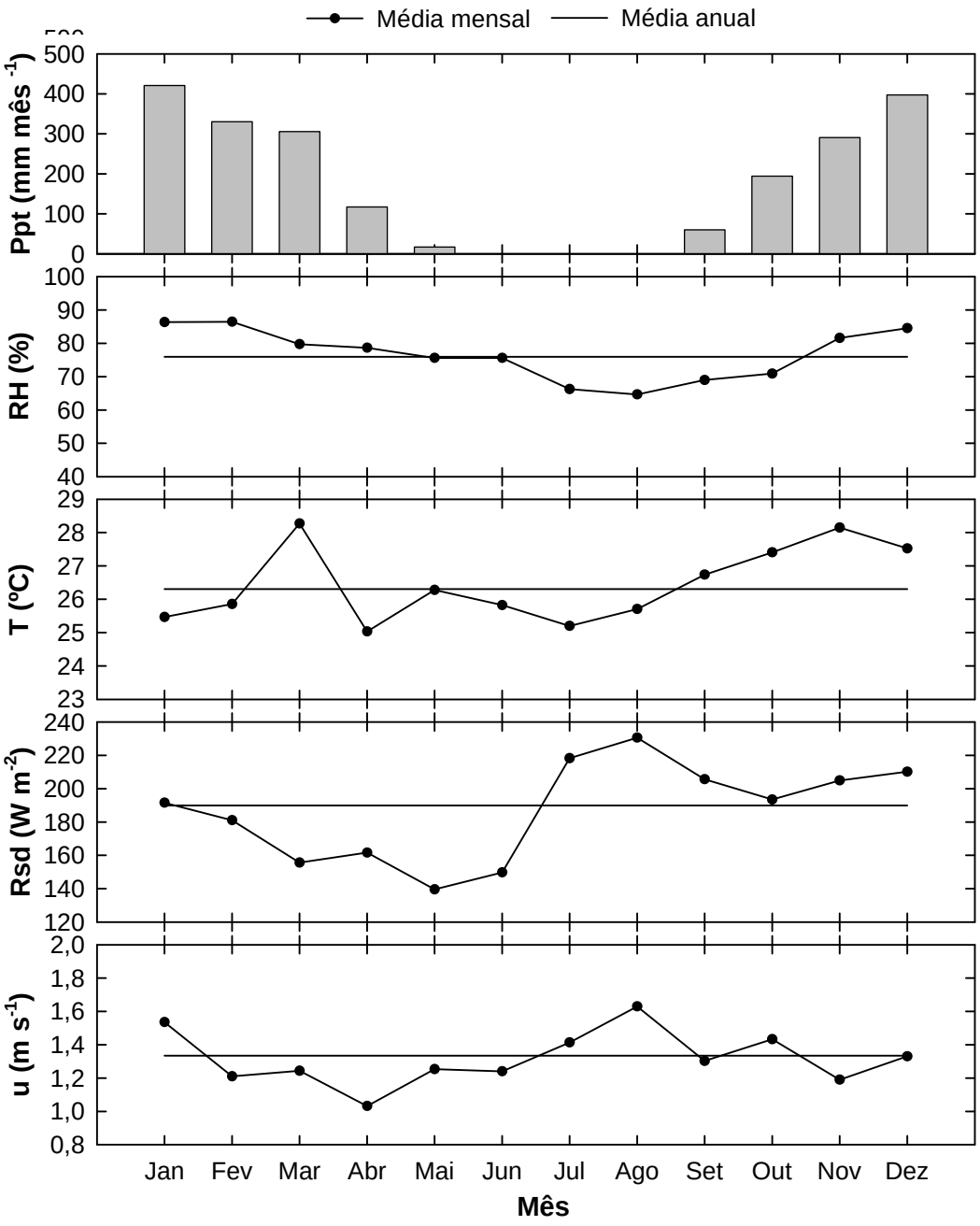

Figura 8: Médias mensais da precipitação (Ppt), umidade relativa do ar (RH), velocidade do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), de 2001 a 2007.

4.1.2.1. Precipitação

A média mensal anualizada, ou seja, o total precipitado anual dividido pelo número de meses do ano, para o período em questão foi 175,04 mm, com sazonalidade bem definida, como apresentado na Figura 8, em que de outubro a março apresentam precipitação maior que a média, e os demais meses, menor precipitação. A maior precipitação ocorreu em janeiro (estação úmida), em média, 420,70 mm, e as menores em junho e julho (estação seca), onde não houve precipitação.

A estação úmida concentra 53,8% do total precipitado no ano, enquanto as estações de transição úmida seca e seca úmida concentraram, respectivamente, 20,6 e 25,5% da precipitação anual, e a estação seca apresentou pouco menos de 1% do total anual (Tabela 5). Sazonalidade semelhante foi verificada para a mesma área de estudos por PRIANTE FILHO et al. (2004) e VOURLITIS et al. (2005).

Tabela 5: Média estacional, anual (±DP), mínimo e máximo mensal da precipitação (Ppt), de 2001 a 2007.

Análise		**Ppt (mm)**
Total	***úmida***	1148,20
	úmida seca	439,06
	seca	0,62
	seca úmida	544,67
	anual	2132,57
Mínimo mensal		0,00
Máximo mensal		420,69
Média mensal anualizada		175,04±157,58

*Para cálculo do desvio padrão, foram consideradas as médias mensais.

O valor médio do total precipitado anual encontrado foi 2132,57 mm, sendo uma característica determinante do ecótono Amazônia - Cerrado, pois é aproximadamente 200 mm menor do que a precipitação em regiões Amazônicas, e 200 mm maior do que em regiões de Cerrado. Valores de 2047 mm e 2000 mm foram verificados, respectivamente, por VOURLITIS et al. (2005), com medidas

referentes ao período de janeiro/01 a dezembro/02, e por PRIANTE FILHO et al. (2004), com medidas referentes a janeiro/2000 a dezembro/2002.

O período de estiagem durante a estação seca é outra importante característica desse ecossitema, pois pode prejudicar a recarga do reservatório hídrico do solo, diminuindo a disponibilidade de água para a vegetação e ocasionando períodos de estresse hídrico.

4.1.2.2. Umidade relativa do ar

A umidade relativa do ar apresenta sazonalidade bem definida, seguindo os padrões de variação temporal da precipitação. A média anual foi 76,6%, e o período de novembro a abril, apresentaram valores de umidade maiores do que a média anual, tendo ocorrido o maior valor em janeiro (86,3%), e o menor, em agosto (64,6%).

Houve umidade relativa 16,94% maior durante a estação úmida em relação à estação seca (Tabela 6). Em relação a media, a estação úmida foi 9,17% maior, a seca 7,77% menor, e, as estações de transição úmida seca e seca úmida, respectivamente 1,39% maior e 2,79% menor.

Tabela 6: Média estacional, anual (±DP), mínimo e máximo de média mensal da umidade relativa do ar (RH), velocidade horizontal do vento (u), radiação solar global (Rsd) e temperatura do ar (T), de 2001 a 2007.

Análise		RH (%)	T (ºC)	Rsd (W m^{-2})	u (m s^{-1})
Média	***úmida***	85,77	26,28	194,23	1,36
	úmida seca	77,99	26,53	152,33	1,18
	seca	68,83	25,58	199,51	1,43
	seca úmida	73,81	27,43	201,38	1,31
	anual	76,60±7,28	26,45±1,09	186,86±28,04	1,32±0,16
Mínimo		64,64	25,03	139,63	1,03
Máximo		86,45	28,27	230,60	1,63

*Para cálculo do desvio padrão, foram consideradas as médias mensais.

Os menores valores de umidade relativa do ar durante a estação seca refletem os efeitos da diminuição da precipitação, e conseqüentemente, da baixa disponibilidade hídrica no ecossistema.

Os padrões de variação da umidade relativa do ar estão diretamente relacionados aos padrões de precipitação das áreas em estudo, e estão de acordo com padrões apresentados por MAITELLI & WRIGHT (1996), em uma floresta tropical de Manaus e por PRIANTE FILHO et al. (2004) e ANDRADE et al. (2009), para a mesma região de floresta de transição Amazônia-Cerrado no sul da Amazônia.

De acordo com o ciclo diário (Figura 9), as maiores médias horárias de umidade relativa do ar ocorreram no período noturno, com máximo valor (89,3%) ocorrendo em horário próximo as 06h, e sua diminuição iniciou-se ao amanhecer, ocorrendo logo após os primeiros instantes com incidência de raios solares, chegando ao seu valor mínimo às 15h, momento a partir do qual volta a ocorrer seu incremento, à medida que a radiação incidente passou a decair.

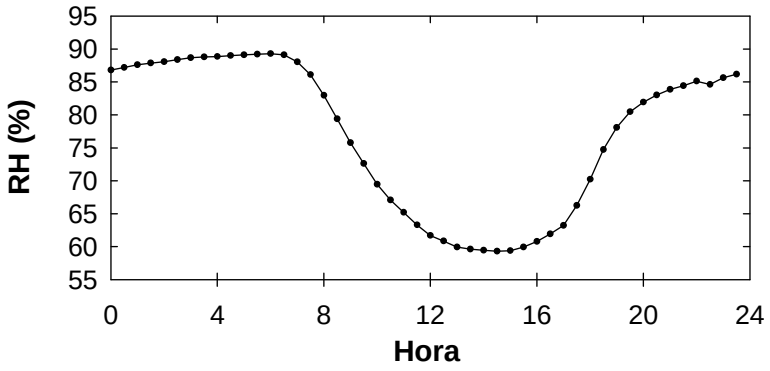

Figura 9: Ciclo diário da média a cada meia hora da umidade relativa do ar (RH) de 2001 a 2007.

4.1.2.3. Temperatura do ar

A média mensal da temperatura do ar apresentou uma variação ao longo do ano de 3,24 ºC, sendo o máximo valor observado em março, de 28,27 ºC e o mínimo em abril, de 25,03 ºC, ambos referentes à estação úmida seca. O valor mínimo em abril pode ser explicado pela ocorrência de frentes frias nessa época do ano.

As maiores médias estacionais ocorreram durante a estação seca úmida, sendo 0,98 ºC superior a média anual, e as mínimas, durante a estação seca, 0,85 ºC inferior a média anual (Tabela 6).

As mínimas temperaturas durante a estação seca ocorrem devido a presença de frentes frias na região.

Em termos de ciclo diário (Figura 10), variação da temperatura está de acordo com as variações do ciclo diário da umidade relativa do ar, estando essas variáveis interligadas de forma inversamente proporcional, de modo que em horários em que houve menor temperatura, houve maior umidade relativa, e vice-versa. A amplitude média observada foi de 10,9 ºC, com temperatura máxima de 32,1 ºC às 15h30min e mínima de 21,3 ºC às 06h00min.

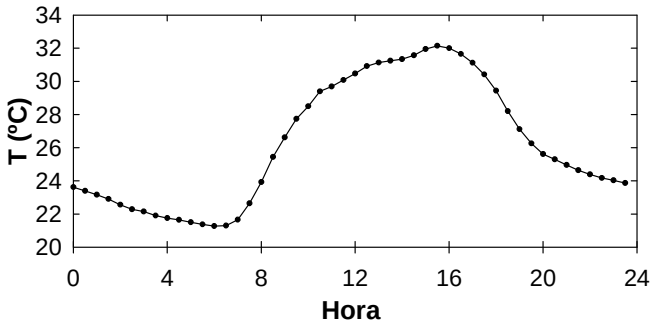

Figura 10: Ciclo diário da média a cada meia hora da temperatura do ar (T), de 2001 a 2007.

4.1.2.4. Radiação solar incidente

A média mensal da radiação solar global apresentou padrão de variabilidade mensal, em que de julho a janeiro as médias foram superiores à média anual, com máximo em agosto (230,6 W m^{-2}), e mínimo em maio (139,6 W m^{-2}).

As maiores médias estacionais ocorreram durante a estação seca, com valores aproximadamente 7,8% maiores do que a média anual, enquanto as menores médias ocorreram na estação úmida seca, aproximadamente 18,5% menores do que a média anual (Tabela 6). Esse comportamento sazonal é concordante com resultados encontrados por AGUIAR (2005). Mudanças sazonais na cobertura das nuvens são os principais fatores que determinam a variação da radiação solar incidente em regiões tropicais (ROCHA et al., 2004), em concordância, em um sítio experimental

na Amazônia Central, MALHI et al., (2002) observaram que a cobertura de nuvens foi mais importante na determinação da variação da radiação solar do que o ângulo do sol ou a duração do dia.

Durante a estação seca, devido a grande ocorrência de queimadas na região, a atmosfera passa a conter uma quantidade maior de partículas suspensas no ar, ocasionando menor radiação solar incidente. Entretanto, nas condições experimentais deste trabalho, a quantidade de partículas suspensas no ar que ocorreram durante a seca foi um fator menor limitante para a incidência da radiação solar do que a cobertura de nuvens durante as chuvas, fenômeno verificado por AGUIAR, 2005.

Maiores incidências de Rsd na estação seca foram observadas em outras áreas de floresta Amazônica, por exemplo, floresta Amazônica em Caxiuanã, que apresentou menor valor de Rsd no período chuvoso (14,8 MJ m^{-2} dia^{-1}) e maior valor no período menos chuvoso (19,3 MJ m^{-2} dia^{-1}) (SOUZA FILHO, 2002); na Reserva Ducke, em que o máximo (18,52 MJ m^{-2} dia^{-1}) foi observado no mês de setembro e o mínimo (13,75 MJ m^{-2} dia^{-1}) no mês de abril, na Fazenda Dimona, localizada em Manaus, em que o máximo (11,30 MJ m^{-2} dia^{-1}) foi em setembro e o mínimo (14,54 MJ m^{-2} dia^{-1}) em janeiro, na Reserva Vale do Rio Doce, em Marabá, em que o máximo (19,33 MJ m^{-2} dia^{-1}) em junho e mínimo (14,41 MJ m^{-2} dia^{-1}) em dezembro (CULF et al., 1996). Esta variação da Rsd está relacionada a pouca quantidade de nuvens na estação seca, pois, em áreas de floresta Amazônica densa, a cobertura de nuvens durante a estação úmida é um fator considerado significativo para a diminuição da incidência de radiação (ROCHA et al., 2004).

No ciclo diário da radiação solar global (Figura 11), houve um incremento da radiação a partir do amanhecer (próximo às 06h30min), atingindo o máximo de 554,47 W m^{-2} às 11h30min. A partir desse momento, houve um decréscimo dos níveis de radiação, até atingir valores aproximadamente nulos no período noturno.

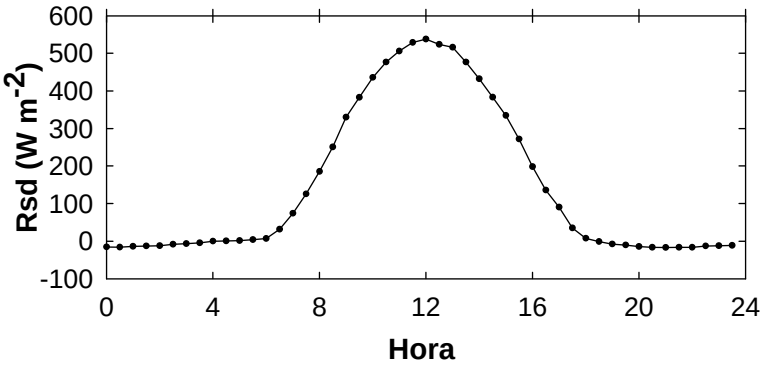

Figura 11: Ciclo diário da média a cada meia hora da radiação solar global (Rsd) de 2001 a 2007.

4.1.2.5. Velocidade horizontal do vento

O padrão médio de comportamento ao longo do ano da velocidade horizontal do vento foi semelhante ao padrão de comportamento da radiação solar global, com máximos em agosto (1,63 m s^{-1}), e mínimos em abril (1,03 m s^{-1}).

Conforme Tabela 6, as maiores médias estacionais ocorreram durante a estação seca, sendo aproximadamente 8,3% superior a media anual, e as menores médias durante a estação úmida-seca , -10,1% em relação a média anual.

Como apresentado na Figura 12, a variação da velocidade horizontal do vento ao longo do dia ocorre de modo semelhante ao da temperatura e da radiação solar global, com menores valores no período noturno e primeiras horas do dia (mínimo de 0,88 m s^{-1} as 06h) que aumentam atingindo o máximo de 1,8 m s^{-1} às 14h30min, horário a partir do qual volta a decrescer.

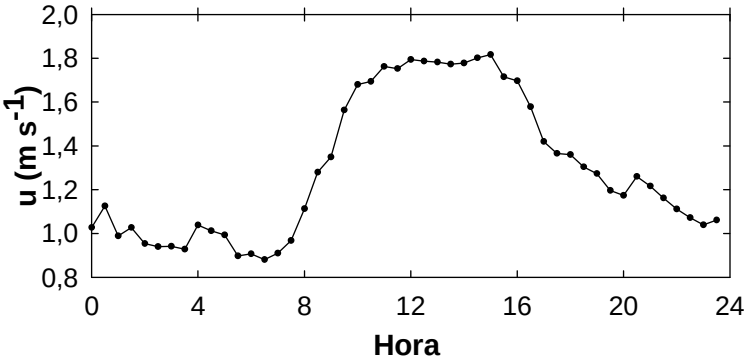

Figura 12: Ciclo diário da média a cada meia hora da velocidade horizontal do vento (u) de 2001 a 2007.

4.1.3. Dados de saída do modelo e partição de energia: padrões de variabilidade sazonal e ciclo diurno

Os padrões de variabilidade mensais e as médias anuais de 2001 a 2007 das variáveis radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) – estão representados na Figura 13.

As médias horárias de Rn, LE e H estão representados na Figura 14.

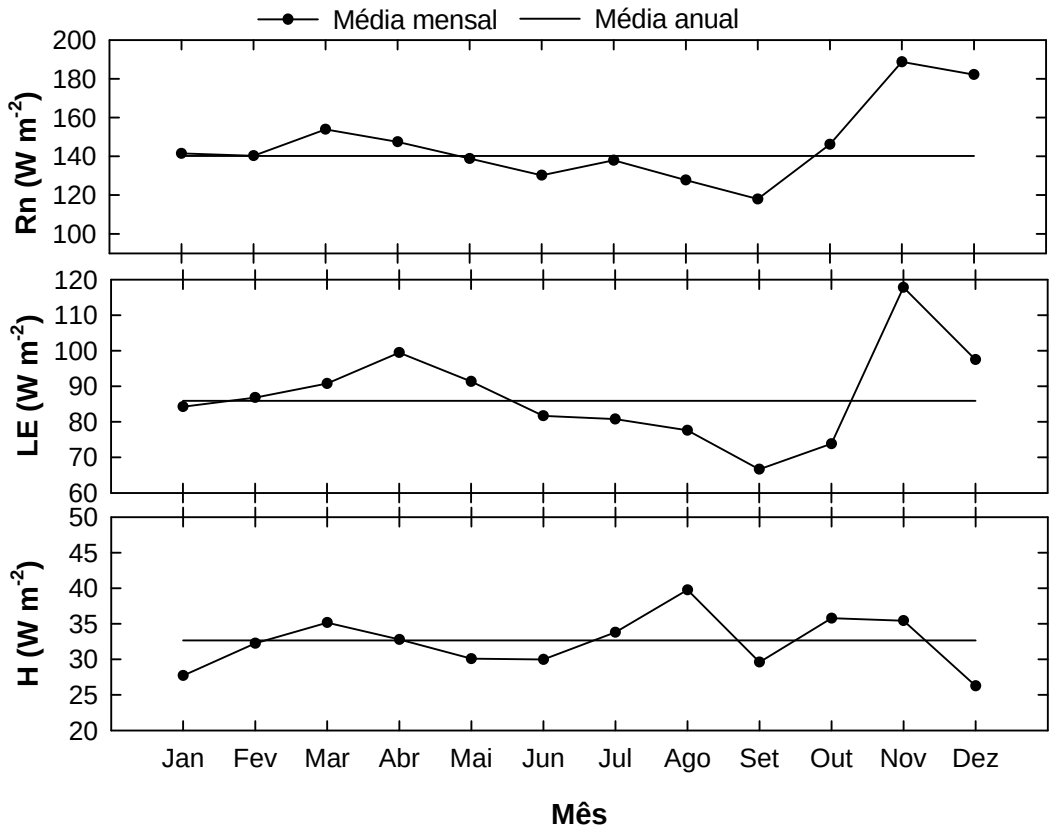

Figura 13: Média mensal do fluxo de calor sensível (H), calor latente (LE) e radiação solar líquida (Rn), de 2001 a 2007.

4.1.3.1. Radiação solar líquida

A radiação solar líquida apresentou uma variação consideravelmente elevada ao longo do ano, em torno de 70,81 W m^{-2}, com máximo durante novembro, e mínimo durante setembro (Figura 13, Tabela 7).

A análise sazonal indica maiores valores durante a estação úmida, sendo a Rn nesse período aproximadamente 5,8% acima da média anual. Os menores valores foram verificados durante a estação seca, sendo esses 9,7% menores do que a média anual. Os períodos de transição úmida seca e seca úmida apresentaram-se, respectivamente, 0,4% e 3,3% acima da média anual.

Tabela 7: Médias sazonais, anuais, mínimos, máximos e desvio padrão das variáveis fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor latente (LE), radiação solar líquida (Rn) e partição de energia para o período de 2001 a 2007.

Análise		H	LE	Rn	(H+LE)/Rn
Média	***úmida***	28,73	89,49	154,62	0,76
	úmida seca	32,67	93,85	146,74	0,86
	seca	34,51	80,01	131,98	0,87
	seca úmida	33,60	86,08	150,95	0,79
	anual	32,38±3,69	87,35±12,89	146,07±19,86	0,82
Mínimo		26,25	66,66	117, 93	
Máximo		39,76	117,76	188,79	

*Para cálculo do desvio padrão, foram consideradas as médias mensais.

Em áreas de floresta Amazônica, durante a estação úmida a média diária foi de 134,3 W m^{-2} e na seca foi de 131,6 W m^{-2} (AGUIAR, 2005). ROCHA et al. (2004) encontraram maior variação do saldo de radiação entre as estações, com um padrão de variação sazonal inverso, com média de 140 W m^{-2} na estação seca e 113 W m^{-2} na úmida.

No ciclo diurno de Rn, assim como de LE e H (Figura 14), foi observado o mesmo padrão de comportamento da Rsd, com valores próximos à zero no período noturno, e valores máximos próximo ao meio dia. Os valores de $Rn_{máx}$ encontrados ao longo do dia foram 530,70 W m^{-2}, 564,67 W m^{-2}, 500,32 W m^{-2} e 396,02 W m^{-2}, respectivamente para as estações úmida, úmida seca, seca e seca úmida.

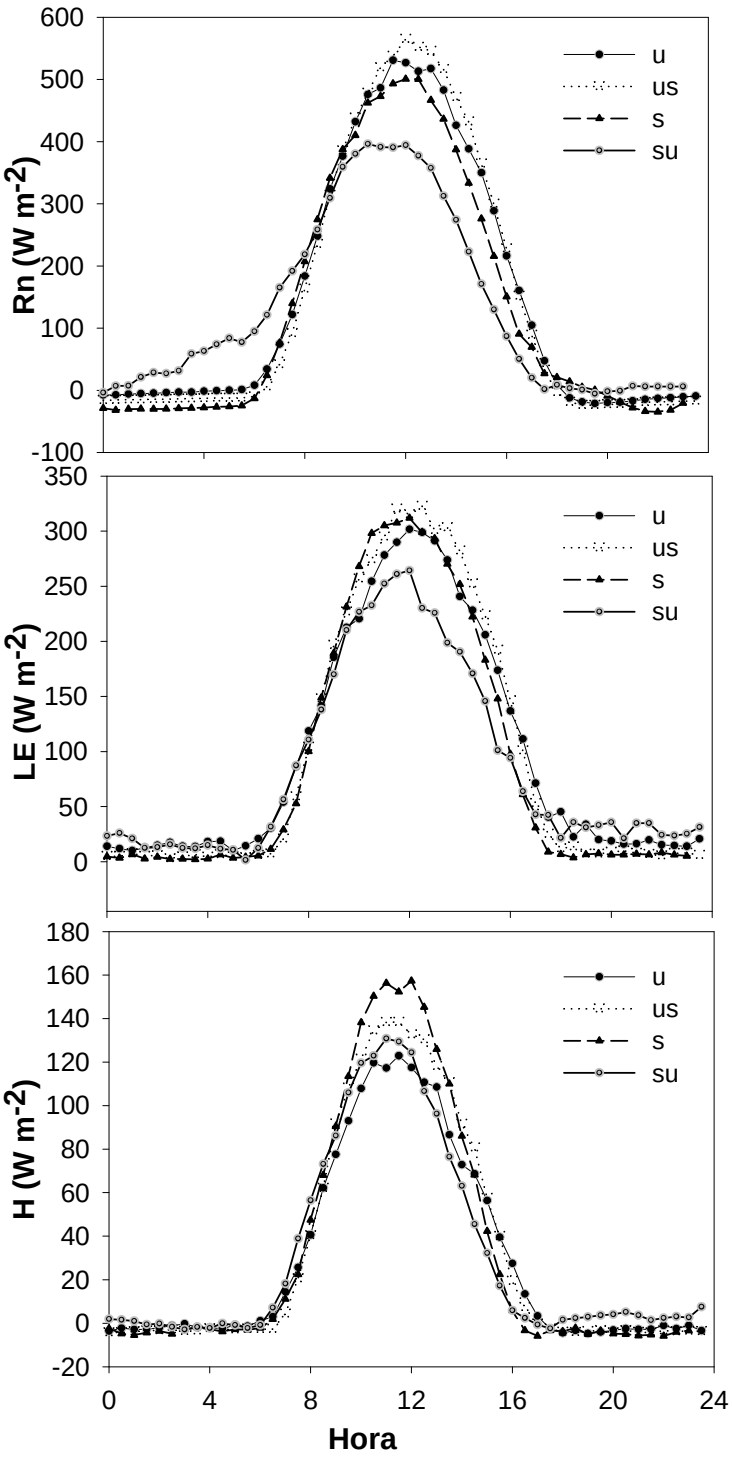

Figura 14: Sazonalidade do ciclo diário da radiação solar líquida (Rn) e dos fluxos de calor latente (LE) e calor sensível (H), nas estações úmida (u), úmida seca (us), seca (s) e seca úmida (su).

Os maiores valores de Rn durante as estações úmida e úmida seca indicam a

existência de um fator externo que minimiza os efeitos da radiação no período seco, mais significativo do que o efeito das nuvens no período chuvoso. Ao que tudo indica, menores valores de Rn durante as estações seca e seca úmida podem estar relacionados à névoa seca que se forma na região neste período do ano, em decorrência das queimadas, que ocorrem em grande quantidade e freqüência próximo ao local em estudo. Comportamento semelhante foi observado na mesma região em estudo, onde Rn aumenta da estação seca para a úmida, embora com um decréscimo no mês de dezembro, devido a grande intensidade de chuvas, porém recompensado com aumento nos meses úmidos subseqüentes (VOURLITIS et al., 2008).

4.1.3.2. Fluxo de calor latente

O fluxo de calor latente apresentou variações ao longo do ano, com a maior média mensal em novembro (estação úmida), e a menor média em setembro (estação seca), ambos coincidindo com o comportamento da Rn (Figura 13). A diferença entre a maior e menor média mensal foi 51,11 W m^{-2}.

Os maiores valores de LE ocorreram durante a estação úmida seca, sendo 7,4% acima da média anual, e os menores valores, durante a estação seca, 8,4% menores do que a média anual (Tabela 7). As estações úmida e seca úmida apresentaram valores, respectivamente, 2,4% maior e 1,5% menor do que a média anual.

Foi observado que a devolução de energia para a atmosfera é realizada predominantemente pelo fluxo de calor latente. O menor LE observado durante a estação seca em relação à estação úmida, coincide com os menores valores de Rn, de modo que a parcela de parcela de Rn utilizada na forma de LE durante a estação seca foi ligeiramente superior a partição média anual, com valor de LE/Rn = 0,61, enquanto a média anual foi de 0,60. Os maiores valores de LE/Rn ocorreram na estação úmida seca (0,64), e, os menores, na seca úmida (0,57).

Os menores valores de LE indicam uma vulnerabilidade desse ecossistema a períodos de seca, onde há menor disponibilidade hídrica para os processos evapotranspirativos, estão de acordo com o observado nos dados de umidade relativa, com menores valores encontrados durante a estação seca.

No ciclo diurno de LE (Figura 14), os maiores valores foram verificados durante a estação úmida seca ($LE_{máx}$ = 322,63 W m^{-2}), e os menores valores durante

a estação seca úmida ($LE_{máx}$ = 264,25 W m^{-2}). As estações úmida e seca apresentaram, respectivamente, $LE_{máx}$ = 301,73 W m^{-2} e $LE_{máx}$ = 311,91 W m^{-2}.

De acordo com o observado, é possível perceber que a floresta de transição apresenta um período de adaptação na variação sazonal de LE, de modo que, para que LE atinja os valores máximos, a floresta necessita de um período para recuperar a disponibilidade hídrica – especialmente no que diz respeito à recarga do lençol freático (ANDRADE et al., 2008), a uma profundidade onde as raízes captam a água para que a floresta funcione sem estresse hídrico, e para que a vegetação se adapte as novas condições, recuperando as taxas de trocas gasosas na medida em que a água passa a não ser mais um fator limitante. Da mesma forma ocorre com os mínimos valores de LE, que se dão após um longo período de estiagem.

4.1.3.3. Fluxo de calor sensível

O fluxo de calor sensível também apresentou variações ao longo do ano (Figura 13), com maior média mensal em agosto (estação seca úmida), e menor em dezembro (estação úmida), variação temporal que não condiz com o comportamento da Rn, embora em setembro, assim como para a Rn, tenha ocorrido um decréscimo significativo de H.

Houve sazonalidade com maiores valores durante o período seco, embora esse seja o período com menor disponibilidade de Rn, de modo que a parcela de Rn utilizada como forma de H durante essa estação foi a maior (H/Rn = 0,26), e a menor H/Rn foi na estação úmida (H/Rn = 0,18).

A média encontrada durante a estação seca foi 6,6% maior do que a média anual, e os menores valores foram encontrados durante a estação úmida (11,27% abaixo da média anual). As estações de transição úmida seca e seca úmida apresentaram-se, respectivamente, 0,89% e 3,07% maiores do que a média anual.

No ciclo diurno (Figura 14) foi observado o mesmo comportamento descrito acima, com maiores valores de H ($H_{máx}$ = 157,24 W m^{-2}) na estação seca, e menores valores na estação úmida ($H_{máx}$ = 122,92 W m^{-2}).

De um modo geral, com relação ao comportamento ao longo do ano, o coeficiente de determinação verificada entre as variáveis em questão (Rn, LE e H) foi baixo. No entanto, com relação ao ciclo diário das variáveis, foi verificado um

maior coeficiente de determinação entre Rn e LE (r^2 = 0,992), entre Rn e H (r^2 = 0,947), e entre LE e H (r^2 = 0,937).

O fechamento do balanço de energia médio encontrado para o período (H+LE/Rn = 0,82), representado na Tabela 7, está de acordo com valores citados pela bibliografia para regiões de floresta Amazônica, em que a soma dos componentes do balanço representa de 70 a 90% da radiação solar líquida medida (HEUSINKVELD et al., 2004). Essas incertezas e possíveis erros das medidas dos fluxos por meio da técnica de correlação de vórtices turbulentos tem sido amplamente discutidas (FINNINGAN, 1999; SAKAI et al., 2001; FINNINGAN et al., 2003; KRUIJT et al., 2003; VON RANDOW, 2002 e 2004; CORREIA et al., 2005). Segundo esses autores, o não fechamento do balanço pode estar relacionado a dois fatores: primeiro, a lenta mudança na direção do vento sobre terrenos ondulados, adicionando um componente de baixa freqüência que não pode ser capturada usando rotações de curta escala de tempo no instrumento, e segundo, a divergência horizontal do vento, que pode causar advecções horizontais dos fluxos de calor sensível e calor latente, não pode ser estimada por meio de medidas em uma única torre.

Outras causas relacionadas ao não fechamento do balanço podem ser incertezas na instrumentação e a não inclusão de componentes que são importantes para alguns tipos de vegetação (MICHILES & GIELOW, 2008).

Os menores valores para o fechamento do balanço foram verificados durante a estação úmida, em que (H+LE)/Rn = 0,76), e os maiores, durante a estação seca, em que (H+LE)/Rn = 0,87. Tal fato pode ser devido ao maior número de fatores externos intervenientes durante a estação chuvosa, o que prejudica a quantidade e a qualidade dos dados medidos.

4.2. ANÁLISE DOS DADOS DE ENTRADA DO MODELO PREENCHIDOS VERSUS NÃO PREENCHIDOS

A porcentagem de dados preenchidos, bem como as médias dos dados preenchidos e não preenchidos, por estação, pode ser observada nas Tabelas 8, 9, 10 e 11.

A estação úmida apresentou menor número de dados totais (n=3199), no entanto, a percentagem de falhas não foi elevada, variando de 0,88% para os dados de velocidade horizontal do vento a 7,48% para temperatura (Tabela 8). E, o maior número de dados totais foi observado na estação seca úmida (n=5296), período no qual se verificaram as maiores porcentagens de falhas para todas as variáveis em questão, com máximo de 69,20% de falhas nos dados de velocidade do vento, e 39,92% de falhas nas demais variáveis. A percentagem de falhas elevada durante a estação de transição seca úmida pode ser explicada pela ocorrência de maior número de eventos extremos de precipitação, com fortes rajadas de vento, durante esse período do ano.

Durante as estações úmida seca (n = 5014) e seca (n = 4224), as porcentagens de falhas foram baixas, conforme Tabelas 9 e 10, respectivamente.

Tabela 8: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação úmida, anos 2001 e 2002.

Variável	Média dos dados com falhas	Média dos dados preenchidos	% de falhas preenchidas	Número total de dados
u ($m\ s^{-1}$)	1,40	1,23	0,88	3199
T (°C)	26,71	26,60	7,48	3199
RH (%)	85,20	85,67	7,26	3199
Rn ($W\ m^{-2}$)	148,26	142,32	7,22	3199
Rsd ($W\ m^{-2}$)	171,45	166,20	7,22	3199

Tabela 9: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação úmida seca, ano 2001.

Variável	Média dos dados com falhas	Média dos dados preenchidos	% de falhas preenchidas	Número total de dados
u ($m\ s^{-1}$)	1,16	1,22	5,42	5014
T (°C)	24,94	24,93	2,55	5014
RH (%)	84,38	84,52	2,55	5014
Rn ($W\ m^{-2}$)	133,51	132,07	2,55	5014
Rsd ($W\ m^{-2}$)	143,04	142,25	2,55	5014

Tabela 10: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007.

Variável	Média dos dados com falhas	Média dos dados preenchidos	% de falhas preenchidas	Número total de dados
u (m s^{-1})	1,42	1,77	5,82	4224
T (°C)	25,77	25,47	0,00	4224
RH (%)	66,06	66,00	0,13	4224
Rn (W m^{-2})	126,50	124,23	1,41	4224
Rsd (W m^{-2})	188,81	179,89	3,82	4224

Tabela 11: Dados da velocidade do vento (u), temperatura (T), umidade relativa do ar (RH), radiação solar líquida (Rn) e radiação solar global (Rsd), com falhas e preenchidos, estação seca úmida, ano 2003.

Variável	Média dos dados com falhas	Média dos dados preenchidos	% de falhas preenchidas	Número total de dados
u (m s^{-1})	1,38	5,74	69,20	5296
T (°C)	26,04	27,05	39,92	5296
RH (%)	79,91	74,04	39,92	5296
Rn (W m^{-2})	284,03	265,22	39,92	5296
Rsd (W m^{-2})	137,76	198,31	39,92	5296

Foi realizada uma análise de covariância (Teste T para dados pareados, α = 5%), que indicou não haver diferença significativa entre os dois grupos de dados em questão (dados preenchidos *versus* dados não preenchidos), para todas as estações, embora durante a estação seca úmida, ao contrário das demais estações, as diferenças entre as médias dos dados preenchidos e não preenchidos tenha sido relativamente maior do que nas demais estações. A exceção foi para os dados de velocidade do vento (u), em que a diferença foi significativa (α = 5%) entre os conjuntos de dados com falhas e preenchidos.

4.3. ANÁLISE DO MODELO SITE APLICADO AO ECOSSISTEMA DE FLORESTA DE TRANSIÇÃO AMAZÔNIA - CERRADO

4.3.1. Parâmetros calibrados

Inicialmente, o modelo SITE foi aplicado com parâmetros calibrados e validados em outros sítios experimentais de acordo com a versão SITE 1.1-0d.

Na estação úmida, os valores originais dos parâmetros do modelo, após alguns testes, apresentaram-se adequados para as variáveis desejadas – Rn, LE e H - não necessitando de calibração.

No entanto, nas estações úmida seca, seca úmida e, principalmente, seca, foi necessário realizar a calibração do parâmetro frações de umidade no solo ($\theta g/\theta d$).

Após exaustivos testes de modelagem alterando os parâmetros em questão, um por vez, obteve-se os melhores ajustes estatísticos (melhor coeficiente de determinação e de inclinação da reta de regressão, e minimização dos erros associados) para as três variáveis em questão – Rn, H e LE, com os parâmetros calibrados apresentados na Tabela 12, sendo H a variável que mais careceu de ajustes.

Tabela 12: Parâmetros iniciais e calibrados capacidade térmica dos galhos ($C_{HS,}$ J m^{-2} $°C^{-1}$) e das folhas ($C_{HU,}$ J m^{-2} $°C^{-1}$), coeficiente de condutância estomática (*m,* adimensional), e capacidade máxima da enzima rubisco (*Vmáx,* μmol CO_2 m^{-2} s^{-1}), sendo um valor apenas para todo o ano, e frações de umidade no solo ($\theta g/\theta d$, adimensionais), com valores variando nas estações úmida, úmida seca, seca e seca úmida.

Parâmetro	**Inicial**	**Calibração**		
	Úmida	***Úmida seca***	***Seca***	***Seca úmida***
C_{HS}	$2{,}109 \times 10^4$	-	-	-
C_{HU}	$2{,}109 \times 10^3$	-	-	-
m	7,0	-	-	-
$\theta g/\theta d$	0,36	0,17	0,165	0,185
Vmáx	85	-	-	-

Os melhores ajustes foram obtidos mantendo-se o valor inicial do modelo

Com relação aos parâmetros $\theta g/\theta d$, foi verificada forte influenciam nos

padrões de comportamento de H, em que menores valores de $\theta g/\theta d$ resultaram em maiores valores de H. Como foi verificada uma tendência do modelo SITE a subestimar H, o melhor ajuste dos parâmetros em questão se deu com a minimização dos mesmos, nas estações úmida seca, seca e seca úmida.

A necessidade de ajustes de alguns parâmetros do modelo, principalmente nos períodos de menor disponibilidade hídrica pode-se dever ao fato do modelo ter sido calibrado inicialmente para áreas de floresta Amazônica, onde a disponibilidade hídrica é maior, ao longo de todo o ano, do que na área em estudos, região mais propensa a períodos de estresse hídrico.

Mesmo para o mesmo ecossistema – no caso, ecossistema Amazônico, muitas vezes se faz necessária a calibração de modelos, quando utilizado em diferentes áreas de estudo. A calibração do modelo SITE para simulação de fluxos H e LE na região da Floresta Nacional de Tapajós, apresentou os seguintes valores: $Vmáx$ = 110 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, m = 7, C_{HS} = 2,109 x 10^4 J m^{-2} °C^{-1}, C_{HU} = 2,109 x 10^3 J m^{-2} °C^{-1} (NUNES et al., 2007).

4.3.2. Validação dos dados de saída do modelo

4.3.2.1. Média a cada meia hora

As séries de dados de radiação líquida e dos fluxos de calor latente e sensível, calibrados *versus* observados estão representados nas Figuras 12 a 15, e as análises estatísticas para sua validação, nas Tabelas 13 a 17. A validação inclui análises do coeficiente de deterninação (ρ), do coeficiente angular da reta de regressão (α) e da raiz do erro quadrado médio (*RMSE*) entre os conjuntos de dados simulados pelo modelo antes e após a calibração do modelo SITE, e os dados observados em campo. Os dados foram agrupados por estações (úmida, úmida seca, seca e seca úmida).

Durante a estação úmida, foi verificado um excelente ajuste entre os dados de Rn observados e modelados, conforme descrito na Tabela 13, com uma subestimativa dos valores em 13 % com relação aos dados observados. Para os dados de LE e H, o ajuste não se apresentou tão consistente quanto de Rn, com tendências a superestimar os valores de LE e subestimar H em, respectivamente, 40 % e 66 %, com valores de *RMSE* elevados. Entretanto, a despeito das super/subestimativas dos

fluxos, o modelo demonstrou representar de maneira satisfatória as variações do ciclo diário dos mesmos, como pode ser observado na Figura 15.

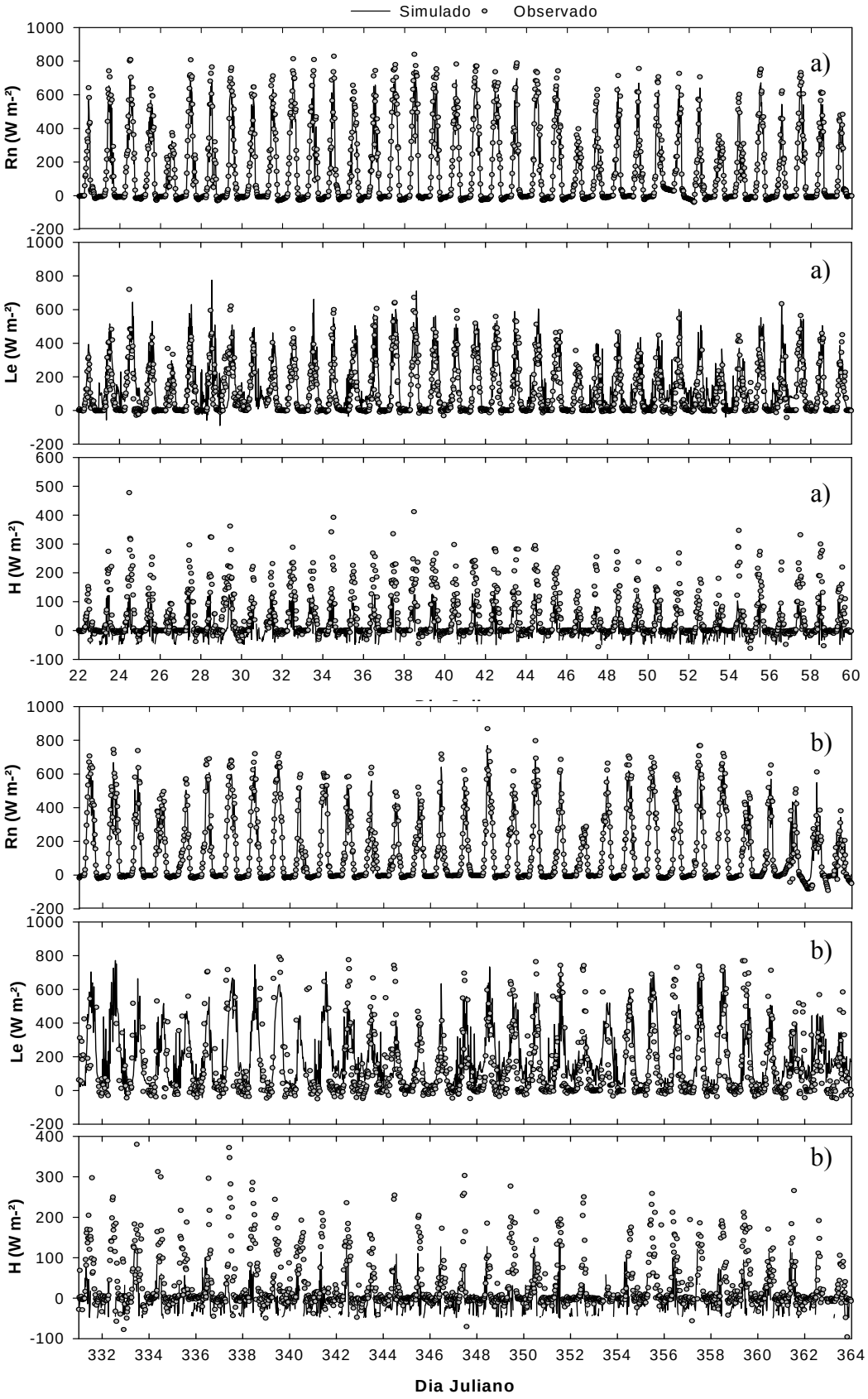

Figura 15: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação úmida, anos 2001 (a), n =1824 e 2002 (b), n = 1118.

Tabela 13: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados, estação úmida, anos 2001 e 2002.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE***
Inicial	**Rn (W m^{-2})**	0,999	0,870	2,351
	LE (W m^{-2})	0,766	1,400	142,586
	H (W m^{-2})	0,657	0,344	62,027

***** As unidades referem-se apenas ao *RMSE*, pois ρ e α são adimensionais.

Para a simulação referente à estação úmida seca, os dados simulados com a calibração original apresentaram um bom ajuste, com relação aos dados de Rn e LE, em que tanto os coeficientes de determinação ρ e α quanto as análises de *RMSE* apresentaram resultados satisfatórios, apenas com uma subestimativa de aproximadamente 13 % dos dados de Rn, e superestimativa de aproximadamente 34 % de LE. No entanto, a simulação de H, embora tenha apresentado bons valores para α, não apresentou um coeficiente de determinação satisfatório, além de ter apresentado altos valores de *RMSE* (conforme Tabela 14), tendo sido necessária, então, a calibração do modelo.

Após calibração foram obtidos resultados satisfatórios, com uma diminuição significativa do *RMSE* – de 2689,62 W m^{-2} para 161,701 W m^{-2} – referente ao H, e melhores valores de ρ e α, que variaram, respectivamente, de 0,463 a 0,660 e de 0,938 a 0,992, antes e após calibração. Entretanto, a tendência do modelo a subestimar os valores de H (-34%), e Rn (13,9%) e superestimar LE (+28,8%), permaneceu (Figura 16).

Essa calibração foi obtida com a diminuição dos valores dos parâmetros referentes à disponibilidade de água no solo ($\theta g/\theta d$ = 0,17), (conforme parâmetros descritos na Tabela 12).

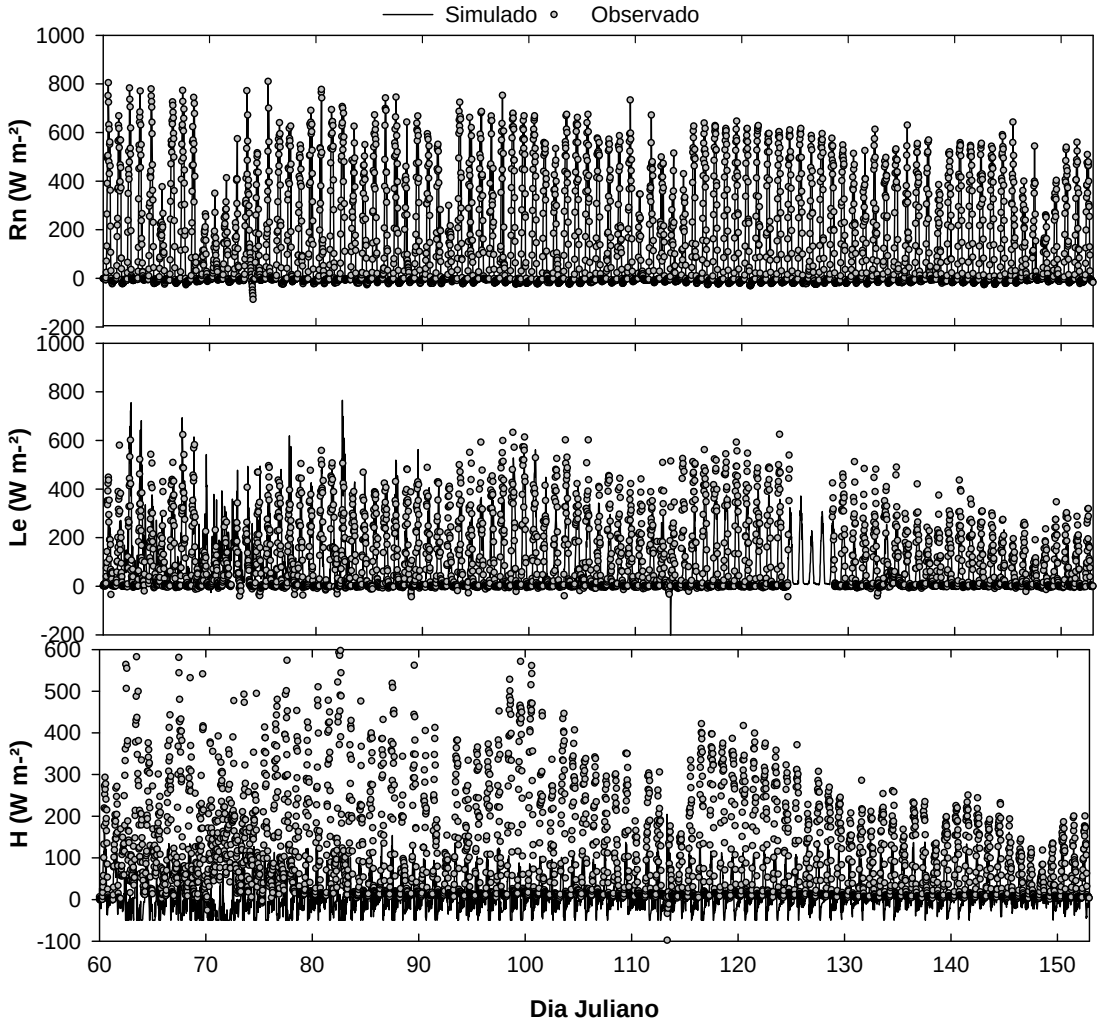

Figura 16: Média a cada meia hora da radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação úmida seca (2001) (n = 3097).

Tabela 14: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida seca, ano 2001.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE*** **(W m^{-2})**
Inicial	**Rn**	0,996	1,129	32,518
	LE	0,814	1,337	113,954
	H	0,463	0,938	2689,622
Calibrado	**Rn**	0,998	0,861	44,85
	LE	0,712	1,228	171,158
	H	0,660	0,992	161,701

Para a simulação dos dados durante a estação seca, com os parâmetros originais, as análises apresentaram os resultados constantes na Tabela 15. O modelo apresentou um bom desempenho para Rn e LE, com bons coeficientes de determinação e inclinação, e erros *RMSE* relativamente baixos. No entanto, a simulação de H não apresentou resultados satisfatórios, de modo que os fluxos de calor sensível foram subestimados em aproximadamente 63%, com coeficiente de determinação entre os dados baixo (ρ = 0,229), sendo necessária, deste modo, a calibração do modelo.

Nos testes para calibração do modelo, os melhores ajustes foram obtidos com os parâmetros $\theta g/\theta d$ ajustados para valores mais baixos, de, respectivamente, 0,36 a 0,165 (conforme Tabela 15). Tais ajustes, assim como os realizados para a estação úmida seca, são representativos de ecossistema com ligeiro estresse hídrico.

Após calibração, foi observada uma melhora significativa do H simulado, com a elevação de ρ = 0,229 para ρ = 0,750, e de α = 0,368 para α = 0,840. No entanto, os erros associados à simulação de H aumentaram.

A diminuição da parcela subestimada do fluxo é uma boa resposta do modelo aos ajustes anteriormente citados, pois, em condições de menor disponibilidade hídrica, maior parcela da radiação líquida é convertida em H.

O conjunto de dados simulado das variáveis Rn e LE, após a calibração, demonstrou um bom desempenho do modelo, no entanto, a tendência do modelo a subestimar levemente essas variáveis permaneceu (Figura 17).

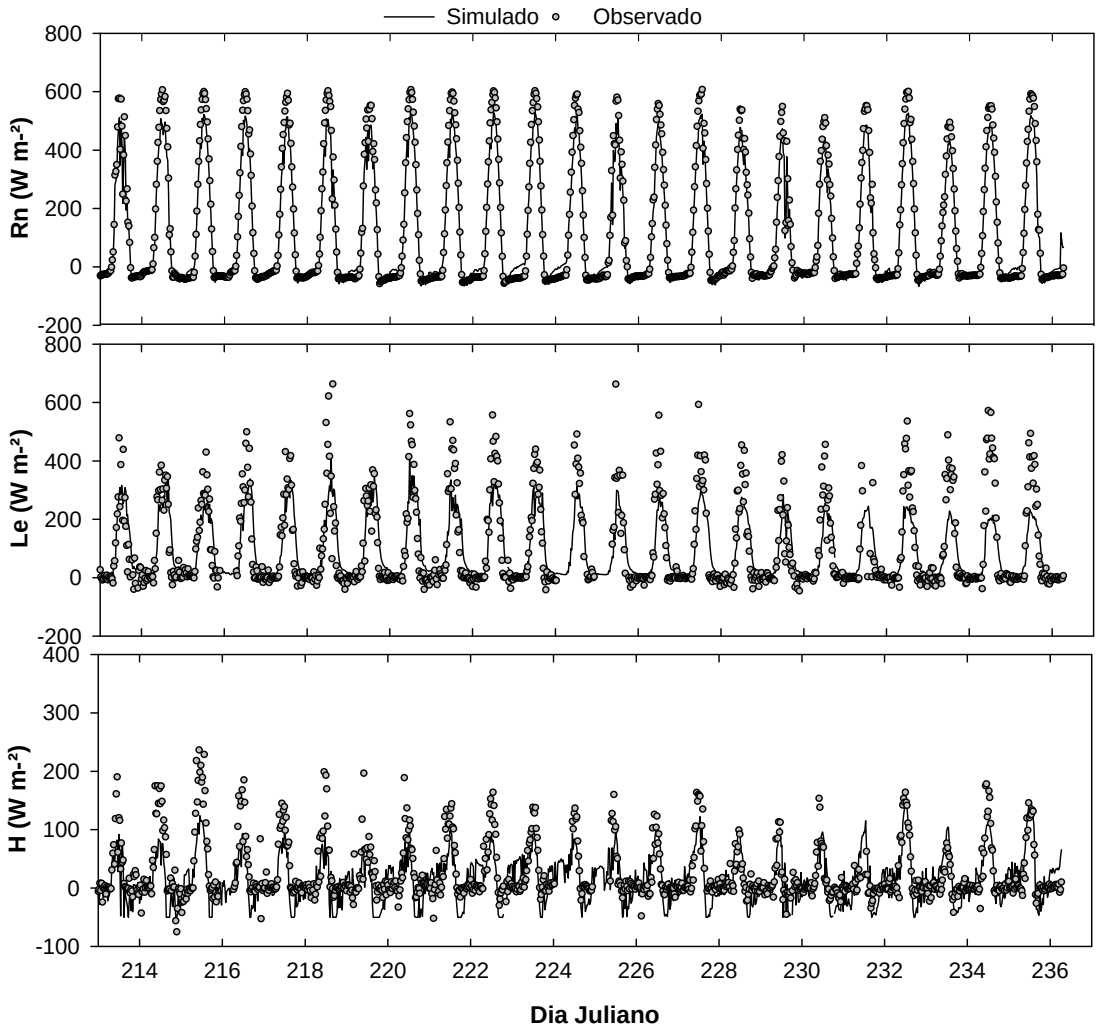

Figura 17: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação seca (2002) (n = 1118).

Tabela 15: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE*** **(W m^{-2})**
Inicial	**Rn**	0,902	0,909	50,528

	LE	0,724	0,754	83,267
	H	0,229	0,368	113,674
Calibrado	**Rn**	0,909	0,809	30,198
	LE	0,839	0,777	85,760
	H	0,750	0,840	138,103

A simulação das variáveis referente à estação seca úmida apresentou um bom ajuste para os dados de Rn, com altos valores dos coeficientes ρ e α, e erros associados *RMSE* relativamente baixos, conforme valores descritos na Tabela 16. Entretanto, para a simulação dos fluxos LE e H, o modelo não apresentou um bom desempenho, com coeficientes ρ de 0,687 e 0,435 e α de 0,473 e 0,189, respectivamente para LE e H, indicando uma tendência de subestimar ambos os fluxos, porém com piores resultados para H. Também foram verificados valores relativamente altos para os erros ε e *RMSE* referentes ao LE (Tabela 16).

Na calibração, foram encontrados melhores ajustes para valores de $\theta g/\theta d$ de 0.185 (conforme Tabela 12), e, os parâmetros C_{HU} e C_{HS} e m, mantiveram-se com os valores da calibração original, ou seja, os mesmos adotados para a estação úmida, conforme apresentado na Tabela 12.

Com a nova calibração do modelo, o ajuste de Rn não sofreu alterações significativas, permanecendo com um bom ajuste, e LE e H apresentaram um melhor ajuste, com aumento de α = 0,473 para α = 1,219, e de α = 0,189 para α = 1,273, respectivamente para LE e H, de modo que, para essa estação, o modelo permanece com uma tendência a subestimar os valores dos fluxos em questão. Além disso, LE apresentou uma diminuição expressiva de *RMSE* de 360,38 W m^{-2} para 125,49 W m^{-2}.

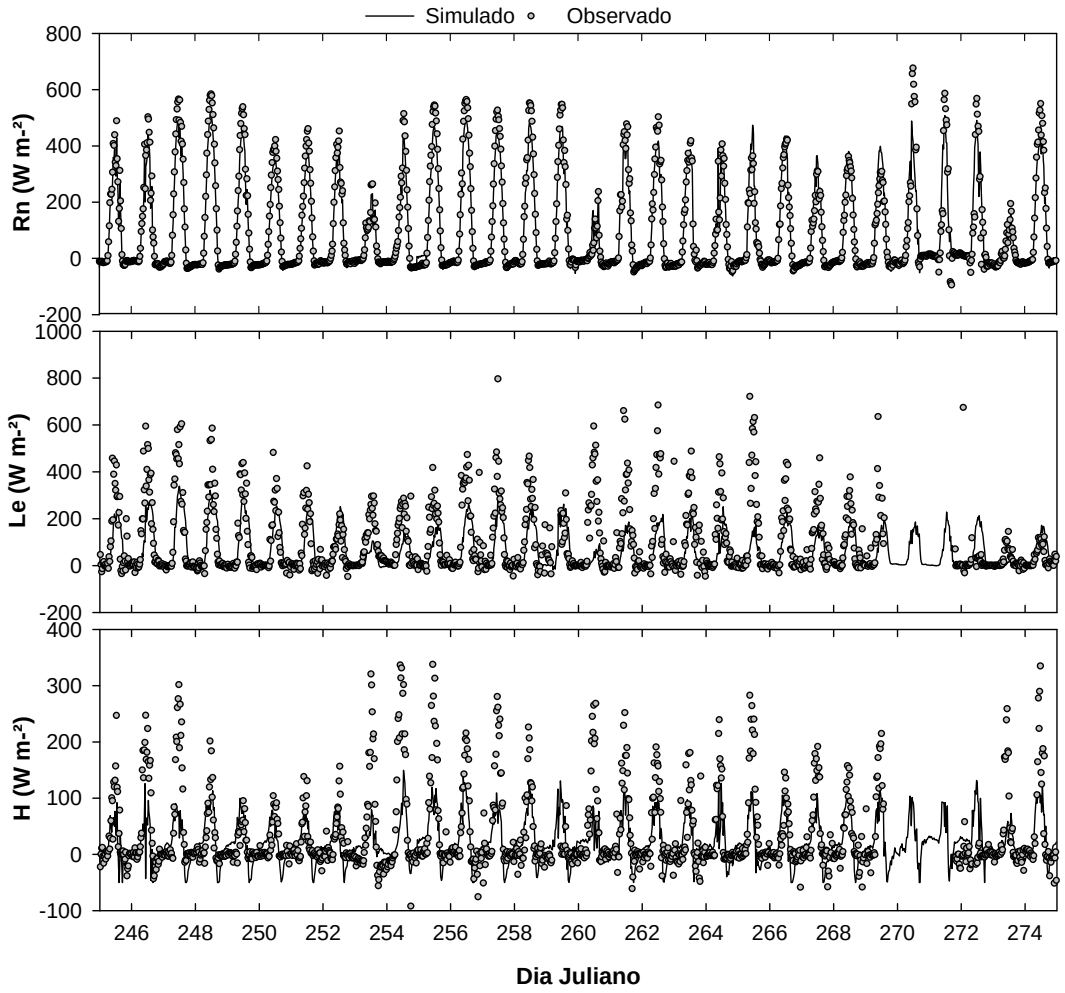

Figura 18: Média a cada meia hora de radiação solar líquida (Rn), fluxo de calor latente (Le) e fluxo de calor sensível (H), com valores simulados e observados, estação seca úmida (2003) (n = 1440).

Tabela 16: Análises de ajuste entre a média a cada meia hora dos dados observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca úmida, ano 2003.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE*** ***(W m^{-2})***
Inicial	**Rn**	0,985	1,052	2,538
	LE	0,687	0,473	360,388
	H	0,435	0,189	49,978
Calibrado	**Rn**	0,976	0,928	3,045
	LE	0,690	0,790	125,495
	H	0,663	1,273	74,524

4.3.2.1. Dados do ciclo diurno médio

Com relação à simulação do dia médio, o modelo apresentou a mesma tendência observada nos dados de meia em meia hora, no entanto com um melhor desempenho, com melhores coeficientes e menores erros para todas as variáveis em todas as estações (Tabelas 17 a 20).

De acordo com as variações do ciclo diurno (Figura 19), pode-se dizer que o modelo simula bem a variabilidade horária dos fluxos Rn, LE e H, exceto em alguns casos específicos.

Foi possível observar que as maiores subestimativas de Rn ocorreram nos horários próximos ao meio-dia, exceto na estação seca úmida (Figura 19c), em que o modelo subestimou valores de Rn noturnos.

O fluxo de LE modelado, embora simule o padrão de comportamento dos fluxos observados, apresenta um deslocamento de, em média, uma hora de retardamento dos horários de picos, nas quatro estações em questão.

E, o fluxo de H modelado, além de subestimar os valores observados, apresenta uma anomalia nos fluxos calculados por volta das 16 às 18 horas, período em que os fluxos modelados apresentam uma diminuição não condizente com os padrões dos dados observados.

Essas falhas na representação do ciclo diário podem ser devido ao modelo adotar para a maioria dos parâmetros um valor único, independente da hora do dia ou da estação do ano, o que pode não ser representativo das condições reais do ecossistema.

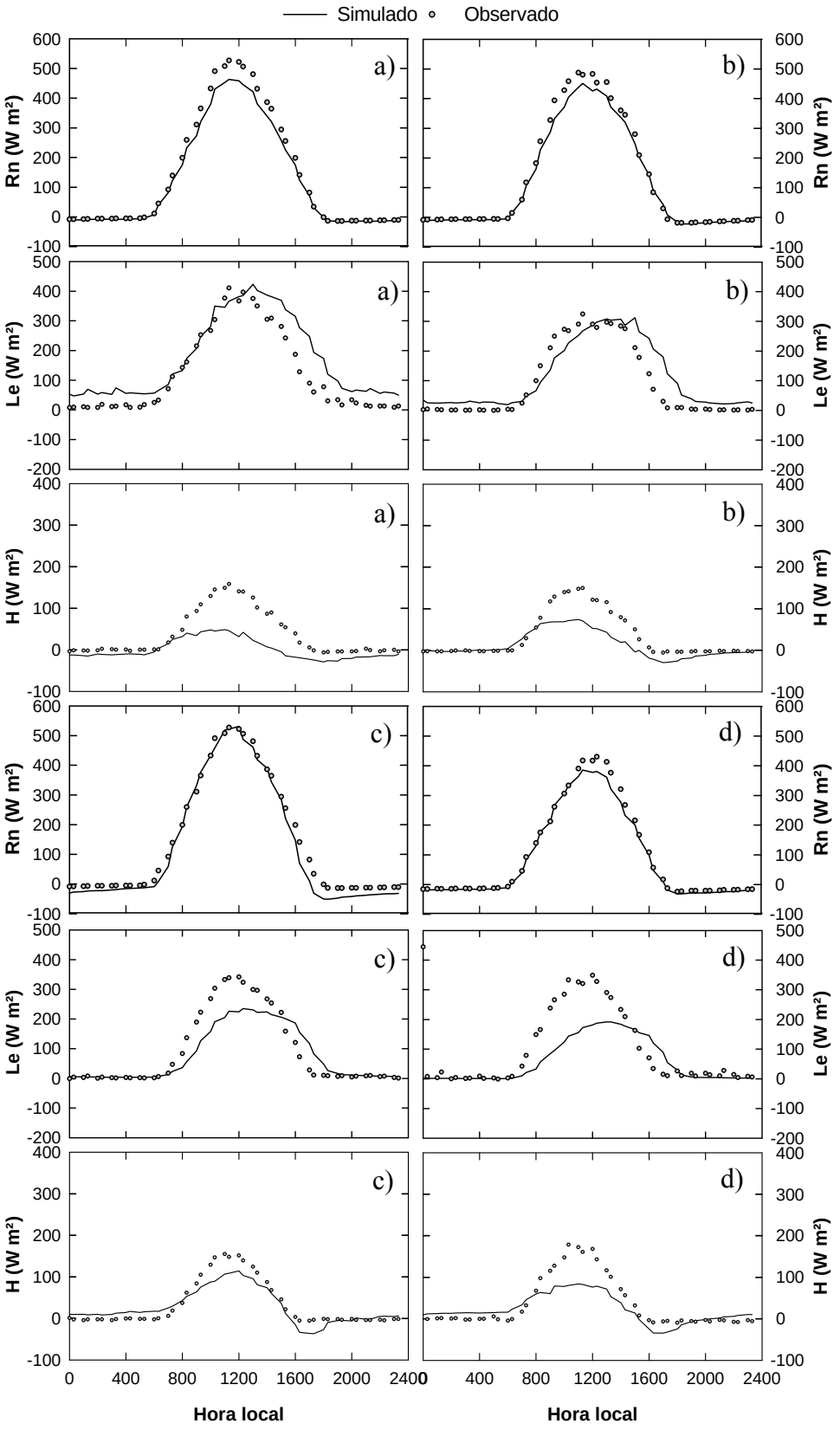

Figura 19: Ciclos diurnos da radiação solar líquida, fluxo do calor latente e fluxo de calor sensível, nas estações úmida (a), úmida seca (b), seca (c) e seca úmida(d).

Tabela 17: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida, anos 2001 e 2002.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE*** **(W m^{-2})**
Inicial	**Rn**	0,999	1,129	1,280
	LE	0,943	1,095	6,149
	H	0,917	0,410	232,018

Tabela 18: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação(ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação úmida seca, ano 2001.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE*** ***(W m^{-2})***
Inicial	**Rn**	0,993	1,136	0,277
	LE	0,951	1,153	7,549
	H	0,697	1,629	5,751
Calibrado	**Rn**	0,997	0,888	0,370
	LE	0,830	1,004	7,644
	H	0,828	0,517	4,037

Tabela 19: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente dedeterminação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração,estação seca, anos 2002, 2003 e 2007.

	Estatística	**Rn** **(W m^{-2})**	**LE** **(W m^{-2})**	**H** **(W m^{-2})**
Inicial	***ρ***	0,996	0,929	0,297
	α	1,034	0,668	0,585
	RMSE	0,542	18,054	24,856
Calibrado	***ρ***	0,999	0,891	0,909
	α	0,981	0,730	0,715
	RMSE	0,570	8,524	15,892

* As unidades referem-se apenas ao *RMSE*, pois ρ e α são adimensionais.

Tabela 20: Análises de ajuste entre os dados do ciclo diurno observados e simulados: coeficiente de determinação(ρ), inclinação da reta de regressão (α), e a raiz do erro quadrado médio (*RMSE*), para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrados e após calibração, estação seca úmida, ano 2003.

		Estatística		
		ρ	***α***	***RMSE* ($W\ m^{-2}$)**
Inicial	**Rn**	0,997	1,054	0,185
	LE	0,745	0,791	7,827
	H	0,606	0,555	15,551
Calibrado	**Rn**	0,994	0,964	0,386
	LE	0,570	0,962	3,209
	H	0,714	0,571	26,177

Em suma, para as quatro estações analisadas, o modelo SITE simulou bem os fluxos, de um modo geral. No entanto, apresentou a tendência a subestimar levemente os valores de Rn (em média 10%), e, em percentuais um pouco maiores, os valores de LE (em média 20%), e H (em média 50%).

Essa tendência do modelo SITE em subestimar os fluxos, especialmente o H, havia sido verificada anteriormente (NUNES et al., 2006; NUNES, 2008). Entretanto, SANTOS (2001) detectou subestimativas apenas nos fluxos de H, com ajuste perfeito dos dados de Rn e superestimativa de LE.

Outros modelos, como por exemplo, o IBIS e o SSiB, embora tenham se mostrado eficientes nas estimativas dos fluxos, também obtiveram fluxos subestimados (IMBUZEIRO, 2005), ou com superestimativas de LE e subestimativa de H (CORREIA et al., 2005). E, uma característica a ser destacada dos modelos citados, é o fato da maior dificuldade de ajuste ser referente ao fluxo de H, o que leva a crer que há necessidade de ajuste dos parâmetros relacionados ao cálculo dessa variável.

4.4. ANÁLISE DAS MÉDIAS E DE VARIÂNCIA ENTRE OS DADOS OBSERVADOS E OS DADOS CALIBRADOS

Os dados resultantes do modelo calibrado foram comparados com os dados observados, por meio de médias, como descrito nas Tabelas 21 a 24.

As médias da estação úmida e úmida seca (Tabelas 21 e 22) demonstraram, como anteriormente identificado nas análises estatísticas, que o modelo subestimou Rn e H, embora a subestimativa de Rn possa ser considerada insignificante, e superestimou LE, na estação úmida.

Apesar das sub ou superestimativas do modelo, a literatura apresenta, para o período úmido, valores de fluxos semelhantes aos modelados. Na floresta Nacional de Caxiuanã foram observados valores de 145,3, 82,6 e 29,7 W m^{-2}, respectivamente para Rn, LE e H, e simulados pelo modelo SITE, na mesma ordem, valores de 145,3, 109,5 e 9,1 W m^{-2} (SANTOS, 2001).

O fluxo de calor sensível simulado, tanto no caso do presente trabalho quanto em SANTOS (2001), apesar de menor do que o medido localmente, apresentou-se mais próximo aos valores encontrados por ROCHA et al. (1996) de 13,9 W m^{-2} para Reserva Ducke no período de setembro de 1983 a agosto de 1985.

Para a mesma região de estudos do presente trabalho, durante o período úmido, foram encontrados, respectivamente para Rn, LE e H, valores de 152, 100 e 43 W m^{-2} ANDRADE et al., 2009) e foram observados valores de Rn de até 170 W m^{-2} (mês de janeiro), LE de 120 a 130 W m^{-2} entre janeiro e abril, e os valores de H geralmente correspondentes a menos da metade de LE (VOURLITIS et al., 2008), sendo esses resultados comparáveis a outros estudos realizados na mesma área (VOURLITIS et al., 2002; PRIANTE FILHO et al., 2004) e em outras áreas de floresta tropical da Amazônia Brasileira (SHUTTLEWORTH, 1988; ROBERTS et al., 1993; MALHI et al., 2002; ROCHA et al., 2004).

Tal análise demonstra que o modelo, de um modo geral, conseguiu representar um padrão de comportamento dos fluxos, exceto para o caso do LE durante a estação úmida, em que os valores simulados apresentaram-se além das medidas reais, o que pode ser devido ao fato de o modelo ter embutidas algumas características típicas de floresta tropical úmida, ocasionando superestimativas do referido fluxo em condições de umidades elevadas.

Tabela 21: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação úmida, anos 2001 e 2002.

Variável	Observado (%)	Simulado (%)
Rn (W m^{-2})	142,95 (100)	124,45 (87,05)
LE (W m^{-2})	115,55 (100)	169,5 (146,69)
H (W m^{-2})	37,15 (100)	25,0 (67,29)

Tabela 22: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação úmida seca, ano 2001.

Variável	Observado (%)	Simulado (%)
Rn (W m^{-2})	134,4 (100)	114,5 (85,19)
LE (W m^{-2})	98,5 (100)	98,5 (100)
H (W m^{-2})	36,0 (100)	10,5 (29)

Durante as estações seca e seca úmida (Tabelas 23 e 24), a tendência do modelo foi subestimar todos os fluxos em questão, com maiores subestimativas referentes a LE. Isso pode ser devido ao fato de o modelo ter sido forçado nesse período com parâmetros de entrada que simulam um ecossistema com estresse hídrico maior do que o real. No entanto, a adoção de alguns desses parâmetros durante a calibração do modelo se fez necessária a fim de melhorar o desempenho do modelo ao simular H.

Para a mesma região de estudos do presente trabalho, durante o período seco – estação seca e seca úmida - foram encontrados, respectivamente para Rn, LE e H valores de 121, 71 e 32 W m^{-2} (ANDRADE et al., 2009). A mesma tendência a menores valores de Rn e LE durante o período seco haviam sido observados anteriormente por VOURLITIS et al. (2002), PRIANTE FILHO et al. (2004) e

VOURLITIS et al. (2008), comportamento que o modelo conseguiu simular adequadamente, inclusive apresentando valores de LE mais próximos aos da literatura do que os valores observados em campo.

NOBRE et al. (1996) encontraram valores médios, de 138,9, 112,3 e 26,1 W m^{-2}, para Rn, LE e H, respectivamente, para a floresta de Ji-Paraná, em Rondônia, no período de julho de 1993, e SANTOS 2001, encontraram valores médios observados de 147,1, 122,3 e 31,9 W m^{-2}, para Rn, LE e H, respectivamente, e valores médios simulados pelo SITE de 147,1, 146,5 e 11,7 W m^{-2} na mesma ordem anterior, para a floresta Nacional de Caxiuanã. Nessas áreas em estudo, observam-se maiores valores de LE e menores valores de H, característica que pode ser atribuída ao fato desses ecossistemas contarem com maior disponibilidade hídrica durante o período seco do que a região de transição.

Tabela 23: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação seca, anos 2002, 2003 e 2007.

Variável	Observado (%)	Simulado (%)
Rn (W m^{-2})	124,3 (100)	122,5 (98,55)
LE (W m^{-2})	98,5 (100)	76,5 (77,66)
H (W m^{-2})	33,8 (100)	26,5 (78,40)

Tabela 24: Valores médios dos componentes do balanço de energia LE, H e Rn, com dados observados e simulados, estação seca úmida, ano 2003.

Variável	Observado (%)	Simulado (%)
Rn (W m^{-2})	98,9 (100)	88,0 (88,98)
LE (W m^{-2})	96,3 (100)	59,3 (61,58)
H (W m^{-2})	36,5 (100)	22,8 (62,46)

O comportamento de Rn observado, em que os maiores valores foram observados durante o período úmido, decrescendo durante a estação seca, foi

compatível com a literatura, sendo esse comportamento sazonal de Rn similar ao encontrado em área de savana próximo a São Paulo (ROCHA et al., 2002), em áreas de floresta Amazônica em Ji-Paraná (AGUIAR et al., 2006) e na mesma região de transição Amazônia - Cerrado (VOURLITIS et al., 2008). No entanto, contrasta com o comportamento descrito em outras áreas de floresta tropical úmida (SANTOS, 2001; MALHI et al., 2002; SOUZA FILHO, 2002; VON RANDOW et al., 2004).

O modelo SITE conseguiu representar com exatidão esse padrão comportamental, embora a variação entre as médias estacionais (36,45 W m^{-2}) tenha se apresentado menor do que a encontrada nos valores observados (44,05 W m^{-2}), sendo os maiores valores referentes à estação úmida, e os menores, a estação seca úmida. A exceção da boa representação da variação sazonal pelo modelo foi a estação úmida seca, onde os valores simulados foram menores do que era de se esperar.

Esse aumento de Rn durante a estação seca em alguns sítios de floresta Amazônica é atribuído principalmente à redução da cobertura de nuvens da estação úmida para a seca, no entanto, em áreas de savana e na região de transição em estudo, bem como na região próxima ao sítio de estudos em Ji-Paraná, há forte presença de aerossóis provenientes de queimadas durante a estação seca, o que ocasiona um comportamento sazonal inverso, com maiores valores de Rn durante a estação chuvosa.

Os padrões de variação sazonal de LE e H também foram bem representados pelo modelo, com menores valores de LE durante o período seco e maiores valores durante o período úmido, e maiores valores de H durante o período seco e menores valores durante o período úmido. No entanto, as variações entre as estações, tanto para LE quanto para H, apresentaram valores superiores com os dados simulados, de 110, 2 e 16 W m^{-2} respectivamente para LE e H, enquanto essa variação entre os valores observados foi de 19,5 e 3,35 W m^{-2} na mesma ordem anterior. Na bibliografia, foi encontrada, para o mesmo sítio em estudo, uma variação de LE entre as estações úmida e seca de até 90 W m^{-2} (VOURLITIS et al., 2008), e de H de 2,4 MJ m^{-2} d^{-1} (PRIANTE FILHO et al., 2004).

5. CONCLUSÕES

Houve uma forte sazonalidade da floresta de transição Amazônia - Cerrado, com períodos de umidade elevada e estiagem bem definidos, o que refletiu no comportamento de LE e H e, consequentemente, na partição de Rn. Maiores valores de LE ocorreram na estação úmida seca, em que a parcela LE/Rn foi maior, e os maiores valores de H foram na estação seca.

Na série de dados de 2001 a 2007, a presença de um número elevado de falhas, situação recorrente em sistemas de medidas contínuas e de longo prazo, o que corrobora a necessidade de se buscarem métodos alternativos que possibilitem a obtenção, simulação e/ou preenchimento desses dados faltantes, como por exemplo, a modelagem.

Desse modo, foi testada a aplicabilidade do modelo SITE para a floresta de transição, necessitando da calibração dos parâmetros coeficiente de condutância estomática (*m*), capacidade máxima da enzima rubisco (*Vmáx*), frações de umidade no solo ($\theta g/\theta d$) e capacidade térmica das folhas (C_{HU}) e galhos (C_{HS}) para as estações úmida seca, seca e seca úmida. Os melhores ajustes do modelo foram: m =7,0 , *Vmáx* = 85 μmol CO_2 $m^{-2}s^{-1}$, C_{HU} = 2,109x10^3 J m^{-2} °C^{-1} e C_{HS} = 2,109x10^4 J m^{-2} °C^{-1}, ao longo de todo o ano, e (a) estação úmida, $\theta g/\theta d$ = 0,36, (b) estação úmida-seca, $\theta g/\theta d$ = 0,17, (c) estação seca, $\theta g/\theta d$ = 0,165, e (d) estação seca úmida, $\theta g/\theta d$ = 0,185.

O modelo SITE apresentou melhor aplicabilidade para simular as variações do ciclo diário, em relação à simulação das variações de maior variação temporal (dados de meia em meia hora), apresentando melhores ajustes entre os dados simulados e observados, com melhores ρ e α, e menores valores de *RMSE*.

O modelo, mesmo anteriormente a calibração, apresentou excelente simulação do saldo de radiação, com leve tendência a subestimativas. Após a calibração do modelo, os valores do fluxo de calor latente (LE) foram

superestimados na estação úmida, no entanto apresentaram-se adequados nos demais períodos, com leve tendência a superestimativas na estação úmida seca e a subestimativas nas demais estações. O fluxo de calor sensível (H) foi a variável de mais difícil ajuste, de modo que sua simulação, mesmo após a calibração do modelo, apresentou forte tendência a subestimativa desses fluxos.

6. RECOMENDAÇÕES

No de correr da elaboração deste, foi verificada a inexistência de medidas de vários parâmetros de entrada do modelo SITE na área em estudo, isso muitas vezes devido à dificuldade existente para a obtenção dos mesmos. Deste modo, foram adotados para estes parâmetros valores observados em outros sítios, buscando-se os locais com maior similaridade com a área de estudo do presente trabalho, o que pode ter sido um fator que corroborou no incremento nos erros dos fluxos modelados para a área de floresta de transição.

Deste modo, seria importante, para futuros trabalhos envolvendo modelagem, a caracterização de um maior número de parâmetros da floresta de transição, sendo estes referentes principalmente às características dos processos aerodinâmicos, fisiologia vegetal e parâmetros físicos e fluxos de calor e água no solo, medições que são de fundamental importância para alcançar uma melhor calibração e validação do modelo.

Sugere-se também que o modelo SITE seja rodado e calibrado para outras áreas em estudo, a fim de testar sua aplicabilidade em diferentes biomas.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, R.G. **Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudoeste da Amazônia.** Dissertação (Mestrado em Física e Meio Ambiente) – Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT, 56 f, 2005.

AGUIAR, R. G.; RANDOW, C. V.; PRIANTE FILHO, N.; MANZI, A. O.; AGUIAR, L. J. G.; CARDOSO, F. L. Fluxos de massa e energia em uma floresta tropical no sudeste da Amazônia. **Revista Brasileira de Meteorologia,** v. 21, n.3b, p. 248-257, 2006.

ALMEIDA, E.D. **Nitrogênio e fósforo no solo de uma floresta de transição Amazônia - Cerrado.** Dissertação (Programa de Pós Graduação em Física e Meio Ambiente), UFMT. Cuiabá:[s.n]. 2005.

ALVES, A. V.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. **Balanço de energia e reflectância de um cultivo de melão**. Revista Brasileira de Agrometeorologia. Santa Maria, RS, v.6 (2): 39-46. 1998

ANDRADE, N. L. R.; SANCHES, L.; ALVES, E. C. R. A.; SANTOS, A. A.; NOGUEIRA, J. S. The response evaluation of the underground water level of the precipitation intensity in different land covers. In: Hydrochange 2008., 2008, Kyoto. **Proceedings of Hydrochange 2008**. Kyoto, 2008.

ANDRADE, N. L. R.; AGUIAR, R. G.; SANCHES, L.; ALVES, E. C. R. F.; NOGUEIRA, J. S. Partição do saldo de radiação em áreas de floresta amazônica e floresta de transição amazônia-cerrado. **Revista Brasileira de Meteorologia**. No prelo (2009).

ARAÚJO. A. C.; NOBRE, A. D.; KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; DALLAROSA, R.; STEFANI, P.; 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. **J. Geophys, Res.** v. 107, p. 58-1 – 58-20, 2002.

ARRUDA, J.C**. Balanço de energia em uma área de floresta Tropical de transição na região de sinop em mato grosso, entre agosto de 1999 a maio de 2003.** Dissertação (Mestrado). Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá – MT, 55 f . 2005.

AYOADE, J. O. **Introdução a climatologia para os trópicos**. 5ª ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil,1998.

BALDOCHI, D. D.; HINCKS, B. B.; MEYERS, T. P. Measuring biosphereatmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**. v. 69, n. 5, p. 1331-1340, 1988.

BALDOCHI, D. D.; VALENTINI, R.; RUNNING, S.; OECHELS, W.; DAHLMAN, R. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems. **Global Change Biology**. v. 2, p. 159-168, 1996.

BALDOCHI, D. D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. **Global Change Biology**. v. 9, p. 479-492, 2003.

BALDOCCHI, D. D.; MEYERS, T. P. On using eco-physiological, micrometeorological and biogeochemical theory to evaluate carbon dioxide, water vapor and trace gas fluxes over vegetation: a perspective. **Agricultural and Forest Meteorology,** v.90, p. 1-25. 1998.

BONAN, G. B. Forests and Climate Change: Forcings, Feedbacks, and the Climate Benefits of Forests. **Science** 320. 2008. [DOI: 10.1126/science.1155121].

BURBA, G. G.; VERMA, S. B.; KIM, J. Surface energy fluxes of *Phragmites australis* in a prairie wetland. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 94, p. 31-51, 1999.BUSINGER.1986.

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 CO2 and H2O flux at an eastern Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, p. 43-1 - 43-16, 2002.

CORREIA, F. W. S. **Modelagem do impacto de Modificações da Cobertura Vegetal Amazônica no Clima Regional e Global**. 358 f. Tese (Doutorado em Meteorologia) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, São Paulo, 2005.

CULF, A.D.; ESTEVES, J. L. ; MARQUES FILHO, A. O and ROCHA, H.R. Radiation, temperature and humidity over forest and pasture in Amazonia. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. (Eds). **Amazonian Deforestation and Climate**, John Wiley & Sons, Chichester, England, p. 175 –191. 1996.

CURTIS, P.S., HANSON, P.J., BOLSTAD, P., BARFORD, C., RANDOLPH, J.C., SCHMID, H.P., & WILSON, K.B. Biometric and eddy-covariance based estimates of annual carbon storage in five eastern North American deciduous forests. **Agric. Forest Meteorol.** 113,3-19, 2002.

DICKINSON, R. E.; SELLERS, A.–H.; KENNEDY, P. J.; WILSON, M. F. **Biosphere-Atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model**. NCAR Technical note TN-275+STR, 69p. 1984.

EGLER, C.A.G. **Mudanças Recentes no Uso e na Cobertura da Terra no Brasil.** In: Seminário "Dimensões Humanas de Mudanças Ambientais Globais: perspectivas brasileiras." Campinas, UNICAMP. 2001.

FABRIS, L. F. **Coletânea geográfica passeando por Mato Grosso: Cuiabá, MT.** Secretaria de Cuiabá, 2001.

FALGE, E.; BALDOCCHI, D.; OLSON, R. J.; ANTHONI P.; AUBINET, M.; BERNHOFER, C.; BURBA, G.; CEULEMANS, R.; CLEMENT, R.; DOLMAN, H.; GRANIER, A.; GROSS, P.; GRÜNWALD, T.; HOLLINGER, D.; JENSEN, N. O.; KATUL, G.; KERONEN, P.; KOWALSKI, A.; TA LAI, C.; LAW, B.E.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MOORS, E.; MUNGER, J.W.; PILEGAARD, K.; RANNIK, Ü.; REBMANN, C.; SUYKER, A.; TENHUNEN, J.; TU, K.; VERMA, S.; VESALA, T.; WILSON, K.; WOFSY, S. Gap filling strategies for long term energy flux data sets. **Agricultural Forest Meteorology**. v.107, p.71-77, 2001.

FALKOWSKI, P.; SCHOLES, R. J.; BOYLE, E.; CANADELL, J.; CANFIELD, D.; MACKENZIE, F. T.; MOORE III, B.; PEDERSEN, T.; ROSENTHAL, Y.; SEITZINGER, S.; SMETACEK, V.; STEFFEN, W. The global carbon cycle: a test of our knowledge of Earth as a system. **Science**. v. 290, p. 291-296, 2000.

FEARNSIDE, P. M. **A floresta amazônica nas mudanças globais**. Manaus: INPA, 134p. 2003.

FINNINGAN, J. A comment on the paper by Lee (1998): "On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation" **Agricultura, and Forest Meteorology**. v.97, p. 55-64. 1999.

FINNIGAN J. J.; CLEMENT, R.; MALHI, Y.; LEUNING, R.; CLEUGH, H. A. A re-evaluation of long-term flux measurement techniques part I: averaging and coordinate rotation. **Boundary-Layer Meteorology**. v. 107, p. 1-48, 2003.

FOLEY, J.A., PRENTICE, I.C., RAMANKUTTY, N., LEVIS, S., POLLARD, D., SITCH, S., & HAXELTINE, A.An integrated biosphere model of land surface processes, terrestrial carbon balance and vegetation dynamics. **Global Biogeochem. Cycles,** 10, 603-628, 1996.

FOLEY, J. A.; COSTA, M. H.; DELIRE, C.; RAMANKUTTY, N.; SNYDER, P. Green surprise? How terrestrial ecosystems could affect earth's climate. **Frontier**

GRACE, J.; LLOYD, J.; MCINTYRE, J.; MIRANDA, A.; MEIR, P.; MIRANDA, H.; MONCRIEFF, J.; MASSHEDER, J.; WRIGHT, I.; GASH, J. Fluxes of carbon dioxide and water vapour over an undisturbed tropical forest in south-west Amazonia. **Global Change Biology**. v.1, p. 1-12, 1995.

HARAZONO, Y.; YOSHIMOTO, M.; MANO, M.; VOURLITIS, G. L.; OECHEL, W. C. Characteristics of energy and water budgets over wet sedge and tussock tundra ecosystems at North Slope in Alaska. **Hydrological Processes**. v. 12, p. 2163-2183, 1998.

HAXELTINE, A.; PRENTICE, I. C. Biome 3: An equilibrium terrestrial biosphere model based on ecophysiological constraints, resource availability, and competition among plant functional types. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, 1996. p.693-709.

HEUSINKVELD B.G.; JACOBS A.F.G.; HOLTSLAG A.A.M.; BERKOWICZ S.M. Surface energy balance closure in an arid region: Role of soil heat flux. **Agricultural and Forest Meteorology**, 122 (1-2), pp. 21-37. 2004.

HURTT, G. C.; MOORCROFT, P. R.; PACALA, S. W.; LEVIN, S. A. Terrestrial models and global change: challenges for the future. **Global Change Biology**, v. 4, p. 581-590. 1998.

HYSON, P., GARRATT, J. R.; FRANCEY, R. J. Algebraic and electronic corrections of measured uw covariance in the lower atmosphere. **Journal of Applied Meteorology** 16:p. 43-47. 1977.

IBGE. **Diagnóstico Ambiental da Amazônia Legal.** IBGE/DGC/Derna-Degeo-Decar. Rio de Janeiro. 1997.

IMBUZEIRO, H. M.A. **Calibração de um modelo para simular fluxos de massa e energia entre a floresta amazônica e a atmosfera usando múltiplos sítios**. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola), Viçosa, MG, 2005.

INPE. Mapa de desflorestamento da Amazônia Legal Projeto prodes digital 2000, 2001 e 2002 – **Monitoramento da Floresta Amazônica Brasileira por Satélite**. 2004.<www.obt.inpe.br/prodes> Acesso em 05/09/2006.

JACOBS, M. **The tropical rain florest – a first encounter.** Berlin: Spriner – Verlag. 1988.

JACOVIDES, C.P.; KONTOYIANNIS, H. Statistical procedures for the evaluation of evapotranspiration computing models. **Agricultural Water Management**, v. 27, p. 365371, 1995.

KAIMAL, J. C.; HAUGEN, D. A. **Some errors in the measurement of Reynolds stress**. J. Appl. Meteorol., **16**, 1298- 1305, 1969.

KATUL. A. , G.; AL BERTSO N, J.; WIBER, P.; HO RNBERGE R, G. – **A mixing layer theory for flow resistance in shallow streams.** Water Resources Research, vol. 38 n. 11, p. 1251-1257, 2002

KRUIJT, B.; ELBERS, J. A.; VON RANDOW, C.; ARAÚJO, A. C.; OLIVEIRA, P. J.; CULF, A.; MANZI, A. O.; NOBRE, A. D.; KABAT, P.; MOORS, E. J. The robustness of eddy correlations fluxes for Amazon rain forest conditions. **Ecological Applications**. v. 14, p. S101-S113, 2004.

KUCHARIK, C. J.; FOLEY, J. A.; DELIRE, C.; FISHER, V. A.; COE, M. T.; GOWER, S. T.; LENTERS, J. D.; YOUNG-MOLLING, C.; NORMAN, J. M.; RAMANKUTTY, N. Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: Water balance, carbon balance end vegetation structure. **Global Biogeochemical Cycles**, v.14, 2000. p.795-825.

LENTINI, M.; VERÍSSIMO, A.; SOBRAL, L. **Fatos florestais da Amazônia 2003**. Belém: Imazon, 110p. 2003.

LEUNING, R.; MONCRIEFF , J. Eddy covariance CO2 flux measurements using open- and closed-path CO2 analyzers: corrections for analyzer water vapor sensitivity and damping fluctuations in air sampling tubes. **Boundary Layer Meteorology**, v. 53: 63-76. 1990

MAHRT, L.; SU N, J.; BLULUMEN, W.; DELA DELADELANY, T.; ONCLELEY, S. – **Nocturnal Boundary-Layer Regimes.** Boundary-Layer Meteorology 88, p. 255-278. 1998

MAITELLI, G. T., AND J. R. WRIGHT. The climate of a riverside city in the Amazon basin: Urban-rural differences in temperature humidity. **Amazonian Deforestation and Climate,** J. H. C. Gash, C. A. Nobre, J. M. Roberts, and R. L. Victoria, Eds., John Wiley and Sons, 193–206. 1996.

MALHI, Y.; NOBRE, A. D.; GRACE, J.; KRUIJT, B.; PEREIRA, M. G. P.; CULF, A.; SCOTT, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**. v. 103, p. 31,593-31,612, 1998.

MALHI, Y. & GRACE, J. Tropical forests and atmospheric carbon dioxide. **Tree**. v. 15, p. 332-337, 2000.

MALHI, Y.; PEGORARO, E.; NOBRE, A. D.; PEREIRA, M. G. P.; GRACE, J.; CULF, A. D.; CLEMENT, R. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**. v. 107, p. 45-1 - 45-17, 2002.

MASSMAN, W. J. A simple method for estimating frequency response corrections for eddy covariance systems. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 104, p. 185-198, 2000.

MASSMAN, W. J. & LEE, X. Eddy covariance flux corrections and uncertainties in long-term studies of carbon and energy exchanges. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 113, p. 121-144, 2002.

MCMILLEN, R.T. An Eddy Correlation Technique with Extended Applicability to Non-Simple Terrain. **Bound. Layer Meteo.,** 43:231-245. 1988.

MAcWILLIAM, A-L.; CABRAL, M. R.; GOMES, B. M.; ESTEVES, J. M. Forest and pasture leaf-gas exchange in south-west Amazonia. In: Gash, J. H. C.; Nobre, C. A.; Roberts, J. M.; Victoria, R. L. (Eds). **Amazonian Deforestation and Climate**, John Wiley & Sons, Chichester, England, p. 265 –285. 1996.

JERRY M. MELILLO*, A. DAVID MCGUIRE*, DAVID W. KICKLIGHTER*, BERRIEN MOORE†, CHARLES J. VOROSMARTY† & ANNETTE L. SCHLOSS. **Global climate change and terrestrial net primary production.** *Nature* **363**, 234 – 240. 1993.

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. doi: <10.1016/j.agrformet.2008.01.00>. (INPE-15431-PRE/10166).

MILLER, S. D.; GOULDEN, M. L.; MENTON, M. C.; ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C.; FIGUEIRA, A. M. S.; SOUZA, C. A. D. Biometric and microteorological measurements of tropical forest carbon balance. **Ecological Applications**. v.14, p.S114-S126, 2004.

MONCRIEFF, J.; VALENTINI, R.; GRECO, S.; SEUFERT, G.; CICCIOLI, P. Trace gas exchange over terrestrial ecosystem: methods and perspectives in micrometeorology. **Journal of Experimental Botany**. v. 48, nº 310, 1997. p.1133-1142.

NOBRE, P.; I. F. A. CAVALCANTI. Previsão Climática Sazonal no CPTEC- A estação chuvosa de 1995 e 1996 no Nordeste do Brasil. VII Congreso Argentino de Meteorologos, VII Congresso Latino Americano e Iberico de Meteorologia. 1996.

NUNES, E. L.; COSTA, M. H.; ALMEIDA T. S. **Calibração do modelo site para simular fluxos de calor sensível, calor latente e carbono em um sítio de floresta tropical amazônica**. Anais do Congresso Brasileiro de Meteorologia. Florianópolis: 2006.

NUNES, E. L.; IMBUZEIRO, H. M. A.; COSTA, M. H. **Uso do modelo site para simular fluxos de calor sensível, calor latente e carbono em um sítio de mata atlântica.** Apresentado no XV Congresso Brasileiro de Agrometeorologia – 02 a 05 de julho de 2007 –Aracaju – SE. 2007.

NUNES, E. L. **Algoritmo regional de monitoramento da taxa de fixação de carbono pelas florestas tropicais da América do Sul**. Tese (Doutorado) Universidade Federal de Viçosa. 146f. 2008.

PARTON, W.; STEWART, J.; COLE, C. Dynamics of C, N, P and S in grassland soils: a model**. Biogeochemistry**, v. 5, 1988. p.109-131.

PEREIRA, A. R. Radiation regime of tropical rain forest. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 5, p.i-viii. 1997.

PEREIRA, A.R.; ANGELOCCI, L.R.; SENTELHAS, P.C. **Agrometeorologia: fundamentos e aplicações práticas**. Guaíba: Agropecuária, 478 p. 2002.

POLLARD, D. & THOMPSON, S. L. The effect of doubling stomatal resistance in a global climate model. **Global and Planetary Change**, v.10, p. 129-161. 1995.

PRENTICE, C.; CRAMER, W.; HARRISON, S.P.; LEEMANS, R.; MONSERUD, R. A.; SOLOMON, A. M. A global biome model based on plant physiology and dominance, soil properties and climate. **Journal of Biogeography**, v. 19, 117–134. 1992.

PRIANTE FILHO, N.; VOURLITIS, G.L., HAYASHI, M.M.S.; NOGUEIRA, J.S.; CAMPELO JR, J.H.; NUNES, P.C., SANCHES, L.; COUTO, E.G.; HOEGER, W., RAITER, F.; TRIENWEILER, J.L.; MIRANDA, E.J.; PRIANTE, P.C., PEREIRA, L.C.; BIUDES, M.S.; FRITZEN, C.L.; LACERDA, M.; SULI, G.S.; SHIRAIWA, S.; SILVEIRA, M.. Comparison of the mass and energy exchange of a pasture and a mature transitional tropical forest of the southern Amazon Basin during a seasonal transition. **Global Change Biology**, v. 10, p. 863-876, 2004.

RAICH, J. W.; RASTETTER E. B.; MELILLO, J. M.; KICKLIGHTER, D. W.; STEUDIER, P. A.; PETERSON, B. J. GRACE, A. L.; MOORE, B.; VOROSMARTY, C. J. Potential net primary productivity in South America: application of a global model. **Ecological Applications**, v. 1, 1991. p.399-429.

ROBERTS, J.; CABRAL, O. M. R, FISCH, G. Transpiration from an Amazonian rainforest calculated from stomatal conductance measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, 65,175–196. 1993.

ROCHA, H.R., SELLERS, P.J., COLLATZ, G.J., WRIGHT, I.R. & GRACE, J., Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon exchange at the ABRACOS forest sites. In: Gash, J.H.C., Nobre, C.A., Roberts, J.M. & Victoria R.L**.**, **Amazonian deforestation and climate.** John Wiley and Sons, 1st ed., p. 459 - 473. 1996.

ROCHA, H. R.; FREITAS, H. C. R.; ROSOLEM, R. I. N. JUAREZ, R. N. TANNUS, LIGO, M. A. O.; CABRAL,M. R.; SILVA DIAS, M. A. F.. Measurements of CO_2 exchange over a woodland savanna (Cerrado Sensu stricto) in southeast Brazil, **Biota Neotropica**, v.2, p.1–11. 2002.

ROCHA, H. R.; GOLDEN, M. L.; MILLER, S. D.; MENTON, M. C.; PINTO, L. D.V. O.; FREITAS, H.C.; FIGUEIRA, A. M. S. Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazônia. **Ecological Applications**. v. 14, p. S22-S32, 2004.

RUNNING, S. W. & GOWER, S. T. Forest – BGC, a general model of forest ecosystem processes for regional applications, II, Dynamic allocation and nitrogen budgets, **Tree Physiol**., v. 9, 1991. p.147-160.

RUSTAD, L.E.; J. CAMPBELL, G.M.;MARION, R.J. NORBY, M.J.; MITCHELL, A.E.; HARTLEY, J. H.C.; CORNELISSEN, J.; GUREVITCH, G. CTE-NEWS. A Meta-analysis of the response of soil respiration, net N mineralization, and aboveground plant growth to experimental ecosystem warming. **Oecologia:** *in press.* 2001.

SAKAI, R.K.; D.R. FITZJARRALD; K.E. MOORE. Importance of Low-Frequency Contributions to Eddy Fluxes Observed over Rough Surfaces. **J. of Applied Meteo.**, 40:2178-2192. 2001.

SALESKA, S. R.; MILLER, S. D.; MATROSS, D. M.; GOULDEN, M. L.; WOFSY, S. C.; ROCHA, H. R.; CAMARGO, P. B.; CRILL, P.; DAUBE, B. C.; FREITAS, H. C.; HUTYRA, L.; KELLER, M.; KIRCHHOFF, V.; MENTON, M.; MUNGER, J. W.; PYLE, E. H.; RICE, A. H.; SILVA, H. Carbon in Amazon forests: unexpected seasonal fluxes and disturbance-induced losses. **Science**. v. 302, p. 1554-1557, 2003.

SANTOS, S. N. M. **Modelo de fluxos de energia, água e CO2 aplicado em ecossitema de floresta tropical**. Viçosa, MG, 2001.80p. Dissertação (Mestrado).Universidade Federal de Viçosa. 2001.

SANTOS, S. N. M.: COSTA, M. H. A simple tropical ecosystem modelo f carbon, water and energy fluxes. **Ecological Modelling.** v. 176, p. 291-312. 2004.

SELLERS, W. D. Physical Climatology, 1.ed. New York: Sellers, W.D. **Physical Climatology.** University of Chicago, 203p. 1965.

SELLERS, P. J.; MINTZ, Y.; SUD, Y.; DALCHER A. A simple biosphere model (SiB) for use with general circulation models. **Journal of the Atmospheric Sciences**, v. 43, 1986. p.505-531.

SENNA, M. C. A. **Fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida pela Floresta Tropical Amazônica: uma comparação entre estimativas baseadas em modelagem, sensoriamento remoto e medições de campo**. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 38p., Viçosa, 2004.

SOUZA FILHO, J. D. C. **Variação sazonal dos componentes do balanço de radiação e energia sobre a floresta de Caxiuanã.** Tese (Pós graduação em Meteorologia Agrícola). Viçosa, MG. 84f**.** 2002;

SHUTTLEWORTH, W. J. Evaporation from Amazonian rainforest. **Proc. R. Soc. Lond**., v. b233,: 321-346.1988

THÉRY, H. Situações da Amazônia no Brasil e no continente. **Estudos avançados**. 19 (53), 2005.

TWINE, T. E.; KUSTAS, W. P.; NORMAN, J. M.; COOK, D. R.; HOUSER, P. R.; MEYERS, T. P.; PRUEGER, J. H.; STARKS, P. J.; WESELY, M. L. Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**. v. 103, p. 279-300, 2000.

VERMA, S. B. Micrometeorological methods for measuring surface fluxes of mass and energy. **Remote Sensing Reviews**. v. 5, p. 99-115, 1990.

VILANI, M. T.). **Estimativa da *f*apar utilizando três métodos para uma floresta de transição amazônia-cerrado**. 2004. 88f. Dissertação de mestrado (Física Ambiental) – Departamento de Física, Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá . 2007.

VON RANDOWN, C.; MANZI, A. O.; KRUIJT, B.; OLIVEIRA, P. J.; ZANCHI, F. B.; SILVA, R. L.; HODNETT, M. G.; GASH, J. H. C.; ELBERS, 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. **Theorical and Applied Climatology**. p. 1-22, 2004.

VOURLITIS GL, OECHEL W.C. Landscape-scale CO2, H2O vapour, and energy flux of moist-wet coastal tundra ecosystems over two growing-seasons. **Journal of Ecology**, 85, 575±590. 1997.

VOURLITIS, G. L.; OECHEL, W. C. Eddy covariance measurements of CO2 and energy fluxes of an Alaskan tussock tundra ecosystem. **Ecology**, v. 80, p. 686±701.1999.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; CASEIRO, F. T.; CAMPELO JR, J. H. Seasonal variations in the net ecosystem CO2 exchange of a mature Amazonian tropical forest (cerradão). **Functional Ecology**. v. 15, p. 388-395, 2001.

VOURLITIS,G. L., PRIANTE FILHO N., HAYASHI, M. M. S., NOGUEIRA, J. S., CASEIRO, F. T., CAMPELO JR., J. H. Seasonal variations in the evapotranspiration of a transitional tropical forest of Mato Grosso, Brazil. **Water Resources Research**, v. 38, 2002.

VOURLITIS, G. L.; PRIANTE FILHO, N.; HAYASHI, M. S.; NOGUEIRA, J. S.; RAITER, F.; HOEGEL, W.; CAMPELO JR, J. H. Effects of meteorological variations on the CO2 exchange of a brazilian transitional tropical forest. **Ecological Applications**. v. 14, n. 4, p. S89-S100, 2004.

VOURLITIS, G. L.; N., J. S., PRIANTE FILHO, N.; HOEGER, W. ; RAITER, F.; BIUDES, M. S.; ARRUDA, J. C.; CAPRISTANO, V. B.; FARIA, J. L. B.; LOBO, F. A. The Sensitivity of Diel CO2 and H2O Vapor Exchange of a Tropical Transitional Forest to Seasonal Variation in Meteorology and Water Availability. **Earth Interactions** • v. 9, p. 11-23. 2005.

VOURLITIS,G. L., NOGUEIRA, J. S., LOBO, F. A., SENDALL, K. M., DE PAULO, S. R., DIAS, C. A. A., PINTO JR., O. B., ANDRADE, N. L. R. Energy balande and canopy conductance of a tropical semi-deciduous forest of the southern Amazon Basin. **Water Resources Research**, v. 44, 2008.

WESELY, M.L.; THURTELL, G.W.;TANNER., C.B. Eddy Correlation Measurements of Sensible Heat Flux near the Earth's Surface. Journal of Applied Meteorology. v.9, p. 45–50. 1969.

WEVE, L. A.; FLANAGAN, L. B.; CARLSON, P. J. Seasonal and interannual variation in evapotranspiration, energy balance and surface conductance in a northern temperate grassland. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.112, p. 31-49, 2002.

WILSON, K.B.; BALDOCCHI, D. D.; AUBINET, M.; BERBIGIER, P.; BERNHOFER, C.; DOLMAN, H.; FALGE, E.; FIELD, C.; GOLDSTEIN, A.; GRANIER, A.; GRELLE, A.; HALLDOR, T.; HOLLINGER, D.; KATUL, G.; LAW, B. E.; LINDROTH, A.; MEYERS, T.; MONCRIEFF, J.; MONSON, R.; OECHEL, W.; TENHUNEN, J.; VALENTINI, R.; VERMA, S.; VESALA, T.; WOFSY, S. Energy partitioning between latent and sensible heat flux during the warm season at FLUXNET sites. **Water Resources Research**. v. 38, n. 12, p. 30-1 – 30-11, 2002.

WOODWARD, F. I. **Climate and plant distribution**. Cambridge University Press, Cambridge, 1987.