

HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÃO E
PROFUNDIDADE DO SISTEMA RADICULAR PELA
CALIBRAÇÃO DE MODELOS MICROMETEOROLÓGICOS –
APLICAÇÃO À FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

**VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2010**

HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO

**ESTIMATIVA DOS PARÂMETROS DE DISTRIBUIÇÃO E
PROFUNDIDADE DO SISTEMA RADICULAR PELA
CALIBRAÇÃO DE MODELOS MICROMETEOROLÓGICOS –
APLICAÇÃO À FLORESTA TROPICAL AMAZÔNICA**

Dissertação apresentada à
Universidade Federal de Viçosa, como
parte das exigências do Programa de
Pós-Graduação em Meteorologia
Agrícola, para obtenção do título de
Doctor Scientiae.

APROVADA: 08 de julho de 2010.

Gilberto Chohaku Sedyama
(Coorientador)

Luís Gustavo Gonçalves de Gonçalves

José Maria Nogueira da Costa

Flávio Barbosa Justino

Marcos Heil Costa
(Orientador)

Ao meu pai, **JOSÉ NEWTON MONTENEGRO**
IMBUZEIRO que tanto contribuiu e incentivou para que eu
alcançasse todos os objetivos durante minha vida.

Adoramos a perfeição, porque não a podemos ter; repugná-la-íamos, se a tivéssemos.

O perfeito é desumano, porque o humano é imperfeito.

(Fernando Pessoa)

AGRADECIMENTOS

- Primeiro lugar a DEUS que sempre esteve presente em todos os momentos da minha vida, sempre me guiando pelo caminho do bem e do amor, me dando saúde, paz, inteligência e força para seguir na conquista dos meus objetivos.
- Aos meus pais José Newton Montenegro Imbuzeiro e Riley Acioli Ribeiro, pela educação nos princípios da verdade, pelos valiosos incentivos e inspirações necessárias para vencer as dificuldades para a conquista de meus ideais.
- À Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Departamento de Engenharia Agrícola (DEA), pela oportunidade de realizar o curso de pós-graduação em Meteorologia Agrícola.
- À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudo.
- Ao grande amigo, professor e orientador, Marcos Heil Costa, pela amizade, a paciência, o apoio, a dedicação, o reconhecimento, a confiança e pela oportunidade de participar de grandes projetos nacionais e internacionais. Por ser uma importante referência no meu futuro como pesquisadora, pela sua dedicação a ciência e pelo brilhantismo na maneira de conduzir o grupo de pesquisa.

- Ao meu coorientador, Professor Gilberto C. Sedyama, pela atenção, a amizade, as sugestões e contribuições ao longo deste trabalho.
- Aos demais professores que contribuíram para o enriquecimento do meu intelecto.
- Aos meus irmãos Newley e Saulo, a minha avó Benedita Acioli (*in memoriam*), a minha madrinha Maria Alice e ao meu cunhado Fabrizzio Tenório pela grande força na continuidade da minha vida profissional.
- Ao meu grande companheiro, Felipe de Oliveira Morbi, pelo amor, o incentivo, a amizade, a atenção, a dedicação, o respeito e a compreensão. Por compartilhar os momentos de alegrias e de tristezas com muita força e serenidade.
- A todos os amigos e funcionários da Meteorologia Agrícola pela amizade e convívio com que me acolheram.
- Aos amigos do Grupo de Pesquisa em Interação Atmosfera-Biosfera, pela convivência e o coleguismo.
- As minhas grandes amigas e primas, Lisiane, Mônica, Scheila, Vânia e Livia, pela confiança na minha vitória.
- Aos grandes amigos Gustavo e Guilherme Lyra, Taciana Toledo, Fernanda Abreu, Daniela Alencar, Santiago Cuadra e Felipe Moraes que sempre me deram força para todas as questões da minha vida.
- Aos antigos amigos da Meteorologia pela amizade e convívio. Em especial aos amigos José Luiz, Raniéri, Marcos Paulo, Sílvia Yanagi, Juninho, Daniel, Rodrigo e Varejão.
- Aos grandes amigos de Maceió Isabele Lages, Ana Karina Prado e Daniela Luko, pela sincera e longa amizade.
- Aos novos amigos de Viçosa e Belo Horizonte, Kadu, Urso, Batata, Nanda, Marina, Inara, Monique, Zeizei, Mara e outros, pelos momentos de descontração e pelo carinho.
- As amigas do basquete pelo coleguismo e companhia.
- A todos que contribuíram direta ou indiretamente para a realização desse trabalho.

BIOGRAFIA

HEMLLEY MARIA ACIOLI IMBUZEIRO, filha de José Newton Montenegro Imbuzeiro e Riley Acioli Ribeiro, nasceu em 23 de setembro de 1980, na cidade de Maceió-AL.

Em dezembro de 1998 terminou o 2º grau no Colégio Santíssimo Sacramento.

Iniciou a graduação em Meteorologia em março de 1999, obtendo o título de Bacharel em Meteorologia, pela Universidade Federal de Alagoas (UFAL), em fevereiro de 2003. Nesse período foi aluna de iniciação científica e bolsista da Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Alagoas (FAPEAL) de março de 2000 a janeiro de 2003.

Em julho de 2005, concluiu o curso de pós-graduação, em nível de Mestrado, em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa (UFV).

Em março de 2006 iniciou o curso de pós-graduação, em nível de Doutorado, em Meteorologia Agrícola na UFV, dedicando-se aos estudos das interações atmosfera-biosfera.

CONTEÚDO

LISTA DE FIGURAS	x
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE SÍMBOLOS	xviii
LISTA DE ABREVIATURAS	xxiii
RESUMO	xxv
ABSTRACT	xxviii
1. 1 INTRODUÇÃO	1
2 METODOLOGIA	6
2.1 DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL	6
2.2 DADOS	8
2.2.1 Descrição dos dados	8
2.2.1.1 Dados micrometeorológicos	10
2.2.1.2 Umidade e temperatura do solo	11
2.2.1.3 Amostra de solo	11
2.2.2 Análise de erros e filtragem de valores espúrios	12

2.2.3 Preenchimento de falhas dos dados de entrada	12
2.2.4 Filtragem dos dados de validação do modelo	13
2.3 DESCRIÇÃO DO IBIS	14
2.3.1 Fisiologia vegetal e condutância estomática	15
2.3.2 Distribuição das raízes	17
2.3.3 Profundidade de raiz	18
2.3.4 Física do solo	19
2.3.5 Evapotranspiração	20
2.3.6 Fluxos de calor sensível e latente	20
2.3.7 Propriedades físicas do solo	21
2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO	22
2.5 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E DAS SIMULAÇÕES	23
2.5.1 Primeiro grupo	25
2.5.2 Segundo grupo	26
2.5.3 Terceiro grupo	28
2.5.4 Análise das incertezas introduzidas pelas diferentes condições de contorno associadas às propriedades físicas do solo	29
2.6 ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO	30
3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
3.1 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS Z_R e β_2	35
3.1.1 Simulação utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO)	35
3.1.1.1 Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R	35
3.1.1.2 Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2	39
3.1.2 Simulação utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo	41

(2° GRUPO)	
3.1.2.1 Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R	41
3.1.2.2 Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2	46
3.1.3 Simulação utilizando dados observados de umidade e temperatura do solo (3° GRUPO)	48
3.1.3.1 Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R	48
3.1.3.2 Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2	50
3.1.4 Discussão conjunta – Análise de sensibilidade	52
3.2 CALIBRAÇÃO UTILIZANDO TRÊS CONDIÇÕES DE CONTORNO	54
3.2.1 Calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos (1° GRUPO)	54
3.2.2 Calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente (2° GRUPO)	62
3.2.3 Calibração utilizando dados observados de temperatura e umidade do solo (3° GRUPO)	69
3.2.4. Discussão conjunta - Calibração	74
3.3 INCERTEZAS INTRODUZIDAS PELAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTORNO ASSOCIADAS ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO	78
3.3.1 Incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente	78
3.3.2 Incertezas introduzidas por diferentes valores de granulometria do solo	81
3.3.3 Discussão conjunta – Erros introduzidos pelas condições de contorno	83
4 RESUMO E CONCLUSÃO	84
5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91

LISTA DE FIGURAS

- Figura 2.1 Mapa de orientação da Amazônia Legal representando a localização do sítio micrometeorológico utilizado neste trabalho. 8
- Figura 2.2 Precipitação (barras pretas, em mm mês⁻¹) com destaque para estação seca (área sombreada), e radiação solar incidente (linha cinza, em Wm⁻²) de acordo com o período de dados utilizado de julho de 2000 a março de 2001, observado na FNT-K83. 10
- Figura 2.3 Estrutura em módulos do modelo IBIS. 15
- Figura 2.4 Variação da fração acumulada de raízes finas (Y) com a profundidade do solo (m) para diversos valores de β_2 . 18
- Figura 2.5 Espessura das camadas de solo utilizada inicialmente pelo IBIS, 0,10; 0,15; 0,25; 0,5; 1 e 2 m. 19
- Figura 3.1 Análise de sensibilidade do erro absoluto médio (*MAE*) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (**1º GRUPO**), para FNT-K83 (a) e (b) é o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 36

- Figura 3.2 Análise de sensibilidade do viés máximo ($B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (**1º GRUPO**), para FNT-K83 (a) e (b) é o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 37
- Figura 3.3 (a) Análise de sensibilidade da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2) = w_1.MAE + w_2.B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (**1º GRUPO**), para FNT-K83; (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 38
- Figura 3.4 (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (**1º GRUPO**), para FNT-K83; (b) é o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 40
- Figura 3.5 (a) Análise de sensibilidade do erro absoluto médio (MAE) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (**2º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 42
- Figura 3.6 (a) Análise de sensibilidade do viés máximo ($B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (**2º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 43
- Figura 3.7 (a) Análise de sensibilidade da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2) = w_1.MAE + w_2.B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (**2º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala 45

reduzida.

- Figura 3.8 (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (**2° GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 47
- Figura 3.9 (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando dados de umidade e temperatura do solo observadas na FNT-K83 (**3° GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 49
- Figura 3.10 (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , utilizando dados de umidade e temperatura do solo observadas na FNT-K83 (**3° GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida. 51
- Figura 3.11 Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão inicial (a) e calibrada com o banco de dados global de granulometria dos solos (b), mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos, **1° GRUPO**. 56
- Figura 3.12 Gráfico cumulativo de LE, para a versão inicial (a) e calibrada com o banco de dados global de granulometria dos solos (b), para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos para FNT-K83, **1° GRUPO**. 57

- Figura 3.13 Fluxo de calor latente observado e simulado ($W m^{-2}$), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de 2001, para a versão inicial (a)-(d) e calibrada (e)-(h) utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos (b), para FNT-K83, **1º GRUPO**. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados. 59
- Figura 3.14 Precipitação horária observada (em $mm\ hora^{-1}$) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em $m^3 m^{-3}$), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b) e perfil da umidade volumétrica simulado (em $m^3 m^{-3}$), nas camadas de 0,1; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 4,00 m (c), **1º GRUPO**, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001, para FNT-K83. 61
- Figura 3.15 Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão inicial (a) e calibrada (b), mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na FNT-K83. 64
- Figura 3.16 Gráfico cumulativo de LE para versão inicial (a) e calibrada (b) para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na FNT-K83. 65
- Figura 3.17 Fluxo de calor latente observado e simulado ($W m^{-2}$), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de 2001, para a versão inicial (a)-(d) e calibrada (e)-(h) utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na FNT-K83. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados. 66

- Figura 3.18 Precipitação horária observada (em mm hora⁻¹) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em m³ m⁻³), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b) e perfil da umidade volumétrica simulado (em m³ m⁻³), nas camadas de 0,75; 1,88 e 3 m (c), **2º GRUPO**, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001, para FNT-K83. 68
- Figura 3.19 Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, **3º GRUPO**. 70
- Figura 3.20 Gráfico cumulativo de LE para versão para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, **3º GRUPO**. 71
- Figura 3.21 Fluxo de calor latente observado e simulado (W m⁻²), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de 2001, para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, **3º GRUPO**. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados. 72
- Figura 3.22 Precipitação horária observada (em mm hora⁻¹) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em m³ m⁻³) (b), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m, para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. 73
- Figura 3.23 Precipitação horária observada (em mm hora⁻¹) (a) e perfil da umidade volumétrica do solo (em m³ m⁻³) (b), para a diferença entre as simulações calibradas no 1º GRUPO e 2º GRUPO, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. FNT-K83. 80

Figura 3.24 Precipitação horária observada (em mm hora^{-1}) (a) e perfil da umidade volumétrica do solo (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (b), para a diferença entre as simulações utilizando valores de granulometria do solo da versão 4.0 do Protocolo do LBA-DMIP e do 1º GRUPO, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. FNT-K83.

LISTA DE TABELAS

Tabela 2.1	Dados de propriedades físicas dos solos utilizadas pelo IBIS (RAWLS et al., 1992).	22
Tabela 2.2	Valores representativos das propriedades físicas do solo inicialmente utilizados pelo IBIS 1º GRUPO .	26
Tabela 2.3	Valores representativos das propriedades físicas do solo obtidos no sítio experimental FNT-K83 2º GRUPO .	27
Tabela 3.1	Valores mínimos de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R, \beta_2)$ para os diferentes grupos de simulações que utilizaram diferentes condições de contorno para representar as propriedades físicas do solo (2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3).	52
Tabela 3.2	Coefficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{máx}$) e função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrado ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,975$) e após calibração ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,999$). As simulações utilizam parâmetros	55

de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos, **1º GRUPO**, para Flona do Tapajós km 83.

- Tabela 3.3 Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{máx}$) e função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrado ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,975$) e após calibração ($Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$), utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na Flona do Tapajós km 83. 63
- Tabela 3.4 Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{máx}$) e função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para a simulação forçada pelos dados observados de umidade e temperatura do solo, **3º GRUPO**, na FNT-K83. 69
- Tabela 3.5 Parâmetros não calibrados (Inicial) e parâmetros calibrados para cada grupo de otimização, juntamente com os valores das espessuras das seis camadas de solo utilizadas no modelo. 76
- Tabela 3.6 Profundidade do sistema radicular para diferentes tipos de ecossistemas tropicais encontrada na literatura. 76
- Tabela 3.7 Distribuição vertical de raízes finas encontrada na literatura. 77

LISTA DE SÍMBOLOS

a -	Albedo da superfície
A_g -	Assimilação de CO ₂ bruta
A_n -	Assimilação de CO ₂ líquida
$APAR$ -	Radiação fotossinteticamente ativa absorvida
b -	Intercepto da relação linear
b_{exp} -	Expoente “b” de Campbell’s
$B_{máx}$ -	Viés máximo
C -	Carbono
CC -	Capacidade de campo

c_i -	Concentração interna de CO ₂
CO ₂ -	Dióxido de Carbono
c_s -	Concentração de CO ₂ na camada limite foliar
d -	Profundidade do solo (cm)
d_i -	Direção que move o Método do Gradiente
$d_{máx}$ -	Profundidade máxima do solo (cm)
f_i -	Diversas medidas de ajuste do modelo
$F(Z_R; \beta_2)$ -	Função de otimização
$F(\theta)$ -	Função objetivo
g_s -	Condutância estomática
H -	Fluxo de calor sensível
h_a -	Umidade relativa do ar
i -	Células que serão interpoladas
J_c -	Taxa de assimilação de CO ₂ limitada pela Rubisco
J_e -	Taxa de assimilação de CO ₂ limitada pela luz
K_c e K_o -	Coeficientes de Michaelis-Menten para CO ₂ e O ₂

K_s -	Condutividade hidráulica saturada
$K(\theta)$ -	Condutividade hidráulica em meio não saturado
LE -	Fluxo de calor latente
L_{in} -	Radiação de onda longa incidente
m_o -	Coefficiente relacionado à condutância estomática
m -	Parte inteira de $(f/24 + 1)$
MAE -	Erro absoluto médio
N -	Nitrogênio
O -	Valores observados
p -	Célula que precede a falha
P -	Precipitação
PMP -	Ponto de murcha permanente
q -	Fluxo de água no solo
q_r -	Umidade relativa do ar
q_s -	Umidade volumétrica do solo
R_n -	Saldo de radiação

S -	Valores simulados
S_{in} -	Radiação solar incidente
T -	Temperatura da folha
T_a -	Temperatura do ar
T_s -	Temperatura do solo
u_a -	Velocidade horizontal do vento
$V_{máx}$ -	Capacidade máxima da Enzima Rubisco à 15°C
X_i -	Valor a ser preenchido
X_p -	Antecessor da falha
X_{p+1} -	Sucessor da falha
Y -	Fração de raízes finas entre a superfície e a profundidade do solo d
w_1 e w_2 -	Peso dado para MAE e $B_{máx}$
z -	Profundidade do solo
Z_R -	Profundidade máxima de raiz
$Z_{Rmáx}$ -	Profundidade máxima de raiz
α -	Tamanho do passo a ser dado

α_i -	Passo do Método do Gradiente
α_3 -	Eficiência quântica da planta C_3
β_2 -	Distribuição vertical de raízes finas
$\beta_{2\text{máx}}$ -	Distribuição vertical de raízes finas máxima
Γ^* -	Ponto de compensação para a assimilação de CO_2 bruta
λ -	Emissividade
ε -	Erro
ζ -	Custo de respiração da atividade da Rubisco
σ -	Constante de Stefan-Boltzmann
θ -	Parâmetros do modelo a serem otimizados
Θ -	Espaço factível dos parâmetros
Ψ_0 -	Potencial de entrada de ar na coluna de solo
Ψ_t -	Potencial total de água no solo
$\omega(T)$ -	Função de estresse devido à temperatura
$\omega(S)$ -	Função de estresse devido à umidade do solo
$\frac{\Delta\Psi_t}{\Delta z}$	Gradiente hidráulico

LISTA DE ABREVIATURAS

ABRACOS -	Estudo Observacional do Clima na Amazônia Anglo-Brasileiro
BATS -	Modelo de Transferência Biosfera-Atmosfera
BOREAS -	Estudo da Interação entre o Ecossistema Boreal e a Atmosfera
CASA -	Modelo de Simulação Global da Interação Biosfera-Atmosfera
CTEM -	Modelo Canadense do Ecossistema Terrestre
ECHAM -	Modelo da Circulação Geral da Atmosfera
FLUXNET -	Rede Global de Torres Micrometeorológicas
FNT-K83 -	Floresta Nacional do Tapajós km83
IBIS -	Modelo Integrado da Biosfera

LBA -	Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia
LBA-DMIP -	Projeto de Intercomparação de Modelos na Amazônia
LPJ -	Modelo de Interação Vegetação-Atmosfera (<i>Lund Postdan Jena</i>)
MC1 -	Modelo de Vegetação Dinâmica
ORCHIDEE -	Organizador da Hidrologia e Carbono em Ecossistemas Dinâmicos
SDGVM -	Modelo de vegetação Dinâmica Global
SiB2 -	Modelo Simplificado da Biosfera
SILVAN -	Modelo Global do Ciclo de Carbono Terrestre
TEM -	Modelo do Ecossistema Terrestre

RESUMO

IMBUZEIRO, Hemlley Maria Acioli, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, julho de 2010. **Estimativa dos parâmetros de distribuição e profundidade do sistema radicular pela calibração de modelos micrometeorológicos – aplicação à floresta tropical Amazônica.** Orientador: Marcos Heil Costa. Coorientadores: Humberto Ribeiro da Rocha e Gilberto Chohaku Sedyama.

Neste trabalho utilizaram-se medidas micrometeorológicas, amostras de solo e medidas de umidade e temperatura do solo coletadas no sítio experimental da Floresta Nacional do Tapajós K83 (FNT-K83) para calibrar o modelo de superfície terrestre, o IBIS, a fim de estimar os parâmetros Z_R e β_2 através da otimização da partição do saldo de radiação (R_n) entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE). A metodologia se baseia na premissa que esta partição é função do estresse hídrico, o qual depende da profundidade e da distribuição vertical do sistema radicular. O diferencial deste trabalho é o uso de condições de contorno, associadas às propriedades físicas do solo, com diferentes níveis de incertezas e os erros introduzidos por essas incertezas também são analisados no presente trabalho. As simulações realizadas pelo IBIS foram organizadas em três grupos, de acordo com os diferentes tipos de dados e condições de contorno, com diferentes níveis de incerteza. No primeiro grupo, o modelo opera no modo normal, simulando LE utilizando dados das propriedades físicas do solo estimadas

através de um banco de dados global de granulometria dos solos. Neste grupo de simulações, a incerteza é maior, pois as propriedades físicas do solo são determinadas por meio de tabelas com valores representativos para cada tipo granulométrico de solo. No segundo grupo, o modelo utiliza parâmetros de solo obtidos localmente a partir da curva de retenção de água no solo através de amostra coletada na FNT-K83 para simular LE. Neste grupo, a incerteza é reduzida, pois as propriedades físicas do solo são determinadas localmente. No terceiro grupo, o modelo simula LE forçando as condições de solo com dados de temperatura e umidade do solo, medidos no sítio experimental FNT-K83. Neste grupo, a incerteza é menor, pois são utilizados dados reais de umidade do solo. Para o procedimento de calibração, para cada grupo de simulações foram obtidos os parâmetros Z_R e β_2 , que otimizavam as estatísticas dos coeficientes de correlação (ρ) e de inclinação da reta de regressão entre os dados observados e simulados (α), e a minimização do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{\text{máx}}$) e da função objetivo ($F(Z_R, \beta_2)$). Antes de iniciar o processo de calibração foi realizada uma análise de sensibilidade dos resultados simulados pelo modelo aos parâmetros Z_R e β_2 . Nesta análise, foi observado nos três grupos de simulações que o IBIS apresentou sensibilidade ao parâmetro Z_R e β_2 , exceto o terceiro grupo de simulações que não apresentou sensibilidade à β_2 . Posteriormente, foi realizado um procedimento de calibração envolvendo cerca de 120 simulações para os três grupos de simulações envolvendo diferentes condições de contorno. O novo conjunto de parâmetros, calibrados para cada grupo de simulações, apresentaram valores distintos. Os parâmetros calibrados utilizando o banco de dados global de granulometria do solo, foram $Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,999$, enquanto que os parâmetros calibrados para as simulações que utilizaram amostras de solo coletadas localmente, foram $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$, já os parâmetros calibrados para as simulações que usaram os dados de temperatura e umidade do solo, foram $Z_R = 3$ m e $\beta_2 = 0,999$. Em geral, os parâmetros estimados são $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$ para a FNT-K83. Já as análises dos erros introduzidos pelas condições de contorno, relacionadas às propriedades físicas do solo, mostraram que a escolha dessas condições de contorno influencia o perfil de umidade volumétrica do solo simulado pelo IBIS, por conseguinte, a quantidade de água disponível para os processos de transpiração e evaporação, conseqüentemente, modificando a partição de R_n em H e LE. Estas análises indicam que a melhor condição de contorno, a que produz menores erros, seria a que

utiliza dados observados do perfil de temperatura e umidade do solo para alimentar o modelo. Porém, esses dados são escassos, restritos a alguns experimentos e localidades. Com isso, a condição de contorno que utiliza parâmetros de solo obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, seria a melhor opção, pois produz resultados satisfatórios e podem ser obtidas facilmente no local do experimento. As conclusões obtidas no presente trabalho e as dificuldades encontradas durante sua execução têm importantes implicações. Em primeiro lugar, provavelmente é real a necessidade de compreender melhor o sistema radicular nos ecossistemas em geral. Isto envolveria, por exemplo, mais medições e especificações da profundidade e distribuição do sistema radicular para validar as estimativas destes parâmetros. Em segundo lugar, a criação de um protocolo de medições em experimentos de campo, que padronizasse nestes experimentos algumas medições básicas, como amostras de solo, que poderiam ser utilizadas para estimar parâmetros do solo para serem utilizados pelos modelos.

ABSTRACT

IMBUZEIRO, Hemley Maria Acioli, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, July, 2010. **Estimate parameters of distribution and depth of the root system for the calibration of the micrometeorological models – application to the Amazon rainforest.** Adviser: Marcos Heil Costa. Co-Advisers: Humberto Ribeiro da Rocha and Gilberto Chohaku Sedyama.

In this work we calibrated the land-surface model IBIS estimating the parameters based on the optimization of net radiation (R_n) partitioning between sensible heat flux (H) and latent heat flux (LE). We used micrometeorological databases, measurements of soil samples properties and soil moisture and temperature obtained from the site of the National Forest of Tapajós km83 (FNT-K83). The methodology is based on the premise that the partition between the heat fluxes is a function of water stress, which depends on the depth and vertical distribution of the root system. It is the first time that it is used boundary conditions, associated with soil physical properties, with different levels of uncertainties and the errors introduced by these uncertainties. The simulations run by IBIS were organized into three groups according to the different types of data and boundary conditions, with different levels of uncertainty. In the first group, the model operates in normal mode, simulating LE using data from physical properties of soil estimated from global database of soil properties. In these simulations group, the uncertainty is greater because the soil physical properties are determined by tables of representative values for each type of

soil granulometrial. In the second group, the model uses soil parameters obtained locally from soil water retention curve samples collected in the FNT-K83 to simulate LE. In this group, the uncertainty is reduced because the soil properties are determined locally. In the third group, the model simulates LE forcing conditions with soil temperature and soil moisture data measured in the experimental site FNT-K83. In this group, the uncertainty is smaller, because the model uses real data of soil moisture. For the calibration procedure each group of simulations obtained Z_R and β_2 parameters that optimized the statistics of the correlation coefficient (ρ) and the slope of the linear regression line between the simulates and observed data (α), and the minimization of the mean absolute error (MAE), the maximum bias ($B_{\text{máx}}$) and the objective function ($F(Z_R, \beta_2)$). Before starting the calibration itself, a sensitivity analysis of the model-simulated was performed for Z_R and β_2 parameters. In this analysis, it was observed in all simulations groups that the IBIS is sensitive to Z_R and β_2 parameters, except in the third group of simulations that showed no sensitivity to β_2 parameter. After the sensitivity analysis was performed, a calibration procedure was performed involving around 120 simulations, for all groups of simulations that used different boundary conditions. The new set of parameters calibrated for each group of simulations, presented different results. The calibrated parameters using data from physical properties of soil estimated from the global database of soil properties were $Z_R = 4$ m and $\beta_2 = 0,999$, while the calibrated parameters for the simulations that used soil parameters obtained locally from the soil water retention curve samples, were $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$, whereas the calibrate parameters for simulations that uses soil temperature and soil moisture data measured in the experimental site FNT-K83, were $Z_R = 3$ m e $\beta_2 = 0,999$. In general, the best estimated parameters are $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$ for FNT-K83. The analysis of the errors introduced by the boundary conditions related to soil physical properties showed that the choice of boundary conditions influence the volumetric soil water content profile simulated by IBIS, therefore, the amount of water available for the processes of evaporation, transpiration and consequently the partition of R_n into H and LE. These analyses indicate that the boundary condition that produces small errors is that use local data of temperature and moisture soil profiles to run the model. However, these data sets are scarce, restricted

to some experiments and localities. Thus, the boundary condition using soil parameters obtained from soil samples collected locally would be the best option because it produces satisfactory results and can be easily obtained at the experimental site. The conclusions and difficulties in this work encountered during implementation have important implications. Firstly, it is probably a real requirement to understand better the root system on general ecosystems. This would involve, for example, more measurements of depth and distribution of the root system characteristics to validate the estimation of these parameters. Secondly, the creation of a protocol for measurements in field experiments, those standardize some basic measurements such as soil samples, which could be used to estimate soil parameters to be used by models.

1 INTRODUÇÃO

A preocupação em fazer com que modelos de superfície terrestre representem de forma realística as interações entre a atmosfera e a superfície terrestre tem levado à incorporação de novos processos (físicos, químicos, entre outros) aos modelos e ao aumento da sua complexidade. Modelos requerem parâmetros e esses precisam ser medidos ou estimados. Enquanto alguns parâmetros podem ser medidos, como o albedo e o índice de área foliar, ou apresentam valores universais, como a aceleração da gravidade, a maioria não é facilmente mensurável, como o caso da profundidade e distribuição do sistema radicular.

Alguns modelos de superfície terrestre como o BATS (DICKINSON et al., 1993), IBIS (FOLEY et al., 1996), ECHAM (ROECKNER et al., 1996), SiB2 (SELLERS et al., 1996) e modelos de biosfera como TEM (RAICH et al., 1991), CASA (POTTER et al., 1993) e SILVAN (KADUK & HEIMANN, 1996) utilizam a

profundidade de raiz como parâmetro para determinar a quantidade de água a ser extraída do solo (KLEIDON & HEIMANN, 1998).

O fluxo de energia entre a vegetação e a atmosfera pode ser alterado pelo controle que a disponibilidade de água no solo exerce sobre a evapotranspiração e sobre o estresse hídrico da vegetação. Em geral, os parâmetros relacionados ao sistema radicular influenciam diretamente o uso de água no solo, determinam a adaptabilidade da vegetação em capturar água e nutrientes estocados em grandes profundidades do solo durante períodos de baixa disponibilidade de água e alta demanda evaporativa, e ainda reservam água para manter a transpiração, evitando assim o estresse hídrico (MEINZER et al., 1999; KLEIDON, 2004). O estresse hídrico afeta praticamente todos os aspectos relacionados ao crescimento das plantas, reduzindo a atividade fotossintética, que induz o fechamento estomático e a diminuição da transpiração, modificando a partição da energia disponível.

O saldo de radiação (R_n) representa a maior parte do total de energia disponível à superfície, sendo particionado principalmente em fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE). Em condição de estresse hídrico, ocorre fechamento estomático e a transpiração da planta diminui. Com isso, uma menor fração de R_n é convertido em LE, com maior disponibilidade para H, isto é, para o aquecimento do ar. Assim, a partição de R_n entre H e LE é uma função da disponibilidade hídrica, que por sua vez depende da profundidade máxima de raiz (Z_R) e da distribuição vertical de raízes finas (β_2).

Apesar da importância dos dois principais parâmetros do sistema radicular na partição do saldo de radiação na correta representatividade da interação

entre o solo, vegetação e a atmosfera, estes ainda não são bem representados pelos modelos atuais. Em parte, esta falta de representatividade deve-se à lacuna de conhecimento sobre o verdadeiro valor destes parâmetros (KLEIDON & HEIMANN, 1998).

Muitos modelos de superfície terrestre, como MC1 (BACHELET et al., 2001; DALY et al., 2000), CTEM (ARORA & BOER, 2003), LPJ (SITCH et al., 2003), SDGVM (WOODWARD & LOMAS, 2004) e ORCHIDEE (KRINNER et al., 2005) consideram que a profundidade do sistema radicular não ultrapassa 2 m. Em contraste com este valor de profundidade do sistema radicular utilizados por alguns modelos, experimentos de campo mostram que em algumas regiões tropicais esta profundidade pode chegar a 60 m (STONE & KALISZ, 1991). Desta forma a estimativa destes parâmetros é de fundamental importância para a correta representação da interação atmosfera-biosfera, pois análises de sensibilidade demonstram que o sistema climático é sensível à capacidade de retenção e extração de água no solo (MILLY & DUNNE 1994; DESBOROUGH 1997; ZENG et al., 1998; KLEIDON & HEIMANN 1999).

A extração de água armazenada a grandes profundidades do solo pelas raízes na floresta tropical amazônica tem sido uma das principais descobertas durante os últimos quinze anos (MARKEWITZ et al., 2010). A floresta tropical amazônica é particularmente dependente da extração de água armazenada a grandes profundidades do solo para manter a atividade fotossintética elevada durante eventos de estiagem. A escolha de valores impróprios destes parâmetros resulta num fraco

desempenho dos modelos de mesoescala e globais (NEPSTAD et al., 1994; BRUNO et al., 2006; SALESKA et al., 2007; ANDERSON et al., 2010; HARPER et al., 2010).

Existem poucos estudos sobre o perfil do sistema radicular dos diferentes ecossistemas devido à dificuldade em realizar observações diretas, que requerem métodos destrutivos, trabalhosos, caros e demorados. Entretanto, alguns estudos obtiveram algumas estimativas; por exemplo, JACKSON et al. (1997) para diferentes tipos de ecossistemas; CHAUVEL et al. (1992), NEPSTAD et al. (1994), HODNETT et al. (1995) e JIPP et al. (1998) para o ecossistema de Floresta Amazônica; CANADELL et al. (1996) para a Savana Tropical; e PERSSON (1983) para a Floresta Boreal, entre outros. Embora esses estudos sugiram valores representativos de tipos de ecossistemas, existem evidências crescentes de que os parâmetros do sistema radicular variam espacialmente dentro de um mesmo ecossistema de maneira ainda desconhecida (Profundidade de raiz na Floresta Amazônica: 3,6 m, HODNETT et al., 1995; 6 m, CHAUVEL et al., 1992; 15 m NEPSTAD et al., 2004; 18 m, JIPP et al., 1998), o que ilustra o tamanho do problema e sugere a necessidade de uma metodologia alternativa para a determinação desses parâmetros.

Apesar da escassez de parâmetros relacionados ao sistema radicular, existe grande disponibilidade mundial de dados de H e LE, que foram coletados em grandes experimentos internacionais (FLUXNET, ABRACOS, LBA e BOREAS). A FLUXNET é uma rede mundial de torres micrometeorológicas, que utiliza o método da covariância de vórtices turbulentos para medir as trocas de carbono, água e energia entre os ecossistemas terrestres e a atmosfera. A rede possui cerca de 400 torres

micrometeorológicas, que operam continuamente em sítios experimentais localizados em diferentes ecossistemas. Entretanto, as observações do sistema radicular são raras nestes sítios.

A falta de observações do sistema radicular e a grande disponibilidade dos dados de fluxos de energia motivaram o presente trabalho. Na ausência das observações de campo, os parâmetros relacionados ao sistema radicular podem ser estimados através de métodos indiretos. Com isto, este trabalho visa desenvolver uma metodologia para estimar os parâmetros Z_R e β_2 por meio da otimização da partição de R_n em LE e H, simulado por um modelo de superfície terrestre. A metodologia se baseia na premissa que esta partição é função do estresse hídrico, o qual depende da profundidade e da distribuição vertical do sistema radicular. A metodologia foi testada para um sítio de floresta tropical Amazônica.

2 METODOLOGIA

As informações sobre o sítio experimental, os tipos de dados utilizados, os processos do modelo utilizado - IBIS, as simulações e a estratégia de otimização serão descritas nas próximas seções: 2.1. informações sobre o sítio experimental; 2.2. os diferentes tipos de dados utilizados no trabalho e os procedimentos de filtragem empregados nos dados de entrada e de validação do modelo; 2.3. a estrutura e alguns processos do IBIS; 2.4. uma visão geral da metodologia; 2.5. as simulações com os diferentes tipos de dados e condições de contorno e; 2.6. a estratégia de otimização do modelo.

2.1 DESCRIÇÃO DO SÍTIO EXPERIMENTAL

A metodologia foi testada usando dados do Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA, na sigla em inglês). O LBA é um experimento internacional que estuda a interação entre a biosfera e a atmosfera na Amazônia e dispõe de 13 sítios experimentais com medições de fluxos e elementos meteorológicos. Dentre estes, o sítio escolhido foi o da Floresta Nacional do Tapajós km 83 (FNT-K83) por dispor, além das medidas citadas anteriormente, das medidas de temperatura e umidade do solo.

A Floresta Nacional de Tapajós está localizada à margem da rodovia Santarém-Cuiabá (BR-163) e possui um sítio experimental próximo à entrada do km 83 (03°03'01"S, 54°56'32"W) (GOULDEN et al., 2004) (Figura 2.1). O solo local foi classificado como Latossolo Amarelo Distrófico (argiloso oxidico) com paisagem de terreno plano, que apresenta diferentes texturas, normalmente profundo e coberto por floresta densa (HERNANDEZ FILHO et al., 1993). O clima é quente e úmido com uma precipitação anual média de 1.911 mm. A estação seca compreende tipicamente os meses de agosto a dezembro, a temperatura média varia de 24,2°C em julho a 25,7°C em outubro e a umidade relativa de 85% em novembro e 93% em maio (BRUNO et al., 2006). A vegetação é de floresta tropical fechada, com dossel emergente de aproximadamente 40 m.

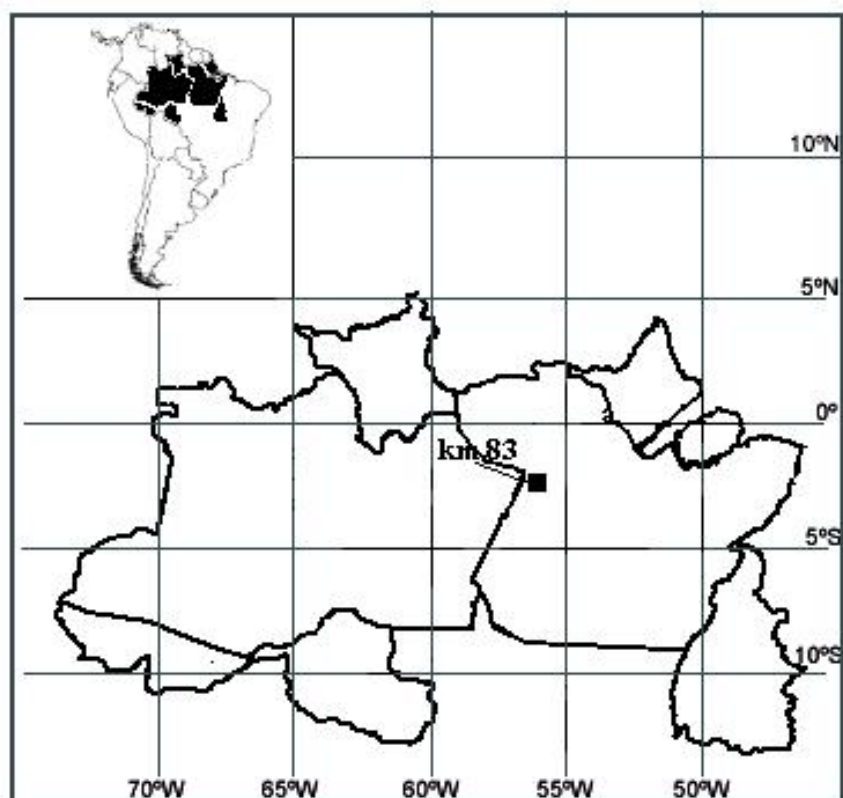


Figura 2.1 – Mapa de orientação da Amazônia Legal representando a localização do sítio micrometeorológico utilizado neste trabalho.

2.2 DADOS

2.2.1 Descrição dos dados

Neste trabalho, foram utilizados os dados coletados por uma estação meteorológica automática, sistema de covariância de vórtices turbulentos, sensores de temperatura e umidade no solo e amostras deformadas de solo na FNT-K83, compreendendo o seguinte conjunto de dados coletados acima do dossel, numa altura de 65 m: radiação solar incidente (S_{in}); temperatura do ar (T_a); velocidade horizontal do vento (u_a); precipitação (P); umidade relativa do ar (q_r); e fluxo de calor latente (LE). Além disso, a temperatura (T_s) e a umidade volumétrica do solo (q_s) foram medidas em diferentes profundidades do solo (0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m).

A série de dados disponíveis (dados fornecidos por Humberto da Rocha, USP e Scott Miller, UC – Irvine) compreende o período de julho de 2000 a março de 2001, com médias de 30 minutos. Esses dados foram coletados antes do corte seletivo da floresta, no sítio da FNT-K83, que ocorreu em setembro de 2001.

Segundo DA ROCHA *et al.* (2004), o período entre julho de 2000 a junho de 2001 a FNT-K83 apresentou características de clima quente e úmido. Neste período, os valores máximos dos totais diários de radiação solar incidente atingiram $23,8 \text{ MJm}^{-2}\text{dia}^{-1}$ no início de setembro de 2000, e os valores médios diários de temperatura do ar variaram entre 27°C no final de agosto de 2000, durante a estação seca, e 21°C no início de fevereiro de 2001, durante a estação úmida (DA ROCHA *et al.*, 2004).

A maior parte dos dados utilizados nas análises corresponde aos meses menos chuvoso, que vai de julho a dezembro de 2000 (ver Figura 2.2).

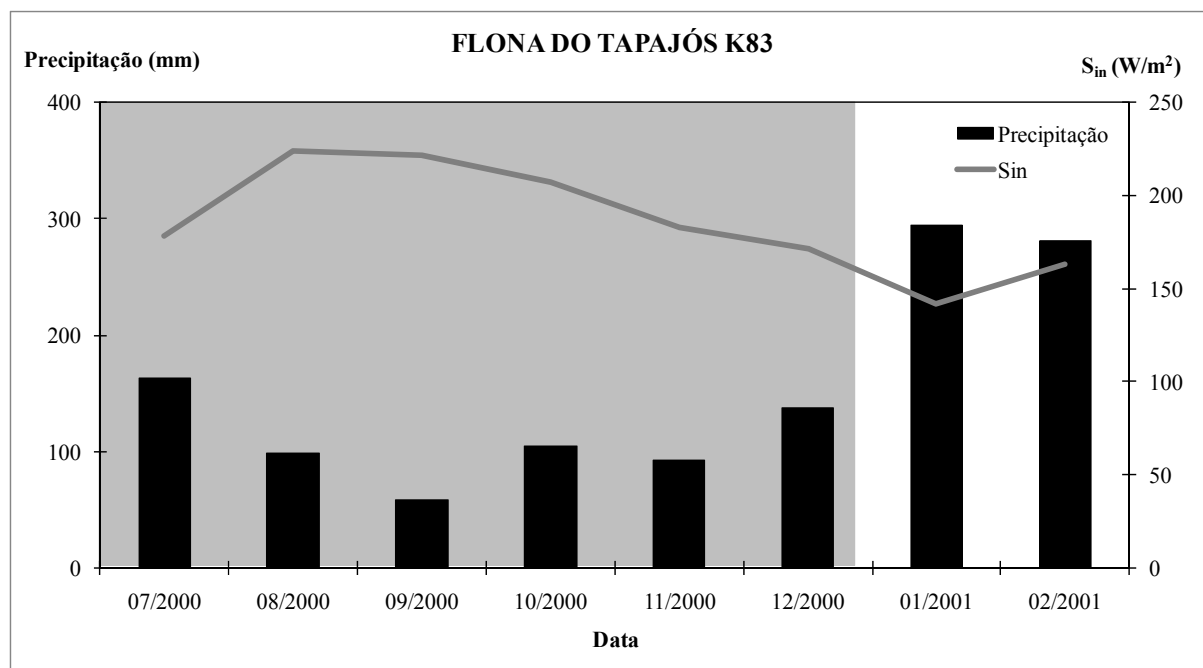


Figura 2.2 – Precipitação (barras pretas, em mm mês⁻¹) com destaque para estação seca (área sombreada), e radiação solar incidente (linha cinza, em Wm⁻²) de acordo com o período de dados utilizado de julho de 2000 a fevereiro de 2001, observado na FNT-K83.

Maiores detalhes sobre as séries de dados estão disponíveis nos metadados do Sistema de Informação e Dados do LBA (<http://beija-flor.cptec.inpe.br>).

2.2.1.1 Dados micrometeorológicos

As variáveis S_{in} , L_{in} , T_a , u_a , P e q_r foram usadas para forçar o modelo, enquanto as demais (LE e q_s) foram usadas para verificar o desempenho do modelo. O termo LE é calculado pelo modelo IBIS, e comparado com os dados coletados por um sistema que utiliza o método da covariância de vórtices turbulentos (ver GOULDEN et al., 2004; MILLER et al., 2004 e DA ROCHA et al., 2004), exceto L_{in} que foi estimado por meio da expressão $L_{in} = R_n - S_{in} + (1-a) + \lambda\sigma T_a^4$, usando o pressuposto de que a emitância radiante do dossel é calculada para temperatura do ar, e que a é o

albedo da superfície, λ é a emissividade, σ é a Constante de Stefan-Boltzmann e T_a é a temperatura absoluta do ar.

2.2.1.2 Umidade e temperatura do solo

Os dados foram coletados no período de julho de 2000 a março de 2001, próximo da torre micrometeorológica da FNT-K83. O conteúdo de água no solo foi estimado usando o tempo de trânsito medido pelo conteúdo de água do refletômetro CS615 (*Campbell Scientific, Logan, Utah, USA*). Os refletômetros foram inseridos horizontalmente na parede do poço às profundidades de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,5 e 3,0 m abaixo da superfície. O conteúdo de água do solo foi calculado utilizando as curvas de calibração, específicas do refletômetro CS615, para o sítio FNT-K83 obtidas por DA ROCHA *et al.* (2004). As temperaturas do solo foram medidas nas profundidades de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,5 e 3,0 m abaixo da superfície utilizando termopares de cobre-constantan (*Omega Engineering, Stamford, Connecticut, USA*).

2.2.1.3 Amostra de solo

As amostras deformadas de solo foram coletadas no sítio experimental da FNT-K83, até a profundidade de 0,5 m. Uma análise laboratorial da amostra de solo, utilizando a técnica da centrifugação (BRIGGS & MCLANE, 1910), foi realizada para obtenção da curva de retenção de água no solo. Esta curva relaciona o conteúdo de água com o seu potencial matricial no solo. Logo a sua avaliação permite obter os parâmetros físicos do solo, que são utilizados na simulação descrita

em 3.2 (b). As análises de solo foram realizadas no Laboratório de Solos do Departamento de Engenharia Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

2.2.2 Análise de erros e filtragem de valores espúrios

Os dados coletados em experimentos de campo contêm, geralmente, vários tipos de erros: erros grosseiros, que provêm do funcionamento inadequado dos equipamentos, tais como manutenção, queda de energia, leituras erradas, etc; erros sistemáticos, geralmente provenientes da descalibração dos instrumentos, não linearidade da curva de calibração, ou uso de fórmulas inadequadas para obtenção de valores finais; e erros aleatórios, que são devidos às variações na tensão da rede elétrica, ruídos, interferências ou instabilidade nos instrumentos, entre outros.

Embora uma parte significativa dos erros presentes nos dados brutos tenha sido eliminada no pós-processamento das observações, as séries de ondas longas obtidas ainda continham alguns valores espúrios, que foram filtrados se $L_{in} > 500 \text{ W m}^{-2}$ ou $L_{in} < 350 \text{ W m}^{-2}$.

2.2.3 Preenchimento de falhas dos dados de entrada

Para que pudessem ser utilizados como dados de entrada pelo IBIS, os dados tiveram todas as suas falhas preenchidas por interpolação, de acordo com as seguintes relações (SENNÁ, 2004):

- se o número de pontos de falhas (f) for menor ou igual a 3 horas

$$X_i = X_p + \frac{(X_{p+f+1} - X_p)}{f + 1} \cdot (i - p) \quad \text{Eq.1}$$

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, i são as células que estão interpoladas e p é a célula que precede a falha.

- se a duração da falha for maior que 3 horas e menor que 24 horas:

$$X_i = X_{i-24} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \cdot (X_p - X_{p-24}) + \frac{(i-p)}{f+1} \cdot (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24}) \quad \text{Eq. 2}$$

- se a duração da falha for maior ou igual a 24 horas:

$$X_i = X_{i-24m} + \frac{[(p+f+1)-i]}{f+1} \cdot (X_p - X_{p-24m}) + \frac{(i-p)}{f+1} \cdot (X_{p+f+1} - X_{p+f+1-24m}) \quad \text{Eq. 3}$$

em que, m é a parte inteira de $(f/24 + 1)$. Estas 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.

2.2.4 Filtragem dos dados de validação do modelo

Inicialmente, os dados usados na validação dos resultados do modelo foram tratados para eliminar os erros grosseiros, como erros no acerto do relógio do sistema de aquisição automática de dados, bem como os valores espúrios. Em seguida, eles foram filtrados de acordo com o critério de filtragem dos dados de entrada, que visa evitar que inconsistências introduzidas nesses dados, devido ao processo de preenchimento das falhas, sejam repassadas aos dados de saída (IMBUZEIRO, 2005). Assim, os horários em que o modelo foi alimentado por dados preenchidos foram eliminados da análise dos resultados.

A série de dados efetivamente usada após o procedimento de filtragem tem duração de 242 dias.

2.3 DESCRIÇÃO DO IBIS

O IBIS faz parte de uma nova geração de modelos de biosfera global, classificado como um modelo dinâmico da vegetação global, que considera as mudanças ocorridas na composição e estrutura da vegetação em resposta às condições ambientais. Este modelo compreende diversos processos, incluindo as interações entre a superfície e a atmosfera, ciclos de CO₂ e nutrientes, e dinâmica da vegetação (FOLEY et al., 1996; KUCHARIK et al., 2000). É um dos poucos modelos a incorporar uma variedade de processos do ecossistema em uma única estrutura, incluindo: troca de energia, água e de dióxido de carbono entre solo, plantas e atmosfera; processos fisiológicos das plantas e organismos do solo, incluindo assimilação de CO₂ e respiração; crescimento e competição entre plantas; ciclo de nutrientes (C, N) e processos físicos do solo.

O trabalho inicial de calibração em cinco regiões do globo para a versão 2.0 do IBIS foi desenvolvido por DELIRE & FOLEY (1999) e KUCHARIK et al. (2000) usando diversas medidas biofísicas, dentre as quais destacam-se as medições de fluxos obtidos no sítio da Reserva Biológica do Jaru (Rebio Jaru), durante a campanha do Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study (ABRACOS).

O modelo segue uma hierarquia conceitual (Figura 2.3) e inclui submodelos (ou módulos) organizados de acordo com a escala temporal: processos de superfície (transferência de energia, água, CO₂ e momentum), biogeoquímica do solo (ciclo do nitrogênio e do CO₂), dinâmica da vegetação (competição das plantas por luz, água e nutrientes) e fenologia (baseada no crescimento medido por graus-dia). Segue-se descrição de alguns processos representados pelo IBIS.

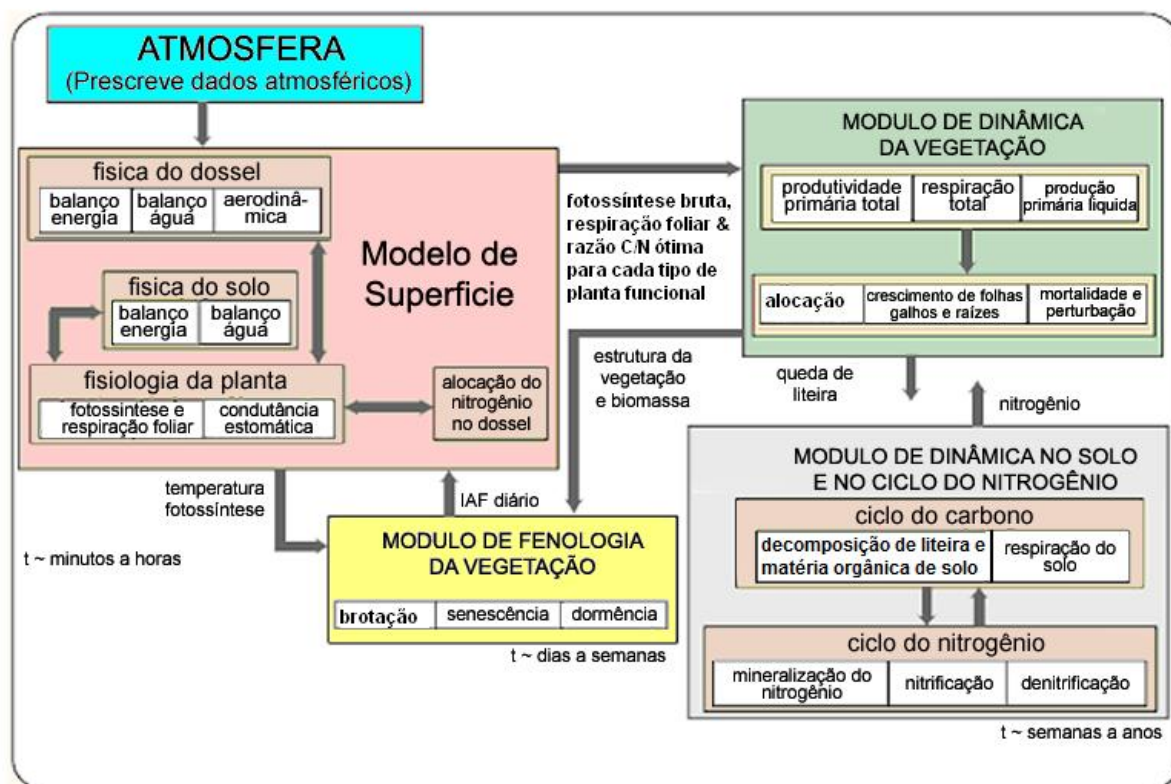


Figura 2.3 - Estrutura em módulos do modelo IBIS.

2.3.1 Fisiologia vegetal e condutância estomática

O modelo simula a assimilação de CO_2 e a respiração na escala da folha utilizando as equações de Farquhar (FARQUHAR et al., 1980; FARQUHAR & SHARKEY, 1982): a assimilação de CO_2 bruta (A_g) é uma função da radiação absorvida ($APAR$), da temperatura da folha (T), da concentração interna de CO_2 (c_i), e da capacidade máxima da enzima Rubisco ($V_{m\acute{a}x}$); a respiração de manutenção (R_d) é uma função apenas de $V_{m\acute{a}x}$. Logo, temos que a assimilação de CO_2 líquida (A_n) é representada por:

$$A_n = A_g - R_d \quad \text{Eq. 4}$$

$$A_g = \min(J_e, J_c) \quad \text{Eq. 5}$$

$$J_e = \alpha_3 \cdot APAR \frac{c_i - \Gamma_*}{c_i + 2\Gamma_*} \quad \text{Eq. 6}$$

$$J_c = \frac{V_m(c_i - \Gamma_*)}{c_i + K_c \left(1 + \frac{[O_2]}{K_o}\right)} \quad \text{Eq. 7}$$

$$c_i = c_s - \frac{1,6A_n}{g_s} \quad \text{Eq. 8}$$

$$V_m = V_{m\max} \cdot \omega(T) \cdot \omega(S) \quad \text{Eq. 9}$$

$$R_d = \zeta \cdot V_{m\max} \quad \text{Eq. 10}$$

em que, J_e é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela luz, J_c é a taxa de assimilação de CO_2 limitada pela Rubisco, Γ_* é o ponto de compensação para a assimilação de CO_2 bruta, K_c , K_o são os coeficientes de Michaelis-Menten para CO_2 e O_2 , em que $K_c = 1,5 \times 10^{-4}$ e $K_o = 0,25$ a ($15 \text{ }^\circ\text{C}$), $\omega(T)$ é a função de estresse devido à temperatura, $\omega(S)$ é a função de estresse devido à umidade do solo, α_3 é a eficiência quântica da planta C_3 e ζ é o custo de respiração da atividade da Rubisco.

A condutância estomática (g_s) é simulada como uma função da A_n , da concentração de CO_2 na camada-limite foliar (c_s) e da umidade relativa do ar (h_a), conforme LEUNING (1995):

$$g_s = m_o \frac{A_n h_a}{c_s} + b \quad \text{Eq. 11}$$

sendo m_o o coeficiente relacionado à condutância estomática e b é o intercepto da relação linear.

2.3.2 Distribuição das raízes

O sistema radicular desenvolve-se de acordo com o tipo de planta e as diversas características do solo, tais como os valores de pH, o conteúdo nutricional do solo, o balanço hídrico, a aeração, a profundidade do solo e a presença de adensamento ou a compactação de um horizonte (LARCHER, 2000).

O IBIS representa a distribuição vertical do sistema radicular de acordo com a Equação 12, proposta por JACKSON *et al.* (1997), representada por

$$Y(d) = \frac{1 - \beta_2^d}{1 - \beta_2^{d_{\max}}}, \quad \text{Eq. 12}$$

em que, $Y(d)$ é a fração de raízes finas entre a superfície e a profundidade do solo d (cm), d_{\max} é a profundidade máxima do solo e β_2 é um parâmetro de distribuição de raízes finas. Para o ecossistema de floresta tropical, JACKSON *et al.* (1996) sugeriram $\beta_2 = 0,962$ para raízes totais, enquanto JACKSON *et al.* (1997) sugeriram $\beta_2 = 0,972$ para raízes finas, considerando que as raízes finas são mais importantes para a captura de água e nutrientes. A versão original do IBIS utiliza o $\beta_2 = 0,975$ para o ecossistema de floresta tropical, enquanto que IMBUZEIRO (2005) calibrou o IBIS com $\beta_2 =$

0,997 e VAREJÃO (2009) calibrou o IBIS com $\beta_2 = 0,996$ para Flona do Tapajós km 67. Em geral, valores de β_2 mais próximos à unidade indicam uma distribuição de raízes mais uniforme no perfil do solo, enquanto valores de β_2 mais próximos a zero indicam raízes concentradas próximo à superfície. A Figura 2.4 representa, esquematicamente, a variação de Y em relação a d , para diversos valores de β_2 .

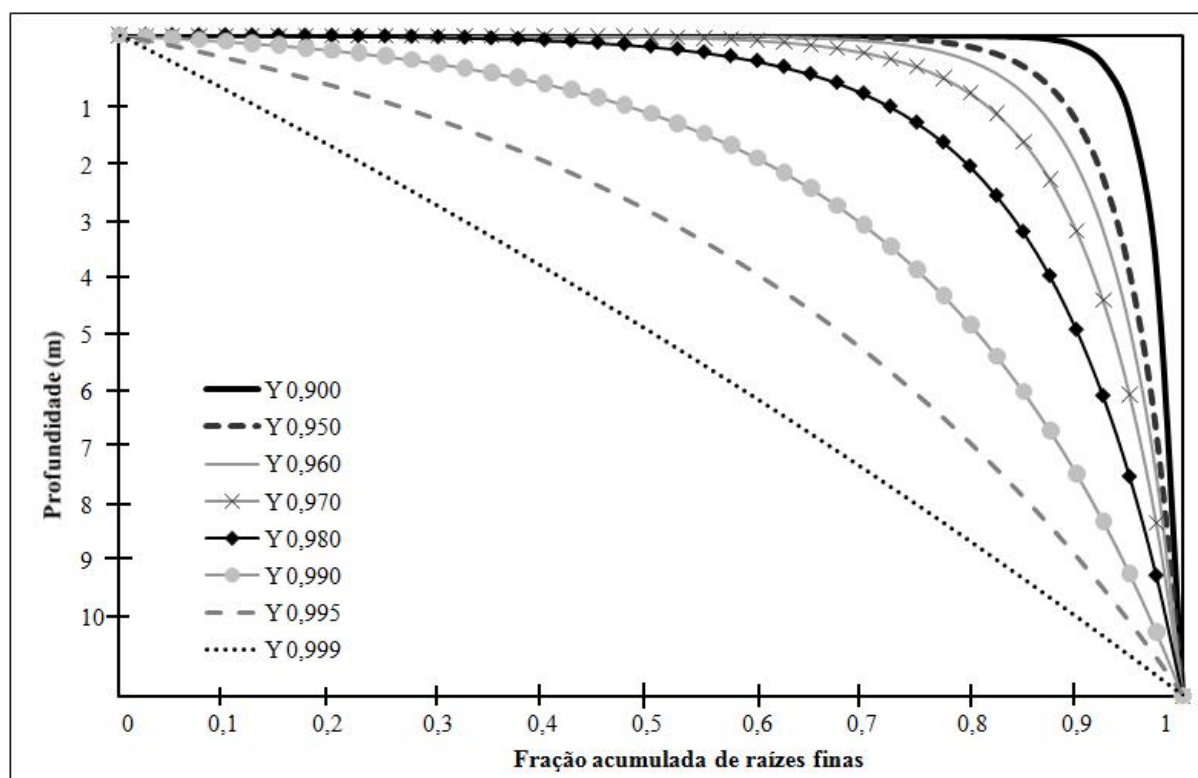


Figura 2.4 – Variação da fração acumulada de raízes finas (Y) com a profundidade do solo (m) para diversos valores de β_2 .

2.3.3 Profundidade de raiz

O IBIS utiliza uma formulação de multicamadas de solo para simular as variações diurnas e sazonais de calor e umidade do solo. As seis camadas de solo, inicialmente utilizadas pelo modelo, apresentam espessuras de 0,10; 0,15; 0,25; 0,50;

1,0 e 2,0 m, respectivamente, podendo ser modificadas (Figura 2.5). Para cada interação, cada camada é descrita em termos de temperatura do solo e conteúdo de água (POLLARD & THOMPSON, 1995; FOLEY et al., 1996). Para o modelo, quanto mais profundo e bem distribuído for o sistema radicular maior será a captura de água pelas raízes e menor será o estresse hídrico.

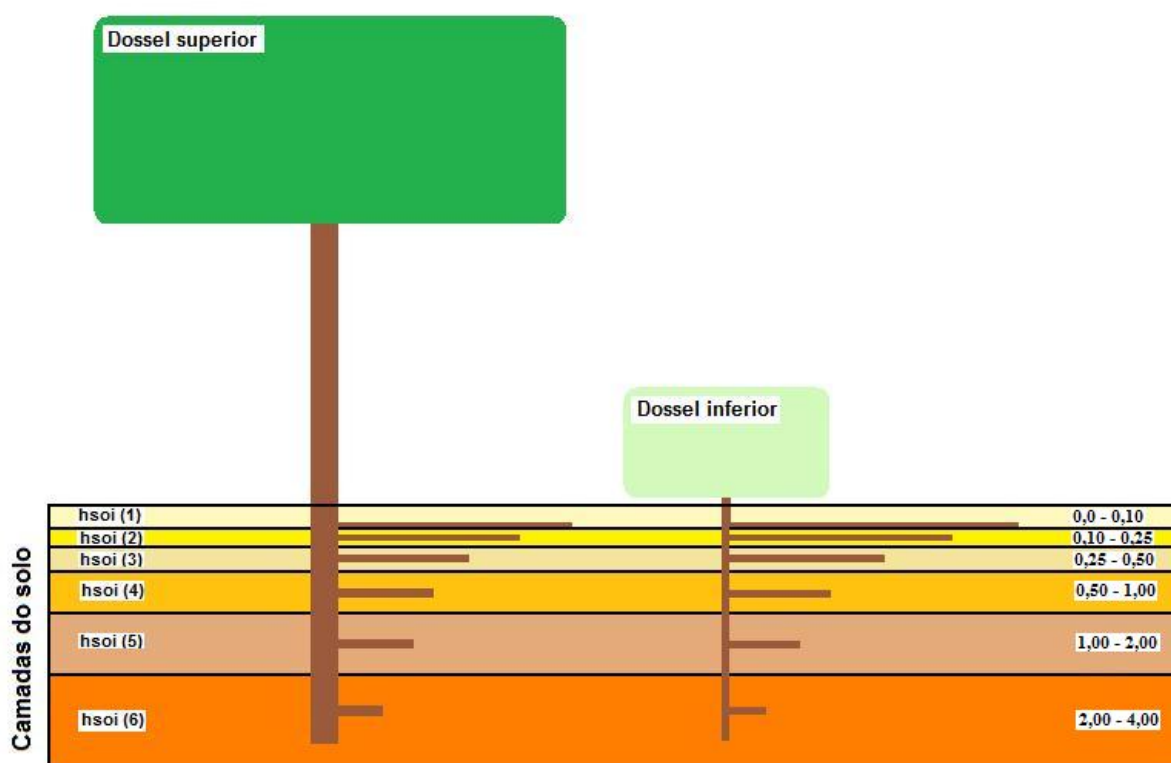


Figura 2.5 – Camadas de solo utilizada inicialmente pelo IBIS, 0,10; 0,15; 0,25; 0,5; 1 e 2 m.

2.3.4 Física do solo

O módulo de física do solo utiliza a equação de Richards (RICHARDS, 1931) para calcular a taxa de variação da umidade do solo com o tempo, com base na Equação de Darcy (Equação 13) e no princípio da conservação de massa, para calcular o fluxo vertical de água no solo (CAMPBELL & NORMAN, 1997). O balanço hídrico do solo é controlado pela taxa de infiltração, pela evaporação da água

na superfície do solo, pela transpiração proveniente das plantas e pela redistribuição de água no perfil do solo.

$$q = -K(\theta) \frac{\Delta\psi_t}{\Delta z} \quad \text{Eq. 13}$$

em que, q é o fluxo; $K(\theta)$ é a condutividade hidráulica em meio não saturado; ψ_t é o potencial total de água no solo; z é a profundidade e $\frac{\Delta\psi_t}{\Delta z}$ é o gradiente hidráulico.

2.3.5 Evapotranspiração

O IBIS trata a evapotranspiração total da superfície terrestre como a soma dos três fluxos de vapor d'água: a evaporação pela superfície do solo, a evaporação da água interceptada pelo dossel e a transpiração do dossel. Já as taxas de transpiração dependem da condutância do dossel e são calculadas de forma independente para cada tipo funcional de planta dentro do dossel. Para contabilizar a evaporação da precipitação interceptada pelo dossel o modelo descreve a interceptação e a cascata de precipitação (chuva e neve) através do dossel.

2.3.6 Fluxos de calor sensível e latente

O IBIS 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 (g_s): quanto maior g_s , maior será a fração LE/R_n .

Por sua vez, g_s depende principalmente da taxa líquida de assimilação de CO_2 , a qual é controlada pela APAR e por $V_{m\acute{a}x}$, o que inclui estressores térmicos e de umidade do solo (Eqs. 4 a 10). A_n é sensível principalmente aos parâmetros $V_{m\acute{a}x}$ e β_2 , enquanto g_s responde também ao parâmetro m . Em geral, quanto maior $V_{m\acute{a}x}$, maior será J_c , A_g , A_n , g_s e LE/R_n , desde que $J_c < J_e$. Seguindo o mesmo raciocínio, quanto maior β_2 , mais profundas as raízes, menor o estresse hídrico, maior $V_{m\acute{a}x}$, J_c , A_g , A_n , g_s e LE/R_n , novamente respeitada a condição $J_c < J_e$. E quanto maior m , maior g_s e LE/R_n . 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.

O IBIS estima PAR_{in} por meio da relação

$$\text{PAR}_{in} = 4,59 \cdot \eta \cdot S_{in} \quad \text{Eq. 14}$$

em que 4,59 é um fator de conversão de W m^{-2} para $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. Em todas as simulações, foi usado o valor $\eta = 0,46$, obtido da regressão linear entre os valores de PAR_{in} e S_{in} medidos no FNT-K83.

2.3.7 Propriedades físicas do solo

O IBIS utiliza dados de granulometria do solo (fração de areia, argila e silte) para determinar a classe textural e as propriedades físicas do solo do local estudado (RAWLS et al., 1992). Os valores representativos das propriedades físicas do solo, para cada tipo granulométrico, são retirados da tabela na sub-rotina de física do

solo do modelo. Os valores das propriedades físicas do solo desta tabela são apresentados na Tabela 2.1, onde são descritos os valores de fração de areia, silte e argila, porosidade (Poros), capacidade de campo (CC), ponto de murcha permanente (PMP), expoente “*b*” de Campbell’s (*b_{exp}*), potencial de entrada de ar (Ψ_0) e condutividade hidráulica saturada (K_s).

Tabela 2.1 – Dados de propriedades físicas dos solos utilizadas pelo IBIS (RAWLS et al., 1992).

Classe Textural	Areia %	Silte %	Argila %	Poros $m^3 m^{-3}$	CC $m^3 m^{-3}$	PMP $m^3 m^{-3}$	<i>b_{exp}</i>	Ψ_0 m_{H_2O}	K_s ms^{-1}
Areia	92	5	3	0,437	0,091	0,033	1,7	0,07	$5,833 \times 10^{-5}$
Areia Argilosa	81	12	7	0,437	0,125	0,055	2,1	0,09	$1,697 \times 10^{-5}$
Franco-Arenoso	65	25	10	0,453	0,207	0,095	3,1	0,15	$7,194 \times 10^{-6}$
Franco	42	40	18	0,463	0,270	0,117	4,5	0,11	$3,666 \times 10^{-6}$
Franco-Siltoso	20	65	15	0,501	0,330	0,133	4,7	0,21	$1,888 \times 10^{-6}$
Franco-Argilo-Arenoso	60	13	27	0,398	0,255	0,148	4,0	0,28	$1,194 \times 10^{-6}$
Franco-Argiloso	32	34	34	0,464	0,318	0,197	5,2	0,26	$6,388 \times 10^{-7}$
Franco-Argilo-Siltoso	9	58	33	0,471	0,366	0,208	6,6	0,33	$4,166 \times 10^{-7}$
Argila Arenosa	53	7	40	0,430	0,339	0,239	6,0	0,29	$3,333 \times 10^{-7}$
Argila Siltosa	10	45	45	0,479	0,387	0,250	7,9	0,34	$2,500 \times 10^{-7}$
Argila	20	20	60	0,475	0,396	0,272	7,6	0,37	$1,666 \times 10^{-7}$

2.4 ANÁLISE DE SENSIBILIDADE DO MODELO

Antes de iniciar o processo de calibração foi realizada uma análise de sensibilidade do IBIS aos parâmetros Z_R e β_2 . Para a análise de sensibilidade foram feitas simulações cobrindo uma ampla faixa de variação destes dois parâmetros, comparando o comportamento do erro absoluto médio (*MAE*), do viés máximo ($B_{máx}$) e

da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R e β_2 .

2.5 DESCRIÇÃO DA METODOLOGIA E DAS SIMULAÇÕES

A metodologia consiste em otimizar o fluxo de calor latente (LE) simulado pelo IBIS em função de diferentes valores de profundidade máxima do sistema radicular (Z_R) e do parâmetro de distribuição vertical de raízes finas (β_2). Embora a estimativa de parâmetros de modelos seja trivial na literatura (CHEN et al., 1997; PITMAN et al., 1999; SLATER et al., 2001; HOGUE et al., 2004; DUAN et al., 2006), o diferencial deste trabalho é o uso de condições de contorno com diferentes níveis de incertezas. As diferentes condições de contorno são associadas às propriedades físicas do solo.

Em um modelo de micrometeorologia de ecossistemas, o sub-modelo de fluxo de energia e massa no solo, que simula o transporte de calor e água no solo, necessita de parâmetros que representem as diversas propriedades físicas do solo (porosidade, condutividade hidráulica saturada, capacidade de campo, ponto de murcha permanente e o potencial de saturação, entre outras). Esses modelos são projetados para aplicações globais, onde esses parâmetros são normalmente obtidos através de relações empíricas, que os relacionam com propriedades facilmente mensuráveis do solo, como granulometria (COSBY et al., 1984, TOMASELLA e HODNETT, 1996, DELIRE et al., 1997).

Neste trabalho, as simulações realizadas pelo IBIS são organizadas em três grupos, de acordo com os diferentes tipos de dados de solos e condições de

contorno, com diferentes níveis de incerteza. Nos três grupos, o LE é otimizado para os valores de Z_R variando entre 2 e 10 m, e para os valores de β_2 variando entre 0,950 e 0,999. Os valores de Z_R e β_2 que minimizam a função objetivo de avaliação são comparados com os valores observados, conforme descrito na Seção 2.6. Os dados utilizados nos três grupos de simulações foram coletados na Floresta Nacional do Tapajós km 83 (FNT-K83) e compreende ao período de julho de 2000 a março de 2001.

O “*spin-up*” refere-se ao período de tempo necessário para determinado processo, representado pelo modelo, atingir o equilíbrio. Nos três grupos de simulações, utilizou-se o mesmo procedimento de “*spin-up*” que correspondeu a oito anos de simulações, com a repetição dos dados de entrada do modelo. Para fins de análises foi considerado apenas o último ano de simulação, onde ocorreu o equilíbrio da umidade do solo.

Esse processo visa os dados de entrada do modelo foram quaduplicados, correspondendo a quatro anos de dados de entrada para a simulação, mas para as análises foi considerado o último ano de simulação.

Em todos os três grupos, testou-se diferentes combinações de Z_R e β_2 . Os valores de Z_R e β_2 que otimizam LE foram determinados por intermédio da minimização dos erros entre as simulações de LE descritas nas próximas Seções (2.5.1), (2.5.2) e (2.5.3) e as observações, conforme descrito na Seção 2.6.

2.5.1 Primeiro grupo

No primeiro grupo, são realizadas simulações utilizando dados das propriedades físicas do solo estimadas através de um banco de dados global de granulometria dos solos (RAWLS et al., 1992), por meio de tabelas de valores representativos das propriedades físicas do solo para cada tipo granulométrico (CAMPBELL & NORMAN, 1997). Nestas simulações, o modelo opera no modo normal, necessitando apenas dos valores de granulometria do solo correspondente ao pixel da torre micrometeorológica, para definir as propriedades físicas do solo na sub-rotina de física do solo do modelo. Neste grupo de simulações, a incerteza é maior. Apesar disso, esta metodologia pode ser usada em qualquer sítio da FLUXNET.

Na Tabela 2.2 são apresentados os valores das propriedades físicas do solo para o pixel da torre da FNT-K83 utilizadas para as simulações do primeiro grupo. Os valores de granulometria do solo referentes ao solo da FNT-K83, utilizados nestas simulações, foram retirados do protocolo (versão 3.0-outubro de 2008) do Projeto de Intercomparação de Modelos na Amazônia (LBA-DMIP) e os demais dados de propriedade física do solo de CAMPBELL & NORMAN, 1997.

Tabela 2.2 - Valores representativos das propriedades físicas do solo inicialmente utilizados pelo IBIS. 1º GRUPO.

Propriedades Físicas do solo – 1º GRUPO	
Fração de Areia	52%
Fração de Argila	42%
Porosidade ($m^3 m^{-3}$)	0,510
Capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$)	0,339
Ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$)	0,239
Expoente “b” de Campbell	6,0
Potencial de entrada de ar (m_{H_2O})	0,29
Condutividade hidráulica saturada (ms^{-1})	$3,33 \times 10^{-7}$

2.5.2 Segundo grupo

No segundo caso, o modelo utiliza parâmetros de solo obtidos localmente pela determinação da curva de retenção de água no solo, além das observações de granulometria, porosidade e condutividade hidráulica saturada realizadas por NEPSTAD *et al.* (2002), BRUNO *et al.* (2006) e BELK & MARKEWITZ (2008) a partir de amostra coletada na FNT-K83 (Tabela 2.2). Nestas simulações, os valores dos parâmetros de solo, obtidos através da determinação da curva de retenção de água no solo, são adicionados na tabela com os valores das propriedades físicas do solo na sub-rotina de física do solo do IBIS para simular LE.

Neste caso, a incerteza é reduzida, pois as propriedades físicas do solo são determinadas localmente. Restam ainda outras incertezas, como as relacionadas à heterogeneidade das propriedades físicas. Apesar de menos incerta, esta metodologia pode ser usada apenas nos sítios da FLUXNET onde a curva de retenção de umidade do solo e demais parâmetros de solo forem obtidos localmente.

Na Tabela 2.3 são apresentados os valores das propriedades físicas do solo obtidas localmente para o pixel da torre da FNT-K83, através da determinação da curva de retenção de água no solo e de estimativas, utilizadas nas simulações do segundo grupo.

Tabela 2.3- Valores representativos das propriedades físicas do solo obtidos no sítio experimental FNT-K83. **2º GRUPO.**

Propriedades Físicas do solo – 2º GRUPO	
Fração de Areia	38%
Fração de Argila	60%
Porosidade ($m^3 m^{-3}$)	0,590
Capacidade de campo ($m^3 m^{-3}$)	0,501
Ponto de murcha permanente ($m^3 m^{-3}$)	0,382
Expoente “b” de Campbell	6,1
Potencial de entrada de ar (m_{H_2O})	0,38
Condutividade hidráulica saturada (ms^{-1})	$6,00 \times 10^{-7}$

2.5.3 Terceiro grupo

No terceiro caso, o modelo simula LE forçando as condições de solo com dados observados de temperatura e umidade do solo, medidos no sítio experimental FNT-K83. Para este grupo de simulações, além das variáveis S_{in} , L_{in} , T_a , q_r , u_a e P utilizadas para forçar o modelo, foram adicionadas mais 12 colunas de dados com os valores da umidade (q_s) e da temperatura do solo (T_s) para as seis camadas de solo do modelo. No arquivo *ibis.infile* do IBIS são disponibilizadas as configurações complementares para simulação, a configuração *isoilforc* apresenta duas opções que determinam se o modelo vai simular a física do solo de forma dinâmica ou forçada. No caso do terceiro grupo, o IBIS utilizou a opção de física do solo forçada, utilizando dados observados de temperatura e umidade no perfil do solo para assimilar as condições iniciais de solo do modelo. Já para as simulações do primeiro e segundo grupos, o IBIS utilizou a opção de física do solo dinâmica, já que umidade do solo foi determinada pelas propriedades do solo descritas na tabela da sub-rotina de física do solo do modelo (ver Tabelas 2.2 e 2.3).

No terceiro caso, a incerteza é menor, pois são utilizados dados reais de umidade do solo. Apesar de fornecer estimativas com uma incerteza mínima, a aplicação desta metodologia é restrita aos poucos sítios onde dados horários de umidade e temperatura do solo foram coletados.

2.5.4 Análise das incertezas introduzidas pelas diferentes condições de contorno associadas às propriedades físicas do solo

O diferencial deste trabalho é o uso de condições de contorno, associadas às propriedades físicas do solo, com diferentes níveis de incertezas. Os dados de propriedades físicas do solo, utilizados neste trabalho, foram obtidos de diferentes fontes de dados: do banco de dados global de granulometria dos solos, de amostras de solo e dos dados observados de temperatura e umidade do solo, todos representativos do pixel da torre micrometeorológica da FNT-K83.

Nesta seção, as incertezas introduzidas pelas diferentes condições de contorno associadas às propriedades físicas do solo são avaliadas. As próximas seções descrevem: (a) incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente e (b) incertezas introduzidas por diferentes granulometrias do solo.

(a) Incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente

As incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente são avaliadas pela diferença entre as simulações do primeiro grupo (2.5.1) e do segundo grupo (2.5.2).

(b) Incertezas introduzidas por diferentes valores de granulometria do solo

Os valores de granulometria do solo utilizados para a realização das simulações do primeiro grupo (2.5.1) foram retirados do Protocolo do LBA-DMIP (versão 3.0-outubro de 2008), os valores de granulometria correspondem a 52% de

areia, 42% de argila e 6% de silte. Em fevereiro de 2010 foi disponibilizada uma nova versão do Protocolo do LBA-DMIP (versão 4.0-fevereiro de 2010) com novos valores de granulometria do solo encontrados em KELLER *et al.* (2005) para FNT-K83, estes novos valores de granulometria correspondem a 18% de areia, 80% de argila e 2% de silte. A diferença entre os valores de granulometria do solo encontrados nas duas versões do Protocolo do LBA-DMIP motivaram a análise das incertezas introduzidas pelos tipos de granulometria do solo utilizados nas simulações.

Para a realização destas análises, uma nova simulação foi realizada utilizando os mesmos parâmetros das simulações do primeiro grupo (2.5.1), porém com os novos valores de granulometria do solo da nova versão do Protocolo. As incertezas introduzidas pelo tipo de granulometria do solo são mostradas pela diferença entre a nova simulação (18% de areia, 80% de argila e 2% de silte) e a simulação do primeiro grupo (2.5.1).

2.6 ESTRATÉGIA DE OTIMIZAÇÃO

A solução para problemas de otimização é obtida pela minimização da função objetivo, que pode ser representada pela seguinte forma:

$$\min_{\theta \in \Theta} F(\theta) = \{f_1(\theta), f_2(\theta), \dots\}, \quad \text{Eq. 15}$$

em que, $F(\theta)$ é a função objetivo a ser minimizada, θ são os parâmetros do modelo a serem otimizados e Θ é o espaço factível dos parâmetros e f_i são as diversas medidas de ajuste do modelo, sendo $i \geq 1$.

As funções de medida de ajuste utilizadas são o erro absoluto médio (MAE) e o viés máximo ($B_{máx}$) entre os valores cumulativos observado (O) e simulado (S), descritos nas equações (16) e (17).

$$MAE = n^{-1} \sum_{i=1}^n |S_i - O_i| \quad \text{Eq. 16}$$

$$B_{máx} = \max_{j=1, \dots, n} \left[\sum_{i=1}^j (S_i - O_i) \right] \quad \text{Eq. 17}$$

em que, $O_i = LE_{obs,i}$ e $S_i = LE_{sim,i}$.

O MAE foi escolhido como medida de ajuste por não ser uma medida ambígua (representa apenas o erro médio entre os valores S e O) e por expressar o erro nas mesmas dimensões da variável em questão (LE). Já o $B_{máx}$ foi escolhido por ser um valor cumulativo capaz de identificar, pelo acúmulo de informações, pequenas mudanças na distribuição dos dados. Esta medida de ajuste indica o maior erro acumulado entre os valores S e O .

Combinando as duas medidas de ajuste (MAE e $B_{máx}$), em uma única função objetivo, tem-se:

$$F(Z_R, \beta_2) = \{w_1 \cdot MAE + w_2 \cdot B_{máx}\}, \quad \text{Eq. 18}$$

sendo $w_1 = w_2 = 0,5$ o peso dado para MAE e $B_{máx}$. Apesar do MAE expressar o erro nas mesmas dimensões de LE ($W \text{ m}^{-2}$), para o cálculo da função objetivo, as medidas de ajuste (MAE e $B_{máx}$) foram normalizadas na mesma unidade ($MJ \text{ m}^{-2}$), mas para

critério de visualização nos gráficos o MAE está em $W\ m^{-2}$ e $B_{máx}$ em $MJ\ m^{-2}$ (Seção 3.1).

Este trabalho utiliza o método do gradiente (HESTENES & STIEFEL, 1952) para a tarefa de otimizar a função $F(Z_R, \beta_2)$. Este método envolve movimentos de pequenos passos na direção do gradiente que irá reduzir o valor da função a cada iteração. Ele foi escolhido por ser um dos métodos mais conhecidos para minimização de uma função de várias variáveis e por ser conceitualmente simples, além de garantir convergência.

A desvantagem do método do gradiente é que ele pode convergir para um mínimo local antes que o mínimo global seja atingido. Para maximizar a possibilidade que o mínimo encontrado seja realmente o mínimo global e não um mínimo regional, o processo de busca parte de quatro valores iniciais: $(Z_{Rmín}, \beta_{2mín})$, $(Z_{Rmín}, \beta_{2máx})$, $(Z_{Rmáx}, \beta_{2mín})$ e $(Z_{Rmáx}, \beta_{2máx})$, onde $Z_{Rmín} = 2\ m$; $Z_{Rmáx} = 10\ m$; $\beta_{2mín} = 0,950$ e $\beta_{2máx} = 0,999$.

Os valores de Z_R e β_2 são normalizados conforme as equações a seguir:

$$Z^\alpha = \frac{Z_R - Z_{Rmín}}{Z_{Rmáx} - Z_{Rmín}} \quad \text{Eq. 19}$$

$$\beta^\alpha = \frac{\ln \beta_2 - \ln \beta_{2mín}}{\ln \beta_{2máx} - \ln \beta_{2mín}} \quad \text{Eq. 20}$$

Durante o processo de otimização, no segundo grupo de simulações (seção 2.5.2), foi necessário utilizar valores de Z_R maiores do que $Z_{Rmáx}$ (10 m), neste

caso ($Z_R > Z_{R\text{máx}}$) temos $Z^\alpha > 1$. Para as outras condições de Z_R temos: se $Z_R = Z_{R\text{máx}}$ logo $Z^\alpha = 1$; se $Z_R < Z_{R\text{mín}}$ logo $Z^\alpha = 0$; e se $Z_R < Z_{R\text{máx}}$ logo $Z^\alpha < 1$ (Equação 19). No caso de β_2 não foi preciso utilizar valores maiores do que $\beta_{2\text{máx}}$ (0,999), logo as condições de β_2 são: se $\beta_2 = \beta_{2\text{máx}}$ logo $\beta^\alpha = 1$; se $\beta_2 < \beta_{2\text{mín}}$ logo $\beta^\alpha = 0$; e se $\beta_2 < \beta_{2\text{máx}}$ logo $\beta^\alpha < 1$ (Equação 20). Como os valores de Z_R maiores do que $Z_{R\text{máx}}$ (10 m) só ocorreram quando β_2 foi igual a $\beta_{2\text{máx}}$ (0,999) os valores das equações 20 e 21 não foram afetados, já que para $Z_R > Z_{R\text{máx}}$ o $Z^\alpha > 1$ e para $\beta_2 = \beta_{2\text{máx}}$ o $\beta^\alpha = 1$.

Partindo dos quatro pares coordenados iniciais ($Z_0^\alpha, \beta_0^\alpha$), o método do gradiente move um passo α_i na direção d_i ao vetor gradiente para convergir para o ponto de mínimo. Assim, a cada iteração deste método, a solução é dada por:

$$Z_{i+1}^\alpha = Z_i^\alpha + \alpha \left(\frac{\partial F}{\partial Z^\alpha} \right)_i \quad \text{Eq. 21}$$

$$\beta_{i+1}^\alpha = \beta_i^\alpha + \alpha \left(\frac{\partial F}{\partial \beta^\alpha} \right)_i, \quad \text{Eq. 22}$$

em que, α é o tamanho do passo a ser dado, que foi escolhido de modo que não seja nem muito grande e nem muito pequeno, pois um incremento muito grande poderia ultrapassar o mínimo da função, e um incremento muito pequeno poderia resultar em um tempo de convergência muito grande. Inicialmente, foi usado $\alpha = 0,1$, mas outros valores menores foram utilizados ($\alpha = 0,05$ e $\alpha = 0,025$) visando um ajuste mais fino. As equações (21) e (22) são resolvidas iterativamente até que $[F(\theta)_{i+1} - F(\theta)_i] < \varepsilon$, onde $\varepsilon = 0,03$.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo, serão apresentados e discutidos os resultados das análises de sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R e β_2 (Seção 3.1); os resultados da calibração do IBIS para os parâmetros Z_R e β_2 utilizando três tipos de dados de solo (Seção 3.2); e os erros introduzidos na simulação do perfil de umidade do solo no IBIS pelas diferentes condições de contorno (Seção 3.3).

3.1 ANÁLISES DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS Z_R E β_2

3.1.1 Simulação utilizando banco de dados global de granulometria dos solos

(1º GRUPO)

3.1.1.1 Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R

As Figuras 3.1 a 3.3 apresentam a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , para a versão utilizando dados das propriedades físicas do solo estimadas através de um banco de dados global de granulometria dos solos (Seção 2.5.1).

A Figura 3.1 apresenta os valores da sensibilidade de diferentes valores de Z_R , fixando-se β_2 em 0,999, com os valores de MAE de LE. Esta figura mostra que os valores do MAE decrescem com o aumento de Z_R . Este comportamento do MAE indica que o modelo é sensível ao parâmetro Z_R . Os valores máximo e mínimo do MAE são encontrados quando Z_R é igual a 2 m e 15 m, respectivamente. Quanto maior a Z_R menor o MAE , este comportamento indica que o IBIS encontra valores de LE mais próximos do observado com valores maiores de Z_R para FNT-K83. Com isto, uma vez que o modelo utilize β_2 igual a 0,999 o Z_R otimizado é igual a 15 m.

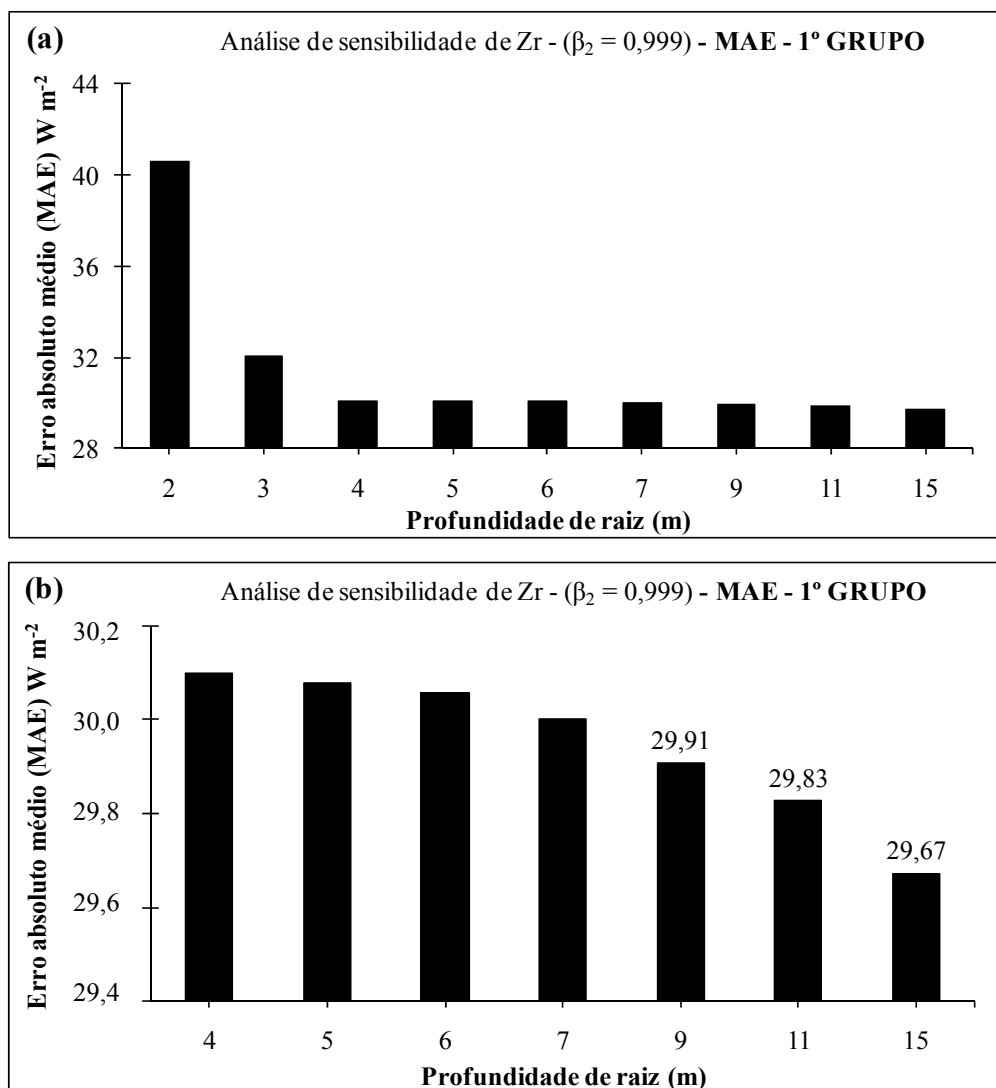


Figura 3.1 – (a) Análise de sensibilidade do erro absoluto médio (*MAE*) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), para FNT-K83; (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

Os valores de $B_{máx}$ de LE, para diferentes valores de Z_R com β_2 fixo em 0,999, são mostrados na Figura 3.2. A análise dos valores de $B_{máx}$, nesta figura, indica que o modelo é sensível ao parâmetro Z_R . A Figura 3.2(a) mostra que os valores de $B_{máx}$ decrescem com o aumento de Z_R , mas quando estes valores são observados numa escala menor (Figura 3.2(b)) pode-se observar que entre as profundidades de 4 m e 7 m o $B_{máx}$ estabiliza, mas depois de 7 m de profundidade o erro volta a aumentar. Este

comportamento indica que o modelo simula melhor LE quando β_2 é igual a 0,999 e Z_R se encontra entre 4 m e 7 m. Mas o valor mínimo do $B_{m\acute{a}x}$ é encontrado quando Z_R é igual a 4 m.

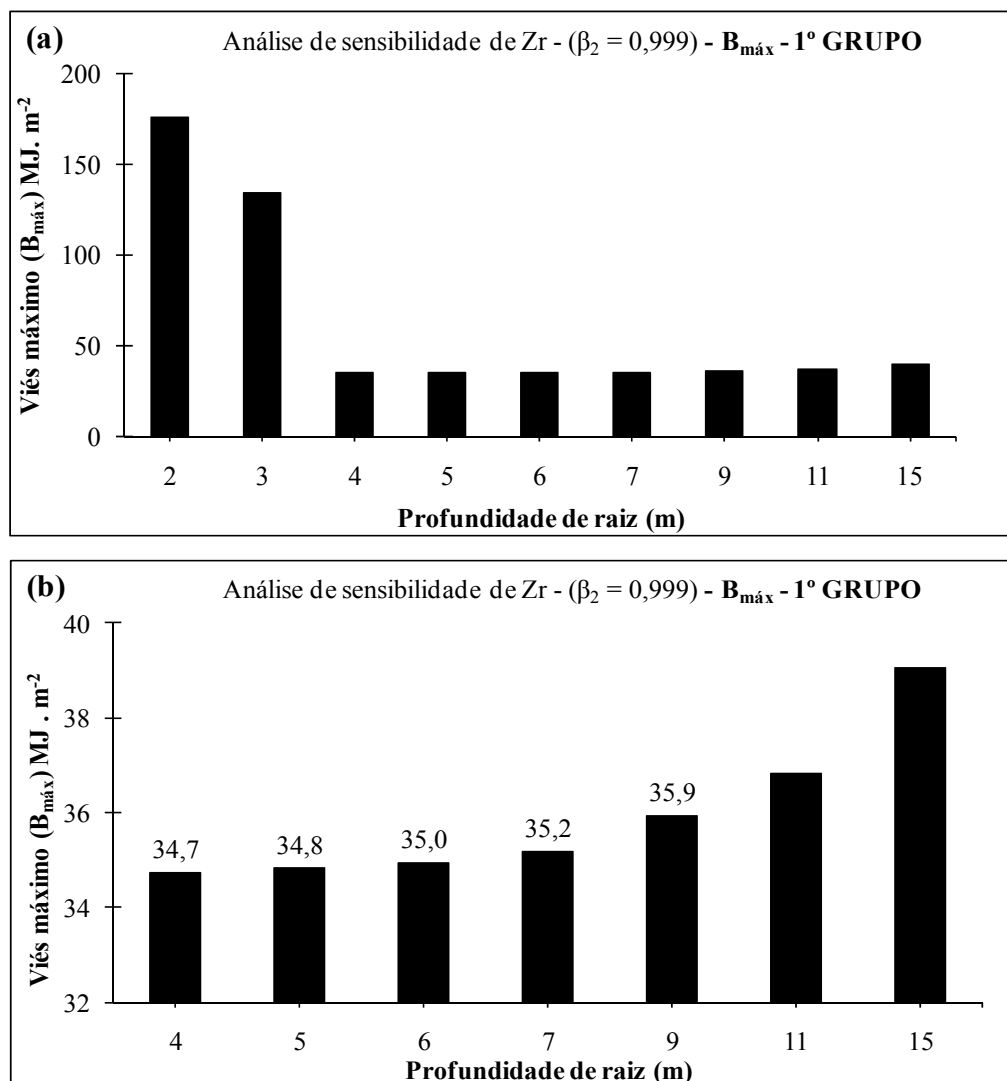


Figura 3.2 – (a) Análise de sensibilidade do viés máximo ($B_{m\acute{a}x}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), para FNT-K83; (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

A Figura 3.3 apresenta os valores da sensibilidade de diferentes valores de Z_R , fixando-se β_2 em 0,999, com os valores de $F(Z_R; \beta_2)$ de LE. Esta figura apresenta um

comportamento similar ao da análise de sensibilidade de $B_{máx}$ (Figura 3.2), onde os valores da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) diminui com o aumento de Z_R (Figura 3.3(a)) e após atingir Z_R entre 4 m e 7 m de profundidade o erro volta a aumentar. A análise também mostra que existe pouca variação nos valores de $F(Z_R, \beta_2)$ quando Z_R está entre 4 m e 7 m de profundidade, mas o menor valor de $F(Z_R, \beta_2)$ é encontrado quando Z_R é igual a 4 m.

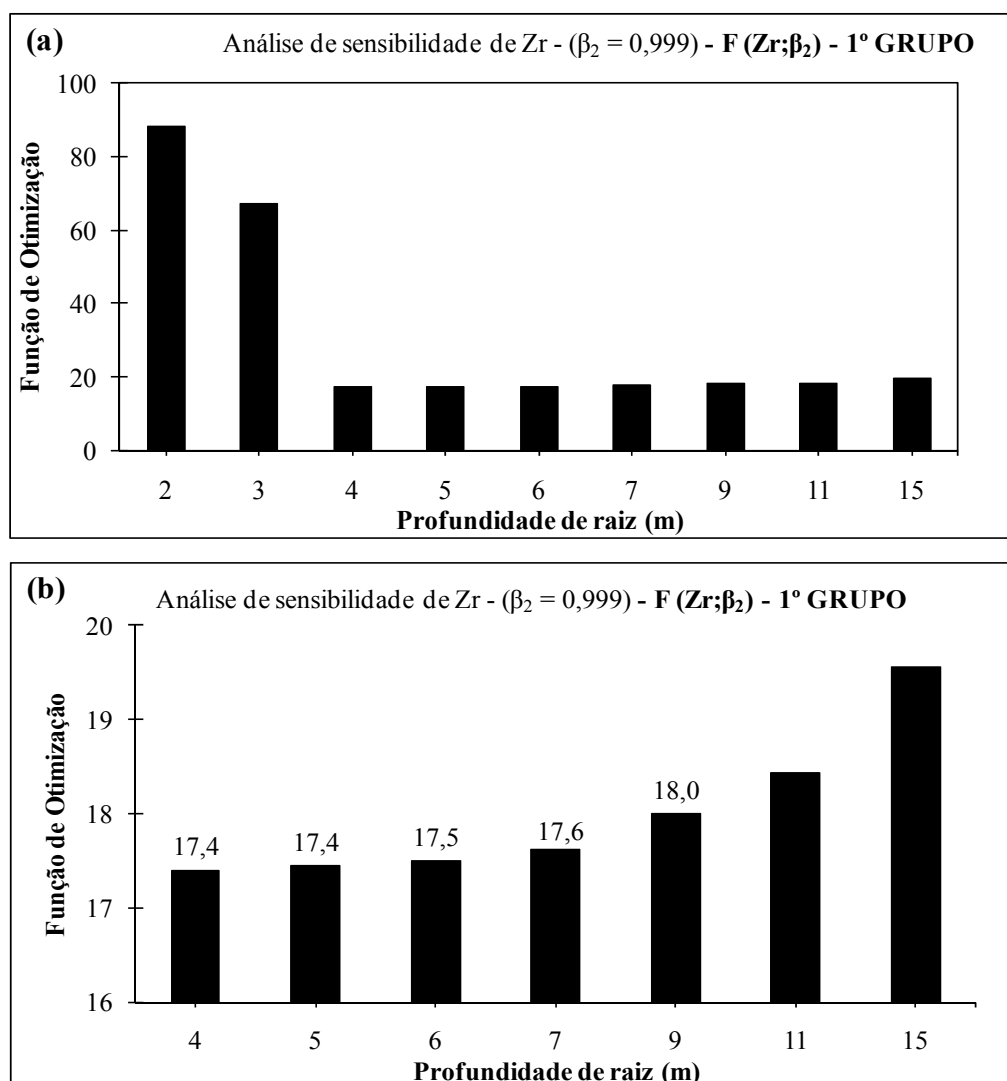


Figura 3.3 – (a) Análise de sensibilidade da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2) = w_1.MAE + w_2.B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), para FNT-K83; (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro Z_R , para a simulação utilizando banco de dados global de granulometria dos solos, mostra que o menor valor de MAE ($29,7 \text{ W m}^{-2}$) é encontrado quando Z_R é igual a 15 m, enquanto o menor valor de $B_{máx}$ ($34,7 \text{ MJ m}^{-2}$) é encontrado em Z_R igual a 15 m e os menores valores da F (17,4) são encontrados quando Z_R é igual a 4 e 5 m.

3.1.1.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2

A Figura 3.4 apresenta a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , para a versão utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo. A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro β_2 , para a simulação utilizando banco de dados global de granulometria dos solos, mostra que os valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R; \beta_2)$ diminuem com o aumento de β_2 . Este comportamento indica que a melhor simulação do modelo ocorre quando β_2 é igual a 0,999.

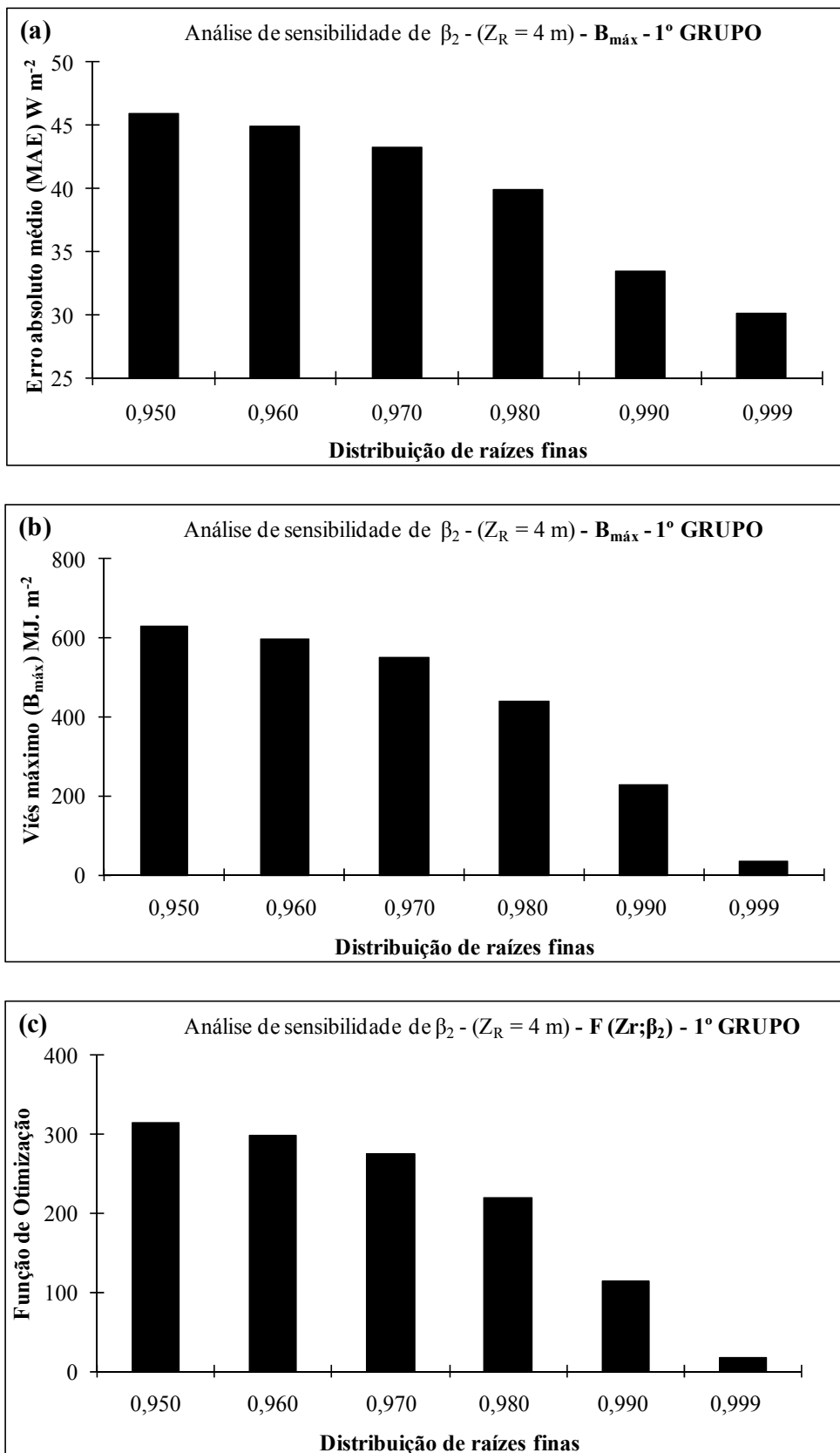


Figura 3.4 – (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da

variação de β_2 , utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (**1º GRUPO**), para FNT-K83; (b) é o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

3.1.2. Simulação utilizando parâmetros obtidos por meio de amostras de solo

(2º GRUPO)

3.1.2.1. Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R

As Figuras 3.5 a 3.7 apresentam a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , para a versão que utiliza parâmetros de propriedade física do solo obtidos através de amostras de solo coletadas localmente - **2º GRUPO** (Seção 2.5.2).

A Figura 3.5 apresenta os valores da sensibilidade de MAE de LE em função de diferentes valores de Z_R , fixando-se β_2 em 0,999. A análise dos valores de MAE indica que o modelo é sensível ao parâmetro Z_R , principalmente entre Z_R igual a 2 m e 4 m, mas a partir de Z_R igual a 6 m, a sensibilidade do modelo diminui (Figura 3.5(b)). Mesmo com pouca sensibilidade a Z_R nestas profundidades, o valor de MAE mínimo ($29,2 \text{ Wm}^{-2}$), pode ser encontrado em Z_R igual a 34 m. Este comportamento indica que maiores Z_R apresentam menores MAE , com isto, a análise de sensibilidade de MAE indica que o modelo gera simulações com menor erro quando utiliza Z_R igual a 34 m.

No processo de otimização o valor máximo previsto para Z_R foi de dez metros (Seção 2.6), mas à medida que o processo de otimização foi sendo realizado foi observado que os valores de MAE continuavam diminuindo com o aumento de Z_R . Estes valores continuaram caindo mesmo após o valor máximo previsto para Z_R , dez metros.

Neste caso, foi necessário continuar realizando o processo de otimização até que valor do *MAE* estabilizasse ou variasse na ordem de uma casa decimal.

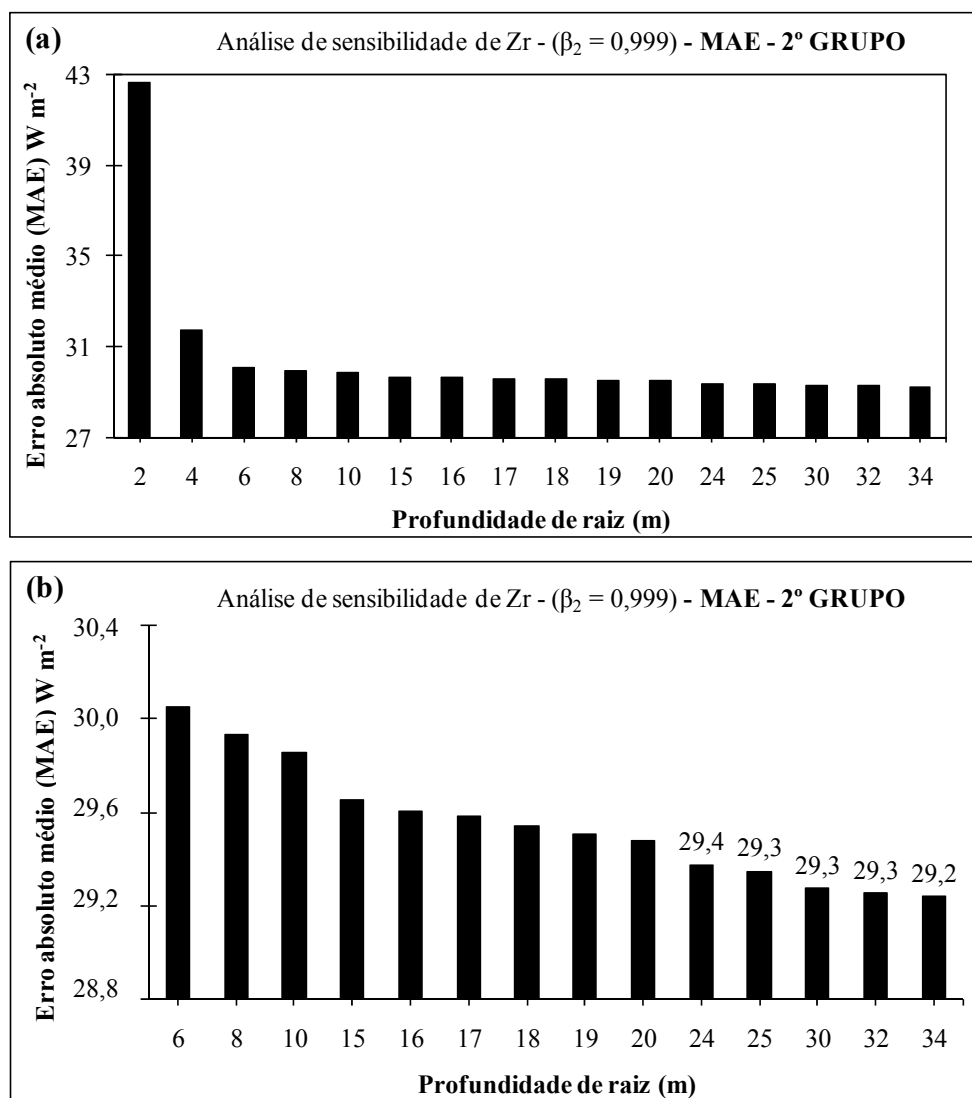


Figura 3.5 – (a) Análise de sensibilidade do erro absoluto médio (*MAE*) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (2º GRUPO); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

Os valores de $B_{máx}$ de LE, para diferentes valores de Z_R com β_2 fixo em 0,999, são mostrados nas Figuras 3.6. Esta figura mostra que o valor máximo de $B_{máx}$

(501,2 MJ m⁻²) é atingido quando Z_R é igual a 2 m, enquanto que o valor de $B_{máx}$ mínimo (36,9 MJ m⁻²) é encontrado quando Z_R é igual a 30 m (Figura 3.6(b)). A análise dos valores de $B_{máx}$ indica que o modelo é sensível ao parâmetro Z_R . A Figura 3.6(a) mostra que o valor de $B_{máx}$ diminui com o aumento de Z_R , mas quando observamos estes valores numa escala menor (Figura 3.6(b)) podemos observar que após atingir a profundidade de raiz de 30 m o erro volta a aumentar, este comportamento indica que o menor $B_{máx}$ ocorre quando Z_R é igual a 30 m.

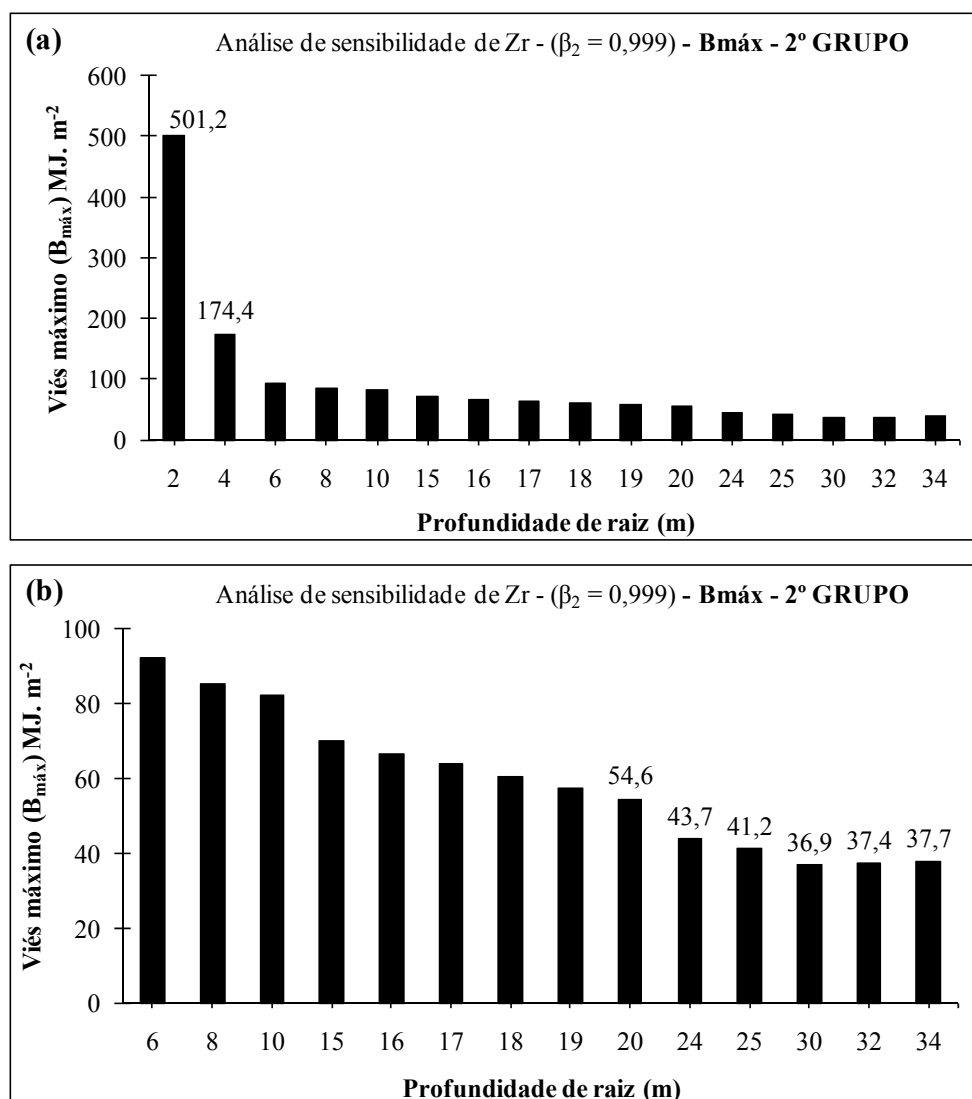


Figura 3.6 – (a) Análise de sensibilidade do viés máximo ($B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando

parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (**2º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

A Figura 3.7 apresentam os valores da sensibilidade de $F(Z_R, \beta_2)$ de LE a diferentes valores de Z_R , fixando-se β_2 em 0,999. Esta figura mostra comportamento semelhante ao da análise de sensibilidade de $B_{máx}$ (Figura 3.6), porém com os valores da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) máximo (250,6) e mínimo (18,5) ocorrendo quando Z_R é igual a 2 m e 30 m, respectivamente. A análise dos valores de $F(Z_R, \beta_2)$ indica que o modelo é sensível ao parâmetro Z_R e que o valor de $F(Z_R, \beta_2)$ decresce com o aumento de Z_R , mas quando Z_R passa de 30 m os valores de $F(Z_R, \beta_2)$ voltam a crescer (Figura 3.7(b)). Com isto, o valor que minimiza $F(Z_R, \beta_2)$ é Z_R igual a 30 m.

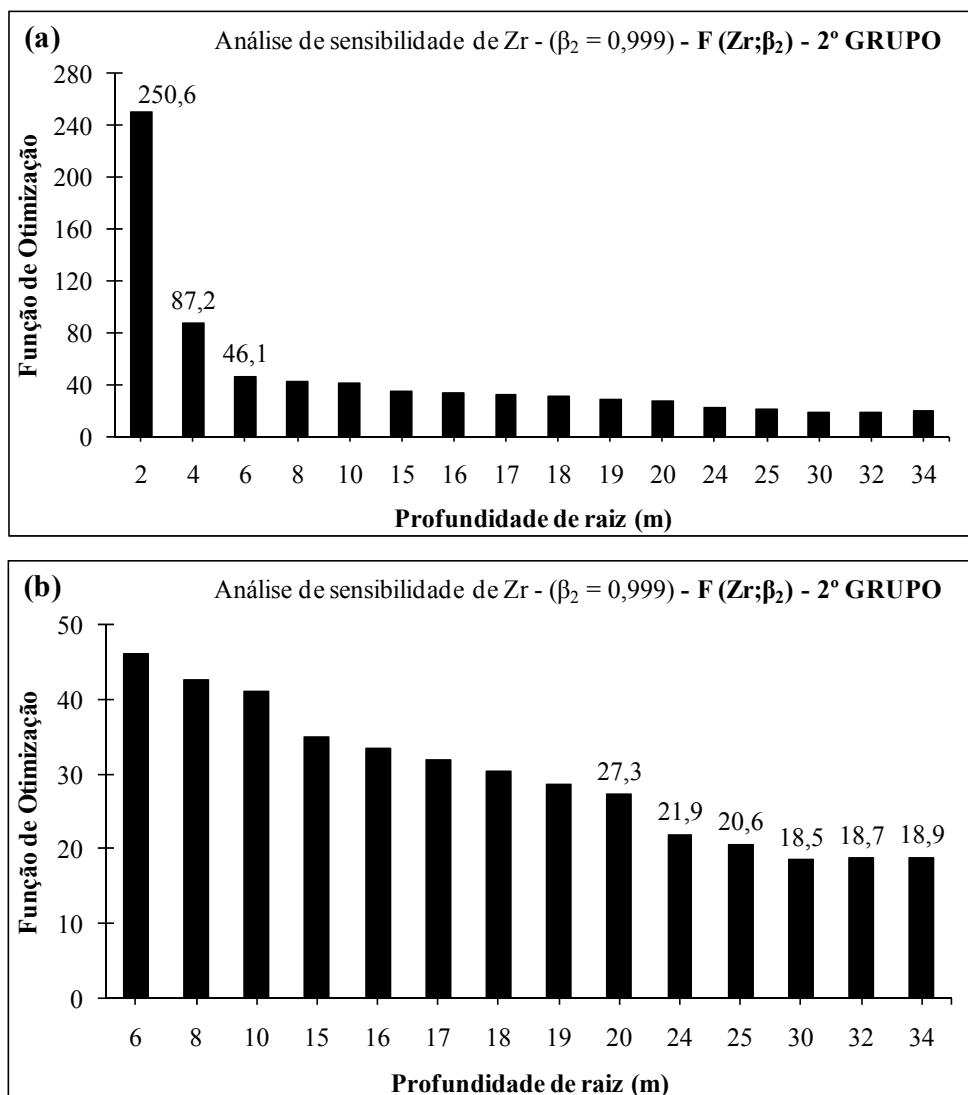


Figura 3.7 – (a) Análise de sensibilidade da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2) = w_1 \cdot MAE + w_2 \cdot B_{máx}$) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83 (2º GRUPO); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

Em resumo, a análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro Z_R , para a simulação utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo, mostra que o menor valor de MAE , ($29,2 \text{ W m}^{-2}$), é encontrado quando Z_R é igual a 34 m, já os menores valores de $B_{máx}$, (20502 W m^{-2}), e $F(Z_R, \beta_2)$, ($24,89$), encontra-se quando Z_R é igual a 30 m.

3.1.2.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2

As Figuras 3.8 (a) a (c) apresentam a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , para a versão que utiliza parâmetros obtidos através de amostras de solo. A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro β_2 mostra o mesmo comportamento da análise de sensibilidade das simulações que utilizaram o banco de dados global de granulometria dos solos (Figuras 3.4), com valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R;\beta_2)$ diminuindo com o aumento de β_2 . Mais uma vez indicando que os menores erros (MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R;\beta_2)$) ocorrem quando β_2 é igual a 0,999.

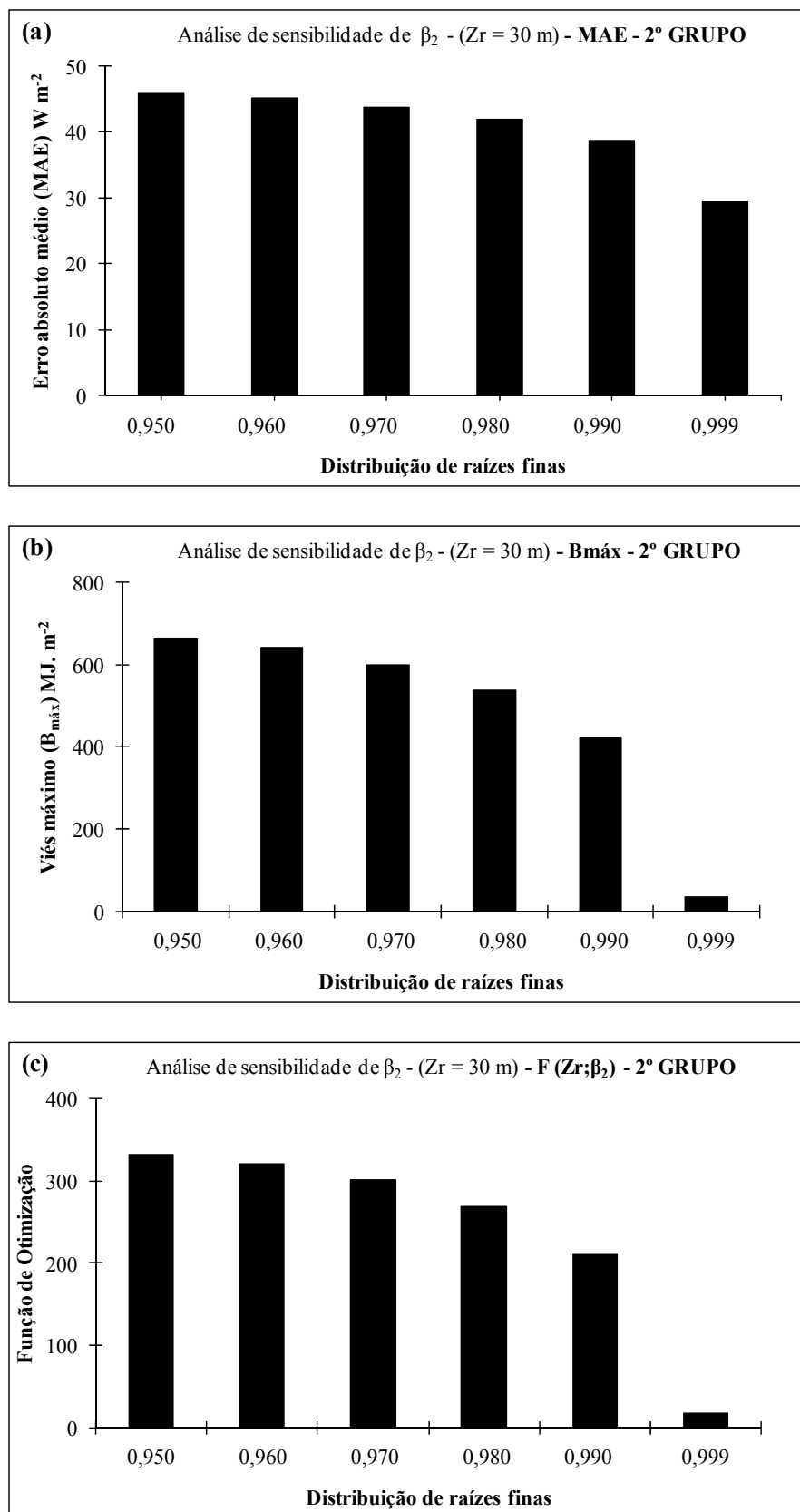


Figura 3.8 – (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo

coletadas na FNT-K83 (**2º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

3.1.3. Simulação utilizando dados observados de umidade e temperatura do solo

3.1.3.1. Análise de sensibilidade ao parâmetro Z_R

As Figuras 3.9(a) a (c) apresentam a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , para a versão que utiliza dados de umidade e temperatura do solo medidos na FNT-K83 para forçar a física do solo do modelo (Seção 2.5.3). A análise mostra que o modelo é sensível a Z_R e que os erros (MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R; \beta_2)$) de maneira geral diminuem com o aumento de Z_R e que os valores mínimos destes erros são encontrados quando Z_R encontra-se entre 2,8 m a 3 m, valor este que corresponde a profundidade máxima que foram realizadas as medições de umidade e temperatura do solo.

Os dados de umidade e temperatura do solo, utilizados para forçar a física do solo do modelo, foram coletados no perfil de solo a uma profundidade máxima de três metros. Por isto, para a realização desta análise de sensibilidade os valores de Z_R só variaram no intervalo até três metros de profundidade, visto que valores superiores a estes seriam considerados inconsistentes, já que as medições foram realizadas até três metros de profundidade.

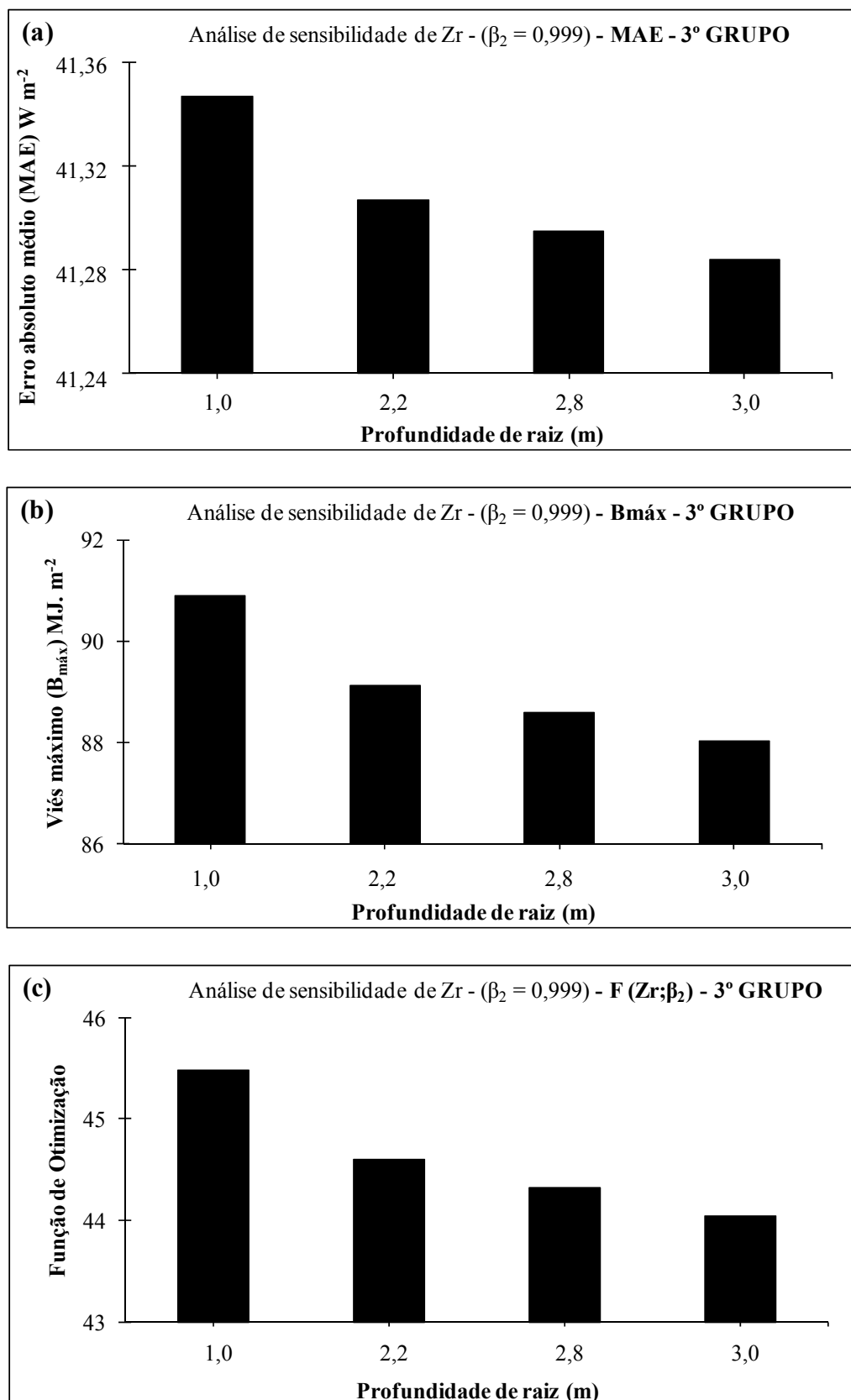


Figura 3.9 – (a) Análise de sensibilidade de MAE (a), $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de Z_R , utilizando dados de umidade e temperatura do solo

observadas na FNT-K83 (**3º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

3.1.3.2. Análise de sensibilidade ao parâmetro β_2

As Figuras 3.10(a) a (c) apresentam a sensibilidade do erro absoluto médio (MAE), do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os dados observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , para a versão utilizando dados de umidade e temperatura do solo medidos na FNT-K83. A análise mostra que as variações dos valores de β_2 não influenciam os valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R;\beta_2)$, este comportamento indica que nesta configuração o modelo não é sensível a β_2 .

Quando o IBIS é alimentado com dados observados de umidade e temperatura do solo, as linhas do código que calculam os valores de temperatura e umidade do solo, na sub-rotina de física do solo do modelo, são comentadas. Com isto, o modelo não depende mais da distribuição do perfil de raízes finas, β_2 , para quantificar a disponibilidade de água no solo para o processo de evapotranspiração (evaporação pela superfície e transpiração das plantas) e conseqüentemente para o cálculo de LE .

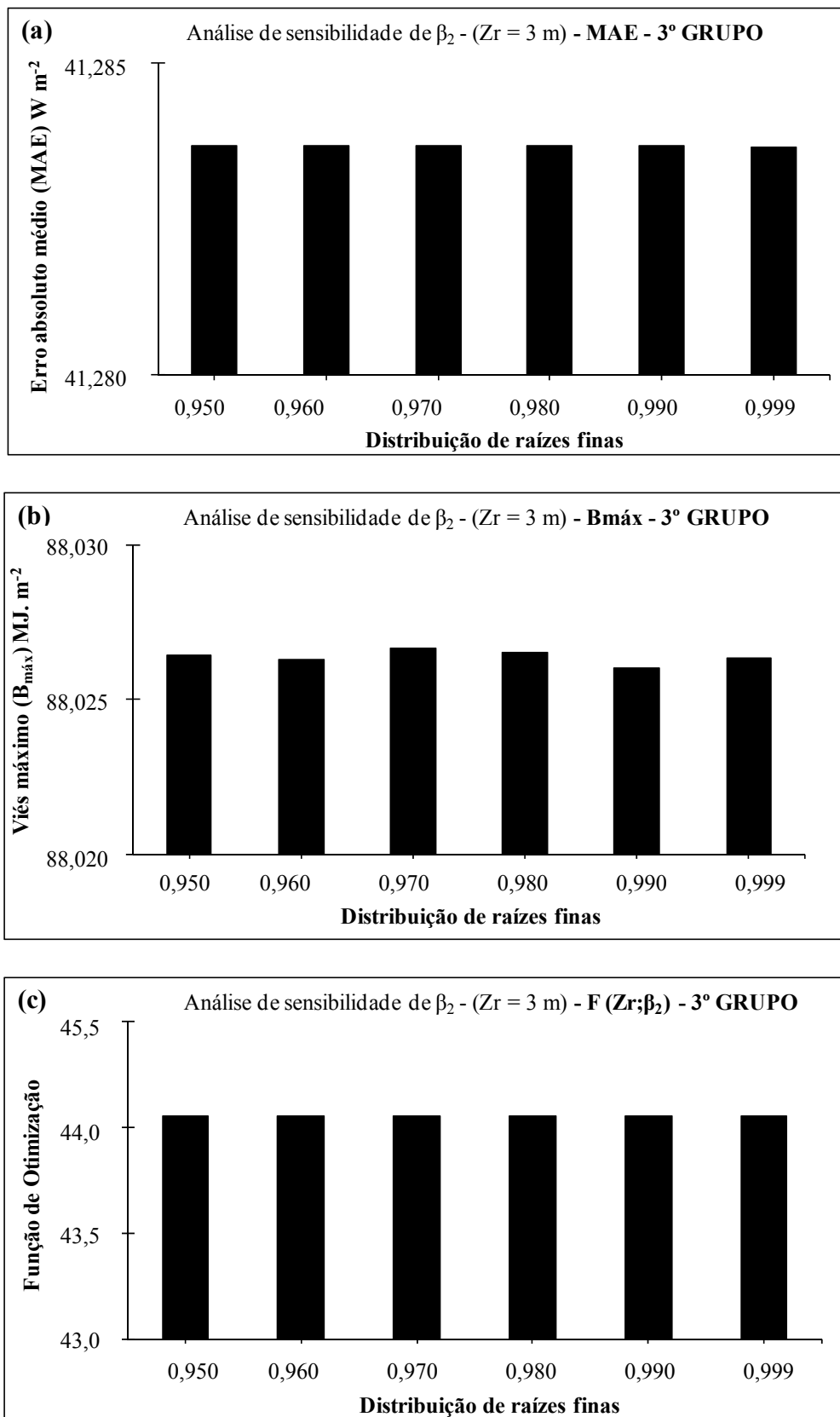


Figura 3.10 – (a) Análise de sensibilidade de MAE , $B_{máx}$ (b) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (c) entre os valores observados e simulados de LE, em função da variação de β_2 , utilizando dados de umidade e temperatura do solo

observadas na FNT-K83 (**3º GRUPO**); (b) o mesmo que (a), mas em escala reduzida.

3.1.4. Discussão conjunta – Análise de sensibilidade

A Tabela 3.1 apresenta os valores mínimos de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R, \beta_2)$ para os diferentes grupos de simulações que utilizaram diferentes condições de contorno para representar as propriedades físicas do solo (2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3).

Tabela 3.1 - Valores de Z_R e β_2 que minimizaram MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R, \beta_2)$ para os diferentes grupos de simulações que utilizaram diferentes condições de contorno para representar as propriedades físicas do solo (2.5.1, 2.5.2 e 2.5.3).

		1º GRUPO	2º GRUPO	3º GRUPO
Z_R (m)	MAE	15 m	34 m	2,8 a 3 m
	$B_{máx}$	4 m	30 m	2,8 a 3 m
	$F(Z_R, \beta_2)$	4 m	30 m	2,8 a 3 m
β_2	MAE	0,999	0,999	
	$B_{máx}$	0,999	0,999	N/A
	$F(Z_R, \beta_2)$	0,999	0,999	

A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro Z_R , para a simulação utilizando banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), mostra que o valor mínimo do erro absoluto médio (MAE) não é encontrado na mesma profundidade do sistema radicular (Z_R) dos valores mínimos do viés máximo ($B_{máx}$) e da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) (Figuras 3.1, 3.2 e 3.3). Este comportamento divergente entre os valores mínimos de MAE e $B_{máx}$ está relacionado à diferença de representatividade destes dois métodos estatísticos. O MAE representa uma medida de dispersão do erro, enquanto

que $B_{m\acute{a}x}$ representa uma medida de posição do erro, ambos entre os valores observados e simulados. Como a função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) apresentou um comportamento igual ao de $B_{m\acute{a}x}$, isto indica que os erros encontrados na simulação, em relação aos valores observados, estão mais relacionados à posição do que  dispersão deste erro, desta forma, a $F(Z_R, \beta_2)$ atuou mais na minimização de $B_{m\acute{a}x}$ do que de MAE .

Diferente do erro expressado em MAE , os valores cumulativos do $B_{m\acute{a}x}$ detectam desvios na distribuição da caracterstica de qualidade dos dados. Como o próprio nome diz, estes valores acumulam as informações dos dados sucessivamente, desta forma uma pequena mudana nos dados pode ser identificada pelo acúmulo de informações, fornecendo um controle mais rigoroso do processo, que permite ao modelador dar mais ênfase em manter o modelo mais próximo das condições reais (observações em campo).

A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro Z_R , para a simulação utilizando parâmetros de solo obtidos através de amostra de solo coletadas na FNT-K83 (2º GRUPO), mostra que o valores de MAE , $B_{m\acute{a}x}$ e $F(Z_R, \beta_2)$ decrescem com o aumento de Z_R (Figuras 3.5, 3.6 e 3.7). O mesmo ocorre na análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro Z_R , para a versão utilizando dados de umidade e temperatura do solo, para forar o modelo, observados na FNT-K83 (3º GRUPO) (Figura 3.9). Entretanto os valores que minimizam estes dois grupos são diferentes, enquanto que Z_R igual a 30 m minimiza $B_{m\acute{a}x}$ e $F(Z_R, \beta_2)$ no segundo grupo de simulações, o Z_R igual a 4 m minimiza estas mesmas estatsticas no terceiro grupo de simulações.

A análise de sensibilidade do modelo ao parâmetro β_2 , para a simulações do 1º GRUPO e 2º GRUPO, mostra que o modelo  sensível ao β_2 . Os valores mínimos de MAE , $B_{m\acute{a}x}$ e $F(Z_R, \beta_2)$, para as simulações destes grupos são encontrados quando β_2 é igual

a 0,999. Já a análise de sensibilidade ao β_2 , para o 3º GRUPO mostra que o modelo não é sensível a este parâmetro, pois quando os dados de umidade e temperatura do solo são utilizados para forçar o modelo, as linhas do código que calculam os valores de temperatura e umidade do solo, na sub-rotina de física do solo do IBIS, são comentadas e o parâmetro de distribuição de raízes finas (β_2) não influencia na simulação de LE (Figura 3.10).

3.2 CALIBRAÇÕES UTILIZANDO TRÊS CONDIÇÕES DE CONTORNO

Nesta seção, os resultados das calibrações utilizando três condições de contorno, associadas às propriedades físicas do solo, com diferentes níveis de incerteza são descritas em detalhe. As próximas subseções descrevem: 3.2.1 calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos; 3.2.2 calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente; 3.2.3 calibração utilizando dados observados de temperatura e umidade do solo para forçar a física de solo do modelo e; 3.2.4 discutem-se os resultados de maneira geral.

3.2.1 Calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos

A Tabela 3.2 apresenta os coeficientes de correlação (ρ), coeficientes de inclinação da reta de regressão linear (α), erro absoluto médio (MAE), o viés máximo ($B_{máx}$) e a função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os valores simulados e observados, para as simulações com os parâmetros iniciais do modelo e com os parâmetros calibrados,

utilizando o banco de dados globais de granulometria dos solos, para FNT-K83. Com os parâmetros Z_R e β_2 iniciais, o modelo não simula bem o fluxo de calor latente (LE), mesmo apresentando baixos valores de MAE e valores aceitáveis de ρ e α , os valores altos de $B_{máx}$ e $F(Z_R;\beta_2)$ comprometem a simulação de LE.

Com o novo conjunto de parâmetros ajustados o modelo IBIS produz melhores resultados na determinação de LE (Tabela 3.2), com melhores valores para ρ e α , bem como diminuição expressiva nos valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R;\beta_2)$.

Tabela 3.2 – Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{máx}$) e função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrado ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,975$) e após calibração ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,999$). As simulações utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos, **1º GRUPO**, para Flona do Tapajós km 83.

	Inicial	Calibrado - 1º GRUPO
ρ	0,760	0,891
α	0,564	0,757
MAE (W m ⁻²)	42,0	30,0
$B_{máx}$ (MJ m ⁻²)	506,8	34,7
$F(Z_R;\beta_2)$	253,4	17,4

As Figuras 3.11 a 3.14 mostram resultados da versão inicial e calibrada do modelo utilizando o banco de dados globais de granulometria dos solos. As Figuras 3.11(a) e 3.11(b) apresentam os gráficos de dispersão para LE. Os gráficos dos fluxos cumulativos observado e simulado de LE, em função do tempo, são apresentados nas

Figuras 3.12(a) e 3.12(b). As Figuras 3.13(a) e 3.13(b) apresentam a variação temporal dos fluxos observado e simulado de LE para períodos selecionados de dez dias. O perfil vertical da umidade volumétrica é apresentado nas Figuras 3.14(a) e 3.14(b).

As Figuras 3.11(a) e 3.11(b) apresentam os gráficos de dispersão para LE para a versão inicial e calibrada, respectivamente, mostrando uma dispersão menor dos dados para a versão calibrada, assim como melhores coeficientes.

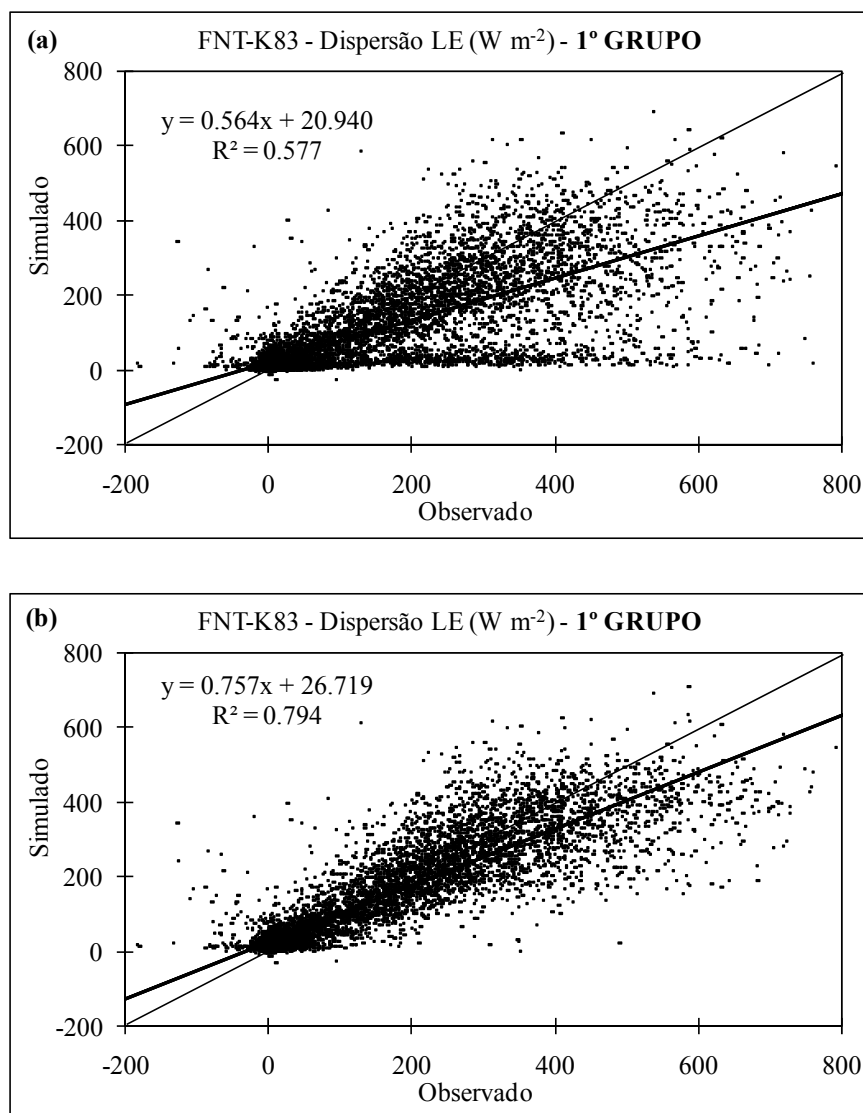


Figura 3.11 – Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão inicial (a) e calibrada com o banco de dados global de granulometria dos solos (b), mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, para as

simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos, **1º GRUPO**.

A Figura 3.12(a) mostra que o LE cumulativo, em função do tempo, apresenta um bom comportamento entre julho e o final de agosto de 2000. Após este período o modelo começa a subestimar os dados observados, enquanto que a versão calibrada apresenta um excelente comportamento de LE cumulativo para todo o período de estudo (Figura 3.12(b)).

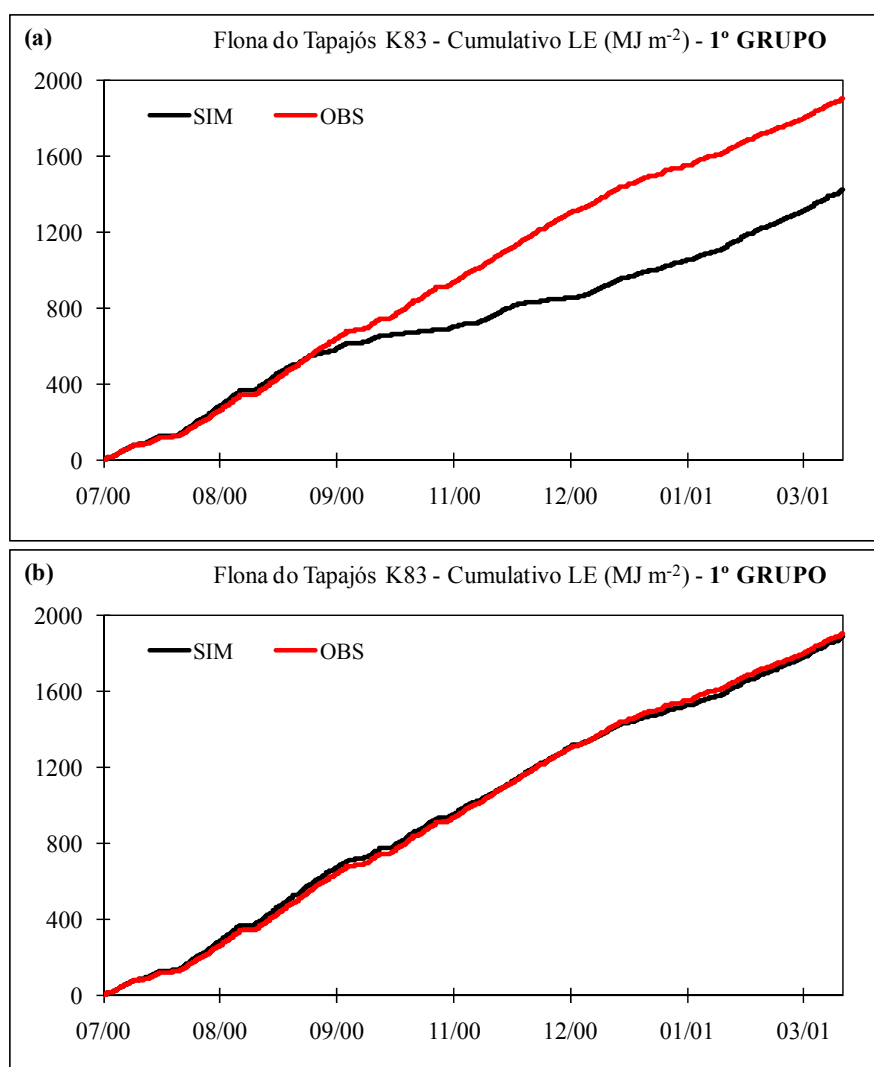


Figura 3.12 – Gráfico cumulativo de LE, para a versão inicial (a) e calibrada com o banco de dados global de granulometria dos solos (b), para as simulações que utilizam

parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos para FNT-K83, **1º GRUPO**.

O fluxo observado e simulado de LE, na versão inicial, em função do tempo para períodos de aproximadamente dez dias em diversas épocas do ano são apresentados nas Figuras 3.13(a)-(d). Nestas figuras, o modelo representa razoavelmente a variação diurna de LE observado nos meses de julho de 2000 (Figura 3.13(a)), setembro de 2000 (Figura 3.13(b)), janeiro (Figura 3.13(c)) e março de 2001 (Figura 3.13(d)) com exceção dos picos. No mês de setembro de 2000 (Figura 3.13(b)), o modelo subestima muito o LE observado.

O fluxo observado e simulado de LE, após calibração, em função do tempo para períodos de aproximadamente de dez dias em diversas épocas do ano são apresentados nas Figuras 3.13(e)-(h). Após a calibração, o modelo IBIS representa bem a variação diurna de LE observado nos meses de julho de 2000 (Figuras 3.13(e)), setembro de 2000 (Figuras 3.13(f)), janeiro de 2001 (Figuras 3.13(g)) e março de 2001 (Figuras 3.13(h)), porém continua não conseguindo simular os picos de LE.

Comparando as Figura 3.13(a)-(d) com as Figuras 3.13(e)-(h) nota-se que a intensidade do LE para a versão calibrada melhorou bastante em relação à versão inicial.

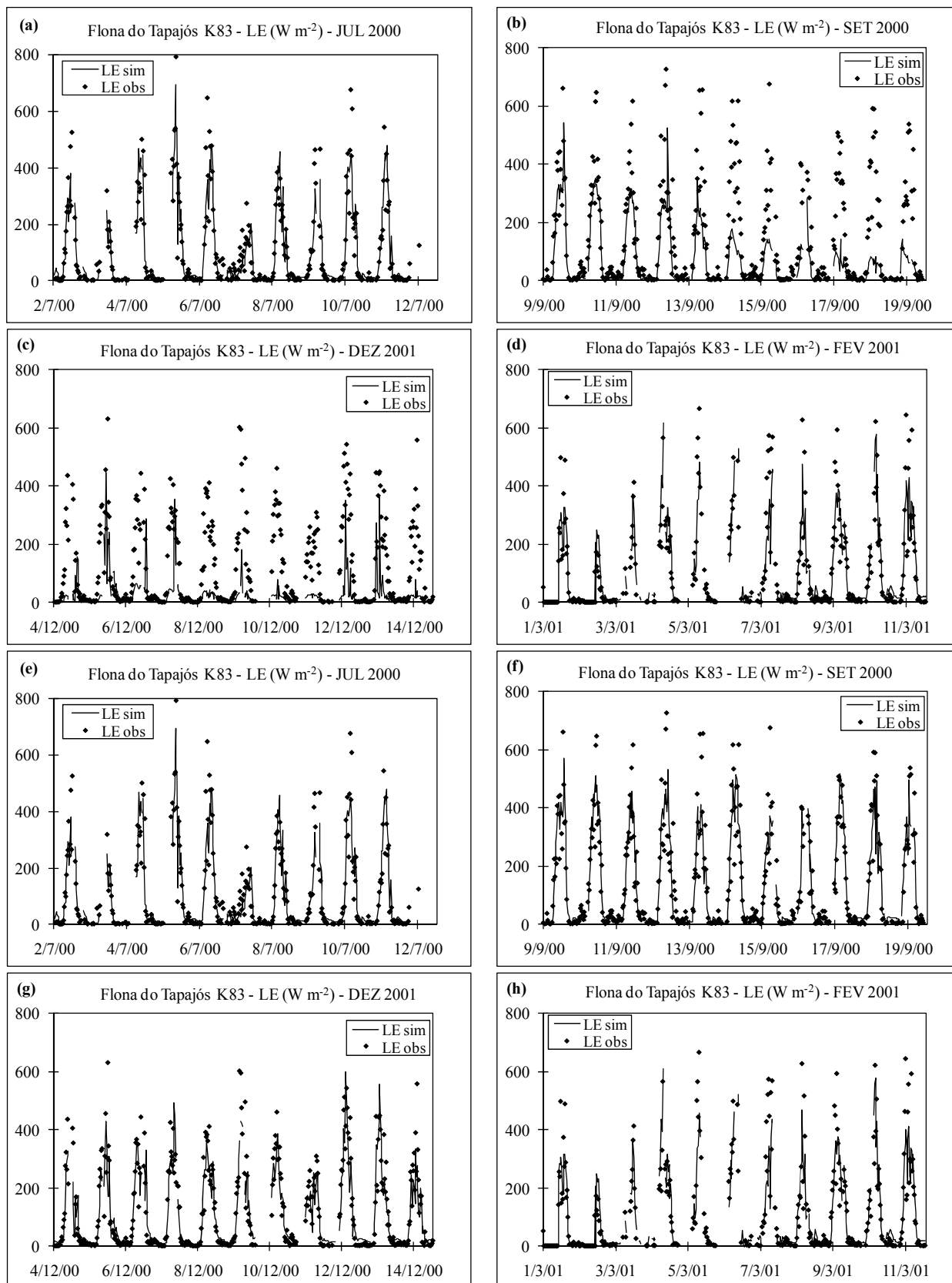


Figura 3.13 - Fluxo de calor latente observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de 2001, para a

versão inicial (a)-(d) e calibrada (e)-(h) utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de banco de dados global de granulometria dos solos (b), para FNT-K83, **1º GRUPO**. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

A Figura 3.14 mostra a precipitação horária observada (Figura 3.14(a)), o perfil da umidade volumétrica do solo observada, nas camadas 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50 e 3,00 m (Figura 3.14(b)) e o perfil da umidade volumétrica do solo simulado, nas camadas 0,1; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 4,00 m (Figura 3.14(c)), no período de 01/07/2000 a 21/03/2001.

Nas Figuras 3.14(b) e (c), a umidade varia ao longo das camadas do perfil do solo, principalmente na estação seca (meses de julho a dezembro de 2000). Entre o período de janeiro e março de 2001 (início da estação chuvosa) e durante eventos consecutivos e intensos de precipitação, a umidade do solo atinge valores máximos em todo o perfil do solo até a profundidade de 3 m. O primeiro 1,5 m abaixo da superfície do solo é onde se encontra as respostas mais rápidas aos eventos de chuva.

Nas Figuras 3.14(b) e (c), a umidade varia ao longo das camadas do perfil do solo. Mas com o avanço da estação seca, especialmente entre o mês de setembro de 2000 a janeiro de 2001, fica bem caracterizada a existência de uma “bolha” de solo mais seco desde 1 até 2 m de profundidade. Nos meses mais chuvosos (janeiro a março de 2001), nos dois primeiros metros abaixo da superfície do solo é onde se apresenta respostas mais rápidas aos eventos de chuva (Figura 3.14(b)). Na Figura 3.14(c) o modelo seca muito o solo, principalmente nos períodos em que os eventos de precipitação são ausentes ou de menor intensidade, em comparação ao perfil de solo da Figura 3.14(b).

Os perfis da umidade volumétrica do solo nas Figuras 3.14(b) e (c) foram interpolados na vertical para melhor visualização.

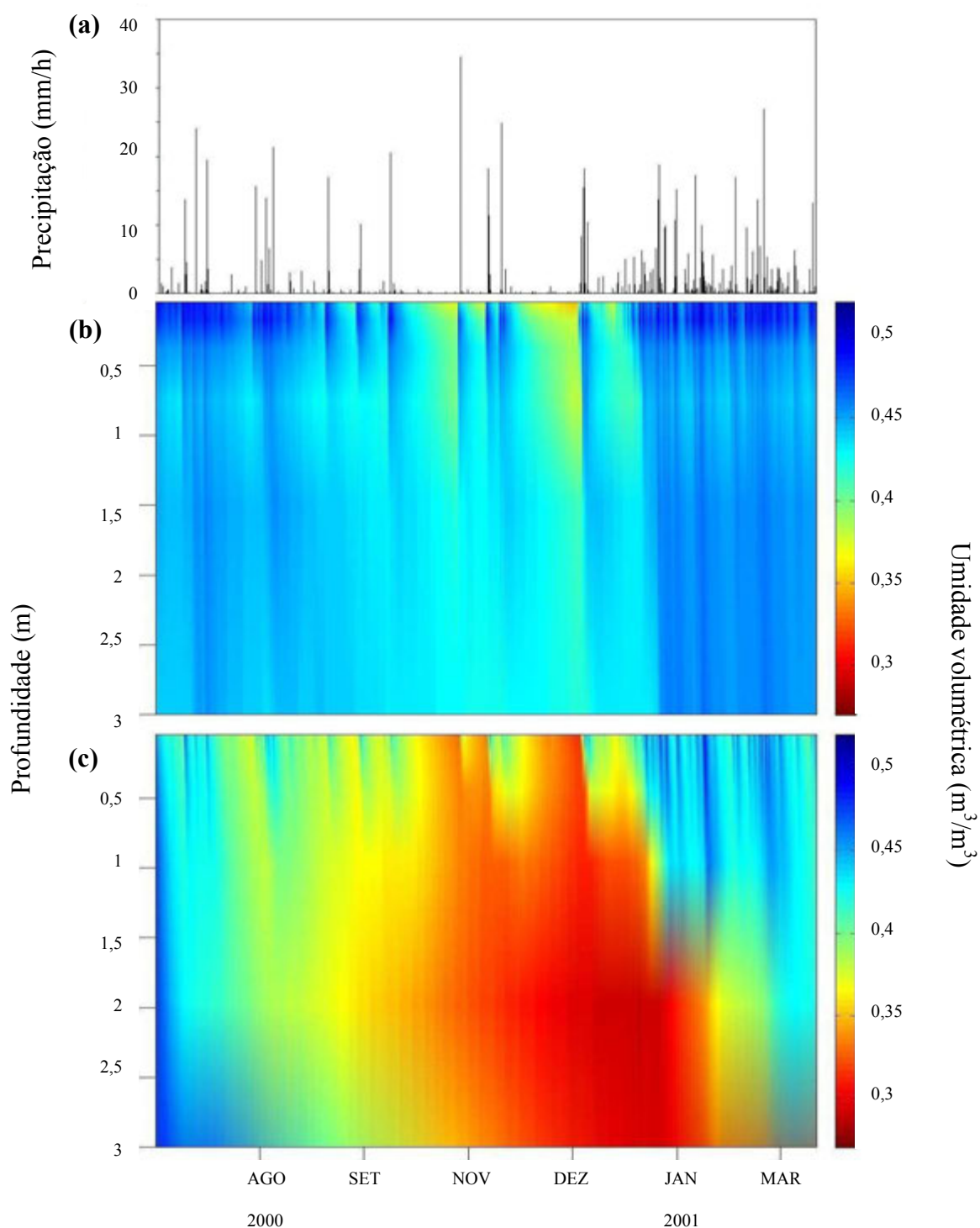


Figura 3.14 – Precipitação observada (em $mm\ hora^{-1}$) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em $m^3\ m^{-3}$), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b) e perfil da umidade volumétrica simulado (em $m^3\ m^{-3}$), nas camadas

de 0,1; 0,25; 0,50; 1,00; 2,00 e 4,00 m (c), 1º GRUPO, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001, para FNT-K83.

3.2.2. Calibração utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente

A Tabela 3.3 apresenta os coeficientes de correlação (ρ), coeficientes de inclinação da reta de regressão linear (α), erro absoluto médio (MAE), o viés máximo ($B_{máx}$) e a função de otimização ($F(Z_R; \beta_2)$) entre os valores simulados e observados, para as simulações com os parâmetros iniciais do modelo e com os parâmetros calibrados, utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83.

Comparando os valores das versões inicial e calibrada, o novo conjunto de parâmetros ajustados produz melhores resultados na determinação de LE (Tabela 3.3), com melhores valores para ρ e α , bem como diminuição expressiva nos valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R; \beta_2)$.

Tabela 3.3 – Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{m\acute{a}x}$) e função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para as simulações com o conjunto inicial de parâmetros não calibrado ($Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,975$) e após calibração ($Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$), utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na Flona do Tapajós km 83.

	Inicial	Calibrado - 2º GRUPO
ρ	0,735	0,893
α	0,515	0,779
MAE (W m ⁻²)	44,5	29,3
$B_{m\acute{a}x}$ (MJ m ⁻²)	616,8	36,9
$F(Z_R;\beta_2)$	308,4	18,5

As Figuras 3.15 a 3.18 mostram resultados da versão inicial (sem calibração) e a versão calibrada do modelo utilizando parâmetros obtidos através de amostras de solo coletadas na FNT-K83. A Figura 3.15 apresenta o gráfico de dispersão para LE. O gráfico cumulativo observado e simulado de LE, em função do tempo, é apresentado na Figura 3.16. A Figura 3.17 apresenta a variação temporal dos fluxos observado e simulado de LE para períodos selecionados de dez dias. O perfil vertical da umidade volumétrica é apresentado na Figura 3.18.

A Figura 3.15(a) e 3.15(b) apresentam os gráficos de dispersão para LE para a versão inicial e calibrada (2º GRUPO), respectivamente. Estas figuras mostram uma dispersão menor dos dados para a versão calibrada, utilizando parâmetros obtidos pela amostra de solo (2º GRUPO), do que a versão inicial e a versão calibrada utilizando o

banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), assim como melhores coeficientes (ver Figura 3.11).

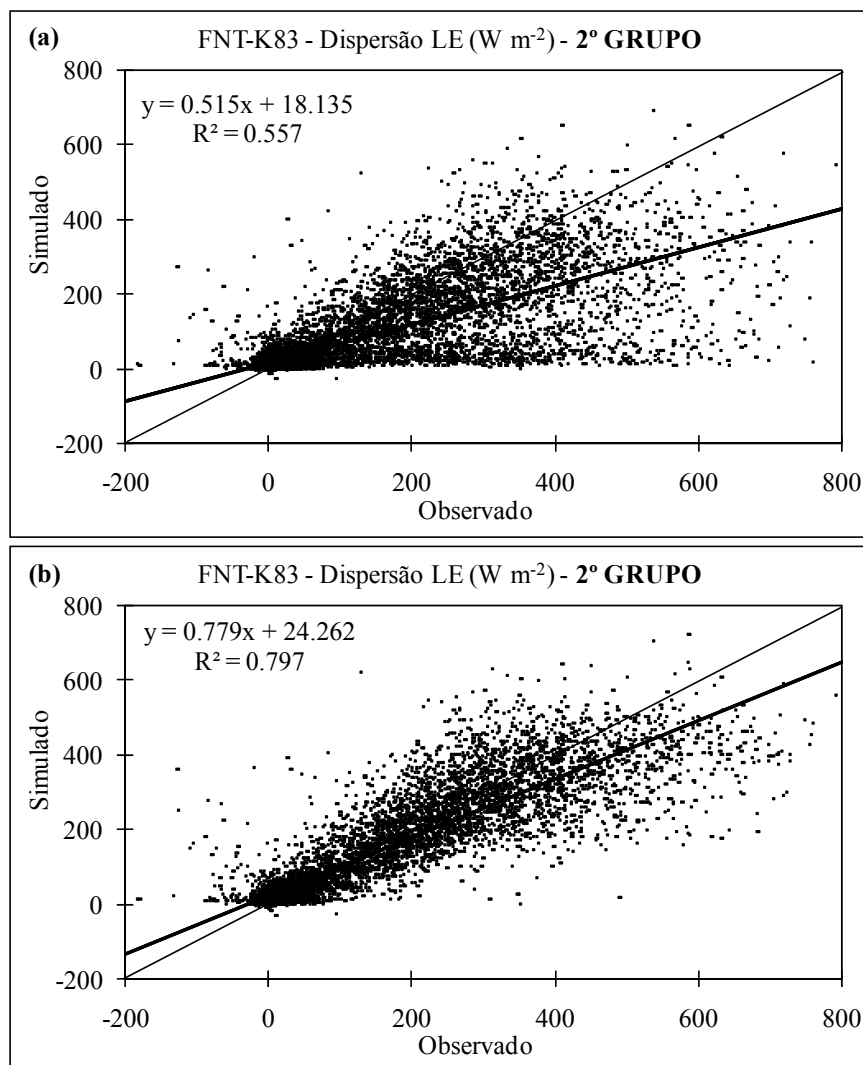


Figura 3.15 – Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão inicial (a) e calibrada (b), mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, 2º GRUPO, na FNT-K83.

Depois de calibrado (Figura 3.16(b)), o modelo IBIS simula bem o LE cumulativo e representa bem a variação diurna de LE ao longo do período estudado,

enquanto que com os parâmetros iniciais o modelo subestima bastante o LE, conseguindo apenas representar bem os dados observados no mês de julho (Figura 3.16(a)).

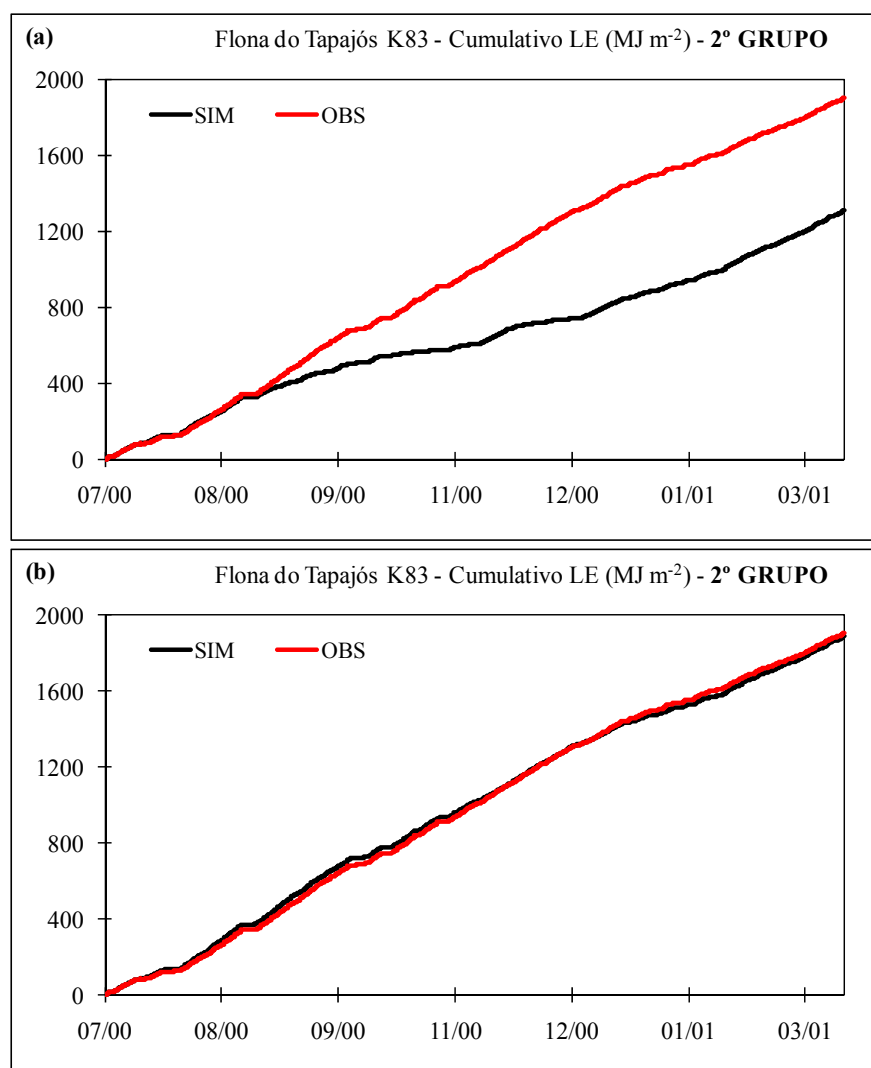


Figura 3.16 – Gráfico cumulativo de LE para versão inicial (a) e calibrada (b) para as simulações que utilizam parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, **2º GRUPO**, na FNT-K83.

A versão inicial subestima o LE principalmente no mês de setembro de 2000 e não consegue simular os picos ao longo do período estudado (Figura 3.17(a)), já a versão calibrada simula bem o comportamento diário de LE, mas ainda continua não simulado bem os picos (Figura 3.17(b)).

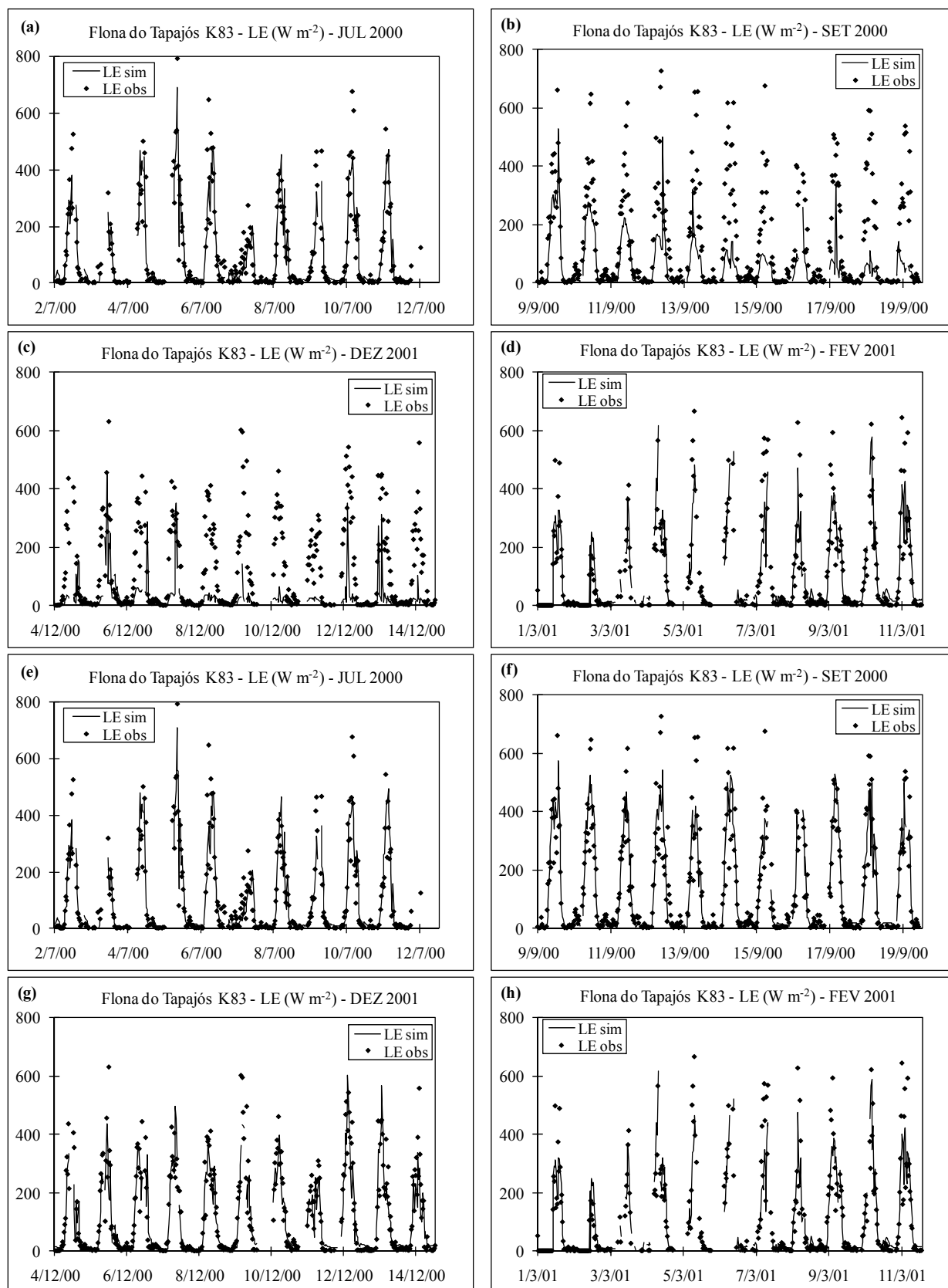


Figura 3.17 - Fluxo de calor latente observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de

2001, para a versão inicial (a)-(d) e calibrada (e)-(h) utilizando parâmetros de solos obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, 2º **GRUPO**, na FNT-K83. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

A Figura 3.18 mostra a precipitação horária observada e o perfil da umidade volumétrica do solo calibrada utilizando os dados obtidos pela amostra de solo, nas camadas 0,75 e 1,88 m, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. Nesta figura, a umidade varia ao longo das camadas do perfil do solo, principalmente na estação seca. Entre o período de janeiro e março de 2001 (início da estação chuvosa) e durante eventos consecutivos e intensos de precipitação, a umidade do solo atinge todo o perfil do solo, atingindo a profundidade de 1,88 m (Figura 3.19). Quando comparado com as Figuras 3.4, 3.5 e 3.9, a versão calibrada, utilizando os dados obtidos pela amostra de solo (2º **GRUPO**), apresenta um perfil de umidade do solo mais parecido com o perfil de umidade observado, apesar de não conseguir representar as regiões de solo mais seco nas camadas mais superficiais.

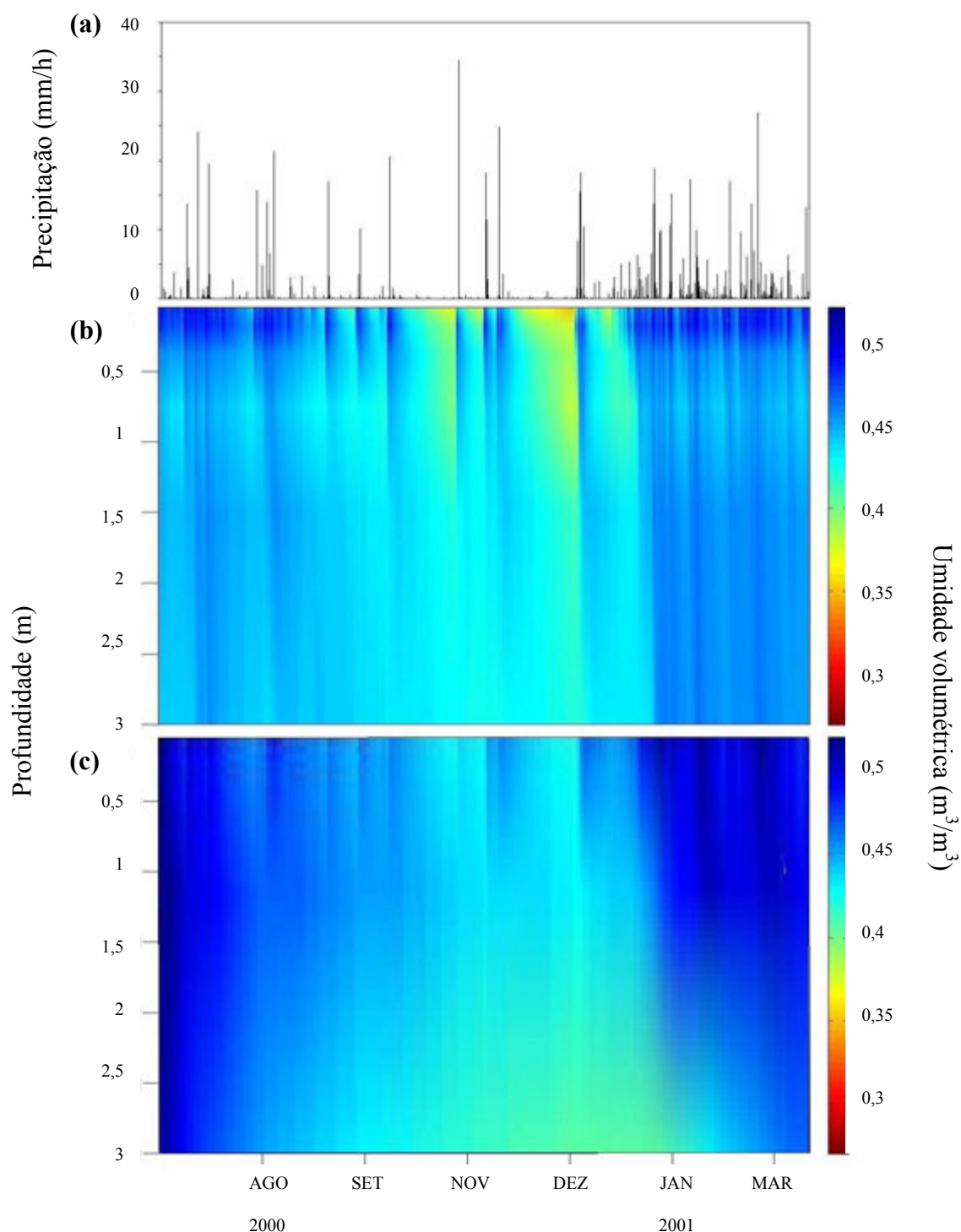


Figura 3.18 – Precipitação observada (em mm hora^{-1}) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b) e perfil da umidade volumétrica simulado (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), nas camadas de 0,75; 1,88 e 3 m (c), **2º GRUPO**, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001, para FNT-K83.

3.2.3. Simulação utilizando dados observados de temperatura e umidade do solo para forçar o modelo

A Tabela 3.4 apresenta os coeficientes de correlação (ρ), coeficientes de inclinação da reta de regressão linear (α), erro absoluto médio (MAE), o viés máximo ($B_{m\acute{a}x}$) e a função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os valores simulados e observados, para simulação forçada por dados de umidade e temperatura do solo medidos no perfil de solo na Flona do Tapajós km 83.

A simulação que utiliza dados de umidade e temperatura do solo, medidos no FNT-K83, para forçar as condições de solo apresenta resultados inferiores (Tabela 3.4) às simulações que utilizam dados das propriedades físicas do solo, estimadas através de um banco de dados global de granulometria dos solos (Tabela 3.2), e que utilizam parâmetros de solo obtidos através da determinação da curva de retenção de água no solo (Tabela 3.3). Estes resultados inferiores apresentam baixa correlação entre o LE simulado e observado e baixo α , bem como valores altos de $B_{m\acute{a}x}$, MAE e $F(Z_R;\beta_2)$.

Tabela 3.4 – Coeficiente de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo ($B_{m\acute{a}x}$) e função de otimização ($F(Z_R;\beta_2)$) entre os dados observados e simulados, para a simulação forçada pelos dados observados de umidade e temperatura do solo, **3º GRUPO**, na FNT-K83.

Calibrado - 3º GRUPO	
ρ	0,793
α	0,665
MAE ($W\ m^{-2}$)	41,3
$B_{m\acute{a}x}$ ($MJ\ m^{-2}$)	88,0
$F(Z_R;\beta_2)$	44,1

Na Figura 3.19 nota-se um aumento na dispersão dos dados simulados em relação aos dados observados em comparação com as simulações que utilizam outros tipos de parâmetros de solo (ver Figuras 3.11(b) e 3.15(b)).

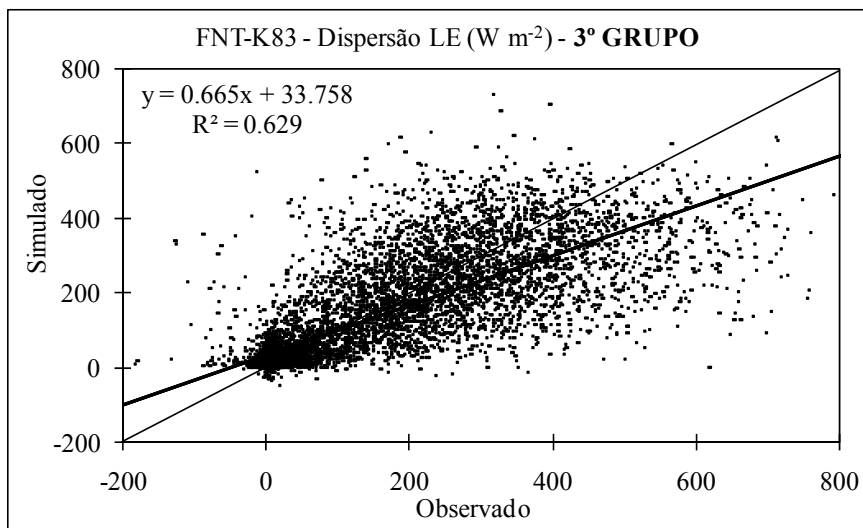


Figura 3.19 – Gráficos de dispersão para o fluxo de calor latente (LE), para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, mostrando a reta 1:1 e a reta de regressão com seus coeficientes, **3º GRUPO**.

A Figura 3.20 mostra que o LE cumulativo, em função do tempo, apresenta um bom comportamento entre julho a novembro de 2000, mas após este período o modelo começa a subestimar os dados observados.

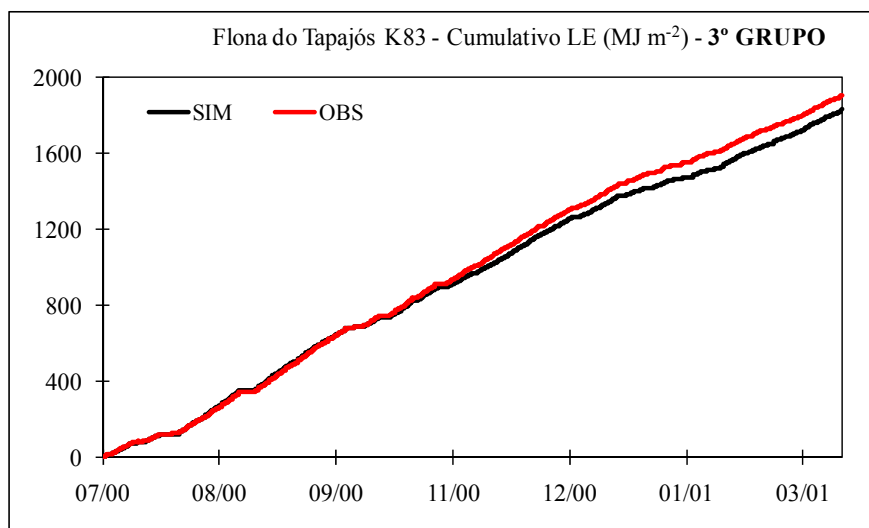


Figura 3.20 – Gráfico cumulativo de LE para versão para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, **3º GRUPO**.

O modelo simula razoavelmente a variabilidade horária de LE, que mais uma vez não consegue atingir os picos de LE (Figura 3.21).

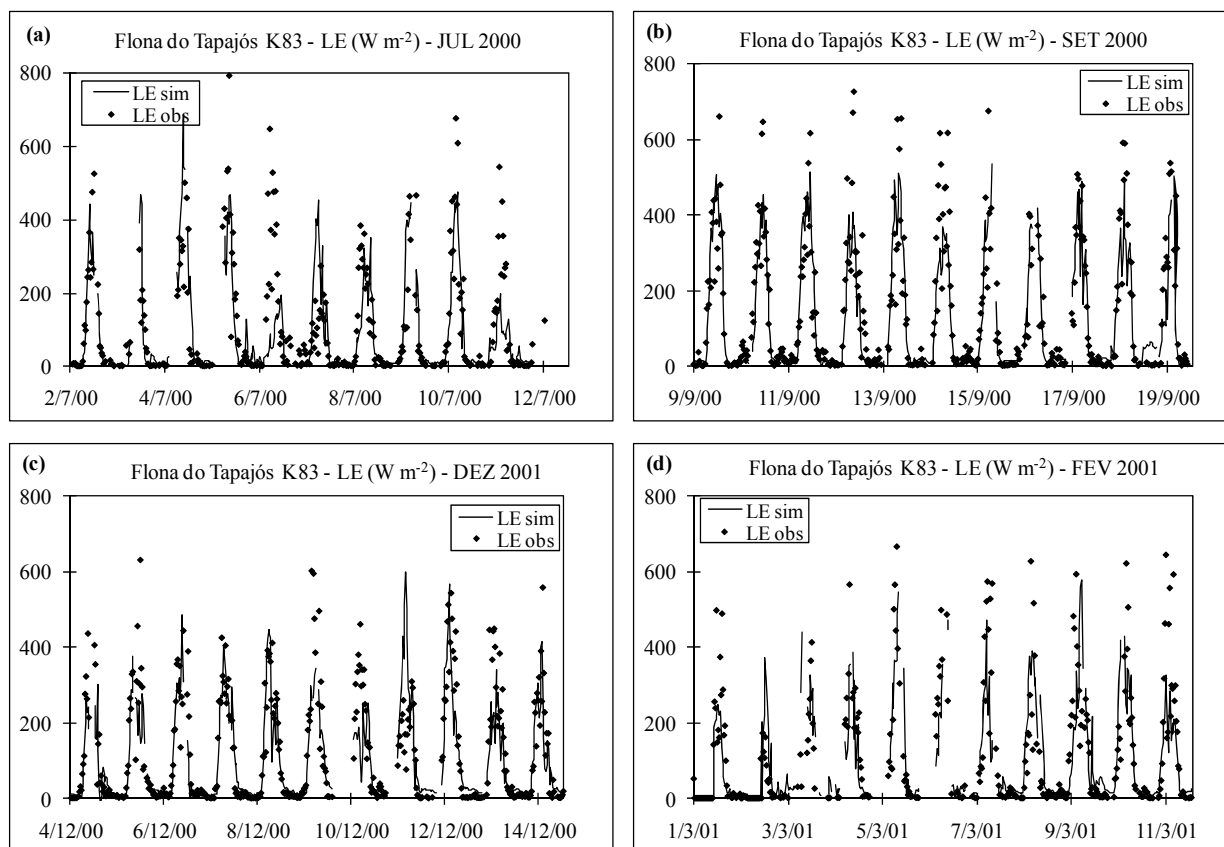


Figura 3.21 - Fluxo de calor latente observado e simulado (W m^{-2}), para períodos selecionados nos meses de julho e setembro de 2000 e janeiro e março de 2001, para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo obtidos na FNT-K83, **3º GRUPO**. Períodos em branco representam aqueles em que os dados foram filtrados.

A Figura 3.22 mostra a precipitação horária (a) e o perfil da umidade volumétrica das camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b), para a versão com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo medidos no perfil de solo na FNT-K83 (3º GRUPO). O perfil da umidade volumétrica gerado pela simulação do 3º GRUPO (Figura 3.22) é similar ao perfil de umidade volumétrica observado (Figura 3.14(b)).

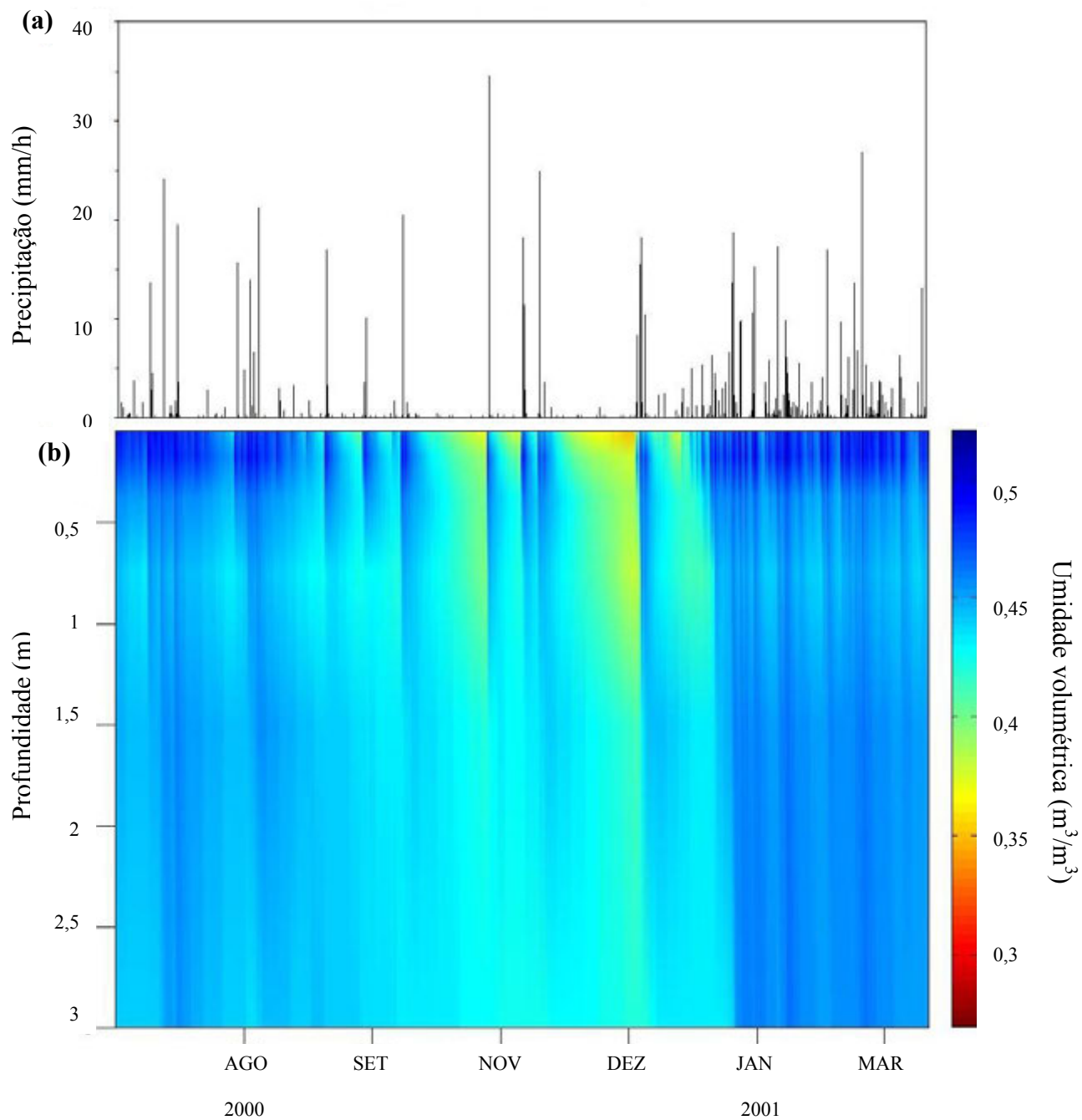


Figura 3.22 – Precipitação observada (em $mm\ hora^{-1}$) (a), perfil da umidade volumétrica observada (em $m^3\ m^{-3}$), nas camadas de 0,05; 0,175; 0,375; 0,75; 1,50; 3,00 m (b), **3º GRUPO**, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001, para FNT-K83.

3.2.4. Discussão conjunta - Calibração

Com os parâmetros iniciais, Z_R igual a 4 m e β_2 igual 0,975, as simulações que utilizam dados das propriedades físicas do solo, estimadas através de um banco de dados global de granulometria dos solos, e a que utiliza parâmetros obtidos através de amostras de solo, subestimam LE (ver Figuras 3.2(a) e 3.7(a)). Além disto, apresentam maior dispersão dos dados simulados em relação aos dados observados (ver Figuras 3.11(a) e 3.16(a)), subestimam as variações diurnas e não atingem os picos de LE (ver Figuras 3.3(a) e 3.8(a)).

O novo conjunto de parâmetros do modelo IBIS (Tabela 3.4), utilizando diferentes parâmetros de solos (1º GRUPO e 2º GRUPO), produz melhores resultados na determinação de LE (Figuras 3.12 e 3.16). O modelo simula e representa bem a variabilidade horária de LE, exceto os valores extremos (picos) (Figuras 3.13 e 3.17), e apresenta menor dispersão dos dados quando comparados às simulações com parâmetros iniciais (Figuras 3.11 e 3.15). Além disto, apresenta melhores valores para ρ e α , bem como para MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R; \beta_2)$ (Tabelas 3.12 e 3.13).

O perfil da umidade volumétrica do solo observado na FNT-K83 mostra que a umidade varia ao longo das camadas do perfil do solo, principalmente na estação seca (meses de julho a dezembro de 2000). Entre o período de janeiro e março de 2001 (início da estação chuvosa) e durante eventos consecutivos e intensos de precipitação, a umidade do solo atinge valores elevados em todo o perfil do solo, atingindo a profundidade de 3 m. O primeiro 1,5 m abaixo da superfície do solo é onde se apresentam respostas mais rápidas aos eventos de chuva (Figura 3.14).

O novo conjunto de parâmetros que descreve melhor o comportamento da umidade volumétrica observada é o que utiliza parâmetros obtidos através de amostras de solo (2º GRUPO). Com os novos parâmetros, Z_R igual a 30 m e β_2 igual a 0,999, e parâmetros obtidos através de amostras de solo, o modelo simula melhor o perfil de umidade do solo (Figura 3.18). Este mesmo conjunto de parâmetros e dados é o que apresenta melhores resultados para LE.

A simulação com assimilação de dados de umidade e temperatura do solo (3º GRUPO) apresenta resultados inferiores às simulações do 1º GRUPO e 2º GRUPO. Estes resultados (3º GRUPO) apresentam alta dispersão dos dados simulados em relação aos observados (Figura 3.19), subestima o LE (Figura 3.20), apresenta valores pouco satisfatórios de ρ e α , e altos valores de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R; \beta_2)$ (Tabela 3.4). O resultado pouco satisfatório desta simulação está relacionado ao fato de que os dados, de umidade e temperatura do solo, utilizados para forçar as condições de solo do modelo correspondem a seis medidas de solo com profundidade máxima de 3 m, logo, no processo de calibração no 3º GRUPO o Z_R máximo só poderia atingir 3 m, impossibilitando que o modelo aumentasse a sua profundidade de raiz, para talvez, alcançar uma simulação com resultados mais robustos. O perfil da umidade volumétrica no 3º GRUPO (Figura 3.22) é igual ao observado (Figura 3.14).

A Tabela 3.5 apresenta os valores dos parâmetros de profundidade máxima do sistema radicular (Z_R) e de distribuição vertical de raízes finas (β_2), antes do processo de calibrações e após as calibrações, juntamente com os valores das espessuras das seis camadas de solo utilizadas no modelo. Estas calibrações utilizaram parâmetros de solo obtidos a partir do banco de dados global de granulometria dos solos (1º GRUPO), a partir

de amostras de solo coletadas localmente (2° GRUPO) e de dados observados de temperatura e umidade do solo medidos na Floresta Nacional do Tapajós K83 (FNT-K83).

Tabela 3.5 – Parâmetros calibrados para cada grupo e valores das estatísticas (ρ , α , MAE e $B_{máx}$) e da função de otimização $F(Z_R; \beta_2)$.

	β_2	Z_R	ρ	α	MAE	$B_{máx}$	$F(Z_R; \beta_2)$
1° GRUPO	0,999	4 m	0,891	0,757	30,0	34,7	17,4
Calibrado 2° GRUPO	0,999	30 m	0,893	0,779	29,3	36,9	18,5
3° GRUPO	0,999	3 m	0,793	0,665	41,3	88,0	44,1

A Tabela 3.6 apresenta um resumo dos valores de profundidade do sistema radicular encontrados na literatura.

Tabela 3.6 – Profundidade do sistema radicular para diferentes tipos de ecossistemas tropicais encontrada na literatura.

Ecossistema	Profundidade de raiz	Literatura
Floresta Amazônica	$Z_R = 3,6$ m	HODNETT et al. 1995
Diferentes tipos de ecossistemas	$Z_R = 4,1$ m	JACKSON et al. 1997
Floresta Amazônica (Pará)	$Z_R = 5,8$ m	NEPSTAD et al. 1994
Floresta Amazônica (Manaus)	$Z_R = 6,0$ m	CHAUVEL et al. 1992
Savana Tropical	$Z_R = 7,3$ m	CANADELL et al. 1996
Floresta Amazônica	$Z_R = 15$ m	NEPSTAD et al. 2004
Floresta Amazônica	$Z_R = 18$ m	JIPP et al. 1998
Regiões Tropicais	$Z_R = 60$ m	STONE & KALISZ, 1991

A Tabela 3.7 apresenta um resumo dos valores da distribuição vertical de raízes finas encontrados na literatura.

Tabela 3.7 – Distribuição vertical de raízes finas encontrada na literatura.

Ecosistema	Distribuição vertical de raízes finas	Literatura
Floresta Tropical	$\beta_2 = 0,962$	JACKSON et al. 1996
Floresta Tropical	$\beta_2 = 0,972$	JACKSON et al. 1997
Floresta Tropical	$\beta_2 = 0,975$	Utilizado no IBIS
Floresta Amazônica (Santarém)	$\beta_2 = 0,996$	VAREJÃO, 2009 (Calibrado)
Floresta Amazônica (Santarém)	$\beta_2 = 0,997$	IMBUZEIRO et al. 2005 (Calibrado)
Transição Floresta-Serrado (Sinop)	$\beta_2 = 0,999$	VAREJÃO, 2009 (Calibrado)

A profundidade do sistema radicular de 3 m encontrada no 3º GRUPO foi desconsiderada nas comparações com os valores encontrados na literatura, pois este grupo ficou restrito ao valor máximo de 3 m de profundidade por causa dos dados observados de umidade e temperatura do solo utilizado para forçar o modelo. Estes valores de profundidade do sistema radicular encontrados nos três grupos de calibrações

Os valores de profundidade máxima do sistema radicular encontrados nas calibrações do 1º GRUPO e 2º GRUPO variaram em 4 m e 30 m, respectivamente (Tabela 3.5). Estas profundidades encontradas nas calibrações, 4 m e 30 m, estão dentro do intervalo de valores de profundidade de raiz encontrados na literatura, entre 3.6 m a 60 m (Tabela 3.6). Já os valores de distribuição do perfil de raízes finas encontrados em todas as

calibrações, β_2 igual a 0,999, é maior do que a média encontrada na literatura, que é β_2 igual a 0,983.

3.3. INCERTEZAS INTRODUZIDAS PELAS DIFERENTES CONDIÇÕES DE CONTORNO ASSOCIADAS ÀS PROPRIEDADES FÍSICAS DO SOLO

Nesta seção, são apresentadas e discutidas as incertezas introduzidas pelas diferentes condições de contorno associadas às propriedades físicas do solo. As próximas subseções descrevem: 3.3.1 incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente; 3.3.2 incertezas introduzidas por diferentes granulometrias do solo e; 3.3.3 discussão conjunta das incertezas introduzidas.

3.3.1 Incertezas introduzidas pelos dados globais de granulometria do solo em relação aos parâmetros obtidos localmente

A Figura 3.23 mostra a precipitação horária (a) e a diferença entre o perfil da umidade volumétrica do solo simulado no 1º GRUPO e no 2º GRUPO ($\theta_{1^\circ \text{GRUPO}} - \theta_{2^\circ \text{GRUPO}}$) (b). A diferença mostra que o banco de dados global de granulometria do solo introduz incertezas na simulação da umidade volumétrica do solo no IBIS. Durante eventos intensos e consecutivos de precipitação, o IBIS gera um perfil de solo mais úmido, em torno de $0,05 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a mais. Enquanto que nos períodos de ausência ou de menor intensidade de precipitação o IBIS gera um perfil do solo mais seco, em torno de $0,05$ e $0,15 \text{ m}^3\text{m}^{-3}$ a mais. Mas na média do período estudado o IBIS gera um perfil de solo mais seco quando utiliza o banco de dados global de granulometria do solo.

As propriedades físicas do solo entre os dois grupos de simulações diferem. A textura dos dados globais de granulometria do solo (52% areia, 42% argila e 6% silte) indica que o solo possui a classe textural argila arenosa (1º GRUPO), enquanto que a textura do solo obtida através de amostras coletadas localmente (38% areia, 60% argila e 2% silte) indica que o solo possui classe textural argila (2º GRUPO).

Solos de textura mais grossa (maior quantidade de areia) possuem, em geral, maior quantidade de macroporos e retêm menos água do que os solos de textura fina (maior quantidade de argila), apresentando maior taxa de infiltração, além de facilitar o movimento de água no perfil do solo devido à sua alta condutividade hidráulica saturada. Estas características do solo de textura mais grossa (1º GRUPO) explicam o comportamento do IBIS em gerar perfis de solo mais úmido durante períodos de maior precipitação e perfis de solo mais secos nos períodos de menor precipitação, já que este tipo de solo retém menos a água e permite que a água infiltre mais rápido no perfil do solo.

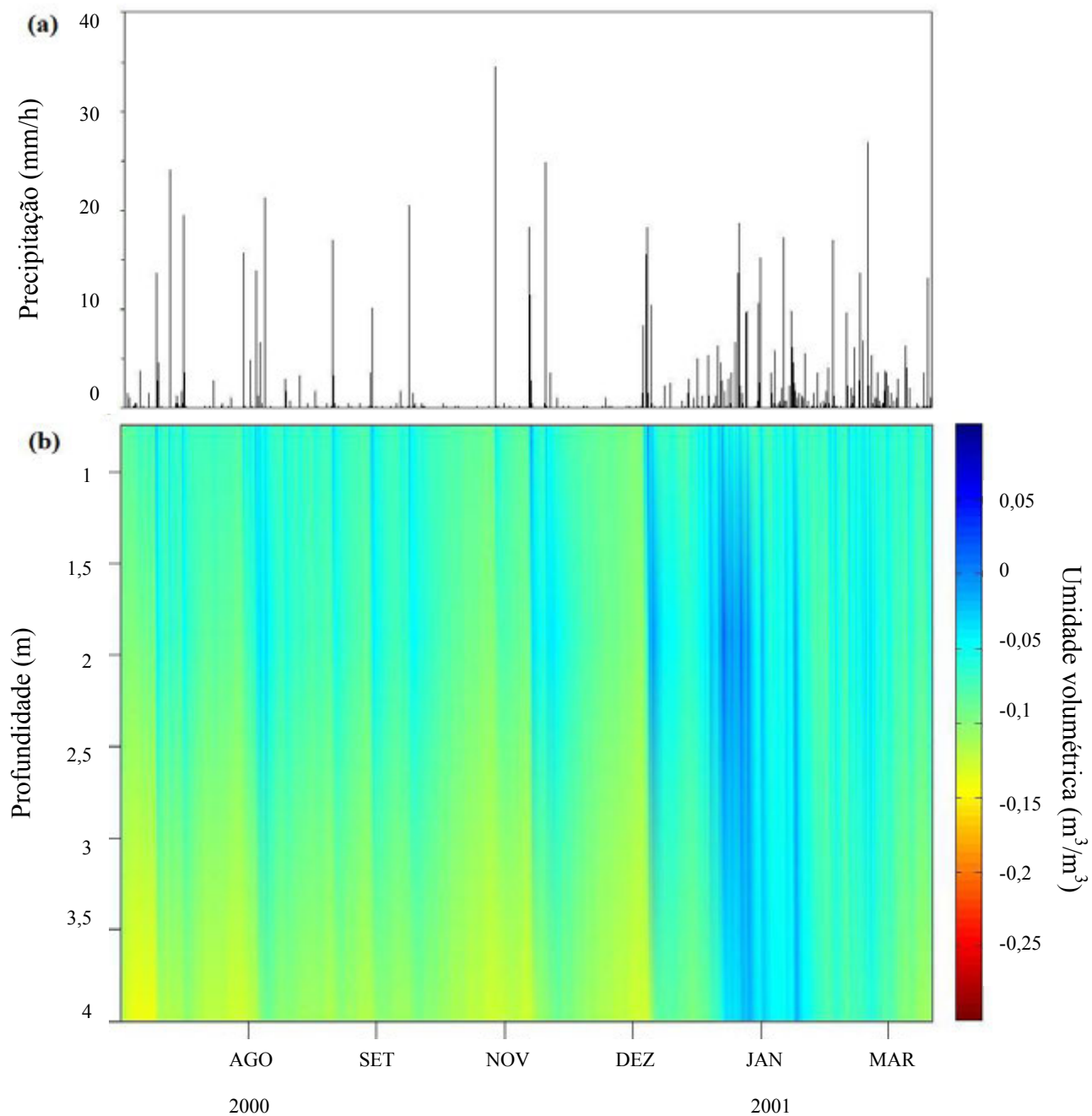


Figura 3.23 – Precipitação observada (em $mm\ hora^{-1}$) (a) e perfil da umidade volumétrica do solo (em $m^3\ m^{-3}$) (b), para a diferença entre as simulações calibradas no 1º GRUPO e 2º GRUPO, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. Flona do Tapajós km 83.

3.3.2 Incertezas introduzidas por diferentes valores de granulometria do solo

A Figura 3.24 mostra a precipitação horária observada (a) e o perfil da umidade volumétrica do solo (b), para a diferença entre as simulações que utilizam parâmetros de solo obtidos a partir de banco de dados de granulometria do solo retirados da versão 4.0 e 3.0 do Protocolo do LBA-DMIP. A diferença entre os valores de textura do solo dos dois protocolos, versão 4.0 (18% areia; 80% argila e 2% silte) e versão 3.0 (52% areia; 42% argila e 6% silte) mostra que o solo da versão 4.0 é considerado argila, enquanto que o da versão 3.0 é argila arenoso. A Figura 3.25(b) mostra que quando o modelo utiliza o tipo de solo argiloso (versão 4.0) no lugar do solo argiloso arenoso, o modelo gera um perfil de umidade volumétrica mais úmido em todo o período, especialmente no primeiro 2 m de profundidade.

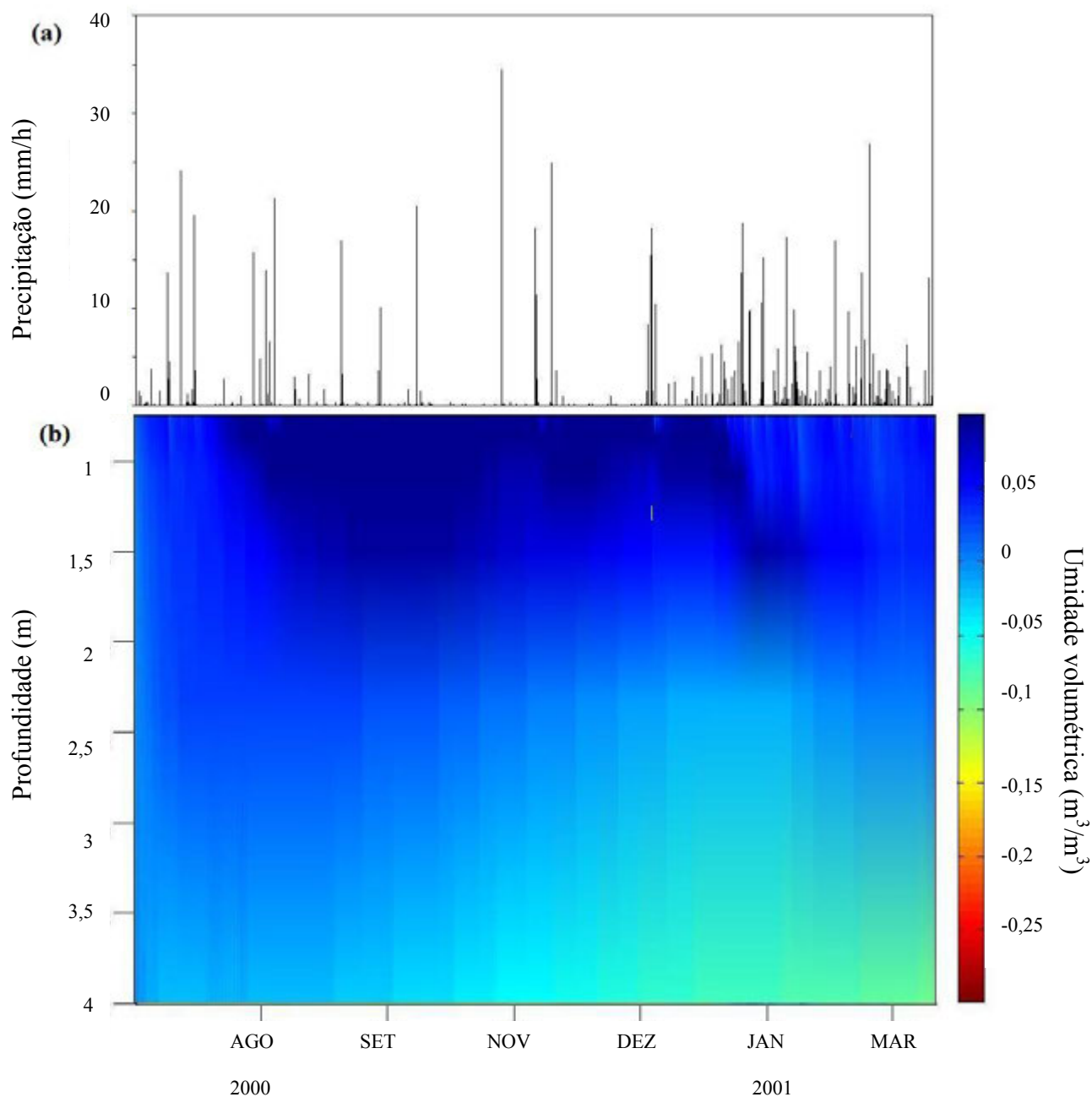


Figura 3.24 – Precipitação observada (em mm hora^{-1}) (a) e perfil da umidade volumétrica do solo (em $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) (b), para a diferença entre as simulações utilizando valores de granulometria do solo da versão 4.0 do Protocolo do LBA-DMIP e do 1º GRUPO, no período de 01/07/2000 a 21/03/2001. Flona do Tapajós km 83.

3.3.3. Discussão conjunta – Erros introduzidos pelas condições de contorno

A diferença do perfil da umidade volumétrica do solo entre as simulações calibradas, utilizando dados das propriedades físicas do solo estimadas através de um banco de dados global de granulometria do solo (1º GRUPO) e dos parâmetros obtidos por amostras de solo (2º GRUPO), mostra que quando o banco de dados global de granulometria do solo é usado pelo IBIS o perfil de solo (até 4 m de profundidade), durante eventos intensos e consecutivos de precipitação, fica mais úmido e durante períodos de ausência ou de menor intensidade de precipitação o perfil do solo fica mais seco (Figura 3.23).

O IBIS utiliza a granulometria do solo (% areia, argila e silte) para classificar o solo e depois estabelecer as suas propriedades físicas (porosidade, capacidade de campo, ponto de muita, etc.). Quando a granulometria do solo é modificada, o modelo passa a utilizar outra classe de solo e outros valores de propriedades físicas. No Protocolo do Projeto de Intercomparação de Modelos de Superfície na Amazônia (*LBA-DMIP*), versão 3.0, o solo do sítio FNT-K83 é classificado como argiloso arenoso, com 52% de areia, 42% de argila e 6% de silte. Já na versão 4.0 do mesmo protocolo, os valores de granulometria para FNT-K83 são 18% de areia, 80% de argila e 2% de silte, com base em KELLER *et al.* (2005), que o IBIS classifica como solo argiloso. A diferença entre a simulação utilizando os tipos de solo argiloso arenoso e argiloso mostra que o IBIS gera um perfil de umidade volumétrica mais úmido em todo o período, especialmente nos primeiros 2 m de profundidade (Figura 3.24).

4 RESUMO E CONCLUSÕES

Considerando que os modelos de micrometeorologia de ecossistemas requerem parâmetros, e estes precisam ser medidos ou estimados, faz-se necessário que os dois principais parâmetros do sistema radicular, a profundidade máxima (Z_R) e a distribuição vertical de raízes finas (β_2), sejam bem representados para que os modelos possam simular corretamente a interação atmosfera-biosfera. A falta de observações do sistema radicular e a grande disponibilidade dos dados de fluxos de energia motivaram o presente trabalho. Na ausência das observações de campo, os parâmetros relacionados ao sistema radicular podem ser estimados através de métodos indiretos.

Neste trabalho visou-se desenvolver uma metodologia para estimar os parâmetros Z_R e β_2 baseando-se na premissa que a partição do saldo de radiação (R_n) entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE) é função do estresse hídrico, o qual depende da profundidade e da distribuição vertical do sistema radicular. A

metodologia foi testada para um sítio de floresta tropical Amazônica, na Floresta Nacional do Tapajós K83 (FNT-K83), utilizando-se parâmetros de solo obtidos a partir de dados global de granulometria do solo, parâmetros obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente e medidas do perfil de temperatura e umidade do solo, para a calibração do IBIS.

O diferencial deste trabalho é o uso de três tipos de dados de solos, com condições de contorno, com diferentes níveis de incertezas para estimar os parâmetros Z_R e β_2 . No primeiro grupo de simulações, o modelo opera no modo normal, simulando LE utilizando dados das propriedades físicas do solo estimadas através de um banco de dados global de granulometria dos solos, por meio de tabelas de valores representativos das propriedades físicas do solo para cada tipo granulométrico (1º GRUPO). No segundo grupo de simulações, o modelo utiliza parâmetros de solo, obtidos através da determinação da curva de retenção de água no solo a partir de amostras de solo coletadas localmente, para simular LE (2º GRUPO). No terceiro grupo de simulações, o modelo simula LE forçando as condições de solo com dados observados de temperatura e umidade do solo, medidos no sítio experimental FNT-K83(3º GRUPO).

Para o procedimento de calibração buscou-se a otimização dos coeficientes de correlação (ρ), inclinação da reta de regressão (α), erro absoluto médio (MAE), viés máximo entre os dados simulados e observados ($B_{máx}$) e a minimização da função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$), além da visualização dos gráficos de dispersão, valores cumulativos e variação diária entre os dados simulados e observados e do perfil da umidade volumétrica do solo.

Este trabalho também traz, para o contexto da condição de contorno, a discussão sobre a qualidade dos dados utilizados para caracterizar as propriedades físicas do solo. Como o procedimento de calibração é muito mais bem sucedido quando o perfil de umidade do solo é bem representado, este trabalho utilizou a diferença entre os perfis de umidade volumétrica, com diferentes condições de contorno, para avaliar o erro introduzido no modelo pelo uso destas condições.

Primeiramente, foi realizada uma análise de sensibilidade do modelo aos parâmetros a serem calibrados, Z_R e β_2 , na FNT-K83. Dessa análise foi possível verificar que o modelo apresenta sensibilidade aos parâmetros Z_R e β_2 . Na simulação de LE, para as três condições de contorno, o modelo apresentou sensibilidade ao parâmetro Z_R . As versões que utilizaram o banco de dados global de granulometria do solo (1º GRUPO) e parâmetros obtidos através de amostra de solo (2º GRUPO) também apresentaram sensibilidade ao β_2 , enquanto que simulação que utiliza dados de temperatura e umidade do solo para forçar o modelo (3º GRUPO) não apresentou sensibilidade ao β_2 . Quando os dados de umidade e temperatura do solo são assimilados pelo modelo, as linhas do código que calculam os valores de temperatura e umidade do solo, na sub-rotina de física do solo do IBIS são comentadas e o β_2 não influencia na simulação de LE, este comportamento pode explicar a falta de sensibilidade do modelo ao β_2 nas simulação do 3º GRUPO.

Posteriormente, foi realizado um procedimento de calibração envolvendo cerca de 120 simulações para as três condições de contorno. Para cada procedimento de calibração, utilizando estas condições de contorno, foi obtido um conjunto de parâmetros Z_R e β_2 que minimizou a função de otimização ($F(Z_R, \beta_2)$) e as demais estatísticas, ρ , α , MAE e $B_{máx}$. O novo conjunto de parâmetros ajustados do modelo IBIS proporcionou

melhores resultados na determinação de LE, exceto para os picos. Isto pode ser observado com a diminuição de MAE , $B_{máx}$ e $F(Z_R, \beta_2)$, melhorias em ρ e α , assim como na diminuição da dispersão, no comportamento cumulativo e na variação diária dos fluxos. Mesmos após calibrado, com as diferentes condições de contorno, o modelo ainda continuou tendo dificuldades em simular os picos de LE, talvez por um problema de turbulência.

A metodologia empregada para estimar os parâmetros β_2 e Z_R , a partir da calibração do modelo IBIS, apresentou resultados diferentes de acordo com o tipo de dado utilizado para caracterizar as propriedades físicas do solo. Os parâmetros calibrados no IBIS, utilizando o banco de dados global de granulometria do solo, foram $Z_R = 4$ m e $\beta_2 = 0,999$. Neste caso, a incerteza na estimativa é maior porque as propriedades do solo são determinadas pelo bando de dados global e não localmente. Os parâmetros calibrados no IBIS, utilizando amostras de solo coletadas localmente, foram de $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$. Neste caso, a incerteza na estimativa é reduzida, pois as propriedades físicas do solo foram determinadas localmente. Já os valores de $Z_R = 3$ m e $\beta_2 = 0,999$ foram encontrados na calibração que utilizou dados de umidade e temperatura do solo para forçar o modelo, neste caso, a incerteza na estimativa é mínima, mas devido às limitações de profundidade da medição dos dados observados e da falta de sensibilidade ao β_2 , o processo de calibração utilizando estes dados ficou comprometido.

Os resultados simulados pelo modelo com novo conjunto de parâmetros calibrados, com os três diferentes tipos de dados de solo, ajustaram-se melhor aos dados observados de LE do que os parâmetros inicialmente utilizados pelo modelo. Apesar de apresentar uma incerteza menor na estimativa de Z_R e β_2 a calibração do IBIS que utilizou os dados de umidade e temperatura do solo não pode ser considerada a melhor estimativa,

pois o parâmetro Z_R só pôde ser calibrado no máximo até 3m de profundidade, uma vez que os dados observados de umidade e temperatura do solo só atingiam esta profundidade, com isto, esta calibração ficou limitada a esta profundidade. Assim, a melhor estimativa ($Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$) para Z_R e β_2 foi alcançada quando a condição de contorno, dos parâmetros de solo obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente, foi utilizada.

Em geral, conclui-se que os parâmetros estimados são $Z_R = 30$ m e $\beta_2 = 0,999$. Esta estimativa indica a distribuição de raízes finas é mais uniforme ao longo do perfil de solo e que a profundidade máxima de raiz pode chegar até 30 m de profundidade, na Floresta Nacional do Tapajós km 83.

O perfil da umidade volumétrica do solo simulado pelo IBIS é bastante modificado de acordo com o tipo de condição de contorno utilizada para representar as propriedades físicas do solo. O perfil da umidade volumétrica do solo gerado pela simulação, que utiliza parâmetros de solo obtidos a partir de banco de dados global de granulometria do solo (1º GRUPO) ao invés de parâmetros de solo obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente (2º GRUPO), mostra que o banco de dados global de granulometria do solo introduz incertezas na simulação da umidade volumétrica do solo no IBIS, gerando um perfil de umidade mais úmido durante eventos intensos e consecutivos de precipitação e mais seco nos períodos de ausência ou de pouca precipitação. Este comportamento está relacionado à classe textural do solo utilizada no 1º GRUPO de simulações que é característica de um solo de textura mais grossa, o que explica o comportamento do IBIS em gerar perfis de solo mais úmido durante períodos de maior precipitação e perfis de solo mais secos nos períodos de menor precipitação, já

que este tipo de solo retém menos a água e permite que a água infiltre mais rápido no perfil do solo.

O IBIS utiliza a granulometria do solo (% areia, argila e silte) para classificar o solo e depois estabelecer as suas propriedades físicas (porosidade, capacidade de campo, ponto de muita, etc.). Quando a granulometria do solo é modificada o modelo passa a utilizar outra classe de solo e outros valores de propriedades físicas. A diferença entre a utilização da granulometria de um solo argiloso e de um solo arenoso argiloso no IBIS é que quando o modelo utiliza o solo argiloso para gerar o perfil de umidade do solo, ele gera um perfil de umidade volumétrica mais úmido em todo o período, especialmente no primeiro 2 m de profundidade. Este comportamento do IBIS em umidificar mais o solo quando o solo de textura argilosa é utilizado, deve-se ao fato dos solos de textura argilosa ser compreendidos em sua maior parte de poros menores, esta característica oferece melhor condição para reter a água nos solo, já que a resistência à passagem através da superfície tende a ser maior que no solo arenoso argiloso.

A escolha das condições de contorno, associadas às propriedades físicas do solo, influenciam o perfil de umidade volumétrica do solo simulado pelo IBIS, por conseguinte, a quantidade de água disponível para os processos de transpiração e evaporação. Os resultados deste trabalho mostram que a melhor condição de contorno, com menor nível de incerteza, seria a que utiliza dados observados do perfil de temperatura e umidade do solo para alimentar o modelo, mas estes dados são escassos, restrito a alguns experimentos e localidades. Porém, a condição de contorno que utiliza parâmetros de solo obtidos a partir de amostras de solo coletadas localmente produz

resultados satisfatórios, quando comparados aos dados observados de LE e da umidade volumétrica, e estas amostras podem ser facilmente obtidas no local do experimento.

As conclusões obtidas no presente trabalho e as dificuldades encontradas durante sua execução têm importantes implicações. Em primeiro lugar, provavelmente é real a necessidade de compreender melhor o sistema radicular nos ecossistemas em geral. Isto envolveria, por exemplo, mais medições e especificações da profundidade e distribuição do sistema radicular para validar as estimativas destes parâmetros. Em segundo lugar, a criação de um protocolo de medições em experimentos de campo, que padronizasse nestes experimentos algumas medições básicas, como amostras de solo, que poderiam ser utilizadas para estimar parâmetros do solo para serem utilizados pelos modelos.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Anderson, L.O., Malhi, Y., Aragão, L.E.O.C., Ladle, R., Arai, E., Barbier, M. & Phillips, O., Remote sensing detection of droughts in Amazonian Forest canopies. *New Phytologist*, 187, 733-750, 2010.

Arora, V. K., & Boer, G.J., A representation of variable root distribution in dynamic vegetation models, *Earth Interaction*, 7, 19 pp, 2003.

Bachelet, D., Neilson, R.P., Lenihan, J.M. & Drapek, R.J., Climate change effects on vegetation distribution and carbon budget in the US. *Ecosystems*, 4, 164-185, 2001.

Belk, E.L. & Markewitz, D., Saturated soil hydraulic conductivity, Seca Floresta, TNF, Brazil: 2001. Data set. Available on-line from LBA data and information system, National Institute for Space Research (INPE/CPTEC), Cachoeira Paulista, São Paulo, Brazil, 2008.

Briggs, L.J. & Mclane, J.W., Moisture equivalent determinations and their application. *American Society of Agronomy*, 2, 138-147, 1910.

Bruno, R.D., da Rocha, H.R., de Freitas, H.C., Goulden, M.L. & Miller, S.D., Soil dynamics in an eastern Amazonian tropical forest. *Hydrological Processes*, 20, 2477-2489, 2006.

Campbell, G.S. & Norman, J.M., An introduction to environmental biophysics. 2nd ed. Springer Verlag, New York, 1997.

Canadell, J., Jackson, R.B., Ehleringer, H.A., Sala, O.E. & Schulze, E.D., Maximum rooting depth of vegetation types at the global scale. *Oecologia*, 108, 583-595, 1996.

Chauvel, A., Vital, A.R.T., Lucas, Y., Desjardins, T., Franken, W.K., Luizão, F.J., Araguás, L.A., Rozanski, K., Bedmar, A.P. O Papel das Raízes no Ciclo Hidrológico da Floresta Amazônica. Anais do VII Congresso Brasileiro de Meteorologia: São Paulo, 298–302, 1992.

Chen, T.H, et al., Cabauw experimental results from the project for intercomparison of land-surface parameterization schemes. *Journal of climate*, 10, 1194-1215, 1997.

Cosby, B.J., Hornberger, G.M., Clapp, R.B. & Ginn, T.R., A statistical exploration of the relationships of soil moisture characteristics to the physical properties of soils. *Water Resour. Res.*, 20, 682-690, 1984.

Daly, C., Bachelet, D., Lenihan, J., Neilson, R., Parton, W., Ojima, D., Dynamic simulation of tree-grass interactions for global change studies. *Ecol. Appl.*, 10, 449-469, 2000.

DA Rocha, H.R., Goulden, 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 Amazonia. *Ecol. Appl.*, 14, 22-32, 2004.

Delire, C., Calvet, J.-C., Noilhan, J., Wright, I., Manzi, A., & Nobre, C., Physical properties of Amazonian soils: A modeling study using the Anglo-Brazilian Amazonian climate observation study data. *J. Geophys. Res.*, 102, 119-133, 1997.

Delire, C., & Foley, J.A., Evaluating the performance of a land surface / ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *J. Geophys. Res.*, 104, 16.895-16.909, 1999.

Desborough, C.E., The impact of root weighting on the response of transpiration to moisture stress in land surface schemes. *Monthly Weather Review*, 125, 1920-1930, 1997.

Dickinson, R.E., A. Henderson-Sellers, & Kennedy, P.J., Biosphere Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR Community Climate Model *tech. rep.*, NCAR, Boulder, CO, 1993.

Duan, Q., Schaake, J., Andréassian, V., Franks, S., Goteti, G., Gupta, H.V., Gusev, Y.M, Habets, F., Hall, A., Hay, L., Hogue, T., Huang, M., Leavesley, G., Liang, X., Nasonova, O.N., Noilhan, J., Oudin, L., Sorooshian, S., Wagener, T., & Wood, E.F., Model parameter estimation experiment (MOPEX): An overview of science strategy and major results from the second and third workshop. *Journal of Hydrology*, 320, 3-17, 2006.

Farquhar, G.D., & Sharkey, T.D., Stomatal conductance and photosyntheses. *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 33, 317-345, 1982.

Farquhar, G.D., Caemmerer, V.S., & Berry, J.A., A biogeochemical model of photosynthetic CO₂ assimilation in leaves of C₃ species, *Ann. Rev. Plant Physiol.*, 149, 78-90, 1980.

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.

Goulden, M.L., Miller, S.D., Menton, M.C., da Rocha, H.R., & Freitas, H.C., Diel and seasonal patterns of tropical forest CO₂ exchange. *Ecological Applications*, 14, S42-S54, 2004.

Harper, A.B., Denning, A.S., Baker, I.T., Branson, M.D., Prihodko, L. & Randall, D.A., Role of deep soil moisture in modulating climate in the Amazon rainforest. *Geophysical Research Letters*, 37, 1-6, 2010.

Hernandez Filho, P., Y.E. Shimabukuro, & D.C.L. Lee., Final report on the forest inventory project at the Tapajós National Forest. INPE, São José dos Campos, SP, Brasil. 1993.

Hodnett, M.G., da Silva, L.P., da Rocha, H.R., Senna, R.C., Seasonal soil water changes beneath central Amazonian rainforest and pasture *Journal of Hydrology*, 170, 233-254, 1995.

Hogue, T., Model parameter experiment begins new phase. *EOS* 85, 217-218, 2004.

Imbuzeiro, H.M.A., Calibração do modelo IBIS na floresta Amazônica usando múltiplos sítios. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 67p., Viçosa, 2005.

Jackson, R.B., Canadell, J., Ehleringer, J.R., Mooney, H.A., Sala, O.E., & Schulze, E.D., A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. *Oecologia*, 108, 389-411, 1996.

Jackson, R.B., Mooney, H.A., & Schulze, E.D., A global budget for fine root biomass, surface area, and nutrient contents. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 94, 7362-7366, 1997.

Jipp, P.H., Nepstad, D.C., Cassel, D.K., de Carvalho, C.R., Deep soil moisture storage and transpiration in forests and pastures of seasonally dry Amazônia. *Climatic Change*, 39, 395-412, 1998.

Kaduk, J.D. & Heimann, M., A prognostic phenology scheme for global terrestrial carbon cycle models. *Climate Research*, 6, 1-19, 1996.

Keller, M., R. Varner, J. Dias, and H. Silva, Soil-atmosphere exchange of nitrous oxide, methane, and carbon dioxide in logged and undisturbed forest in the Tapajós National Forest, Brazil, *Earth Interactions*, 9 (23), 1-28, 2005.

Krinner, G., Viovy, N., de Noblet-Ducoudre, N., Ogee, J., Polcher, J., Friedlingstein, P., Ciais, P., Sitch, S., & Prentice, I.C., A dynamic global vegetation model for studies of the coupled atmosphere-biosphere system, *Global Biogeochem. Cycles*, 19, 2003.

Kleidon, A. & Heimann, M., A method of determining rooting depth from a terrestrial biosphere model and its impacts on the global waterland carbon cycle. *Global Change Biol.*, 4, 275-286, 1998.

Kleidon, A. & Heimann, M., Deep-rooted vegetation, Amazonian deforestation, and climate: results from a modeling study. *Global Ecology and Biogeography*, 8, 397-405, 1999.

Kleidon, A., Global datasets of rooting zone depth inferred from inverse methods. *Journal of Climate*, 17, 2714-2722, 2004.

Kruijt, B., Elbers, J.A., von Randow, C., Araujo, A.C., Oliveira, P.J., Gulf, A., Manzi, A.O., Nobre, A.D., Kabat, P., & Moors, E.J., The robustness of eddy correlation fluxes for Amazon rain forest conditions. *Ecol. Appl.*, 14, 101-113, 2004.

Kucharik, C.J., Foley, J.A., Delire, C., Fisher, V.A., Coe, M.T., Gower, S.T., Lenters, J.D., Youngmolling, C., Norman, J. M., & Ramankutty, N., Testing the performance of a dynamic global ecosystem model: water balance, carbon balance and vegetation structure. *Global Biogeochem. Cycles*, 14, 795-825, 2000.

Larcher, W., *Ecofisiologia Vegetal*. Ed. RIMA, São Carlos, SP, 2000.

LBA-Data Model Intercomparison Project (LBA-DMIP). In: <http://www.climatemodeling.org/lba-mip/>, acessado em janeiro de 2010.

Leuning, R., A critical appraisal of a combined stomatal-photosynthesis model for C3 plants. *Plant. Cell Environ.*, 18, 339-355, 1995.

Markewitz, D., Devine, S., Davidson, E.A. Brando, P. & Nepstad, D.C., Soil moisture depletion under simulated drought in the Amazon: impacts on deep root uptake. *New Phytologist*, 187, 592-607, 2010.

Meinzer, F.C., Goldstein, G., Franco, A.C., Bustamante, M., Ingler, E., Jackson, P., Caldas, L. & Rundel, P.W., Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado wood species. *Functional Ecology*, 13, 273-282, 1999.

Miller, S.D., Goulden, M.L., Menton, M.C., da Rocha, H.R., de Freitas, H.C., Silva Figueira, A.M. & Dias de Sousa, C.A., Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. *Ecological Applications* 14, 114-126, 2004.

Milly, P.C.D. & Dunne, K.A., Sensitivity of the global water cycle to the water-holding capacity of land. *Journal of Climate*, 7, 506-526, 1994.

Nepstad, D.C., de Carvalho, C.R., Davidson, E.A., Jipp, P.H., Lefebvre, P.A., Negreiros, G.H., Silva, E.D., Stone, T.A., Trumbore, S.E. & Vieira, S. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. *Nature*, 372,666–669, 1994.

Nepstad, D.C., Moutinho, P., Dias-Filho, M.B., Davidson, E., Cardinot, G., Markewitz, D., Figueiredo, R., Vianna, N., Chambers, J., Ray, D., Guerreiros, J.B., Lefebvre, P., Sternberg, L., Moreira, M., Barros, L., Ishida, F.Y., Tohlver, I., Belk, E., Kalif, K. & Schwalbe, K., The effects of partial throughfall exclusion on canopy

processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest. *Journal of Geophysical Research*, 107, 8085, 2002.

Nepstad, D., Lefebvre, P., Silva, U.L., Tomasella, J., Schlesinger, P., Solorzano, L., Moutinho, P., Ray, D., Benito, J.G., Amazon drought and its implications for forest flammability and tree growth: a basin-wide analysis. *Global Change Biology*, 10, 704–717, 2004.

Persson, H. The distribution and productivity of fine roots in boreal forests. *Plant Soil* 71, 87-10, 1983.

Pitman, A.J. et al., Key results and implications from phase 1(c) of the project for intercomparison of land-surface parametrization schemes. *Climate Dynamics*, 15, 673-684, 1999.

Potter, C. S., Randerson, J. T., Field, C. B., Matson, P. A., Vitousek, P. M., Mooney, H. A. & Klooster, S. A., Terrestrial Ecosystem Process Model Based on Global Satellite and Surface Data. *Global Biogeochem. Cycles* 7, 811-841, 1993.

Raich, J.W., Rastetter, E.B., Melillo, J.M., Kicklighter, D.W., Steudler, P.A., Peterson, B.J., Grace, A.L., Moore III, B, Vorosmarty, C.S., Potential net primary productivity in South America: Application of a global model. *Ecological Applications* 1, 399-429, 1991.

Rawls, W.J., Ahuja, J.R., & Brakensiek, D.L., Estimating soil hydraulic properties from soils data. Workshop on Indirect Methods for Estimating the Hydraulic Properties of Unsaturated Soils, Riverside, CA, Proceedings p.329-341, 1992.

Richards, L.A., Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1, 318, 1931.

Roeckner, E., Arpe, K., Bengtsson, L., Christoph, M., Claussen, M., Dümenil, L., Esch, M., Giorgetta, M., Schlese, U. & Schulzweida, U., The atmospheric general circulation model ECHAM-4: Model description and simulation of present-day climate. Report 218, *Max-Planck Institut für Meteorologie*, Hamburg, 90 pp, 1996.

Saleska, S.R., Didan, K., Huete, A.R. & da Rocha, H.R., Amazon forest green-up during 2005 drought. *Science*, 318, 612, 2007.

Sellers, P.J., Randall, D.A., Collatz, G.J., Berry, J.A., Field, C.B., Dazlich, D.A., Zhang, C., Collello, G.D, & Bounoua, L., A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs: Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705, 1996.

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.

Slater, A.G., et al., The representation of snow in land surface schemes: results from PILPS 2(d). *American Meteorological Society*, 2, 7-25, 2001.

Stone, E.L. & Kalisz, P.J., On the maximum extent of tree roots. *For. Ecol. Mgmt*, 46, 59-102, 1991.

Richards, L.A., Capillary conduction of liquids through porous mediums. *Journal of Applied Physics*, 1, 318, 1931.

Sitch, S. et al., Evaluation of ecosystem dynamics, plant geography and terrestrial carbon cycling in the LPJ dynamic global vegetation model. *Global Change Biol.* 9, 161–185, 2003.

Tomasella, J. & Hodnett, M.G., Soil hydraulic properties and van Genuchten parameters for an oxisol under pasture in central Amazonia. In *Amazonian Deforestation and Climate*, Gash JHC, Nobre CA, Roberts JM, Victoria RL (eds). John Wiley and Sons: West Sussex, 101–124, 1996.

Varejão, C.G.V., Calibração hierárquica multiobjetiva de um modelo de micrometeorologia e de dinâmica de ecossistemas terrestres. Dissertação de mestrado em Meteorologia Agrícola. 95p., Viçosa, 2009.

Woodward, F.I. & Lomas, M.R., Vegetation dynamics - simulating responses to climate change. *Biological Review*, 79, 643–670, 2004.

Zeng, X., Dai, Y.-J., Dickinson, R.E. & M. Shaikh, The role of root distribution for land climate simulation. *Geophys. Res. Lett.*, 25, 4533–4536, 1998.