

HERNANI JOSÉ BRAZÃO RODRIGUES

**BALANÇO DE RADIAÇÃO, ENERGIA E FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM  
ECOSSISTEMA DE MANGUEZAL NA AMAZÔNIA**

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  
2006**

**HERNANI JOSÉ BRAZÃO RODRIGUES**

**BALANÇO DE RADIAÇÃO, ENERGIA E FLUXO DE CO<sub>2</sub> EM  
ECOSSISTEMA DE MANGUEZAL NA AMAZÔNIA**

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*.

**APROVADA: 14 de agosto de 2006.**

---

**Prof. João Batista Miranda Ribeiro  
(Co-Orientador)**

---

**Prof. Antônio Carlos Lola da Costa  
(Co-Orientador)**

---

**Pesq. Williams Pinto Marques Ferreira**

---

**Doutora Francisca Zenaide de Lima**

---

**Prof. José Maria Nogueira da Costa  
(Orientador)**

A Deus, por tudo...

À minha esposa, Aurení Rodrigues pelo amor, compreensão, apoio e determinação de assumir tantas responsabilidades durante minha ausência.

A meus filhos, Alícia Andrezza e Lucas Calábria por todo carinho e alegria que me proporcionam nessa vida.

Aos meus pais, irmã e irmãos que sempre acreditaram em mim.

## **AGRADECIMENTOS**

Ao Professor Dr. José Maria Nogueira da Costa, pelos ensinamentos, incentivo e dedicada orientação na elaboração desse estudo.

Ao Projeto LBA-ECOBIOOMA pela oportunidade de utilização da mais longa e melhor série de dados coletados em ecossistema de manguezal amazônico.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e ao Programa de Qualificação Interinstitucional (CAPES-PQI) pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores, Dr. João Batista Miranda Ribeiro e Dr. Antonio Carlos Lôla da Costa, pelas sugestões, apoio e incentivo na condução desse estudo e merecedores de meu reconhecimento pela árdua tarefa de implantar um sítio experimental em ecossistema de manguezal.

À Universidade Federal de Viçosa pela oportunidade oferecida e a todos os Professores do Departamento de Meteorologia Agrícola pelos ensinamentos recebidos.

Ao Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Pará pela confiança na liberação para o doutoramento e em especial ao Prof. Dr. Edson Rocha pelo crédito de confiança sendo meu fiador junto a UFPA.

Aos meus Pais Henrique Rodrigues e Alice Brazão Rodrigues pelo exemplo de caráter, dignidade, religiosidade e honestidade e por me ofertarem tudo que lhes foi possível.

A todos os colegas de pós-graduação que de alguma forma contribuíram para a realização desse estudo, em especial a Marcos Antonio Vanderlei Silva, José Danilo, Rosandro Minuzzi, Josinaldo Ribeiro, Ricardo Guimarães, Vanda Andrade e Leonardo Neves.

## **BIOGRAFIA**

HERNANI JOSÉ BRAZÃO RODRIGUES, filho de Henrique Rodrigues e Alice Brazão Rodrigues, nasceu em Belém do Pará em 22 de janeiro de 1963.

Em janeiro de 1991, graduou-se em Meteorologia pela Universidade Federal do Pará.

Em setembro de 1991, concluiu o curso de Especialização em Métodos Estatísticos Aplicados à Meteorologia e Climatologia, pela Universidade Federal da Paraíba.

Em 1993 ingressou no curso de Mestrado em Meteorologia da Universidade Federal da Paraíba, defendendo sua Dissertação em outubro de 1995.

De novembro de 1995 a novembro de 1996 atuou como Meteorologista do Núcleo de Meteorologia e Recursos Hídricos do Estado de Alagoas.

Em dezembro de 1996 entrou para o quadro de Professores do Departamento de Meteorologia da Universidade Federal do Pará.

Em agosto de 2002 iniciou o curso de Doutorado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa-MG, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, submetendo-se à defesa de tese em 14 de agosto de 2006.

## CONTEÚDO

	<b>Página</b>
LISTA DE FIGURAS.....	viii
LISTA DE SÍMBOLOS.....	xii
LISTA DE TABELAS.....	xvi
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS.....	xviii
RESUMO.....	xx
ABSTRACT.....	xxii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	6
2.1. O que é o manguezal.....	6
2.2. Distribuição dos manguezais.....	8
2.3. Sistema de medição de fluxo de massa e energia.....	9
2.4. Modelos de simulação de fluxos.....	12
2.5. Balanço de radiação e partição da energia.....	15
2.6. Determinantes ambientais do ecossistema de manguezal.....	18
2.7. Condutância estomática.....	21
2.8. Influência de variáveis meteorológicas na magnitude dos fluxos.....	22
2.9. Impactos do desmatamento sobre a climatologia regional.....	23
3. MATERIAIS E MÉTODOS.....	27
3.1. Localização e descrição do sítio experimental.....	27
3.1.1. Manguezal natural.....	28
3.1.2. Manguezal degradado.....	29
3.2. Medições e sistema de aquisição de dados.....	30

	<b>Página</b>
3.2.1. Medição no manguezal natural.....	30
3.2.2. Medições no manguezal degradado.....	31
3.2.3. Estação Meteorológica Automática (EMA).....	31
3.2.4. Sistema de medição de fluxos (EDISOL).....	33
3.2.5. Anemômetro sônico de três eixos.....	34
3.2.6. Analisador de gás a infravermelho (IRGA).....	35
3.2.6.1. Princípio de funcionamento.....	36
3.2.6.2. Método de calibração.....	38
3.2.7. Cálculo dos fluxos.....	38
3.2.8. O método de correlação de vórtices turbulentos.....	39
3.3. Modelos aplicados para balanço de radiação.....	40
3.3.1. Modelo de HARGREAVES e SAMANI.....	40
3.3.2. Modelo de BRISTOW e CAMPBELL.....	41
3.3.3. Modelo baseado em BRUTSAERT.....	42
3.3.4. Modelo baseado em BRUNT.....	44
3.3.5. Modelo baseado em BRUIN.....	45
3.4. Modelos empíricos aplicados para balanço de energia.....	46
3.4.1. Modelo baseado em SHUTTLEWORTH.....	46
3.4.2. Modelo baseado em BRUIN e HOLTSLAG.....	49
3.4.3. Modelo baseado em PENMAN e MONTEITH.....	50
3.5. Partição da energia.....	53
3.6. Condutância estomática.....	53
3.7. Déficit de umidade específica.....	54
3.8. Fluxo de calor no solo.....	54
3.9. Análise estatística.....	55
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	57
4.1. Distribuição da precipitação.....	57
4.2. Radiação solar global.....	58
4.3. Radiação fotossinteticamente ativa.....	60
4.4. Simulação da radiação solar global em base diária.....	61

	<b>Página</b>
4.5. Simulação do balanço de radiação de onda longa em base diária.....	64
4.6. Fluxo de calor sensível.....	71
4.6.1. Simulação do fluxo de calor sensível em base horária.....	71
4.6.2. Simulação do fluxo de calor sensível em base média horária.....	103
4.6.3. Simulação do fluxo de calor sensível em base diária.....	110
4.7. Fluxo de calor latente.....	117
4.7.1. Simulação do fluxo de calor latente em base horária.....	117
4.7.2. Simulação do fluxo de calor latente em base média horária.....	149
4.7.3. Simulação do fluxo de calor latente em base média diária.....	156
4.8. Variação sazonal e partição dos componentes do balanço de energia.....	163
4.9. Variação sazonal, relações de dependência entre condutância estomática e variáveis meteorológicas no manguezal.....	171
4.10. Características e relações entre fluxo de carbono e variáveis Meteorológicas.....	176
4.11. Alterações micrometeorológicas decorrentes da degradação no manguezal.....	182
5. CONCLUSÕES.....	189
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	193

## LISTA DE FIGURAS

<b>Número</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
1	Distribuição mundial dos manguezais.	9
2	Mapa da península bragantina e localização dos sítios experimentais de mangue natural e degradado.	27
3	Torre micrometeorológica instalada no manguezal natural de Bragança.	28
4	Vista parcial da área degradada do manguezal de Bragança-PA.	30
5	Estação Meteorológica Automática (EMA) instalada no manguezal natural.	32
6	Sistema EDISOL instalado no manguezal natural de Bragança.	34
7	Esquema operacional do IRGA em detalhes.	37
8	Distribuição da precipitação medida no sítio experimental e série climatológica da estação de Tracuateua.	58
9	Variação sazonal da radiação solar global média e máxima em associação com a distribuição de precipitação para o mesmo período.	58
10	Marcha diária da radiação solar global entre (07:00 e 18:00 h) correspondente ao período chuvoso (a) e menos chuvoso (b).	59
11	Variação média horária da radiação fotossinteticamente ativa, correspondente ao período chuvoso (a) e menos chuvoso (b).	60
12	Estimativas da variação diária da radiação solar global, utilizando modelos empíricos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell, associada à precipitação medida entre os meses de novembro de 2002 a agosto de 2003.	62
13	Estimativas da variação diária do balanço de radiação de onda longa, utilizando modelos empíricos baseados em Brutsaert, Brunt e Bruin entre os meses de novembro de 2002 a agosto de 2003.	65-69
14	Variação horária do fluxo de calor sensível para valores observados e simulados, utilizando o método de Shuttleworth entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	72-76

15	Variação horária do fluxo de calor sensível para valores observados e simulados, utilizando o método de Bruin-Holtslag entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	77-81
16	Variação horária do fluxo de calor sensível para valores observados e simulados, utilizando o método de Penman-Monteith entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	82-86
17	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor sensível, utilizando o método de Shuttleworth entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	87-91
18	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor sensível, utilizando o método de Bruin-Holtslag entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	92-96
19	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor sensível, utilizando o método de Penman-Monteith entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	97-101
20	Estimativa da variação média horária do fluxo de calor sensível, utilizando modelos empíricos baseados em Shuttleworth (H1), Bruin-Holtslag (H2) e Penman-Monteith (H3) entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	104-108
21	Estimativa da variação média diária do fluxo de calor sensível, utilizando modelos empíricos baseados em Shuttleworth (H1), Bruin-Holtslag (H2) e Penman-Monteith (H3) entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	111-115
22	Variação horária do fluxo de calor latente para valores observados e simulados, utilizando o método de Shuttleworth entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	118-122
23	Variação horária do fluxo de calor latente para valores observados e simulados, utilizando o método de Bruin-Holtslag entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	123-127
24	Variação horária do fluxo de calor latente para valores observados e simulados, utilizando o método de Penman-Monteith entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	128-132
25	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor latente, utilizando o método de Shuttleworth entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	133-137
26	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor latente, utilizando o método de Bruin-Holtslag entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	138-142

27	Gráficos de dispersão da variação horária do fluxo de calor latente, utilizando o método de Penman-Monteith entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	143-147
28	Estimativa da variação média horária do fluxo de calor latente, utilizando modelos empíricos baseados em Shuttleworth (H1), Bruin-Holtslag (H2) e Penman-Monteith (H3) entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	150-154
29	Estimativa da variação média diária do fluxo de calor latente, utilizando modelos empíricos sugeridos por Shuttleworth (H1), Bruin-Holtslag (H2) e Penman-Monteith (H3) entre os meses de nov_02 (a) e ago_03 (j).	157-161
30	Variação média horária do saldo de radiação, calor sensível e calor latente para os meses de nov.(a), dez.(b), jan.(c), fev.(d), mar.(e), abr.(f), mai.(g), jun.(h), jul.(i) e ago.(j).	164-168
31	Variação sazonal dos valores médios diários dos componentes do balanço de energia.	170
32	Variação sazonal da partição dos componentes do balanço de energia.	170
33	Comportamento médio diário da condutância estomática e déficit de pressão de vapor para o período chuvoso e menos chuvoso.	172
34	Gráficos de dispersão da variação média diária da condutância estomática e déficit de pressão de vapor para o período chuvoso e menos chuvoso.	172
35	Comportamento médio diário da condutância estomática e saldo de radiação para o período chuvoso e menos chuvoso.	173
36	Gráficos de dispersão da variação média diária da condutância estomática e saldo de radiação para o período chuvoso e menos chuvoso.	173
37	Comportamento médio diário da condutância estomática e vento para o período chuvoso e menos chuvoso.	174
38	Gráficos de dispersão da variação média diária da condutância estomática e vento para o período chuvoso e menos chuvoso.	174
39	Comportamento médio diário da condutância estomática e fluxo de calor latente para o período chuvoso (a) e menos chuvoso (b).	175

40	Gráficos de dispersão da variação média diária da condutância estomática e fluxo de calor latente para o período chuvoso (a) e menos chuvoso (b).	175
41	Variação sazonal dos ciclos diurno e noturno do fluxo de CO <sub>2</sub> entre os meses de novembro de 2002 a agosto de 2003.	177
42	Comportamento do balanço diário do fluxo de CO <sub>2</sub> correspondente a 20 dias do período chuvoso e menos chuvoso.	178
43	Variação sazonal dos fluxos de CO <sub>2</sub> e radiação fotossinteticamente ativa (PAR) entre os meses de novembro de 2002 a agosto de 2003.	178
44	Variação sazonal do fluxo de CO <sub>2</sub> e déficit de umidade específica correspondente ao ciclo diurno (a) e noturno (b).	179
45	Comportamento da variação sazonal do fluxo médio mensal de CO <sub>2</sub> e condutância estomática em ecossistema de manguezal.	180
46	Variação sazonal noturna das taxas de respiração e a temperatura do ar para o período de novembro de 2002 a agosto de 2003.	181
47	Variação média diária do saldo de radiação nas áreas de manguezal natural e degradado.	182
48	Variação média horária da radiação solar global e saldo de radiação para as áreas de manguezal natural e degradado.	183
49	Variação média horária da temperatura do ar para as áreas de manguezal natural e degradado.	184
50	Variação média horária do déficit de umidade específica para as áreas de manguezal natural e degradado.	185
51	Variação média horária dos perfis de temperatura do solo nas áreas de manguezal natural e degradado.	186
52	Variação média horária do fluxo de calor no solo para as áreas de manguezal natural e degradado.	187
53	Variação média horária da velocidade do vento para as áreas de manguezal natural e degradado.	188

## LISTA DE SÍMBOLOS

<b>Símbolo</b>	<b>Significado</b>	<b>Unidade</b>
A	Constante (eq. 38)	$s^{1/2} m^{-1}$
b	Coefficiente empírico	-
$c_p$	Calor específico do ar a pressão constante	$J.kg^{-1},K^{-1}$
c	Coefficiente empírico	-
C	Cobertura de nuvens	décimos
$C_1$	Constante empírica	$h Pa^{-1/2}$
$C_2$	Constante empírica	$h Pa^{-1/2}$
CO <sub>2</sub>	Dióxido de carbono	$\mu mol.m^{-2},s^{-1}$
d	Deslocamento do plano zero	m
D	Largura característica da folha	m
$d_i$	Diferença entre valores estimados e observados	-
DPV	Déficit da pressão de vapor	h Pa
e	Pressão que o vapor d'água exerce na atmosfera	h Pa
$e_a$	Pressão de vapor em um nível de referência	h Pa
$e_s$	Pressão de saturação do vapor d'água	h Pa
$e_s(T_f)$	Pressão de saturação do vapor à temperatura da folha	h Pa
F	Energia utilizada na fotossíntese	$W.m^{-2}$
Fc	Fluxo vertical total de uma grandeza escalar C	-
$f_c$	Fluxo de carbono	$\mu mol.m^{-2},s^{-1}$
$F_{Rg}$	Influência da radiação solar na resistência estomática	-
G	Fluxo de calor no solo	$W.m^{-2}$
$g_s$	Condutância estomática	$m.s^{-1}$
$g_a$	Condutância aerodinâmica	$m.s^{-1}$
H	Fluxo de calor sensível	$W.m^{-2}$
$\mathcal{H}$	Ângulo horário do por-do-sol	graus
hc	Altura média das árvores	m
k	Constante de von Karmann	-
$K_{\downarrow}$	Radiação de onda curta emitida pelo sol	$W.m^{-2}$
$K_{\uparrow}$	Radiação de onda curta refletida	$W.m^{-2}$

$K^*$	Balanço de radiação de ondas curtas	$W.m^{-2}$
$k_{rs}$	Coefficiente empírico	-
$L$	Comprimento característico da folha	m
$L_{\downarrow}$	Radiação de onda longa emitida pela atmosfera	$W.m^{-2}$
$L_{\uparrow}$	Radiação de onda longa emitida pela superfície	$W.m^{-2}$
$L^*$	Balanço de radiação de ondas longas	$W.m^{-2}$
$L_n$	Balanço de radiação de ondas longas	$W.m^{-2}$
$LE$	Fluxo de calor latente	$W.m^{-2}$
$L_v$	Calor latente de vaporização da água	$J.kg^{-1}$
$m_a$	Massa de ar	kg
$m_v$	Massa de vapor d'água	g
$n$	Número de horas de brilho solar	h
$n$	Número de dados da amostra	-
$n'$	Coefficiente de atenuação para velocidade do vento	-
$n_j$	Dia Juliano	-
$N$	Duração do fotoperíodo	h
$P$	Pressão atmosférica	h Pa
$Q^*$	Radiação líquida	$W.m^{-2}$
$q$	Umidade específica	$g.kg^{-1}$
$q_s$	Umidade específica de saturação	$g.kg^{-1}$
$q'$	Desvio instantâneo da umidade específica	$g.kg^{-1}$
$R_a$	Radiação da atmosfera	$W.m^{-2}$
$R_{a,all}$	Radiação atmosférica sob presença de nuvens	$W.m^{-2}$
$R'_{a,clr}$	Radiação emitida pela atmosfera sob céu claro	$W.m^{-2}$
$r_a$	Resistência aerodinâmica global	$s.m^{-1}$
$r_b$	Resistência média da camada limite	$s.m^{-1}$
$r_e'$	Termo para determinação da resistência estomática	$mol.m^{-1}.s^{-1}$
$R_g$	Radiação solar global	$W.m^{-2}$
$R_n$	Saldo de radiação	$W.m^{-2}$
$R_o$	Radiação extraterrestre	$MJ.m^{-2}.d^{-1}$
$R_{par}$	Radiação fotossinteticamente ativa	$\mu mol.m^{-2}.s^{-1}$
$R_r$	Radiação solar refletida pela superfície	$W.m^{-2}$
$R_s$	Radiação solar emitida pela superfície	$W.m^{-2}$

$r_s$	Resistência estomática	$s.m^{-1}$
$r_{smin}$	Resistência estomática mínima	$s.m^{-1}$
$r_{smax}$	Resistência estomática máxima	$s.m^{-1}$
$S$	Energia armazenada no dossel	$W.m^{-2}$
$\mathcal{S}_i$	Desvio padrão das diferenças entre v. estimado e obs.	-
$S_n$	Balanço de radiação de ondas curtas	$W.m^{-2}$
$t$	Teste t-estatístico	-
$T$	Temperatura do ar em graus Kelvin	$^{\circ}K$
$T'$	Desvio instantâneo da temperatura média do ar	-
$T_{ar}$	Temperatura do ar	$^{\circ}C$
$T_s$	Temperatura do solo	$^{\circ}C$
$T_l$	Temperatura do solo na profundidade l	$^{\circ}C$
$T_{max}$	Temperatura máxima	$^{\circ}C$
$T_{min}$	Temperatura mínima	$^{\circ}C$
$T_t$	Transmitância atmosférica total	-
$T_{tmax}$	Máxima transmitância para céu claro	-
$T_{tf}$	Fração de $T_{tmax}$	-
$T_f$	Temperatura da folha	$^{\circ}C$
$T_{sf}$	Temperatura da superfície foliar	$^{\circ}K$
$T_{vs}$	Temperatura virtual sônica	$^{\circ}C$
$u$	Velocidade do vento no topo do dossel	$m.s^{-1}$
UR	Umidade relativa do ar	%
$u_z$	Velocidade do vento na altura z	$m.s^{-1}$
$V$	Velocidade do vento	$m.s^{-1}$
$w$	Componente vertical da velocidade do vento	$m.s^{-1}$
$w'$	Componente vertical das flutuações da vel. do vento	$m.s^{-1}$
$Z_e$	Altura da medida da umidade do ar	m
$Z_m$	Altura da medida da velocidade do vento	m
$Z_{oe}$	Comprimento de rugosidade p/ transp. de vapor e H	m
$Z_{om}$	Comprimento de rugosidade p/ transp. de momentum	m
$\alpha$	Albedo	-
$\beta$	Razão de Bowen	-
$\delta$	Declinação solar	graus

$\Delta$	Declividade da curva de pressão de saturação	$\text{h Pa}\cdot\text{C}^{-1}$
$\Delta q$	Déficit de umidade específica	$\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
$\overline{\Delta T}$	Valor médio mensal entre temperaturas extremas	$^{\circ}\text{C}$
$\varepsilon_a$	Emissividade atmosférica aparente	-
$\varepsilon_{sf}$	Emissividade da superfície foliar	-
$\gamma$	Constante psicrométrica	$\text{h Pa}\cdot\text{K}^{-1}$
$\lambda$	Condutibilidade térmica do solo	$\text{W}\cdot\text{m}^{-1},\text{K}^{-1}$
$\varphi$	Latitude	Graus
$\Theta$	Temperatura potencial	$^{\circ}\text{C}$
$\rho_a, \rho$	Densidade do ar ou massa específica do ar	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\rho_c$	Densidade do escalar C	$\text{Kg}\cdot\text{m}^{-3}$
$\Psi_{pd}$	Potencial hídrico foliar	M Pa
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzmann	$\text{W}\cdot\text{m}^{-2},\text{K}^{-4}$

## LISTA DE TABELAS

<b>Número</b>	<b>Descrição</b>	<b>Página</b>
1	Relação das variáveis meteorológicas coletadas na Estação Meteorológica Automática (EMA) com identificação dos sensores, unidade de medida e altura/profundidade de instalação.	31
2	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação diária da radiação solar global ( $R_g$ ), simulada pelos métodos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell.	63
3	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação diária da radiação solar global ( $R_g$ ) simulada pelos métodos de Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell.	63
4	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação diária do balanço de radiação de onda longa simulado pelos métodos de Brutsaert, Brunt e Bruin.	70
5	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação diária do balanço de radiação de onda longa simulado pelos métodos de Brutsaert, Brunt e Bruin	70
6	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação horária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	102
7	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação horária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	102
8	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação média horária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	109
9	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação média horária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	109

10	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação diária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	116
11	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação diária do fluxo de calor sensível simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	116
12	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação horária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	148
13	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação horária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	148
14	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação média horária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	155
15	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação média horária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	155
16	Valores do desvio médio do erro (MBE) e raiz do erro quadrado médio (RMSE) para variação diária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-Holtslag e Penman-Monteith.	162
17	Valores de t-calculado e t-crítico ao nível de significância de 95% e 99% de probabilidade para variação diária do fluxo de calor latente simulado pelos métodos de Shuttleworth, Bruin-holtslag e Penman-Monteith.	162
18	Valores médios diários da fração do saldo de radiação utilizado sob a forma de calor latente e calor sensível em sítios experimentais na floresta Amazônica.	169
19	Valores médios diários dos componentes do balanço de energia e partição do saldo de radiação em calor sensível e calor latente para o ecossistema de manguezal.	169
20	Valores médios, máximos, mínimos, amplitudes e variação média diurna e noturna da temperatura do ar em área de manguezal	184

natural e degradado.

### LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ABRACOS	Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study
B-H	Bruin-Holtslag
B-C	Bristow-Campbell
BOREAS	Boreal Ecosystem-Atmosphere Study
CANOAK	Model biophysical to investigate how fluxes and concentration profiles of carbon vary on diurnal and seasonal time scales.
EMA	Estação Meteorológica Automática
EUROFLUX	Long term carbon dioxide and water vapour fluxes of European forest and interactions with the climate system.
ECOBIOMA	Medições e simulações da variabilidade sazonal, anual e interanual dos ciclos de energia, carbono e água nos ecossistemas de floresta, mangue e agricultura na região Amazônica.
FLUXNET	Network to measure the exchange of fluxes between terrestrial ecosystem and atmosphere.
HAPEX-Sahel	A large-scale study of Land-Atmosphere interactions in the semi-arid tropics.
H-S	Hargreaves-Samani
IBIS	Integrated Biosphere Simulator
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
IRGA	Analisador de Gás a Infravermelho
LAI	Index Área Leaf
LBA	Experimento de grande escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia
LI	Linha de Instabilidade
MBE	Mean Bias Error (Desvio médio do erro)
MCGA	Modelo de Circulação Geral da Atmosfera

NOPEX	Northern hemisphere climate processes land-surface EXperiment.
PAR	Radiação Fotossinteticamente Ativa
P-M	Penman-Monteith
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
RMSE	Root Mean Square Error (Raiz do erro quadrado médio)
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations
SSiB	Simplifield Simple Biosphere
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical

## RESUMO

RODRIGUES, Hernani José Brazão, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Balço de radiação, energia e fluxo de CO<sub>2</sub> em ecossistema de manguezal na Amazônia.** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Co-Orientadores: João Batista Miranda Ribeiro e Antônio Carlos Lôla da Costa.

Este trabalho utiliza a mais longa série de dados meteorológicos contínuos e medições de fluxos de CO<sub>2</sub>, calor sensível e calor latente, obtidos em ecossistema de manguezal amazônico. A série utilizada neste estudo corresponde ao período de novembro de 2002 a agosto de 2003. Os dados meteorológicos foram coletados por uma estação meteorológica automática e os fluxos de CO<sub>2</sub> e energia foram medidos com o sistema EDISOL que utiliza a técnica de covariância de vórtices turbulentos. Os principais objetivos do presente trabalho foram, avaliar o desempenho de modelos empíricos na estimativa dos componentes do balanço de radiação e energia; avaliar as variações sazonais da partição dos componentes do balanço de radiação e energia; quantificar as magnitudes diárias e sazonais dos fluxos de CO<sub>2</sub> e suas relações de dependência com variáveis meteorológicas; estimar e analisar a variação temporal da condutância estomática e estabelecer relações de dependência com a micrometeorologia do manguezal e finalmente avaliar alterações micrometeorológicas decorrentes da degradação no manguezal. Na estimativa da radiação solar global (R<sub>g</sub>), foram utilizados os modelos propostos por Hargreaves-Samani e Bristow-Campbell, que se baseiam nas variações de temperaturas extremas diárias. O modelo de Bristow-Campbell apresentou desempenho satisfatório e o modelo de Hargreaves-Samani se mostrou bastante sensível às ocorrências de precipitação mostrando, todavia bom desempenho nas estimativas de R<sub>g</sub> para dias de céu claro. Nas simulações do balanço de radiação de onda longa (BOL), os melhores resultados são apresentados pelos modelos de Brutsaert e Bruin, que conseguem reproduzir entre 70% e 80% a variabilidade diária do BOL. O modelo baseado em Brunt foi o que mostrou as maiores diferenças entre valores medidos e simulados, apresentando sempre subestimativa do balanço de radiação de ondas longas. Para estimativa dos fluxos de calor sensível (H) e calor latente (LE) no manguezal, foram aplicados os modelos propostos por Shuttleworth,

Bruin-Holtslag e Penman-Monteith. Nas estimativas do fluxo de calor sensível, os resultados mostraram que os modelos de Shuttleworth e Bruin-Holtslag são os que simulam mais próximos dos dados medidos, ressaltando que ambos fazem ligeira superestimativa e subestimativa respectivamente. O modelo de Penman-Monteith apresentou uma superestimativa da ordem de 10 a 15% e seus melhores resultados são obtidos na estação chuvosa. Na estimativa do fluxo de calor latente, os modelos apresentaram um menor desempenho, quando comparado com as simulações de H. Contudo, o modelo de Penman-Monteith foi o que apresentou menor diferença entre valores medidos e simulados, podendo ser considerado o mais apropriado nas estimativas de LE no manguezal. Em relação à partição do saldo de radiação, verificou-se que a troca de energia dá-se predominantemente sob a forma de calor latente, com 56% da energia disponível utilizada para o processo de evapotranspiração no período chuvoso e 43% no período menos chuvoso. A energia utilizada para aquecimento da atmosfera sob a forma de calor sensível, praticamente não diferiu entre os períodos e correspondeu a 27% do saldo de radiação. Foi avaliado o comportamento horário da condutância estomática que apresentou um valor médio de  $0,015 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no período chuvoso e  $0,027 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$  no período menos chuvoso. Constatou-se que o déficit de pressão de vapor foi a variável que apresentou melhor relação de dependência com a condutância estomática, independente da época do ano. O comportamento da condutância estomática também foi influenciado pelo saldo de radiação. O ciclo diário de fluxo de  $\text{CO}_2$  apresentou uma absorção média de 7 a  $15 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$  e uma emissão média noturna que corresponde a respiração do ecossistema de  $5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ , indicando que o manguezal foi um sumidouro de  $\text{CO}_2$ . Em relação às alterações decorrentes da degradação no manguezal, os resultados mostraram que o desmatamento proporcionou um aumento de temperatura, tanto do ar como do solo. A degradação do manguezal resultou em um aumento do albedo superficial e em termos de umidade no ar, esta sofre considerável diminuição, basicamente devido à ausência da vegetação que proporciona uma diminuição da evapotranspiração. Devido às altas taxas de aquecimento na área degradada, o fluxo de calor no solo apresentou uma amplitude seis vezes maior que a medida no manguezal natural.

## ABSTRACT

RODRIGUES, Hernani José Brazão, D. Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2006. **Radiation and energy balance and fluxes of CO<sub>2</sub> in a Amazon mangrove ecosystem.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-advisers: João Batista Miranda Ribeiro and Antônio Carlos Lôla da Costa.

This work use the longest series of continuous meteorological data and fluxes measurements of CO<sub>2</sub>, sensible heat and latent heat made in Amazon mangrove ecosystem. The series used in this study corresponds to the period of November, 2002 to August, 2003. The meteorological data were collected using an EDISOL system based on the hedí covariance technique. The main objectives of the work were to evaluate the performance of empirical models in estimating the components of radiation and energy balance; quantify the magnitudes of daily and seasonal fluxes of CO<sub>2</sub> and its dependence to meteorological variables to evaluate the seasonal variations; to estimate and analyze the temporal variation of stomatal conductance and establish dependence relationships with the micrometeorology of mangrove and to evaluate micrometeorological changes due to the mangrove degradation. In order to estimate the global solar radiation ( $R_g$ ) models proposed by Hargreaves-Samani and Bristow-Campbell were used based an variations on daily extreme temperatures. Bristow-Campbell's model showed a satisfactory performance while the Hargreaves-Samani's model didn't work well when it rains, although showed good performance in the estimates of  $R_g$  under cloudless conditions. The best results for the longwave radiation (BOL) balance estimates were presented by Brutsaert and Bruin's model that account for 70% to 80% of the BOL daily variation. Brunt's model was the one that showed the greatest differences between measured and simulated values, always underestimating the longwave radiation balance. In order to estimate the sensible heat (H) and latent heat (LE) fluxes in the mangroves the models proposed by Shuttleworth, Bruin-Holtslag and Penman-Monteith were applied. The results for sensible heat estimates showed that Shuttleworth's model and Bruin-Holtslag's model were the best in comparison with measurements data, although it was evident some overestimation and underestimation respectively. Penman-Monteith model showed an overestimation of about 10% to 15% and

it's best results were obtained in the rainy season. A lower performance was presented by the models in the estimation of latent heat flux, in comparison with the sensible heat flux estimates. However, the Penman-Monteith model was the one that showed a lower difference between measured and simulated values and thus is considered the more appropriate in estimating the latent heat flux in mangrove. In regard to the partition of net radiation, it was found that the main Exchange of energy in latent heat flux, with 56% of the available energy used in the process of evapotranspiration in the rainy period and 43% in the less rainy period. The energy used for heating the atmosphere by sensible heat did not change much between both periods, corresponding to 27% of the net radiation. The hourly pattern of the stomatal conductance was evaluated, presenting a mean value of  $0,015 \text{ m.s}^{-1}$  in the rainy period and  $0,027 \text{ m.s}^{-1}$  in the less rainy period it was found that the vapor pressure deficit was the variable that showed the best dependence relationship with the stomatal conductance in both seasonal periods of the year. The pattern of stomatal conductance was also influenced by the net radiation. The daily cycles of  $\text{CO}_2$  fluxes showed an mean diurnal assimilation of 7 to  $15 \mu\text{mol.m}^{-2},\text{s}^{-1}$ , and a mean nocturnal emission that corresponds to the ecosystem respiration of  $5 \mu\text{mol.m}^{-2},\text{s}^{-1}$ , suggesting that the mangrove is a sink of  $\text{CO}_2$ . In regard to the changes due to the mangrove degradation, the results showed that the deforestation caused an increase in air and soil temperature. The mangrove degradation caused an increase in surface albedo and a decrease in the air humidity, due to reduction in evapotranspiration because of vegetation removal. The amplitude of soil heat flux in the degraded mangrove was six times higher than in the natural mangrove due to the high rates of heating in the degraded area.