

UNIVERSIDADE FEDERAL DE CAMPINA GRANDE
CENTRO DE TECNOLOGIA E RECURSOS NATURAIS
UNIDADE ACADÊMICA DE CIÊNCIAS ATMOSFÉRICAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM METEOROLOGIA

**EFEITO DA EXCLUSÃO PARCIAL DA CHUVA NA TRANSPIRAÇÃO DE ESPÉCIES
VEGETAIS DA FLONA DE CAXIUANÃ (PROJETO ESECAFLOR/LBA), PARÁ**

RAFAEL FERREIRA DA COSTA

CAMPINA GRANDE, PB

Fevereiro de 2008

RAFAEL FERREIRA DA COSTA

(Meteorologista)

EFEITO DA EXCLUSÃO PARCIAL DA CHUVA NA TRANSPIRAÇÃO DE ESPÉCIES
VEGETAIS DA FLONA DE CAXIUANÃ (PROJETO ESECAFLOR/LBA), PARÁ

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Meteorologia da Universidade Federal de Campina Grande, em cumprimento às exigências para obtenção do Grau de Doutor.

Área de Concentração: Meteorologia Agrícola e Micrometeorologia

Linha de pesquisa: Micrometeorologia

Orientadores: Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva (UFCG - CTRN - UACA)

Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo (MPEG - CCTE)

CAMPINA GRANDE, PB


Fevereiro de 2008

RAFAEL FERREIRA DA COSTA


EFEITO DA EXCLUSÃO PARCIAL DA CHUVA NA TRANSPIRAÇÃO DE ESPÉCIES
VEGETAIS DA FLONA DE CAXIUANÃ (PROJETO ESECAFLOR/LBA), PARÁ

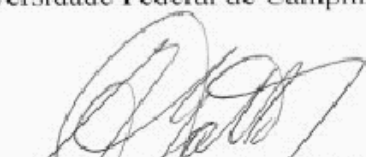
TESE APROVADA EM 08/02/2008

BANCA EXAMINADORA


Prof. Dr. VICENTE DE PAULO RODRIGUES DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. BERNARDO BARBOSA DA SILVA
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. PEDRO VIEIRA DE AZEVEDO
Unidade Acadêmica de Ciências Atmosféricas
Universidade Federal de Campina Grande


Prof. Dr. ARTHUR MATTOS
Departamento de Engenharia Civil
Universidade Federal do Rio Grande do Norte


ANTONIO CARLOS LOLA DA COSTA
Departamento de Meteorologia
Universidade Federal do Pará

À minha Mãe Nair, minha Esposa Ana, e filhos Lucas, Beatriz e Laura, pela compreensão da minha longa ausência nas coisas de casa, DEDICO.

A meus irmãos, especialmente ao Felipe pela confiança e o apoio, OFEREÇO.

AGRADECIMENTOS

Quase nada na vida humana é possível de ser realizado por uma só pessoa. Um trabalho de pesquisa, com diversas fases e atividades não foge deste princípio; por isso, tenho muito que agradecer:

Aos professores orientadores, Dr. Vicente de Paulo Rodrigues da Silva, e Dra. Maria de Lourdes Pinheiro Ruivo, pelas informações e confiança que permitiram este trabalho.

Aos Membros da Banca Examinadora, pelas pertinentes críticas e sugestões apresentadas.

Ao Museu Paraense Emílio Goeldi - MPEG pelas oportunidades proporcionadas, e aos que participaram das atividades de campo na Estação Científica Ferreira Penna - ECFPn em Caxiuana, em especial aos EBPs Dr. Antonio Carlos Lôla da Costa, Alan Braga, João de Athaydes Silva Jr., e Paulo Henrique que se mostraram fortes e unidos quando foi necessário. Aos que partilharam as inúmeras viagens e estadas na ECFPn: Araquém, Celita, Clésio, Cuquinha, Dedé (*In memoriam*), Eleneide Sotta, Guanabara, Gemaque, Graça, Luiz Aragão, Macaquinho, Maria, Martins, Natanael, Paulo, Rommel, Rosie Fisher, Saraff, Tereza, Tufão e Vanda.

Aos irmãos do Pólo Aquático, que estão na gênese de minha história, e que sempre acreditaram na vitória em mais esta peleja: Aluísio, Carlinhos, Celso, Cezar, Cleber, Christian, Jovelino, Leray, Lino, Luiz, Maurício, Mauros Camelo e Louco, Pimenta, Quiba, Ratinho, Samy, Serginho, Sérgio Bolinha, Toni (*In memoriam*) e Xavier.

Lembrando que ninguém começa doutorando, agradeço aos meus amigos de colégio, graduação e pós-graduação em todos esses anos. Desde o 'Souza Franco', aonde tudo começou, em especial ao Aécio, Ernani, Mário Eloís, Tânia, e Regineide. Depois na UFPA distintamente a Aurora, Carvalho, Cláudia, Danilo, Edson, Everaldo, Hernani, João Batista, João Wanzeler e Jaqueline, Júlia, Maria do Carmo, Midori, Paulo Jorge, Ricardo, e Valena. Passando pelos ótimos anos de ESALQ-USP, particularmente aos queridos Aderbal, Alaílson, Alessandra, Betânia, Cláudia e Marcelino, Cristina, Evandro, Fábio, Glauco, Jeane, Karen, Késia e Jarbas, Marcius, Marcos, Norberto, Ratinho, Rosinha, Sylvia, e Tonhão, até chegar na UFCG aonde encontrei a turma, Bartolomeu, Daisy, Ewerton, Janúncio (*In memoriam*), Juarez, Ranyére e Saulo.

Aos Drs. Yadvinder Malhi (Oxford, England), John Grace e Patrick Meir (Edinburgh, Scotland) pelas oportunidades do aprendizado nas atividades de campo e nos intercâmbios científicos.

Aos que acreditaram e me apoiaram em outras etapas de formação, Antonio Roberto Pereira, Carlos Nobre, Gilberto Fisch, Antonio ‘Matão’ Manzi, Néilton Araújo Pereira, Nilson Villa-Nova, e Roberto Lyra.

À secretária do Programa de Pós-graduação em Meteorologia, Sra. Divanete Cruz, pela incrível capacidade de solucionar as dificuldades ocorridas durante o curso, e sem a qual quase nada andaria por aqui.

Aos paraenses que conviveram nas diferentes etapas em Campina Grande e que compartilharam as dificuldades e alegrias, principalmente a Gláucia, Ronaldo e Zilurdes.

Aos ‘paraibanos’ que conheci por aqui e me ajudaram a levar a vida longe de casa, Alexandre (*In memoriam*), Cleide, Yule e Alexandre Filho, Cleuber e Jonas, Déda, Dória, Edivania, Ferreira, Hudson, Isaier Jr., Janne, Josiclêda, Júlio Cezar, Luis Carlos, Magna, Manoel e Alan Severo, Maryfrance, Morgana, Neca, Paulão, Rildo, Wilma e Kate, e Val(dez).

À turma das inesquecíveis sextas-sem-lei, Genival, João Hugo, Lindem(bega)berg, e Roberto Alan.

À Leidiane Oliveira pelo carinho, atenção e colaboração prestados para realização desta tese.

Ao João Roberto Feitosa, amigo de longa data que me convidou e recebeu em Campina Grande, e que certamente ainda teremos muitas histórias em comum pela frente.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa de estudos.

A todos que não foram aqui citados, mas que em algum instante contribuíram para a minha formação até a realização deste trabalho, o meu muitíssimo obrigado.

SUMÁRIO

AGRADECIMENTOS.....	V
LISTA DE FIGURAS.....	IX
LISTA DE TABELAS.....	XIII
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS.....	XIV
RESUMO.....	XVII
ABSTRACT.....	XVIII
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 OBJETIVOS.....	3
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1. As mudanças climáticas e suas relações com a Amazônia.....	4
2.2. Observações sobre o ciclo hidrológico na Amazônia.....	10
2.3. Uma breve climatologia da Amazônia.....	13
2.4. O processo de transpiração vegetal.....	16
2.5. Métodos para determinar o fluxo de seiva.....	18
2.5.1. Método do pulso de calor (PC).....	19
2.5.2. Método da dissipação térmica (DT).....	20
2.5.3. Método do balanço de calor no tronco (BCT).....	21
2.5.4. Método da deformação do campo de calor (DCC).....	22
2.5.5. Aplicações dos diversos métodos de determinação do fluxo de seiva.....	23
2.6. A importância da determinação do fluxo de seiva em árvores de grande porte na Amazônia.....	25
2.7. O Projeto LBA.....	26
2.8. O Experimento ESECAFLOR.....	27
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	33
3.1. Descrição da área de estudo.....	33
3.2. Características climáticas da FLONA de Caxiuanã, Pará.....	35
3.2.1. Precipitação pluvial (P).....	35

3.2.2. Temperatura do ar (T)	36
3.3. Características vegetais da FLONA de Caxiuanã, Pará	37
3.4. Características pedológicas da FLONA de Caxiuanã, Pará	40
3.4.1. Análises físico-químicas dos solos do ESECAFLOR.....	40
3.4.2. Determinação do conteúdo de água no solo (CAS) utilizando o TDR (Time-Domain Reflectometer).....	42
3.5. Método utilizado para a determinação do fluxo de seiva.....	42
3.6. Cálculos e análises estatísticas	46
3.6.1. Regressão linear	46
3.6.2. Balanço hídrico	46
3.6.3. Transpiração vegetal	47
3.6.4. Déficit de pressão de vapor	48
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	50
4.1. Transpiração em espécie de grande porte sob estresse hídrico	50
4.1.1. Análises das variáveis meteorológicas.....	50
4.1.2. Conteúdo de água no solo (CAS).....	54
4.1.3. Análises das medidas de fluxo de seiva (FS).....	58
4.2. Curso anual da transpiração de exemplares de <i>Couratari Multiflora</i> na FLONA de Caxiuanã, Pará.....	67
4.2.1. Análises das variáveis observadas	67
4.2.2. O balanço hídrico durante o ESECAFLOR	71
4.2.3. A transpiração dos exemplares de <i>Couratari Multiflora</i>	74
4.3. A capacidade potencial transpiratória da FLONA de Caxiuanã, Pará	78
4.3.1. Medidas de transpiração em dois conjuntos de árvores nas parcelas experimentais do ESECAFLOR	78
4.3.2. Estimativas da transpiração potencial da vegetação na FLONA de Caxiuanã, Pará.....	80
5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES	84
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	86

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Taxas dos desmatamentos anuais (colunas) e acumulado (linha) na Amazônia brasileira no período de 1998 a 2005. Fonte: INPE - PRODES Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>) 9
- Figura 2. Simulações numéricas de dois cenários das mudanças da cobertura vegetal na Amazônia, sob os impactos da pavimentação das rodovias no avanço do desmatamento na região, para os anos de 2002(a) e 2050(b). Fonte: Cohen *et al.* (2007)..... 9
- Figura 3. Ciclo hidrológico com ênfase no processo de transpiração (*Tr*) da vegetação. Adaptado de Oliveira (2007)..... 11
- Figura 4. Detalhe da trincheira para drenagem da chuva na parcela B no experimento ESECAFLOR..... 29
- Figura 5. Detalhe das Vistas superior (a) e inferior (b) da cobertura plástica da parcela B no experimento ESECAFLOR..... 30
- Figura 6. Vista do solo da torre metálica com 30 m de altura instalada na parcela A do experimento ESECAFLOR..... 31
- Figura 7. Vista aérea da torre de alumínio com 52 m de altura instalada na parcela T, distante cerca de 2 km ao norte do experimento ESECAFLOR..... 32
- Figura 8. Acima, localização da FLONA de Caxiuanã, Pará e trajetória percorrida entre Belém e a ECFPn. No centro, o percurso fluvial (24 horas ···) nos rios Pará e Anapú até a Baía de Caxiuanã, com escala na Cidade de Breves na Ilha do Marajó. Abaixo, destaques das parcelas do ESECAFLOR (A - controle) e (B - coberta) a 0,8 km da base da ECFPn, e Torre do LBA (52 m de altura) a 2 km (----) ao Norte das parcelas do experimento de exclusão da chuva. 34
- Figura 9. Precipitação média mensal na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 1996 a 2003. As linhas verticais representam os desvios-padrão..... 36

Figura 10. Temperatura média do ar mensal na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 1996 a 2003. Entre 1996 e 1998 (símbolos cheios) medidas no nível da superfície, e a partir de 1999 na torre com 52 m de altura.....	37
Figura 11. Índice de área foliar (IAF) na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 2001 a 2003. A linha contínua representa a parcela de controle (A) e a linha pontilhada a parcela coberta (B). A seta indica o início da exclusão da chuva na parcela B. Fonte: Fisher (2005).....	38
Figura 12. Frações médias de areia, silte e argila (12a), concentrações de Carbono (C) e Fósforo (P) são apresentadas em (12b) e de Nitrogênio (N) em (12 c) realizadas em sete perfis desde a superfície até 5 m de profundidade no ESECAFLOR, nas parcelas A (linhas tracejadas) e B (linhas contínuas). Fonte: Ruivo <i>et al.</i> (2007).....	41
Figura 13. Instrumentação utilizada nas medidas de conteúdo de água no solo na FLONA de Caxiuanã, Pará. Monitor TDR Tektronic 1502B/C (a). Trincheira com 5 m de profundidade (b). Detalhes das conexões das sondas inseridas nas paredes das trincheiras (c).	42
Figura 14. Detalhe dos cinco eletrodos metálicos e de dois pares de sensores térmicos do sistema <i>Sap flow meter</i> , P4.1 inseridos no tronco do vegetal.	43
Figura 15. Árvore com a cobertura confeccionada em alumínio e plástico, para a proteção dos sensores de fluxos de seiva à ação das intempéries climáticas.....	45
Figura 16. Conteúdo de água no solo - CAS - (mm) na camada de 0 a 3 m, nas parcelas do ESECAFLOR. O ciclo sazonal foi alterado na parcela B.....	56
Figura 17. Diferenças (%) do conteúdo de água no solo CAS (mm) na camada de 0 a 3 m, nas parcelas do ESECAFLOR	57
Figura 18. Perfis de conteúdo de água no solo (mm) nas parcelas A (símbolos cheios) e B (símbolos vazados) nos anos de 2001 e 2003. Os valores são médios das medidas realizadas entre janeiro e março de cada ano.....	58

Figura 19. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar A237 de <i>E. Coriacea</i> referente ao período de 3 a 17 de dezembro de 2000.....	59
Figura 20. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar B381 de <i>E. Coriacea</i> referente ao período de 3 a 17 de dezembro de 2000.....	60
Figura 21. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar A237 de <i>E. Coriacea</i> referente ao 12 e 25 de janeiro de 2003	61
Figura 22. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar B381 de <i>E. Coriacea</i> referente ao período de 12 e 25 de janeiro de 2003	62
Figura 23. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore A237 de <i>E. Coriacea</i> , referentes ao período de 3 a 17 de dezembro de 2000. As barras verticais são os desvios-padrão	64
Figura 24. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore B381 de <i>E. Coriacea</i> , referentes ao período de 3 a 17 de dezembro de 2000. As barras verticais são os desvios-padrão	65
Figura 25. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore A237 de <i>E. Coriacea</i> , referentes ao período de 12 a 25 de janeiro 2003. As barras verticais são os desvios-padrão	65
Figura 26. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore B381 de <i>E. Coriacea</i> , referentes ao período de 12 a 25 de janeiro 2003. As barras verticais são os desvios-padrão	66
Figura 27. Medidas diárias da precipitação pluvial (mm) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	69
Figura 28. Medidas diárias da temperatura do ar ($^{\circ}\text{C}$) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003.....	69

Figura 29. Medidas diárias da radiação global (MJ m^{-2}) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	70
Figura 30. Medidas diárias do déficit de pressão de vapor (kPa) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	71
Figura 31. Totais mensais das precipitações pluviárias (mm) referentes ao período de dezembro de 2002 e novembro de 2003	72
Figura 32. Evapotranspiração potencial mensal (mm), as medidas foram realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	73
Figura 33. Balanço hídrico mensal (mm) obtido pela relação $P-ET$. As medidas foram realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	74
Figura 34. Médias diárias da transpiração (kg dia^{-1}) de três exemplares de <i>Couratari Multiflora</i> obtidas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003. As barras verticais são os respectivos desvios-padrão	75
Figura 35. Média da transpiração (kg dia^{-1}) de cada um dos três exemplares de <i>Couratari Multiflora</i> para o período de dezembro de 2002 a novembro de 2003	76
Figura 36. Totais mensais das transpirações (mm mês^{-1}) somadas dos três exemplares de <i>Couratari Multiflora</i> obtidos entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	76
Figura 37. Valores acumulados das transpirações (Mg) para cada planta de <i>Couratari Multiflora</i> obtidos entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	77
Figura 38. Transpirações medidas e estimadas (T_r , kg dia^{-1}) em 11 e 12 árvores nas parcelas <i>A</i> e <i>B</i> do ESECAFLOR, respectivamente, durante o período de 1 a 13 de dezembro de 2002, e suas correlações lineares	80
Figura 39. Transpirações mensais estimadas para todas as árvores das duas parcelas do ESECAFLOR (mm mês^{-1}) entre dezembro de 2002 e novembro de 2003	81

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Características das espécies vegetais estudadas no ESECAFLOR. Circunferência no ponto de medida (CMP), diâmetro à altura do peito (DAP), direção Norte-Sul (N-S), direção Leste-Oeste (L-O), área da copa projetada no solo (ACPS), área Basal (AB)..... 39
- Tabela 2. Valores anuais de precipitação (mm) e temperatura máxima, média e mínima do ar (°C) para a FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 2000 a 2003 51
- Tabela 3. Valores diários da Prp - precipitação pluvial (mm); ROC - radiação de ondas curtas (MJ m^{-2}); RFA - radiação fotossinteticamente ativa (mol m^{-2}) e T_{ar} - temperatura média do Ar (°C). ROC e RFA foram integrados das 07 às 18 h 52
- Tabela 4. Dimensões dos exemplares de *E. coriacea* monitorados no ESECAFLOR. CPM (m) - circunferência do tronco no ponto de medida, DAP (m) - diâmetro do tronco na altura do peito, ACPS (m^2) - área plana da copa da árvore projetada no solo. Os valores à direita em % são diferenças da árvore B381 em relação a A237 54
- Tabela 5. Valores diários da transpiração – Tr (kg) de *E. Coriacea* nas árvores A237 (referência) e B381 submetida ao estresse hídrico a partir de dezembro de 2001 63
- Tabela 6. Equações das regressões lineares e coeficientes de determinação (R^2) entre as médias horárias do fluxo de seiva (FS, kg h^{-1}), radiação fotossinteticamente ativa (RFA, $\mu \text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e radiação de ondas curtas (ROC, $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$), nos exemplares A237 e B381 de *E. Coriacea* 67
- Tabela 7. Dimensões dos exemplares de *Couratari Multiflora*. CPM - circunferência do tronco no ponto de medida, DAP - diâmetro do tronco na altura do peito, ACPS - área plana da copa da árvore projetada no solo 68
- Tabela 8. Precipitação (P), transpiração estimada da parcela (T_p), e evapotranspiração potencial (ET) em diferentes estudos 83

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

AB	Área Basal
ABLE - 2b	Amazonian Boundary Layer Experiment - 2b
ACPS	Área da Copa da árvore Projetada no Solo
BCT	Balanço de Calor no Tronco
BRAMS	Brazilian Regional Atmospheric Modeling System
a_p	Área da parcela
c	Capilaridade
C	Carbono
C	Condensação
CAS	Conteúdo de Água no Solo
CCM	Complexos Convectivos de Mesoescala
CO_2	Dióxido de carbono
Cst	Constantã
Cu	Cobre
c_w	Calor específico da água
d	Distância entre os eletrodos
DAP	Diâmetro à altura do peito
DCC	Deformação do Campo de Calor
D_o^2	Número de horas de sol
DPV	Déficit de Pressão de Vapor
dT	Diferença de temperatura no ponto de medida
DT	Dissipação Térmica
e_a	Pressão atual de vapor
E_{al}	Evaporação da água livre
ECFPn	Estação Científica Ferreira Penna
E_p	Evaporação potencial
e_s	Pressão de vapor de saturação
ESC	Escoamento da água de chuva pelos troncos
ESC_{sub}	Escoamento subterrâneo
ESECAFLOR	O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica
e_{su}	Pressão de vapor de saturação úmida

<i>ET</i>	Evapotranspiração potencial
FLONA	Floresta Nacional
<i>FS</i>	Fluxo de Seiva
<i>g</i>	Gotejamento
GEE	Gases de Efeito Estufa
<i>I</i>	Interceptação da precipitação pela vegetação
IAF	Índice de área foliar
<i>I_f</i>	Infiltração
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
<i>kTC</i>	Coefficiente de temperatura das termobaterias
LI	Linha de Instabilidade
MCT	Ministério da Ciência e Tecnologia
MPEG	Museu Paraense Emílio Goeldi
<i>n</i>	Número de eletrodos
N	Nitrogênio
OL	Onda de Leste
<i>p</i>	Coefficiente de precipitação livre direta
<i>P</i>	Precipitação pluvial total incidente acima do dossel
P	Fósforo
PC	Pulso de Calor
PRODES	Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite
<i>q_t</i>	Densidade da vapor saturado à temperatura média do ar
<i>Q</i>	Energia para o aquecimento
<i>R</i>	Escoamento superficial
RFA	Radiação Fotossinteticamente Ativa
<i>R_n</i>	Saldo de radiação
<i>t</i>	Tempo
<i>T</i>	Temperatura do ar
TDR	Time-Domain Reflectometer
<i>T_p</i>	Transpiração da parcela
<i>T_r</i>	Transpiração
TSM	Temperatura da superfície do mar
<i>U</i>	Voltagem de saída dos sensores térmicos

V	Vazão
z	Coefficiente de dissipação do calor no ponto de medida
ZCAS	Zona de Convergência do Atlântico Sul
ZCIT	Zona de Convergência Intertropical
$\alpha, \beta, \varphi, \eta$	Coefficientes de regressão
γ	Constante psicrométrica
ρ	Densidade do ar

RESUMO

Os dados utilizados neste trabalho foram obtidos durante o experimento “O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica” (ESECAFLOR), subprojeto do Experimento de Grande escala da Biosfera-Atmosfera da Amazônia (LBA). Os estudos foram conduzidos na Estação Científica Ferreira Pena, dentro da Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará (1° 42' 30'' S; 51° 31' 45'' W; 62 m de altitude) com as espécies predominantes em terra-firme de *Eschweilera coriacea* (Matá-matá branco), *Voucapoua americana* (Acapu) e *Protium pallidum* (Breu Branco). As medições foram realizadas entre os anos de 2000 a 2003, objetivando-se determinar a transpiração de diferentes árvores em situação normal de disponibilidade hídrica no solo e mediante os efeitos da seca provocada. A área experimental compreendeu duas parcelas, cada uma com 1 hectare, parcela A (controle) e parcela B (exclusão da chuva), utilizando-se o método do Balanço de Calor no Tronco, com sistema Sap Flow meter, P4.1. As análises realizadas mostraram que as árvores de grande porte das florestas tropicais apesar de captarem água em maiores profundidades também são suscetíveis aos longos períodos de estiagem. A relação da transpiração com o total de chuva registrado no período mostrou a importante função da vegetação no ciclo hidrológico da floresta e no clima. Foram registradas reduções no conteúdo da água no solo na parcela B durante todo o período de estudo. Na análise da espécie *Eschweilera Coriacea* entre os dois períodos estudados, a transpiração média registrou aumento de 56% na árvore A237 (parcela A) e redução de 68% na árvore B381 (parcela B). A transpiração de três exemplares de *Couratari Multiflora* exibiu comportamento similar durante o período de dezembro de 2002 a novembro de 2003, com pequenas variações devidas principalmente aos elementos climáticos, como maior déficit de pressão de vapor e maior disponibilidade de radiação solar. As transpirações estimadas por modelagens aplicadas em 524 e 499 árvores nas parcelas A e B, respectivamente, alcançaram totais de 1.228,3 mm ano⁻¹ na parcela A, e 401,0 mm ano⁻¹ na parcela B, representando 58,5% e 19,1% da precipitação registrada nas parcelas A e B, respectivamente, e também 76,4% e 24,9% da evapotranspiração potencial, no período de dezembro de 2002 a novembro de 2003. A transpiração estimada foi distribuída de forma regular durante o ano, com 45,5% no inverno (período chuvoso) e 54,5% no verão (período seco) na parcela A, e 43,1% (inverno) e 56,9% (verão) na parcela B.

Palavras-chave: Amazônia, ESECAFLOR, Estresse hídrico, Floresta tropical chuvosa, Fluxo de Seiva, LBA, Transpiração.

ABSTRACT

The data used in this work were obtained during the “Long-term drought impact on water and carbon dioxide fluxes in Amazonian Tropical Rainforest Experiment” (ESECAFLOR) which is subproject of Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazônia (LBA). This study was carried out at Ferreira Penna Scientific Station (FPSS) into the Caxiuanã National Forest (CNF) in Pará State (1° 42' 30" S; 51° 31' 45" W; 62 m a.s.l.). The region has a well-preserved forest with a canopy of 35 m high. The predominates trees species in the landscape are *Eschweilera coriacea* (White Matá-matá), *Voucapoua americana* (Acapu) and *Protium pallidum* (White Pitch). Sap flow measures were made between the years of 2000 and 2003, aiming to determinate the transpiration of many different trees in normal situation of water availability and the effects of the drought long term induced. The ESECAFLOR site consist of two different areas with 1 ha each. Plot *A* (control) and Plot *B* (rainfall exclusion). The Trunk Heat Balance (THB) method based on Sap Flow Meter P4.1 system was used for measuring sap flow predominates trees species in Amazônia. Results show that the big trees on the tropical rainforest are susceptible at long term drought stress. The transpiration and rainfall relation showed how important is the vegetaton function on the forest hidrological cicle and the climate. Redutions of the soil water content available in the plot *B* were observed during all the study period. For two analysed periods, the mean transpiration in *Eschweilera Coriacea* increased 56% in the tree A237 (control plot), and decreased 68% in the tree B381 (drought plot). The transpiration in three trees of *Couratari Multiflora* showed a similar behavior during the period from December 2002 to November 2003, with shorts variations because of climate factors impacts like a vapor pressure deficit and high solar radiation availability. The transpiration obtained by model in 524 and 499 trees in the plots *A* and *B*, respectively, reached 1,228.3 mm year⁻¹ and 401.0 mm year⁻¹ in the *B* plot. These values represent 58.5% and 19.1% of rainfall registrered in the plots *A* and *B*, respectively, and also 76.4% and 24.9% of evapotranspiration, from December 2002 to November 2003. The estimated transpiration was regularly distributed during the year, around 45.4% in the winter (rainy season), and 54.5% in the summer (dry season) to plot *A*, and 43.1% (winter), and 56.9% (summer) in the plot *B*.

Key words: Amazonia, Drought stress, ESECAFLOR, LBA, Sap Flow, Transpiration, Tropical rainforest.

1. INTRODUÇÃO

A importância da vegetação no recebimento e redistribuição das precipitações é significativa para o balanço hídrico local, atuando no escoamento superficial que atinge a rede hidrológica, e no processo de infiltração, que favorece os lençóis freáticos e que são os fornecedores de água ao sistema radicular da própria vegetação (Oliveira, 2007). Devido a grande extensão da cobertura vegetal na Amazônia, a quantidade de água interceptada durante as chuvas deve responder pela reposição de consideráveis quantidades de massa de vapor d'água na atmosfera, contribuindo com o equilíbrio hídrico na região (Franken *et al.*, 1982a, b).

Os vegetais, através da atividade estomática, respondem de forma diferente às condições climáticas de determinada região. A ausência de precipitação pluvial, por períodos prolongados, limita a disponibilidade de água para as raízes, afeta o transporte de nutrientes para todas as partes do vegetal e compromete o desenvolvimento da planta (Ferreira da Costa *et al.*, 2003a). A condutância estomática na planta sob condições de estresse hídrico é controlada pela taxa de fornecimento de água para as folhas. Isso depende da diferença no potencial hídrico entre o solo e a folha, e a resistência a ser vencida pela água para atingir a folha (Fisher, 2003).

A relação natural que há entre a floresta e a chuva torna-se cada vez mais evidente, pois uma não pode existir sem a outra, pelo menos com as mesmas características que apresentam em conjunto. As florestas de grande porte, como as tropicais, necessitam de chuvas abundantes e bem distribuídas durante todo o ano, com curtos períodos de estiagem nos quais ainda ocorrem eventos esporádicos de chuvas, geralmente do tipo convectiva, com forte intensidade e curta duração. Através da transpiração a floresta devolve para a atmosfera, na forma de vapor, a água da chuva que se armazenou no solo, contribuindo para a formação de nova nebulosidade, que em condições propícias se desenvolverá até atingir a maturação e precipitar novamente, realimentando o processo do ciclo hidrológico. Para a quantificação do fluxo de água das plantas para a atmosfera, em uma área ou em uma bacia hidrográfica, é fundamental o conhecimento da transpiração.

Há uma enorme carência de estudos desenvolvidos na Amazônia para a determinação da transpiração dos exemplares de grande porte que compõem a maior floresta tropical do mundo. Alguns mecanismos de controle da evapotranspiração no Leste da Amazônia foram estimados com a aplicação de equações compostas por condutância aerodinâmica,

condutância da superfície, e fatores de desacoplamento da transpiração do dossel com a atmosfera (Souza Filho *et al.*, 2005).

Outros estudos de transpiração foram realizados no Brasil, porém para plantas em pomares, como o de cítricos por Marin *et al.* (2001), Angelocci *et al.* (2004) e Coelho Filho *et al.* (2004) na região Sudeste do país. O consumo hídrico das goiabeiras em uma região irrigada do semi-árido do Nordeste brasileiro foi determinado por Silva *et al.* (2002). Alguns estudos utilizando essa técnica em plantas de café na região Sudeste do Brasil foram realizados por Marin (2003). No caso de biomas naturais brasileiros, árvores do cerrado, campo sujo e cerradão do Distrito Federal no Centro-Oeste foram estudadas por Meinzer *et al.* (1999) e Naves-Barbiero *et al.* (2000).

A hipótese deste trabalho é que como a estiagem natural reduz o nível de água no solo e, por conseguinte, o fluxo de vapor d'água oriundo da floresta para a atmosfera; então caso a estiagem se intensifique, possivelmente será alterado o equilíbrio natural entre o teor de umidade atmosférica e as características das espécies florestais, com possíveis impactos na transpiração da floresta, visto que a substituição da vegetação de grande porte por outra cobertura do solo, reduzirá a transpiração, podendo influenciar na duração da estiagem. Assim, devem-se usar as informações obtidas através de experimentos de campo, para tentar ajudar a criar uma mentalidade preservacionista da floresta como forma de influenciar nas decisões das políticas sobre o uso da terra na floresta tropical amazônica. Pois, a vegetação na Amazônia produz e consome simultaneamente, a umidade da atmosfera em enormes quantidades que, conseqüentemente, acabam influenciando no clima local e global.

1.1 OBJETIVOS

Este trabalho tem os seguintes objetivos:

(i) Geral:

Analisar as respostas transpiratórias dos vegetais em diferentes condições ambientais em duas áreas florestais, uma natural e outra submetida à exclusão de parte da chuva pela instalação de cobertura plástica em uma das parcelas do Experimento ESECAFLOR/LBA na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará.

(ii) Específicos:

- a) comparar as taxas transpirativas de diferentes exemplares de uma mesma espécie vegetal, bem como entre diferentes espécies submetidas às condições estudadas;
- b) determinar as relações existentes entre as diferentes condições de umidade do solo e a transpiração dos vegetais;
- c) definir o curso anual da transpiração de algumas espécies de grande porte;
- d) estimar a capacidade potencial de transpiração da floresta tropical baseando-se em medidas de fluxo de seiva de algumas espécies de grande porte, e em características bióticas e abióticas da área de Caxiuanã.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1. As mudanças climáticas e suas relações com a Amazônia

A população do planeta atualmente é mais de seis e meio bilhões de habitantes (Johnson, 2006), sendo que mais de 183 milhões estão no Brasil; e desses, 14,6 milhões na Amazônia brasileira (IBGE, 2006). Essa pressão econômica gerada por uma população cada vez mais necessitada de alimentos e, por conseguinte, de mais áreas para produzi-los, que consome mais energia fornecida de diferentes fontes, principalmente os combustíveis fósseis, demonstra a complexidade para se perceber a diferença entre mudança climática e os efeitos antropogênicos sobre o clima em escalas local ou global.

Previsões climáticas indicam que em cenários de mudanças globais, algumas regiões como a Amazônia e o Nordeste brasileiro poderão experimentar temperaturas mais elevadas e reduções nos totais pluviométricos nos próximos 50 a 100 anos, como resultados da intensificação do fenômeno El-Niño (Cox *et al.*, 2000). O aumento do número de eventos de furacões e tornados na América do Norte, América Central e Caribe, além do crescimento na duração do período de estiagem em parte da região amazônica ocorridos simultaneamente no ano de 2005, são situações complexas e ainda em análise. Esses fatos remetem a alguns questionamentos, tais como: esses fenômenos têm relações diretas, ou são apenas ciclos naturais do Planeta? Caso tornem-se freqüentes, a floresta Amazônica resistirá a eles da mesma maneira que a atual? A quantidade de desastres hidrometeorológicos, entre eles as enchentes, secas, ondas de calor ou frio extremos, furacões e tornados, ocorridos no mundo todo cresceu, de uma média de 195 eventos por ano entre 1987 a 1998, para 365 por ano, entre 2000 e 2006, ou seja, um aumento de aproximadamente 187% (Hoyois *et al.*, 2007).

Na Amazônia, as mudanças de hábito no uso da floresta, que foi quase que exclusivamente utilizada para extração de látex de seringueira (*Hevea brasiliensis*) durante o primeiro ciclo da borracha, na metade final do século XIX, ganharam evidência a partir de meados do século XX, quando a exploração econômica regional chegou com a implantação de rodovias. Os projetos agropecuários e os extrativismos vegetal e mineral tornaram-se, a partir dessa época, as principais atividades antropogênicas, com a retirada e substituição da floresta primária (Ferreira da Costa *et al.*, 1998).

Os estudos de Vieira *et al.* (2007) indicaram que para entender algumas paisagens atuais da região seria necessário retroceder, tanto às primeiras informações de desmatamento

quanto de eventos sociais e econômicos relacionados à colonização, que propiciaram a expansão da agricultura nas terras firmes da Amazônia. A pressão por maiores produções de alimentos para uma população cada vez maior, tem se refletido na ocupação de áreas originalmente de florestas na Amazônia, tanto nos ecossistemas de cerrado como de vegetação de grande porte. Essa transformação na cobertura vegetal em enormes áreas e em curto período de tempo tem, possivelmente, influenciado nas características climáticas em escala local, evidenciando que o desmatamento e a pressão demográfica tiveram um impacto significativo, ao substituir a floresta nativa por áreas agrícolas.

Marengo *et al.* (2007) classificaram que a seca na Amazônia no ano de 2005 foi uma das maiores dos últimos 40 anos. Em 2005 a longa escassez de chuvas que se localizou na parte Sudoeste da Amazônia, nas calhas dos rios Solimões e Madeira, no Amazonas e Rondônia, respectivamente, fez cair o nível da água deixando cidades da região amazônica praticamente isoladas por via fluvial. Aragão *et al.* (2007) consideraram a estiagem de 1997-1998 mais forte e intensa que a de 2005, porém concentrada na parte Noroeste da Amazônia, que tem época chuvosa diferente do restante da região. Em 1997 as maiores anomalias pluviométricas foram observadas entre abril e junho, período de transição entre as épocas chuvosa e seca na maioria da Amazônia, e em 1998 a estiagem foi mais intensa entre janeiro e março, período tipicamente mais chuvoso na maior parte da Amazônia, exceto no extremo Norte. Os estudos de Marengo *et al.* (2007) ainda destacaram que a população local sofreu a falta de água potável, surtos epidêmicos e dificuldade de acesso a outras cidades. Com menos chuva, o rio Madeira secou na margem esquerda, onde está a cidade de Manicoré, distante cerca de 330 km de Manaus. Formou-se uma expressiva praia de areia e pedras no lugar originalmente ocupado pelo rio, impedindo o tráfego das embarcações surpreendidas no ancoradouro local. No mês de maio de 2005 o nível batimétrico do rio atingiu apenas 1,7 m enquanto que a média anual é de 12,9 m. O rio Solimões também teve seu nível reduzido drasticamente entre maio e setembro de 2005, da média de 13,8 m para menos de 0,5 m, próximo da cidade de Tabatinga a mais de 1.100 km a Sudoeste de Manaus. Com a ocorrência das chuvas no final de 2005, o nível do Solimões voltou a subir, chegando a provocar enchentes em março de 2006.

A grande estiagem de 2005, que ajudou a provocar incêndios florestais em diversas áreas da parte Leste da Amazônia, foi relacionada a diversos fatores climáticos de escalas local e global, tais como, a redução do movimento vertical ascendente do ar na região Sudoeste da Amazônia que inibiu a formação de nuvens precipitantes; a elevação anômala da

TSM no Atlântico Norte, e a diminuição da intensidade dos ventos alíseos que transportam umidade da região tropical do Atlântico para a Amazônia durante o período chuvoso. Os autores enfatizaram que o evento de seca de 2005 não esteve relacionado com o fenômeno El Niño, como ocorreu nos anos de 1983 e 1998 (Marengo *et al.*, 2007).

Para Nepstad *et al.* (1999a) caso ocorra uma diminuição na precipitação e um alongamento da estiagem a vegetação pode consumir toda a água disponível ao sistema radicular, ocasionando forte senescência das folhas. Esse cenário torna o piso florestal vulnerável ao fogo.

Os incêndios ocorridos na Amazônia, que foram agravados pela estiagem de 2005, são principalmente provocados pela mudança no uso da terra, com o desmatamento para conversão de florestas nativas em áreas agrícolas ou de pecuária extensiva (Uhl e Kauffman, 1990). Para Aragão *et al.* (2007) a inflamabilidade da floresta é potencialmente elevada pela ocorrência de estiagem, mesmo quando o desmatamento diminui, o fogo ainda se alastra.

Em seus estudos para a região do Rio Negro no Amazonas, Uhl *et al.* (1988) determinaram que a susceptibilidade da floresta primária ao fogo, na região, aconteceria somente quando o conteúdo de água da serapilheira atingisse 12%. Esse valor seria mais alto para Mendoza (2002), de acordo com os seus estudos para a região Sudoeste da Amazônia, indicando que o conteúdo de água na serapilheira menor que 20% já torna a floresta mais susceptível ao fogo.

Para Brown e Salimon (2007), a grande estiagem de 2005 provocou incêndios em mais de 2.600 km² de florestas e em mais de 2.000 km² de áreas abertas no Leste do Acre e no Sul do Amazonas. Esse estudo revelou ainda que 1.200 km² de florestas foram afetados nas regiões de Pando na Bolívia, e mais de 200 km² de florestas queimaram em Madre de Dios no Peru. Essas áreas de floresta levarão tempo para se regenerarem com a reposição da matéria orgânica sobre o solo e o adensamento do dossel superior que protege a superfície da incidência direta dos raios solares, diminuindo o risco de novos incêndios. Os autores questionaram sobre as possibilidades desse evento extremo se repetir, visto que a Amazônia já sofreu com secas esporádicas e localizadas também com grandes impactos sobre a floresta e suas populações.

A Amazônia, devido aos seus altos índices de precipitação e umidade do ar em condições climáticas normais, pode ser considerada de pequeno risco de incêndios. Porém

devido, principalmente, às mudanças de uso da terra, isso tende ser alterado (Nepstad *et al.*, 1999a,b; Barbosa e Fearnside, 2000).

Prospecções arqueológicas determinaram a existência de camadas de carvão vegetal nas camadas subsuperficiais da floresta amazônica atual, essas camadas são datadas de 8.000, 2.700, 1.500, 700 e 130 anos atrás. Os períodos coincidem com evidências de antigos eventos de El Niño, permitindo relacioná-los com longas estiagens que favoreceriam a existência de queimadas na Amazônia (Sanford *et al.*, 1985; Meggers, 1994a,b; Piperno e Becker, 1996; Behling e Costa, 2000; Santos *et al.*, 2000).

Durante o século XX, a Amazônia sofreu incêndios de grandes proporções em diversas oportunidades, em 1912 e 1926 as estiagens prolongadas na bacia do rio Negro, no Noroeste do Amazonas, provocaram a incidência de fogo na região. Entre os anos de 1997 e 1998 cerca de 30.000 km² de florestas nativas sofreram incêndios que foram intensificados pelas estiagens no Norte do Amazonas e em diversas áreas de Roraima. Esses períodos de estiagem coincidem com a presença de eventos de El Niño intensos (Sanford *et al.*, 1985; Sternberg, 1987; Nepstad *et al.*, 1999a,b; Barbosa e Fearnside, 2000; Shimabukuro, 2000; Dias *et al.*, 2002). Em 2005 a bacia do rio Acre, no Sudoeste da Amazônia, passou por longa estiagem que provocou a redução do nível de água, comprometendo o abastecimento à população da cidade de Rio Branco e distritos habitacionais ao redor (Brown e Salimon, 2007), porém essa estiagem não estaria relacionada ao El Niño (Aragão *et al.*, 2007; Marengo *et al.*, 2007).

Sempre que há a ocorrência de longos períodos de estiagem em regiões de floresta, isso se traduz em prejuízos à biodiversidade, e aos ciclos de água e nutrientes que são fortemente atingidos. A perda de vegetação de grande porte pela ação do fogo reduz o potencial de reciclagem da água no sistema solo-planta-atmosfera. Havendo reduções das precipitações na Amazônia, induzidas pelas mudanças climáticas globais, que somadas às reduções previstas como resposta ao desmatamento, isso aumentaria sobremaneira a suscetibilidade dos ecossistemas amazônicos ao fogo, reduzindo a quantidade das espécies menos tolerantes à seca, com influências na biodiversidade, podendo alterar biomas até induzindo a ‘savanização’ de partes da Amazônia (Nobre *et al.*, 1991, 2007; Nobre, 2001).

O desmatamento na Amazônia é certamente o maior fator de impacto nas pressões que o Brasil sofre de diferentes entidades ambientais e governos internacionais. A derrubada da vegetação vem geralmente seguida por uma queimada, que libera enormes quantidades de

dióxido de carbono (CO₂) na atmosfera. Malhi *et al.* (2002) sugeriram alguns procedimentos que, se aplicados, minimizariam os impactos antropogênicos nas florestas tropicais e permitiriam uma melhor qualidade ambiental, principalmente no que se refere à redução das emissões de CO₂ para a atmosfera e mitigação dos impactos causados pelo efeito estufa.

A Amazônia tem sofrido uma mudança no uso do solo associada a um processo desordenado de ocupação desde a década de 1970. A região onde essa alteração é mais visível é denominada de ‘arco do desmatamento’ devido à exploração de madeira, abrangendo áreas de Rondônia, Mato Grosso, Tocantins, e Pará. A mudança de uso da terra se dá pela queima da biomassa existente na forma de floresta primária, permitindo a utilização da área para outros fins, como a expansão agrícola e da pecuária extensiva. A queimada é uma prática comum de limpeza das terras. O inventário nacional de emissões de gases de efeito estufa (GEE) classificou que as queimadas são responsáveis por, aproximadamente, 75% das emissões brasileiras de CO₂, o que coloca a mudança de uso da terra como a principal causa de emissão de GEE no Brasil (MCT, 2002; Pauliquevis *et al.*, 2007).

As estimativas das taxas de desmatamento da Amazônia Legal (Figura 1) são realizadas pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) através do Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (PRODES) desde 1988. As estimativas são produzidas por classificação digital de imagens. Entre as diversas vantagens deste procedimento a principal está na precisão do geo-referenciamento das áreas de desmatamento. A partir dos incrementos dos desmatamentos identificados em cada imagem, as taxas anualizadas são estimadas para a data de 1º de agosto do ano de referência (INPE, 2007).

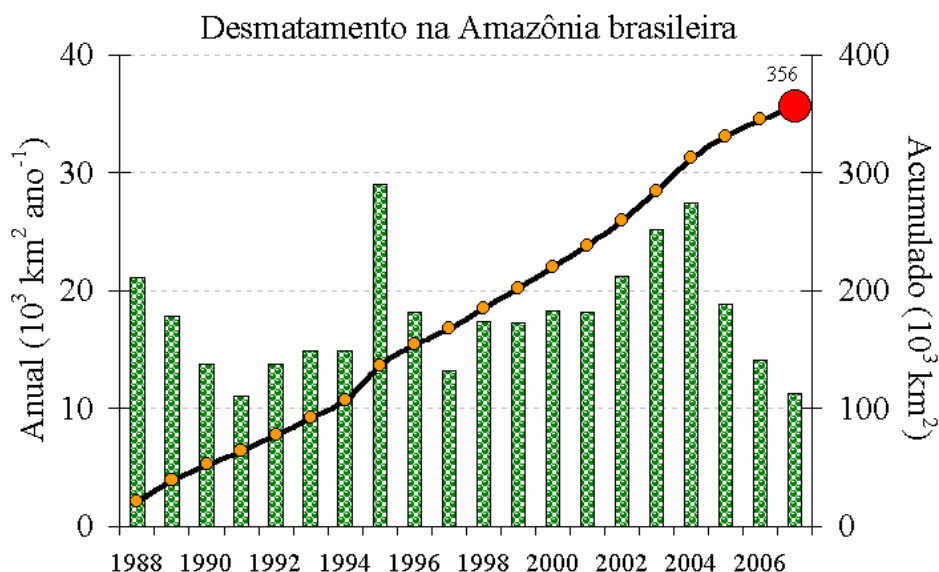


Figura 1. Taxas dos desmatamentos anuais (colunas) e acumulado (linha) na Amazônia brasileira no período de 1988 a 2007. Fonte: INPE - PRODES Projeto de Monitoramento do Desmatamento na Amazônia Legal por Satélite (<http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html>)

Aplicando simulações numéricas com o modelo BRAMS (Brazilian Regional Atmospheric Modeling System), Cohen *et al.* (2007) exibiram cenários de uma Amazônia mais seca e quente no futuro devido ao impacto do desmatamento. Foram apresentados dois cenários de cobertura vegetal, simulando os impactos da pavimentação das rodovias no avanço do desmatamento ao longo da Amazônia, para os anos de 2002 e 2050, Figuras 2a e 2b, respectivamente.

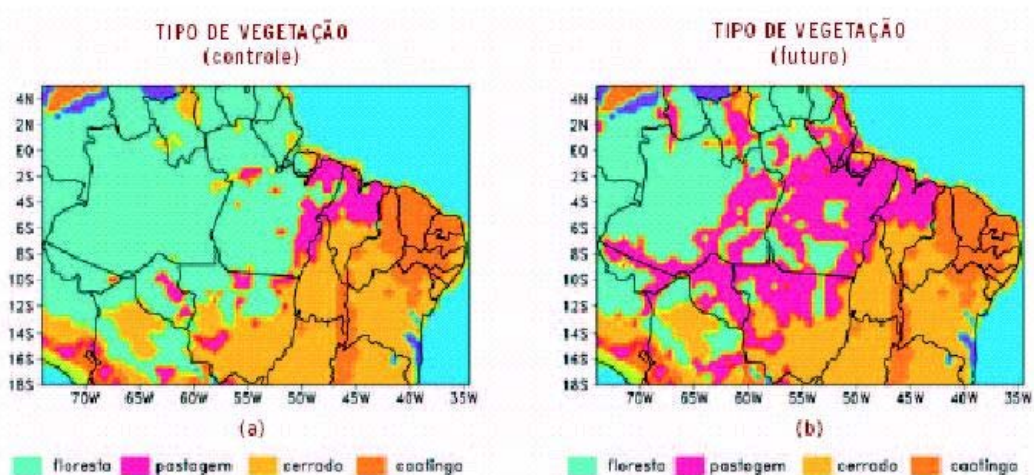


Figura 2. Simulações numéricas de dois cenários das mudanças da cobertura vegetal na Amazônia, sob os impactos da pavimentação das rodovias no avanço do desmatamento na região, para os anos de 2002(a) e 2050(b). Fonte: Cohen *et al.* (2007)

Observa-se que as classes dominantes de vegetação nesses cenários são a floresta, pastagem, cerrado e caatinga. A substituição da floresta por vegetação de pequeno porte indicou reduções de chuva em determinadas regiões e aumentos em outras, tanto no período chuvoso como no período seco. No Pará haveria redução da chuva de até 15% e 25% no período seco e chuvoso, respectivamente. Porém, no Amazonas, os autores observaram que a chuva seria reduzida em maior magnitude e área de abrangência no período seco.

O efeito do desmatamento pode intensificar os gradientes horizontais de temperatura e umidade, provocando aumento da precipitação pluvial associada às circulações atmosféricas locais. Esse crescimento nas chuvas poderá existir por um período, enquanto o suprimento de umidade for suficiente para manter a própria precipitação e, principalmente, o desmatamento não atingir áreas de dimensões tão grandes que quebrem esse equilíbrio (Correia *et al.*, 2007).

2.2. Observações sobre o ciclo hidrológico na Amazônia

Existem sérias dificuldades para a realização de um balanço hídrico com precisão para a Amazônia. Isso se deve à descontinuidade espacial e temporal das medidas de precipitação, a inexistência de medidas simultâneas de vazões fluviais e o desconhecimento do armazenamento de água no solo, entre outros fatores (Fisch *et al.*, 1998).

A compreensão do ciclo hidrológico (Figura 3) depende de diferentes processos físicos atuantes no caminho percorrido pela água no sistema solo-planta-atmosfera. Dois desses processos foram destacados por Villela e Mattos (1975) como os mais importantes no ciclo hidrológico de uma região, a precipitação P ou a precipitação livre p e a evaporação que pode ser dividida em E_s evaporação do solo, E_{al} evaporação da água livre. Oliveira (2007) destacou que do ponto de vista de conservação dos recursos hídricos, torna-se essencial o conhecimento quantitativo do processo de interceptação I , pois representa uma quantidade de água que, não chegando ao solo, é evaporada para a atmosfera. Tem-se ainda os processos de condensação C , o gotejamento g , escoamento pelos troncos ESC , o escoamento superficial R e escoamento subterrâneo ESC_{sub} .

As árvores atuam como bombas hidráulicas, absorvendo água do solo através das raízes e emitindo na forma de vapor d'água para a atmosfera, resfriando as folhas e o ar ao redor. Este processo denomina-se transpiração T_r , transformando o calor sensível em calor latente de vaporização (Brown e Salimon, 2007). A capacidade de absorção de água pelas

raízes das plantas, sob diferentes condições de solo, salinidade e nutrição, está associada ao poder dessas raízes de atingir elevadas taxas de respiração. A atividade estomática responde às mudanças das condições climáticas, independentes da região. A breve redução na radiação solar incidente sobre uma árvore, provocada pela simples passagem de nuvem, pode acionar a resposta imediata dos estômatos. Alterações na quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (RFA), disponível ou no déficit de pressão de vapor (DPV), também são prontamente sentidas pela vegetação (Ferreira da Costa *et al.*, 2003a).

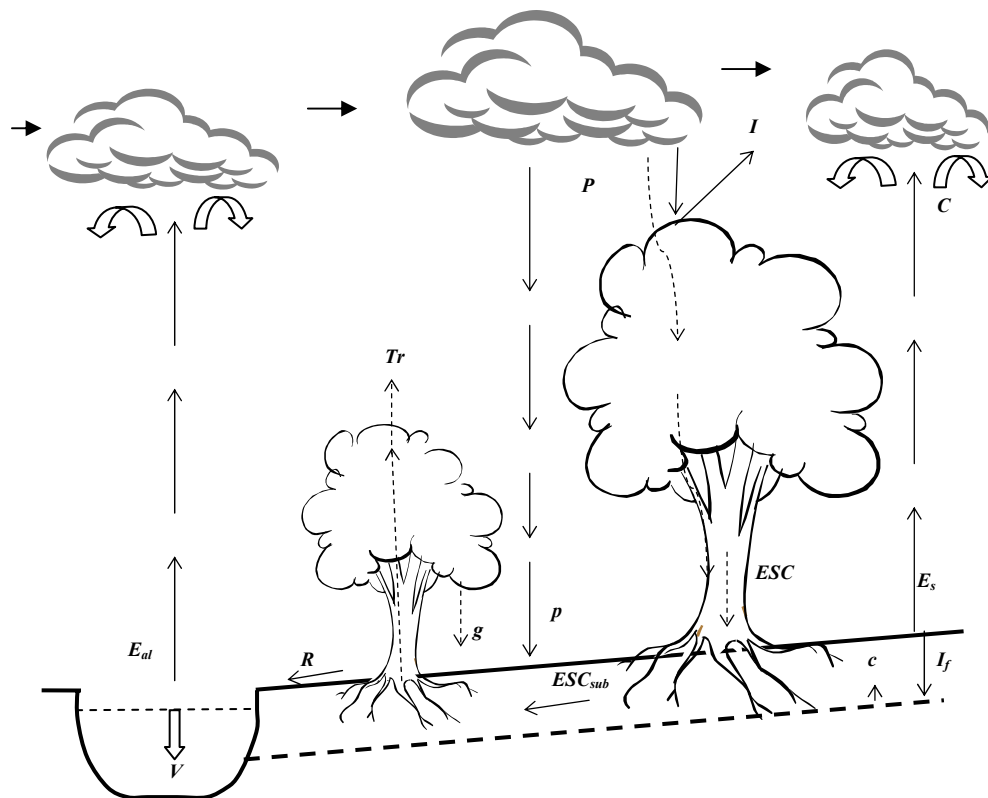


Figura 3. Ciclo hidrológico com ênfase no processo de transpiração (Tr) da vegetação. Adaptado de Oliveira (2007)

Sob uma vegetação ocorre redução da temperatura. Entretanto, com temperaturas mais baixas e umidade elevada, as folhas e galhos caídos no chão da floresta (foliço ou serapilheira) ficam úmidos e não permitem a expansão do fogo na vegetação (Mendoza, 2002). Sem transpiração, o ar se torna mais seco dentro da floresta, possibilitando a propagação do fogo dentro da floresta (Brown e Salimon, 2007). A precipitação pluvial em excesso satura o solo por infiltração I_f e por capilaridade c , e elimina os espaços de ar existentes, o que torna mais difícil o bom funcionamento das raízes. Por outro lado, quando

há longos períodos de estiagem, a disponibilidade de água para as raízes fica limitada, prejudicando o trabalho de absorção e afetando o transporte de nutrientes para todas as partes do vegetal. Isso compromete o seu desenvolvimento, ou seja, os eventos extremos (inundações ou estiagens) são quase sempre danosos aos vegetais. De maneira geral, as plantas absorvem efetivamente pouco da RFA nos processos fisiológicos, enquanto grande parte é transmitida como aquecimento (Bonato *et al.*, 1998).

Algumas vezes a transpiração pode reduzir o fluxo de água (a vazão V) nos igarapés e pequenos cursos d'água na floresta. Entretanto, a transpiração permite que haja formação de nuvens que provocarão mais chuvas em outras regiões para onde o vento desloque esta umidade. Essa teleconexão significa que uma parte da precipitação que ocorre no Sudoeste da Amazônia foi bombeada de algum solo da parte Leste da região, conseqüentemente o desmatamento no Leste da Amazônia pode ter um efeito nas chuvas no lado Sudoeste, especialmente na época seca (Brown e Salimon, 2007). A forma côncava da cordilheira dos Andes contribui para distribuição da umidade, tanto aquela advinda do Oceano Atlântico como a produzida na própria Amazônia. Parte dessa umidade se desloca para o Noroeste da região, Caribe e América central, outra parte vai para o Sudeste, atingindo a Bolívia e transportando umidade para as regiões Sul e Sudeste do Brasil. Uma parcela da precipitação, que ocorre eventualmente em Estados como Mato Grosso do Sul, São Paulo e Minas Gerais, vem de vapor d'água transpirado de regiões da Amazônia (Figueroa e Nobre, 1990; Marengo, 1992; Nobre e Shukla, 1996; Brown e Salimon, 2007).

Silva Dias *et al.* (2002) descreveram de forma meteorológica que a parte superior do ciclo hidrológico considera uma parcela de ar úmido ascendente na atmosfera, ocasionada pelo aquecimento do dossel vegetal provocado pelos raios solares, evaporando a água interceptada pela floresta ou que foi transpirada pela vegetação.

Para Case (2006) o ciclo hidrológico na Amazônia é ameaçado pelo risco que representam as mudanças climáticas. Em caso de elevação da temperatura isso causaria também maiores evaporações e transpirações das plantas, acelerando o ritmo normal do ciclo hidrológico. Nijssen *et al.* (2001) observaram que em havendo concomitantemente uma redução na precipitação durante a estação seca, o impacto das mudanças climáticas no regime hidrológico na Amazônia será ainda mais agravado.

Medidas realizadas durante o Experimento ABLE 2b, 1987 (*Amazonian Boundary Layer Experiment 2b, 1987*) determinaram em média, uma evapotranspiração de $5,3 \text{ mm dia}^{-1}$

ou 55% da precipitação medida de $9,7 \text{ mm dia}^{-1}$, indicando que a Amazônia é bastante eficiente na reciclagem da água na atmosfera, sendo que a substituição da floresta por pastagens não manteria a elevada taxa de evapotranspiração. Essa e outras mudanças podem indicar a existência de uma significativa sensibilidade do clima regional à presença ou ausência da floresta tropical (Nobre *et al.*, 1991). Através de um modelo de reciclagem da precipitação Eltahir e Bras (1994) estimaram que entre 25% e 35% da precipitação ocorrida na bacia amazônica seriam provenientes da evapotranspiração local.

2.3. Uma breve climatologia da Amazônia

Como a Amazônia é uma floresta tropical de dimensões continentais abriga uma das maiores e mais importantes bacias hidrográficas da Terra, ela é responsável por parte significativa da ciclagem de gases e umidade na interface floresta – atmosfera, influenciando no clima em escalas regional e global.

A floresta amazônica tem diversas funções, tais como a de sumidouro de carbono da atmosfera, utilizado pela vegetação no processo de fotossíntese (Grace *et al.*, 1996; Malhi *et al.*, 1998; Ferreira da Costa, 2000). Ela também tem entre suas finalidades a de repor parte do teor de umidade presente na atmosfera, por meio da transferência da água contida no solo realizada através da transpiração (Ferreira da Costa *et al.*, 2007).

Composta pelo rio Amazonas e seus afluentes, a bacia Amazônica é a maior do mundo com área $7 \times 10^6 \text{ km}^2$, dos quais mais de $4,7 \times 10^6 \text{ km}^2$ no Brasil, drenando também regiões dos seguintes países: Peru, Bolívia, Equador, Venezuela, Guiana e Colômbia, representando o maior volume de água doce do mundo e o maior potencial para geração de hidroeletricidade do Brasil. O rio Amazonas tem um comprimento de 6.868 km, nasce na cordilheira dos Andes, no Peru, e ao longo de seu percurso tem diversos nomes, entre eles; *Tunguragua*, *Marañón*, *Ucayali*, já em território brasileiro passa a denominar Solimões, só recebendo o nome de Amazonas ao encontrar-se nas proximidades da cidade de Manaus, AM, com o rio Negro, possui mais de mil afluentes, sendo os principais no Brasil, à margem direita o rios Juruá, Purus, Madeira, Tapajós e Xingu, e na margem esquerda os rios Japurá, Negro, Nhamundá, Trombetas e Jarí (Souza *et al.*, 2003).

Cerca de $6.000 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ de água (~15% a 20% do total de vazão de água doce mundial) são drenados pela bacia amazônica e lançados no oceano Atlântico. A região age como um sumidouro de vapor de água na mesma proporção que a água líquida resultante abastece seus

rios e outros mananciais. Estudos observacionais mostraram que o fluxo de umidade para a Amazônia é predominantemente zonal de Leste, intensificado pela elevação da temperatura da superfície do mar (TSM) sobre o Atlântico, o qual se movimenta acompanhando a zona de convergência intertropical ZCIT (Marques, 1978; Marques *et. al.* 1979a,b; Souza, 1991, Davidson *et al.*, 2004.).

Estudos das circulações de macro e mesoescala que atuam na Amazônia e dos processos dinâmicos que organizam e promovem a precipitação naquela área foram realizados por Molion (1987; 1993). Segundo esse autor, os mecanismos que provocam chuva na Amazônia podem ser reunidos em três grupos; a) convecção diurna resultante do aquecimento da superfície e condições de larga escala favoráveis; b) linhas de instabilidade originadas na costa Norte-Nordeste do litoral do Atlântico; c) aglomerados convectivos de meso e larga escala, associados com a penetração de sistemas frontais nas regiões Sul e Sudeste do Brasil e interagindo com a Amazônia.

Foram observados no Sul e Sudeste da Amazônia que a estação seca é mais acentuada durante o inverno do hemisfério sul, e a estação chuvosa é causada pela presença freqüente de aglomerados convectivos associados a sistemas frontais, produzidos pela penetração no continente da umidade proveniente da zona de convergência do Atlântico Sul (ZCAS)(Cohen *et al.*,1995; Cohen, 1996). Há indução de formação de nuvens convectivas e precipitação pela ocorrência de fenômenos de brisa fluvial em áreas próximas a grandes corpos d'água (Molion e Dallarosa, 1990). Isso também foi observado por Fisch *et al.* (1998) e Cohen *et al.* (2007) em grandes áreas de transição de floresta para vegetação de pequeno porte (principalmente pastagem).

Figuerola e Nobre (1990), e Marengo (1992) indicaram que as máximas precipitações regionais ocorrem na parte Noroeste da Amazônia, sem estação seca, e com totais mensais acima de 200 mm mês⁻¹ na maioria dos meses, e estaria associado à forma côncava da cordilheira dos Andes que produziria convergência da umidade em baixos níveis, naquela sub-região. Há também grandes precipitações no Leste da Amazônia próximo do Atlântico, porém, com duas estações bem distintas; a seca de setembro a novembro ($P < 50$ mm mês⁻¹) e a chuvosa de fevereiro a maio ($P > 250$ mm mês⁻¹) causado pela penetração da ZCIT que se impõe às linhas de instabilidade (LIs), ondas de Leste (OL), complexos convectivos de mesoescala (CCMs).

A umidade específica média anual na Amazônia varia entre 16 e 19 g kg⁻¹ (gramas de água por quilograma de ar) na superfície. Sendo os menores valores médios dessa grandeza, em torno de 14 g kg⁻¹, encontrados a Sudeste da região. Essa umidade do Atlântico penetra no continente ao mesmo tempo em que o fluxo se atenua às proximidades da cordilheira dos Andes, onde se bifurca, indo um ramo para o Noroeste da Amazônia e para a América Central e outro ramo segue para o Sudeste, transportando umidade para o Sul da Região (Marengo, 1992; Nobre e Shukla, 1996). As precipitações acima da média no Leste da Amazônia estão relacionadas com os eventos de La Niña e sofrem as influências das TSMs do Atlântico e Pacífico no primeiro trimestre do ano (Souza, 2003).

A distribuição da precipitação observada na América do Sul tropical apresenta grandes áreas onde os totais anuais alcançam mais de 3.000 mm ano⁻¹. No Leste dos Andes e na costa Oeste da Colômbia os totais atingem até 5.000 mm ano⁻¹, devido principalmente, ao levantamento mecânico dos fluxos de ar dos baixos níveis, pela topografia. Das Guianas até o Estado do Maranhão, na costa atlântica, as propagações da brisa marítima e das linhas de instabilidade para Oeste proporcionam precipitações acima de 3.000 mm ano⁻¹. As razões para essa máxima precipitação registrada no Oeste da Amazônia não são bem entendidas, mas há sugestões de que a forma côncava da Cordilheira dos Andes favoreceria a convergência dos fluxos de umidade de baixos níveis predominantemente de Leste (Nobre *et al.* 1991; Salati e Vose, 1984). Além dessas características, há uma grande precipitação máxima anual acima de 2.000 mm estendendo-se de Sudoeste para Sudeste da Amazônia, combinando-se com as áreas de grandes precipitações da área da ZCAS (Nobre *et al.*, 1991).

Salati *et al.* (1979), aplicando as técnicas isotópicas para analisar as medidas de concentração de oxigênio em água da chuva na Amazônia, determinaram que a precipitação na região é uma composição da quantidade de água evapotranspirada localmente somada a uma contribuição advinda do Oceano Atlântico, estimando dessa forma, que aproximadamente 50% do vapor d'água que formam as chuvas são gerados por evapotranspiração local, sendo a outra metade importada para a região pelo fluxo atmosférico proveniente do Atlântico. A contribuição do Oceano Pacífico seria mínima (Salati e Vose, 1984). Para Marques *et al.* (1980) que usaram a divergência do fluxo de vapor d'água na Amazônia e estimaram que 52% da precipitação ocorrida entre Belém e Manaus seriam provenientes do Oceano Atlântico e os 48% restante seriam reciclados na própria área.

De uma maneira geral, o período de chuvas com intensas atividades convectivas, é compreendido de novembro a março, enquanto que a época seca entre maio e setembro. Os

meses de abril e outubro são meses de transição entre um regime e outro. A distribuição de chuva no trimestre dezembro – janeiro - fevereiro apresenta uma região de precipitação acima de 900 mm situada nas regiões Oeste e Central da Amazônia. O máximo da chuva na região Central da Amazônia pode estar associado à penetração de sistemas frontais da região Sul do país, interagindo e organizando a convecção local (Fisch *et al.*, 1998).

2.4. O processo de transpiração vegetal

A transpiração é um processo vital para os seres vivos. A transpiração é uma reação fisiológica do organismo a um aumento térmico biótico ou abiótico, e resulta na transferência da água líquida de um corpo para a atmosfera, na forma de vapor.

Mais especificamente, a transpiração vegetal ocorre pelas respostas físicas e fisiológicas das plantas através dos seus estômatos e das cutículas. Os estômatos, que ocupam somente de 1 a 2% da superfície foliar, são os controladores da quantidade de água transpirada, sendo suas atividades diretamente dependentes das condições ambientais, climáticas e edáficas. A transpiração é vital para a planta por possibilitar a condução da água e dos nutrientes captados pelas raízes, desde o solo até as folhas, que permitirão os processos fotossintéticos dentro dos estômatos, além de resfriar a superfície foliar (Meyer *et al.*, 1973; Campbell & Reece, 2002).

A adaptação da planta ao seu habitat influencia sobremaneira a capacidade de controle da transpiração deste vegetal. Em determinadas condições, a abertura ou fechamento dos estômatos que regulam a transpiração é dirigido pelo conteúdo de água no solo disponível ao sistema radicular. Esta resposta estomática é variável entre as diversas espécies, que têm inúmeras estratégias de sobrevivência. Mesmo entre indivíduos de uma mesma espécie, há respostas diferenciadas devido à localização dos galhos nas árvores, das folhas nos galhos, e dos estômatos nas folhas. Isto porque os estômatos sofrem influência direta das condições climáticas (Larcher, 2000).

Os principais fatores ambientais que influenciam no ritmo da transpiração vegetal são as radiações solares nas formas de luminosidade e de temperatura, pois as plantas transpiram mais intensamente sob luz do que sombreadas, devido ao estímulo que a luminosidade provoca nos mecanismos de abertura estomática e também no aquecimento da superfície foliar, já que a água evapora mais celeremente sob temperaturas mais elevadas. Uma folha pode transpirar até três vezes mais rápido a 30 °C do que se estiver a 20 °C. A umidade

contida no ar também age sobre a transpiração das plantas, pois a taxa de difusão de uma substância tem aumento proporcional ao crescimento da diferença entre as concentrações dessa substância em dois ambientes adjacentes; portanto, quanto mais o ar no entorno da folha estiver seco, maior será a difusão da água contida nos estômatos, e vice-versa. Neste ponto, outro fator abiótico entra em ação sobre a transpiração, que é o vento. Quando não há vento, ou deslocamento de ar, a região no entorno da folha torna-se mais úmida, o que reduz a taxa de transpiração pela menor difusão hídrica, sendo este quadro alterado quando ocorre a substituição do ar úmido em contato com a folha, por um ar mais seco que foi advectado pelo vento. O outro fator ambiental que influencia na transpiração das plantas, e talvez o mais importante, é o conteúdo de água no solo disponível às suas raízes. Uma planta não conseguirá manter uma taxa de transpiração regular se não houver a reposição pelas raízes da mesma quantidade de água transferida para a atmosfera, e esta manutenção hídrica é que irá determinar a turgescência do vegetal. Uma planta com a turgidez ameaçada se defenderá fechando seus estômatos para diminuir a perda de água, o que influenciará também na sua fotossíntese, pois se o equilíbrio hídrico entre as raízes e as folhas não for mantido, a planta entrará em estado de murcha, inicialmente temporária, mas que se for prolongado, poderá levar a sua à morte (Larcher, 2000; Steudle, 2001; Taylor *et al.*, 2002; Steudle & Paterson, 1998).

Quase a totalidade (>90%) da água absorvida do solo pelas raízes é transpirada, essencialmente pelo dossel foliar, sendo que a maior parcela da transpiração é realizada nas horas de luz solar. Durante parte da noite ainda há transpiração, porém em pequenas quantidades, enquanto que a absorção radicular de água é máxima nesse período. Esta situação faz com que as plantas estejam geralmente túrgidas na fase noturna (Taylor *et al.*, 2002).

Para a adaptação das plantas ao ambiente terrestre, foi necessário o desenvolvimento evolutivo de mecanismos de captação no solo, da água e dos nutrientes e de seu fornecimento para todas as partes do vegetal, além de uma proteção eficiente para não permitir o extravio durante a condução dessa água, fundamental para sua sobrevivência. O transporte e a distribuição da água e dos nutrientes captados pelas raízes, desde o solo até as folhas é feito através do sistema vascular das raízes e dos troncos. Esse conjunto vascular é composto pelas estruturas do xilema e do floema. O grupo xilêmico é o responsável pela condução da seiva bruta formada pela água e nutrientes absorvidos no solo até os estômatos, onde serão transformados pelas atividades fotossintéticas, em soluções orgânicas da seiva elaborada que

são distribuídas pela estrutura floêmica para todas as porções da planta (Salisbury & Ross, 1992).

Para tentar melhor entender as atividades e estruturas das plantas, o fisiologista irlandês Henry H. Dixon publicou no ano de 1895, um dos estudos pioneiros sobre o transporte de água nas plantas. A teoria de Dixon propôs a hipótese da Tensão-Coesão indicando a existência da relação direta entre a transpiração e a ascensão da água no xilema. Nessa situação, a transpiração seria a força motriz para fazer a seiva bruta alcançar os estômatos. Em uma simplificação dos processos envolvidos, pode-se imaginar que quando há a evaporação de parte da água contida nos estômatos para a atmosfera, uma nova quantidade de água adjacente ocuparia o espaço liberado, como as moléculas de água tendem a se agregar devido ao poder de atração das pontes de hidrogênio. Esse movimento de substituição das quantidades que ascenderiam se repetiria até alcançar as estruturas xilêmicas das raízes, onde a redução do potencial hídrico facilitaria a absorção por osmose de nova água do solo no xilema radicular. O ponto frágil desse sistema é que ele tem que ser contínuo, sem interrupções, que na realidade ocorrem por cavitação no xilema, quando há a formação de bolhas de ar no duto vascular. Em algumas situações e espécies, é possível a retomada do fluxo ascendente após a cavitação, porém, se a recuperação da continuidade do fluxo não ocorrer, aquele duto xilêmico estará definitivamente comprometido das suas funções de transporte da água na planta (Dixon & Joly, 1895; Campbell & Reece, 2002; Taiz & Zeiger, 2004). Portanto, para se determinar o fluxo de água de uma população vegetal para a atmosfera em uma área ou em uma bacia hidrográfica, a quantificação da transpiração torna-se de fundamental importância.

2.5. Métodos para determinar o fluxo de seiva

Há uma variedade de métodos para determinação de fluxos de seiva, sendo que os principais deles foram revisados por Čermák *et al.* (2004) e serão detalhados a seguir: pulso de calor (PC) (Huber, 1932; Huber e Schmidt, 1937; Marshall, 1958); balanço de calor no tronco (BCT) (Čermák *et al.*, 1973, 1982, 2004; Sakuratani, 1981; Baker e Van Bavel, 1987); o método da dissipação térmica (DT) (Granier, 1985, 1987); e da deformação do campo de calor (DCC) (Nadezhdina *et al.*, 1998, 2004; Nadezhdina e Čermák, 1998; Čermák *et al.*, 2004).

Também há os métodos destrutivos, nos quais se mede o deslocamento de indicadores (sal, tinta, ou partículas radioativas) que se movem através de uma área conhecida de seção transversal do tronco, em um determinado espaço de tempo. Esses métodos têm a desvantagem de necessitar de vasos de calibres convenientes e fluxos de seiva de grande intensidade além de medir a quantidade da seiva ou introduzir o indicador causando erros desconhecidos e danos aos vegetais (Crafts *et al.*, 1949). Em seus experimentos, Marshall (1958) confirmou que a ruptura dos vasos capilares das plantas vivas sempre provocava grandes variações instantâneas na magnitude do fluxo de seiva.

Diversos estudos também foram desenvolvidos com o objetivo de determinar medidas e/ou estimativas de evapotranspiração. Grande parte deste esforço foi direcionada para as espécies frutíferas de pomar ou para culturas com produção em grande escala, através da aplicação de diferentes métodos (Casa *et al.*, 2000; Netto *et al.*, 2000; Silva *et al.*, 2000; Azevedo *et al.*, 2003; Möller *et al.*, 2004; Sammis *et al.*, 2004; Testi *et al.*, 2004; Williams *et al.*, 2004; Nicolasa *et al.*, 2005; Orgaz *et al.*, 2005); entretanto, a determinação da evapotranspiração em espécies florestais tem sido menos enfocada, porém não menos importante (Meinzer *et al.*, 1997, Naves-Barbiero *et al.*, 2000, Köstner, 2001). Foram realizados, também, alguns estudos para estimativa de evapotranspiração na região amazônica (Villa Nova *et al.*, 1976; Marques *et al.*, 1980; Shuttleworth *et al.*, 1987).

2.5.1. Método do pulso de calor (PC)

O método do pulso de calor (PC) foi originalmente aplicado em lianas tropicais com altas taxas de fluxo de seiva por Huber (1932); Huber e Schmidt (1937) e Dixon (1937) que usou o calor como marcador, por não apresentar as desvantagens dos métodos destrutivos, determinando o fluxo de seiva por condução térmica nas paredes dos vasos capilares. O calor foi aplicado por um ou dois segundos representando um pulso na emenda do termopar a 0,30 m abaixo do aquecedor. O tempo necessário para a primeira medida de calor chegar no termopar foi considerado como o mesmo que a seiva levaria para percorrer a mesma distância. Dixon (1937) obteve bons resultados quando posicionou os termopares a 0,01 e 0,02 m distantes do aquecedor e considerando apenas os casos quando a emenda mais distante obteve maiores valores de temperatura que a mais próxima no mesmo estágio. Huber e Schmidt (1937) adaptaram o método com a mesma proposta na qual uma emenda estava a 0,02 m abaixo do aquecedor enquanto a outra ficou 0,016 m acima do mesmo.

Para Smith e Allen (1996), e Santos *et al.* (2005), dentre os diversos métodos para determinar diretamente o consumo hídrico das plantas lenhosas, destaca-se o PC que ganhou espaço pela facilidade de automação e possibilidade de monitoramento individualizado e contínuo da água na planta, em intervalos curtos de tempo. A perda de água pela videira em vasos e em campo pode ser determinada satisfatoriamente pelo PC, com sensores de pequeno diâmetro e baixo fornecimento de calor para marcação da seiva, dependendo da localização dos sensores no lenho para correta integração do fluxo volumétrico de seiva (Santos *et al.*, 2005).

2.5.2. Método da dissipação térmica (DT)

O método da dissipação térmica (DT) ou método de Granier quantifica o fluxo de seiva de árvores lenhosas pela diferença de temperatura entre duas sondas (agulhas) inseridas radialmente no caule, sendo que uma delas recebe energia constante para aquecimento e a outra serve para determinar a temperatura de referência. Uma equação simples permite o cálculo do fluxo de seiva em função da diferença de temperatura observada entre as duas sondas. É um método eficiente de efetuar amostragem de diferentes espécies vegetais. O baixo custo de instalação e a boa sensibilidade desse sistema permitem obter medidas quantitativas e variabilidades da transpiração em uma determinada vegetação (Granier, 1985; 1987).

Naves-Barbiero *et al.* (2000), utilizando o método DT, compararam o fluxo de seiva, condutância estomática e potencial hídrico de duas espécies lenhosas típicas do cerrado (*Rapanea guianensis* e *Roupala montana*) no campo sujo e no cerradão, durante a estação da seca, visando determinar se as espécies apresentariam diferentes estratégias de regulação hídrica nas duas fisionomias. Ambas são espécies sempre verdes, comuns nos cerrados, e que podem atingir porte arbóreo. O fluxo de seiva no xilema foi medido em três indivíduos de cada espécie estudada durante quatro dias consecutivos em agosto de 1997. O dispositivo para medir o fluxo de seiva constava de duas sondas de 0,002 m de diâmetro e 0,02 m de comprimento, que foram inseridas no xilema das árvores, separadas por uma distância vertical de 0,15 m. As sondas continham um termopar de cobre-constantã (Cu-Cst) no centro de uma agulha hipodérmica. Além do termopar, a sonda superior possuía uma resistência elétrica alimentada por uma bateria de 12 volts, provocando um aumento de temperatura no local de inserção da sonda.

2.5.3. Método do balanço de calor no tronco (BCT)

O método do balanço de calor no tronco (BCT) (Čermák *et al.*, 1973) resume-se na aplicação contínua de energia para aquecimento de parte do tronco vegetal em quantidade constante. Considerando as perdas de energia por condução no tronco e a variação da temperatura do tronco. Assim sendo, determina-se o fluxo de calor conduzido pela seiva através da diferença entre as perdas axial e radial com a energia aplicada. Esse fluxo de calor permite a determinação do fluxo de seiva.

O BCT é uma técnica para medir o consumo hídrico de plantas lenhosas que resulta em boas respostas. Essa técnica se destaca dos outros métodos de fluxo de seiva por não ser invasivo e dispensar calibrações, possuir instrumental simples de confecção e aplicação além do baixo custo. Apesar da operacionalidade fácil, há necessidade de avaliação da qualidade das medidas o que é de difícil realização, principalmente em campo e em árvores de grande porte (Marin, 2003; Marin *et al.*, 2007).

Sakuratani (1981) e Baker e Van Bavel (1987) simplificaram o BCT aplicando uma quantidade de energia com potência constante no sensor, barateando o preço e facilitando as medidas, pois precisariam somente fornecer uma corrente contínua aos sensores de fluxo. Comparando as modificações propostas por Sakuratani (1981) e Baker e Van Bavel (1987), verifica-se que os resultados obtidos por Sakuratani são de melhor qualidade e que o BCT é considerado melhor que outros métodos, principalmente por não necessitar de calibração e ser de fácil utilização. O BCT requer, naturalmente, que alguns cuidados sejam observados quando da sua aplicação, como os descritos por alguns autores, como Baker e Nieber (1989) que observaram a importância do formato anatômico dos troncos das plantas estudadas. Steinberg *et al.* (1990) observaram que quando há grande variação radial na condução de água, é necessário conhecer as variações axiais de temperatura no tronco vegetal. Valancogne e Nasr (1993) chamaram à atenção para as árvores de grande porte, para a necessidade de considerar o armazenamento de calor no tronco. Weibel e de Vos (1994) destacaram que é necessário que sempre haja um contato entre o termo-sensor e o tronco do vegetal. Van Bavel (1999) recomendou a instalação dos sensores distantes da superfície do solo o suficiente para minimizar a influência do gradiente térmico do solo.

Quando se tomam os cuidados necessários para minimizar os erros de instalação, principalmente em árvores de grande porte, o BCT é muito eficiente para se obter o fluxo de

seiva, que quando integrado para intervalos maiores que 24h, representa fielmente a transpiração vegetal (Čermák *et al.*, 1973, 1982; Sakuratani, 1981; Baker e Van Bavel, 1987; Čermák e Kucera, 1990; Jiménez *et al.*, 1996; Marin *et al.*, 2007). As vantagens do controle da energia para o BCT nas medidas de fluxo de seiva são evidentes para as grandes taxas de fluxo ($FS > 0,6 \text{ kg h}^{-1}$) onde altas taxas de energia devem ser aplicadas. Para os fluxos ainda maiores ($FS > 1,6 \text{ a } 4,0 \text{ kg h}^{-1}$), obtidos em videiras adultas, foram utilizados para controle do fornecimento de energia para o BCT (Tarara e Ferguson, 2006).

2.5.4. Método da deformação do campo de calor (DCC)

O método da deformação do campo de calor (DCC) foi utilizado também por diversos pesquisadores (Nadezhdina *et al.*, 1998, 2002, 2003, 2004; Nadezhdina e Čermák 1998, 2003; Čermák *et al.*, 2004). Esse método é baseado em medidas dos gradientes de temperaturas axial e tangencial do tronco em torno de um aquecedor linear. O equipamento consiste de dois conjuntos de sensores compostos por duas agulhas do mesmo tamanho (termopares) e uma terceira agulha maior que será a fonte de calor em cada um dos conjuntos. No primeiro conjunto, os termopares são inseridos simetricamente a 0,015 m acima e abaixo do aquecedor para determinar a diferença de temperatura simétrica do fluxo de seiva (dT_{si}), enquanto o segundo conjunto é colocado ao lado do aquecedor para determinar a diferença de temperatura assimétrica do fluxo de seiva (dT_{as}), sendo que nesse caso o termopar superior é inserido a apenas 0,001 m do aquecedor enquanto o inferior fica na mesma distância do primeiro conjunto (0,015m). Para o cálculo do fluxo de seiva leva-se em consideração a geometria do ponto de medida, a condutividade de calor pelo tronco o calor específico da água, e a razão entre os gradientes térmicos (dT_{si} / dT_{as}). O campo de calor produzido pelo aquecedor é registrado pelos termopares inseridos no tronco, e também pode ser visualizado por uma câmera com sensor infravermelho apontada para uma face do tronco especialmente preparado com antecedência acompanhando o do pico de calor gerado pelo aquecedor, que é deslocado proporcionalmente pelo movimento da seiva (Nadezhdina *et al.*, 2002, 2004; Čermák *et al.*, 2004).

2.5.5. Aplicações dos diversos métodos de determinação do fluxo de seiva

A condutância estomática na planta sob condições de estresse hídrico é controlada pela taxa de fornecimento de água para as folhas. Isso depende da diferença no potencial hídrico entre o solo e a folha e a resistência a ser vencida pela água para atingir a folha. No solo, a resistência hidráulica depende da conexão da água existente nos poros, e na planta, e depende também da quantidade e tamanho dos vasos do xilema que transportarão a água. Outra resistência adicional existe na membrana superficial da raiz. Durante condições de estresse hídrico, a água que preenche os poros no solo está menos conectada, tornando mais difícil sua retirada do solo pelas raízes. Além disso, em condições de elevada sucção, o ar entra no vaso do xilema, causando uma quebra na coluna interna de água, tornando aquele vaso inativo. As resistências da planta e do solo são respostas dinâmicas do ecossistema ao nível de estresse hídrico (Fisher, 2003).

Granier (1987) descreveu a aplicação do método da DT em uma área com pinheiros para determinar a transpiração durante quatro meses. A variação do fluxo de seiva entre os exemplares da mesma espécie foi relacionada com a diferença de classe das copas das árvores. Para dias ensolarados, em média, as árvores mais sombreadas transpiraram $1,6 \text{ mm dia}^{-1}$, as intermediárias atingiram $8,0 \text{ mm dia}^{-1}$ enquanto que as árvores emergentes alcançaram $22,0 \text{ mm dia}^{-1}$. Quando a disponibilidade de água no solo atingiu menos de 30% do seu potencial, a transpiração estimada pelo fluxo de seiva foi inferior à evapotranspiração potencial. Os valores de transpiração obtidos pelas medidas de fluxo de seiva foram similares àqueles determinados pelo método do balanço hídrico.

Meinzer *et al.* (1999) utilizaram sensores de fluxo de seiva para estudar a regulação hídrica em quatro espécies arbóreas sempre-verdes, em um cerrado *sensu strictu* da região Centro-Oeste, e constataram que essas espécies exerceram um rígido controle da transpiração, via controle estomático pronunciado, levando a limitações no fluxo de seiva tanto na estação seca como na estação chuvosa.

Marin *et al.* (2001) realizaram medições de fluxo de seiva pelo método BCT e de fluxo de vapor d'água acima de um pomar irrigado de lima ácida "Tahiti" para determinar a contribuição relativa da transpiração das árvores para a evapotranspiração do pomar. Medidores de fluxo de seiva foram instalados em duas árvores com áreas foliares bem distintas para se avaliar o efeito do tamanho da copa na transpiração.

No estudo de Coelho Filho *et al.* (2004) o BCT permitiu a determinação do fluxo de seiva, cujo valor em escala diária equivale à transpiração em espécies arbóreas. Esse método apresentou as vantagens de não necessitar calibração, de ser não-destrutivo e de possibilitar o monitoramento simultâneo da transpiração em muitas plantas. Porém, como desvantagens, pode-se citar o custo dos sensores comerciais e certa complexidade do seu manejo, que dificulta seu uso na prática.

A quantificação da transpiração de fruteiras em campo é difícil e depende de uma série de fatores, como a disponibilidade hídrica, da demanda de umidade atmosférica e características da planta, como área foliar, geometria de copa e de plantio, que afetam a capacidade de interceptação da radiação solar e a interação com o vento (Angelocci, 1996; Valancogne *et al.*, 2000).

Diversos estudos foram realizados para comparar os resultados obtidos com o BCT e aqueles através de modelos ou lisímetros. Todos eles indicaram que quando são tomados os cuidados necessários na instalação do BCT esse método responde satisfatoriamente (Steinberg *et al.*, 1990; Trejo-Chandia *et al.*, 1997; Herzog *et al.*, 1997; Gutiérrez *et al.*, 1994; Čermák e Nadezhdina, 2006).

Nadezhdina *et al.* (2004) aplicaram o método DCC em duas árvores de lima (*Tilia cordata* Mill.) identificadas por T1 e T2, com DAP de 0,153 m e 0,148 m, respectivamente. Na árvore T1 os termopares foram inseridos na parte posterior à face preparada para monitoramento por uma câmera com sensor infravermelho, sendo que o final do aquecedor atingia essa face alisada. A árvore T1 teve um dos seus dois ramos secundários cortado logo após a bifurcação do tronco principal para provocar alteração brusca no fluxo de seiva. Na árvore T2, que também teve uma face preparada igual a T1, os termopares foram instalados paralelamente à face alisada e não sofreu corte do ramo secundário. Os autores obtiveram ótimas imagens térmicas do deslocamento da seiva através do acompanhamento da movimentação do pico de energia gerado pelo aquecedor linear inserido no tronco. O método DCC, apesar dos resultados alcançados neste experimento, apresenta elevada complexidade de operação, porém é considerado ser bastante invasivo ao vegetal.

2.6. A importância da determinação do fluxo de seiva em árvores de grande porte na Amazônia

Como apresentado nos diversos tópicos da sessão anterior, vários estudos foram realizados para determinar a transpiração das plantas através do uso dos mais diferentes métodos de medidas de fluxo de seiva. Alguns desses trabalhos foram realizados em áreas de florestas, como os desenvolvidos por Jimenez *et al.* (1996, 1999) na região de Tenerife, nas Ilhas Canárias, e também o estudo de Cienciala *et al.* (2000) realizado na floresta tropical de Bornéu, na Malásia.

No Brasil, estudos de transpiração foram realizados para plantas em pomares, como o de cítricos por Marin *et al.* (2001), Angelocci *et al.* (2004) e Coelho Filho *et al.* (2004) na região Sudeste do país. As necessidades hídricas das goiabeiras em uma região irrigada do semi-árido do Nordeste brasileiro foram determinadas por Silva *et al.* (2002). Por outro lado, Marin (2003) desenvolveu trabalho com exemplares de café na região Sudeste do Brasil utilizando essa técnica. Para biomas naturais brasileiros, Meinzer *et al.* (1999) e Naves-Barbiero *et al.* (2000) estudaram árvores do cerrado, campo sujo e cerradão do Distrito Federal no Centro-Oeste.

Souza Filho *et al.* (2005) estimaram alguns mecanismos de controle da evapotranspiração no Leste da Amazônia através da aplicação de equações, condutâncias da superfície e aerodinâmica, além de fatores de desacoplamento da transpiração do dossel com a atmosfera. Neste contexto, nota-se a lacuna existente causada pela ausência de estudos desenvolvidos na Amazônia para a determinação da transpiração dos exemplares de grande porte, que compõem a maior floresta tropical do mundo.

A transferência de água do solo para a atmosfera, transpirada pelas florestas, ocorre o ano inteiro, existindo ou não precipitação pluvial. A água do solo é absorvida e transpirada, secando o solo quando há um período de estiagem. Dependendo da duração da seca, as árvores começam a ter dificuldades de transpirar, provocando a queda das folhas, tornando o dossel da floresta esparso, permitindo que o sol reduza a umidade do solo mais rapidamente, tornando a área vulnerável ao fogo (Brown e Salimon, 2007).

A vegetação na Amazônia sofre grandes queimadas todos os anos durante o período de estiagem, sendo apontada como a região responsável pela maior parte da liberação de CO₂ do Brasil para a atmosfera. O inventário nacional de emissões de GEE coloca que, em termos de liberação de CO₂, as queimadas são responsáveis por 75% das emissões brasileiras de

carbono (MCT, 2002), indicando que a mudança de uso da terra seria a principal causa de emissão de GEE no Brasil.

Segundo Pauliquevis *et al.* (2007) as mudanças climáticas que vêm sendo observadas na Terra são causadas pelas emissões antropogênicas de GEE, e que se nada for feito para reduzir as emissões desses gases, entre eles o CO₂, o clima poderá sofrer profundas mudanças nas próximas décadas.

Desta forma, entende-se que todas e quaisquer ferramentas disponíveis devem ser utilizadas para auxiliar na formação da conscientização de que a floresta amazônica, ou parte do que dela ainda existe, pode e deve ser preservada.

Assim, demonstrar através de medições reais obtidas em experimentos de campo, que a vegetação de grande porte na Amazônia contribui com a manutenção dos teores de umidade atmosférica e concomitantemente é dependente dessa umidade na forma de precipitação pluvial para sobreviver, deve ser considerado como mais uma forma de persuasão na formação das políticas públicas para manutenção da floresta tropical na Amazônia.

2.7. O Projeto LBA

O Experimento em Grande Escala da Biosfera - Atmosfera na Amazônia (LBA) é um programa de pesquisa multinacional e interdisciplinar liderado pelo Brasil, com o objetivo principal do entendimento das alterações nos ciclos da água, de carbono e de nutrientes, bem como dos balanços de energia solar, em função das modificações verificadas na cobertura vegetal da região. Esse projeto estuda os relacionamentos entre o clima, o solo, os gases atmosféricos, e os impactos do uso da terra na Amazônia. E, ainda, a interação dos processos entre o ciclo biogeoquímico amazônico e a biosfera terrestre, além do ciclo hidrológico.

Na Hidrologia se consideram questões relativas à quantidade e qualidade de água na bacia amazônica. Os reservatórios e fluxos de água, os controles no movimento da água em solos e rios, e o transporte de constituintes associado, são determinados para um conjunto de sítios representando uma gama de intensidades de usos da terra. Microbacias desmatadas ou não, são instrumentadas de modo que fossem realizadas as medidas, de alta resolução temporal, de descarga, precipitação, evaporação, interceptação, armazenamento de água do solo, fuga de água subterrânea, e transporte de nutrientes e sedimentos. Os dados melhoram os modelos hidrometeorológicos nas respostas do escoamento do rio Amazonas e de seus tributários às mudanças de clima e de usos da terra. Os controles no movimento de materiais

da terra firme até os rios, através das zonas ripárias, são estudados em pequenas bacias hidrológicas. Modelos de balanço de nutrientes em bacias maiores integram os resultados do trabalho de campo em pequenas bacias com modelos biogeoquímicos de rios de maior ordem existentes e modelos hidrológicos novos e existentes de propagação da onda de cheia. Mudanças dos usos da terra e da cobertura vegetal nativa ou cultivos agrícolas e regeneração subsequente são quantificadas e relacionadas a causas físicas e sócio-econômicas. Estudos de desmatamento e alteração de florestas, em escala amazônica, são realizados utilizando-se dados de satélite e de levantamentos de censos estatísticos. Estudos de caso são realizados para ilustrar de que modo as mudanças dos usos da terra afetam a cobertura vegetal. As duas questões centrais do LBA são compreender como funciona a Amazônia enquanto um sistema regional e como mudanças de uso da terra e do clima podem afetar esse funcionamento. A concepção do programa preocupou-se em reconhecer os padrões e processos de mudanças de cobertura e uso da terra e formular cenários que incorporem a diversidade e a complexidade das mudanças de uso da terra, para melhor definir as condições sob as quais os sistemas amazônicos deverão operar. Ao mesmo tempo, mudanças climáticas e ambientais têm efeito sobre o uso sustentável dos recursos e, de uma forma geral, sobre as populações. Foi nesse contexto que a questão das dimensões humanas se incluiu, para investigar quais e como diferentes fatores humanos podem condicionar os processos de transformação da Amazônia, e compreender como o homem pode sofrer ou adaptar-se a impactos de mudanças no clima ou nos ecossistemas (Avissar e Nobre, 2002; Gash *et al.*, 2004).

2.8. O Experimento ESECAFLOR

Um dos projetos desenvolvidos no âmbito do LBA é “O Impacto da Seca Prolongada nos Fluxos de Água e Dióxido de Carbono em uma Floresta Tropical Amazônica (ESECAFLOR)”.

O Experimento ESECAFLOR consiste na indução de um período de seca na floresta para avaliar o seu impacto nos fluxos de água e dióxido de carbono em uma área de floresta tropical amazônica, investigando a influência da exclusão de água no solo sobre o ciclo da floresta e as alterações provocadas pelo evento (Meir *et al.*, 2002; 2003), que seria como a simulação de um evento de El Niño, que provoca seca anômala em determinadas áreas na Amazônia. A ocorrência de estresse hídrico em florestas tropicais, causa alterações ainda

pouco conhecidas em todo o ecossistema (Nepstad *et al.*, 2002; Ferreira da Costa *et al.*, 2003b).

Em sua estrutura física o ESECAFLOR é composto por duas parcelas (*A* e *B*) de 1 ha cada uma, localizadas a cerca de 800 m de distância da sede da ECFPn. A parcela *A* é usada como referência para os experimentos realizados na parcela *B*, na qual se fez a exclusão de aproximadamente, 98% da água da chuva; ressalta-se haver uma distância de 20 m entre as parcelas. Essas áreas foram delimitadas por trincheiras de 0,5 m de largura, cavadas com profundidade variando de 0,5 a 1,5 m, para facilitar a drenagem da chuva. A trincheira da parcela *B* foi revestida com lona plástica preta (Figura 4), para minimizar a infiltração lateral e, na parcela *A*, não foi instalado este revestimento.

A montagem da estrutura do experimento ESECAFLOR foi iniciada no primeiro semestre do ano de 2000. Uma grande equipe de operários atuou na primeira fase de construção da cobertura. Primeiramente, foram montadas duas torres metálicas com 30 m de altura cada uma, em ambas as parcelas do experimento. Posteriormente, as obras da estrutura de madeira montada para suportar as calhas e os painéis demandaram um enorme esforço de todos. Durante meses, os operários se empenharam em criar uma verdadeira rede de suportes de madeira paralelos, a uma distância de 5 m entre cada linha de suporte com 100 m de comprimento, ligando uma lateral à outra da parcela *B*. Em seguida, à conclusão das calhas, foram iniciadas a fabricação dos painéis com estruturas de madeira e revestidos de plástico transparente, que formariam a cobertura da parcela propriamente dita. Quando todos os cerca de 6.000 painéis já estavam confeccionados, só então foi realizado o fechamento da cobertura completa, em meados do mês de novembro de 2001, dando início ao período de exclusão da chuva, que a partir de então, não mais atingiria em sua totalidade o solo da floresta.



Figura 4. Detalhe da trincheira para drenagem da chuva na parcela B no experimento ESECAFLOR

Para cobertura da parcela *B* foram utilizados aproximadamente 6.000 painéis, com estrutura de madeira e revestimento plástico transparente, instalados a uma altura variando de 1,5 a 4 m acima do solo (Figura 5a). Esses painéis têm largura em torno de 0,5 m, e comprimento aproximado de 3 m, oscilando de acordo com o local, permitindo também a passagem, entre eles, da vegetação de subdossel e piso. Nesta parcela foram construídas 20 calhas de madeira com 0,3 x 0,3 m de largura e profundidade, que têm 100 m de comprimento e estão dispostas paralelamente a uma distância de 5 m, com altura em torno dos 4 m na parte central da parcela e 1,5 m nas laterais. Para evitar a infiltração da água interceptada pelos painéis, as calhas também foram revestidas com o mesmo material plástico dos painéis, o que facilitou o escoamento da água para as trincheiras laterais que direcionam esses fluxos para pontos de descarga distantes da parcela, para dificultar o retorno da água à parcela *B* (Figura 5b). A cobertura da parcela era mantida permanentemente limpa, com substituição dos painéis com a estrutura ou o plástico danificado pela queda de galhos, frutos e, eventualmente, árvores.

(a)



(b)



Figura 5. Detalhe das Vistas superior (a) e inferior (b) da cobertura plástica da parcela B no experimento ESECAFLOR

Cada uma das áreas possui uma torre de ferro galvanizado com dimensões de 1,2 x 2,5 x 30,0 m de largura, comprimento e altura, respectivamente, sustentada por cabos-de-aço estendidos de diferentes alturas até o solo (Figura 6). Essas torres permitem o acesso fácil às árvores para análises de fotossíntese, dentre outras medições, além do monitoramento de algumas variáveis meteorológicas obtidas por estações automáticas, tais como: temperatura do ar em diferentes níveis de altura, acima e abaixo dos painéis plásticos, velocidade e direção do vento e precipitação pluviométrica acima do dossel florestal. As referidas torres possuem plataformas e escadas que permitem fácil acesso às árvores.



Figura 6. Vista do solo da torre metálica com 30 m de altura instalada na parcela A do experimento ESECAFLOR

Anteriormente ao ESECAFLOR, em 1999, foi instalada uma torre micrometeorológica, construída em alumínio, com 52 m de altura, na área denominada de parcela *T*, localizada a cerca de 2 km ao norte das parcelas *A* e *B* (Figura 7). A estação meteorológica automática instalada na torre da parcela *T* foi composta por instrumental com capacidade de registrar a temperatura do ar em diferentes níveis de altura (2, 16, 32 e 53 m), umidade relativa do ar, precipitação pluviométrica, direção e velocidade do vento, radiação solar (incidente e refletida), radiação fotossinteticamente ativa, (incidente e refletida). A pressão atmosférica, temperatura do solo (0,05; 0,20 e 0,50 m), e o conteúdo de água no solo (0,30 m) também foram medidos. Essas informações, em médias horárias, foram armazenadas em datalogger modelo 21X (Campbell, Scientific Inc. Loughborough, UK).



Figura 7. Vista aérea da torre de alumínio com 52 m de altura instalada na parcela *T*, distante cerca de 2 km ao norte do experimento ESECAFLOR

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Descrição da área de estudo

A Floresta Nacional (FLONA) é uma área com cobertura florestal de espécies predominantemente nativas e tem como objetivo básico o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas. A FLONA de Caxiuanã foi criada pelo decreto nº 239, de 28 de novembro de 1961, sendo a segunda criada no Brasil e a primeira a ser realmente implementada no País (IBAMA, 2004).

O sítio experimental do LBA está localizado na Estação Científica Ferreira Pena (ECFPn) ($1^{\circ} 42' 30''$ S; $51^{\circ} 31' 45''$ W; 62 m de altitude) pertencente ao Museu Paraense Emílio Goeldi (MPEG). Ainda no século XIX, Emílio Goeldi, enquanto diretor do então denominado Museu Paraense, tentou adquirir uma área conservada destinada à pesquisa científica. Essa iniciativa permaneceria sem resposta até o ano de 1990, quando o MPEG, na gestão de Guilherme de La Penha, formou uma equipe para procurar a área ideal. A FLONA de Caxiuanã, a 400 km de Belém, foi a área escolhida para sediar a ECFPn. Parte da floresta foi cedida pelo Instituto Brasileiro do Meio Ambiente (IBAMA) e o Governo Britânico apoiou a construção de uma das melhores bases científicas instaladas em áreas florestais. A ECFPn foi inaugurada em outubro de 1993, e atualmente, além do ESECAFLOR/LBA, nela são desenvolvidas inúmeras pesquisas, nas mais diversas áreas do conhecimento, envolvendo um considerável número de participantes de instituições nacionais e estrangeiras.

A área da ECFPn é de 33.000 ha, localizada dentro da FLONA de Caxiuanã, uma reserva com 330.000 ha de floresta primária de terra-firme que ainda preserva as características ambientais em boas condições no município de Melgaço, distante cerca de 400 km a Oeste de Belém do Pará (Figura 8). Ela tem limites geográficos ao Norte, o divisor de águas entre as bacias do rio Caxiuanã e do rio Amazonas, ao Sul o rio Caxiuanã e igarapé Laranjal e a Oeste o igarapé Grande. Além de ecossistemas de terra firme, a ECFPn possui várzea e de igapó e manchas de savana e vegetação secundária. Os rios são de águas negras, ricas em plantas aquáticas (Lisboa, 1997).

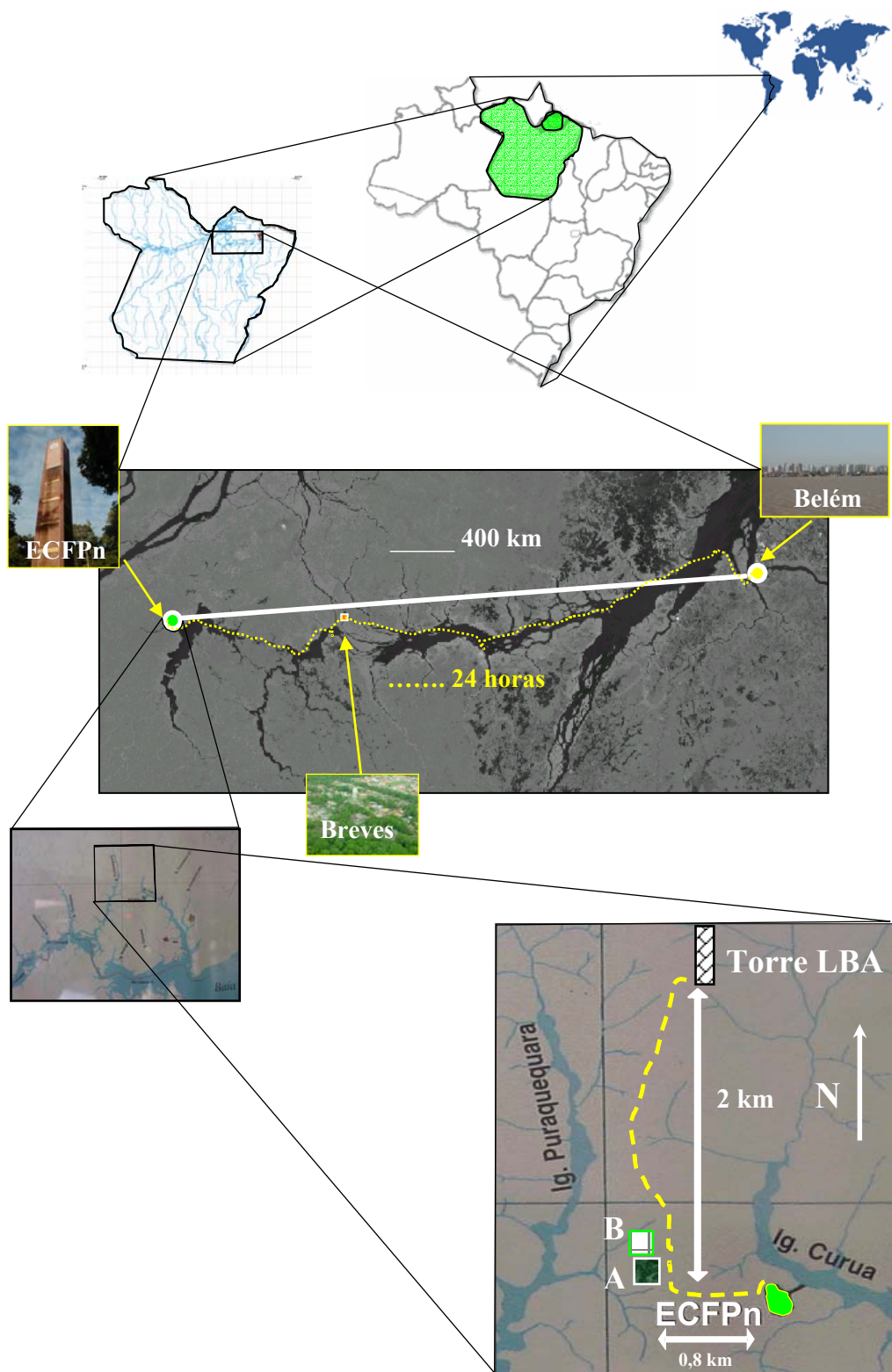


Figura 8. Acima, localização da FLONA de Caxiuanã, Pará e trajetória percorrida entre Belém e a ECFPn. No centro, o percurso fluvial (24 horas ····) nos rios Pará e Anapú até a Baía de Caxiuanã, com escala na Cidade de Breves na Ilha do Marajó. Abaixo, destaques das parcelas do ESECAFLOR (A - controle) e (B – cobertura) a 0,8 km da base da ECFPn, e Torre do LBA (52 m de altura) a 2 km (-----) ao Norte das parcelas do experimento de exclusão da chuva

A chuva é certamente a variável meteorológica que mais facilmente caracteriza um determinado local. O conhecimento das variações pluviométricas auxilia no planejamento e realização das atividades humanas. No caso de experimentos científicos, realizados em campo, a escolha das épocas de atividades (principalmente campanhas intensivas), pode ser determinante para o sucesso de todo o trabalho.

No presente estudo, foram utilizados os dados de diversas variáveis meteorológicas, entre elas a precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar, pressão atmosférica, velocidade e direção do vento, déficit de pressão de vapor, radiação solar incidente, refletida e fotossinteticamente ativa, saldo de radiação solar, conteúdo de umidade do solo, e fluxo de seiva, colhidos no projeto ESECAFLORE durante os anos de 2000 a 2003.

3.2. Características climáticas da FLONA de Caxiuanã, Pará

Pela classificação de Köppen o clima da FLONA de Caxiuanã é do tipo tropical quente e úmido e subtipo climático “Am” com uma curta estação seca. As informações apresentadas nesta seção do trabalho foram coletadas entre os anos de 1996 e 2003. Nos primeiros anos, entre 1996 e 1998, os dados meteorológicos foram coletados na estação convencional da base de apoio da ECFPn. A partir de 1999 os dados foram coletados em uma estação meteorológica automática instalada na torre com 52 m de altura montada dentro da floresta.

3.2.1. Precipitação pluvial (P)

A região de Caxiuanã tem uma distribuição regular das chuvas durante todo o ano e com sazonalidade definida. O período chuvoso da região está compreendido de dezembro a junho, enquanto o seco vai de agosto a novembro.

No período entre 1996 e 2003 a região de Caxiuanã apresentou precipitação média anual de $1.960 \text{ mm ano}^{-1}$, sendo o mês de março o mais chuvoso, com média de $337 \pm 82 \text{ mm}$ ou cerca de 17,1% do total anual, enquanto que o mês mais seco foi o de novembro (Figura 9) com $61 \pm 29 \text{ mm}$ (3,1%). Aproximadamente, 74% das chuvas ocorreram no primeiro semestre do ano, entre janeiro e junho (1.449 mm), enquanto no semestre, de julho a dezembro choveu em média 511 mm (26%). Nos meses de agosto e novembro houve um período de estiagem, com precipitações abaixo de 100 mm mês^{-1} .

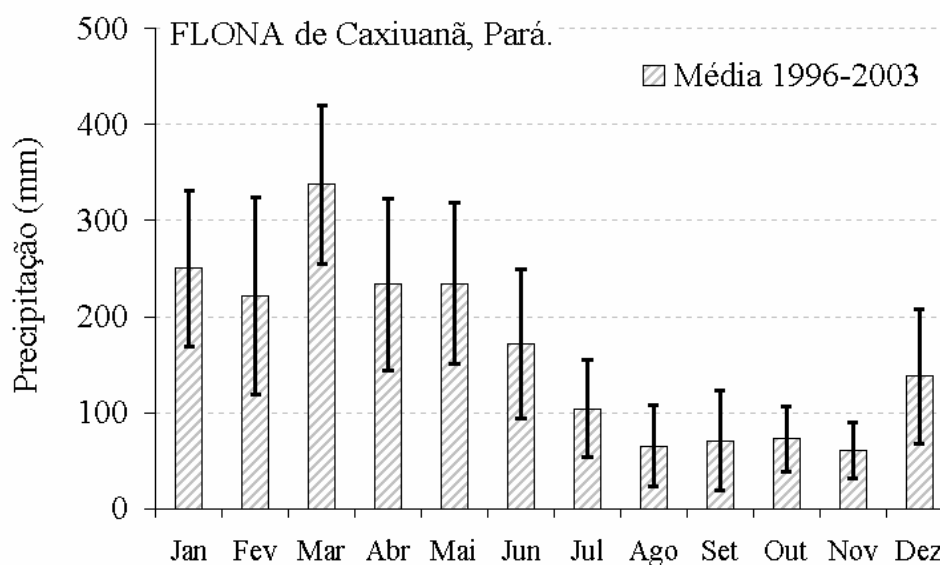


Figura 9. Precipitação média mensal na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 1996 a 2003. As linhas verticais representam os desvios-padrão

3.2.2. Temperatura do ar (T)

Entre 1996 e 2003, a temperatura média do ar mensal foi em torno de 26,5 °C, variando entre de 24,1 °C em fevereiro de 2000 e 28,4 °C em dezembro de 2001. Como nos anos de 1996 a 1998 as informações foram coletadas na estação convencional na superfície, enquanto que a partir de 1999 elas foram obtidas no topo da torre (52 m de altura), as temperaturas nesse período foram freqüentemente mais elevadas que as medidas entre 1999 e 2003 (Figura 10).

As menores temperaturas foram registradas nos meses de janeiro a maio que compõem o período chuvoso da região, caracterizado pela grande e freqüente presença da nebulosidade intensa comum na Amazônia. No período de junho a setembro ocorre uma fase de transição da estação chuvosa para a estação seca, e as temperaturas médias sofrem uma elevação gradual, pois nesse período a nebulosidade sofre uma diminuição de intensidade e, conseqüentemente, redução das chuvas. A partir de outubro, as temperaturas registradas são as mais elevadas do ano, já que nesse período são comuns os dias ensolarados e com pouca precipitação, que quando ocorrem são intensas, mas de curta duração. Essa é uma característica natural do período seco na região.

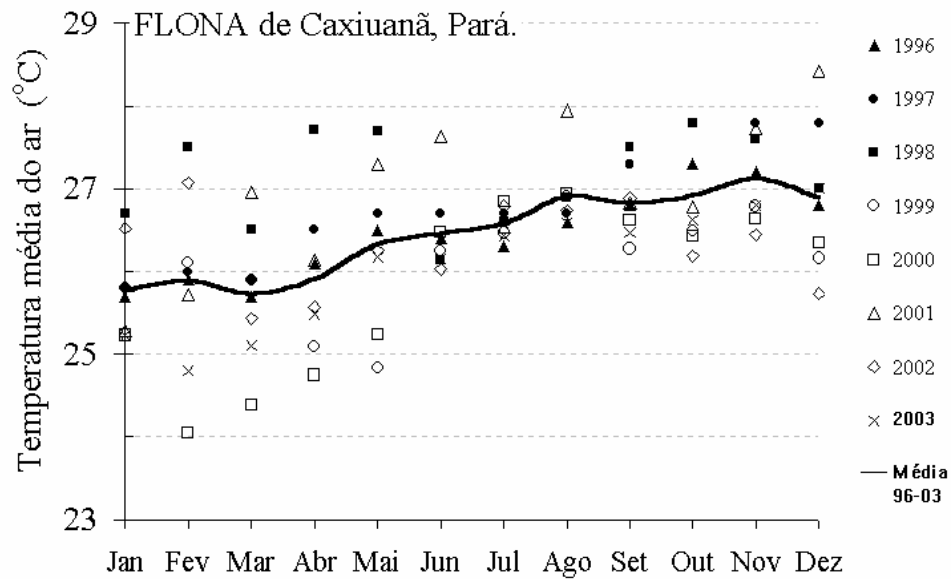


Figura 10. Temperatura média do ar mensal na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 1996 a 2003. Entre 1996 e 1998 (símbolos cheios) medidas no nível da superfície, e a partir de 1999 na torre com 52 m de altura

O número de horas de brilho de luz solar alcança mais de 2.100 horas ano⁻¹, umidade relativa do ar média anual situa-se em torno de 80%. A direção predominante do vento é de Nordeste (Moraes *et al.*, 1997).

3.3. Características vegetais da FLONA de Caxiuanã, Pará

A FLONA de Caxiuanã agrega ecossistemas riquíssimos em espécies vegetais, o que a caracteriza como uma zona que abrange vários ambientes, dentre eles a floresta densa de terra-firme e igapó (Almeida *et al.*, 1993).

Os ecossistemas apresentam estrutura florestal constituída de árvores emergentes (40 a 50 m), dossel (30 a 35 m), sub-dossel (20 a 25 m) e piso (5 m). A diversidade está entre 150 e 160 espécies por hectare, e a densidade de indivíduos variando de 450 a 550 árvores por hectare. As espécies mais abundantes na mata de terra-firme são: *Eschiweilera coriacea* (Ap. Dec.) Mart. Ex Berg (Lecythidaceae), *Voucapoa americana* Aubl (Caesalpinaceae) e *Protium pallidum* Cuatrec. Burseraceae (Viana *et al.*, 2003). Essa floresta apresenta um dossel bastante fechado, permitindo pouca penetração dos raios solares que atingem o solo. Levantamentos recentes mostraram que foram registradas na ECFPn 1.054 espécies,

pertencentes a 393 gêneros e 102 famílias. As espécies arbóreas são predominantes na área com 663 spp (62,9%) (Silva *et al.*, 2003).

O índice de área foliar (IAF) foi medido durante as campanhas intensivas de coletas de dados realizadas duas vezes por ano, onde foram feitas 100 medidas nas subparcelas (10x10 m) usando um *LI-COR LAI-2000 plant canopy analyser* (LI-COR, Inc, Lincoln, NE, USA). Em novembro de 2001 e em maio de 2002 o IAF foi igual a $5,4 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, apresentando uma redução em novembro de 2002 para $4,1 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$, voltando a crescer no registro realizado em maio de 2003 quando atingiu $5,0 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ e continuou crescendo na coleta de novembro de 2003, quando foi registrado o maior valor de $5,8 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$. O valor médio do IAF para Caxiuanã foi de $5,14 \text{ m}^2 \text{ m}^{-2}$ (Fisher, 2005; Fisher *et al.*, 2007).

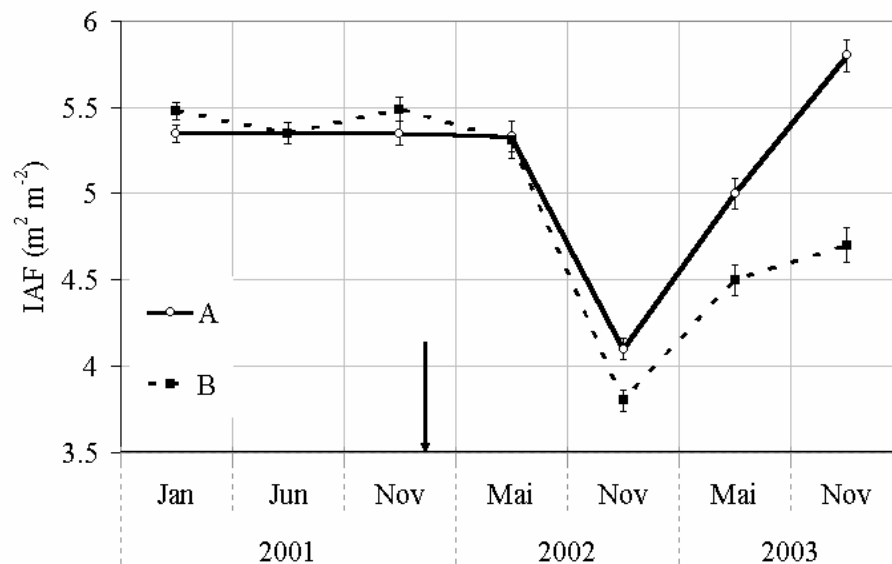


Figura 11. Índice de área foliar (IAF) na FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 2001 a 2003. A linha contínua representa a parcela de controle (A) e a linha pontilhada a parcela coberta (B). A seta indica o início da exclusão da chuva na parcela B. Fonte: Fisher (2005)

Nas duas parcelas estudadas, durante o período experimental, foram monitorados os fluxos de seiva de diferentes espécies vegetais descritas na Tabela 1. Foram 11 árvores na parcela A e 12 árvores na parcela B. Os critérios utilizados para a escolha dessas árvores foram suas características físicas, tais como; altura do fuste (tronco até a primeira ocorrência de galhos) e altura total da árvore, diâmetro à altura do peito, posição dentro da parcela e da copa em relação à exposição aos raios solares, representatividade da espécie entre toda a variedade da vegetação da região, entre outros.

Tabela 1. Características das espécies vegetais estudadas no ESECAFLOR. Circunferência no ponto de medida (CMP), diâmetro à altura do peito (DAP), direção Norte-Sul (N-S), direção Leste-Oeste (L-O), área da copa projetada no solo (ACPS), área Basal (AB)

Parcela A		CPM	DAP	Altura		Diâmetro da Copa		ACPS	AB	Nome vulgar
ID	Espécie	(cm)		Fuste	Total	(N-S)	(L-O)	(m ²)		
158	<i>Stryphnodendron</i>	101,0	32,1	22,0	33,0	10,8	13,1	111,1	0,081	Tachirana
229	<i>Tachigalia mirmecofilia</i>	190,0	60,5	13,0	27,0	26,5	27,1	564,0	0,287	Tachi preto
187	<i>Couratari multiflora</i>	98,0	31,2	15,0	30,0	12,7	12,5	124,7	0,076	Tauari
225	<i>Eschweilera grandiflora</i>	81,0	25,8	12,0	27,5	16,6	17,8	232,1	0,052	Matá matá
88	<i>Rinoria guianensis</i>	79,0	25,0	12,0	17,0	8,0	6,0	37,7	0,049	Acariquirana
237	<i>Eschweilera coriacea</i>	106,0	33,7	13,0	27,0	16,1	14,8	187,1	0,089	Matá-matá branco
185	<i>Couratari multiflora</i>	57,0	18,1	14,0	25,0	8,1	9,1	57,9	0,026	Tauari
245	<i>Endopleura uchi</i>	117,0	37,2	19,2	30,2	15,0	11,8	139,0	0,109	Uchi
155	<i>Rinoria guianensis</i>	49,0	15,6	7,0	9,0	10,0	9,0	70,7	0,019	Acariquirana
270	<i>Couratari multiflora</i>	96,0	30,6	20,5	31,5	9,5	10,6	79,1	0,073	Tauari
252	<i>Goupia glabra</i>	250,0	79,6	12,0	26,0	25,9	21,5	437,3	0,497	Cupiúba
Médias		111,2	35,4	14,5	25,7			185,5	0,124	
Totais		1.223,5	389,5	159,7	283,2			2.040,8	1,360	

Parcela B		CPM	DAP	Altura		Diâmetro da Copa		ACPS	AB	Nome vulgar
ID	Espécie	(cm)		Fuste	Total	(N-S)	(L-O)	(m ²)		
315	<i>Lecythis confertiflora</i>	115,0	36,6	19,0	31,0	8,0	11,0	69,1	0,105	Indeterminado
366	<i>Licaria armeniaca</i>	51,0	16,2	10,0	18,0	8,0	7,0	44,0	0,021	Louro Pimenta
363	<i>Hirtela bicornis</i>	104,0	33,1	14,0	23,0	7,0	7,0	38,5	0,086	Macacuca
259	<i>Protium tenuifolium</i>	72,0	22,9	9,0	19,0	5,0	7,0	27,5	0,041	Breu
414	<i>Lecythis confertiflora</i>	97,5	31,0	13,0	29,0	11,0	11,0	95,0	0,076	Indeterminado
376	<i>Nectandra pulverulenta</i>	85,0	27,1	14,2	24,2	9,2	9,6	69,4	0,057	Indeterminado
204	<i>Eschweilera decolorans</i>	93,0	29,6	15,5	26,5	11,7	9,7	89,1	0,069	Matá-matá
381	<i>Eschweilera coriacea</i>	99,0	31,5	28,5	33,0	13,6	11,5	122,8	0,078	Matá-matá branco
309	<i>Manilkara paraensis</i>	197,0	62,7	26,0	31,0	17,3	11,0	149,5	0,309	Maparajuba
312	<i>Manilkara paraensis</i>	126,0	40,1	23,0	34,0	18,0	10,5	148,4	0,126	Maparajuba
367	<i>Swartzia racemosa</i>	127,0	40,4	15,0	34,0	15,0	9,0	106,0	0,128	Patapeuá
266	<i>Trattinickia burseraefolia</i>	440,0	140,1	30,5	60,0	21,0	25,0	412,3	1,541	Sucuruba Folha lisa
Médias		133,9	42,6	18,1	30,2			114,3	0,220	
Totais		1.606,5	511,4	217,7	362,7			1.371,7	2,637	

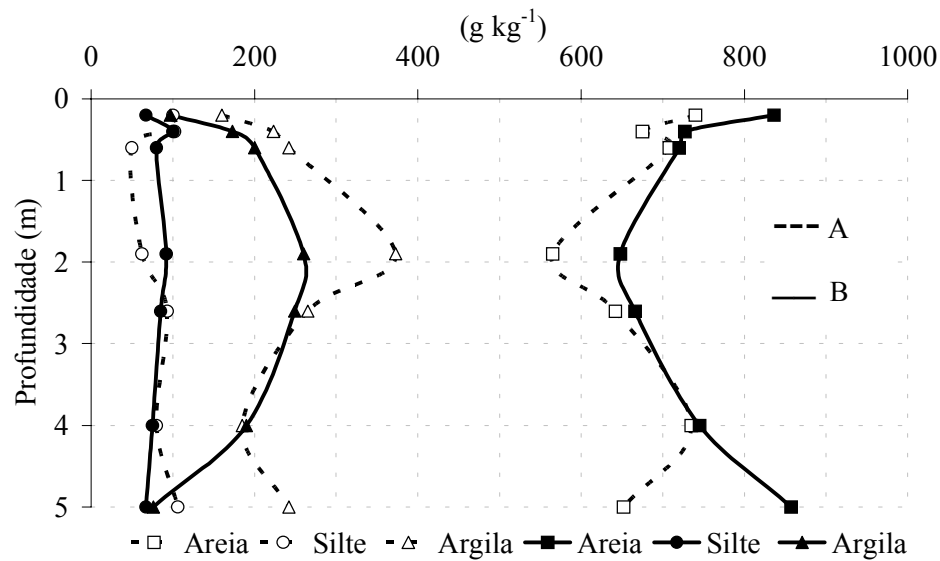
3.4. Características pedológicas da FLONA de Caxiuanã, Pará

A floresta de terra-firme ocupa cerca de 85% da área onde foi implantada a ECFPn, apresentando um relevo relativamente plano que sustenta um Latossolo Amarelo, profundo e de origem terciária, tendo como características marcantes a acidez, solos argilo-arenosos e bastantes vulneráveis à erosão laminar. A FLONA de Caxiuanã localiza-se em um terreno sob formação geológica sedimentar (Formação Alter do Chão), que foi posteriormente laterizado. Arenitos ferruginizados podem ser encontrados ao nível do espelho d'água da Baía de Caxiuanã, correspondendo à parte basal do perfil de alteração. Rochas tipo caulim afloram às proximidades da ECFPn. Sedimentos recentes são encontrados nas margens dos pequenos igarapés e como anéis de praias nas margens da baía (Kern e Costa, 1997).

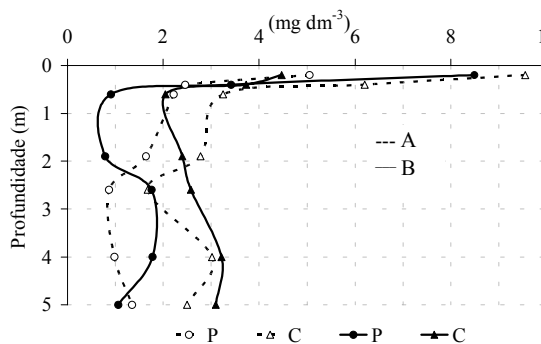
3.4.1. Análises físico-químicas dos solos do ESECAFLOR

As amostras para as análises do solo foram obtidas em quatro trincheiras com cinco metros de profundidade abertas nas parcelas A e B do experimento ESECAFLOR. Os solos de Caxiuanã são classificados como Latossolo amarelo e apresentam uma camada de laterita entre 2 e 4 m de profundidade. Eles variam de bem drenados a moderadamente drenados, de arenoso a argiloso, ácidos e pobres em nutrientes. O pH varia de 3,5 (muito ácido) a 5,5 (moderadamente ácido). Foram observadas pequenas variações nas propriedades físico-químicas entre as parcelas A e B. Na Figura 12a são apresentadas as médias das quatro trincheiras de cada parcela das frações de areia, silte e argila, determinadas pelo método gravimétrico, em ambas as parcelas, nas profundidades de 0,0–0,2; 0,2–0,4; 0,4–0,6; 0,6–1,9; 1,9–2,6; 2,6–4,0; e 4,0–5,0 m. A fração de argila variou de 160 a 373 g kg⁻¹ na parcela A e de 76 a 260 g kg⁻¹ na parcela B. Também foram realizadas medidas de concentrações de Carbono (C) e Fósforo (P) apresentadas na Figura 12b, e de Nitrogênio (N) em (Figura 12c). As maiores concentrações de C (9,55 mg dm⁻³) de P (5,05 mg dm⁻³) e de N (0,40 mg dm⁻³) na parcela A foram determinadas na camada superficial, enquanto que na parcela B as maiores concentrações de P (8,4 mg dm⁻³) e C (4,47 mg dm⁻³) foram encontradas na camada superficial, e a maior concentração de N (0,52 mg dm⁻³) foi encontrada na camada mais profunda (4 a 5 m). Na comparação entre as concentrações somadas de todos os sete perfis (da superfície até cinco metros) em ambas as parcelas, observaram-se que a parcela A em relação à parcela B contém -9,3% areia, +4,8% silte, +35,7% argila, e para os totais de C +34,6%, P -20,0% e N +5,0% (Ruivo *et al.*, 2002; 2007; Ruivo e Cunha 2003).

a)



b)



c)

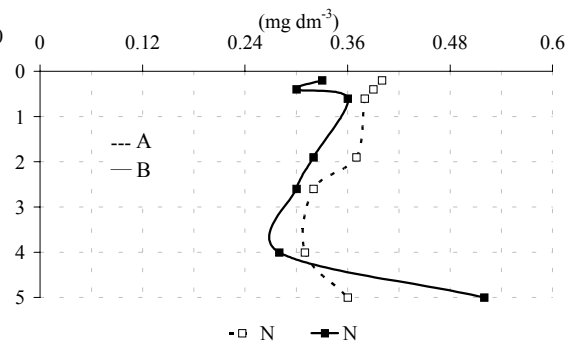


Figura 12. Frações médias de areia, silte e argila (12a), concentrações de Carbono (C) e Fósforo (P) são apresentadas em (12b) e de Nitrogênio (N) em (12 c) realizadas em sete perfis desde a superfície até 5 m de profundidade no ESECAFLOR, nas parcelas A (linhas tracejadas) e B (linhas contínuas). Fonte: Ruivo *et al.* (2007)

Sotta (2006) concluiu que os ecossistemas amazônicos localizados sobre solos com textura grossa (arenosos) são mais sensíveis à estiagem do que as florestas localizadas sobre os solos mais duros (argilosos), pois eles não podem compensar a capacidade relativamente baixa de retenção de água nas camadas superficiais com o armazenamento de água nas camadas mais profundas do solo. Para Davidson *et al.* (2004) em curto prazo, a resposta à redução da precipitação dependerá principalmente da capacidade de fornecimento de água para as raízes de cada tipo de solo.

3.4.2. Determinação do conteúdo de água no solo (CAS) utilizando o TDR (Time-Domain Reflectometer)

O conteúdo de água no solo foi monitorado com TDR (Time-Domain Reflectometer), com um osciloscópio Tektronic 1502B/C e o software WATTDR 3.11 (Waterloo Centre for Groundwater Research), nas profundidades de 0,5; 1,0; 2,0; 3,0; 4,0 e 5,0 m. Foram realizadas medidas quinzenais regulares. Em cada uma das parcelas (A, B) foram feitas quatro trincheiras com de 1 x 2 x 5 m de largura, comprimento e profundidade, respectivamente. Nessas trincheiras foram instalados sensores de umidade do solo, em perfis, nos dois lados de menor dimensão (Figura 13). Com a quantificação do teor de água no solo, torna-se possível a avaliação confiável das alterações provocadas pela simulação de seca na parcela do ESECAFLOR.

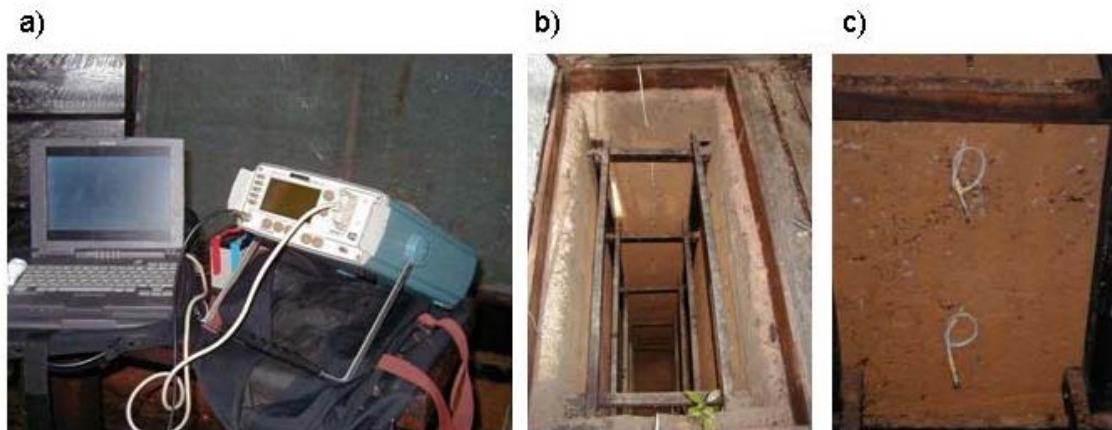


Figura 13. Instrumentação utilizada nas medidas de conteúdo de água no solo na FLONA de Caxiuanã, Pará. (a) Monitor TDR Tektronic 1502B/C. (b) Trincheira com 5 m de profundidade. (c) Detalhes das conexões das sondas inseridas nas paredes das trincheiras

3.5. Método utilizado para a determinação do fluxo de seiva

O método aplicado na determinação do fluxo de seiva (*FS*) no tecido vegetal foi o balanço de calor no tronco (BCT) desenvolvido originalmente para árvores de grande porte. Esse método é caracterizado pelo aquecimento de parte do tronco dos vegetais, por uma corrente elétrica que passa por eletrodos inseridos no tecido vegetal. Assim, o calor é liberado mais uniformemente dentro do xilema, e não passa através da casca da árvore. O sistema *Sap flow meter, P4.1*, da *Environmental Measuring Systems* (EMS, Turistická, Brno, Czech Republic), utilizado neste estudo, é composto por cinco eletrodos de aço inoxidável, com espessura de um mm, largura de 25 mm e comprimentos variados, dependendo das dimensões da árvore.

As peças metálicas são inseridas lado a lado, a uma distância de 20 mm entre si. O eletrodo central é posicionado em direção radial ao tronco (Figura 14).

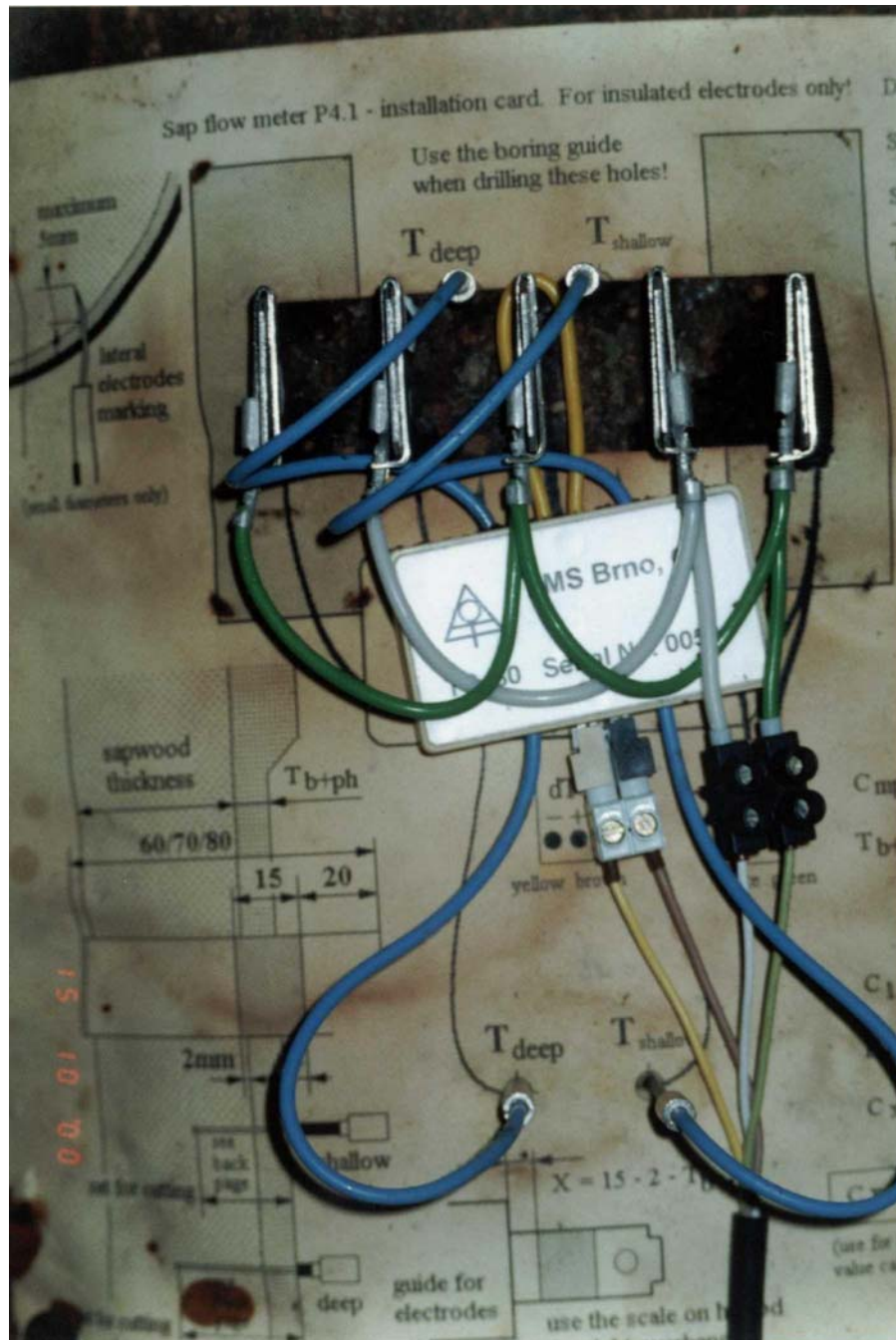


Figura 14. Detalhe dos cinco eletrodos metálicos e de dois pares de sensores térmicos do sistema *Sap flow meter, P4.1* inseridos no tronco do vegetal.

A energia aplicada (Q) e a diferença de temperatura (dT) são, respectivamente, diretamente e inversamente proporcionais ao fluxo de seiva, as quais podem ser mantidas constantes pelo circuito eletrônico, enquanto as outras variáveis são registradas (Kučera,

1998; Čermák *et al.*, 2004). O método calcula o balanço de calor baseado na razão entre a energia aplicada e o aumento da temperatura em um espaço definido entre os sensores térmicos. O sistema realiza medidas a cada minuto, e armazena a média em intervalos de 15 minutos no módulo interno de memória, que tem capacidade para até 14 dias de informações. A energia aplicada, que é distribuída entre a perda de calor por condutividade e o aquecimento da água que passa através da área aquecida, pode ser obtida pela Equação 1 (Kučera, 1998):

$$Q = FS dTc_w + dTz \quad (1)$$

em que Q é a energia para o aquecimento (Watt), FS o fluxo de Seiva (kg s^{-1}), dT a diferença de temperatura no ponto de medida ($^{\circ}\text{Kelvin}$), c_w é o calor específico da água ($4,186 \text{ kJ kg}^{-1} \text{ K}^{-1}$) e z o coeficiente de dissipação do calor no ponto de medida (W K^{-1}).

A quantidade de água que passa no ponto de medida no tronco da árvore é calculada usando-se o valor da temperatura no xilema e a energia aplicada no aquecimento. A escolha do ponto de medida no tronco é fundamental para a qualidade das informações. A homogeneidade do tronco e a ausência de injúrias (nós ou cortes), que poderiam prejudicar o transporte da água no xilema, ajudam na qualidade das medidas. A altura a serem instalados os eletrodos também é significativa, um gradiente térmico ocorre próximo à superfície do solo, o que pode interferir nas medições; em geral, escolhe-se uma altura próxima a 1,3 m (altura do peito usada em inventários florestais). Inseriram-se, no ponto de medida escolhido, paralelamente, cinco eletrodos de aço inoxidável que atingem o xilema e são aquecidos pela corrente elétrica. As peças metálicas têm 1,0 mm de espessura, 25 mm de largura e comprimento variando entre 60 e 80 mm, dependendo das dimensões da árvore monitorada, com uma distância lateral de 20 mm entre elas. O eletrodo central é posicionado em direção radial ao tronco. Dois pares de agulha (termopares) de cobre-constantan (Cu-Cst) com 50 x 1 mm de comprimento e diâmetro, respectivamente, foram inseridos em orifícios do mesmo diâmetro das agulhas feitos com furadeira elétrica, sendo que duas agulhas são instaladas na parte superior, na altura dos eletrodos, próximo ao eletrodo central, e as outras duas são colocadas 120 mm abaixo, na mesma direção das agulhas acima. A distância lateral entre duas agulhas é de 20 mm. Em cada par desses sensores térmicos a agulha do lado esquerdo é inserida a uma profundidade maior que a do lado direito. As diferenças são fixadas para cada tamanho de eletrodo, 13, 17 e 23 mm para os eletrodos de 60, 70 e 80 mm, respectivamente.

As profundidades que as agulhas atingirão são determinadas de acordo com as características da planta, como diâmetro e espessura da casca e do floema (Ferreira da Costa *et al.*, 2007).

Após a instalação, os sensores foram protegidos da ação do clima, pela utilização de finas capas de alumínio flexível revestidas de esponja e cobertores de plástico transparente, vedados na parte superior com fita adesiva e graxa natural, evitando a infiltração da água escorrida pelo tronco, que poderia causar curtos-circuitos conforme ilustrado na Figura 15.



Figura 15. Árvore com a cobertura confeccionada em alumínio e plástico, para a proteção dos sensores de fluxos de seiva à ação das intempéries climáticas

Foram utilizados dois sistemas de medidas (*Sap flow meter P4.1*), sendo que cada um pode monitorar até doze árvores simultaneamente, a uma distancia máxima de 50 m do equipamento.

A partir da Equação 1, o fluxo de seiva foi determinado de acordo com a Equação 2.

$$FS = \frac{Q}{c_w dT} - \frac{z}{c_w} (\text{kg s}^{-1}) \quad (2)$$

Para os doze canais do sistema os fluxos de seiva foram calculados pela Equação 3.

$$FS = \frac{3600Q}{c_w (n-1)d} \frac{kTC}{U} \quad (3)$$

em que n é o número de eletrodos (5), d a distância entre os eletrodos (20 mm), kTC o coeficiente de temperatura das baterias com oito elementos ($80 \mu\text{V } ^\circ\text{C}^{-1}$), e U a voltagem de saída dos sensores térmicos (μV). Esse sistema é de fácil utilização no campo experimental, pois apresenta boa resistibilidade aos fatores ambientais e não necessita de calibração (Kučera, 1998).

3.6. Cálculos e análises estatísticas

3.6.1. Regressão linear

Para avaliar a relação entre o FS e RFA e a ROC foi utilizada a análise de regressão linear simples. O modelo de regressão é um dos métodos estatísticos mais usados para investigar a relação entre variáveis.

3.6.2. Balanço hídrico

Para o cálculo do balanço hídrico foram utilizados dados horários de radiação solar global (R_g), precipitação pluvial (P) e temperatura do ar (T_a) obtidos na estação meteorológica automática instalada na torre de 52 m de altura, durante o período de 1 de dezembro de 2002 a 30 de novembro de 2003. Inicialmente, os dados meteorológicos horários foram

transformados para os totais diários, para as 24 h da precipitação, para os totais integrados das 7 às 18 h da radiação solar global diária, e a média aritmética simples das 24 h diárias para a temperatura do ar.

A evapotranspiração potencial (ET , $mm\ dia^{-1}$) foi calculada pelo método simples proposto por Hamon (1961) descrito pela Equação 4.

$$ET = 0,140D_o^2q_t \quad (4)$$

onde D_o^2 representa a quantidade de horas de brilho solar, que foi assumida como constante de $12\ h\ dia^{-1}$, devido a localização da área de estudo próxima ao Equador geográfico, e q_t é a densidade de vapor saturado à temperatura média do ar ($g\ m^{-3}$), obtida por equações de simples aplicações.

Em seguida, foram realizados os somatórios dos valores diários para cada um dos doze meses estudados, obtendo-se os totais mensais utilizados no cálculo do balanço hídrico. Os saldos mensais desse balanço foram obtidos pela diferença entre a precipitação e a evapotranspiração ($P-ET$).

3.6.3. Transpiração vegetal

Para o cálculo da transpiração das espécies vegetais monitoradas durante o ESECAFLOR, foram utilizados os dados de fluxo de seiva registrados a cada 15 minutos. Essas informações foram integradas inicialmente para dados horários aplicados na determinação das variações temporais horárias dos fluxos utilizados nas correlações com as variáveis meteorológicas, e posteriormente para totais diários. Como já descrito anteriormente, quando as medidas de fluxo de seiva são integradas para intervalos de tempo superiores a 24 h, representam fielmente a transpiração vegetal (Čermák *et al.*, 1973, 1982; Sakuratani, 1981; Baker e Van Bavel, 1987; Čermák e Kucera, 1990; Jiménez *et al.*, 1996, 1999; Marin *et al.*, 2007).

A transpiração foi medida em 11 árvores na parcela de referência (A), e em 12 na parcela submetida ao estresse hídrico (B), os dados obtidos durante o período de 1º de dezembro de 2002 a 30 de novembro de 2003 foram utilizados para a obtenção das equações das regressões lineares entre a transpiração (Tr), a área basal (AB), precipitação pluvial (P), e a radiação de ondas curtas (ROC) das árvores estudadas em ambas as parcelas.

A equação (5), obtida através das regressões lineares, entre as medidas de transpiração das árvores monitoradas nas parcelas *A* e *B* e as variáveis meteorológicas de interesse, radiação solar de ondas curtas, precipitação pluvial, e área basal, foi aplicada para cada árvore com diâmetro de tronco (DAP) maior que 0,1 m, que totalizaram 524 e 499 exemplares, nas parcelas *A* e *B*, respectivamente, para se obter a transpiração estimada das parcelas.

$$Tr = \{(\varphi ROC_d) + (\eta P) + (\alpha AB_i \pm \beta)\} \quad (5)$$

em que *Tr* é a transpiração (kg dia⁻¹), φ , α e η são as inclinações e, β é a interceptação da reta, respectivamente, *ROC_d* é a radiação solar de ondas curtas diária (MJ m⁻²), *P* é a precipitação pluvial diária (mm dia⁻¹), e *AB_i* é a área basal da *i*ésima árvore (m²),

Após a obtenção das transpirações estimadas para todas as árvores das duas parcelas, foi realizada a extrapolação para todo o período de interesse para cada parcela do ESECAFLOR, com a aplicação da equação (6).

$$Tp = \frac{\sum Tr_t}{ap} \quad (6)$$

em que *Tp* é a transpiração da parcela estimada (por unidade de área) durante o tempo (*t*) de interesse, e *ap* a área de cada parcela (10.000 m²).

3.6.4. Déficit de pressão de vapor

Durante o período de 1º de dezembro de 2002 a 30 de novembro de 2003 foram realizadas medidas contínuas das variáveis meteorológicas e de fluxo de seiva. Como a transpiração é fortemente influenciada pela demanda atmosférica de umidade, foi necessário também calcular o déficit de pressão de vapor (*DPV*) para se analisar algumas relações entre essas medidas. Para se obter o *DPV* (Equação 7) foi necessário primeiro calcular a pressão de saturação de vapor d'água (*e_s*) e a pressão atual de vapor (*e_a*), pois o *DPV* (kPa) é a diferença entre elas. As equações de (7) a (10) são de uso bastante comum em estudos meteorológicos e entre diversos autores, também estão descritas em Pereira *et al.*, (2002).

$$DPV = e_s - e_a \quad (7)$$

Para o cálculo da pressão de saturação de vapor d'água (e_s) foi aplicada a Equação de Tetens que utiliza a temperatura do ar obtida em psicrômetro aspirado. A quantidade de vapor contida no ar é diretamente dependente da temperatura do ambiente, conforme a Equação 8.

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times t_a}{237,3 + t_a} \right)} \quad (8)$$

em que t_a é a temperatura do ar obtido no termômetro de bulbo seco em ($^{\circ}\text{C}$) e e_s é expressa em (kPa). A pressão real de vapor (e_a) que foi obtida pela aplicação da Equação Psicrométrica (Eq. 9) a seguir.

$$e_a = e_{su} - \gamma \cdot (t_a - t_u) \quad (9)$$

em que (e_{su}) é a pressão de saturação de vapor d'água à temperatura do bulbo úmido (t_u), γ é o fator psicrométrico resultante do produto de $P \times A$, em que P é a pressão atmosférica (kPa) e a constante $A = 0,00067 \text{ } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ para psicrômetro de ventilação forçada. Para o cálculo de e_{su} também foi utilizada a Equação de Tetens (Eq. 8), sendo somente substituída a temperatura do ar (t_a) obtida no termômetro de bulbo seco, pela temperatura do bulbo úmido (t_u), descritas na Equação (10).

$$e_{su} = 0,6108 \times 10^{\left(\frac{7,5 \times t_u}{237,3 + t_u} \right)} \quad (10)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Transpiração em espécie de grande porte sob estresse hídrico

Nesta seção do trabalho são apresentados os resultados obtidos nas medidas para determinação da transpiração de dois exemplares de grande porte de Matá-matá branco (*Eschweilera coriacea*) na FLONA de Caxiuanã, visando comparar as taxas transpirativas de diferentes exemplares de uma mesma espécie vegetal, pelas medidas de fluxo de seiva obtidas com a aplicação do método do BCT do vegetal, após um longo período de seca provocada artificialmente, a partir do uso de cobertura plástica numa parcela da área do experimento ESECAFLOR.

Especificamente, para estas análises as medidas foram realizadas nos períodos de 3 a 16 de dezembro de 2000, antes do fechamento da cobertura plástica na parcela *B* e também entre 12 e 25 de janeiro de 2003, após 13 meses de influência do estresse hídrico provocado pela exclusão da chuva. No estudo foram monitorados dois exemplares de *Eschweilera coriacea* (Matá-matá branco) identificados como A237, localizado na parcela *A* (controle) e B381 na parcela *B* (submetida à redução da disponibilidade hídrica no solo).

4.1.1. Análises das variáveis meteorológicas

Nesta subseção é apresentada uma breve análise relacionada a alguns fatores abióticos que influenciaram nas respostas transpirativas dos vegetais, durante os dois períodos de estudo no experimento ESECAFLOR.

Entre os anos de 2000 e 2003, na FLONA de Caxiuanã a média anual de chuva foi de 1.865 mm ano⁻¹ e a temperatura média do ar registrada foi de 26,3 °C. Os valores de temperatura do ar e precipitação anual são apresentados na Tabela 2.

O ano de 2000 registrou o menor valor total de precipitação, com 1.518,7 mm e temperatura média de 25,8 °C, seguido pelo ano de 2001 quando foram registrados 1.697,9 mm de chuva e temperatura máxima absoluta de 37,1 °C a maior no período estudado. Em 2002, a precipitação pluvial registrada foi de 2.192,8 mm, o maior total desse período, com temperatura média de 26,3 °C; e, finalmente, o ano de 2003 registrou o total pluviométrico de 2.049,5 mm e a temperatura mínima absoluta do ar de 20,2 °C, a menor desse período.

Tabela 2. Valores anuais de precipitação (mm) e temperaturas máxima absoluta, média e mínima absoluta do ar (°C) para a FLONA de Caxiuanã, Pará, no período de 2000 a 2003

Ano	2000	2001	2002	2003	Média
Temperatura máxima	34,0	37,1	35,2	34,3	35,1
Temperatura média	25,8	26,9	26,3	26,1	26,3
Temperatura mínima	20,9	21,6	20,5	20,2	20,8
Precipitação	1.518,7	1.697,9	2.192,8	2.049,5	1.865,0

O mês de março foi o mais chuvoso no período de 2000 a 2003, com média de 295 mm, enquanto o mais seco foi agosto, com precipitação de 45 mm. Aproximadamente 73% das chuvas ocorreram entre janeiro e junho, período em que as médias para os meses de interesse nas medidas de fluxo de seiva, janeiro e dezembro foram de 242 e 150 mm, respectivamente. Em dezembro de 2000 foram registrados apenas 87 mm de chuva, 58% da média do período, enquanto em janeiro de 2003 foram 187 mm, ou seja, 77% da média do período.

No período de 3 a 16 de dezembro de 2000 houve ocorrência de chuvas em 10 dos 14 dias estudados, com um volume total de 65 mm, sendo o máximo diário de 19 mm no dia 15. No período de 12 a 25 de janeiro de 2003 o total precipitado foi de 92 mm, com máximo diário de 22 mm, registrado no dia 24. Neste mesmo período choveu em todos os 14 dias estudados (Tabela 3).

Ambos os períodos da pesquisa estão inseridos na época chuvosa da região de Caxiuanã; desta maneira, a disponibilidade de água para as raízes estava satisfatória na parcela A, tanto em dezembro de 2000 como em janeiro de 2003. Considerando-se que na parcela B mais de 90% das chuvas foram interceptados pelos painéis plásticos durante o ano de 2002, essa área apresentou menor disponibilidade de água no solo em janeiro de 2003, para suprir as necessidades hídricas da vegetação local.

Tabela 3. Valores diários da P - precipitação pluvial (mm); ROC - radiação de ondas curtas (MJ m^{-2}); RFA - radiação fotossinteticamente ativa (mol m^{-2}) e T_{ar} - temperatura média do Ar ($^{\circ}\text{C}$). ROC e RFA foram integrados das 07 às 18 h

Dezembro de 2000															
Dias	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	média
P	0,0	1,6	4,2	2,2	0,2	12,0	0,0	0,0	0,0	1,4	8,0	1,4	19,0	10,2	4,3
ROC	19,5	13,5	20,6	16,3	19,7	19,4	17,1	16,8	18,9	15,6	11,7	17,0	11,8	10,0	16,0
RFA	32,3	22,4	34,3	26,9	31,6	31,4	28,9	28,3	29,4	26,0	20,2	30,1	21,3	18,1	26,8
T_{ar}	26,9	26,4	26,4	26,1	26,9	26,8	26,7	27,3	27,4	26,2	24,7	25,5	24,0	24,5	26,1
Janeiro de 2003															
Dias	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	média
P	3,6	4,2	8,2	5,6	7,2	7,0	6,6	5,0	5,4	0,2	1,0	0,8	21,8	0,2	5,5
ROC	16,0	13,2	12,8	12,8	10,7	14,2	14,9	15,9	15,6	13,1	9,9	15,1	14,9	20,3	14,2
RFA	35,8	28,5	29,2	29,3	24,5	32,6	34,7	36,9	36,7	30,6	24,0	30,9	28,6	37,7	31,4
T_{ar}	26,1	26,3	25,4	25,3	24,9	25,8	25,4	25,3	24,4	25,0	24,6	25,3	25,2	26,0	25,3

A floresta funciona como controlador das variações aerotérmicas, não permitindo oscilação acentuada durante o dia. A vegetação densa reflete, para a atmosfera, uma parte da radiação solar, que chega ao topo do dossel; outra parte da energia disponível é utilizada nos processos de fotossíntese realizados pelas plantas, deixando apenas uma pequena parte da luz solar penetrar entre as diversas camadas de folhagem e atingir o solo. Após aquecer a superfície, parte desta energia fica armazenada na camada de ar compreendida entre o solo e a parte inferior do dossel, propiciando um aquecimento constante e regular.

Para as áreas de floresta, segundo Ribeiro *et al.* (2006), a radiação solar incidente é atenuada significativamente, sofrendo extinção exponencial, por múltiplas reflexões no próprio dossel, desde a parte superior do dossel até o solo. De acordo com Correia *et al.* (2007), no início do processo de desmatamento, a retirada da vegetação primária pode intensificar os gradientes horizontais de temperatura e umidade, provocando aumento da precipitação pluvial associada às circulações atmosféricas locais. Também poderá ocorrer aumento no índice pluviométrico durante um período, enquanto o fornecimento de umidade

mantiver a própria precipitação e principalmente o desmatamento não atingir áreas tão grandes que quebrem o equilíbrio inicial.

Entre os anos de 2000 e 2003 a temperatura do ar alcançou valores máximos, normalmente acima dos 32 °C, em geral em torno das 13 h, principalmente nos meses de menor pluviosidade (julho a dezembro). A temperatura máxima absoluta de 37,1 °C ocorreu em dezembro de 2001 o mês mais quente do período, com média das máximas de 33,7 °C.

As temperaturas mínimas ocorreram logo ao amanhecer, alcançando valores em torno de 21 °C. A temperatura mínima absoluta no período foi de 20,2 °C em setembro de 2003; na média, o mês com as menores temperaturas foi setembro, com 21,5 °C.

No período entre 2000 e 2003 as temperaturas médias nos meses de janeiro e dezembro foram de 25,6 e 26,9 °C, respectivamente, enquanto as médias registradas em dezembro de 2000 e janeiro de 2003 foram de 26,3 e 25,2 °C, respectivamente. As diferenças observadas nas médias dos meses de estudo em relação às médias do período total foram de apenas 2%, aproximadamente.

Os períodos estudados apresentaram muita nebulosidade (época chuvosa) reduzindo, desta forma, a quantidade de energia radiante que atingiu o solo; mesmo assim, a área experimental, por estar localizada na região equatorial e sujeita a nebulosidade cumuliforme, registrou picos horários da radiação de ondas curtas incidentes (ROC) acima de 980 W m⁻² em dezembro de 2000 e de até 950 W m⁻² em janeiro de 2003.

Em dezembro de 2000, para os valores de ROC integrados diariamente, das 7 às 18 h, os valores máximos e os mínimos foram de 20,6 e 10,0 MJ m⁻², nos dias 5 e 16, respectivamente, enquanto no período de janeiro de 2003 os máximos e mínimos registrados foram de 20,3 e 9,9 MJ m⁻² nos dias 25 e 22, respectivamente (Tabela 2). A quantidade de energia radiante disponível nos dois períodos foi similar e as pequenas diferenças observadas estão relacionadas com o horário de ocorrência de cobertura de nuvens e das chuvas.

A radiação fotossinteticamente ativa (RFA) disponível atingiu valores superiores a 1.600 μmol m⁻² s⁻¹, em dezembro de 2000 e a 1.700 μmol m⁻² s⁻¹, em janeiro de 2003.

Durante os 14 dias analisados em dezembro de 2000 os valores máximo e mínimo diários de RFA integrados das 7 às 18 h, foram de 34,3 e 18,1 mol m⁻² nos dias 05 e 16, respectivamente, enquanto no período de janeiro de 2003 os valores máximo e mínimo foram 37,7 e 24,0 mol m⁻² nos dias 25 e 22, respectivamente (Tabela 3). Como ocorre

continuamente na Amazônia, também durante os períodos estudados as plantas receberam grande suprimento de RFA.

As características das plantas monitoradas são apresentadas na Tabela 4. O intervalo de mais de um ano, ocorrido entre o fechamento da cobertura na parcela B (em dezembro de 2001) e a repetição das medidas de fluxo (em janeiro de 2003) foi necessário para uma definição melhor dos efeitos sentidos pelo ecossistema, devido ao evento da seca provocada. Nos 14 dias de medidas em dezembro de 2000 as plantas estavam sob as mesmas condições de umidade no solo; entretanto, nos 14 dias, em janeiro de 2003, a parcela B apresentava redução no teor de água no solo disponível à planta.

Tabela 4. Dimensões dos exemplares de *E. coriacea* monitorados no ESECAFLOR. CPM (m) - circunferência do tronco no ponto de medida, DAP (m) - diâmetro do tronco na altura do peito, ACPS (m²) - área plana da copa da árvore projetada no solo. Os valores à direita em % são diferenças da árvore B381 em relação a A237

ID	Altura		DAP		CPM		ACPS	
			(metros)				(m ²)	
A (237)	27		0,337		1,06		187	
B (381)	33	+22%	0,315		0,99	-6,6%	123	-34%

4.1.2. Conteúdo de água no solo (CAS)

O solo da ECFPn apresentou uma particularidade com relação a abertura das trincheiras de 5 m de profundidade nas parcelas. Em torno dos 3 m de profundidade, foi observada a ocorrência de uma camada de solo laterítico, com aproximadamente 0,3 m de espessura; tal presença rochosa dificulta a penetração das raízes para as camadas mais profundas do solo. Os conteúdos de água no solo, a partir de novembro de 2000, são exibidos na Figura 16. É importante ressaltar que no dia 15 de dezembro de 2001 iniciou-se o processo de exclusão parcial da água da chuva, na parcela B.

A redução do volume de água que atingiu o solo nessa área provocou diminuição acentuada nos valores medidos de umidade do solo, já observada a partir de fevereiro de 2002 (Figura 16). Essa restrição hídrica induzida, ao qual foram submetidas as plantas da parcela coberta (B), provocou alterações nas respostas transpiratórias das árvores de *E. coriacea* monitoradas. As medições realizadas no solo mostraram grande variação no conteúdo de

água entre as parcelas. Comparando-se os volumes, concluiu-se que a maior diferença foi de -33% de água na parcela B no mês de junho de 2002, final do período chuvoso (Figura 17). Nesse ano não ocorreu, durante a época das chuvas, reposição dos estoques normais da água no solo dessa parcela (conteúdo pré-cobertura da área). A disponibilidade hídrica para as raízes foi reduzida alterando, concomitantemente, o volume de água transportado pelos vegetais para a atmosfera.

No período de julho a dezembro de 2002, as diferenças no conteúdo de água entre as parcelas diminuíram, mais pelo fato de também haver redução no teor de umidade do solo da parcela A do que por uma elevação no conteúdo da parcela B. Com o retorno do período chuvoso, no início de 2003, as diferenças voltaram a crescer, mostrando a eficiência do trabalho estrutural realizado na cobertura do Experimento ESECAFLOR, que permitiu se avaliar o impacto causado pelo período acentuado de seca na região.

O conteúdo de água no solo (CAS), armazenado na camada da superfície até 3 m, superior ao horizonte laterítico, durante o ano de 2002 (Figura 16), oscilou próximo de 600 mm na parcela B, nos meses de janeiro a junho, sendo o máximo registrado em abril, com 602 mm. Em janeiro de 2003, mediu-se o nível mais baixo de água no solo com 452 mm e, como previsto, a sazonalidade natural da umidade do solo foi alterada na parcela B; em 13 de janeiro de 2003, a parcela B reduziu 30,5% de água no solo, em relação a 15 de dezembro de 2000. Por outro lado, na parcela de controle (A) a sazonalidade foi mantida, sendo registrado o valor máximo (março) e mínimo (outubro) de 776 e 530 mm, respectivamente. Finalmente, em 13 de janeiro de 2003, a parcela A registrou redução de apenas 9,1% de água no solo, em relação a 15 de dezembro de 2000.

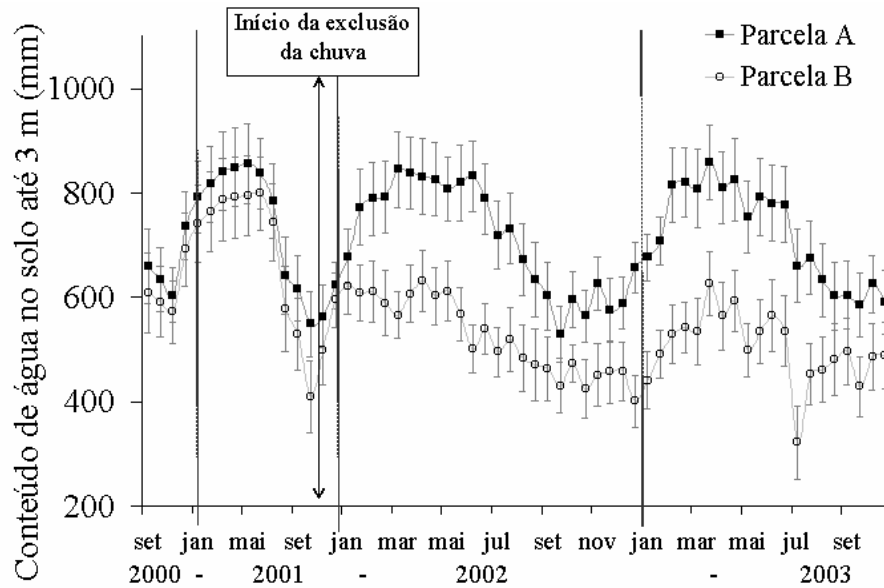


Figura 16. Conteúdo de água no solo - CAS - (mm) na camada de 0 a 3 m, nas parcelas do ESECAFLOR. O ciclo sazonal foi alterado na parcela B

Como em meados de dezembro de 2001, o trabalho de cobertura da parcela B foi finalizado; e, se iniciaram as medidas sob o processo de exclusão de mais de 90% da água das chuvas que ocorreram na região. No começo do período chuvoso de 2002, o solo já apresentava redução no teor de água; entretanto, ainda continha grande volume armazenado. Por outro lado, com a cobertura plástica na parcela B, o conteúdo de água começou a não mais ser repostado integralmente, reduzindo, desta maneira, a disponibilidade hídrica às plantas. Em julho de 2002, com a chegada da época menos chuvosa, a diferença já era claramente visível, como foi determinado pelas medidas de TDR (Figura 17), sendo que o solo da parcela B chegou a apresentar, na camada da superfície até os 3 m de profundidade, cerca de dois terços do teor de umidade registrado na parcela A.

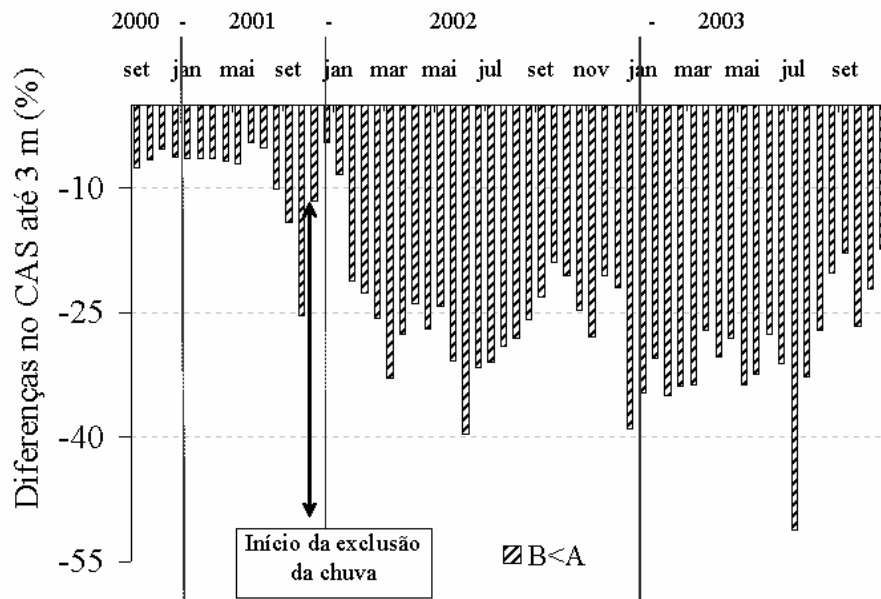


Figura 17. Diferenças (%) do conteúdo de água no solo CAS (mm) na camada de 0 a 3 m, nas parcelas do ESECAFLOR

Para quantificar o conteúdo de água no solo prontamente disponível às raízes, foram realizados perfis a cada metro de profundidade desde a superfície até cinco metros. Como a cobertura da parcela *B* foi fechada no final do ano 2001, e as análises de fluxo de seiva foram realizadas em dezembro de 2000 e janeiro de 2003, os perfis médios de CAS obtidos entre janeiro e março dos anos de 2001 e de 2003 são representativos das condições hídricas do solo nos períodos estudados. No ano de 2001 (círculos) quase não há diferença entre a parcela *A* (símbolos cheios e linhas contínuas) e a parcela *B* (símbolos vazados e linhas pontilhadas), principalmente nos três primeiros metros de profundidade. Para o ano de 2003 (triângulos), a parcela *A* permanece com valores aproximadamente iguais àqueles obtidos no ano de 2001 até três metros de profundidade; depois deste nível sofre uma redução. Por outro lado, a parcela *B* apresenta claramente a diminuição do conteúdo de água desde a superfície até o fundo da trincheira (Figura 18).

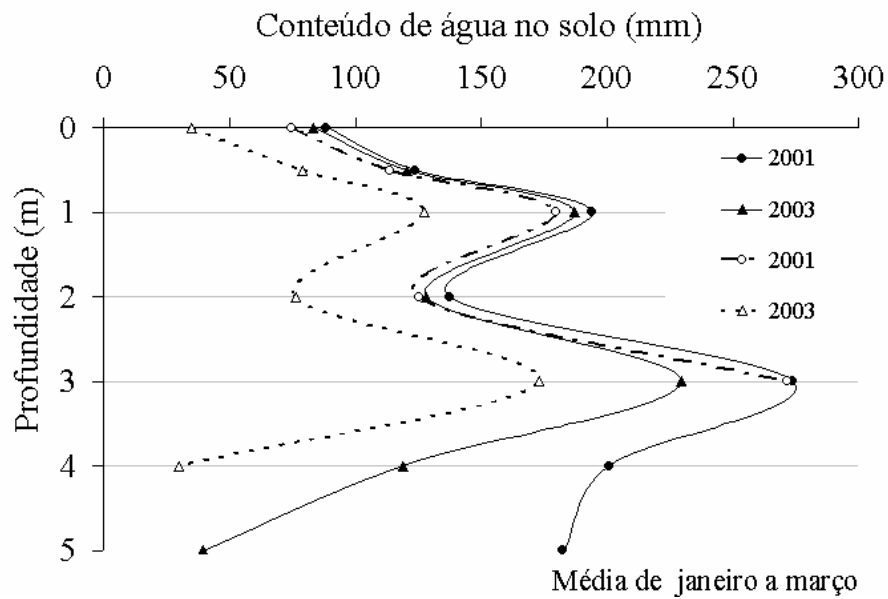


Figura 18. Perfis de conteúdo de água no solo (mm) nas parcelas *A* (símbolos cheios) e *B* (símbolos vazados) nos anos de 2001 e 2003. Os valores são médios das medidas realizadas entre janeiro e março de cada ano

4.1.3. Análises das medidas de fluxo de seiva (FS)

As medidas de fluxo de seiva realizadas em dois exemplares de *Eschweilera coriacea* (Matá-matá branco) na área experimental do ESECAFLOR, no período chuvoso da região caracterizam, de forma bem definida, os ciclos transpirativos desta espécie tropical. Em dezembro de 2000, ambos os exemplares estavam em condições climáticas semelhantes; essa similaridade de ambiente está representada nas respostas fisiológicas descritas nas Figuras 19 e 20. No exemplar A237, monitorado na parcela de referência (*A*), entre 03 e 16 de dezembro de 2000 (Figura 19) os fluxos atingiram nos dias 3, 8 e 9, valores acima de $25 \text{ kg arv}^{-1} \text{ h}^{-1}$ (quilograma de seiva pela circunferência do tronco da árvore por hora que, a partir daqui, será descrito apenas como kg h^{-1}), sendo registrado no dia 9, o máximo de 27 kg h^{-1} . No período de 03 e 16 de dezembro de 2000 o fluxo médio foi de apenas $4,0 \text{ kg h}^{-1}$ na árvore A237.

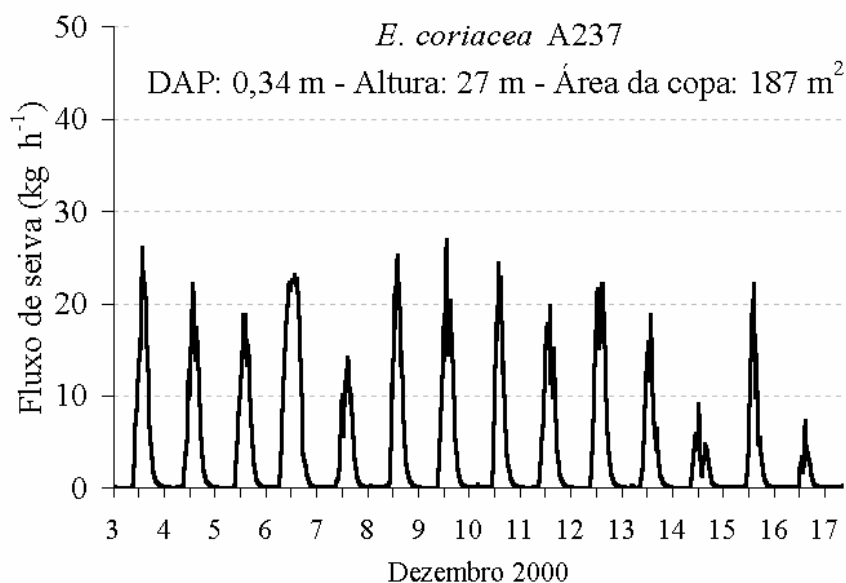


Figura 19. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar A237 de *E. Coriacea* referente ao período de 3 a 16 de dezembro de 2000

Para a árvore B381, localizada na parcela B que foi submetida à exclusão da chuva a partir de dezembro de 2001, os fluxos máximos alcançaram valores acima de 38 kg h^{-1} nos dias 3, 6 e 9 (Figura 20); o fluxo de seiva médio foi de $7,3 \text{ kg h}^{-1}$, cuja diferença foi atribuída principalmente às características de cada exemplar, como altura total da árvore, diâmetro do tronco, área da copa e conseqüentemente maior exposição à luz solar, já que estão em áreas fisicamente similares.

Há significativas variações diárias observadas no dia 7, com um pico de fluxo de aproximadamente 25 kg h^{-1} . No dia 14, houve redução no fluxo de seiva, com um pico de aproximadamente 18 kg h^{-1} . O dia 16 apresentou um fluxo de seiva da ordem de 12 kg h^{-1} o em torno do meio-dia; nesse dia houve a ocorrência de 10,2 mm de precipitação e um total de radiação solar de ondas curtas integrado das 7 as 18 h de apenas $10,0 \text{ MJ dia}^{-1}$.

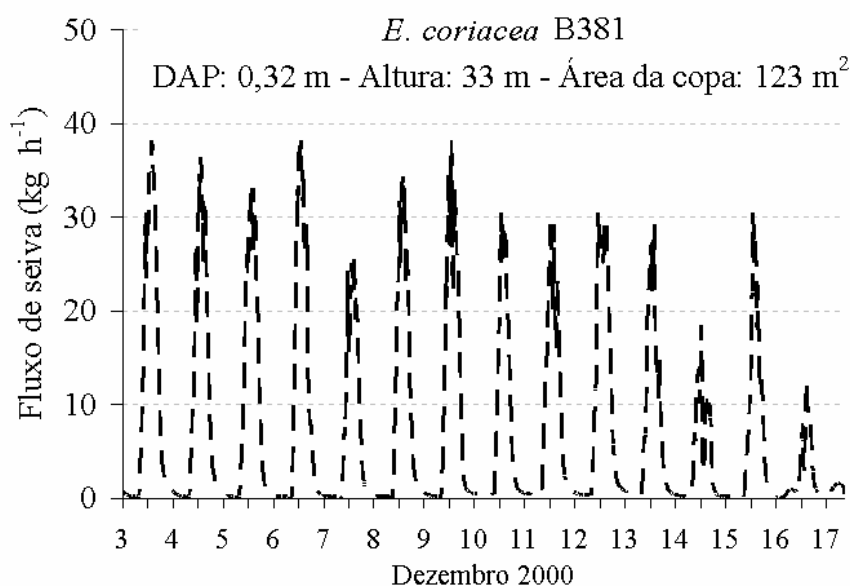


Figura 20. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar B381 de *E. Coriacea* referente ao período de 3 a 16 de dezembro de 2000

Nas medidas de fluxo de seiva da *E. Coriacea*, realizadas entre 12 e 25 de janeiro de 2003, os efeitos da seca forçada (13 meses) a que foi submetido o exemplar da parcela B, foram bastante evidentes. A planta A237, na parcela A, continuou a registrar valores de fluxo da mesma magnitude daqueles obtidos em dezembro de 2000, até mais elevados, atingindo 37 kg h^{-1} , nos dias 18 e 25 (Figura 21) período em que o fluxo médio em A237 foi de $6,1 \text{ kg h}^{-1}$.

O menor pico de fluxo de seiva foi registrado no dia 16 com cerca de 20 kg h^{-1} ; nesse dia também foram registrados 7,2 mm de chuva e apenas $10,7 \text{ MJ dia}^{-1}$ de radiação solar de ondas curtas. Não somente a ocorrência de chuva influencia na transpiração das plantas, mas também o horário em ocorrer chuva. A redução na quantidade de radiação solar que atinge a superfície é também um fator importante para que haja uma diminuição nos fluxo de seiva de uma determinada planta, principalmente se essa árvore não ocupar uma posição privilegiada no conjunto do dossel, isto é, se sofrer muito sombreamento das outras árvores.

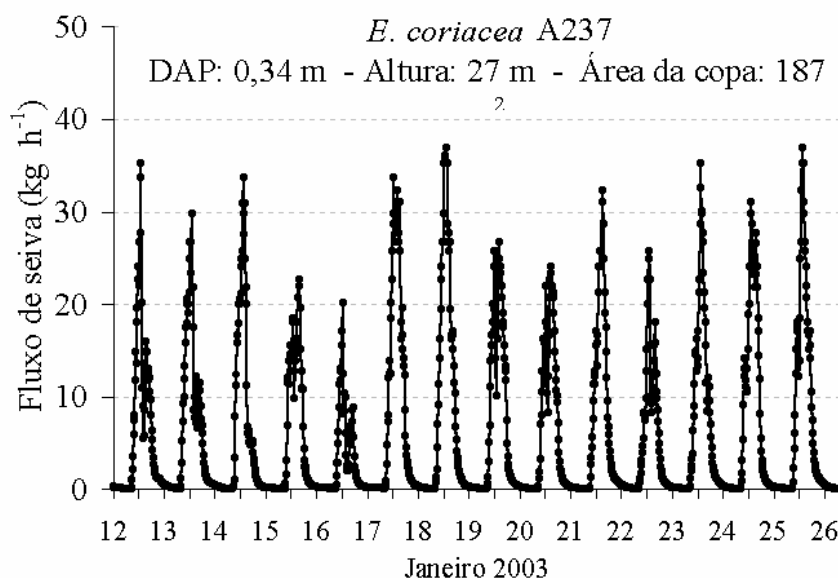


Figura 21. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar A237 de *E. Coriacea* referente ao período de 12 e 25 de janeiro de 2003

A árvore da parcela B teve os fluxos reduzidos de maneira acentuada. Para o exemplar B381, sob restrição hídrica, o fluxo de seiva foi em torno de 10 kg h^{-1} , uma redução para cerca de 32,4% dos fluxos medidos em dezembro de 2000. O fluxo médio em B381 foi de apenas $2,3 \text{ kg h}^{-1}$ (Figura 22).

Mesmo ocorrendo eventos de chuva durante esse período, mas como estava sob exclusão da chuva, essa árvore apenas tinha à disposição do seu sistema radicular a água armazenada anteriormente e em camadas menos acessíveis, como foi observado na Figura 18, o conteúdo de água na parcela B em janeiro de 2003 era bastante reduzido se comparado com o teor de umidade da parcela A. O exemplar B381 respondeu ao estresse hídrico com valores muito abaixo daqueles apresentados antes da exclusão de parte da chuva.

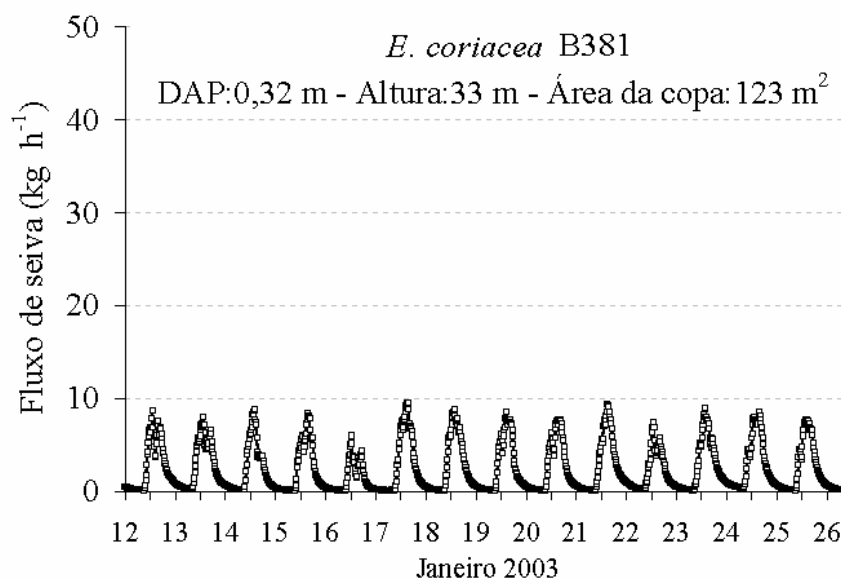


Figura 22. Fluxo de seiva (kg h^{-1}) no exemplar B381 de *E. Coriacea* referente ao período de 12 e 25 de janeiro de 2003

Quando foram integrados diariamente, os resultados dos fluxos de seiva de cada árvore de *E. Coriacea* monitorada nos dois períodos estudados foram os seguintes: em dezembro de 2000, o exemplar A237, situado na parcela de referência transportou à atmosfera, em média, 98 kg de água, alcançando o máximo e o mínimo de 191 e 24 kg nos dias 6 e 16/12/2000, respectivamente. Como essa árvore não sofreu carência hídrica, em janeiro de 2003, ela continuou a transpirar com a mesma intensidade, registrando-se, nesse período, em média 151 kg, com o máximo e o mínimo de 205 e 70 kg nos dias 18 e 16/01/2003, respectivamente (Tabela 5).

O exemplar B381, submetido ao menor conteúdo hídrico no solo, forçado pela cobertura plástica na parcela B sofreu, durante o ano de 2002, uma variação acentuada na quantidade de água transpirada. Os valores de fluxo de seiva integrados diariamente foram de maneira significativa superiores no período de dezembro de 2000, período anterior à cobertura, em relação a 2003. Com frequência, variaram acima dos 200 kg (em 7 dos 14 dias analisados), sendo que a média no período foi de 179 kg. Essa árvore atingiu os fluxos máximo e mínimo de 248 e 54 kg, nos dias 3 e 16/12/2000, respectivamente; no entanto, em janeiro de 2003, após mais de um ano submetida às restrições de disponibilidade de água, a planta transpirou apenas um terço (32,4%) do volume medido em dezembro de 2000, em média 58 kg, e com o máximo e o mínimo de 67 e 24 kg nos dias 24 e 16/01/2003, respectivamente. Nesse período, a árvore B381 apresentou acentuada queda de folhas e envelhecimento anormal de alguns galhos (mudanças na coloração e maior fragilidade), em

diferentes alturas do dossel foliar. Os valores da transpiração diária das árvores monitoras são apresentados na Tabela 5. Não foi possível determinar exatamente as causas das duas árvores terem registrado os fluxos mínimos nos mesmos dias, para os dois períodos. Estes resultados sugerem que a combinação de fatores meteorológicos, como precipitação pluvial, elevada nebulosidade e umidade do ar, e com pouca radiação solar, tenha inibido a atividade transpiratória das plantas naqueles dias.

Tabela 5. Valores diários da transpiração – Tr (kg) de *E. Coriacea* nas árvores A237 (referência) e B381 submetida ao estresse hídrico a partir de dezembro de 2001

Dezembro de 2000															
Tr \ dias	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	média
A237	122	107	100	191	72	113	120	102	100	123	80	38	78	24	98
B381	248	227	215	226	155	201	225	167	179	216	161	90	143	54	179
Janeiro de 2003															
Tr \ dias	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	24	25	média
A237	141	149	147	128	70	194	205	160	140	156	110	157	174	179	151
B381	60	61	55	52	31	64	63	60	59	64	47	63	67	60	58

Considerando-se a Área plana da Copa da árvore Projetada no Solo (*ACPS*), calculou-se a transpiração por unidade de área, com a divisão da transpiração total diária pela área da copa ($Tr/ACPS$), em cada exemplar.

Para a árvore A237, com *ACPS* de 187 m² (Tabela 1), as médias obtidas nos períodos estudados foram de 0,52 e 0,81 mm dia⁻¹ com os máximos de 1,02 e 1,10 mm dia⁻¹ em 2000 e 2003, respectivamente. O aumento médio foi de 55,8% entre os dois períodos.

Na árvore B381, com *ACPS* de 123 m², as médias foram de 1,46 e 0,47 mm dia⁻¹, com máximos de 2,02 e 0,55 mm dia⁻¹ em 2000 e 2003, respectivamente. Como esperado, ocorreu redução na transpiração média, que entre os períodos analisados de 2000 e 2003 foi de 67,8%.

As taxas de evapotranspiração para florestas tropicais são em torno de 4 mm dia⁻¹, com variações sazonais decorrentes da existência ou não de chuvas (Fisch *et al.*, 1998). Entretanto, nesses casos todos os fatores são considerados, por exemplo, a superposição de

camadas foliares e a contribuição da superfície. A evapotranspiração da floresta na região Amazônica foi objeto de alguns estudos (Villa Nova *et al.*, 1976, Marques *et al.*, 1980, Shuttleworth *et al.*, 1987). No caso do experimento ESECAFLOR, os resultados consideraram apenas a contribuição de exemplares isolados, ou seja, a água efetivamente transferida pela planta para a atmosfera (transpiração), sem adição do potencial evaporativo do solo.

Os ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) e os fluxos de seiva (FS) são apresentados nas Figuras 23 e 24. Observa-se um pequeno atraso na resposta transpiratória em relação a RFA; entretanto, os ciclos são coincidentes. Após o término da incidência de RFA, em torno das 18 h, o FS se estendeu ainda pelas primeiras horas da noite, até atingir a estabilização (fluxo zero), por volta das 3 h da manhã.

No período de 3 a 16 de dezembro de 2000, os valores de RFA e FS nas plantas A237 (Figuras 23) e B381 (Figuras 24) se mantiveram na mesma ordem de grandeza com um volume de água no solo em torno de 650 mm.

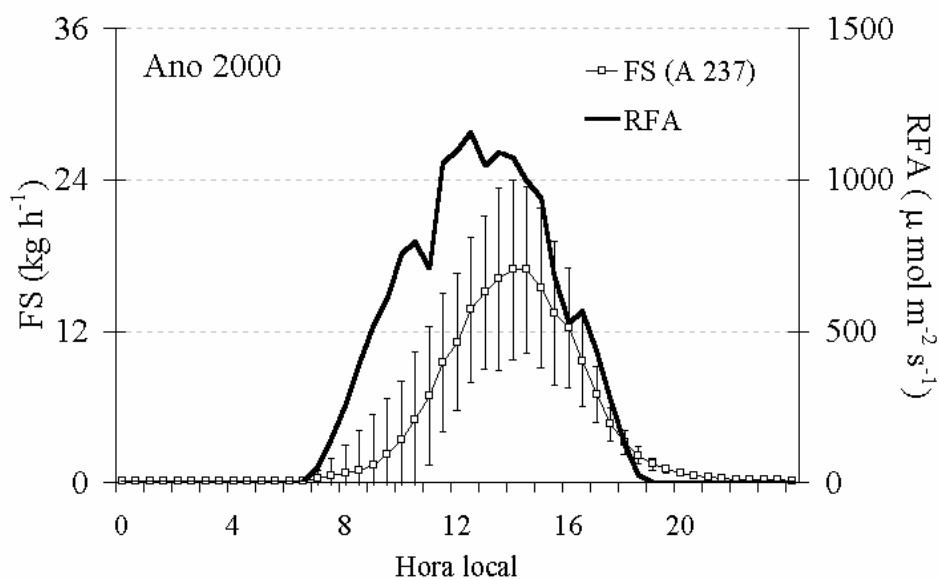


Figura 23. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore A237 de *E. Coriacea*, referentes ao período de 3 a 16 de dezembro de 2000. As barras verticais são os desvios-padrão

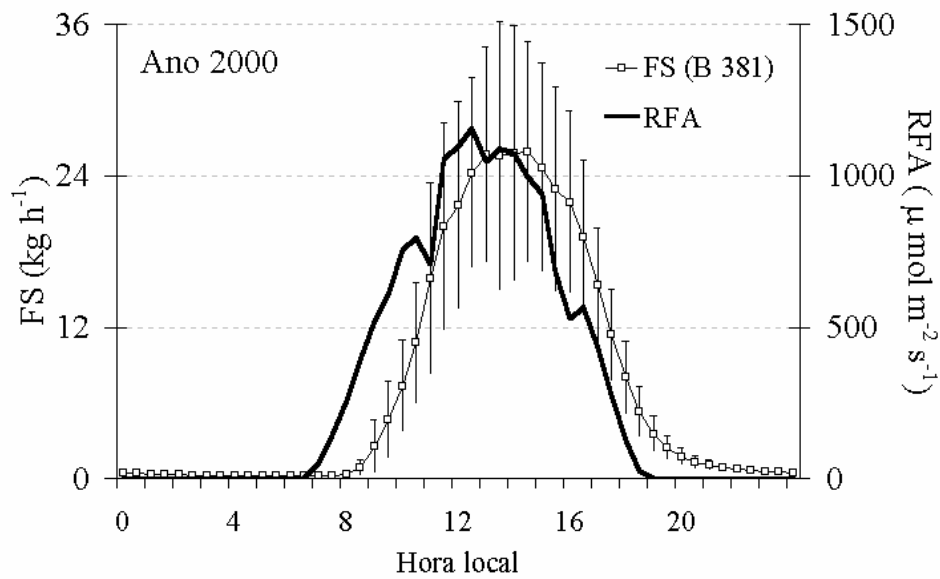


Figura 24. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore B381 de *E. Coriacea*, referentes ao período de 3 a 16 de dezembro de 2000. As barras verticais são os desvios-padrão

Já no período de 12 a 25 de janeiro de 2003 o FS no exemplar A237 se manteve elevado com suave crescimento, atingindo um pico superior aos 24 kg h^{-1} no início da tarde (Figura 25).

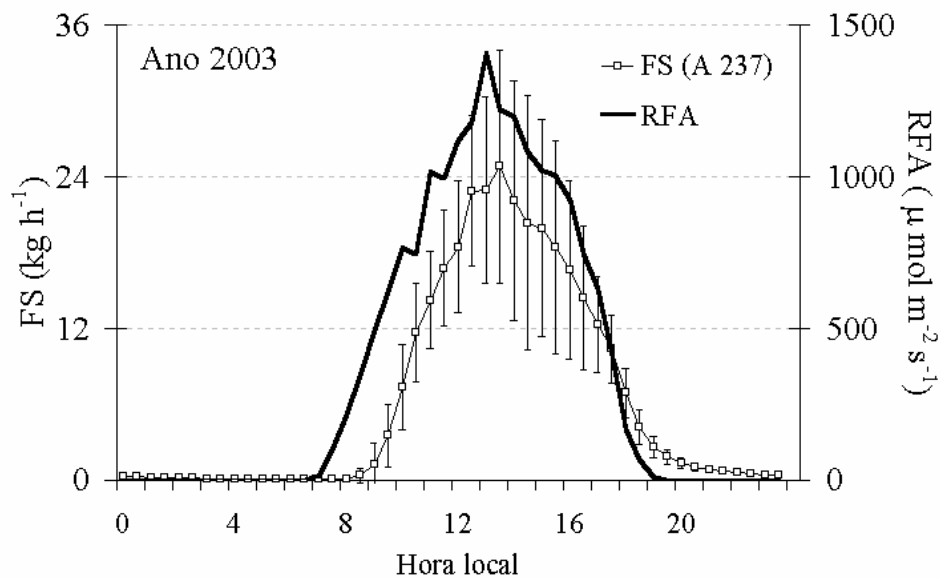


Figura 25. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore A237 de *E. Coriacea*, referentes ao período de 12 a 25 de janeiro 2003. As barras verticais são os desvios-padrão

A árvore B381 sofreu redução acentuada nos valores registrados, caindo de um fluxo superior a 25 kg h^{-1} no ano de 2000, para menos de 10 kg h^{-1} em 2003. Esse resultado sugere que, mesmo com grande quantidade de RFA disponível à planta e ainda um teor de água no solo de aproximadamente 450 mm, o estresse hídrico prevaleceu, reduzindo a transpiração (Figura 26).

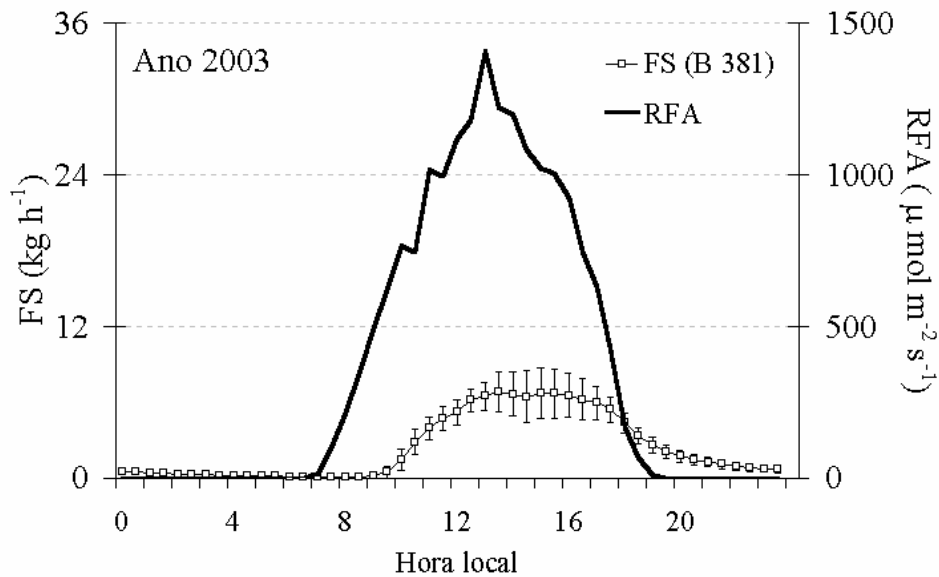


Figura 26. Ciclos médios diários da radiação fotossinteticamente ativa (RFA) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e do fluxo de seiva (FS) (kg h^{-1}), na árvore B381 de *E. Coriacea*, referentes ao período de 12 a 25 de janeiro 2003. As barras verticais são os desvios-padrão

As regressões lineares entre os fluxos de seiva e as radiações de ondas curtas e fotossinteticamente ativas, apresentaram bons coeficientes de determinação (Tabela 6). Os valores desses coeficientes, como esperado, foram menores para a árvore B381 em janeiro de 2003, em relação ao período de dezembro de 2000, pois esse exemplar passou mais de um ano sob restrição hídrica.

Tabela 6. Equações das regressões lineares e coeficientes de determinação (R^2) entre as médias horárias do fluxo de seiva (FS, kg h^{-1}), radiação fotossinteticamente ativa (RFA, $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) e radiação de ondas curtas (ROC, $\text{W m}^{-2} \text{s}^{-1}$), nos exemplares A237 e B381 de *E. Coriacea*

Radiação	03 a 16 de dezembro de 2000			
	A 237		B 381	
	Equação	R^2	Equação	R^2
RFA	$\text{FS} = 0,0123\text{RFA} + 0,1469$	0,8056	$\text{FS} = 0,0211\text{RFA} + 0,6988$	0,8212
ROC	$\text{FS} = 0,0202\text{ROC} + 0,1943$	0,7483	$\text{FS} = 0,0351\text{ROC} + 0,7023$	0,7811
Radiação	12 a 25 de janeiro de 2003			
	A 237		B 381	
	Equação	R^2	Equação	R^2
RFA	$\text{FS} = 0,0169\text{RFA} + 0,1483$	0,9116	$\text{FS} = 0,0046\text{RFA} + 0,7371$	0,7106
ROC	$\text{FS} = 0,0374\text{ROC} + 0,1102$	0,8725	$\text{FS} = 0,01\text{ROC} + 0,7394$	0,67

4.2. Curso anual da transpiração de exemplares de *Couratari Multiflora* na FLONA de Caxiuanã, Pará

Esta seção do trabalho objetivou a determinação do curso anual da transpiração de exemplares de *Couratari Multiflora* (Tauari) localizados na parcela A do experimento ESECAFLORE desenvolvido na FLONA de Caxiuanã, utilizando-se as medidas de fluxo de seiva obtidas com a aplicação do método do BCT do vegetal. Alguns estudos foram realizados para a determinação da transpiração em diferentes espécies florestais em diversas regiões (Čermák *et al.*, 1973, 1982, 2004; Jiménez *et al.*, 1996, 1999; Cienciala *et al.*, 2000; Naves-Barbiero *et al.*, 2000; Köstner, 2001).

4.2.1. Análises das variáveis observadas

Medidas contínuas de fluxo de seiva em três exemplares de *Couratari Multiflora* (Tauari) foram realizadas durante o período de 1º de dezembro de 2002 a 30 de novembro de 2003. As características físicas dessas árvores são apresentadas na Tabela 7.

Os dados meteorológicos foram obtidos por uma estação automática e armazenados em datalogger 21X (Campbell Scientific, Loughborough, UK) instalados no topo da torre de alumínio com 52 m de altura. A evapotranspiração potencial (*ET*) foi calculada pelo método de Hamon (1961).

O fluxo de seiva foi medido para cada centímetro de circunferência do tronco, depois multiplicado pelo perímetro total do tronco no ponto de medida ($\text{kg árvore}^{-1} \text{h}^{-1}$). Os valores diários foram divididos pela área da copa da árvore projetada no solo (m^2), obtendo-se a transpiração diária da planta (mm dia^{-1}).

Tabela 7. Dimensões dos exemplares de *Couratari Multiflora*. CPM - circunferência do tronco no ponto de medida, DAP - diâmetro do tronco na altura do peito, ACPS - área plana da copa da árvore projetada no solo

Identificação das árvores	Altura	DAP (m)	CPM	ACPS (m^2)
A (185)	25,0	0,181	0,57	57,9
A (187)	30,0	0,312	0,98	79,1
A (270)	31,5	0,306	0,96	124,7

As medidas contínuas realizadas entre 1º de dezembro de 2002 e 30 de novembro de 2003, apresentadas na seqüência, registraram precipitações pluviais (Figura 27) de até 65 mm dia^{-1} e uma distribuição durante todo o ano, com uma redução na freqüência de eventos entre agosto e novembro. A média diária da precipitação durante este ano foi de 5,8 mm dia^{-1} .

Nessa região da Amazônia o período chuvoso detém cerca de 75% das precipitações totais anuais. Esse período normalmente se estende de dezembro a maio, enquanto que os 25% restantes acontecem nos meses de junho a novembro, que representam o período seco.

Durante o período chuvoso é comum a ocorrência de seqüências de vários dias consecutivos com precipitação pluvial, com grandes quantidades, mas não necessariamente de eventos de grandes intensidades. Para o período considerado como seco, há grande redução nos totais de chuva, mas isso não significa a ausência de eventos de precipitação, que

de uma maneira geral ocorrem em dias espaçados, de forma isolada, com características do tipo de pancadas, e principalmente com curta duração e grande intensidade.

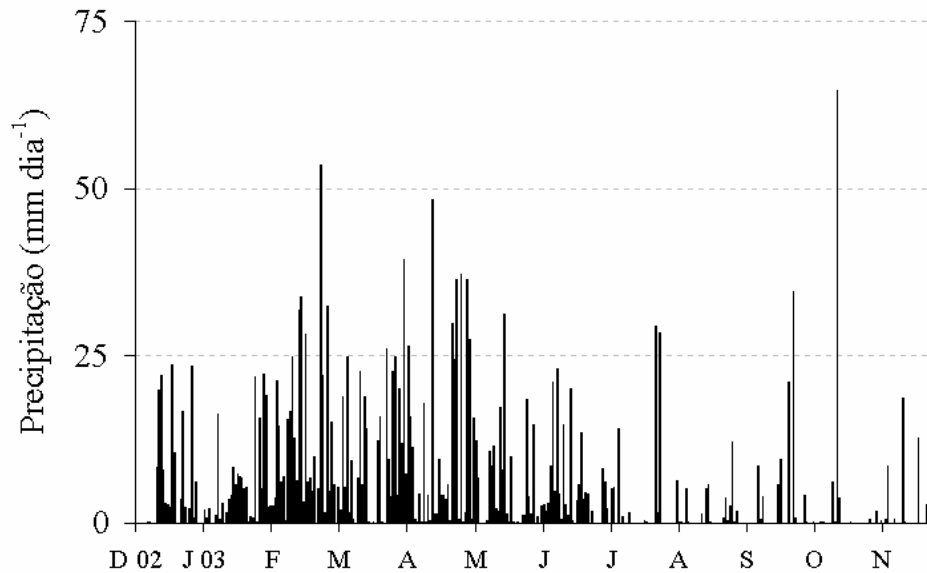


Figura 27. Medidas diárias da precipitações pluviiais (mm) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

A temperatura do ar medida acima da copa das árvores (Figura 28) variou entre 29,6 e 22,7 °C, com média de 26,2 °C. Observa-se uma suave elevação na temperatura a partir de junho até os maiores valores em novembro.

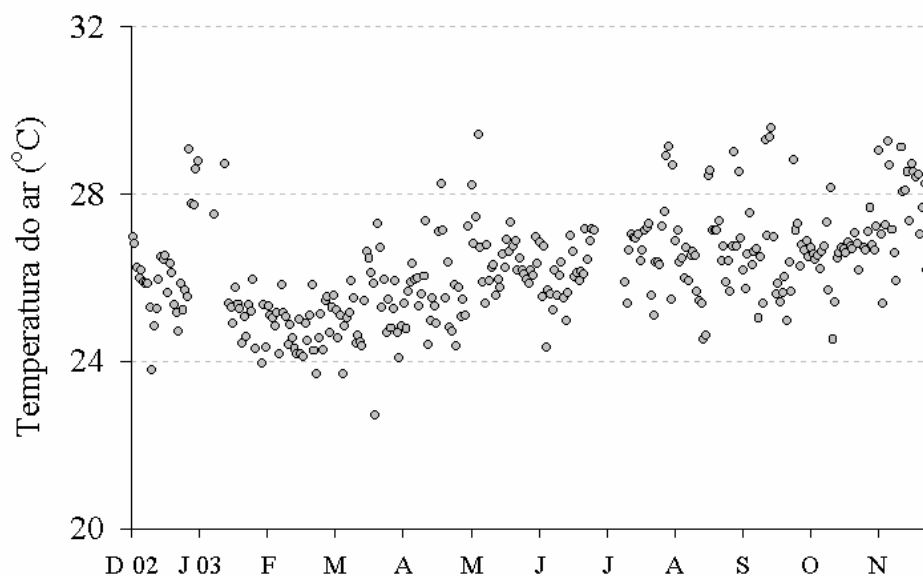


Figura 28. Medidas diárias da temperatura do ar (°C) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

A radiação global integrada diariamente das 7 às 18h (Figura 29) apresenta um aumento bem definido nos meses de agosto a novembro, cuja média foi de $16,1 \text{ MJ m}^{-2}$, com extremos de $6,2$ e $25,4 \text{ MJ m}^{-2}$. A nebulosidade que ocorre com maior frequência na Amazônia, de uma maneira geral, é do tipo cumuliforme, com grande desenvolvimento vertical que provocam precipitação na forma de pancadas localizadas. Essa característica da nebulosidade influencia diretamente na quantidade de radiação solar que atinge a superfície, pois mesmo em dias que se registram precipitações, ocorre também horas de grande intensidade de radiação, que podem ser intercaladas à essas precipitações de curta ou média durações. Isto ocorre principalmente nos meses de agosto a novembro, quando há redução nos totais de precipitação pluvial.

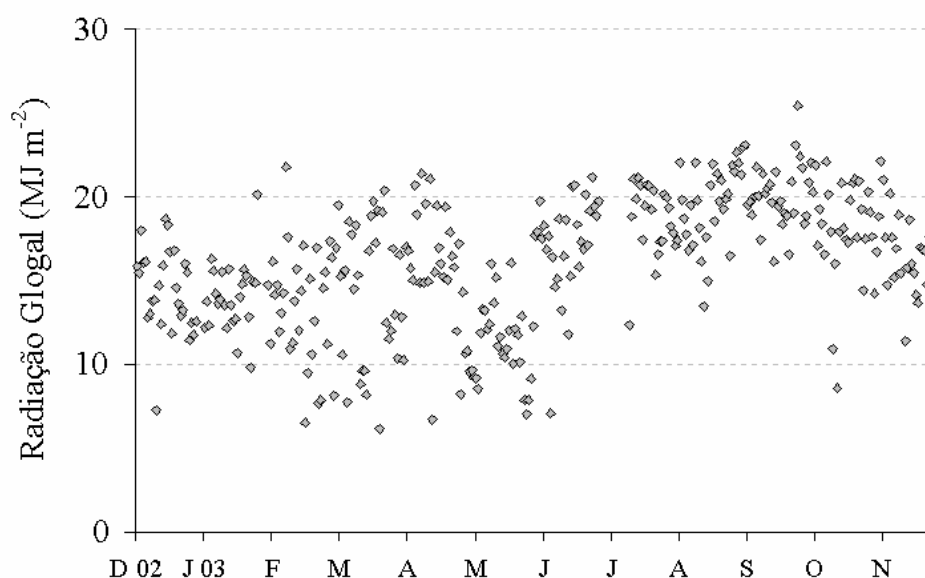


Figura 29. Medidas diárias da radiação global (MJ m^{-2}) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

O déficit de pressão de vapor (*DPV*) não apresentou uma variação bem definida, com média de $0,64 \text{ kPa}$, mas assim mesmo observou-se uma suave elevação na demanda atmosférica nos meses de setembro e outubro, exibindo claro crescimento em novembro, com picos de até $5,2 \text{ kPa}$ (Figura 30). Com a redução acentuada da precipitação pluvial a partir do mês de agosto, há uma natural elevação na necessidade de umidade presente na atmosfera. Isso fica evidente nos valores do *DPV* durante os meses de agosto até novembro, quando o *DPV* registra os maiores picos diários.

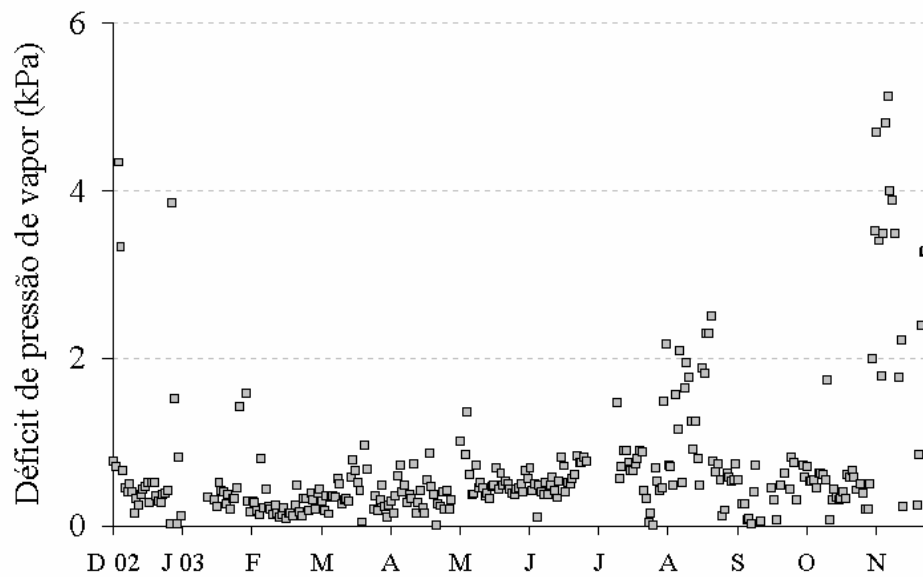


Figura 30. Medidas diárias do déficit de pressão de vapor (kPa) realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

4.2.2. O balanço hídrico durante o ESECAFLOR

As variáveis que foram utilizadas para o cálculo do balanço hídrico para a FLONA de Caxiuanã no período de dezembro de 2002 a novembro de 2003 são apresentadas nas figuras a seguir.

A precipitação total no ano foi de 2.100,1 mm, fazendo com que os totais mensais da precipitação pluvial (Figura 31) registrassem uma média de 175 mm mês⁻¹. Durante oito meses – de dezembro de 2002 a julho de 2003 – os valores mensais foram superiores a 100 mm, sendo o máximo de 390 mm registrado em fevereiro. No período de agosto a novembro de 2003 as chuvas não alcançaram os 100 mm mês⁻¹, sendo o menor valor em agosto, com apenas 44,2 mm. Segundo Nepstad *et al.* (1999b) uma seqüência de três ou mais meses consecutivos com precipitações abaixo de 100 mm mês⁻¹ aumenta consideravelmente a suscetibilidade de incêndios florestais, pois torna a vegetação sob estresse hídrico potencialmente inflamável, principalmente na estação seca.

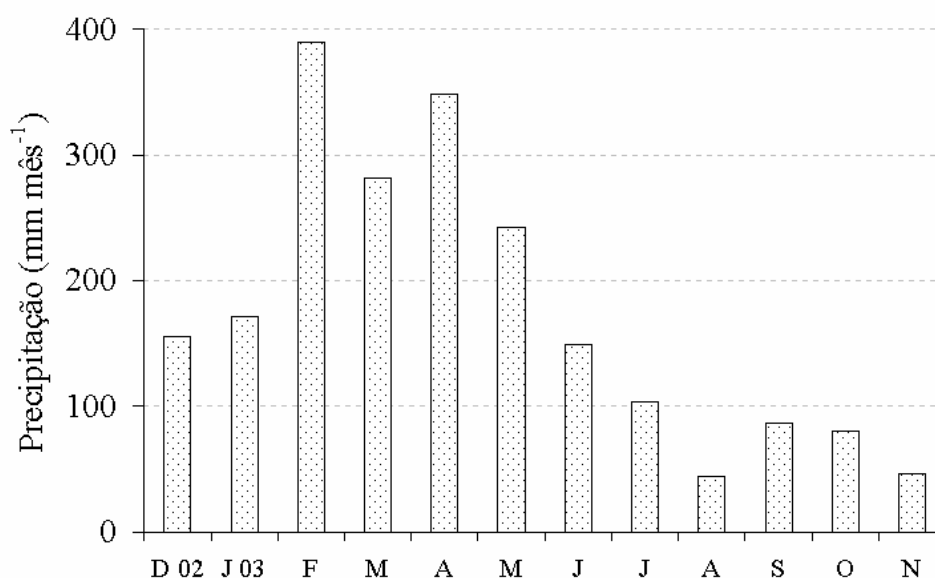


Figura 31. Totais mensais das precipitações pluviiais (mm) referentes ao período de dezembro de 2002 e novembro de 2003

A evapotranspiração potencial média ET calculada atingiu $134,1 \text{ mm mês}^{-1}$ (Figura 32) perfazendo um total de $1.608,6 \text{ mm ano}^{-1}$ durante o período de medidas. Esse valor de ET calculado representou 76,6% da precipitação pluvial registrada no mesmo período. Isso significa que mais de 3/4 da precipitação ocorrida na FLONA de Caxiuanã, nesse período, foram originados da reciclagem de umidade produzida localmente, como sugerido anteriormente por alguns autores para a Amazônia, como Salati *et al.* (1979) que em seus estudos determinaram que a precipitação na região é composta por uma quantidade de água evapotranspirada localmente somada a uma contribuição advinda do Oceano Atlântico, estimando dessa forma, que aproximadamente 50% do vapor d'água que formam as chuvas são gerados por evapotranspiração local, sendo a outra metade transportada para a região pelo fluxo atmosférico proveniente do Atlântico. Outros que estudaram o assunto foram, Marques *et al.* (1980), que usando a divergência do fluxo de vapor d'água na Amazônia, estimaram que 52% da precipitação ocorrida entre Belém e Manaus são provenientes do Oceano Atlântico e os 48% restante seriam reciclados na própria região. Para Salati e Vose (1984) a contribuição do Oceano Pacífico é muito pequena.

Em todos os meses as taxas de ET superaram os 100 mm, com o máximo de 142,2 mm obtido em agosto, os menores valores de evapotranspiração foram de 114,0 mm para o mês de fevereiro e 128,5 mm em abril. A média diária da ET obtida foi de 4,4 mm. Para Fisch

et al. (1998) as taxas de *ET* para florestas tropicais são em torno de 4 mm dia⁻¹, com pequenas variações sazonais devido à ocorrência de eventos de chuvas.

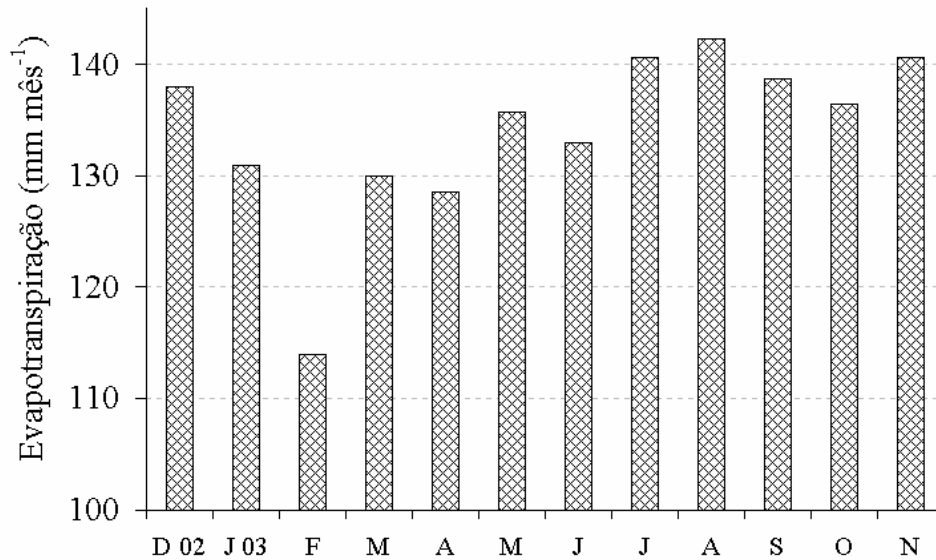


Figura 32. Evapotranspiração potencial mensal (mm), as medidas foram realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

O balanço hídrico (Figura 33) obtido pela relação *P-ET* (diferença entre a precipitação pluvial e a evapotranspiração potencial) apresentou um volume acumulado durante sete meses de 829,4 mm entre dezembro de 2002 e junho de 2003, porém durante os cinco meses seguintes, de julho a novembro, houve um déficit de 337,9 mm, resultando em um excedente hídrico de 491,5 mm. Durante todo o período, houve um saldo médio de 41,0 mm mês⁻¹. A ocorrência de um período prolongado de déficit hídrico, com cinco meses consecutivos, como ocorreu nessa fase analisada na FLONA Caxiuanã, pode tornar a vegetação frágil à ação do fogo.

Como no mês de dezembro já há ocorrência de grande quantidade de precipitação (155,6 mm), inicia-se neste período a reposição dos conteúdos de umidade do solo, isto é, a recarga da água que estará disponível ao sistema radicular das plantas. Porém, ainda há uma enorme taxa de evapotranspiração potencial ocorrendo, como resultado disso o pequeno excedente hídrico registrado neste mês (17,7 mm).

A partir de fevereiro (276,0 mm) e se estendendo até maio (107,1 mm), serão contabilizados os maiores excedentes de água do período, que garantirão o fornecimento de água às plantas durante o segundo semestre do ano, período que ocorrem os maiores

potenciais de evapotranspiração concomitantemente com as menores quantidades de precipitação pluvial. Os meses de agosto (-98,0 mm) e novembro (-94,0 mm) aparecem com os maiores déficits de água.

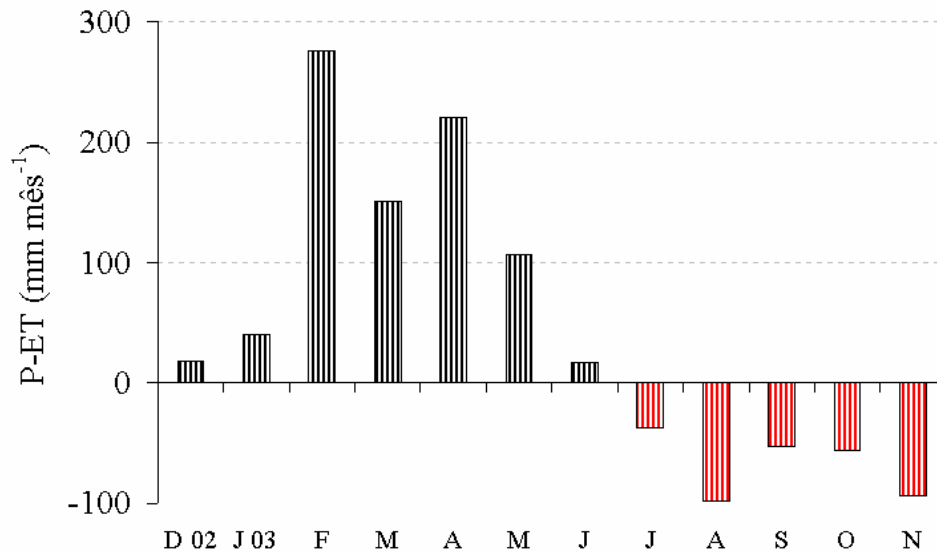


Figura 33. Balanço hídrico mensal (mm) obtido pela relação $P-ET$. As medidas foram realizadas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

4.2.3. A transpiração dos exemplares de *Couratari Multiflora*

A transpiração dos três exemplares de *Couratari Multiflora* ocorreu em intensidades similares durante o ano inteiro, o que é a variação normal para uma floresta tropical que não convive com períodos de frio intenso, com pequenas oscilações devidas, principalmente, aos elementos climáticos. A soma dos valores médios da transpiração das três plantas (Figura 34) indica a resposta da vegetação às condições de demanda atmosférica por umidade e maior disponibilidade de radiação global, principalmente nos meses de junho a agosto e em novembro.

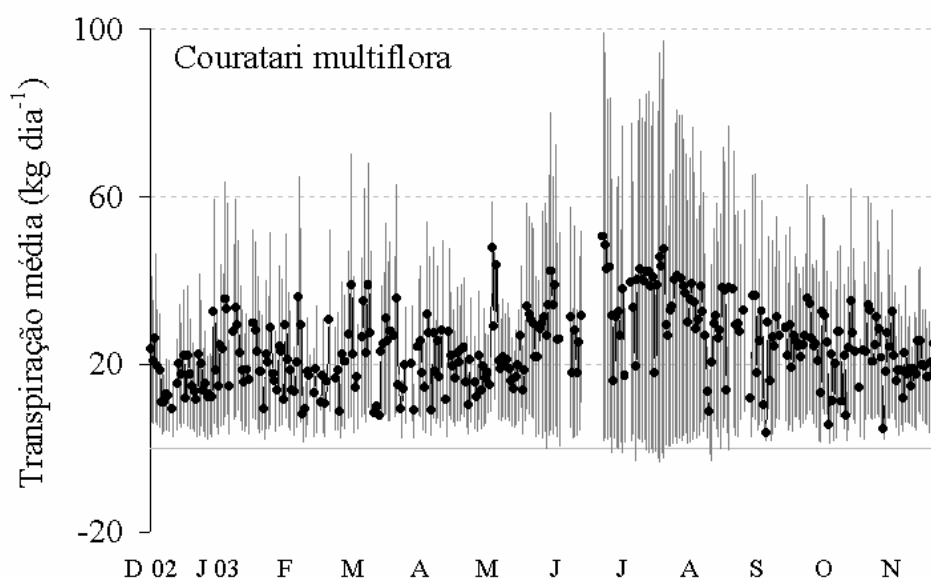


Figura 34. Médias diárias da transpiração (kg dia⁻¹) de três exemplares de *Couratari Multiflora* obtidas entre dezembro de 2002 e novembro de 2003. As barras verticais são os respectivos desvios-padrão

A transpiração média das três árvores foi de 0,83 mm dia⁻¹, considerando-se as pequenas falhas ocorridas por problemas operacionais, se extrapolada para todo o período de dezembro de 2002 a novembro de 2003 alcançaria cerca de 303 mm. A média da transpiração de cada árvore monitorada (Figura 35) explicita a importância das características individuais das plantas para a transpiração. A planta A185, por ser a que apresenta os menores diâmetro e altura (ver Tabela 7), tem menos eficiência na transpiração, durante os 325 dias no período analisado. Ela transpirou, em média, 4,8 kg dia⁻¹, provavelmente por ter que disputar com as outras plantas em sua vizinhança por uma melhor exposição aos raios solares. As plantas A187 durante 326 dias (26,1 kg dia⁻¹) e A270 monitorada durante 319 dias (42,6 kg dia⁻¹) têm, praticamente, os mesmos valores de diâmetro e altura, porém a planta A270 apresenta uma área de copa, aproximadamente, 58% maior que a A187. Isso é um dos fatores que faz com que seja mais eficiente na transpiração, pois tem maior exposição ao sol.

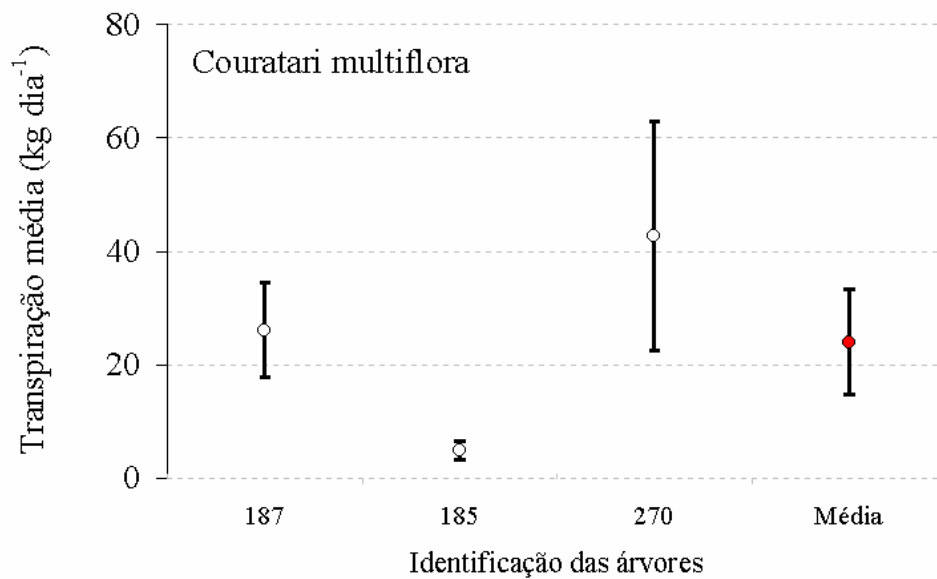


Figura 35. Média da transpiração (kg dia⁻¹) de cada um dos três exemplares de *Couratari Multiflora* para o período de dezembro de 2002 a novembro de 2003

Os totais mensais de transpiração das três árvores (Figura 36) nos meses de julho (35,3 mm) e agosto (30,5 mm) apresentaram os maiores valores, coincidindo com um período de baixa precipitação pluvial que concentrou aproximadamente 75% do total das chuvas entre dezembro e maio, e também simultâneo com o crescimento na demanda de umidade na atmosfera, que causa um maior déficit de pressão de vapor, além da radiação solar disponível, que acumulou cerca de 56,3% do total da radiação de ondas curtas no período seco entre junho e novembro.

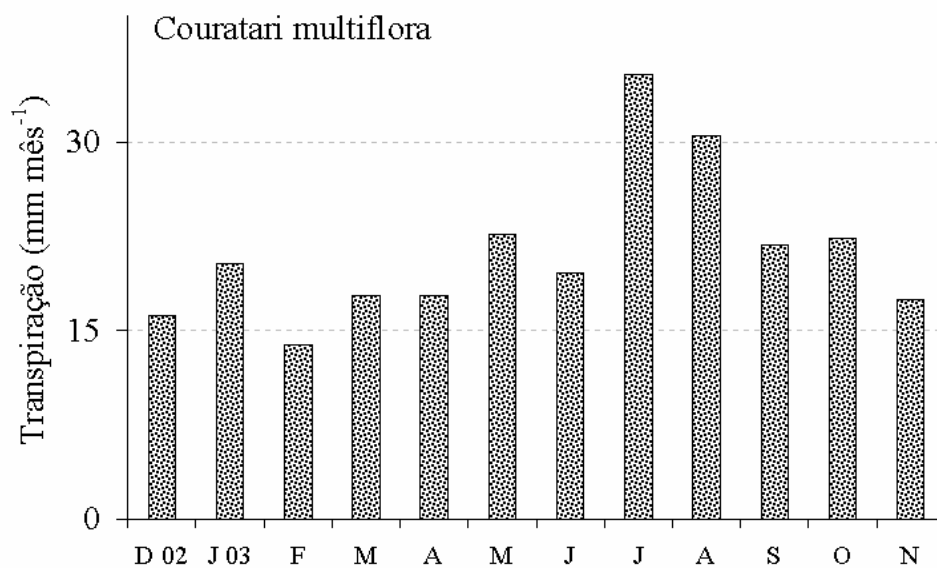


Figura 36. Totais mensais das transpirações (mm mês⁻¹) somadas dos três exemplares de *Couratari Multiflora* obtidos entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

As medidas contínuas da transpiração durante o ano somam um grande volume de água que foi transferido para a atmosfera (Figura 37). Os três exemplares de *Couratari Multiflora* transpiraram juntos cerca de 23,7 toneladas. A planta menor (A185) foi responsável por 1,56 ton ano⁻¹, o exemplar intermediário (A187) transpirou, aproximadamente, 8,51 ton ano⁻¹, enquanto que a árvore A270 transpirou, aproximadamente, 13,6 ton ano⁻¹. Esses valores quantificam a importância da vegetação no ciclo hidrológico das florestas tropicais, pela enorme capacidade de reposição de umidade à atmosfera.

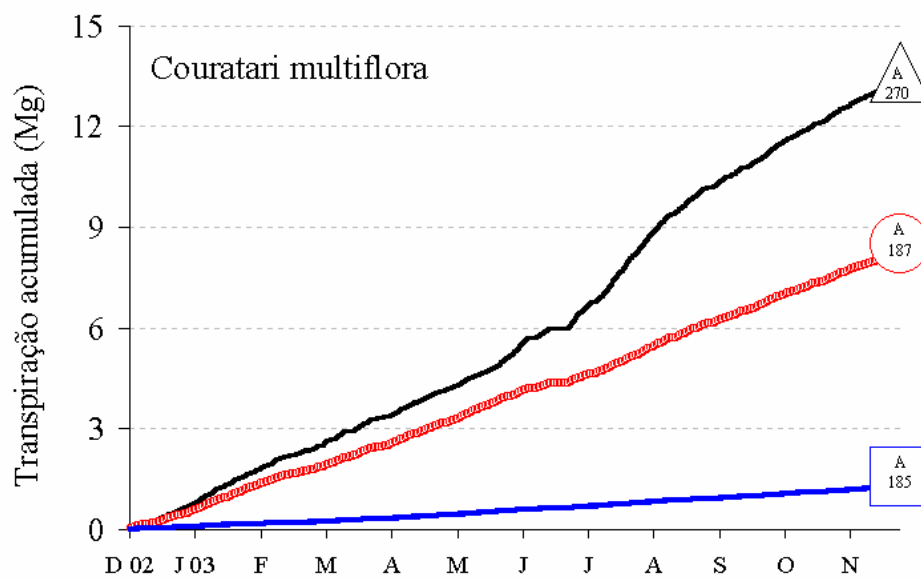


Figura 37. Valores acumulados das transpirações (Mg) para cada planta de *Couratari Multiflora* obtidos entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

Durante todo o ano analisado, uma grande quantidade de água foi transpirada pelo conjunto de *Couratari Multiflora* analisado, sendo observada apenas uma pequena variação sazonal. O período de maior transpiração foi devido ao aumento da disponibilidade de radiação solar e menor quantidade de chuva.

Houve diferença entre os totais transpirados pelos exemplares de *Couratari Multiflora*, significando que as características individuais de cada planta influenciam na transpiração. A proporção da transpiração, em relação ao total de chuva registrado, representou a importante função da vegetação no ciclo hidrológico da floresta tropical úmida.

4.3. A capacidade potencial transpiratória da FLONA de Caxiuanã, Pará

Durante o período de um ano, entre dezembro de 2002 e novembro de 2003, foram realizadas medidas de fluxo de seiva para se obter a transpiração de onze exemplares de grande porte na parcela de referência (*A*) e em doze árvores na parcela sob estresse hídrico (*B*). De posse desses dados reais, foi possível extrapolar as medidas para todas as árvores das parcelas, através da aplicação de um modelo numérico para estimar a capacidade de transpiração destas áreas da floresta tropical.

4.3.1. Medidas de transpiração em dois conjuntos de árvores nas parcelas experimentais do ESECAFLOR

As medidas da transpiração média das 11 árvores da parcela *A* somaram 159,6 mm com o valor máximo de 17,1 mm no mês de julho e o menor valor foi 8,2 mm, registrado em junho. Entretanto, esse valor foi influenciado por falhas durante alguns dias de medias em algumas árvores. As árvores monitoradas na parcela *A* acumularam uma transpiração de 75,7 mm, no período considerado chuvoso que foi de dezembro de 2002 a maio de 2003, representado cerca de 47,5% do total do ano. No período restante, considerado seco, de junho a novembro de 2003, o volume acumulado foi de 83,9 mm que representaram 52,5% do total.

Na parcela *B*, o total médio anual transpirado pelas doze árvores monitoradas foi de 190,8 mm. A média mensal foi de 15,9 mm, com máximo de 25,6 mm em agosto, e mínimo de 6,7 mm registrado em novembro, que também sofreu a influência das falhas nas coletas de dados em face aos problemas operacionais. Nos seis meses do período chuvoso, as árvores da parcela *B* transpiraram 92,9 mm que significaram 48,7% do total anual, enquanto que no semestre seco foram transpirados 97,9 mm, ou 51,3%.

As medidas realizadas nessas árvores mostraram uma transpiração maior das árvores da parcela *B* mesmo submetida à exclusão de parte da chuva. Isso se deve às características físicas dessas árvores, descritas na Tabela 1 principalmente a altura média total das árvores (14,5 e 18,1 m em *A* e *B*, respectivamente) e área basal média de 0,124 m² em *A* e 0,220 m² em *B*, porém, isso não é observado quando se considera a parcela integralmente. Aplicando-se a relação da transpiração, dividida pela área basal (Tr/AB), em média, as onze árvores da parcela *A* transpiraram até 1.287,1 mm ano⁻¹, já as doze árvores da parcela *B* que estavam sob influência da exclusão de parte das chuvas, transpiraram até 867,3 mm ano⁻¹.

Também foram realizadas estimativas da transpiração com a aplicação de modelo numérico desses 11 exemplares na parcela *A* e 12 na parcela *B*, para comparação com os valores de transpiração medidos durante o mesmo período. Para uma melhor visualização são apresentados apenas os resultados obtidos para os primeiros dias do período de medidas, ou seja, de 1 a 13 de dezembro de 2002. Os totais diários somados das 11 árvores da parcela *A* (Figura 38a) indicam uma boa concordância entre as transpirações medidas e estimadas. Observou-se a grande variabilidade diária existente, mesmo em um curto período de dias. As transpirações somadas dessas 11 árvores atingiram nos cinco primeiros dias facilmente os 1.000 kg dia⁻¹. Tais variações são comuns em dias com grande disponibilidade de radiação solar e elevado déficit de pressão de vapor atmosférico. As transpirações também sofreram reduções com o aumento da nebulosidade e ocorrência de chuva, como nos dias 10 (8,2 mm), 11 (19,8 mm), 12 (22,0 mm) e dia 13 (8,0 mm), sendo que no dia 11 a precipitação ocorreu mais durante o período noturno. A radiação solar de ondas curtas no dia 11 foi de 14,7 MJ dia⁻¹, sendo de apenas 7,3 MJ dia⁻¹ no dia 10, de 12,4 MJ dia⁻¹ no dia 12 e de 15,9 MJ dia⁻¹ no dia 13. A ocorrência de precipitação durante o período de luz solar reduz a demanda atmosférica por umidade e, conseqüentemente, diminui a transpiração naquele dia, porém o maior conteúdo de água no solo é favorável à transpiração no dia seguinte à chuva. A correlação entre as transpirações (T_r) medidas e estimadas apresentou um excelente coeficiente de determinação com $R^2=0,89$ (Figura 38b), indicando o bom ajuste do modelo utilizado. Observou-se que as árvores da parcela *B* apresentam totais diários ligeiramente inferiores aos da parcela *A* nos primeiros dias analisados; entretanto, não apresentam reduções consideráveis nos dias com chuvas no período de 10 a 13 de dezembro (Figura 38c). O coeficiente de determinação obtido na parcela *B* ($R^2=0,85$) também mostrou ótima concordância entre os valores medidos e os estimados nesse período (Figura 38d).

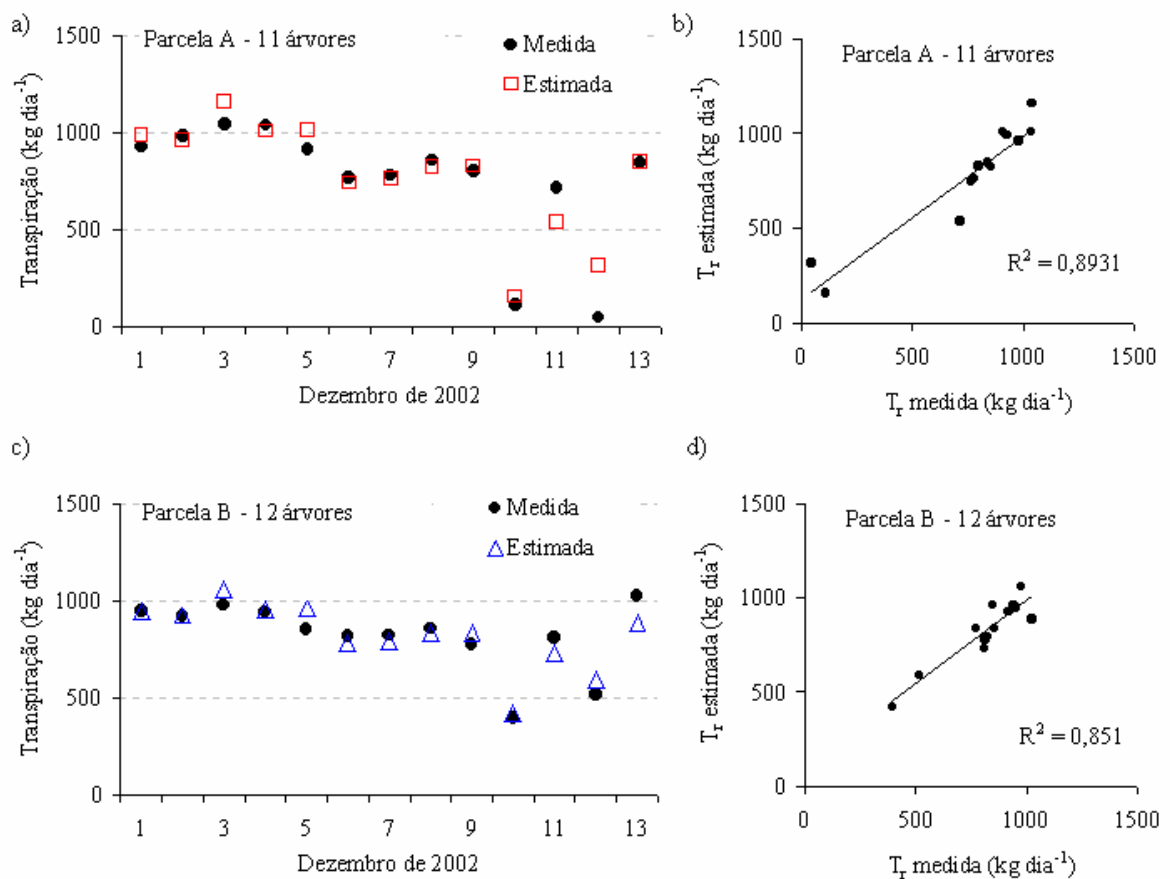


Figura 38. Transpirações medidas e estimadas (T_r , $kg\ dia^{-1}$) em 11 e 12 árvores nas parcelas *A* e *B* do ESECAFLOR, respectivamente, durante o período de 1 a 13 de dezembro de 2002, e suas correlações lineares

4.3.2. Estimativas da transpiração da vegetação na FLONA de Caxiuanã, Pará

Para a estimativa da transpiração de todas as árvores com DAP > 0,1 m, foi utilizado um modelo numérico composto por equações obtidas em regressões lineares realizadas com as medidas de fluxo de seiva em algumas árvores, descrito na Equação 5, utilizando-se os seguintes coeficientes: $\varphi=0,6503$; $\eta=-1,5651$; $\alpha=446,77$; $\beta=34,619$ para a parcela *A*, e $\varphi=0,01$; $\eta=-0,9724$; $\alpha=447,07$; $\beta=-0,731$ para a parcela *B*. Posteriormente, as transpirações estimadas em cada uma das árvores foram somadas para se determinar o potencial de transpiração das duas parcelas experimentais.

A integração de todas as transpirações diárias (Equação 6) obtidas pela aplicação do modelo, para as 524 árvores da parcela *A*, resultou em uma transpiração da parcela (T_p) de $1.228,3\ mm\ ano^{-1}$. Essa transpiração é correspondente ao período de um ano, cuja média foi de $102,4 \pm 12,3\ mm\ mês^{-1}$, representando cerca de 58,5% da precipitação pluvial (P) registrada

nesse mesmo período, que foi de 2.100,1 mm ano⁻¹. Desse total precipitado, 1.589,9 mm foram registrados no período chuvoso, que se estende de dezembro a maio, representando cerca de 75,7% do total anual. O restante do total precipitado (510,2 mm), que corresponde a 24,3%, foi obtido no período seco, entre junho e novembro. Assim sendo, a T_p de 669,5 mm representou 54,5% de P , no período seco, enquanto que os 558,8 mm estimados para a T_p significaram 45,5% de P no período chuvoso. Houve uma oscilação máxima de 35,9% nos valores mensais da T_p , que variam entre os maiores valores de 118,5 mm em agosto, 116,8 mm em outubro, e os menores valores de 75,9 mm em fevereiro, 89,5 mm em abril (Figura 39). Essa sazonalidade da transpiração estimada é explicada pela pouca variabilidade nos totais da radiação solar incidente na região equatorial. Na FLONA de Caxiuanã a radiação de ondas curtas acumulada foi de $ROC = 5.538,8 \text{ MJ ano}^{-1}$ neste mesmo período, sendo que cerca de 2.422,3 MJ (43,7%) foram acumulados no período chuvoso, enquanto que 3.116,5 MJ (56,3%) no período seco.

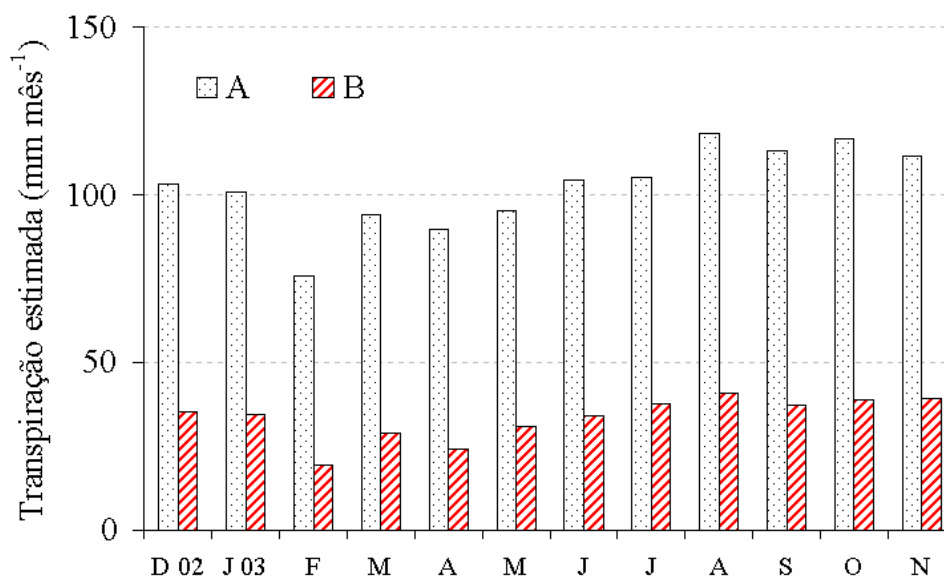


Figura 39. Transpirações mensais estimadas para todas as árvores das duas parcelas do ESECAFLO (mm mês⁻¹) entre dezembro de 2002 e novembro de 2003

Oliveira (2007), em seu estudo para a mesma região da FLONA de Caxiuanã, revelou que a precipitação efetiva (PE), ou seja, aquela chuva que realmente alcança a superfície somada a porção que escoou pelos troncos das árvores, representou 78,5% da P total incidente acima do dossel, enquanto que a precipitação interceptada (I) pela vegetação foi de 21,5% de P .

Considerando-se que tenha ocorrido uma interceptação da chuva da ordem de 21,5% nesse período de estudo, o volume de precipitação que efetivamente atingiria a superfície e estaria disponível para infiltrar no solo e ser absorvido pelas raízes, seria reduzido dos 2.100,1 mm para cerca de 1.648,5 mm. Isso faria com que a Tp na parcela *A* (1.228,3 mm) passasse a ter uma representatividade maior, passando dos 58,5% para cerca de 74,5% da *P*. A transpiração estimada para a FLONA de Caxiuana na parcela *A* (1.228,3 mm ano⁻¹) representou 76,4% da *ET* calculada de 1.608,6 mm ano⁻¹. Jimenez *et al.* (1996) realizaram um estudo nas florestas de Água Garcia nas montanhas de Tenerife, nas Ilhas Canárias, e mediram o fluxo de seiva em seis exemplares de *Laurus azorica* para determinar a transpiração durante um ano, entre junho de 1993 e maio de 1994. Os autores extrapolaram as medidas para toda a área, considerando hipoteticamente que todas as árvores seriam exemplares de *Laurus azorica*, e encontraram uma $Tp = 636$ mm, que representariam cerca de 65% da *ET* e 80% da *P*.

Quando o modelo numérico foi aplicado nas 499 árvores da parcela *B* do ESECAFLOR, e posteriormente as transpirações individuais integradas, obteve-se como resultado uma transpiração da parcela (Tp) de 401,0 mm ano⁻¹. Para o mesmo período a transpiração média foi de 33,4±6,5 mm mês⁻¹. A variação máxima entre as transpirações mensais foi de 52,5% estimada entre fevereiro (19,1 mm) e agosto (40,8 mm), para o mês de abril foi estimada uma Tp de 24,2 mm, enquanto que para novembro foi de 39,2 mm (Figura 39). Durante esse período a *P* registrada foi de 2.100,1 mm, com 75,7% no período chuvoso, e 24,3% obtidos no período seco. Assim sendo, na parcela *B* a Tp (401,0 mm ano⁻¹) representou 19,1% de *P* no ano, apesar da grande diferença entre os extremos de fevereiro e agosto, quando se consideram ambos os períodos, chuvoso e seco, há uma distribuição regular entre as duas estações do ano, com 173,0 mm (43,1%), estimados para o período de dezembro a maio, e 228,0 mm (56,9%) de junho a novembro, os percentuais da parcela *B* são ligeiramente diferentes daquelas obtidas na parcela *A* (Tabela 8). A Tp da parcela *B* representou cerca de 24,9% da *ET* calculada no período (1.608,6 mm ano⁻¹).

Como durante o período desse estudo a *P* foi medida no topo da torre acima da vegetação, e considerando-se uma interceptação da chuva de 21,5% conforme recomendado por Oliveira (2007), nesse período de estudo, o volume de precipitação que efetivamente atingiu a superfície e estaria disponível para infiltrar no solo e ser transpirado de volta à atmosfera seria reduzido dos 2.100,1 mm ano⁻¹ para cerca de 1.648,5 mm ano⁻¹. Isso faria com que a Tp na parcela *B* (401,0 mm ano⁻¹) tivesse uma maior participação, passando dos 19,1% para cerca de 24,3% da *P*. Em um estudo nas florestas de Água Garcia nas montanhas

de Tenerife, nas Ilhas Canárias, Jimenez *et al.* (1999) mediram o fluxo de seiva em seis exemplares de *Myrica faya* para determinar a transpiração durante o ano de 1995. Ao extrapolar as medidas para toda a área os autores consideraram que todas as árvores seriam exemplares de *Myrica faya*, e encontraram uma $Tp = 294$ mm, representado cerca de 30% da ET e 47% da P , sendo que 34% da Tp seriam no inverno e 66% no verão (Tabela 8).

Tabela 8. Precipitação pluvial (P), transpiração estimada da parcela (Tp), e evapotranspiração potencial (ET) em diferentes estudos

Local	P		Tp		ET		Autor
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	(mm)	(%)	
Tenerife	795,0		636,0		978,5		Jimenez <i>et al.</i> 1996
Tenerife	625,5		294,0		980,0		Jimenez <i>et al.</i> 1999
Caxiuanã A	2.100,1		1.228,3		1.608,6		Este estudo
Caxiuanã B			401,0				

Local	Transpiração estimada da parcela (Tp)				Autor
	Inverno		Verão		
	(mm)	(%)	(mm)	(%)	
Tenerife	100,0	34,0	194,0	66,0	Jimenez <i>et al.</i> 1999
Caxiuanã A	558,8	45,5	669,5	54,5	Este estudo
Caxiuanã B	173,0	43,1	228,0	56,9	

A resposta da modelagem aplicada para a transpiração de todas as árvores com $DAP > 0,1$ m, em ambas as parcelas experimentais, indicou uma redução da transpiração na parcela B ($401,0 \text{ mm ano}^{-1}$) sob exclusão de parte das chuvas, para cerca de 32,6% da transpiração estimada para a parcela A ($1.228,3 \text{ mm ano}^{-1}$) em condições ambientais normais de suprimento hídrico às plantas. Esse resultado obtido através de modelagem está plenamente de acordo com aquele observado nas medidas realizadas nos exemplares de *E. Coriacea*, entre os anos de 2000 e 2003, quando a árvore (B381) da parcela B apresentou uma redução na transpiração para apenas 32,4% da transpiração medida na planta (A237) na parcela A. Como a árvore B381 apresentou claros sinais de acelerada senescência durante o período de restrição hídrica, pode-se considerar que, por analogia, as outras árvores sob as mesmas condições ambientais responderiam de maneira semelhante.

5. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Este trabalho proporcionou as seguintes conclusões:

1. As medidas realizadas no Experimento ESECAFLOR/LBA e as modelagens aplicadas, indicam que a vegetação na FLONA de Caxiuanã não resistirá aos efeitos provocados por estiagens caso estes períodos secos sejam estendidos demasiadamente, visto que houve reduções consideráveis nas transpirações das árvores sob restrição hídrica induzida, provocando sinais claros de senescência nos exemplares estudados, reduções que provavelmente influenciarão na formação de nebulosidade, e por conseguinte, no ciclo hidrológico regional.
2. Mesmo as árvores de grande porte das florestas tropicais que podem captar água em grandes volumes de solo são suscetíveis aos longos períodos de estiagem. A proporção da transpiração, em relação ao total de chuva registrado no período, representa uma importante função da floresta tropical úmida na manutenção do ciclo hidrológico e do clima.
3. Para os exemplares de *Eschweilera Coriacea* analisados, na parcela A que não foi submetido à limitação hídrica o exemplar A237 registrou aumento na transpiração nos dois períodos estudados, em dezembro de 2000 e janeiro de 2003, enquanto que o exemplar B381 localizado na parcela coberta, registrou redução na transpiração após o período de seca induzida.
4. Foram registradas reduções no conteúdo da água no solo na parcela B durante todo o período analisado. A menor disponibilidade de água às raízes reduziu a transpiração da árvore B381 (*Eschweilera Coriacea*) apesar da grande quantidade de energia fotossintética disponível. A redução de água afetou a capacidade de transporte de nutrientes para algumas árvores provocando reações como a senescência precoce e a derrubada atípica das folhas.
5. A transpiração dos três exemplares de *Couratari Multiflora*, monitorados de dezembro de 2002 a novembro de 2003, ocorreu durante o ano inteiro com pequenas variações devidas principalmente aos elementos climáticos, como maior déficit de pressão de vapor e maior

disponibilidade de radiação solar. Essa variação é considerada normal para a floresta tropical que não apresenta grandes diferenças sazonais. Houve diferença entre os totais transpirados por cada árvore, significando a importância das características individuais de cada exemplar, como diâmetro do tronco, altura total, área e exposição da copa aos raios solares.

6. As transpirações estimadas com modelos, utilizando os valores obtidos da radiação solar de ondas curtas incidente, da precipitação pluvial, e da área basal de cada árvore aplicados em 524 e 499 árvores nas parcelas *A* e *B*, respectivamente, alcançaram totais de 1.228,3 mm ano⁻¹ na parcela *A* e 401,0 mm ano⁻¹ na parcela *B*, os quais representaram 58,5% e 19,1% da precipitação registrada nas parcelas *A* e *B*, respectivamente, no período de dezembro de 2002 a novembro de 2003, significando uma redução para 32,6% da transpiração da parcela *B* em relação à parcela *A*. A transpiração estimada foi distribuída de forma regular durante o ano, sendo que aproximadamente 45,5% da *T_p* ocorreram no período de inverno (chuvoso) e 54,5% durante o verão (período seco) na parcela *A*, e 43,1% (verão) e 56,9% (inverno) na parcela *B*.

Sugere-se que também sejam realizadas medidas de fluxo de seiva em outros biomas amazônicos para que sejam conhecidos os potenciais da vegetação na reciclagem de água do solo para a atmosfera que influenciam no ciclo hidrológico e no clima.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Almeida, S.S.; Lisboa, P.L.B. e Silva, A.S.L. Diversidade florística de uma comunidade arbórea na Estação Científica Ferreira Penna, Caxiuanã, Pará. *Boletim Museu Paraense Emílio Goeldi, série botânica*, Belém, v.9, n.1, p.99-105, 1993.
- Angelocci, L.R. Estimativa da transpiração máxima de macieiras (*Malus* spp) em pomares pelo modelo de Penman-Monteith. *Tese de Livre-Docência - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, ESALQ/USP*. Piracicaba, SP. 103 p., 1996.
- Angelocci, L.R.; Marin, F.R.; Oliveira, R.F.; Righi, E.Z. Transpiration, leaf diffusive conductance, and atmospheric water demand relationship in an irrigated acid lime orchard. *Brazilian Journal of Plant Physiology*. v.16, n.1, p.53-64, 2004.
- Aragão, L.E.O.C.; Malhi, Y.; Roman-Cuesta, R.M.; Saatchi, S.; Anderson, L.O.; Shimabukuro, Y.E. Spatial patterns and fire response of recent Amazonian droughts. *Geophysical Research Letters*, v. 34, 2007.
- Avissar, R., Nobre, C.A. Preface to special issue on the Large-Scale Biosphere-Atmosphere Experiment in Amazonia (LBA). *Journal of Geophysical Research*, v.107, n. D20, 8034, 2002. doi:10.1029/2002JD002507.
- Azevedo, P.V.; Silva, B.B.; Silva, V.P.R. Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.58, p.241-254, 2003.
- Baker, J.M.; Nieber, J.L. An analysis of the steady-state heat balance method for measuring sap flow in plants. *Agricultural and Forest Meteorology*, v.48, p.93-109, 1989.
- Baker, J.M.; Van Bavel, C.H.M. Measurements of mass flow of water in stems of herbaceous plants. *Plant, Cell and Environment*, Oxford, v. 10, n. 6, p. 777-782, 1987.
- Barbosa, R.I.; Fearnside, P.M. As lições do fogo. *Ciência Hoje*, v.27, n.157, p.35-39, 2000.
- Behling, H.; Costa, M.L. Holocene environmental changes from the Rio Curua record in the Caxiuanã region, Eastern Amazon Basin. *Quaternary Research*, v.53, n.3, p.369-277, 2000.
- Bonato, C.M.; Rubin Filho, C.J.; Melges, E.; Santos, V.D. **Nutrição mineral de plantas**. UEM, Maringá, 1998, 60p.
- Brown, F.; Salimon, C. A Seca de 2005. A Reprise. *Jornal A Gazeta*, 29 de junho de 2007, Rio Branco, AC, n. 179/07, p.2, 2007.
- Campbell, N.A.; Reece, J.B. **Biology**. 6th edition, Benjamin Cummings Ed. San Francisco, CA. 1247 p. il. ISBN: 0805366245 / 0201750546, 2002.
- Casa, R.; Russell, G.; Lo Cascio, B. Estimation of evapotranspiration from a field of linseed in central Italy. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.104, n.1, p.289-301, 2000.
- Case, M. Climate change impacts in the Amazon: review of scientific literature (World Wildlife Fund – WWF). 8th Conference of the Parties to the Convention on Biological Diversity. Curitiba, 20-31 March, 2006.
- Čermák, J., Deml, M., Penka, M. A new method of sap flow rate determination in trees. *Biologia Plantarum* (Praha) n.15, p.171-178, 1973.

- Čermák, J.; Kučera, J.; Nadezhdina, N. Sap flow measurements with some thermodynamic methods, flow integration within trees and scaling up from sample trees to entire forest stands. *Trees-Structure Function*, Berlim, v.18, p.529–546, 2004.
- Čermák, J.; Kučera J. Scaling up transpiration data between trees, stands and watersheds. *Silva Carelica*. v.15, p.101–120, 1990.
- Čermák, J.; Nadezhdina, N. Transpiration of trees and forests under contrasting soil water conditions and its relation to tree architecture. 1st International Conference BIOHYDROLOGY 2006 - *Impact of biological factors on soil hydrology*. Prague, Czech Republic, September 2006.
- Čermák, J.; Ulehla J, Kučera J, Penka M. Sap flow rate and transpiration dynamics in the full-grown oak (*Quercus robur* L.) in floodplain forest exposed to seasonal floods as related to potential evapotranspiration and tree dimensions. *Biologia Plantarum (Praha)* n.24, p.446–460, 1982.
- Cienciala, E.; Kucera, J.; Malmer, A. Tree sap flow and stand transpiration of two *Acacia mangium* plantations in Sabah, Borneo. *Journal of Hydrology*. n.236, p.109–120, 2000.
- Coelho Filho, M.A.; Angelocci, L.R.; Rojas, J.S.D.; Campeche, L.F.S.M.; Folegatti, M.V. Relações entre transpiração máxima, área foliar e evapotranspiração de referência em pomar jovem de lima ácida ‘Tahiti’. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 12, n. 2, p. 265-274, 2004.
- Cohen, J.C.P. Mecanismo de propagação e estrutura das linhas de instabilidade da Amazônia. *Tese de Doutorado*. Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, 170 p. 1996.
- Cohen, J.C.P.; Beltrão, J.C.; Gandú, A.W.; Silva, R.R. Influência do desmatamento sobre o ciclo hidrológico na Amazônia. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p.36-39, 2007.
- Cohen, J.C.P.; Dias, M.A.F.S.; Nobre, C.A. Environmental conditions associated with Amazonian squall lines: A case study. *Monthly Weather Review*, v. 123, n.11, p. 3163-3174, 1995.
- Correia, F.W.S.; Manzi, A.O.; Cândido, L.A.; Santos, R.M.N.; Pauliquevis, T. Balanço de umidade na Amazônia e sua sensibilidade. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p.39-43, 2007.
- Cox, P.M.; R.A. Betts; C.D. Jones; S.A. Spall; I.J. Totterdell. Acceleration of Global Warming Due to Carbon-Cycle Feedbacks in a Coupled Climate Model. *Nature*, n.408, p.184-187, 2000.
- Crafts, A.S.; Currier, H.B.; Stocking, C.R. Water in the Physiology of Plants. *Chronica Botanica*, Waltham, p.168-172, 1949.
- Davidson, E.A.; Ishida, F.Y.; Napstad, D.C. Effects of an experimental drought on soil emissions of carbon dioxide, methane, nitrous oxide, and nitric oxide in a moist tropical forest. *Global Change Biology*, v.10, p.718-730, 2004.
- Dias, M.C.V.; Nepstad, D.C.; Mendonça, M.J.C.; Motta, R.; Alencar, A.; Gomes J.C.; Ortiz, R.A. O preço oculto do fogo na Amazônia: Os custos econômicos associados as queimadas e incêndios florestais. *Relatório Instituto de Pesquisa Ambiental da Amazônia (IPAM) / Instituto de Pesquisa Econômica Aplicada (IPEA) / Centro de Pesquisa Woods Hole*. Belem, PA, 45p., il., 2002.
- Dixon, H.H. The convection of heat and materials in the stem of a tree. *Notes Botanic School Trinity College*, Dublin, n.4, p.269-278, 1937.

- Dixon, H.H.; Joly, J. The path of the transpiration-current. *Annals of Botany*, n.9, p.403-420, 1895.
- Eltahir, R.A.B.; Bras, R.L. Precipitation recycling in the Amazon basin. *Quarterly Journal of The Royal Meteorological Society*, v.120, n.518, p.861-880, 1994.
- Ferreira da Costa, R.; Costa, A.C.L.; Meir P.; Malhi, Y; Fisher, R.A.; Braga, A.P.; Oliveira, P.J.; Silva Junior, J.A.; Gonçalves, P.H.L.; Costa, J.M.N.; Lobo do Vale, R.; Sotta, E.D.; Cohen, J.C.; Ruivo, M.L.P.; Silva, R.B.C.; Andrade, V.M.S.; Grace, J. Projeto LBA/Esecaflor em Caxiuanã: Características, Atividades e Resultados. *Seminário da Estação Científica Ferreira Penna - Dez Anos de Pesquisa na Amazônia*. Belém, Pará, 2003b. http://www.museu-goeldi.br/sobre/Eventos/CCTE_006.pdf Acessado em 14.8.2005.
- Ferreira da Costa, R.; Feitosa, J.R.P.; Fisch, G.; Souza, S.S.; Nobre, C.A. Variabilidade diária da precipitação em regiões de floresta e pastagem na Amazônia. *Acta Amazônica*, v.28, n.4, p.395-408, 1998.
- Ferreira da Costa, R.; Fluxos de dióxido de carbono em uma área de floresta na Amazônia Central. *Dissertação de Mestrado em Física do Ambiente Agrícola*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, ESALQ/USP. Piracicaba, SP, 2000, 97p. il. <http://143.107.213.59:4500/ALEPH/POR/ESA/ESA/TESESA/FIND-ACC/0181125>
- Ferreira da Costa, R.; Meir, P.; Oliveira, P.J.; Malhi, Y.; Costa, A.C.L.; Costa, J.M.N.; Silva, R.B.C.; Andrade, V.M.S.; Braga, A.P.; Gonçalves, P.H.L. E Silva Junior, J.A. Transporte de Seiva em Espécies Vegetais de um Ecossistema de Manguezal - Bragança, Pará, Brasil. *Mangrove 2003 - Articulando pesquisa e gestão participativa de estuários e manguezais*. Salvador, Bahia, p.175, 2003a.
- Ferreira da Costa, R.; Silva, V.P.R.; Ruivo, M.L.P.; Meir P.; Costa, A.C.L.; Malhi, Y; Braga, A.P.; Gonçalves, P.H.L.; Silva Junior, J.A.; Grace, J. Transpiração em espécie de grande porte na Floresta Nacional de Caxiuanã, Pará. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*. Campina Grande, PB, DEAg/UFCG v.11, n.2, p.180-189, 2007 <http://www.agriambi.com.br>.
- Figueroa, S.N. e Nobre, C.A. Precipitations distribution over central and western tropical south América. *Climanálise*. Boletim de monitoramento e análise climática, v.5, n.6, p. 36-48, 1990.
- Fisch, G.; Marengo, J.A.; Nobre, C.A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 28, n. 2, p. 101–126, 1998.
- Fisher, R.A. Interactions between climate patterns, soil moisture, tree hydraulics and carbon uptake in a rainforest area vulnerable to climate change. *Report of fieldwork supported by Natural Resources International Foundation Research Grant. School of GeoScience, Univeristy of Edinburgh, UK*. Edinburgh, p1-5, 2003.
- Fisher, R.A. Understanding the response of rain forest to drought stress. *PhD. Thesis, University of Edinburgh, School of Geosciences, Edinburgh, Scotland, UK*, 195 p, 2005.
- Franken, W.; Leopoldo, P.R.; Matsui, E.; Ribeiro, M.N.G. Estudo da interceptação da água da chuva em cobertura florestal Amazônica do tipo terra firme. *Acta Amazônica*, v.12, n.2, p.327-331, 1982a.
- Franken, W.; Leopoldo, P.R.; Matsui, E.; Ribeiro, M.N.G. Interceptações das precipitações em floresta Amazônica de terra firme. *Acta Amazônica*, v.12, Suplemento, p.15-22, 1982b.

- Gash, J.H.C.; Huntingford, C.; Marengo, J.A.; Betts, R.A.; Cox, P.M.; Fisch, G.; Fu, R.; Gandu, A.W.; Harris, P.P.; Machado, L.A.T.; von Randow, C.; Silva Dias, M.A.F. Amazonian climate: results and future research. *Theoretical and Applied Climatology*, 78, 187–193, 2004.
- Grace, J., Lloyd, J., McIntire, J., Miranda, A., Meir, P., Miranda, H., Carbon dioxide flux over Amazon. rainforest in Rondonia. *Amazonian deforestation and climate*. (Eds.) Gash, J.H.C.; Nobre, C.A.; Roberts, J.M.; Victoria, R.L. Chichester, John Wiley & Sons, p.307-317, 1996.
- Granier, A. Mesure du flux de sève brute dans le tronc du Douglas par une nouvelle méthode thermique. *Annales des Sciences Forestières*, v.44, n.1, p.1-14, 1987.
- Granier, A. Une nouvelle méthode pour la mesure du flux de sève brute dans le tronc des arbres. *Annales des Sciences Forestières*, v.42, n.2, p.193-200, 1985.
- Gutiérrez, M.V.; Harrington, R.A.; Meinzer, F.C.; Fownes, J.C. The effect of environmentally induced stem temperature gradients on transpiration estimates from the heat balance method in two tropical woody species. *Tree Physiology*, Victoria, v. 14, p. 179-190, 1994.
- Hamon, W. R. Estimating potential evapotranspiration. *Journal of Hydraulics Division ASCE*, Nova Iorque, v.87, n.HY3, p107-120, 1961.
- Hoyois P., Scheuren J-M., Below R., Guha-Sapir D. Annual Disaster Statistical Review: Numbers and Trends 2006, CRED: Brussels. n. 231, 54 p., 2007. <http://www.cred.be/>
- Huber, B. Beobachtung und Messung pflanzlicher Saftströme. *Berichte Deutsche Botanische Gesellschaft*, n.50, p.89-109, 1932.
- Huber, B.; Schmidt, E. Eine Kompensationsmethode zur thermoelektrischen Messung langsamer Saftströme. *Berichte Deutsche Botanische Gesellschaft*, n.55, p.514-529, 1937.
- IBAMA - Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, Diretoria de Florestas Nacionais – DIREF, 2004, www.ibama.gov.br, acessado em 31/01/2007.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Estimativas das populações residentes, segundo os municípios. 119p., 2006. http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/populacao/estimativa2006/POP_2006_DOU.pdf Acessado em 13.4.2007.
- INPE - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais. Projeto PRODES monitoramento da floresta Amazônica brasileira por satélite, 2007. <http://www.obt.inpe.br/prodes/index.html> Acessado em 25.5.2007.
- Jiménez, M.S.; Cermák, J.; Kucera, J.; Morales, D. Laurel forests in Tenerife, Canary Island: the annual course of sap flow in *Laurus* trees and stand. *Journal of Hydrology*, n.183, p.307–321, 1996.
- Jiménez, M.S.; Morales, D.; Kucera, J.; Cermák, J.; The annual course of transpiration in a laurel forest of Tenerife. Estimation with *Myrica faya*. *Phyton*, Horn, v.39, n.4, p.85-90, 1999.
- Johnson, P. Total Midyear Population for the World: 1950-2050. U.S. *Census Bureau, Population Division, International Programs Center*, 2006. <http://www.census.gov/ipc/www/world.html> Acessado em 5.9.2006.

- Kern, D.C. e Costa, M.L. Os solos antrópicos. In: P.L.B. Lisboa (org.). *Caxiuanã*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém Pará, p. 105-119, 1997.
- Köstner, B. Evaporation and transpiration from forests in Central Europe - relevance of patch-level studies for spatial scaling. *Meteorology and Atmospheric Physics*, Viena, v.76, p.69-82, 2001.
- Kučera, J. Sap Flow Meter – P4.1, *Environmental measuring systems Instruction manual*. Brno: EMSBRNO, 1998. v.1. 20p.
- Larcher, W. **Ecofisiologia vegetal**. RiMa, São Paulo, 531p. 2000.
- Lisboa, P.L.B. **Caxiuanã**. *Museu Paraense Emílio Goeldi*. Belém, Pará, Brasil. 1997. 446p.
- Malhi, Y., Nobre, A.D., Grace, J., Kruijt, B., Pereira, M.G.P., Culf, A.D.; Steve, S. Carbon dioxide transfer over a Central Amazonian rain forest. *Journal of Geophysical Research*, v.103, n.D24, p.31593-31612, 1998.
- Malhi, Y.; Meir, P.; Brown, S. Forests, carbon and global climate. *Philosophical Transactions of the Royal Society*, London. v.360, n.1797, p.1567-1591, 2002.
- Marengo, J.A. Interannual variability of surface climate in the Amazon basin. *International Journal of Climatology*, v.12, p.853-863, 1992.
- Marengo, J.A.; Alves, L.M.; Valverde, M.C.; Laborbe, R.; Rocha, R.P. Eventos extremos em cenários regionalizados de clima no Brasil e América do Sul para o Século XXI: Projeções de clima futuro usando três modelos regionais. Relatório 5. *Mudanças Climáticas Globais e Efeitos sobre a Biodiversidade*. Ministério do Meio Ambiente - MMA, Secretaria de Biodiversidade e Florestas – SBF, Diretoria de Conservação da Biodiversidade – DCBio, São Paulo, SP, 77 p, 2007.
- Marin, F.R. Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado. *Tese de Doutorado*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo - ESALQ/USP, Piracicaba, SP, 118 p, 2003.
- Marin, F.R.; Angelocci, L.R.; Antonio Roberto Pereira, A.R.; Villa Nova, N.A.; Sentelhas, P.C. Sap flow and evapotranspiration in an irrigated citrus orchard. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n. 2, p. 219-226, 2001.
- Marin, F.R.; Ribeiro, R.V.; Angelocci, L.R.; Righi, E.Z. Fluxo de seiva pelo método do balanço de calor: base teórica, qualidade das medidas e aspectos práticos. *Bragantia* (no prelo) 2007.
- Marques, J. A transferência horizontal de vapor d'água na troposfera e a hidrologia da bacia Amazônica. *Tese de Doutorado*. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - ESALQ / USP. Piracicaba, 1978.
- Marques, J., Salati, E., Santos, J.M. Cálculo da evapotranspiração real na Bacia Amazônica através do método aerológico. *Acta Amazônica*, v.10, n.2, p. 357-361, 1980.
- Marques, J.; Santos, J.M. ; Salati, E. O armazenamento atmosférico de vapor d'água sobre a Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 9, n.4, p.715-721, 1979b.
- Marques, J.; Santos, J.M. ; Salati, E. O campo do fluxo de vapor d'água atmosférico sobre a Amazônia. *Acta Amazônica*, v. 9, n. 4, p.701-713, 1979a.
- Marshall, D.C. Measurement of sap flow in conifers by heat transport. *Plant Physiology*. v.33, n.6, p.385-396, 1958.

- MCT - Ministério da Ciência e Tecnologia. Primeiro Inventário Brasileiro de Emissões de Gases de Efeito Estufa. Brasília, DF, 2002.
- Meggers, B.J. Archeological evidence for the impact of mega-El Niño events on Amazonia during the past two millennia. *Climatic Change*, n.28, p.321–328, 1994a.
- Meggers, B.J. Pre-Columbian Amazonia. *Research Explore*, v.10, n.4, p.399-421, 1994b.
- Meinzer, F.C.; Andrade, J.L.; Goldstein, G.; Holbrook, N.M.; Cavelier, J.; Jackson, P. Control of transpiration from the upper canopy of a tropical forest: the role stomatal, boundary layer and hydraulic architecture components. *Plant, Cell and Environment*. Oxford, v.20, p.1242-1252, 1997.
- Meinzer, F.C.; Goldstein, G.; Franco, A. C.; Bustamante, M.; Iglar, E.; Jackson, P.; Caldas, L.; Rundel, P. W. Atmospheric and hydraulic limitations on transpiration in Brazilian cerrado woody species. *Functional Ecology*. v13, p.273-282, 1999.
- Meir, P.; Costa, A.C.L.; Ferreira da Costa, R.; Malhi, Y.; Ruivo, M.L.P. Drought-sensitivity in the E. Amazon. II-ISC-LBA–2nd *International Scientific Conference of Large Scale Biosphere Atmosphere Experiment in Amazônia* (LBA), Manaus, AM, July 07-10th 2002. <http://lba.cptec.inpe.br/abstracts/Manaus2002/submitted-abstracts-Manaus-July2002.pdf>
- Meir, P.; Costa, A.C.L. ; Ferreira da Costa, R.; Silva Júnior, J.A.; Ruivo, M.L.P.; Costa, J.M.N.; Malhi, Y.; Grace, J.; Sotta, E.D.; Vale, R.L. Effects of experimental drought on carbon cycling in an eastern Amazonia. In: 7th LBA-ECO Science Team Business Meeting. *Results of Ecological Studies of The Large Scale Biosphere-Atmosphere Experiment In Amazonia* (LBA), Fortaleza, 2003.
- Mendoza, E.R.H. Susceptibilidade da floresta primária ao fogo em 1998 e 1999: estudo de caso no Acre, Amazônia Sul-Occidental, Brasil. *Dissertação de Mestrado em Ecologia e Manejo de Recursos Naturais*. Universidade Federal do Acre - UFAC, Rio Branco, AC, 41 p. il., 2002.
- Meyer, B.; Anderson, D.; Bohning, R. **Introdução à Fisiologia Vegetal**. 2ª edição. Lisboa, Fundação Calouste Gulbenkian, 710 p. 1973.
- Molion, L.C.B. Amazônia rainfall and its variability. In: Bonell, M. Hufschmidt, M.M.; Gladwell, J.S. (eds). *Hydrology and water management the humid tropics. International Hydrology Series*, Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido, p. 99-111, 1993.
- Molion, L.C.B. Climatologia dinâmica da região Amazônica: Mecanismos de precipitação *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.2, n.1, p. 107-117, 1987.
- Molion, L.C.B.; Dallarosa, R.L.G. Pluviometria da Amazônia: São os dados confiáveis? *Climanálise – Boletim de Monitoramento e análise climática*, v.5, n.3, p. 40-42, 1990.
- Möller, M.; Tanny, J.; Li, Y.; Cohen, S. Measuring and predicting evapotranspiration in an insect-proof screenhouse. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.127, p.35–51, 2004.
- Moraes, J.C.; Costa, J.P.R.; Rocha, E.J.P.; Silva, I.M.O. Estudos hidrometeorológicos na bacia do rio Caxiuanã. In: Lisboa, P. L. B. (org). *Caxiuanã*. Museu Paraense Emílio Goeldi, Belém, p.85-95, 1997.
- Nadezhdina N, Čermák, J.; Nadezhdin V. Heat field deformation method for sap flow measurements. In: Cermak J, Nadezhdina N, eds. *Measuring sap flow in intact plants*.

- Proceedings of the 4th International Workshop, Zidlochovice, Czech Republic, IUFRO Publications. Brno, Czech Republic: Publishing House of Mendel University, p.72–92, 1998.
- Nadezhdina N.; Čermák, J. Instrumental methods for studies of structure and function of root systems of large trees. *Journal of Experimental Botany*, v. 54, n. 387, p.1511-1521, 2003.
- Nadezhdina N.; Čermák, J. The technique and instrumentation for estimation the sap flow rate in plants. Patent No.286438 (PV-1587–98), 1998.
- Nadezhdina N.; Čermák, J.; Ceulemans, R. Radial pattern of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors. *Tree Physiology*. n.22, p.907–918, 2002.
- Nadezhdina N; Tributsch, H.; Čermák, J. Infra-red images of heat field around a linear heater and sap flow in stems of lime trees under natural and experimental conditions. *Annals Forest Science*. n. 61, p. 203–213, 2004.
- Naves-Barbiero, C.C.; Franco, A.C.; Bucci, S.J.; Goldstein, G. Fluxo de seiva e condutância estomática de duas espécies Lenhosas sempre-verdes no campo sujo e cerradão. *Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal*, Lavras, v.12, n.2, p.119-134, 2000.
- Nepstad, D.C., *et al.* The effects of partial throughfall exclusion on canopy processes, aboveground production, and biogeochemistry of an Amazon forest, *Journal of Geophysical Research*, v. 107, n.D20, 8085, 2002.
- Nepstad, D.C.; Moreira, A.G.; Alencar, A.A. **A floresta em chamas: Origens, impactos e prevenção de fogo na Amazônia.** Programa Piloto para a Proteção das florestas tropicais do Brasil - PPG7, Brasília, DF, 202p., 1999a.
- Nepstad, D.C.; Veríssimo, A.; Alencar, A.A.; Nobre, C.; Lima, E.; Lefebvre, P.; Schlesinger, P.; Potter, C.; Moutinho, P.; Mendoza, E.; Cochrane, M.; Broos, V. Large-Scale impoverishment of Amazonian forest by logging and fire. *Nature*, n.398, p.505-508, 1999b.
- Netto, J.A.; Azevedo, P.V.; Silva, B.B.; Soares, J.M.; Teixeira, A.H.C. Exigências hídricas da videira na região do submédio São Francisco. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, Brasília, v.35, n.8, p.1559-1566, 2000.
- Nicolasa, E.; Torrecillasa, A.; Ortuno, M.F.; Domingo, R.; Alarcón, J.J. Evaluation of transpiration in adult apricot trees from sap flow measurements. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.72, p.131-145, 2005.
- Nijssen, B.; O'Donnell, G.M.; Hamlet, A.F.; Lettenmaier, D.P. Hydrologic sensitivity of global rivers to climate change. *Climate Change*. v.50, n.1-2, p.143–175, 2001.
- Nobre, C.A. Amazônia: fonte ou sumidouro de carbono? *Causas e dinâmica do desmatamento na Amazônia*. Ministério do Meio Ambiente, p.197-224, 2001.
- Nobre, C.A.; Sampaio, G.; Salazar, L. Mudanças climáticas e Amazônia. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p.22-27, 2007.
- Nobre, C.A.; Sellers, P.J.; Shukla, J. Amazonian deforestation and regional change. *Journal of Climate*, v.4, p.957-988, 1991.
- Nobre, P.; Shukla, J. Variations of sea surface temperature, wind stress, and rainfall over the tropical Atlantic and south America. *Journal of Climate*, vol. 9, p. 2464-2479, 1996.

- Oliveira, L.L. Avaliação da interceptação da precipitação pela vegetação na floresta nacional de Caxiuanã, Pará. *Dissertação de Mestrado em Meteorologia*. Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, PB. 123p.il., 2007.
- Orgaz, F.; Fernández, M.D.; Bonachela, S.; Gallardo, M.; Fereres, E. Evapotranspiration of horticultural crops in an unheated plastic greenhouse. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.72, p.81-96, 2005.
- Pauliquevis, T.; Artaxo, P.; Oliveira, P.H. O papel das partículas de aerossol no funcionamento do ecossistema amazônico. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p.48-50, 2007.
- Pereira, A.R.; Angelocci, L.R.; Sentelhas, P.C. Agrometeorologia: Fundamentos e aplicações práticas. Editora Agropecuária, Guaíba, RS, 478p., 2002. ISBN: 85-85347-71-6.
- Piperno, D.R.; Becker, P. Vegetational history of a site in the Central Amazon Basin derived from phytolith and charcoal records from natural soils. *Quaternary Research*, n.45, p.202–209, 1996.
- Ribeiro, J.B.M.; Rocha, E.J.P.; Ferreira, M.A.V.; Santos, D.M.. Contrastes micrometeorológicos clareira /floresta em Urucu-AM. II Workshop da Rede CT-PETRO, Manaus, 2006.
- Ruivo, M.L.P.; Barreiros, J.A.P.; Bonaldo, A.B.; Silva, R.M.; Sá, L.D.A.; Lopes, E.L.N. LBA ESECAFLOR Artificially Induced drought in Caxiuanã Reserve, Eastern Amazonia. Soil Properties and Litter Spider Fauna. *Earth Interactions*, v. 11, n .8, p. 1-13, 2007.
- Ruivo, M.L.P.; Cunha, E. S. Mineral and organic components in archaeological black earth and yellow latosol in Caxiuanã, Amazon, Brazil. *Ecosystems and Sustainable Development IV*, (Eds.) E. Tiezzi, C. A. Brebbia, and J. L. Usó, v. 2, WitPress, 1113–1121, 2003.
- Ruivo, M.L.P.; Pereira, S. B.; Bussetti, E.P.C.; Ferreira da Costa, R.; Quanz, B.; Nagaishi, T.Y.; Oliveira, P.J.; Meir, P.; Malhi, Y.; Costa, A.C.L. Propriedades do Solo e Fluxos de CO₂ em Caxiuanã, Pará: Experimento LBA-ESECAFLOR. *Contribuições a Geologia da Amazônia (CGA-3)*, Sociedade Brasileira de Geologia, Belém, v.3, p.291-299, 2002. ISBN: 95-88692-02-3.
- Sakuratani, T. A heat balance method for measuring water sap flow in the stem of intact plant. *Journal of Agricultural Meteorology*, Tokyo, v. 39, n. 1, p. 9-17, 1981.
- Salati, E.; Dall'Olio, A.; Matsui, E.; Gat, J.R. Recycling of water in the Amazon basin: an isotopic study. *Water Resource Research*, v.15, n. 5, p.1250-1258, 1979.
- Salati, E.; Vose, P. B. Amazon Basin: a system in equilibrium. *Science*, v. 225, n. 4658, p. 129-138, 1984.
- Salisbury, F.; Ross, C. **Plant Physiology**. 4th edition. Belmont: Wasworth, Inc., p.103-115, ISBN: 0534151620, 1992.
- Sammis, T.W.; Mexal, J.G.; Miller, D. Evapotranspiration of flood-irrigated pecans. *Agricultural Water Management*, Amsterdam, v.69, p.179–190, 2004.
- Sanford, R.L. Jr; Saldarriaga, J.; Clark, K.E.; Uhl, C.; Herrera, R. Amazon rain – forest fires. *Science*, n.227, p.53-55, 1985.
- Santos, A.O.; Adão, F.M.R.B.;Hernandez, J.L.; Orlando, T.G.S. Determinação do fluxo de seiva em videira através da técnica do pulso de calor. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. v. 13, n.2, p.262-272, 2005.

- Santos, G.M.; Gomes, P.R.S.; Anjos, R.M.; Cordeiro, B.J.; Sifeddine, A.; Tada, M.L.; Cresswell, R. G. Field LK 14c AMS dating of fires in the central Amazon rain forest. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research*, n.172, p.761-766, 2000.
- Shimabukuro, Y.E.; Krug, T.; Santos, J.R.; Novo, E.M.; Yi, J.L.R. Roraima o incêndio visto do espaço. *Ciência Hoje*, v.27, n.157, p.32 – 34, 2000.
- Shuttleworth, W.J.; Gash, J.H.C.; Lloyd, C.R. *et al.* Amazonian Evaporation. *Revista Brasileira de Meteorologia*, São Paulo, v.2, n.1, p.179-191, 1987.
- Silva Dias, M.A.F.; Rutledge, S.; Kabat, P.; Silva Dias, P.L.; Nobre, C.; Fisch, G.; Dolman, A.J.; Zipser, E.; Garstang, M.; Manzi, A. O.; Fuentes, J. D.; Rocha, H. R.; Marengo, J.; Plana-Fattori, A.; Sá, L.D.A.; Alvalá, R.C.S.; Andreae, M.O.; Artaxo, P.; Gielow, R.; Gatti, L. Clouds and rain processes in a biosphere atmosphere interaction context in the Amazon Region. *Journal of Geophysical Research*, v.107, D20, 8072, 2002. doi:10.1029/2001JD000335.
- Silva, A.S.L.; Almeida, S.S.; Rosário, C.S. Flórula fanerogâmica da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPN): Caracterização dos ecossistemas e lista preliminar de espécies. *Seminário de 10 anos de atividades da Estação Científica Ferreira Penna, Caxiuanã, Pará*. Belém, 2003. http://www.museu-goeldi.br/sobre/Eventos/CBO_007.pdf
- Silva, B.B.; Moura, M.S.B.; Azevedo, P.V.; Soares, J.M.. Medidas de transpiração de um pomar de goiabeiras pelo método do balanço de calor caulinar. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 19-27, 2002
- Silva, B.B.; Slack, D.C.; Kilby, M.W.; Hla, A.K. Measurements of water requirements of table grapes in Arizona (USA). *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.8, n.2, p.175-183, 2000.
- Smith, D.M.; Allen, S.J. Measurements of sap flow in plant stems. *Journal fo Experimental Botany*, Oxford, v.47, p.1833-1844, 1996.
- Sotta, E.D. Carbon Dioxide dynamics and Nitrogen cycling in an Eastern Amazonian Rainforest, Caxiuanã, Brazil. *PhD Tesis* in Soil Doctor of Forestry and Forest Ecology of Georg-August-University of Göttingen, Germany, 120 p. 2006.
- Souza Filho, J.D.C.; Ribeiro, A.; Costa, M.H.; Cohen, J.C.P. Mecanismos de controle da variação sazonal da transpiração de uma floresta tropical no nordeste da Amazônia. *Acta Amazônica*, Manaus, v.35; n.2; p.223-229; 2005.
- Souza, E.P.P. Relações entre as anomalias de TSM do Atlântico e Pacífico e as precipitações na Amazônia oriental. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, São José dos Campos, SP (INPE-11435 - TDI/955), 78p, 2003.
- Souza, J.R.S.; Rocha, E.J.P.; Cohen, J.C.P. **Avaliação dos impactos antropogênicos no ciclo da água na Amazônia**. Capítulo 4. *Problemática do uso local e global da água da Amazônia*. (Org) L.E. Aragon; E M. Clüsener-Godt. Brasília - DF: Edições UNESCO-Brasil, p. 69-94, 2003.
- Souza, P.F.S. Variabilidade espacial e temporal das componentes atmosféricas do ciclo hidrológico da Amazônia durante o experimento meteorológico GTE/ABLE-2b. *Dissertação de Mestrado*. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais INPE, São José dos Campos, SP (INPE-5281 - TDI/451), 82p, 1991.
- Steinberg, S.L.; Van Bavel, C.H.M.; Mcfarland, M.J. Improved sap flow gauge for woody and herbaceous plants. *Agronomy Journal*, Madison, v. 81, p. 851-854, 1990.

- Sternberg, H.O.R. Aggravation of floods in the Amazon River as a consequence of deforestation? *Geografiska Annaler*, série A, v. 69, n.1, p.201–219, 1987.
- Steudle, E. The cohesion-tension mechanism and the acquisition of water by plant roots. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* N.52, p.847-875, 2001.
- Steudle, E.; Paterson, C. A. How does water get through roots. *Journal of Experimental Botany*, 49:775-788, 1998.
- Taiz, L.; Zeiger, E. **Fisiologia vegetal**. 3ª edição. Porto Alegre, Artmed Ed., 719p. 2004.
- Tarara, J.M.; Ferguson, J.C. Two algorithms for variable power control of heat-balance sap flow gauges under high flow rates. *Agronomy Journal*, Madison, v.98, p.830-838, 2006.
- Taylor, M.R.; Campbell, N.A.; Reece, J.B. Student study guide for Biology. 6th edition, Benjamin Cummings Ed. San Francisco, CA. 532 p. il. ISBN: 0805366342, 2002.
- Testi, L.; Villalobos, F.J.; Orgaz, F. Evapotranspiration of a young irrigated olive orchard in southern Spain. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.121, p.1–18, 2004.
- Trejo-Chandia, J.E.; Angelocci, L.R.; Oliveira, R.F. Aplicação do método de balanço de calor na determinação da transpiração de mudas de limoeiro. *Scientia Agricola*, Piracicaba, v. 54, n. 3, p. 221-231, 1997.
- Uhl, C.; Kauffman, B. Deforestation, fire susceptibility, and potential tree responses to fire in the eastern Amazon. *Ecology*, n.7, v.2, p. 437– 449, 1990.
- Uhl, C.; Kauffman, B.; Cumings, D.L. Fire in the Venezuela Amazon 2: Environmental conditions necessary for forest fire in the evergreen rainforest of Venezuela. *Oikos*, n.53, p.176–184, 1988.
- Valancogne, C., Dayau, S., Pieri, P. Influence of orchard and vineyard characteristics on maximal plant transpiration. International Symposium Irrigation of Horticultural Crops. 3. Estoril, Portugal: Internatinal Society of Horticultural Science, *Acta Horticulturae*, n. 537, v.1, p.61-68, 2000.
- Valancogne, C.; Nasr, Z. A heat balance method for measuring sap flow in small trees. In: Orghetti, M.; Grace, J.; Raschi, A. (Eds.). *Water transport in plants under climatic stress*. Cambridge: Cambridge University Press. p.166-173, 1993.
- Van Bavel, C.H.M. Flow 32tm Installation and operation manual. Houston: Dynamax Inc., 1999, 178p.
- Viana, J.S.; Almeida, S.S.; Conceição, C.; Ferreira, E.; Alves, N.; Silva, R. Comparação estrutural e florística entre os ambientes de terra-firme e igapó do entorno da Estação Científica Ferreira Penna (ECFPn). Seminário da Estação Científica Ferreira Penna - Dez Anos de Pesquisa na Amazônia. Belém, Pará, 2003. http://www.museu-goeldi.br/sobre/Eventos/CBO_001.pdf
- Vieira, I.C.G.; Toledo, P.M.; Almeida, A. Análise das modificações da paisagem da região Bragantina, no Pará, integrando diferentes escalas de tempo. *Ciência e Cultura*, v.59, n.3, p.27-30, 2007.
- Villa Nova, N.A.; Salati, E.; Matsui, E. Estimativa da evapotranspiração na Bacia Amazônica. *Acta Amazônica*, Manaus, v.6, n.2, p.215-228, 1976.
- Villela, S. M.; Mattos, A. **Hidrologia Aplicada**. McGraw-Hill do Brasil, São Paulo, 245 p. 1975.

- Weibel, F.P.; de Vos, J.A. Transpiration measurements in apple trees: an improved stem balance heat method. *Plant and Soil*, v.166, p.203-217, 1994.
- Williams, D.G.; Cable, W.; Hultine, K. *et al.* Evapotranspiration components determined by stable isotope, sapflow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.125, p.241–258, 2004.