



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
MUSEU PARAENSE EMÍLIO GOELDI
EMBRAPA AMAZÔNIA ORIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS AMBIENTAIS-PPGCA**

LIVIA DA SILVA OLIVEIRA

**REFINAMENTO DA REPRESENTAÇÃO DE RAÍZES NO MODELO DE BIOSFERA
SiB2 EM ÁREA DE FLORESTA NA AMAZÔNIA**

**BELÉM
2008**

LIVIA DA SILVA OLIVEIRA

**REFINAMENTO DA REPRESENTAÇÃO DE RAÍZES NO MODELO DE BIOSFERA
SiB2 EM ÁREA DE FLORESTA NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA Amazônia Oriental, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais. Área de Concentração: Física do Clima.

Orientador: Prof. Dr. José Henrique Cattanio.
Co-Orientador: Prof. Dr. Luiz Antonio Candido.

Belém

2008

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação(CIP)

Biblioteca Geól. Rdº Montenegro G. de Montalvão

Oliveira, Livia da Silva

O48r Refinamento da representação de raízes no modelo de biosfera SiB2 em área de floresta na Amazônia. /. Livia da Silva Oliveira – 2008

66 f. : il.

Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Museu Emílio Goeldi e EMBRAPA, Belém, 2008.

Orientador, José Henrique Cattanio; Co-Orientador, Luiz Antonio Candido

1. Distribuição de raízes. 2. Modelo de biosfera. 3. SiB2. 4. Umidade do solo. 5. Floresta tropical. 6. Amazônia. I.Universidade Federal do Pará II. Cattanio, José Henrique, Orient. III. Candido, Luiz Antonio, Co-orient. IV. Título.

CDD 20º ed.:581.49809811

LIVIA DA SILVA OLIVEIRA

**REFINAMENTO DA REPRESENTAÇÃO DE RAÍZES NO MODELO DE BIOSFERA
SiB2 EM ÁREAS DE FLORESTA NA AMAZÔNIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará em convênio com Museu Paraense Emílio Goeldi e EMBRAPA Amazônia Oriental, como requisito parcial para a obtenção do grau de Mestre em Ciências Ambientais. Área de Concentração: Física do Clima.

Data da aprovação: _____ / _____ / _____

Conceito:

Banca Examinadora:

Prof. José Henrique Cattanio - Orientador
Doutor em Agronomia Tropical
Universidade Federal do Pará

Prof. Antonio Ocimar Manzi - Membro
Doutor em Ciências Atmosféricas
Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia

Profa. Maria Isabel Vitorino - Membro
Doutora em Meteorologia
Universidade Federal do Pará

Prof. Steel Vasconcelos - Membro
Doutor em Recursos e Conservação Florestais
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

*Aos meus pais
Raimundo Nonato (in memoriam) e Maria
José e ao meu filho José Henrique,*

Dedico

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus por seu infinito amor que produz em seus filhos a força para buscar novas conquistas, mesmo quando o caminho se mostra extremamente estreito;

Ao meu pai Raimundo Nonato R. de Oliveira (*in memoriam*) por todo amor que me dedicou durante sua passagem na Terra;

À minha mãe Maria José, por todo o amor e pela coragem de assumir o meu papel de mãe para que eu pudesse seguir nesta caminhada;

As minhas irmãs Nivea Maria e Lilian Francisca, pela maneira carinhosa que cuidaram do meu filho durante a minha temporada em Belém;

A José Wanderley, pelo incentivo, pelo companheirismo, pelas notícias de casa, pelas fotos do “Rique”;

Ao grupo GEOMA pelo apoio financeiro nos primeiros meses deste curso;

À FAPEAM pela concessão da bolsa de mestrado e pelo apoio aos estudantes amazonenses;

Ao meu orientador Dr. José Henrique Cattanio e co-orientador Dr. Luiz Antonio Candido por tudo de bom que foi acrescentado neste trabalho através de suas valiosas orientações;

Ao Dr. Antônio Manzi pela oportunidade de participar do grupo LBA, podendo assim dispor da infra-estrutura necessária para a realização deste projeto;

À minha grande amiga Eliete de Sousa, por toda paciência, carinho e dedicação que me ofereceu gratuitamente, e não há nada mais justo que assistir a filmes “chatos” e comer no Habib`s. Obrigada por existir e por ser minha amiga!

À minha amiga Daniela Barros, pela generosidade e pela amizade gratuita que me ofereceu desde o primeiro momento. Você é uma pessoa muito especial na minha vida!

Aos amigos Bruno, Cibelle, Crisalda, Daniel, Douglas, Gleyce e Nilzelle, pelos momentos sérios de estudo e também pelos momentos de descontração. Vocês são demais!

À Márcia Figueiredo, pela amizade e pelo carinho. Você foi uma das pessoas designadas por Deus para estar comigo em Belém. Muito obrigada por não ter recusado esta missão;

Ao Dr. Ricardo Figueiredo e aos seus filhos, por me receberem em sua casa;

Ao amigo Adnaldo Cabano, pelo apoio e incentivo;

À Fabiane e Harumi, pela amizade e pelo exemplo de força e determinação;

Aos meus amigos do grupo LBA , Ruth Araújo, Paulo Ricardo Teixeira, Joyce Santos, Fernando Cardoso, Theotônio Pauliquevis, Rubenildo Lima, Gerla Myrcea, Adriana Castro, Elisama Bezerra, Lucinete Pereira, Márcia Sousa, Shirley Pinheiro, Érica Laura Schloemp, por todo profissionalismo, disponibilidade e atenção que sempre encontrei em cada um de vocês;

A todos os funcionários da Escola Estadual Professora Diana Pinheiro pelo apoio e carinho dedicados a mim durante os dois anos de convivência.

A todos que contribuíram direta ou indiretamente para que eu pudesse vencer os desafios dessa jornada.

***A todos vocês os meus SINCEROS
AGRADECIMENTOS!!!!!!***

Ao meu Eterno Amor:

No dia 21 de junho de 2007, você foi chamado para a vida eterna...

O excelente marido, pai e avô, partiu, deixando muitas saudades e lembranças.

É imensurável a dor causada por tua ausência, mas sou confortada pela promessa do Senhor, que diz:

“Todos os que estão nos túmulos memoriais ouvirão a voz de Jesus e sairão”. (João 5: 28,29)

Então creio no reencontro, em poder abraçar-te novamente... Ouvir tua voz...

Pai, você sempre procurou semear bondade, foi perseverante e um grande guerreiro.

Não desanimou jamais, conquistou ideais, construiu uma família maravilhosa e deixou em seu caminho a marca da honestidade.

De repente, como as surpresas que a vida nos traz, a doença trouxe o sofrimento,

Que a cada momento era superado por sua imensa vontade de viver, mas ...

Enfim, chegou o dia que encerrou sua passagem na Terra, tivestes que partir para ocupar teu lugar no céu. Deus chamou meu Herói.

E agora, o que fazer? Onde te encontrar?

Estou te buscando nas coisas mais belas que deixastes: a família, as palavras proferidas por ti que ainda ecoam em meus ouvidos, nas lembranças dos momentos que estivemos juntos... Momentos que estarão para sempre em minha memória.

Estou te buscando dentro de mim mesma, na certeza de te encontrar em meu coração. Pois, a maior de tuas vitórias foi semear, no coração de todos que te conheceram, um amor infinito e inabalável!

“Ninguém morre enquanto permanece vivo no coração de alguém”.

Livia Oliveira

RESUMO

O objetivo desta pesquisa foi estudar a sensibilidade dos fluxos de superfície e hidrologia do solo em relação à representação e distribuição de raízes no modelo de biosfera para uma floresta de terra firme na Amazônia. A finalidade foi avaliar o impacto na representatividade dos fluxos de energia considerando a sazonalidade da região amazônica, usando como suporte medidas intensivas realizadas em uma reserva biológica (Reserva Biológica do Cuieiras, em Manaus). Foram realizadas oito simulações com o modelo de biosfera SiB2 ("Simple Biosphere Model" – versão 2) , onde cada simulação representou um cenário diferente de distribuição de raízes em uma profundidade de 4 m de solo, dividido em três camadas: 0,5 m, 1,5 m e 2,0 m. As raízes foram distribuídas privilegiando a concentração de raízes na camada superficial, em seguida, na camada intermediária e, por fim, uma concentração de raízes abaixo de 2,0 m de profundidade. As simulações foram realizadas para o período de 2003 a 2006, enfatizando o ano de 2005 para avaliar o efeito da representação de raízes nos fluxos de energia (calor latente – LE e calor sensível – H) e de dióxido de carbono (CO₂). A partir da análise integrada dos fluxos simulados com dados observacionais medidos no sítio experimental foi possível perceber que uma redução na precipitação no ano de 2005, apesar de ter sido menor na parte central da Amazônia, implicou na diminuição da umidade do solo, mostrando que a floresta passou por um período de estresse hídrico maior do que os outros anos analisados. O modelo representou a energia disponível com valores muito próximos aos observados, variando sazonalmente em concordância com os dados medidos em 2005. No entanto, LE é superestimado durante a estação chuvosa, mas mostra juntamente com o fluxo de CO₂, a redução com a umidade do solo na estação seca, enquanto H é superestimado em até 20 W m⁻² durante todo o período simulado. Estes resultados mostram que, a consideração de raízes rasas é mais apropriada para regiões que possuem estação seca curta, conforme se caracteriza a área de estudo, e raízes profundas devem favorecer a modelagem dos processos para superfície de áreas com estação seca mais pronunciada. Com isto os resultados revelam que há necessidade de obter mais informações de propriedades físicas do solo, apropriadas às condições da região, para que outros refinamentos sejam

efetivos na distinção do comportamento de florestas tropicais sob diferentes regimes de disponibilidade de água no solo.

Palavras-chave: Distribuição de raízes. Modelo de biosfera. SiB2. Umidade do solo. Floresta tropical. Amazônia.

ABSTRACT

The objective of this research was to study the sensitivity of the surface flows and soil hydrology in relation to the representation and distribution of roots in the biosfera model for upland forest in the "Amazônia". The purpose was to evaluate the impact on the representativeness of the energy surface flows, considering the Amazon region seasonality supported by intensive measures carried through in a biological reserve (Biological Reserve in "Cuieiras" River, near Manaus). Eight simulations were conducted with the model of biosphere SiB2 (Simple Biosphere Model - version 2), where each simulation scenario represented a different scenery of roots distribution in a 4.0 m depth, divided in three layers: 0.5 m , 1.5 m and 2.0 m. The roots were distributed favoring the root's concentration in the surface layer, after that, the intermediate layer and, finally, a concentration of roots below 2.0 m deep. The simulations were conducted for the period of 2003 to 2006, emphasizing the year of 2005 to evaluate the effect of the roots representation in the energy flows (latent heat - LE and sensitive heat - H) and carbon dioxide flow (F_{CO_2}). From the integrated analysis of simulated flows with observational data, measured in the experimental site, was possible to perceive that a reduction in the rainfall for the year of 2005, although to have been lesser in the central part of the Amazon, led the decline in soil moisture, showing that the forest passed for a considerable period of water stress. The model represented the available energy with values very close to those observed, varying seasonally in agreement with the data measured in 2005. However, LE is overestimated during the rainy season, but it shows together with the CO_2 flow, the reduction with soil moisture in the dry season period, while H is overestimated by 20 W.m^{-2} during all the simulated period. These results show that, apparently, the consideration of surface roots are more appropriate for regions with short dry season, as characterized the study area, and deep roots should promote the modeling of the processes of the surface areas with more pronounced dry season. With the results showing that it has necessity to get more information of soil physical properties, appropriate to the region conditions, so that other

refinements are effective in distinguishing the behavior of tropical forests under different regimes of water availability in the soil.

Key-words: Root distribution. Biosphere Model. SiB2. Soil moisture. Rainforest. Amazon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Imagem da área de estudo, Reserva Biológica do Cuieiras, do INPA (dentro do retângulo) de floresta tropical (Manaus-AM).....	22
Figura 2. Esquema representativo do sistema automático de aquisição dos dados AWS (Torre K34), montada na Reserva Biológica do Cuieiras, do INPA (Manaus-AM).....	24
Figura 3. Sonda de nêutrons utilizada para medir a umidade do solo nos pontos de coleta T1, T2 e T3 próximos à estação meteorológica K34, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	26
Figura 4. Esquema conceitual da parametrização “big leaf” dos processos de superfície utilizada no modelo SiB2.....	27
Figura 5. Esquema de transferência dos fluxos utilizado pelo modelo SiB2. Os fluxos são análogos ao fluxo de corrente elétrica em uma associação de resistores. Fonte: Modificado de Sellers <i>et al.</i> (1996).....	28
Figura 6. Distribuição vertical da fração de raízes segundo o modelo de <i>Arora e Boer</i> (2003).....	32
Figura 7. Esquema representativo da divisão de camadas do solo utilizado nas simulações com o modelo SiB2.....	35
Figura 8. Perfis verticais de distribuição e profundidade de raízes até a profundidade de 4 m resultantes da variação de biomassa do sistema radicular.....	35
Figura 9. Precipitação medida na estação meteorológica K34, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM), durante o ano de 2005.....	38
Figura 10. Água armazenada no solo durante as estações seca e chuvosa no ano	

de 2005, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	39
Figura 11. Variação de água do solo (em mm/dia) ao longo de um perfil de 5 m durante as estações seca e chuvosa no ano de 2005 na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM), com linhas de tendência (polinômio seco e polinômio chuvoso).....	40
Figura 12. Fluxo de calor latente representado em termos de evapotranspiração e interceptação, médias semanais, para o período de maio de 2005 a fevereiro de 2006 na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	41
Figura 13. Saldo de radiação (Rn), Fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e fluxo de CO ₂ , observados na estação meteorológica K34 (OBS) e simulados pelo modelo SiB2 no experimento Controle (Cont.), em médias mensais, para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	44
Figura 14. Fluxo de CO ₂ medido na estação meteorológica K34 (Observado, linha vermelha) e simulado pelo modelo SiB2 no experimento Controle (Controle, linha azul), em médias diárias, para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	45
Figura 15. Umidade do solo medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na primeira camada de solo (C1).....	48
Figura 16. Umidade do solo medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na segunda camada de solo (C2).....	49
Figura 17. Umidade do solo medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na terceira camada de solo (C3).....	50
Figura 18. Fluxo de calor latente (LE) medido na estação meteorológica K34 e fluxos de calor latente (LE) simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005.....	51

Figura 19. Fluxo de calor sensível (H) medido na estação meteorológica K34 e fluxos de calor sensível (H) simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005..... 51

Figura 20. Fluxo de CO₂ medido na estação meteorológica K34 e fluxos de CO₂ simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005..... 52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Variáveis meteorológicas medidas com seus respectivos instrumentos instalados na torre do km 34, localizada na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).....	25
Tabela 2. Fluxos de calor sensível (H), latente (LE) e CO ₂ calculados em trajetórias especificadas com uma diferença de potencial e uma resistência determinada.....	29
Tabela 3. Frações de raízes para cada camada do solo do modelo SiB2 calculadas pelo modelo exponencial descrito pela equação (7).....	36
Tabela 4. Resultados estatísticos das simulações de umidade do solo para a Reserva Biológica do Cuieiras (Ano 2005).....	47
Tabela 5. Parâmetros variantes e invariantes no tempo utilizados no SiB2.....	61

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	16
2	OBJETIVOS	21
2.1	GERAL.....	21
2.2	ESPECÍFICOS.....	21
3	MATERIAL E MÉTODOS	22
3.1	ÁREA EXPERIMENTAL.....	22
3.2	INSTRUMENTOS E MEDIDAS.....	24
3.2.1	Instrumentos e medidas das forçantes meteorológicas e dos fluxos de energia e de CO₂	24
3.2.2	Medidas de umidade do solo	26
3.3	O MODELO SIB2.....	27
3.4	O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES.....	31
3.5	SIMULAÇÕES.....	33
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1	ANÁLISE OBSERVACIONAL.....	37
4.1.1	Precipitação	37
4.1.2	Umidade do solo	38
4.1.3	Evapotranspiração e interceptação	41
4.2	ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS.....	43
4.2.1	Comparação do experimento controle com as observações	43
4.2.1.1	Balanço de energia.....	43
4.2.1.2	Fluxo de CO ₂	45
4.2.2	Impacto da distribuição e profundidade de raízes	46
4.2.2.1	Umidade do solo.....	46
4.2.2.2	Fluxos de calor latente, sensível e CO ₂	50
4.3	DISCUSSÃO.....	53
5	CONCLUSÕES	55
	REFERÊNCIAS	56
	ANEXOS	61
	ANEXO A - TABELA DE PARÂMETROS VARIANTES E INVARIANTES NO TEMPO UTILIZADOS NO SIB2.....	61
	ANEXO B - ARQUIVO DE PARÂMETROS DATA1.....	66

1 INTRODUÇÃO

Atualmente o aquecimento global é , uma das linhas de pesquisas priorizadas pela comunidade científica, e que para tanto torna-se imprescindível o entendimento sobre o funcionamento do complexo sistema solo-planta-atmosfera a fim de obter parâmetros para uma melhor compreensão dos processos de evapotranspiração, bem como emissão e fixação de dióxido de carbono (CO₂). Sendo estes processos fortemente relacionados à questão da variabilidade climática regional e global.

Considerando o bioma amazônico, o qual possui cerca de 28% das florestas tropicais mundiais, sendo a maior área de floresta tropical do mundo, possui ainda 15 a 20% dos recursos hídricos e cerca de 1/3 de toda a biodiversidade do planeta (FREITAS, 2004), percebemos que por sua magnitude esta região além da importante contribuição com a manutenção da biodiversidade do planeta, esta participa efetivamente na regulação das chuvas e do clima, em escala regional e global (SILVA DIAS; COHEN; GANDÚ, 2005).

Segundo Nobre, Sampaio e Salazar (2007) as variações climáticas que vêm acontecendo na Amazônia podem estar associadas a três fatores distintos: (i) *causas naturais, como variações na intensidade da radiação solar que chega até a superfície*, resultantes das variações periódicas no eixo de rotação da Terra, variações na excentricidade da órbita terrestre, entre outras; (ii) *atividades antrópicas que alteram os ecossistemas naturais*, principalmente, da conversão da floresta para uso agrícola e/ou pecuária; (iii) *mudanças climáticas globais provocadas por ações antrópicas*, como o crescimento das emissões de gases do efeito estufa que podem levar há um aumento na temperatura média global. De acordo com estudos realizados por Carter e Hulme (2000), a temperatura da região amazônica pode ter um aumento de 1 a 6 °C até o final do século.

Bruijnzeel (1996) mostra que, em um longo prazo, a substituição da vegetação de floresta por pastagem conduz a diminuição na disponibilidade de água para as plantas, que reflete em um déficit na evapotranspiração, com conseqüências diretas no balanço de água e da radiação solar, levando a expectativa de mudanças importantes nas condições climáticas da região (FERREIRA; LUIZÃO; DALLAROSA, 2005). O aumento da temperatura na região amazônica pode conduzir a diminuição da precipitação (MITCHELL *et al.*, 1995) resultando em uma exigência maior das

plantas por água, aumentando assim o estresse hídrico (TAIZ; ZEIGER, 1998), com conseqüente diminuição da evapotranspiração.

Em síntese, a diminuição de precipitação pode ocorrer em função da diminuição da evapotranspiração juntamente com a intensificação do efeito estufa como resultante do aumento da concentração atmosférica de CO₂. Com isto, o homem sofreria diretamente as conseqüências do cenário resultante de suas intervenções, pois os processos de superfície e clima estão fortemente interligados. Isto é confirmado com as simulações de modelos climáticos calibrados com informações sobre características da floresta amazônica e de áreas desmatadas fornecidas pelo projeto ABRACOS (“Anglo-Brazilian Climates Observations Study”), as quais mostram que teremos uma elevação da temperatura séria com uma diminuição na umidade do ar e nos volumes de chuva total anual em cerca de 20%, caso haja a substituição completa da floresta amazônica por pastagem (GASH e NOBRE, 1997).

A conversão da cobertura vegetal da floresta por outras formas do uso da terra pode implicar diretamente no balanço hídrico da bacia amazônica (FERREIRA *et al.*, 2005), em função das superfícies florestadas liberarem água para a atmosfera com maior eficiência do que um solo nu com a mesma quantidade de água. Isto e deve ao fato que as raízes das plantas podem extrair umidade do solo mais rapidamente do que o transporte de água por processos abióticos. A distribuição do sistema radicular da vegetação e a dinâmica da água no solo são dois fatores de considerável relevância para medir os impactos climáticos provenientes da mudança na cobertura vegetal.

O conhecimento da influência das florestas sobre os vários aspectos da água do solo é de fundamental importância no que diz respeito à avaliação do papel da floresta no ciclo hidrológico. Um ecossistema de floresta apresenta uma distribuição de raízes mais abundante nas camadas mais superficiais, no entanto também apresenta raízes distribuídas nas camadas mais profundas em comparação com pasto, por exemplo (NOBRE; SELLERS; SHUKLA, 1991). De acordo com estudos realizados por Nepstad *et al.* (1994) as raízes se distribuem até profundidades superiores a 8 m em áreas de floresta em comparação aos 2 m em pastagens, e mostram também que as árvores da floresta dependem de suas raízes profundas para manter seu equilíbrio hidráulico e a turgescência do dossel durante os meses secos (JIPP *et al.*, 1998).

Na região de Manaus Cerri e Volkoff (1987) observaram a ocorrência de raízes abaixo de 5 m, o que permite a captação de água armazenada nas camadas mais profundas do solo. Contudo, esta captação está condicionada à disponibilidade de água contida no solo, o que, por sua vez, está relacionado com a quantidade de material orgânico bem como a textura e estrutura do solo (fatores físicos).

A dinâmica da água no solo está relacionada aos processos de infiltração, redistribuição e evaporação. A infiltração é o processo de penetração da água no solo cuja taxa varia com o tempo, iniciando com taxas elevadas as quais diminuem gradativamente com o tempo, até atingirem valores constantes (PREVEDELLO, 1996). Segundo Klar (1998), o movimento da água no solo se dá sempre de acordo com a tendência natural da água de assumir estado de menor potencial. Neste sentido, a direção do movimento é sempre de regiões de maior potencial para regiões de menor potencial, em resposta aos gradientes de potenciais hidráulicos, tendo como principais componentes a somatória dos potenciais matricial (Ψ_m), de pressão (Ψ_p) e gravitacional (Ψ_g).

Anjos *et al.* (1994) comparando propriedades físicas de quatro solos sob mata nativa e sob cultivo em diferentes sistemas de manejo na região amazônica, constataram que nos sistemas de manejo analisados houve degradação da estrutura do solo, comprovada pelo aumento da densidade, resultando em uma diminuição da porosidade total e conseqüente diminuição da taxa de infiltração da água.

Quando o processo de infiltração é cessado tem início o processo de redistribuição ou drenagem. No início desse processo, a força gravitacional é a principal responsável pelas alterações ocorrentes, e a umidade nas proximidades da superfície do solo é a que mais rapidamente decrescerá, se o solo apresentar boas condições para a drenagem livre (TARBOTON, 2003). Tanto a taxa de fluxo descendente quanto a umidade serão progressivamente diminuídas com o tempo, até que essas variações se tornam tão pequenas quanto desprezíveis (TARBOTON, 2003). Nessas condições, costuma-se dizer que o excesso de água foi drenado e o solo atingiu a sua condição de “capacidade de campo” o que representa a capacidade que o solo tem de armazenamento de água. A capacidade de campo tem sido assumida como o limite superior de disponibilidade às plantas (SILVEIRA; LOUZADA; BELTRAME, 2004).

A perda de água do solo pelo processo de evapotranspiração constitui-se num importante parâmetro para o ciclo hidrológico, podendo atingir 50% ou mais da

água que chega a atmosfera. A cobertura florestal geralmente reduz o nível da água do solo mais do que qualquer outra cobertura vegetal, implicando em um déficit hídrico maior (abaixo da umidade correspondente à capacidade de campo) bem como em solos desprovidos de cobertura vegetal (MELO-IVO *et al.*, 1997).

A cobertura vegetal é determinante para definição do caminho percorrido pela água através do contínuo solo-planta-atmosfera (FEDDES *et al.*, 2001). De acordo com Zheng e Wang (2007) a profundidade e o perfil vertical das raízes são cruciais na determinação do ciclo da água. A análise dos resultados de vários trabalhos (ZHENG *et al.*, 1998; SEN; SHUTTLEWORT; YANG, 2000; BARLAG; ZHENG, 2004) evidenciam que a profundidade e o perfil do sistema radicular exercem influência nos fluxos de calor sensível, calor latente e no fluxo total de CO₂, por estar intimamente relacionado com a quantidade de água que potencialmente é transpirada pela vegetação para a atmosfera, especialmente durante a estação seca.

Estudos feitos por Jackson *et al.* (1996) revelam que em uma análise do perfil vertical, o modelo exponencial do sistema radicular é o mais freqüentemente observado. Em uma análise de dados de biomassa de raiz para diversos tipos de vegetação, definiu-se que o perfil exponencial do sistema radicular é controlado por dois parâmetros empíricos que variam em concordância com tipo de vegetação (ZHENG *et al.*, 1998; ZHENG, 2001). Desta forma, Zheng (2001) incorporou nos modelos climáticos um perfil vertical exponencial de distribuição de raízes para áreas de floresta, melhorando assim as simulações de clima sazonal nos modelos climáticos.

No entanto, a profundidade da distribuição vertical do sistema radicular para áreas da Amazônia é subestimada (ZHENG; WANG, 2007), isso ocorre na maioria dos modelos de superfície, onde geralmente o fluxo de calor latente na Amazônia é subestimado na estação seca. Uma representação mais realística dos fluxos de superfície pode ser obtida através da incorporação do perfil exponencial vertical da distribuição de raízes e considerando profundidades maiores que 2 m, sendo esta a profundidade de raízes considerada pela maioria dos modelos (ARORA; BOER, 2003).

O objetivo desta dissertação focaliza-se na aplicação de uma estratégia de modelagem para a Amazônia utilizando o “Simple Biosphere Model – versão 2” no sentido de estudar a sensibilidade dos fluxos de superfície e a hidrologia do solo em

relação às modificações na representação e na distribuição de raízes neste modelo de biosfera. A finalidade é avaliar o impacto na representatividade dos fluxos de energia na superfície considerando a sazonalidade da região amazônica. Com isto esta dissertação propõe-se a mostrar que a representação de um sistema radicular mais profundo dentro dos modelos pode gerar fluxos de superfície na Amazônia mais coerentes.

Medidas intensivas realizadas em uma reserva biológica na Amazônia (Reserva Biológica do Cuieiras em Manaus) estão sendo realizadas desde 1999 pela equipe de micrometeorologia do Projeto de Grande escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia (LBA) e serão utilizadas como suporte nesta pesquisa. Este melhoramento pretendido, na representação da vegetação nos esquemas de biosfera e nos modelos climáticos, são esclarecedores da importância do sistema de raízes em efeitos nos fluxos de superfície. Desta forma poderá fornecer subsídios científicos que justificam a necessidade de preservação do meio ambiente, com a manutenção da cobertura florestada, como forma de atenuação das consequências das mudanças climáticas.

2 OBJETIVOS

2.1 GERAL:

Avaliar a importância da distribuição vertical das raízes no modelo “Simple Biosphere Model” versão 2 (SiB2), em relação ao balanço de água no solo, fluxos de energia e de CO₂.

2.2 ESPECÍFICOS:

- ✓ Introduzir um modelo de distribuição de raízes no modelo de biosfera SiB2 representativo do padrão de distribuição horizontal e vertical do sistema radicular encontrado na Amazônia.
- ✓ Ajustar o modelo exponencial de distribuição de raízes com a profundidade (ARORA; BOER, 2003) aos parâmetros representativos da vegetação para melhor representação do sistema radicular para a micro-bacia na Reserva Biológica do Cuieiras.
- ✓ Verificar o impacto nas simulações geradas pelo modelo de biosfera SiB2 avaliando a sensibilidade nos fluxos de superfície com mudanças na hidrologia do solo tendo como base medidas de umidade do solo e dos fluxos de superfície realizadas na Reserva Biológica do Cuieiras.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

O sítio experimental da Reserva Biológica do Cuieiras (Figura 1) encontra-se a $02^{\circ}35'22''$ S e $60^{\circ}06'55''$ W. Esta área pertence ao Instituto Nacional de Pesquisa da Amazônia (INPA), tem 22.735 ha e situa-se cerca de 60 km ao norte da cidade de Manaus (AM). O acesso à reserva é feito por via rodoviária e através de uma estrada de terra ZF-2 (ARAÚJO *et al.*, 2002; MARQUES FILHO; DALLAROSA; PACHECO, 2005).

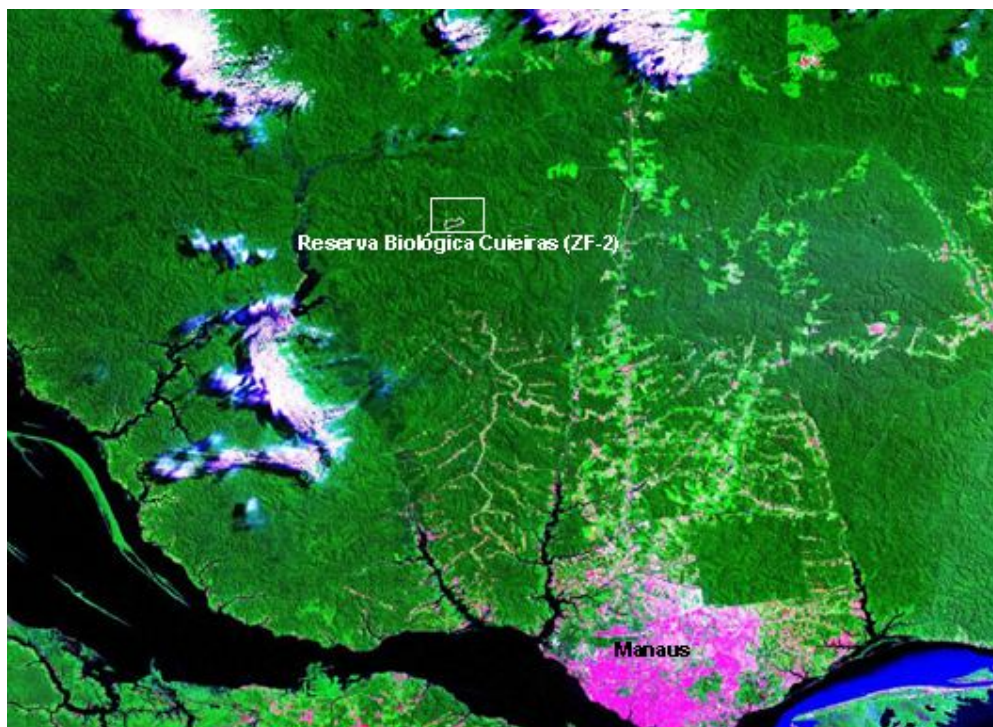


Figura 1 – Imagem da área de estudo, Reserva Biológica do Cuieiras (dentro do retângulo) de floresta tropical (Manaus-Am).

A Reserva Biológica do Rio Cuieiras apresenta um relevo fortemente ondulado e tem sua rede de drenagem entre platôs (áreas mais elevadas da topografia) e baixios (áreas mais baixas da topografia). Nos baixios aparecem vários igarapés compondo uma rica rede de escoamento, com diferença máxima de altura entre platôs e baixios de aproximadamente 60 m. O platô é recoberto por latossolo

amarelo álico (Oxissol), com textura argilosa, pobre em nutrientes e com baixo pH (4,3) (MALHI *et al.*, 2002). O baixio é essencialmente constituído de solo mais arenoso (ARAÚJO *et al.*, 2002). O sítio experimental é uma área típica de vegetação tropical primária não perturbada, com dossel variando entre 30-40 m, proporcionando uma biomassa seca entre 300-350 t ha⁻¹ e índice de área foliar entre 5 a 6 m² m⁻².

O clima é típico da Amazônia Central, caracterizado por temperatura e umidade elevadas, com abundância de chuvas ao longo do ano e uma curta estação seca. A normal climatológica apresenta um período seco, correspondente aos meses de junho a novembro, e um período chuvoso, correspondente aos meses de dezembro a maio. Os totais médios mensais de precipitação são superiores a 150 mm em pelo menos nove meses do ano (entre outubro e junho), existindo apenas três meses com valores inferiores a 150 mm (julho a setembro), sendo que o mês de agosto apresenta em média o menor índice pluviométrico (MARQUES FILHO; DALLAROSA; PACHECO, 2005).

A Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) desloca para a região grande quantidade da umidade produzida no oceano Atlântico, desempenhando um papel importante no regime pluviométrico local. Três mecanismos de macro e mesoescala também são determinantes para a ocorrência de chuva na região: 1) a convecção diurna devido ao aquecimento da superfície; 2) a propagação de linhas de instabilidade da costa do Atlântico; e 3) a convecção de meso e larga escala associada com sistemas frontais de S-SE (FISCH; MARENGO; NOBRE, 1998).

A umidade relativa apresenta índices médios mensais acima de 80% (MALHI *et al.*, 2002). As temperaturas médias mensais variaram entre 25,2 °C (julho) e 26,7 °C (novembro), sendo que durante o período de estudo as máximas oscilaram entre 31,3 °C em fevereiro e 33,2 °C em setembro, enquanto as mínimas estiveram entre 21,5 °C em julho e 23,0 °C em março (MARQUES FILHO; DALLAROSA; PACHECO, 2005). A ocorrência de valores extremos de temperatura nos meses secos, tanto máximos como mínimos, pode ser explicada pela baixa nebulosidade da estação, que permite maior quantidade de radiação solar à superfície durante o dia e uma maior perda radiativa durante a noite, associada com a presença mais freqüente de sistemas frontais provenientes do sul durante o período (MARQUES FILHO; DALLAROSA; PACHECO, 2005).

3.2 INSTRUMENTOS E MEDIDAS

3.2.1 Instrumentos e medidas das forçantes meteorológicas e dos fluxos de energia e de CO₂

Para monitorar as trocas dos fluxos de energia, vapor d'água e de CO₂ entre o ecossistema estudado e a atmosfera foi necessário medir os principais fluxos (de gás e energia) de entrada e saída do sistema. Neste sentido, as forçantes meteorológicas irradiância de onda curta incidente, o saldo de radiação, onda longa incidente, temperatura do ar, velocidade horizontal do vento, umidade relativa do ar e a precipitação são as variáveis utilizadas como forçantes para o modelo SiB2, juntamente com as medidas dos fluxos de calor latente, calor sensível e fluxo de CO₂.

Estas variáveis estão sendo monitoradas pelo grupo de micrometeorologia do LBA, através do sistema automático de aquisição de dados ("Automatic Weather Station" - AWS) que dispõe de instrumentos instalados em uma torre com estrutura de alumínio de 1,5 m x 2,54 m de seção e 54,0 m de altura (Torre K34), em uma área de platô (coordenadas: 2°36'32" S, 60°12'33"), no quilômetro 34 da ZF-2 (Figura 2).

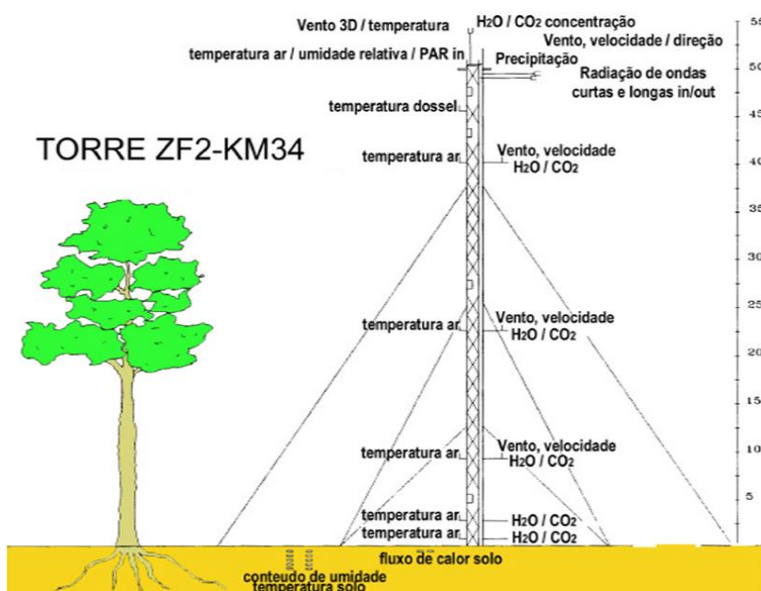


Figura 2 – Esquema representativo do sistema automático de aquisição dos dados AWS (Torre K34), montada na Reserva Biológica do Cuieiras, do INPA (Manaus-AM).

As variáveis foram analisadas no período de 01 de janeiro de 2003 a 31 de dezembro de 2006. Foi selecionado o ano de 2005 para análise por este ter apresentado um período de seca mais pronunciado em uma análise dos últimos 40 anos de medição.

Tabela 1 – Variáveis meteorológicas medidas com seus respectivos instrumentos instalados na torre do km 34, localizada na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

Variáveis Meteorológicas	Instrumentos
<i>Onda Curta incidente e refletida</i>	<i>Kipp & Zonen Pyranometer CM 21</i>
<i>Onda longa incidente e emitida</i>	<i>Kipp & Zonen Pyranometer CG 1</i>
<i>PAR</i>	<i>LI-COR LI – 190SZ quantum sensor</i>
<i>Umidade Relativa</i>	<i>Vaisala HMP35A</i>
<i>Fluxo de calor do solo</i>	<i>Hukseflux SH1</i>
<i>Direção do vento</i>	<i>Vector W200P</i>
<i>Perfil vertical da velocidade do vento</i>	<i>Vector A100R</i>
<i>Precipitação</i>	<i>EM ARG-100</i>
<i>Temperatura da superfície</i>	<i>Heimann KT15 infrared sensor</i>
<i>Pressão atmosférica</i>	<i>Vaisala PTB100A</i>
<i>Onda longa incidente e temperatura</i>	<i>PT100</i>
<i>Perfil vertical da temperatura do ar</i>	<i>PT100</i>
<i>Perfil vertical de concentração de CO₂</i>	<i>PP Systems CIRAS SC IRGA</i>
<i>Perfil vertical de concentração H₂O</i>	<i>PP Systems CIRAS SC IRGA</i>
<i>Perfil da temperatura do solo</i>	<i>IMAG-DLO MCM101</i>
<i>Perfil de umidade do solo</i>	<i>IMAG-DLO MCM101</i>
<i>Concentração de CO₂</i>	<i>IRGA LI-COR 6262 closed-path</i>
<i>Concentração de H₂O</i>	<i>IRGA LI-COR 6262 closed-path</i>
<i>Vetores velocidade do vento u, v e w</i>	<i>Solent three-axis ultrasonic anemometer</i>

As medidas dos fluxos de calor sensível e latente juntamente com o fluxo de CO₂ compõem a base de dados utilizada na verificação do impacto da mudança na distribuição das raízes nas simulações do modelo de biosfera SiB2, configurado para a reserva do Cuieiras descrita acima. O SiB2 calcula os fluxos e as trocas de energia entre as camadas dentro do perfil do solo (SELLERS *et al.*, 1996).

3.2.2 Medidas de umidade do solo

Os dados hidrológicos constam de medidas de conteúdo volumétrico de água no solo em um perfil de 5,0 m de profundidade, medidos em três pontos distintos (T1, T2 e T3) sobre área de platô próximo a estação meteorológica km 34, as quais medidas foram fornecidas pelo grupo de hidrologia do projeto LBA. Foram excluídos dados obtidos durante o período em que houve falhas nos equipamentos, assim como dados não consistentes com o padrão esperado.

A sonda de nêutrons foi utilizada para medir o conteúdo volumétrico de água no solo (Figura 3). Este instrumento mede o índice de água volumétrica com o auxílio de acesso de tubos de alumínio previamente instalados. A ponta de amostragem trabalha usando uma fonte radioativa de "nêutrons" rápidos, os quais são retardados quando se chocam com os átomos de hidrogênio da água. Com isto a sonda mede os nêutrons lentos e em consequência quantifica o volume de água no solo a partir de uma calibração prévia.



Figura 3 – Sonda de nêutrons utilizada para medir a umidade do solo nos pontos de coleta T1, T2 e T3 próximos à estação meteorológica K34, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

3.3 O MODELO SiB2

O modelo SiB2 descrito por Sellers *et al.* (1996) foi utilizado na estimativa dos fluxos de energia, fluxo de CO₂ e água entre a floresta e a atmosfera acima. Este modelo segue a aproximação “big-leaf” (grande folha) que calcula os processos associados aos balanços de energia e água à superfície, integrados para todo o sistema, conforme ilustrado na Figura 4.

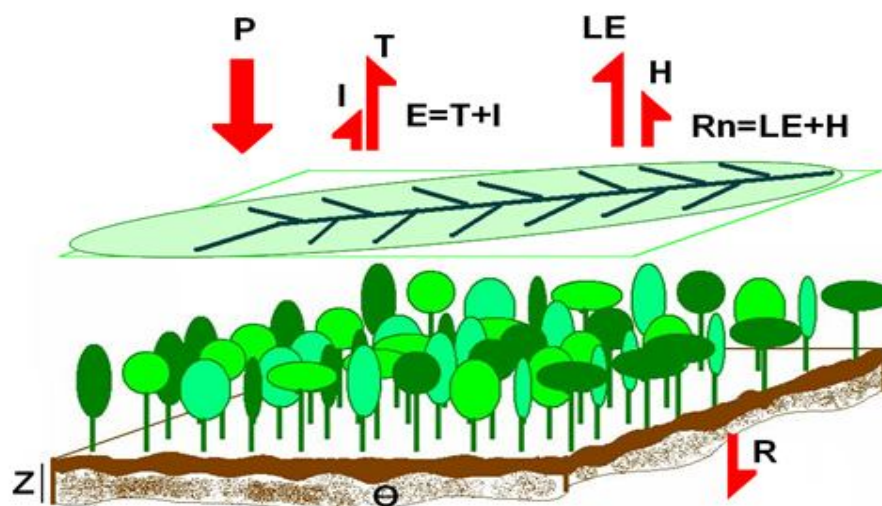


Figura 4 – Esquema conceitual da parametrização “big leaf” dos processos de superfície utilizada no modelo SiB2.

Onde P é precipitação, T é a transpiração, I é a interceptação, E é a evaporação, LE é o fluxo de calor latente, H é o fluxo de calor sensível, Rn é o balanço de energia, Z é a profundidade do solo, θ é a porosidade do solo e R é a infiltração.

As parametrizações das trocas dos fluxos de energia entre a superfície e a atmosfera são baseadas na equação de Penman-Monteith (INCLÁN; FORKEL, 1995) em trajetórias de resistência ao longo e acima do dossel. Para isto usa-se a temperatura média diária, a velocidade do vento, a umidade relativa e a radiação solar para prever a evapotranspiração líquida. O modelo é estruturado tendo uma camada de dossel e três camadas de solo. As forçantes atmosféricas usadas são todas no nível acima do dossel, respectivamente: temperatura e pressão parcial de vapor d'água, velocidade do vento, concentração de CO₂ e pressão parcial de O₂ (na

prática estimadas em 340 ppm e 2.090 Pa, respectivamente), irradiância solar global incidente e precipitação.

O modelo tem onze variáveis prognósticas: temperatura do dossel (T_c), temperatura da superfície do solo (T_g) e do solo profundo (T_d); quantidade de água interceptada pelo dossel (M_{cw}) e pela superfície do solo (M_{gw}); quantidade de gelo e neve interceptados pelo dossel (M_{cs}) e na superfície do solo (M_{gs}); grau de saturação da umidade do solo na camada de superfície (W_1), na camada de raízes (W_2), e na camada de drenagem profunda (W_3); e a condutância de superfície (g_c).

Também, o modelo calcula os fluxos de energia, como saldo de radiação (Rn), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor latente (LE), e a taxa de assimilação de carbono (A), que são funções explícitas das forçantes atmosféricas, das variáveis prognósticas, das resistências aerodinâmicas e das condutâncias de superfície. Os fluxos turbulentos de energia (H e LE) e o fluxo de CO_2 são calculados de forma análoga à corrente elétrica, proporcional há uma diferença de potencial a qual é inversamente proporcional à resistência do meio, isto é:

$$Fluxo = \frac{\text{diferença de potencial}}{\text{resistência}}, \quad (1)$$

sendo que as diferenças de potencial para os fluxos estudados são: temperatura, pressão de vapor d'água e pressão parcial de CO_2 , os quais são ilustrados na Figura 5 e descritos na Tabela 2.

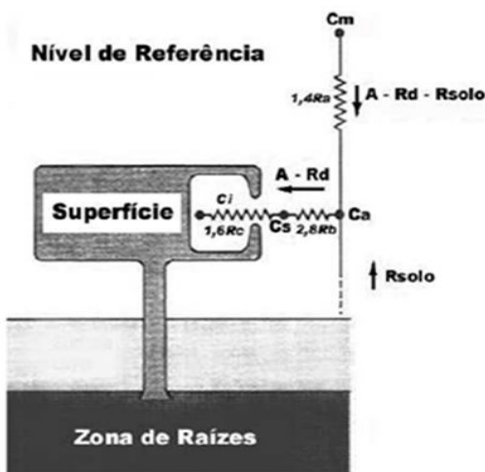


Figura 5 – Esquema de transferência dos fluxos utilizado pelo modelo SiB2. Os fluxos são análogos ao fluxo de corrente elétrica em uma associação de resistores. Fonte: Modificada de Sellers *et al.* (1996).

Tabela 2 – Fluxos de calor sensível (H), calor latente (LE) e CO₂ calculados em trajetórias especificadas com uma diferença de potencial e uma resistência determinada.

Variáveis	Diferença de Potencial	Resistência
H _c	$\rho c_p (T_c - T_a)$	r_b
H _g	$\rho c_p (T_g - T_a)$	r_d
H _c + H _g	$\rho c_p (T_a - T_m)$	r_a
LE _{ct}	$\rho c_p [e_s(T_c) - e_a] / \gamma$	$(r_c + 2r_b) / (1 - W_c)$
LE _{ci}	$\rho c_p [e_s(T_c) - e_a] / \gamma$	$2r_b / W_c$
LE _{gi}	$\rho c_p [e_s(T_g) - e_a] / \gamma$	r_d / W_g
LE _{gs}	$\rho c_p [h_{soil} e_s(T_g) - e_a] / \gamma$	$(r_{soil} + r_d) / (1 - W_g)$
LE _{ct} + LE _{ci} + LE _{gi} + LE _{gs}	$\rho c_p (e_a - e_m) / \gamma$	r_a
A - R _d	$(c_a - c_r) / p$	$1,6 r_a + 2,8 r_b$
R _{soil}	$(c_{soil} - c_a) / p$	$1,4 r_d$
A - R _d - R _{soil}	$(c_m - c_a) / p$	$1,4 r_a$

Onde γ = constante psicrométrica ($Pa K^{-1}$); (ρ , c_p) = densidade e calor específico do ar ($kg \cdot m^{-3}$, $J kg^{-1} k^{-1}$); T_a , e_a = temperatura e pressão de vapor d'água no espaço aéreo do dossel (K, Pa), respectivamente; T_m , e_m = temperatura e pressão de vapor d'água no nível de referência z_m (K, Pa), respectivamente; r_d = resistência aerodinâmica entre o solo e o espaço aéreo do dossel ($s m^{-1}$); r_a = resistência aerodinâmica entre o espaço aéreo do dossel e o nível de referência z_m ($s m^{-1}$); r_c = resistência estomática do nível superior do dossel ($s m^{-1}$); r_{soil} = resistência de superfície do solo nu ($s m^{-1}$); r_b = resistência da camada limite do dossel ($s m^{-1}$); h_{soil} = umidade relativa nos poros da superfície do solo; $e_s(T)$ = pressão de vapor de saturação à temperatura T (Pa); W_c = fração de cobertura de umidade e neve do dossel; W_g = fração de cobertura de umidade e neve do solo; c_a = pressão parcial de CO₂ no espaço aéreo do dossel (Pa); c_l = pressão parcial de CO₂ "bulk" interna das folhas (Pa); c_{soil} = pressão parcial de CO₂ na superfície do solo (Pa); c_m = concentração de CO₂ no nível de referência (Pa).

As transferências de momentum no modelo SiB2 e as resistências aerodinâmicas r_a , r_b e r_d ($s \cdot m^{-1}$) são calculadas através dos coeficientes "bulk" de transferência turbulenta de momentum C_1 , C_2 e C_3 (Figura 5). Estes coeficientes, juntamente com os coeficientes z_0 e d , são calculados previamente para um tipo específico de vegetação.

A assimilação líquida de carbono no dossel (A_c) é calculada a partir de um modelo de fotossíntese na folha para plantas do tipo C_3 (SELLERS *et al.*, 1996). A assimilação na folha é descrita como a taxa mínima limitante de três fatores: w_c , w_e e w_s ($\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), que são respectivamente a eficiência da enzima fotossintética (Rubisco), a quantidade de radiação fotossinteticamente ativa (PAR), capturada pela clorofila, e a capacidade da folha de exportar os produtos da fotossíntese. O termo A_c pode ser descrito resumidamente como

$$A_c = f(w_c, w_e, w_s) - R_D \quad (2)$$

Onde: $f(w_c, w_e, w_s)$ corresponde à assimilação bruta e R_D a respiração da planta ambos em $\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$.

O fluxo total de CO_2 no dossel, NEE (“net ecosystem exchange”, ou troca líquida do ecossistema), é calculado como

$$NEE = A_c - R_s \quad (3)$$

Onde A_c é a assimilação líquida de carbono no dossel e R_s é a respiração do solo ou *efluxo* de CO_2 ($\text{mol de CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$), a qual tem uma grande dependência de fatores locais, associados ao manejo do solo e uso da terra, sendo difícil sua generalização em um modelo atmosférico.

O modelo SiB2, além de utilizar um conjunto de parâmetros de caracterização do bioma, tem o solo dividido em três camadas distintas para a difusão hidráulica que está baseada na “equação de Darcy”, tal que:

$$q = -K \nabla h \quad (4)$$

Onde q é a densidade de fluxo de água ($\text{m}^3 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$); ∇h o gradiente de potencial de água no solo em MPa, considerando $h = \psi + z$, e K a condutividade

hidráulica (m s^{-1}). As relações hidráulicas entre θ , K e ψ são dadas pelas expressões:

$$K = K_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{(2b+3)} \quad (5)$$

$$\psi = \psi_s \left(\frac{\theta}{\theta_s} \right)^{-b} \quad (6)$$

Onde K_s é a condutividade hidráulica do solo saturado (m s^{-1}), θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), θ_s umidade volumétrica do solo no ponto de saturação ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$), b é o parâmetro da curva de retenção da água no solo (adimensional), Ψ é potencial matricial e Ψ_s é potencial matricial do solo saturado.

Na configuração do modelo utilizaram-se parâmetros biofísicos da vegetação e do solo representativos do local de estudo (dados observados - OBS) presentes na literatura, tais como: porosidade do solo, altura do dossel, índice de área foliar, profundidade de raízes, bem como parâmetros adicionados do modelo compatíveis com a vegetação de floresta tropical relacionados em Sellers *et al.* (1996) e que estão relacionados no ANEXO A.

3.4 O MODELO DE DISTRIBUIÇÃO DE RAÍZES

O modelo utilizado para representar a distribuição de raízes com a profundidade foi proposto por Arora e Boer (2003). Este modelo considera fatores dinâmicos determinados pela biomassa total de raízes no solo, e estima a fração de raízes acumulada no perfil de solo através da seguinte expressão:

$$f_i = 1 - \exp \left[- \bar{a} \left(\frac{\bar{B}}{B_i} \right)^\alpha Z \right]$$

(7)

Onde f_i é a fração cumulativa da densidade de raízes em dada profundidade Z (m), associada à biomassa total de raízes B_i (kg m^{-2}). Os parâmetros \bar{a} , \bar{B} e α adotados neste trabalho foram os propostos por Arora e Boer (2003) para floresta tropical, que são $4,4 \text{ kg m}^{-2}$, $2,43 \text{ kg m}^{-2}$ e $0,78$, respectivamente.

Desta forma utilizando-se deste modelo e as medidas de biomassa de raízes existentes na literatura (KLINGE, 1973; PAVLIS; JENÍK, 2000; RUSSEL, 1983) construiu-se um modelo de distribuição de raízes que melhor se ajusta às características de profundidade e distribuição de raízes observadas em áreas de floresta na Amazônia, particularmente nas camadas de solo acima de 2,0 m de profundidade. O modelo de distribuição de raízes resultante é mostrado na Figura 6 considerando os limiares de variação de biomassa de raízes estimados para a floresta amazônica (KLINGE, 1973; RUSSEL, 1983).

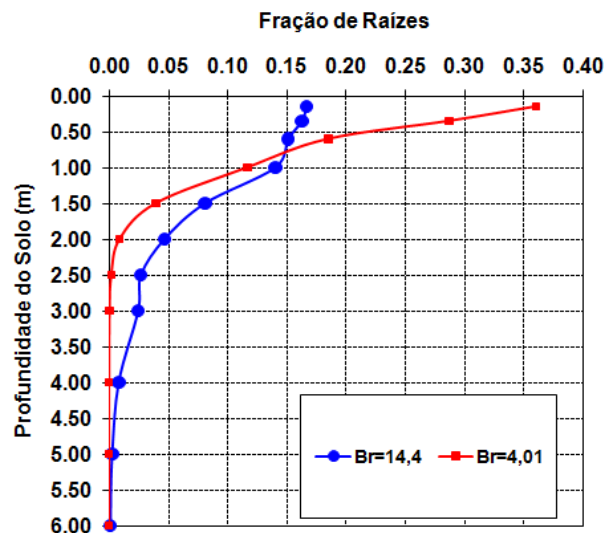


Figura 6 – Distribuição vertical da fração de raízes segundo o modelo de Arora e Boer (2003).

O modelo mostra que quanto maior a biomassa de raízes, mais vertical e profunda é a distribuição de raízes, ou seja, quanto maior a biomassa de raízes (B_r) nos primeiros 0,5 m de solo menor é o aprofundamento das mesmas no perfil do solo. Nas simulações com o modelo SiB2 considerou-se o perfil de fração de raízes associado à variação nos valores de biomassa para satisfazer as profundidades de raízes típicas do bioma na região de Manaus relatadas em Jackson *et al.* (1996).

3.5 SIMULAÇÕES

O experimento numérico 1, aqui denominado **Controle**, simulou a interação entre a atmosfera e o ecossistema de floresta na Reserva Biológica do Cuieiras no período de 2003 a 2006, utilizando um conjunto de forçantes medidos no mesmo sítio experimental com resolução temporal de 30 minutos, e uma distribuição e profundidade de raízes tipicamente adotadas nos estudos com modelos climáticos globais. As variáveis forçantes são irradiância solar de onda curta incidente (SW_{down}), saldo de irradiância de onda longa (l_{in}), temperatura do ar (t_m), velocidade horizontal do vento (u_m), precipitação ($prec$) e umidade relativa (RH), todas as medidas acima do dossel da vegetação. Esta última variável foi utilizada no cálculo da pressão de vapor d'água (e_m) dada pela equação:

$$e_m = RH \left(\frac{e_s}{100} \right)$$

(8)

Onde, e = pressão parcial de vapor, RH = umidade relativa, e e_s = pressão parcial de vapor na saturação, dada pela equação

$$e_s = 0,61078 \exp \left(\frac{17,269 (t)}{t + 237,3} \right)$$

(9)

Sendo que \exp = equação exponencial e t = temperatura ($^{\circ}\text{C}$). Os dados de umidade do solo utilizados na inicialização do modelo Sib2 foram medidos na área de estudo em unidade de conteúdo volumétrico de água no solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e convertido para grau de saturação através da equação,

$$W = \frac{\theta}{\theta_s} \quad (10)$$

Onde θ é o conteúdo volumétrico de umidade do solo medido ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e θ_s é a porosidade do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$). Neste estudo foi utilizada a porosidade média de um solo semelhante de uma área de floresta próximo à área de estudo com as profundidades de 0,1 a 1,0 m, extrapolado para todo o perfil de solo, $\theta_{s10-100} = 0,57$ (FERREIRA *et al.*, 2002), estes dados são usados nas condições de inicialização do experimento Controle (ANEXO B).

As demais simulações utilizaram as mesmas forçantes do experimento Controle, sendo que ao todo foram realizadas sete simulações, variando em cada uma o perfil de distribuição de raízes para cada experimento. Essas simulações possibilitaram avaliar cenários com raízes concentradas na primeira camada do solo, raízes concentradas na segunda camada, uma distribuição homogênea de raízes por todo o perfil do solo e raízes concentradas na camada mais profunda do solo.

Para as simulações no modelo SiB2, o perfil de solo foi dividido em três camadas: camada 1 (C1), camada 2 (C2), camada 3 (C3) na profundidade de 0,5 a 1,5 m; de 1,5 a 2,0 m e de 2,0 a 4,0 m respectivamente, para todas as simulações, sendo que o perfil de solo estudado foi o de 4 m de profundidade (Figura 7).

Para cada camada a fração de raízes (*f-root*, variável que determina a fração de raízes da camada no modelo SiB2) foi determinado, através do modelo exponencial de distribuição de raízes descrito pela equação (7), os perfis verticais de distribuição de raízes até a profundidade de 4 m, determinados a partir da variação na biomassa de raízes e os resultados apresentados na Figura 8.

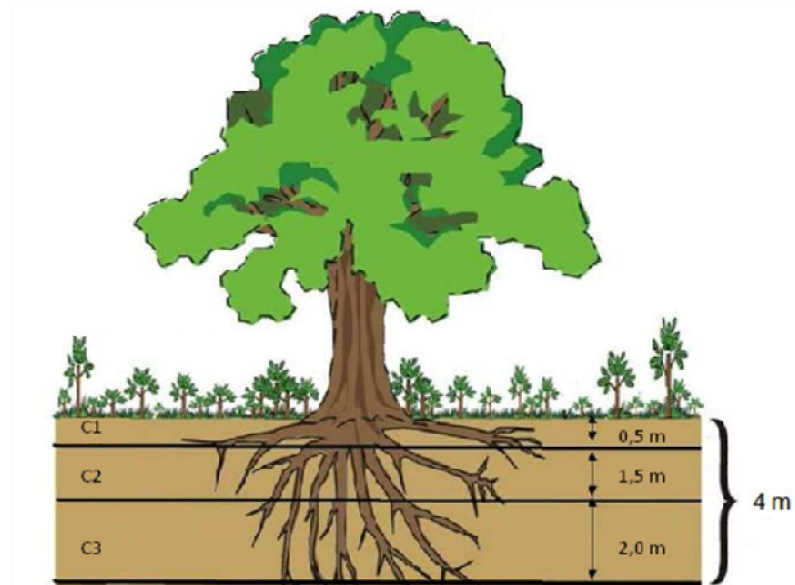


Figura 7 – Esquema representativo da divisão de camadas do solo utilizada nas simulações com o modelo SiB2.

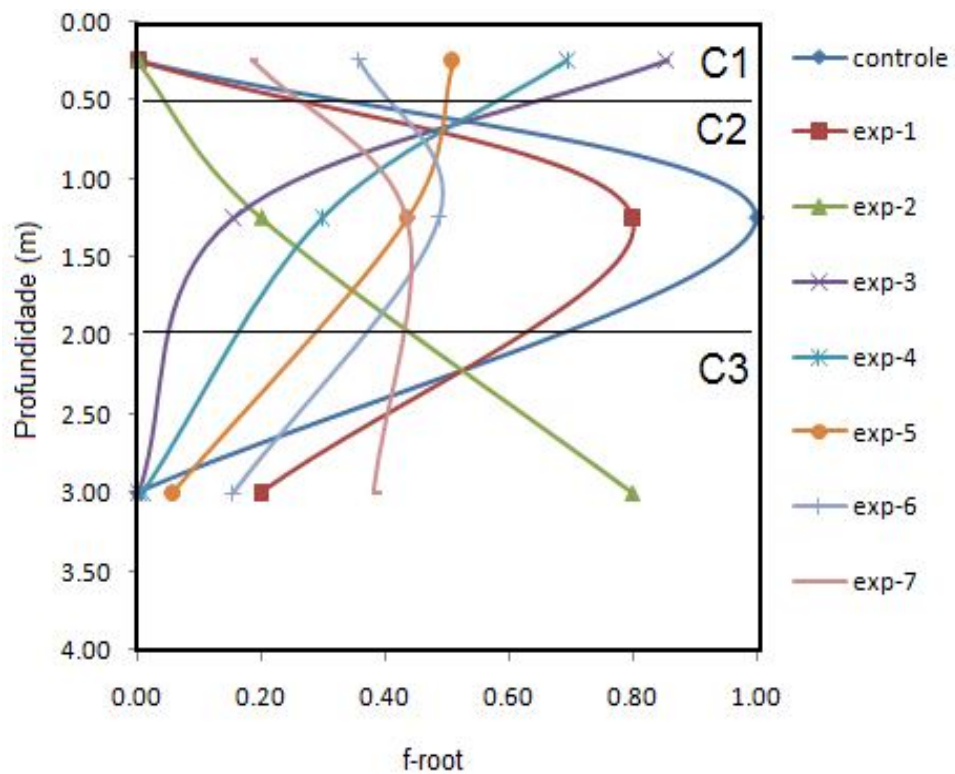


Figura 8 – Perfis verticais de distribuição de raízes até a profundidade de 4 m resultantes da variação da biomassa do sistema radicular.

A biomassa total de raízes (B_i) foi o parâmetro utilizado para a observação da principal característica do modelo de distribuição de raízes, cujo perfil de distribuição é mais vertical e profundo quando se usa valores maiores de biomassa. Com isto, cada simulação foi feita para um conjunto de $f\text{-root}$ calculado para valores diferentes de biomassa conforme mostra a Tabela 3. Neste caso os valores pertencentes ao intervalo de 3,0 a 14,4 kg m⁻² correspondem aos mais realísticos da biomassa de raízes encontrados para áreas de floresta amazônica (JACKSON *et al.*, 1996; PAVLIS; JENÍK, 2000; RUSSEI, 1983), e os valores do intervalo entre 20,0 a 100,0 kg m⁻² foram utilizados para buscar uma distribuição mais vertical das raízes (Figura 8).

Tabela 3 – Frações de raízes para cada camada de solo do modelo SiB2 calculadas pelo modelo exponencial descrito pela equação (7).

Experimento	extfrac		
	C1	C2	C3
<i>Controle</i>	0.0000	1.0000	0.0000
Exp. 1	0.0000	0.8000	0.2000
Exp. 2	0.0000	0.2000	0.8000
Exp. 3	0.8453	0.1541	0.0006
Exp. 4	0.6928	0.2984	0.0088
Exp. 5	0.5090	0.4353	0.0557
Exp. 6	0.3582	0.4874	0.1545
Exp. 7	0.1838	0.4350	0.3812

De modo geral, todas as simulações replicaram o arquivo de forçantes de 4 anos (2003 a 2006), onde cada experimento utilizou-se separadamente de uma distribuição de raízes com a profundidade específica, totalizando 8 cenários distintos do perfil vertical do sistema radicular para área da Reserva Biológica do Cuieiras (Figura 8). Os resultados, no entanto, serão analisados apenas para o ano de 2005 onde ocorreu variação significativa da umidade do solo na parte central da Amazônia em decorrência da seca que afetou esta área.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 ANÁLISES OBSERVACIONAIS

Para a avaliação do impacto da variação da distribuição e profundidades das raízes nas simulações dos fluxos de energia e no fluxo de CO₂, foi necessário verificar o comportamento das variáveis que influenciam diretamente estes fluxos através de valores observados na área de estudo. Para isso é analisada, em bases anual e sazonal, a precipitação e a umidade do solo a partir de valores medidos por outros estudos para a série temporal utilizada nas simulações com o modelo SiB2.

4.1.1 Precipitação

No ano de 2005, grande parte da Bacia Amazônica Ocidental viveu a mais grave seca dos últimos 40 anos (MARENGO *et al.*, 2008). Na região central da Amazônia (local onde se localiza a área de estudo), as chuvas ocorridas durante a estação mais úmida, que corresponde ao período de janeiro a maio de 2005 (Figura 9), contabilizaram 1.453,4 mm, valor muito próximo da média histórica que é de 1.444,1 mm na região. Por outro lado, o período mais seco, correspondendo a um total de 591,8 mm de chuva (Figura 9), foi durante os meses de maio (165,8 mm) a outubro (81,2 mm), com o mês de menor precipitação o mês de agosto (20,2 mm).

O déficit de chuvas se intensificou, particularmente, na época seca de 2005 (Figura 9). Essa diminuição da precipitação resultou em uma intensificação do estresse hídrico do solo típico do período seco, conforme será apresentado abaixo, mas que não havia sido registrado nos anos anteriores nas medidas de umidade do solo. O impacto da redução das chuvas neste período e seus efeitos na umidade do solo e nos fluxos de energia e carbono são avaliados nas próximas seções.

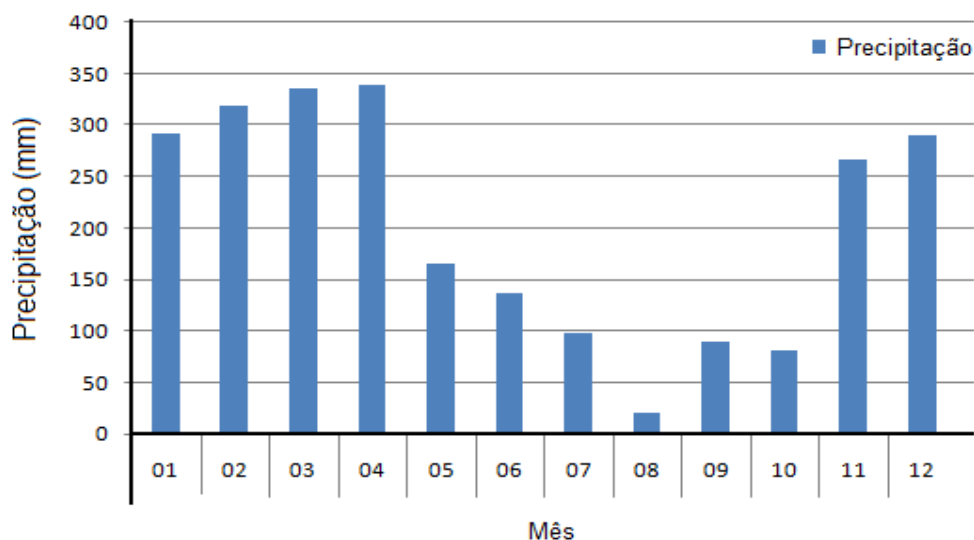


Figura 9 – Precipitação medida na estação meteorológica K34, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM), durante o ano de 2005.

4.1.2 Umidade do solo

O comportamento da umidade do solo (Figura 10) pode ser evidenciado pelas séries temporais de algumas medidas do conteúdo volumétrico de água no solo, obtidas nas profundidades de 0,1, 0,6, 1,0, 1,8 e 4,8 m durante o ano de 2005. Analisando os dados verifica-se a presença de um forte gradiente na umidade no solo entre as camadas superficiais, que apresentam valores variando de 0,25 a 0,35 mm^3 de água/ mm^3 de solo nos primeiros 10 cm, e as camadas mais profundas, onde a umidade do solo tem pouca variação ao longo do ano, e os valores são muito próximos à condição saturada, cerca de 0,55 mm^3 de água/ cm^3 de solo a 4,8 m de profundidade, contra uma porosidade típica de 0,57 mm^3 dos solos da região (FERREIRA *et al.*, 2002).

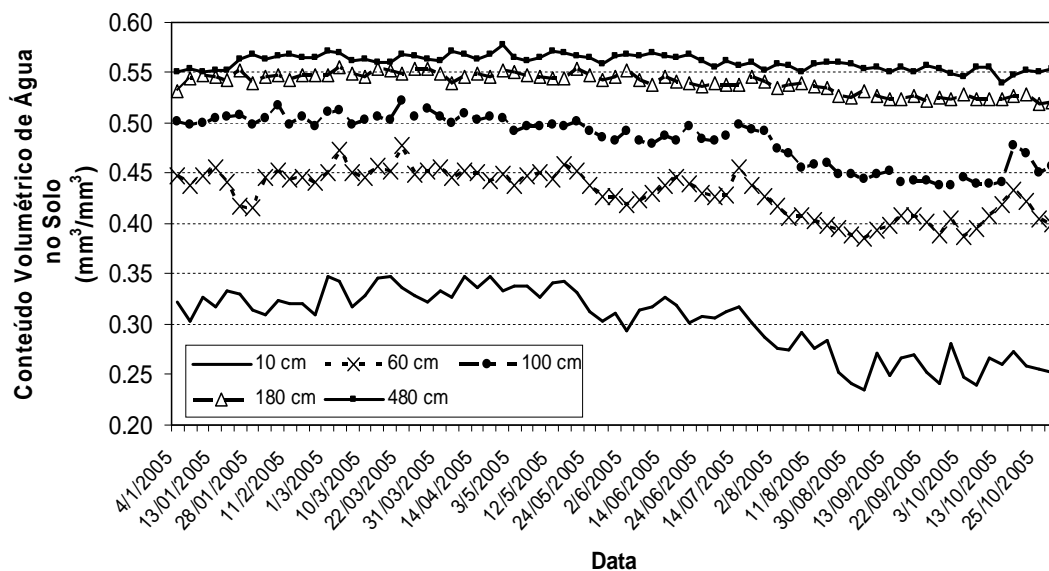


Figura 10 - Água armazenada no solo durante as estações seca e chuvosa do ano de 2005, na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

À medida que as chuvas começam a diminuir, com o início da estação seca, a umidade do solo diminui progressivamente, em resposta a absorção da água armazenada no solo pela vegetação nos seus processos fisiológicos, e conseqüente perda de água através da evapotranspiração, sem que haja a devida reposição da água pela precipitação. Esse efeito extrator atinge desde a superfície, onde ocorre em intensidade maior (Figura 10), e prossegue até os primeiros metros de profundidade do solo. Neste ano de 2005, pode-se observar que tanto no período chuvoso quanto no período seco houve uma variação da água no solo até 2,0 m de profundidade, e que só para nas profundidades de 2,0 a 3,7 m foi observado um aumento no conteúdo de água no solo, apenas durante o período chuvoso.

Uma análise mais detalhada da variação da umidade do solo é apresentada abaixo (Figura 11), considerando as medidas de umidade do solo em todas as camadas monitoradas, e o respectivo padrão de variação (dado pelo Polinômio), no período chuvoso e também no período seco de 2005. Para entendimento da Figura 11 é necessário dizer que o sinal negativo é associado aos processos de perda de umidade do solo (evapotranspiração/percolação) e o sinal positivo aos processos que acrescentam umidade no solo (acumulação/infiltração) nas camadas do solo estudadas.

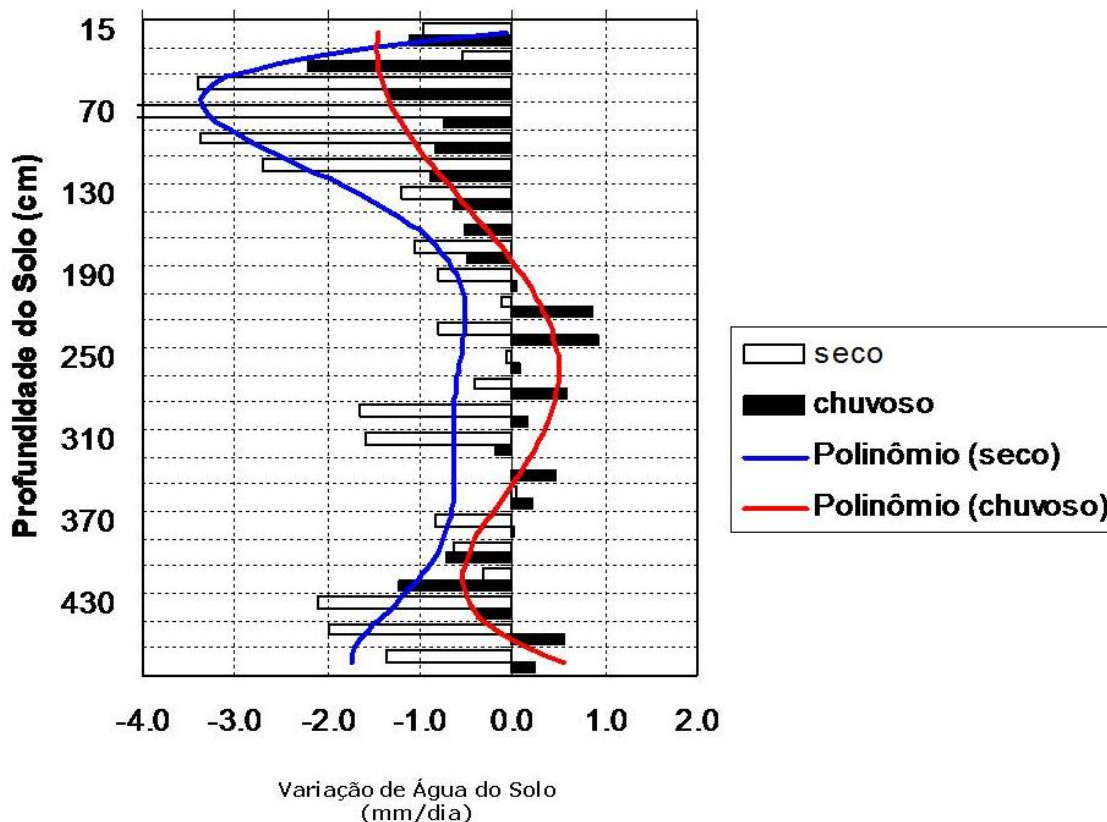


Figura 11 – Variação de água do solo (em mm/dia) ao longo de um perfil de 5 m durante as estações seca e chuvosa no ano de 2005 na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM), com linhas de tendência (polinômio seco e polinômio chuvoso).

No período chuvoso ocorre uma combinação dos processos de evapotranspiração/percolação e acumulação/infiltração, e a camada representada pelo primeiro metro do solo é a principal fonte de umidade para a transpiração dos vegetais, como mostra as variações de água da primeira camada (Figura 11). O período seco é dominado pelo processo de evapotranspiração/percolação, quando a variação da umidade do solo torna-se ainda mais negativa no primeiro metro de solo em comparação ao período chuvoso. Analisando estes resultados nota-se que as camadas mais profundas do solo também passam a experimentar variações negativas na umidade do solo, mesmo sendo com valores menores quando comparadas com as das camadas superficiais. Isto pode indicar que não está havendo uma reposição da água em profundidade nos períodos chuvosos para este ano.

A maior variação na umidade do solo é verificada em torno de 0,40 m de profundidade no período chuvoso (Figura 11), o mesmo ocorrendo perto da

profundidade de 0,80 m no período seco. Isto sugere que o sistema radicular da floresta tem particularidades que garantem a manutenção do equilíbrio hídrico da planta mesmo na época de menor disponibilidade de água.

4.1.3 Evapotranspiração e interceptação

Vários fatores influenciam os fluxos de calor e CO_2 entre a superfície e a atmosfera, dentre estes a umidade do solo desempenha papel fundamental através de dois processos: primeiro, por partição da energia disponível nos fluxos de calor sensível e latente e, segundo, através da fotossíntese, a qual influencia no fluxo de CO_2 para a atmosfera. Na Figura 12 são apresentados os fluxos de calor latente representado em termos de evapotranspiração e interceptação (médias semanais) para o período de maio de 2005 a fevereiro de 2006.

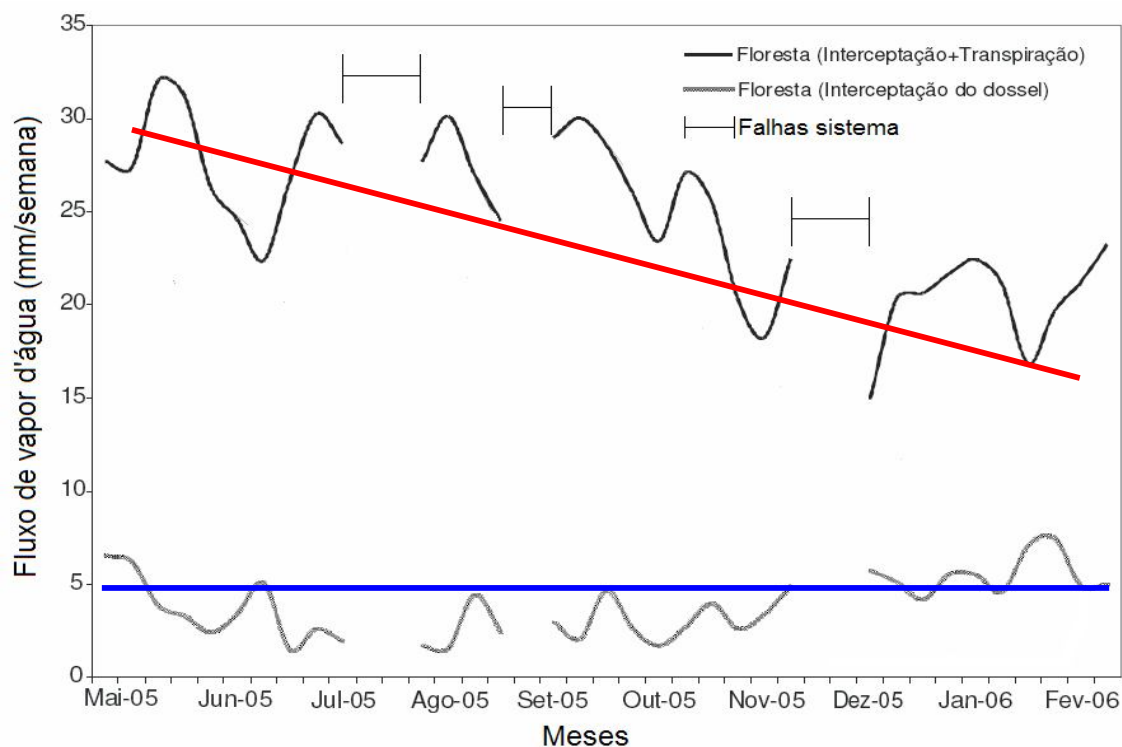


Figura 12 – Fluxo de calor latente representado em termos de evapotranspiração e interceptação, médias semanais, para o período de maio de 2005 a fevereiro de 2006 na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

A evapotranspiração, que é a perda de água do solo por evaporação juntamente com a perda de água por transpiração da planta, apresenta um comportamento variável nos primeiros meses do ano (período chuvoso), mas com certa tendência de diminuir ao longo deste período (linha de tendência, Figura 12). Por outro lado, a interceptação, que é a evaporação direta da precipitação que fica retida em obstáculos, sobretudo em partes das plantas, tende a ficar constante durante o período analisado (Figura 12).

Após o início da estação seca, observa-se uma redução progressiva da umidade do solo (Figura 10), resultando em uma diminuição contínua do fluxo da evapotranspiração ocorrendo principalmente a partir de setembro de 2005. A redução da evapotranspiração de maneira acoplada com a diminuição da umidade do solo, conforme mostra as observações, sugere que neste período em especial, a floresta passou por um período maior estresse hídrico, afetando desta forma a evapotranspiração. Esse fato é comprovado quando são avaliados os dados de interceptação medidos na área durante o mesmo período (Figura 12), tendo em vista que para floresta a maior contribuição a evapotranspiração é dada pelos componentes de transpiração e interceptação.

Colaborando com isto, a perda por interceptação se mantém estável neste período com valores muito pequenos, voltando a aumentar com início das chuvas (Figura 12). Apesar da região em estudo não ter sofrido as conseqüências da diminuição da precipitação de forma tão intensa como ocorreu ao sul da bacia amazônica (MARENGO *et al.*, 2008), a pequena redução da precipitação promoveu alterações significativas nas condições hídricas do solo apresentadas na estação seca de 2005.

A estreita relação entre a disponibilidade de água no solo para os processos fisiológicos das plantas e a evapotranspiração, fazem do ano de 2005 um excelente comparativo para os fluxos de energia simulados pelo SiB2. Esse comportamento de redução progressiva da transpiração permite avaliar a importância da distribuição e profundidade de raízes nesse processo e discutir sobre as reais necessidades de desenvolvimento dos modernos modelos de biosfera para representar os ecossistemas Amazônicos.

A precipitação também é determinante no fluxo de CO₂ e, segundo Meir *et al.* (1996), o CO₂ produzido nos solos de floresta tropical úmida pode representar mais de 80% de todo CO₂ emitido por esse ecossistema. Zanchi *et al.* (2003) observaram

que logo após um evento de chuva ocorre um grande aumento no fluxo de CO_2 , presente nos poros do solo, sendo que após algumas horas ocorre uma diminuição brusca no fluxo de CO_2 da superfície. Os mesmos autores indicam que esta diminuição se dá, principalmente, devido a uma camada de impedimento que a água faz no solo evitando a passagem de CO_2 e com isto diminuindo os fluxos para a atmosfera. Contudo, Sotta *et al.* (2004) afirmam que os solos de floresta tropical apresentam baixa variação de umidade, logo este fator não explicaria grandes variações no fluxo de CO_2 . No entanto, onde a umidade do solo apresenta maior variação, este fator tem sido indicado como um dos mais importantes fatores determinantes para o fluxo de CO_2 .

4.2 ANÁLISE DAS SIMULAÇÕES NUMÉRICAS

4.2.1 Comparação do experimento controle com as observações

4.2.1.1 Balanço de energia

Analisando o balanço de energia, o experimento controle manteve uma distribuição de raízes típica do modelo SiB2, ou seja, concentrando toda a fração de raízes na segunda camada do solo (Tabela 3), mantendo a distribuição de raízes utilizadas por Rocha *et al.* (1996) em um dos experimentos do projeto ABRACOS. Os resultados referentes à simulação controle para o saldo de radiação (R_n), fluxos de calor latente (LE) e sensível (H), e também de fluxo de CO_2 (FCO_2) médios mensais para o ano de 2005 são apresentados na Figura 13.

De acordo com os fluxos simulados observa-se que o modelo representa a energia disponível com valores muito próximos ao observado, inclusive o padrão de aumento que ocorre no período seco (Figura 13). Os fluxos de LE e H variam sazonalmente em concordância com os dados medidos no período de 2005. No entanto, LE é superestimado a partir do início da estação chuvosa até meados do ano. A partir da época de transição do período chuvoso para o período seco (mês de maio e junho, Figura 9) o modelo equipara o fluxo de LE simulado com os valores observados, e na época seca captura a diminuição associada à redução da umidade do solo (Figura 13). No caso do fluxo H o comportamento sazonal é bastante

próximo do observado, porém o modelo superestima H em até 20 W m^{-2} sistematicamente (Figura 13). Este erro pode estar associado ao fato da umidade do solo simulada pelo SiB2 também apresentar um desvio no período seco frente as observações, o que será melhor discutido nos próximos parágrafos.

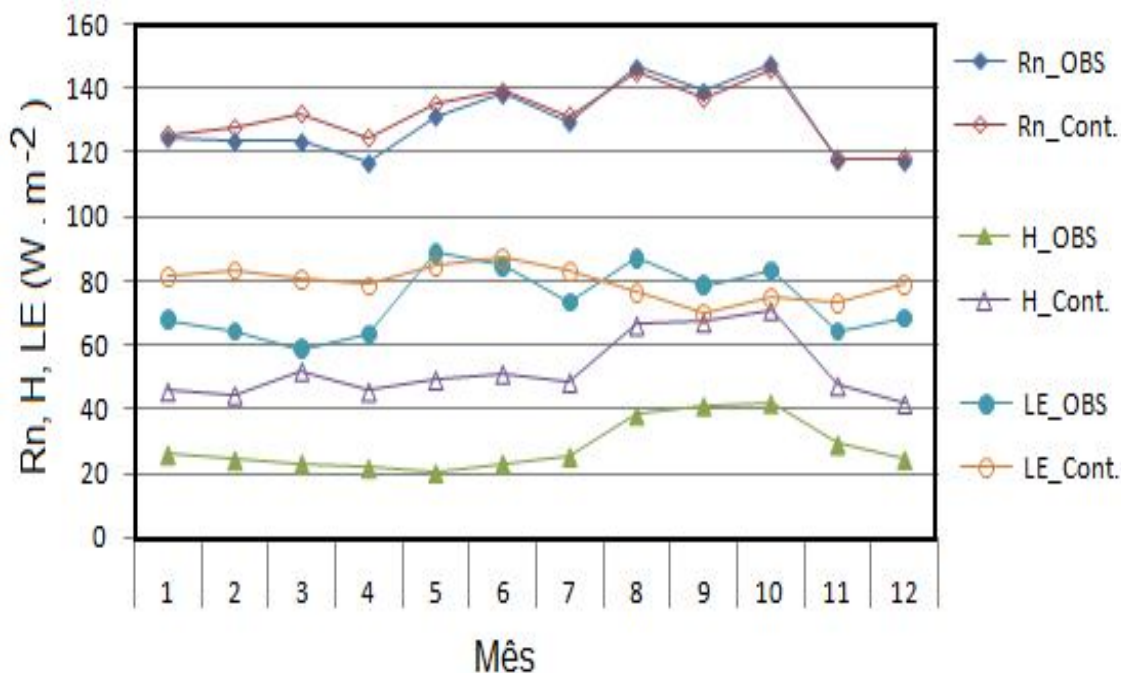


Figura 13 - Saldo de radiação (Rn), fluxos de calor latente (LE), calor sensível (H) e fluxo de CO_2 , observados na estação meteorológica Km 34 (OBS) e simulados pelo modelo SiB2 no experimento Controle (Cont.), em médias mensais, para a reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

Simulações com dois modelos de superfície para uma área de floresta tropical na Amazônia, durante os períodos de agosto a outubro de 1992 (período seco) e abril a julho de 1993 (período úmido), subestimaram LE para a estação seca (ZHENG; WANG, 2007) diferentemente do resultado obtido no experimento controle. No entanto, Correia *et al.* (2005) mostraram, para a mesma área de estudo de Zheng e Wang (2007), que simulações feitas com um terceiro modelo de superfície superestimaram LE e subestimaram H, o qual aparece superestimando durante todo o período de 2005 na simulação de controle neste trabalho.

4.2.1.2 Fluxo de CO₂

O desempenho do modelo SiB2 em simular o fluxo de CO₂ de uma região de floresta é avaliado comparando-se a sazonalidade do ciclo diário médio mensal para os dados medidos no ano de 2005, e simulados no caso controle. A comparação é apresentada na Figura 14.

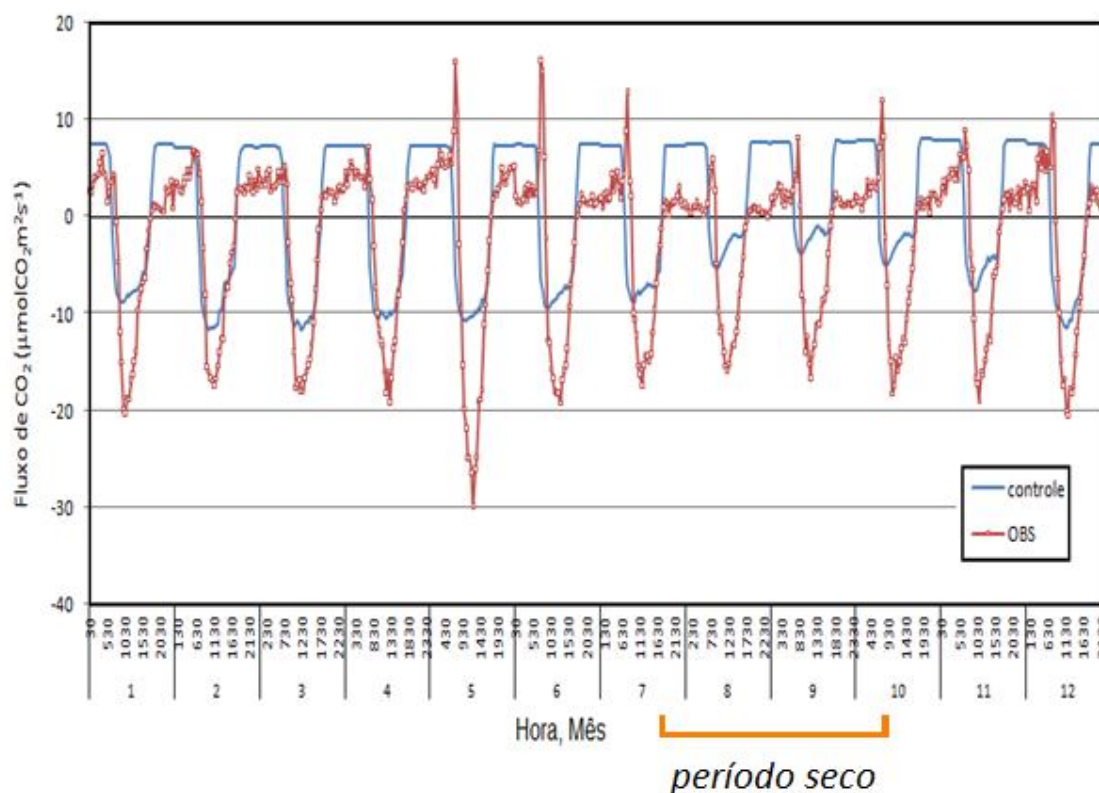


Figura 14 – Fluxo de CO₂ medido na estação meteorológica K34 (Observado, linha vermelha) e simulado pelo modelo SiB2 no experimento Controle (Controle, linha azul), em médias diárias, para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM).

A magnitude do fluxo de CO₂, no que tange a assimilação-respiração, durante o período diurno é subestimada pelo modelo, enquanto o fluxo do período noturno é superestimado (Figura 14). Em termos de sazonalidade o modelo apresenta uma redução mais acentuada que a observada na assimilação de carbono, sendo que esta diferença é intensificada à medida que se aproxima da época seca (Figura 14). A diferença existente entre observação e controle no início da manhã (entre 06:00 e 08:00) pode ser explicada por dois fatores: (1) os fluxos de CO₂ estimados e observados não se referem ao mesmo processo, isto é o modelo estima a troca líquida de CO₂ enquanto que os dados observados se referem ao fluxo de CO₂ e (2)

o armazenamento noturno de carbono abaixo do dossel da floresta não é considerado no modelo. O fluxo de CO₂ foi superestimado na simulação do experimento controle, no período seco de 2005 seu valor é reduzido voltando a aumentar logo no início do período úmido (Figura 14).

4.2.2 Impacto da distribuição e profundidade de raízes

4.2.2.1 Umidade do solo

Dentre os vários processos da dinâmica da água do solo, o armazenamento da água é a mais impactado quando se fala em alteração da profundidade e distribuição de raízes, particularmente se o ambiente considerado é o de floresta. Nesta seção é analisado o efeito da alteração da distribuição de raízes no comportamento da água do solo, de forma numérica, tomando como referência a condição de representação de raízes de maneira uniforme e em única camada tipicamente considerada nos modelos de biosfera utilizados nos estudos com os modelos climáticos globais.

Na Tabela 4 são apresentados os índices de correlação e erro relativo entre a umidade do solo simulada nos vários experimentos com o SIB2 e os dados observados e as saídas da variável umidade do solo em cada um dos experimentos. Para cada camada de solo um experimento distinto mostrou uma maior correlação com os dados observados.

O impacto é quantificado comparando-se os valores médios, observados e simulados, da umidade do solo para as camadas de 0-0,5, 0,5-2,0 e 2,0-4,0 m de profundidade, conforme adotadas no modelo. Tomando-se a simulação de controle como primeira referência quantitativa tem-se que o erro relativamente auto, o qual aumenta com a profundidade da camada, e é 6,91% na camada de 0 a 0,5 m, 21,30% na camada de 0,5 a 2,0 m, e 25,96% na camada de 2,0 a 4,0 m (Tabela 4).

Tabela 4 – Resultados estatísticos das simulações de umidade do solo para a Reserva Biológica do Cuieiras (Ano 2005).

Camada 1 - W(C1)								
Índice	exp-1	exp-2	exp-3	exp-4	exp-5	exp-6	exp-7	Controle
Correlação	0.87	0.85	0.88	0.89	0.88	0.88	0.88	0.86
Erro relativo	-6.19	-4.94	-10.37	-9.65	-8.62	-7.61	-6.26	-6.91
Camada 2 - W(C2)								
Índice	exp-1	exp-2	exp-3	exp-4	exp-5	exp-6	exp-7	Controle
Correlação	0.90	0.90	0.88	0.89	0.90	0.90	0.90	0.90
Erro relativo	-20.50	-18.91	-20.25	-20.55	-20.72	-20.51	-19.78	-21.30
Camada 3 - W(C3)								
Índice	exp-1	exp-2	exp-3	exp-4	exp-5	exp-6	exp-7	Controle
Correlação	0.83	0.81	0.79	0.80	0.81	0.82	0.82	0.80
Erro relativo	-26.27	-26.76	-25.79	-25.87	-25.97	-26.15	-26.49	-25.96

Estes erros elevados estão associados não apenas a imprecisão na representação de processos, mas também no grau de complexidade de sua representação, além das incertezas de propriedades físicas do solo, as quais propriedades muitas vezes heterogêneas e que ainda não foram testadas nos modelos. Por exemplo, uma condição necessária ao SiB2 é a representação de um perfil de solo com características físicas homogêneas, isto é, variações naturais do solo não são consideradas. Este fato pode contribuir para o elevado erro relativo nas simulações, particularmente nas camadas profundas do solo. Apesar dos erros, o SiB2 capturou a variação sazonal da umidade do solo incluindo a forte depleção da umidade do solo nos primeiros dois metros do solo iniciada em meados de 2005 (Figura 10).

Analisando o impacto na alteração da distribuição e profundidade das raízes pode-se agrupar os experimentos em três classes de simulações que consideram: i) raízes concentradas na camada superficial do solo (exp-3, exp-4 e exp-5); ii) raízes concentradas na camada intermediária do solo (exp-1 e exp-6); e iii) raízes concentradas na camada profunda do solo (exp-2 e exp-7), conforme será apresentado abaixo.

A maior concentração de raízes na camada superficial pode ser resultado de uma maior porcentagem de areia nas primeiras camadas ou de camadas

compactadas abaixo, o que por sua vez pode favorecer o estresse hídrico na vegetação (Figura 15), devido às areias serem menos higroscópicas do que as argilas e de, quando compactada, impedir o aprofundamento do sistema radicular. Em uma análise dos resultados, pode-se observar que a umidade do solo calculadas nas simulações tende a superestimar a depleção da umidade do solo (Figura 15).

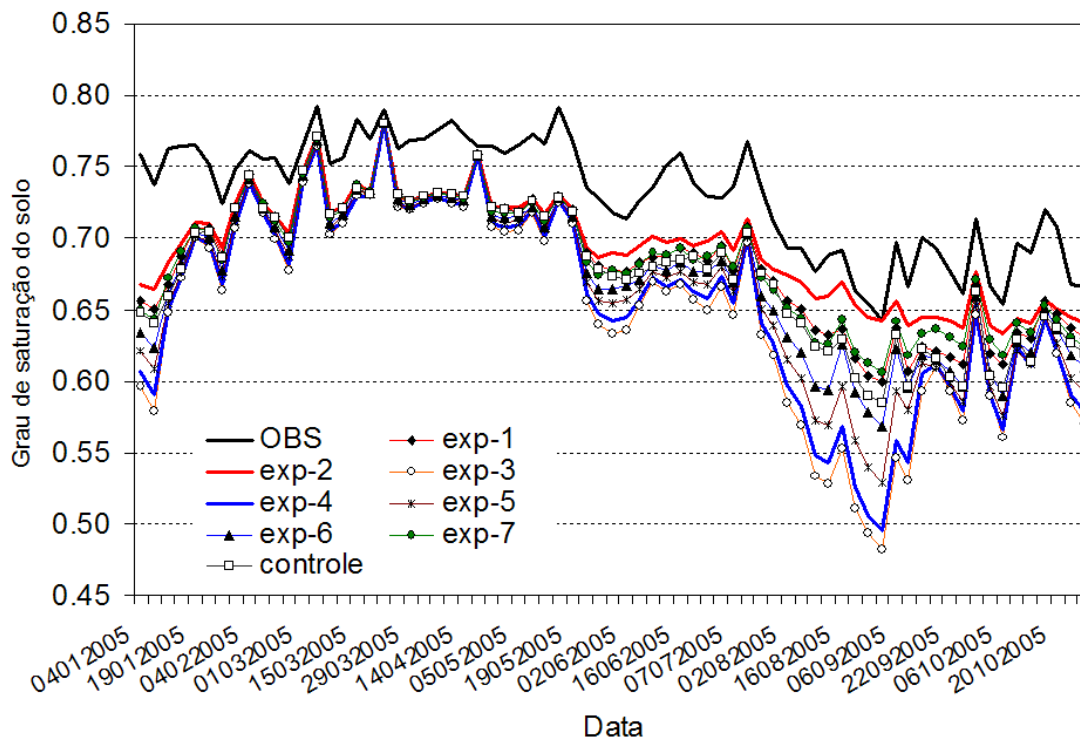


Figura 15 - Umidade do solo, medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na primeira camada de solo (C1).

As simulações com concentração de raízes na camada intermediária (Figura 16) apresentam variações na umidade do solo em torno daqueles simulados no caso controle na mesma camada, mostrando valores maiores de umidade do solo na camada de 0,5 a 2,0 m. Como resultado tem-se uma redução da susceptibilidade do ecossistema ao estresse hídrico frente à consideração de raízes superficiais.

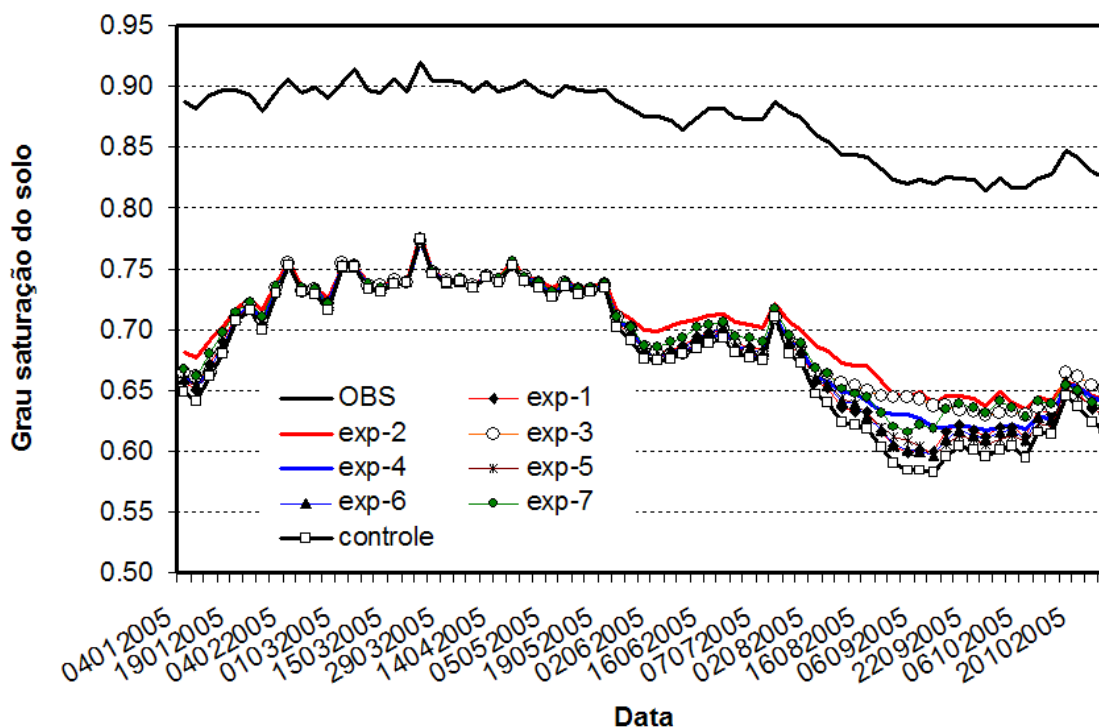


Figura 16 - Umidade do solo, medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na segunda camada de solo (C2).

A consideração de raízes profundas no modelo SiB2 deixa o solo mais úmido nas camadas superficial, intermediária e na terceira camada (Figuras 15, 16, 17 respectivamente) as quais mostram um déficit de umidade. A mudança da fonte de extração de água do solo das camadas superficiais indo até as áreas mais profundas, contribui para que o efeito das variações rápidas nas duas primeiras camadas seja suavizado em função do maior efeito da memória da água do solo na camada mais profunda.

As quantificações do erro relativo e do coeficiente de correlação entre as medidas de umidade do solo e os seus respectivos valores simulados mostram que as melhorias na representação de raízes nos modelos não são universais (Tabela 4). Por exemplo, na representação da umidade do solo na camada superficial o exp-2 representou em um menor erro relativo (-4,94%) enquanto a melhor correlação (0,89) foi obtida no exp-4. Na camada de 50 a 200 cm o exp-2 forneceu os melhores índices, com valores de erro relativo de -18,91% e coeficiente de correlação 0,90. Na camada mais profunda o exp-3 teve o menor erro relativo (25,79%) e o exp-1 a melhor correlação (0,83). Praticamente não existem diferenças entre os

experimentos no período chuvoso para todas as camadas de solo (Figura 15, 16 e 17).

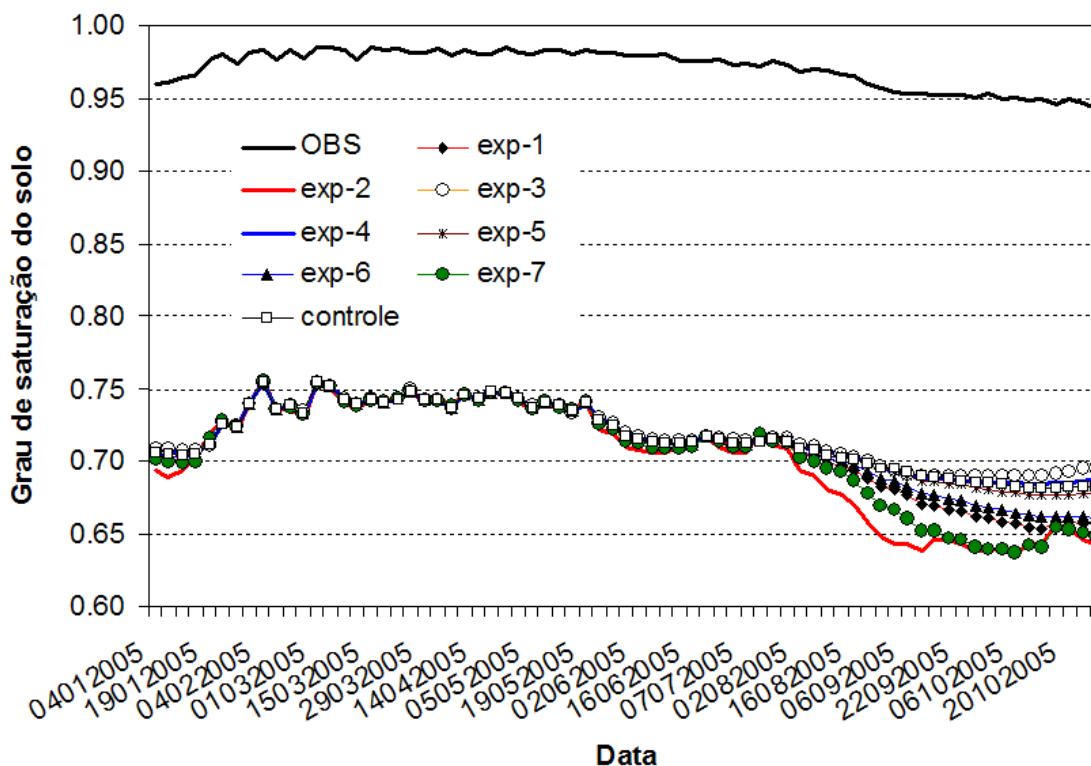


Figura 17 - Umidade do solo, medida na Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) e simulada pelo modelo SiB2, na terceira camada de solo (C3).

Em relação à umidade do solo, todos os experimentos com o modelo SiB2 subestimam a quantidade de água nas três camadas do solo em relação aos resultados observados (Figura 15, 16 e 17). As variações entre os experimentos foram maiores nos períodos de menor precipitação em comparação ao período chuvoso (Figura 17).

4.2.2.2 Fluxos de calor latente, sensível e CO_2

Comparando os fluxos de calor latente (LE) em cada experimento pode-se observar uma redução deste fluxo no período seco de 2005 (Figura 18). Por exemplo, o exp-3 apresenta maior redução de LE. Este experimento apresenta uma distribuição de raízes concentrada na primeira camada do solo mostrando o estresse hídrico desta camada em função da diminuição da precipitação durante a estação chuvosa.

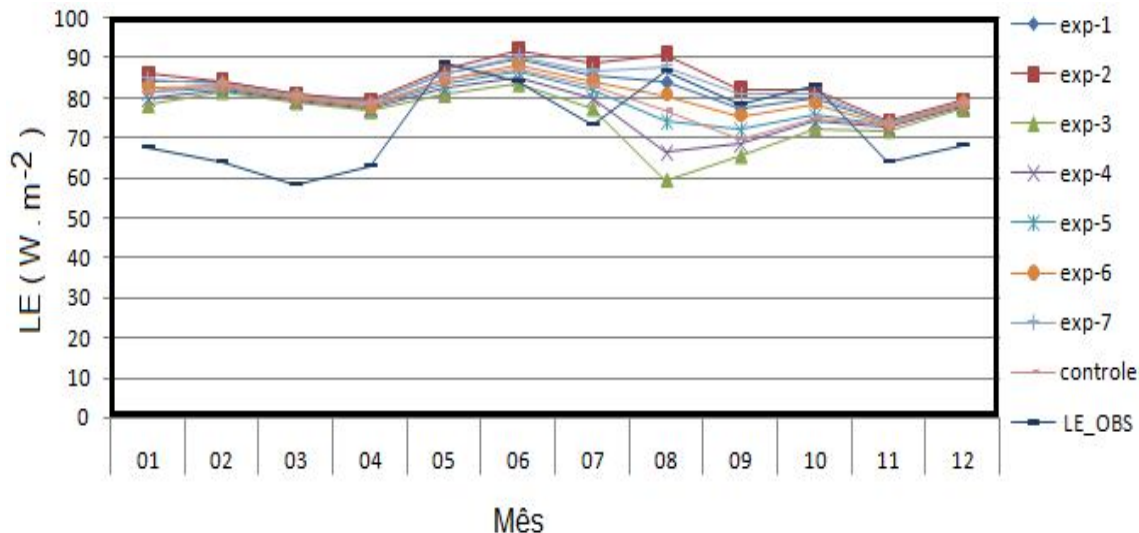


Figura 18 – Fluxo de calor latente (LE) medido na estação meteorológica K34 e fluxos de calor latente (LE) simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005.

Os fluxos de calor sensível simulados apresentam um aumento no período seco de 2005 (Figura 19), sendo que como esperado, o exp-3 resultou no aumento de H. Na avaliação do impacto na alteração na distribuição de raízes, verifica-se que a consideração de raízes superficiais tende a potencializar o efeito do estresse hídrico nos fluxos de calor, no sentido de reduzir LE (Figura 18) e aumentar H (Figura 19).

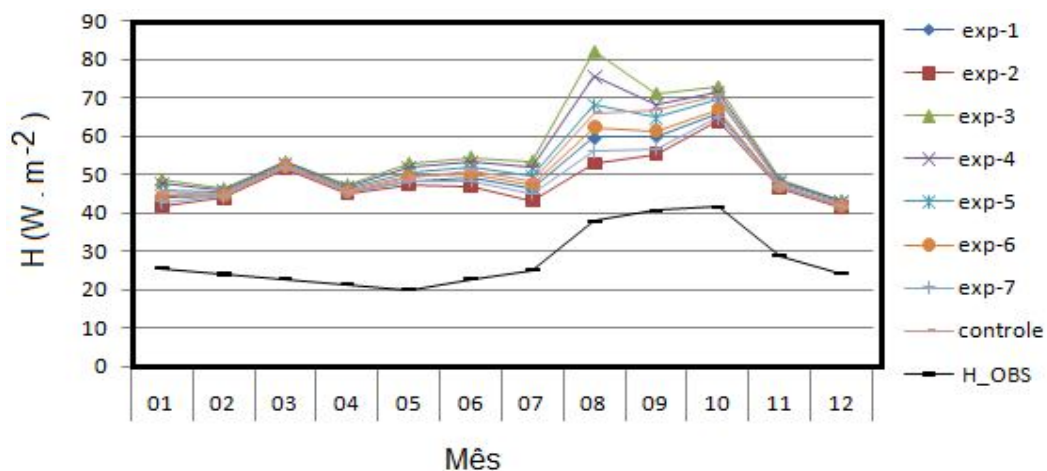


Figura 19 - Fluxo de calor sensível (H) medido na estação meteorológica K34 e fluxos de calor sensível (H) simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005.

Em todas as simulações há redução no fluxo de CO_2 no período seco de 2005 (Figura 20). Este fato, bem como a redução de LE e o aumento de H, é esperado em função da diminuição da precipitação na estação chuvosa deste mesmo ano. Em relação ao fluxo de CO_2 , a comparação entre o caso controle e as observações mostra que o modelo acentua o efeito da estação seca na redução da assimilação de carbono. A modificação da distribuição de raízes impacta principalmente a fotossíntese.

Os fluxos de CO_2 para os experimentos exp-3, controle, exp-2, e exp-7 no mês de agosto de 2005 (são apresentados na Figura 20). Neste período as raízes superficiais ampliaram o efeito do estresse hídrico no calor latente e na fotossíntese, que foram reduzidos. Por outro lado, a consideração de raízes profundas no exp-2 favoreceu um menor efeito de estresse nesses fluxos.

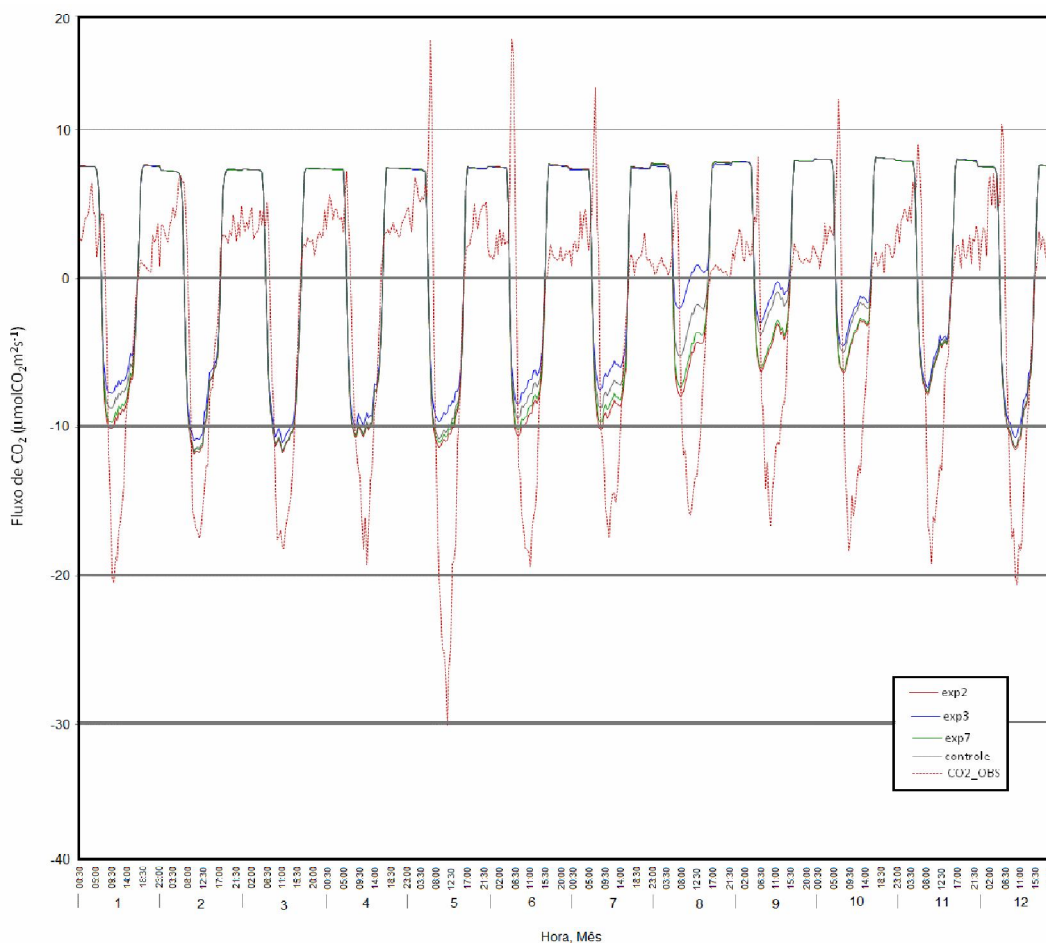


Figura 20 – Fluxo de CO_2 medido na estação meteorológica K34 e fluxos de CO_2 simulados pelo modelo SiB2 para a Reserva Biológica do Cuieiras (Manaus-AM) no ano de 2005.

4.3 DISCUSSÃO

O presente estudo avaliou a importância de se fazer um detalhamento na distribuição de raízes, no modelo de biosfera SiB2 com expectativa de uma subsequente melhoria nas simulações dos fluxos de energia, de CO₂ e no comportamento da umidade do solo, em uma área experimental de floresta natural na Amazônia Central. Os resultados foram comparados com dados medidos em uma área de floresta tropical primária. Contudo uma análise mais detalhada mostra a necessidade de refinamento para representar de maneira mais realística as interações entre solo-planta-atmosfera para um bioma de floresta tropical.

A melhoria na representação da distribuição do sistema radicular levou a observações importantes sobre as limitações do esquema de biosfera SiB2 quanto a parametrização de água no solo adotada no modelo, que generaliza as propriedades físicas do solo para todo o perfil. Esta generalização leva há uma distribuição espacial uniforme da umidade do solo, por desconsiderar a variação dos parâmetros físicos do terreno, tais como a porosidade, densidade e a textura do solo. Entretanto, um ajuste nos modelos físicos, principalmente em regiões tropicais não é fácil, conforme afirma Bruijnzeel (1990), o qual utilizou o exemplo da topografia em terrenos tropicais, que se caracterizam por serem bastante intemperizados. Nestes casos, a aceitação típica de que os gradientes hidráulicos do fluxo subsuperficial ocorrem paralelamente à superfície pode não ser válida.

No esquema de biosfera SiB2 foi possível observar algumas limitações na representação do ecossistema de floresta tropical da região amazônica. O modelo considera um perfil de solo homogêneo, desprezando processos sub-superficiais que interferem no movimento da água no solo como infiltração, percolação, escoamento lateral (superficial e sub-superficial), além de características físicas do solo como textura e densidade variada, entre outros. Estas variáveis podem ser relevantes na representatividade dos fluxos de superfície, por determinarem a quantidade de umidade disponível para as plantas, escoamento, armazenamento, intimamente relacionados aos processos de fluxo que ocorrem na superfície do solo.

A divisão do perfil do solo em apenas três camadas foi também um fator limitante para maiores variações dos experimentos de distribuição vertical do sistema radicular. A adoção de um maior número de camadas de solo requer que a

física adotada no modelo de transferência de água no solo seja modificada, para que fatores como gradientes hidráulicos e matriciais possam ser considerados no trato de multicamadas de pequena espessura.

Outro fator importante, ainda fonte de muita incerteza refere-se à relação que define a resposta da vegetação ao estresse hídrico do solo. Atualmente é utilizada uma formulação genérica que não permite distinguir comportamentos de florestas tropicais sob diferentes regimes de disponibilidade de água no solo. Esse mecanismo pode estar associado também a própria distribuição e dinâmica de raízes como resposta ou adaptação do ecossistema a um regime menos úmido.

Estudos feitos por Feddes *et al.* (2001), assim como diversos outros autores (COSTA; FOLEY, 2000; SHUKLA; NOBRE; SELLERS, 1990), têm mostrado que variações nas características da superfície têm significativo impacto no clima. Contextualizando para a região amazônica, em face ao desmatamento progressivo que vem acontecendo na região, é de grande interesse dispor de um esquema de biosfera parametrizado que represente as características da vegetação e do solo permitindo os estudos dos novos cenários climáticos na Amazônia. Contudo, estes mesmos autores revelam que, para melhorar os modelos, a inclusão de processos físicos apenas não é suficiente. O refinamento dos esquemas representativos das interações entre a superfície e a atmosfera e suas implicações no sistema climático deve considerar aspectos mais completos dos processos incluindo a variação das propriedades físicas da região (características do solo e da vegetação) no sentido de reduzir suas incertezas e melhorar os resultados das simulações.

5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos nos levam às seguintes conclusões:

- A consideração de raízes rasas na modelagem do ecossistema de floresta tropical úmida estudado pode contribuir para a superestimativa da resposta do ciclo de carbono (fluxo de CO_2 e fotossíntese) da floresta e as conseqüentes alterações do clima que levem em consideração a redução da umidade do solo.

- Aparentemente, a consideração de raízes rasas é mais apropriada para regiões com estação seca curta, conforme se caracteriza a área de estudo. E raízes profundas devem favorecer a modelagem dos processos na superfície em áreas com estação seca mais pronunciada. Esta questão leva à necessidade de desenvolvimento da modelagem para incorporar e considerar outros tipos de floresta ou ecossistema na Amazônia, aumentando a diversidade e características da superfície na representação do clima da região.

- A consideração de raízes rasas reduz o fluxo de calor latente e aumenta o fluxo de calor sensível, devido à depleção da umidade do solo na camada superficial quando comparado o caso de referência (observados) com distribuição uniforme de raízes (modelos). Desta forma, a transpiração de floresta simulada pelo modelo SiB2 mostra sensibilidade ao tratamento da distribuição vertical de raízes. A análise das simulações em modo “off-line” indica que a transpiração da floresta torna-se progressivamente mais susceptível ao estresse hídrico quando a fração de raízes na superfície é aumentada. Esta sensibilidade é manifestada principalmente na escala sazonal na época seca.

- Existe a necessidade de obter mais informações de propriedades físicas e relações físicas universais do solo, para serem inseridas nas equações matemáticas do modelo SiB2 a fim de que representem os fenômenos físicos apropriados às condições da região para que outros refinamentos sejam efetivados.

REFERÊNCIAS

ANDREAE, M. O. et al. Biogeochemical cycling of carbon, water, energy, traces gases, and aerosols in Amazônia : The LBA-EUSTACH experiments. **Journal of Geophysical Research**, 107(D20): 8066, doi: 10. 1029/2001JD000524, 2002.

ANJOS, J. T. et al. Propriedades físicas em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 18, p.139-145, 1994.

ARAÚJO, A. C. et al. Comparative measure of carbon dioxide fluxes from two nearby towers in a central Amazonian rainforest: The Manaus LBA site. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, p. 58(1)-58(19), 2002.

ARORA, V. K.; BOER, G. J. A representation of variable root distribution in dynamic vegetation models. **Earth Interactions**, v. 7, n. 6 p.1-19, 2003.

BARLAG, M.; ZHENG, X. Impact of observed vegetation root distribution on seasonal global simulations of land surface processes. **Journal of Geophysical Research**, v. 109, p. 1-17, 2004.

BRUIJNZEEL, L. A. Predicting the hydrological impacts of land cover transformation in the humid tropics: the need for integrated research. In: AMAZONIAN DEFORESTATION AND CLIMATE. John Wiley & Sons Ltd. p. 15-55, 1996.

CARTER, Y.; HULME, M. Interim characterizations of regional climate and related changes up to 2100 associated with the provisional SRES marker emissions scenarios. Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) Secretariat, **World Meteorological Organization**, Genebra, Suíça, 2000.

CERRI, C. C.; VOLKOFF, B. Carbon content in a Yellow Latossol of central Amazon rain forest. **Acta Oecologica**. Oecologia Generalis, v. 8, p. 29-42, 1987.

CORREIA, F. W. S. et al. Calibração do “simplified simple biosphere model-SSiB” para áreas de pastagem e floresta na Amazônia com dados do LBA. **Acta Amazônica**, v. 35 (2), p. 273-288, 2005.

COSTA, M.H., e FOLEY, J. A. Combined Effects of Deforestation and Doubled Atmospheric CO₂ Concentrations on the Climate of Amazonia. **Journal of Climate**, v.13, p.18–34, 2000.

FEDDES, R. A. et al. Modeling root water uptake in hydrological and climate models. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 82 (12), p.2797-2809, 2001.

FERREIRA, S. J. F. et al. Propriedade físicas do solo após extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 32 (3), p. 449-446, 2002.

FERREIRA, S. J. F.; LUIZÃO, F. J.; DALLAROSA, R. L. G. Precipitação interna e interceptação da chuva em floresta de terra firme submetida a extração seletiva de madeira na Amazônia Central. **Acta Amazônica**, v. 35(1), p. 55-62, 2005.

FREITAS, M. d.; CASTRO JÚNIOR, W. E. O ciclo hidrológico: projeções mundiais e Amazônia. In: FREITAS, M. d. (Ed.) **Amazônia e Desenvolvimento Sustentável: um diálogo que todos deveriam conhecer**. Petrópolis, Vozes/Editora. 1ª ed, p. 42-65, 2004.

FISCH, G.; MARENGO, J. A.; NOBRE, C. A. Uma revisão geral sobre o clima da Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 28, p. 101-126, 1998.

GASH, J.H.C.; NOBRE, C.A. "Climatic effects of Amazonian deforestation: Some results from Abracos". *Bulletin of the American Meteorological Society*, v.78, n.5, p.823-830, 1997.

HARRIS, P. P. et al. Calibration of a land-surface model using data from primary forest sites in Amazônia. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 78, p. 27-45, 2004.

IMBUZEIRO, H. M. A. **Calibração do modelo IBIS na Floresta Amazônica usando múltiplos sítios**. 2005. 92f. Dissertação (Mestrado). Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.

INCLÁN, M. G. e FORKEL R. Comparison of energy fluxes calculated with the Penman-Monteith equation and the vegetation models SiB and Cupid. **Journal of Hydrology**, v.166, p. 193-211, 1995.

JACKSON, R. B. et al. A global analysis of root distributions for terrestrial biomes. **Oecologia**, v.108, p. 389-411, 1996.

JIPP, P. H. et al. Deep Soil Moisture Storage and Transpiration in Forests and Pastures of Seasonally-Dry Amazonia. **Climatic Change** v.39, p. 395-412, 1998.

KLAR, E. A. Movimentação da água do solo. In: KLAR, E. A. **A Água no sistema solo-planta-atmosfera**. São Paulo Nobel/Editora. 2^a ed. p. 83-110, 1998.

KLINGE, H. Root mass estimation in lowland tropical rain forest of Central Amazonia, Brasil. I. Fine root masses of a pale yellow latossol and a giant humus podzol. **Tropical Ecology**, v.14, p. 29-38, 1973.

MALHI, Y. et al. Energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107 (D20),8061, 2002.

MARENGO, J. A. et al. The drought of Amazonia in 2005. **Journal of Climate**, v. 21, p. 495-516, 2008.

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

MEIR, P. et al. Soil respiration in Amazônia and in cerrado in central Brazil. In: GASH, J. H. C. et al. (Eds.) **Amazonian deforestation and climate**, p. 319-329, 1996.

MELO-IVO, W. et al. Nutrientes na solução do solo após o corte seletivo de madeira em Floresta Tropical Úmida de Terra Firme ao norte de Manaus, Brasil. In: PROJETO BIONTE – BIOMASSA E NUTRIENTES FLORESTAIS – MCT/INPA, Relatório Final, p. 173-181, 1997.

MITCHELL, J. F. B. et al. On surface temperature, greenhouse gases, aerosols: Model and observations. **Journal of Climate**, v. 10, p. 2.364-2.386, 1995.

NEPSTAD, D. C. et al. The role of deep roots in the hydrological and carbon cycles of Amazonian forests and pastures. **Nature**, v.. 372, p. 666–669, 1994.

NOBRE, C. A., SELLERS, P.J., SHUKLA, J. Amazonian deforestation and regional climate change. **Journal of Climate** v.4, p. 987-998, 1991.

NOBRE, C. A.; SAMPAIO, G.; SALAZAR, L. Mudanças Climáticas e Amazônia. **Revista Ciência e Cultura**, v. 54 (3), p. 22-27, 2007.

PAVLIS, J.; JENÍK, J. Roots of pioneer trees in the Amazonian rain forest. **Original Article**, v. 14, p. 442-455, 2000.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Salesward-Discovery, Curitiba, p. 446, 1996.

ROCHA, H. R. d. et al. Calibration and use of the SiB2 model to estimate water vapour and carbon Exchange at the ABRACOS Forest sites. In: GASH, J. H. C. et al. (Eds.) **Amazonian deforestation and climate**, p. 460-471, 1996.

RUSSEL, C.E. **Nutrient cycling and productivity of native and plantation forest at jarí Florestal, Pará, Brasil**. Doctoral thesis, University of Georgia. University Microfilms International, Ann Arbor, MI, 1983.

SELLERS, P. J. et al. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs. Part I: Model Formulation. **Journal of Climate**, v. 9, p. 676-705, 1996.

SHUKLA, J.; NOBRE, C. e SELLERS P. Amazon Deforestation and Climate Change. **Science**, v. **247**, p. 1322-1325, 1990.

SILVA DIAS, M. A. F. d.; COHEN, J. C. P.; GANDÚ, A. W. Interações entre nuvens, chuvas e a biosfera na Amazônia. **Acta Amazônica**, v. 35(2), p. 215-222, 2005.

SILVEIRA, A. L.d.; LOUZADA, J. A.; BELTRAME, L. Infiltração e Armazenamento no solo. In: TUCCI, C. E. M., (Org.) **Hidrologia: ciência e aplicação**. 3ª ed. Porto alegre, ABRH/Editora da Universidade/UFRGS, EDUSP. p. 335-365, 2004.

SIMON, E. et al. Lagrangian dispersion of ²²²Rn, H₂O and CO₂ within Amazonian rain forest. **Agricultural and Forest Meteorological**, v. 132, p. 286-304, 2005.

SOTTA, E. D. et al. Soil CO₂ efflux in a tropical forest in the central Amazon. **Global Change Biology**, v. 10 (5), p. 601-617, 2004.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Sunderland: Sinauer, 792 p., 1998.

TARBOTON, D. G. **Rainfall – Runoff Processes**. Utah State University, 2003. Disponível em <<http://www.engineering.usu.edu/dtard/rrp.html>>. Acesso em janeiro de 2008.

ZANCHI, F. B. et al. Medição do efluxo de CO₂ do solo: monitoramento com câmeras automáticas sobre floresta e pastagem em Rondônia. In: CONGRESSO DE ECOLOGIA DO BRASIL, 6., 2003, Fortaleza. **Anais**. Fortaleza: Ed. Betania, p. 631-632, 2003.

ZHENG, X. B. et al. The role of root distribution for land climate simulation. **Geophysical Research Letter**, v. 25, p. 4533-4536, 1998.

ZHENG, X. Global vegetation root distribution for land modeling. **Journal Hydrometeorological**, v. 2, p. 525-530, 2001.

ZHENG, Z.; WANG, G. Modeling the dynamic root water uptake and its hydrological impact at the Reserva Jaru site in Amazonia. **Journal of Geophysical Research**, v. 112, p. 1-14, 2007.

ANEXOS

ANEXO A - TABELA DE PARÂMETROS VARIANTES E INVARIANTES NO TEMPO UTILIZADOS NO SiB2.

Tabela 5 – Parâmetros variantes e invariantes no tempo utilizados no SiB2.

	Parâmetro	Modelo (Sellers et al., 1996)	Medido (ZF-2)	Unidade	Referência
--	-----------	-------------------------------------	------------------	---------	------------

(a) Parâmetros morfológicos, óticos e fisiológicos dependentes do bioma.

(Floresta Tropical)

Morfológicos	V	1,0		--	
	X _L	0,1		--	
	Z ₂	35,0	30	m	- Andreae <i>et al.</i> , 2002 - P.P. Harris <i>et al.</i> , 2004
	Z ₁	1,0	0,65h _c (h _c é a altura do canopy)	m	- Simon <i>et al.</i> , 2005
	Z _c	28,0		m	
	l _w	0,05		m	
	l _i	0,1		m	
	D _r	1,5	12	m	- Nepstad <i>et al.</i> , 1994
	D _T	3,5		m	
	α _{V,l}	0,1		--	
	α _{V,d}	0,16		--	
	α _{N,l}	0,45		--	
	α _{N,d}	0,39		--	

Óticos	$\delta_{V,l}$	0,05		--	
	$\delta_{V,d}$	0,001		--	
	$\delta_{N,l}$	0,25		--	
	$\delta_{N,d}$	0,001		--	
	$a_{s,v}$	0,11		--	
	$a_{s,N}$	0,225		--	
Fisiológicos	V_{max0}	1×10^{-4}	70×10^{-6}	$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	Imbuzeiro, 2005
	ε	0,08		mol mol^{-1}	
	m	9	9	--	Imbuzeiro, 2005
	b	0,01		$\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$	
	β_{ce}	0,98		--	
	s_2	313		K	
	s_4	288		K	
	Ψ_c	-200		m	
	f_d	0,015		--	

(b) Parâmetros morfológicos e fisiológicos independentes do bioma.

(Floresta Tropical)

Morfológicos	Z_s	0,05		m	
	G_1	1,449		--	
	G_4	11,785		--	
	D_l	0,02		m	
	\varnothing_s	0,176		rad	
Fisiológicos	S	$2600 \times$ $0,57^{Qt}$		--	
	K_c	$30 \times 2,1^{Qt}$		Pa	
	K_0	$30000 \times$ $1,2^{Qt}$		Pa	
	β_{os}	0,95		--	
	s_1	0,3		K^{-1}	

	s3	0,2		K ⁻¹	
	s5	1,3		K ⁻¹	
	s6	328		K	
	Q _t	(T _c - 298)/10		--	
(c) Parâmetros associados ao tipo de solo (Floresta Tropical) (Latossolo amarelo alico, argiloso, horizontes médios, porosos – oxisol)					
	B	8,52			
Tipo de solo	ψ _s	- 0,36	- 0,049	m	- P.P. Harris <i>et al.</i> ,2004
	K _s	2,5 x 10 ⁶	16,92 mh ⁻¹	m s ⁻¹	*** Ferreira <i>et al.</i> , 2002
	θ _s	0,48	0,458 ***0,57	m ³ m ⁻³	
(d) Parâmetros da vegetação que variam no tempo (Floresta Tropical)					
Variam com o tempo	FPAR				
	L _T	7,0	**** 6,1 ***** 5,5	m ² m ⁻²	****Marques Filho <i>et al.</i> ,2005 *****P.P. Harris <i>et al.</i> ,2004
	N				
	Z ₀			m	
	d		25,8	m	- P.P. Harris <i>et al.</i> ,2004

Onde:

V – Fração de cobertura do dossel

X_L – Fator de distribuição do ângulo da folha

Z₂ – Altura do topo do dossel

Z₁ – Altura da base do dossel

Z_c – Altura de inflexão para densidade foliar
 l_w – Largura da folha
 l_i – Comprimento da folha
 D_r – Profundidade do sistema radicular
 D_T – Profundidade total do solo
 $\alpha_{V,l}$ – Reflectância da folha viva (visível)
 $\alpha_{V,d}$ – Reflectância da folha morta (visível)
 $\alpha_{N,l}$ – Reflectância da folha viva (infravermelho próximo)
 $\alpha_{N,d}$ – Reflectância da folha morta (infravermelho próximo)
 $\delta_{V,l}$ – Transmitância da folha viva (visível)
 $\delta_{V,d}$ – Transmitância da folha morta (visível)
 $\delta_{N,l}$ – Transmitância da folha viva (infravermelho próximo)
 $\delta_{N,d}$ – Transmitância da folha morta (infravermelho próximo)
 $a_{s,v}$ – Reflectância do solo (visível)
 $a_{s,n}$ – Reflectância do solo (infravermelho próximo)
 V_{max0} – Máxima capacidade de RuBisCO no topo do dossel
 ε - eficiência intrínseca de fotossíntese
 m – Fator de resposta estomática
 b – Condutância estomática mínima
 β_{ce} - Coeficiente de acoplamento
 s_2 – Fator de estresse de alta temperatura, fotossíntese
 s_4 – Fator de estresse de baixa temperatura, fotossíntese
 ψ_c – Parâmetro de resposta ao potencial de água
 f_d – Fator de respiração na folha
 Z_s – Rugosidade da superfície
 G_1 – Fator de aumento do coeficiente de transferência de momentum
 G_4 – altura de transição para o coeficiente de transferência de momentum
 D_1 – Espessura da camada superficial do solo
 \varnothing_s – Inclinação topográfica
 S – Especificação da RuBisCO para o CO_2 relativo ao O_2
 K_c – Constante de Michaelis-Menten para o CO_2

- K_0 – Constante de inibição para o O_2
- β_{os} – Coeficiente de acoplamento
- s_1 – Fator de estresse de alta temperatura, fotossíntese
- s_3 – Fator de estresse de baixa temperatura, fotossíntese
- s_5 – Fator de estresse de alta temperatura, respiração
- s_6 – Fator de estresse de alta temperatura, respiração
- Q_t – Coeficiente de temperatura Q_{10}
- B – Potencial de umidade do solo
- ψ_s – Potencial de umidade do solo saturado
- K_s – Condutividade hidráulica do solo saturado
- θ_s – Porosidade do solo
- FPAR – Fração da radiação absorvida pelo dossel
- L_T – Índice de área foliar
- N – Fração verde do dossel
- Z_0 – Rugosidade da Superfície
- d – Deslocamento do plano zero

ANEXO B - ARQUIVO DE PARÂMETROS *DATA1*

@.. SITE LOCATION, NUMBER OF ITERATIONS, INITIAL CONDITIONS (NON-VEGINC)

ivtype istype

1 8

vmax0 gmudmu green zlt

0.0000818 1.0 0.90 6.0

dttrunk ilw ico2m facco2 irespg iitero

1800. 20 1 0 1.0 1 1

zlat zlong time month day year maxit nyfirst nylast

-2.609 -60.209 23.5 01 01. 2003. 1000000 63010101 66123148

tc tg td ta tm ht qa

300.0 300.0 300.0 300.0 300.0 0. 5.5

www1 www2 www3

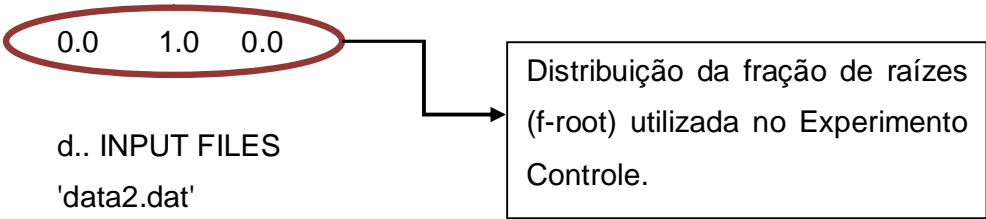
0.717661 0.877713 0.981207

f-root1 f-root2 f-root3

0.0 1.0 0.0

d.. INPUT FILES

'data2.dat'



Distribuição da fração de raízes (f-root) utilizada no Experimento Controle.