

## Calibração do Módulo de Fotossíntese e Condutância Estomática do Modelo SiB2 para a Floresta Tropical Amazônica

*Photosynthesis and Stomatal Conductance Module Calibration of the SiB2 Model for the Amazon Rain Forest*

Marta Llopart<sup>1</sup> e Humberto Ribeiro da Rocha<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Dra, Earth System Physics Section, the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics, Trieste, Itália  
mllpart@ictp.it

<sup>2</sup>Dr, Departamento de Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, Brasil  
humberto@model.iag.usp.br

### Resumo

O trabalho descreve a calibração do módulo de fotossíntese e condutância estomática do modelo de interação Biosfera-Atmosfera Simple Biosphere Model (SiB2) para a Floresta Tropical Amazônica, utilizando medidas micrometeorológicas coletadas no sítio experimental da Floresta Nacional do Tapajós, km 83, PA, nos anos de 2002 e 2003. Primeiramente foi ajustada a respiração do solo em função dos fluxos atmosféricos noturnos de CO<sub>2</sub>, e os parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática otimizados foram: o coeficiente angular da equação de Ball & Berry ( $m$ ), a máxima capacidade de fotossíntese ( $V_{max0}$ ), aperfeiçoando-se o cálculo dos fluxos de calor sensível e calor latente. No módulo final o fluxo total de CO<sub>2</sub> (troca líquida do ecossistema) foi comparado com as observações, com bom desempenho. A nova calibração mostrou uma substancial melhoria em relação à calibração anterior do modelo SiB2 para Floresta Tropical Amazônica.

**Palavras-chave:** SiB2. Calibração. Modelo de superfície. Módulo de fotossíntese e condutância estomática.

### Abstract

The goal of this work has been done the calibration of the Simple Biosphere Model (SiB2) for the Amazon Rain Forest, using micrometeorological measurements collected in the experimental site of the National Forest of Tapajós, km 83, PA, in 2002 and 2003. Firstly was adjusted the soil respiration equation according to the nocturnal atmospheric CO<sub>2</sub> fluxes. The parameters of photosynthesis and stomatal conductance module were calibrated optimizing the slope of the equation of Ball & Berry, maximum photosynthetic capacity ( $V_{max0}$ ), and optimizing the calculation of the fluxes of sensible and latent heat. In the end the total CO<sub>2</sub> flux, or net ecosystem exchange, was compared with the observations resulting in a good performance. The new calibration showed a substantial improvement on previous calibration of SiB2 model for the Amazon Rain Forest.

**Keywords:** SiB2. Calibration. Surface land model. Photosynthesis and stomatal conductance module.

## 1 Introdução

As calibrações de modelos dos fluxos de superfície no contexto de modelos do sistema climático têm sido realizadas com a finalidade de se validar os parâmetros descritores da biosfera. Existem na literatura vários modelos que tratam da transferência solo-planta-atmosfera (SVATs), sendo alguns deles: SiB e SiB2 (Sellers et al. 1986; 1996a,b), BATS (Dickinson et al. 1986), IBIS (Foley et al. 1996), SSiB (Xue et al. 1991). Esses modelos são formulados para representar uma superfície vegetada, sendo necessário calibrá-los para cada tipo de bioma (vegetação e solo). Segundo Gupta et al. (2005) parâmetro é uma característica do modelo que representa uma propriedade invariante ou variante do sistema, e neste caso o sistema refere-se ao bioma. Para que um conjunto de parâmetros ótimos represente o sistema modelado, é necessário que utilizem informações do funcionamento (por exemplo, os fluxos atmosféricos) e/ou dos parâmetros do sistema, por meio de observações de campo, ou valores dos parâmetros retirados da literatura em última instância. Mas, mesmo que os parâmetros tenham sido estimados experimentalmente, podem ser reajustados por meio de uma calibração a *posteriori*. Isto ocorre porque os modelos são simplificações da natureza, e muitas características são simplificadas na sua formulação, o que resulta em compensá-las e tornar o modelo mais eficaz (Nielsen 1992b). Portanto, o parâmetro medido diretamente no ecossistema, mesmo que da melhor forma possível, pode não ser o melhor no contexto do modelo. A calibração é uma forma indireta de se estimar os valores dos parâmetros, ajustados tal que o modelo reproduza o mais fielmente possível o funcionamento do ecossistema, geralmente aferida segundo uma medida de erro, como o erro absoluto médio, o erro médio quadrático ou o erro absoluto médio percentual, que a torna um método objetivo.

Experimentos com Modelos de Circulação Geral (MCGs) demonstram que a circulação atmosférica tem alta sensibilidade aos mecanismos de interação superfície-atmosfera (Sellers et al. 1989), até devido à diversidade de ecossistemas que trocam massa, momentum e calor com a atmosfera, em graus e modos distintos. A atmosfera é fortemente sensível ao albedo da superfície, umidade do solo,

rugosidade e outras características da vegetação e do solo em diferentes escalas de tempo (Sellers et al. 1996a). Por exemplo, Negron-Juarez (2004) reportou que variações nas características da vegetação da região Sudeste do Brasil têm significativo impacto no clima regional. Devido à interação dos processos na interface solo-planta-atmosfera, simula-se esses processos separadamente dos MCGs na forma *off-line* (ou desacoplada, utilizada neste trabalho), para se calibrar e fazer avaliação da sensibilidade do modelo de superfície. Além de aumentar a acurácia dos prognósticos, a calibração abrange um estudo mais detalhado de casos, visando à melhoria dos modelos conforme as necessidades e recursos disponíveis (Pitman 2003), ou seja, a prescrição incorreta dos parâmetros biofísicos da superfície pode conduzir a uma deficiência na representação dos processos da camada limite, o que conseqüentemente afetaria a previsão climática.

Para os ecossistemas de floresta e pastagem na Amazônia, e caatinga do Nordeste, diferentes esquemas de superfície foram calibrados com dados de experimentos de campo (Sellers et al. 1989; da Rocha et al. 1996a; Delire e Foley 1999; Imbuzeiro 2005; Correia et al. 2005, Cunha 2007). Um método de otimização não-linear (Sellers et al. 1989) resultou no melhor ajuste dos fluxos de calor latente e calor sensível para a Floresta Amazônica no *Simple Biosphere Model* – SiB (Sellers et al. 1986). Os parâmetros otimizados reduziram a condutância do dossel em relação aos descritos na literatura. da Rocha et al. (1996a) utilizaram dados em dois sítios de pastagem na Amazônia, durante o projeto *Anglo-Brazilian Amazonian Climate Observation Study* – ABRACOS (Gash et al. 1996), e, com o mesmo algoritmo de Sellers et al. (1989), calibrar o modelo SiB e reportaram que os parâmetros iniciais de pastagem degradada (Nobre et al. 1991) superestimava o fluxo de calor sensível e subestimava a evapotranspiração. O modelo SiB2 (Sellers et al. 1996), que introduziu a parametrização dos fluxos de CO<sub>2</sub>, entre outras alterações do modelo SiB, foi calibrado para a Floresta tropical na Amazônia por da Rocha et al. (1996b) com dados da Reserva Jarú em Rondônia, e obtiveram parâmetros corroborados posteriormente por Sen et al. (2000).

Este trabalho propõe reavaliar a calibração dos parâmetros do módulo de fotossíntese e

condutância estomática do modelo SiB2 para o ecossistema de Floresta Tropical na Amazônia, com medidas micrometeorológicas coletadas em uma área da Floresta Nacional do Tapajós no período 2002 a 2003.

## 2 Material e Métodos

### 2.1 O modelo SiB2

O modelo SiB (*Simple Biosphere Model*; Sellers et al. 1986) representou, quando de sua concepção, um grande avanço na modelagem da superfície continental. Ele é considerado, do ponto de vista biofísico, um modelo pioneiro e realista por basear-se nos processos físicos de interação superfície-atmosfera, concebido para interagir com modelos de circulação geral da atmosfera. O modelo requer que se prescrevam, para cada ponto de grade, os parâmetros físicos, fisiológicos e morfológicos da superfície, supostos uma representação média da vegetação e do solo na área da célula. As mudanças da primeira versão do SiB para o modelo SiB2 (Sellers et al. 1996a,b) incluem: uso de uma parametrização mais realista da condutância e fotossíntese do dossel; a possibilidade de se usar dados de satélite, para também se descrever a fenologia da vegetação (não utilizado neste estudo); um sub-modelo hidrológico modificado da versão de Sellers et al. (1996 a,b), que foi utilizado nesse trabalho.

### 2.2 Sítio experimental e dados utilizados na calibração

A área de estudo está localizada na Floresta Nacional do Tapajós (FNT: 3,017S; 54,97N), no estado do Pará, uma unidade de conservação com uma área aproximada de 545 mil hectares de floresta tropical úmida, com dossel da vegetação de altura média de 40m, a aproximadamente 70km ao sul da cidade de Santarém. A plataforma instrumental foi instalada em junho de 2000, aproximadamente 2km a oeste da entrada do km 83 da Rodovia Cuiabá-Santarém, e 14km a leste da margem oriental do Rio Tapajós. A instrumentação foi

fixada em uma torre de 67m de altura. O modelo foi calibrado baseado em observações micrometeorológicas de fluxo de calor sensível, fluxo de calor latente e fluxo total de CO<sub>2</sub>, a partir das médias horárias. O período de dados compreendeu 2002 a 2003. Maiores detalhes sobre as medidas de fluxos e medidas meteorológicas encontram-se em Goulden et al. (2004), Miller et al. (2004) e da Rocha et al. (2004).

### 2.3 Calibração do módulo de fotossíntese e condutância estomática

Os parâmetros do módulo de fotossíntese e condutância estomática que foram calibrados são: coeficiente angular estomático ( $m$ ), máxima capacidade RuBisco ( $V_{cmax0}$ ) e o parâmetro de fração de folhas verdes do dossel ( $N$ ). A primeira etapa da calibração foi ajustar a equação de respiração do solo ( $R_h$ ), supondo-se por simplicidade que a média anual do fluxo total de CO<sub>2</sub> noturno observado se iguale à média anual de  $R_h$  calculado. A partir da regressão entre as médias diárias noturnas do fluxo total de CO<sub>2</sub> e do grau de saturação do solo calculado na primeira camada ( $W1$ ), prescreveu-se a equação (1).

$$R_h = 4,08 - 3,22 * (W1) + 6,35 (W1)^2 \quad (1)$$

Os testes de sensibilidade do modelo aos parâmetros  $N$ ,  $m$  e  $V_{cmax0}$  foram feitos a seguir, constando da análise dos fluxos de calor latente ( $LE$ ), de calor sensível ( $H$ ), e total de CO<sub>2</sub> à variação destes parâmetros na média sazonal na estação chuvosa (janeiro a junho) e na estação seca (agosto a novembro) dos valores simulados e observados, conforme duas funções de otimização, equações (2) e (3).

$$F_0 = (LE/H + LE)_{obs} - (LE/H + LE)_{sim} \quad (2)$$

em que as frações indicam a taxa evaporativa (aproximada) observada e simulada, respectivamente.

$$F_0 = ((CO_2)_{obs} - (CO_2)_{sim})^2 \quad (3)$$

em que CO<sub>2</sub> é o fluxo de carbono observado e simulado, respectivamente.

## 2 Resultados e Discussão

A primeira etapa do processo de calibração do módulo de fotossíntese e condutância estomática do modelo SiB2 foi introduzir uma equação de respiração heterotrófica (Rh), que o modelo SiB2 não descreve. Segundo Goulden et al. (2004) a respiração do solo, medida com câmaras de solo respondem rapidamente aos eventos de precipitação, e na média é maior durante a estação chuvosa (janeiro a julho) do que na seca (agosto a novembro), com uma diferença média de  $\sim 2 \mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ .

A equação do solo proposta foi calibrada indiretamente por meio da relação polinomial dos fluxos noturnos de  $\text{CO}_2$  médios diários observados com a média diária do grau de saturação do solo na primeira camada (W1). As médias horárias não foram utilizadas para se prevenir a grande oscilação e eventos de turbulência variável. Os fluxos noturnos de  $\text{CO}_2$  mostram-se até certo ponto convenientes para uma estimativa inicial de Rh, uma vez que não envolvem a contribuição da fotossíntese, mas adicionam a respiração autotrófica noturna (folhas e troncos), o que poderia caracterizar o ajuste como, a princípio, levemente superestimado, entre outras simplificações, como a desconsideração do armazenamento temporário de  $\text{CO}_2$  no solo resultante da respiração heterotrófica e da respiração autotrófica das raízes; e o armazenamento de carbono orgânico e inorgânico no solo, entre outras do ciclo completo do C no sistema solo-planta.

Na Figura 1 é mostrada a regressão polinomial entre a média diária do fluxo de  $\text{CO}_2$  noturno observado e a média diária de W1. Na Figura 2 nota-se o padrão de Rh calculado, onde a diferença entre os valores da estação chuvosa e estação seca ( $\sim 2 \mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) está de acordo com o reportado por Goulden et al. (2004). O mínimo de Rh ocorre na estação seca, e devido à ausência de precipitação e estacionariedade da umidade do solo, mostra um valor mínimo e constante com o tempo.

Anterior ao procedimento de calibração propriamente dito foi realizado um teste de sensibilidade a fim de se verificar a influência de cada parâmetro na estimativa dos fluxos turbulentos de energia e  $\text{CO}_2$ , com ênfase na

distinção do padrão sazonal, ou seja, analisando-se as médias sazonais da estação seca e chuvosa.

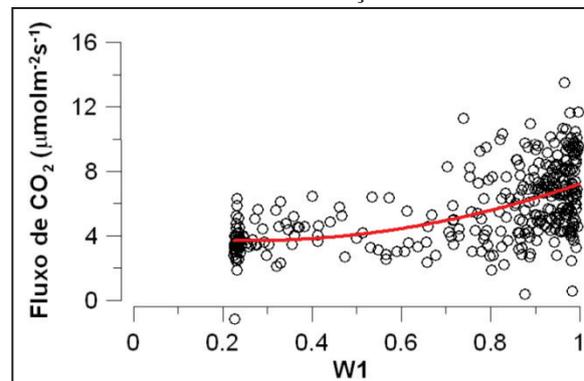


Figura 1- Regressão polinomial entre a média diária noturna de  $\text{CO}_2$  (em  $\mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) e a média diária do grau de saturação do solo na primeira camada (em  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ ).  $R_h = 4,08 - 3,22^* (W1) + 6,35 (W1)^2$

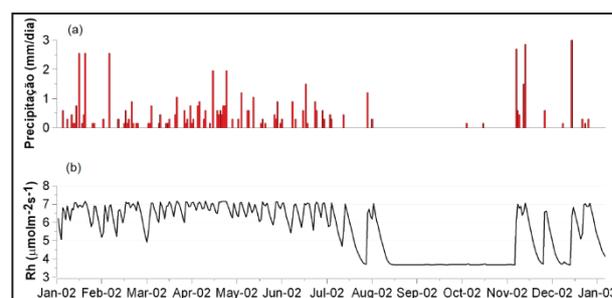


Figura 2 - Médias diárias do ano de 2002 para: (a) precipitação, (em  $\text{mm}/\text{dia}$ ). (b) respiração heterotrófica, (em  $\mu\text{molm}^{-2} \text{s}^{-1}$ )

O parâmetro N, que é variante no tempo, foi variado no intervalo de 0,90 a 1,00 em incrementos de 0,01. A interpretação do termo LE sugere média sensibilidade ao parâmetro, que é superestimado pelo modelo em ambas as estações, e o valor de  $N=0,90$  naquela escala é o que mais aproxima o valor simulado do valor observado (Figura 3a). Para o fluxo de calor sensível há alta sensibilidade ao parâmetro, e, na estação seca, o valor ótimo de N que iguala o fluxo simulado do observado, é de  $N\sim 0,91$  (círculo na Figura 3b). Na estação chuvosa, ocorre sistemática subestimativa pelos fluxos calculados. Para o fluxo total de  $\text{CO}_2$  há um padrão geral de certa insensibilidade ao parâmetro N, mas que mostra boa concordância em ambas às estações (Figura 3c), todavia com certa subestimativa (mais absorção de C) do modelo na estação seca, como sugerido anteriormente.

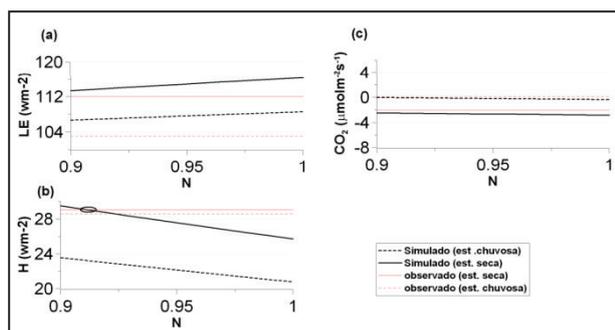


Figura 3 - Médias sazonais, estação seca (linha contínua) e estação chuvosa (linha pontilhada), para os valores simulados (linha preta) e os valores observados (linha vermelha) em função da variação do parâmetro fração de folhas verdes do dossel,  $N$ . (a) Fluxo de calor latente (em  $Wm^{-2}$ ). (b) Fluxo de calor sensível (em  $Wm^{-2}$ ). (c) Fluxo total de  $CO_2$  (em  $\mu molm^{-2} s^{-1}$ )

O parâmetro  $V_{max_0}$  (condição inicial= $81,8 \mu molm^{-2}s^{-1}$ ) é invariante no tempo, foi variado no intervalo de 60 a 100, em incrementos de 0,5. A interpretação do termo LE sugere alta sensibilidade ao parâmetro: o valor ótimo de  $V_{max_0}$  que igualam os fluxos LE simulado e observado é de  $\sim 90$  na estação seca e  $\sim 75$  na estação chuvosa (círculos no painel LE da Figura 4a), onde modelo subestima as observações abaixo destes ótimos. No termo H há também alta sensibilidade ao parâmetro: o valor ótimo de  $V_{max_0}$  que igualam os fluxos H simulado e observado é o de  $\sim 90$  na estação seca e  $\sim 60$  na estação chuvosa (círculos no painel H da Figura 4b), onde modelo subestima as observações acima destes ótimos. Para o fluxo total de  $CO_2$  há um padrão geral de baixa a média sensibilidade ao parâmetro  $V_{max_0}$ , com boa concordância em ambas as estações (Figura 4c): o valor ótimo de  $V_{max_0}$  que igualam os fluxos totais de  $CO_2$  simulado e observado é o de  $\sim 80$  na estação seca e  $\sim 85$  na estação chuvosa (círculos no painel NEE da Figura 4c), onde modelo subestima as observações (maior absorção de C) acima dos ótimos.

O parâmetro  $m$  (condição inicial =9), que é invariante no tempo, foi variado no intervalo de 7 a 10, em incrementos de 1. A interpretação do termo LE sugere alta sensibilidade ao parâmetro: o valor ótimo de  $m$  que igualam os fluxos LE simulado e observado é de  $\sim 10$  na estação seca e  $\sim 8,6$  na estação chuvosa (círculos no painel LE da Figura 5a), onde modelo subestima as observações abaixo destes ótimos.

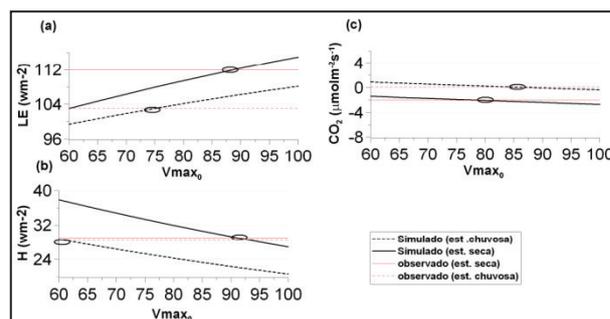


Figura 4 - Médias sazonais, estação seca (linha contínua) e estação chuvosa (linha pontilhada), para os valores simulados (linha preta) e os valores observados (linha vermelha) em função da variação do parâmetro máxima capacidade RuBisCo,  $V_{max_0}$ . (a) Fluxo de calor latente (em  $Wm^{-2}$ ). (b) Fluxo de calor sensível (em  $Wm^{-2}$ ). (c) Fluxo total de  $CO_2$  (em  $\mu molm^{-2}s^{-1}$ )

No termo H há também alta sensibilidade ao parâmetro: o valor ótimo de  $m$  que igualam os fluxos H simulado e observado é o de  $\sim 10$  na estação seca e  $\sim 7,5$  na estação chuvosa (círculos no painel H da Figura 5b), onde modelo subestima as observações acima destes ótimos. Para o fluxo total de  $CO_2$  há um padrão geral de baixa sensibilidade ao parâmetro  $m$ , com boa concordância em ambas as estações (Figura 5c): o valor ótimo de  $m$  que mais aproximam os fluxos totais de  $CO_2$  simulado e observado é o de  $\sim 7$ , que é o inferior da escala (Figura 5c), onde modelo subestima levemente as observações (maior absorção de C) acima dos ótimos.

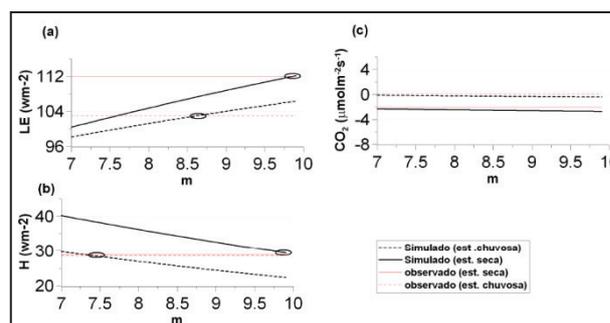


Figura 5- Médias sazonais, estação seca (linha contínua) e estação chuvosa (linha pontilhada), para os valores simulados (linha preta) e os valores observados (linha vermelha) em função da variação do parâmetro  $m$ , coeficiente estomático de Ball & Berry. (a) Fluxo de calor latente (em  $Wm^{-2}$ ). (b) Fluxo de calor sensível (em  $Wm^{-2}$ ). (c) Fluxo total de  $CO_2$  (em  $\mu molm^{-2}s^{-1}$ )

A calibração dos parâmetros fisiológicos foi feita por meio da minimização de duas funções erro, as equações de partição de energia (eq. 2) e

do desvio do fluxo de CO<sub>2</sub> (eq. 3). Para o cálculo das funções foram utilizadas médias sazonais das variáveis envolvidas, posteriormente foram utilizadas na estimativa das funções F<sub>0</sub>. O procedimento de calibração deu-se na seguinte ordem: N, Vmax<sub>0</sub> e m.

O parâmetro N foi variado no modelo SiB2 no intervalo de 0,90 até 1,00 em incrementos de 0,01. O valor que minimiza a função F<sub>0</sub>(H,LE) é N=0,90, sendo que para a estação seca houve melhor ajuste (Figura 6a), e identicamente há minimização em N=0,90 para a função F<sub>0</sub>(CO<sub>2</sub>), entretanto com melhor ajuste na estação chuvosa (Figura 6b). Desta forma, o valor ótimo selecionado foi N=0,90, invariante no tempo. Com isso o parâmetro fração de folhas verdes do dossel foi calibrado para todos os meses com o valor de N=0,90. Este parâmetro pode variar mensalmente no modelo SiB2, mas como foi mostrado na calibração, prescreveu-se um valor constante.

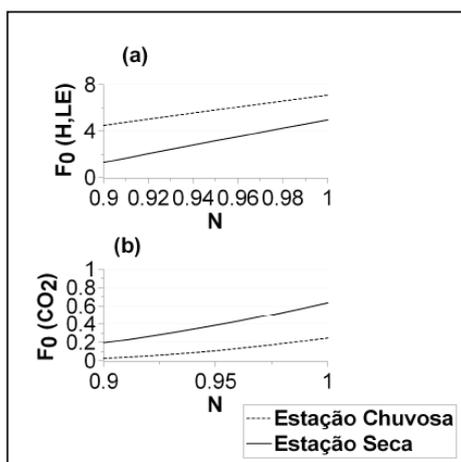


Figura 6 - Funções de otimização do parâmetro N. (a) F<sub>0</sub> (LE,H). (b) F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>)

O parâmetro Vmax<sub>0</sub> foi variado no modelo SiB2 no intervalo de 60 até 100 em incrementos de 5. O valor que anula a função F<sub>0</sub> (H,LE) é Vmax<sub>0</sub>=85 na estação chuvosa e 100 na estação seca (círculos na Figura 7a). Para a função F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>) o ótimo deu-se com Vmax<sub>0</sub> ~90 em ambas as estações (círculos na Figura 7b). Optou-se por selecionar apenas um valor ótimo, invariante no tempo, como a média de todos os ótimos das duas funções erro, em ambas as estações, o que resultou em Vmax<sub>0</sub> =93,75 μmolm<sup>-2</sup>s<sup>-1</sup>.

Após a calibração dos parâmetros N e Vmax<sub>0</sub>, calibrou-se o parâmetro m, através do mesmo procedimento empregado para a calibração dos

parâmetros anteriores. O intervalo de variação de m foi de 7,0 a 10 em um incremento de 0,1.

Na Figura 8 observa-se as funções de otimização, calculadas em função dos fluxos turbulentos para cada variação do parâmetro m.

Analisando-se F<sub>0</sub> (H, LE) para a estação chuvosa, conforme a Figura 8a, o valor de m=8,1 minimiza essa função, já para a estação seca o valor de m=9,2 satisfaz essa condição. Já para F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>), Figura 8b, a função não é minimizada, mas o valor de m=7,0 é o que mais aproxima os valores simulados dos valores observados do fluxo total de CO<sub>2</sub>.

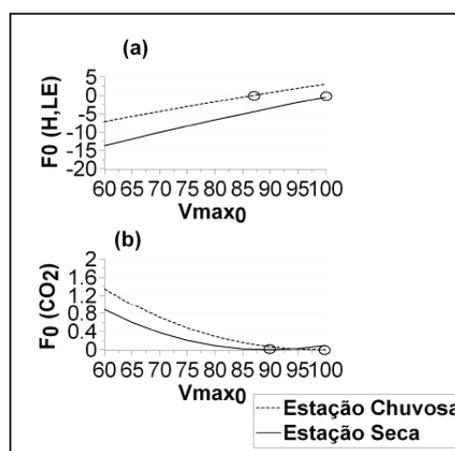


Figura 7 - Funções de otimização do parâmetro Vmax<sub>0</sub>. (a) F<sub>0</sub> (LE,H). (b) F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>)

Fazendo o mesmo procedimento da calibração do parâmetro Vmax<sub>0</sub>, o valor de m foi escolhido através da média entre a média dos valores que minimizaram F<sub>0</sub> (H, LE) e a média dos valores que minimizaram F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>). Com isso, o valor m escolhido foi de m=7,825.

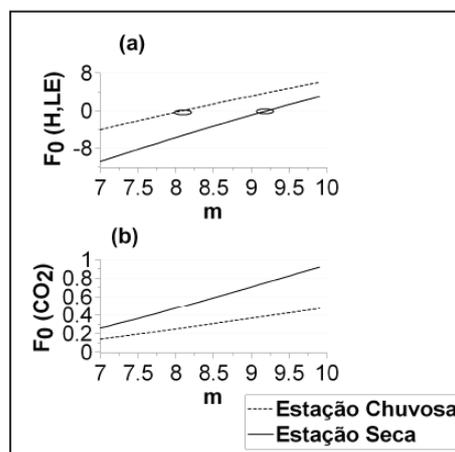


Figura 8 - Funções de otimização do parâmetro m. (a) F<sub>0</sub> (LE,H). (b) F<sub>0</sub> (CO<sub>2</sub>)

O desempenho do modelo na condição otimizada foi analisado comparando-o com a simulação que utilizou parte dos parâmetros iniciais descritos em da Rocha et al. (1996b) e Sen et al. (2000). Nas condições ótimas o fluxo de calor latente foi muito melhor simulado que na condição inicial, havendo uma leve alternância acima e abaixo das observações de  $\sim 10$  mm mês<sup>-1</sup> (Figura 9a). A calibração de condições iniciais descreve adequadamente a sazonalidade, mas superestimou sistematicamente o fluxo de calor latente. Paralelamente, nas condições ótimas o fluxo de calor sensível também melhorou muito a simulação da condição inicial, com certa superestimativa das observações na transição da estação chuvosa para a seca, e subestimativa na estação chuvosa, ambas na escala de  $\sim 10$  mm mês<sup>-1</sup> (Figura 9b). A calibração de condições iniciais subestimou sistematicamente o fluxo de calor sensível.

O fluxo de calor sensível calculado não foi tão bem ajustado com a observação como o fluxo de calor latente, em parte por que na calibração dos parâmetros fisiológicos a função  $F_0(H,LE)$  de certa forma prioriza o termo LE. Nas condições ótimas o fluxo de CO<sub>2</sub> foi muito melhor simulado que na condição inicial, com notável melhoria na sazonalidade, mas mostrou-se, entretanto com o viés de subestimar as observações (maior absorção de CO<sub>2</sub>) principalmente na estação seca, da ordem de  $\sim 1$   $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$  (Figura 9c). A calibração inicial exibe um máximo em setembro devido ao fato do modelo de respiração heterotrófia daqueles autores ser função exclusiva da temperatura do solo, que atinge o máximo na estação seca (Figura 9d). A comparação da produtividade líquida entre as condições inicial e ótima mostra a mesma evolução de fase e sazonalidade, sendo fundamentalmente diferentes na menor capacidade de absorção ( $\sim 1$   $\mu\text{molCO}_2 \text{ m}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) da condição ótima.

Vários fatores explicam o pior desempenho das condições iniciais. O modelo SiB2 calibrado em da Rocha et al. (1996b) e Sen et al. (2000) foi prescrito apenas com 3 camadas no solo, durante 1 ano de simulação, o que não garantia necessariamente que o estado da umidade do solo foi corretamente simulado, principalmente na estação seca. Adicionalmente, a calibração inicial foi feita com apenas 44 dias de dados da estação chuvosa, coletados em 1993 sobre uma

área de Floresta tropical semi-decídua no sul da Amazônia em Rondônia. Portanto a cobertura da sazonalidade dos dados foi muito pequena em comparação com a do presente estudo. Adicionalmente, geram-se obviamente incertezas ao se utilizar a calibração sobre uma área para simular as condições em outra diferente. Mais além, o clima e a resposta funcional dos fluxos de energia no ecossistema da floresta em Rondônia têm certas diferenças de fase e amplitude com relação ao padrão da Amazônia oriental em Santarém (da Rocha et al. 2009).

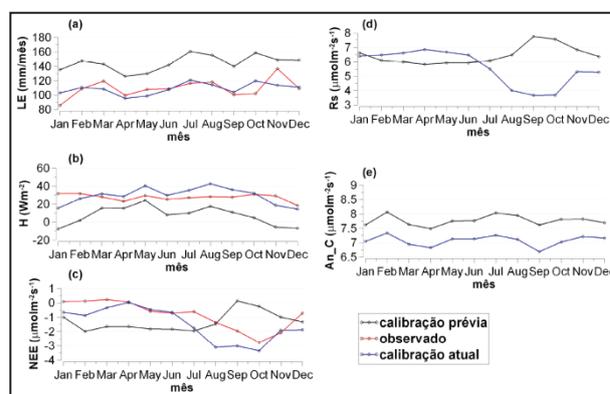


Figura 9 - Médias mensais para o ano de 2002 para a simulação com condições iniciais (linha preta), simulação realizada (linha azul) e valores observados (linha vermelha) para: (a) fluxo de calor latente (em  $\text{Wm}^{-2}$ ). (b) fluxo de calor sensível (em  $\text{Wm}^{-2}$ ). (c) Fluxo total de CO<sub>2</sub> ( $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). (d) Respiração heterotrófica (em  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ). (e) Assimilação líquida de CO<sub>2</sub> (em  $\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$ )

### 3 Conclusões

O modelo de Interação Biosfera-Atmosfera SiB2 foi calibrado para uma área da Floresta Tropical Amazônica, em Santarém, PA, a partir de observações micrometeorológicas coletadas no período de 2002 a 2003. O trabalho reavaliou a calibração do modelo SiB2 para a Floresta de terra firme amazônica, em relações aos parâmetros inicialmente calibrados na literatura.

Os valores otimizados de  $N$ ,  $V_{\text{max}0}$  e  $m$  foram: 0,90; 93,75 e 7,825 respectivamente. O parâmetro  $V_{\text{max}0}$  foi calibrado com um valor maior que o inicial e o valor ótimo de  $m$  e  $N$  foram mais baixos que os valores prescritos inicialmente. Mas mesmo após a otimização, NEE superestimou a absorção de carbono e  $H$  foi levemente superestimado.

Parâmetros como o  $V_{\text{cmax}0}$  e  $m$  são invariantes com o tempo, mas pelo

procedimento de calibração dos mesmos verificou-se que nem sempre o mesmo valor ótimo de uma estação é igual ao da outra estação. Este fato abre espaço para que seja analisada uma variação sazonal destes parâmetros. Outra análise interessante seria a de se prescrever Rh em função de temperatura e do grau de saturação do solo, já que neste estudo só foi considerado o grau de saturação, e com isso talvez se tenha uma melhora na simulação NEE durante a estação seca.

Com a nova calibração do modelo SiB2 para Floresta Tropical Amazônica tem-se uma substancial melhoria na estimativa dos fluxos turbulentos, em relação a calibração anterior para o ecossistema em questão.

## Agradecimentos

Ao CNPq pelo auxílio financeiro, através dos processos: 134978/2006-4 e 249244/2013-6. Aos colegas do Laboratório de Clima e Biosfera do IAG/USP.

## Referências

CORREIRA FWS, ALVALÁ RCS, MANZI AO, GIELOW, R, KUBOTA PY (2005) Calibração do Simplified Simple Biosphere Model – SsiB para Áreas de Pastagem e Floresta Amazônia com Dados do LBA. *ACTA Amazônica*, V.35(2), 273-288.

CUNHA APMA (2007) *Calibração do Simplified Simple Biosphere Model – SsiB para o bioma caatinga do nordeste brasileiro*. Tese de Mestrado em Meteorologia. Instituto Nacional de Pesquisas espaciais –INPE. 135p.

DA ROCHA HR, NOBRE CA, BONATTI JP, WRIGHT IR, SELLERS PJ (1996a) A vegetation atmosphere interaction study for Amazonian deforestation using field data and a single column model. *Quarterly Journal Royal Meteorological Society*, 122: 567-594.

DA ROCHA HR, SELLERS PJ, COLLATZ J, WRIGHT I, GRACE J (1996B) Calibration and use of SiB2 model to estimate H<sub>2</sub>O and CO<sub>2</sub> exchanges in ABRACOS forest sites. in *Amazon Deforestation and Climate*, eds. J. Gash, C. Nobre, J.

Roberts and R. Victória. J. Wiley & Sons, Chichester, UK, p. 459-472.

DA ROCHA HR, GOULDEN ML, MILLER S, MENTON MC, OLIVEIRA LDV, FREITAS H, FIGUEIRA MAS (2004) Seasonality of water and heat fluxes over a tropical Forest in eastern Amazônia. *Ecological Applications*, S22-S32.

DELIRE C, FOLEY JA (1999) Evaluating the performance of a land surface/ecosystem model with biophysical measurements from contrasting environments. *J. Geophys. Res.*, 104 (D14), 16 895–16 909.

DICKINSON RE, SELLERS PJ, WILSON MF (1986) Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) for the NCAR CCM, NCAR/TN-275-STR. *Nat. For Atmos. Res.*, Boulder, Colo.

FOLEY JA, PRENTICE IC, RAMANKUTTY N, LEVIS S, POLLARD D, SITCH S, HAXELTINE S (1996) An Integrated Biosphere Model of Land Surface Processes, Terrestrial Carbon balance and Vegetation Dynamics. *Global Biogeochem. Cycles*, 10, 603-628.

GASH JC, NOBRE C, ROBERTS J, VICTORIA R (1996) An overview of ABRACOS. In: Gash, J.C.; Nobre, C.; Roberts, J.; Victoria, R. (Eds). *Amazonian Deforestation and Climate*, John Wiley, New York, p. 1-14.

GUPTA HV, BEVEM KJ, WAGWNWR T (2005) Model Calibration and Uncertainty Estimation. In: *Encyclopedia of Hidrologic Sciences*, 3 volumes, John Wiley and Sons.

GOULDEN ML, MILLER SD, MENTON MC, DA ROCHA HR, FREITAS H (2004) Diel and seasonal patterns of tropical forest CO<sub>2</sub> exchange. *Ecological Applications* 14: S42–S54.

IMBUZEIRO HM (2005) *Calibração do Modelo Íbis na Floresta Amazônica Usando Múltiplos Sítios*. Tese de Mestrado em Meteorologia Agrícola do Departamento de Engenharia Agrícola da Universidade Federal de Viçosa. 93p.

MILLER SD, GOULDEN ML, MENTON MC, DA ROCHA HR, DE FREITAS HC, SILVA FIGUEIRA AM, DIAS DE SOUSA CA (2004)

- Biometric and micrometeorological measurements of tropical forest carbon balance. *Ecological Applications* 14:S114–S126.
- NIELSEN SN (1992b) Strategies for Structural-dynamic Modelling. *Ecological Modelling*, n.63, pag.91-102.
- NEGRÓN-JUAREZ RIN (2004) *Variabilidade Climática Regional e controle da vegetação no Sudeste: Um Estudo de Observações sobre Cerrado e cana-de-açúcar e Modelagem Atmosférica*. Tese de Doutorado, 159p. Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas. Universidade de São Paulo.
- NOBRE CA, SELLERS PJ, SHUKLA J (1991) Amazonian deforestation and regional climate change, *J. Climate*, 4, 957–988.
- PITMAN AJ (2003) The Evolution of, and Revolution in, Land Surface Schemes designed for Climate Models. *J. Climatology*, 23, 479-510.
- SELLERS PJ, MINTZ Y, SUD YC, DALCHER A (1986) A Simple Biosphere Model (SiB) for use within general circulation models. *J. Atmos. Sci.*, 43(6):505-531.
- SELLERS PJ, SHUTTLEWORTH W, DORMAN J (1989) Calibrating the Simple Biosphere Model for Amazonian Tropical Forest using field and remote sensing data. Part I: Average calibration with field data. *Journal of Applied Meteorology*, 28: 727-759.
- SELLERS PJ, RANDALL DA, COLLATZ CJ, BERRY JA, FIELD CB, DAZLICH DA, ZHANG, COLLELO C (1996a) A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part I: Model formulation. *J. Climate*, 9, 676-705.
- SELLERS PJ, LOS SO, TUCKER CJ, JUSTICE CO, DAZLICH DA, COLLATZ CJ (1996b) A revised land surface parameterization (SiB2) for atmospheric GCMs, Part II: The generation of global fields of terrestrial biophysical parameters from satellite data. *J. Climate*, 9, 706-737.
- SEN OL, SHUTTLEWORTH WJ, YANG ZL (2000) Comparative evaluation of BATS2, BATS, and SiB2 with amazon data. *Journal of Hydrometeorology*, 1:2, 135-153.
- XUE Y, SELLERS PJ, KINTER JL, SHUKLA J (1991) A simplified biosphere model for global climate studies. *Journal of Climate*, v. 4, n.3, p. 345-36.