

Artigo

## Modelagem de Fluxos Superficiais entre uma Cultura de Soja e a Atmosfera

André Luís Diniz dos Santos<sup>1</sup>, Maurício Felga Gobbi<sup>2</sup> , Dornelles Vissotto Jr<sup>3</sup>,  
Celso L. Prevedello<sup>4</sup>, Nelson Luís Dias<sup>2</sup>

<sup>1</sup>*Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.*

<sup>2</sup>*Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.*

<sup>3</sup>*Departamento de Engenharia e Tecnologia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.*

<sup>4</sup>*Departamento de Solos, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, Brasil.*

Recebido em: 1 de Novembro de 2018 - Aceito em: 8 de Março de 2019

### Resumo

Este trabalho implementa um modelo de transferência entre superfície-vegetação-atmosfera para estimar os fluxos de calor sensível e latente, entre outras variáveis, em culturas agrícolas e outras coberturas vegetais. Foram feitas duas implementações distintas para o de resposta estomática das plantas. Estas implementações foram comparadas entre si e com medições de fluxo de calor latente e sensível em uma plantação de soja. Os resultados mostram o impacto das implementações de resposta estomática nos fluxos de calor latente e sensível, e que o modelo possui potencial de aplicações do modelo para previsões operacionais ou para simular cenários de modificações no uso do solo e possíveis mudanças climáticas decorrentes.

**Palavras-chave:** evapotranspiração, fluxos superficiais, modelo superfície-atmosfera.

### Surface Flux Modelling Between a Soy Culture and the Atmosphere

#### Abstract

In this article a soil-vegetation-atmosphere transfer model is implemented to estimate amongst other variables, sensible and latent heat fluxes, in crop fields and other vegetated areas. Two distinct sub-models for carbon fluxes were implemented. We compared the models with each other and with heat flux measurements over a soy field. The results show the impact of the different stomatal response implementations on the surface heat fluxes. We found that the model has good predictive potential for operational applications or for evaluation of potential climate changes resulting from land-use modifications.

**Keywords:** evapotranspiration, surface flux, surface-atmosphere model.

### 1. Introdução

Há um grande interesse no papel das atividades humanas no clima por conta das emissões de gases de efeito estufa (GEE). Dentre estas atividades, a modificação do uso do solo é uma das principais. Neste contexto, um problema importante é o de se avaliar impactos de diferentes tipos de vegetação nas trocas de calor latente e sensível, e nos fluxos de GEE como o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), para diferentes usos de solo em uma mesma área

decorrentes de reflorestamento e desmatamento, mudança de cultura agrícola, alagamento, etc. Igualmente importante é a avaliação do impacto de diferentes abordagens da modelagem da resposta biológica da planta, nos fluxos que delas resultam.

As simulações dos fluxos de vapor d'água, calor sensível, e CO<sub>2</sub> normalmente são feitas com modelos de transferência entre solo/vegetação e atmosfera (chamados de SVATs). Além de serem em si uma ferramenta prognóstica para estimar fluxos de GEE, estes modelos podem

ser acoplados a modelos ecológicos, meteorológicos, climáticos e hidrológicos.

O modelo ISBA (Noilhan e Planton, 1989), em suas várias versões, é um SVAT que vem sendo utilizado amplamente. Decharme *et al.* (2012) avaliaram satisfatoriamente o ISBA integrado a um modelo hidrológico (ISBA-TRIP). Sarrat *et al.* (2009) estudaram a interação de CO<sub>2</sub> entre a superfície e a atmosfera com um modelo de mesoescala acoplado ao ISBA de Calvet *et al.* (1998). Barbu *et al.* (2011) estudaram a assimilação de dados de satélite no ISBA para o caso de vegetação gramínea. Carrer *et al.* (2011) estudaram efeitos do dossel na penetração/absorção de radiação pelas plantas usando o modelo ISBA. Furusho *et al.* (2013) usaram o acoplamento ISBA-TOPMODEL para simulação de mudanças de longo termo no ciclo hidrológico em áreas urbanas e aplicaram a um subúrbio de Nantes na França. Joetzjer *et al.* (2014) aprimoraram o ISBA para prever o balanço de carbono na floresta amazônica. Getirana *et al.* (2014) usaram o ISBA juntamente com outros 13 SVAT's para formar um *ensemble* para cálculo de balanço de massa na floresta amazônica. O modelo ISBA é usado para os cálculos da evolução superfície/solo natural na plataforma SURFEX (Barbu *et al.*, 2014; Napoly *et al.*, 2016). Garrigues *et al.* (2015a,b) estudaram a sensibilidade de modificações no uso do solo nas previsões de longo termo da evapotranspiração calculada pelo ISBA em um estudo de caso sobre cultivo em sítio experimental na França mediterrânea. Canal *et al.* (2014) procuraram relacionar o módulo de captura de água pelas raízes no modelo ISBA com estatísticas de produção agrícola na França.

Niyogi e Raman (1997) compararam diferentes parametrizações de resistência estomática entre os principais modelos SVAT da literatura acoplados a modelos atmosféricos. Um destes modelos é o ISBA (Noilhan e Planton, 1989; Noilhan e Mahfouf, 1996). O modelo de Jarvis (1976) é usado nos SVAT's propostos por Noilhan e Planton (1989), Pleim e Xiu (1995), Viterbo e Beljaars (1995), Bosilovich e Sun (1995), entre outros. Nestes modelos a resposta estomática é modelada de forma simplificada como função de variáveis físicas da atmosfera e solo. Há também esquemas com abordagens mais fisiológicas como Jacobs (1994), Sellers *et al.* (1996), Foley *et al.* (1996), Cox *et al.* (1998), Calvet *et al.* (1998), entre outros.

Segundo Calvet *et al.* (1998), a parametrização do tipo Jarvis fornece boas estimativas da transpiração, mas a resposta estomática à umidade do ar é simulada com dificuldade, e muitas vezes é necessária uma análise aprofundada dos fluxos e da condutância estomática em campo para se calibrar o modelo. De fato, é comum presumir-se que os fatores ambientais agem de forma independente na condutância estomática, enquanto que experimentos de campo sugerem fortes interações entre eles (Collatz *et al.*, 1991; Jacobs, 1994). Além disso, o valor fixo do índice de

área foliar (*IAF*) pode ser uma aproximação grosseira, que não leva em conta as rápidas mudanças na cobertura vegetal associadas a eventos climáticos e práticas de agricultura. Outra limitação da parametrização do tipo Jarvis (Jarvis, 1976) é a falta de retroalimentação devido à concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico. De fato, Calvet *et al.* (1998) apontam que um aumento na concentração de CO<sub>2</sub> induz uma resposta fisiológica das plantas por meio de uma redução na condutância estomática para vapor de água. Este efeito pode influenciar os balanços de energia e água em diversas escalas de tempo. Por isso parametrizações fisiológicas da resposta estomática são mais apropriadas do que as do tipo Jarvis.

O módulo de Jacobs (1994) foi introduzido no modelo ISBA por Calvet *et al.* (1998) visando a melhoria no cálculo da transpiração na vegetação e possibilitando o cálculo de seu fluxo de CO<sub>2</sub>. Manzi e Planton (1994) propuseram uma nova formulação no balanço de energia na superfície para coberturas florestais. Mahfouf e Noilhan (1996) incluíram uma formulação para contabilização dos efeitos de drenagem gravitacional. Habets *et al.* (1999a) incluíram escoamento superficial na escala subgrade. Mascart *et al.* (1995) modificaram a formulação fluxo-perfil para a camada superficial apresentada em Louis (1979), usada em muitos modelos atmosféricos. Boone *et al.* (1999) incluíram uma terceira camada de solo no modelo. A assimilação líquida de CO<sub>2</sub> estimada por SVATs como o ISBA vem sendo utilizada para simular o crescimento e mortalidade das plantas, diagnosticando o índice de área foliar (*IAF*) de forma consistente com o clima e concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico (Calvet *et al.*, 1998; Gibelin *et al.*, 2006, 2008; Brut *et al.*, 2009).

Embora muito se tenha trabalhado no sentido de melhorar a resposta estomática e os fluxos de CO<sub>2</sub> dos SVAT's, não há estudos comparando as abordagens de Jarvis (1976) e Jacobs (1994) quanto aos seus impactos nos fluxos de calor sensível e latente, tão importantes nos modelos (hidro)meteorológicos. Neste trabalho o ISBA é implementado tanto com a abordagem de Jarvis (1976) quanto com a de Jacobs (1994) para a resposta estomática e aplicados para uma cultura de soja. Algumas das modificações são inéditas no ISBA, como a formulação de van Genuchten (1980) de permeabilidade do solo. O objetivo específico do trabalho é a intercomparação entre as duas abordagens e seus impactos nos fluxos de calor latente e sensível, e também comparações entre os modelos e medições micrometeorológicas em uma plantação de soja no oeste do estado do Paraná-Brasil. O modelo ISBA é resumidamente apresentado na Seção 2, os dados medidos e os resultados dos modelos são apresentados na Seção 3, e as conclusões são apresentadas na Seção 4. Agradecimentos e referências são apresentados nas duas últimas seções.

## 2. Materiais e Métodos

As equações prognósticas que compõem o modelo ISBA no presente trabalho são:

$$\frac{\partial T_s}{\partial t} = C_T(R_n - H - LE) - \frac{2\pi}{\tau_d}(T_s - T_2) \quad (1)$$

$$\frac{\partial T_2}{\partial t} = \frac{1}{\tau_d}(T_s - T_2) \quad (2)$$

$$\frac{\partial w_g}{\partial t} = \frac{C_1}{\rho_w d_1}(P_g - E_g) - \frac{C_2}{\tau_d}(w_g - w_{geq}) \quad (3)$$

$$\frac{\partial w_2}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_2}(P_g - E_g - E_{tr}) - D_2 - K_2 \quad (4)$$

$$\frac{\partial w_3}{\partial t} = \frac{d_2}{d_3 - d_2}(K_2 - D_2) - K_3 \quad (5)$$

$$\frac{\partial w_r}{\partial t} = \frac{1}{\rho_w d_r}(P_r - E_r - R_r) \quad (6)$$

onde identifica-se: a temperatura da superfície  $T_s$ , a capacidade térmica da superfície  $C_T$ , a radiação líquida  $R_n$ , os fluxos de calor sensível  $H$  e latente  $LE$ , o período do ciclo diurno  $\tau_d$ , a temperatura da zona de raízes  $T_2$ , a umidade  $w_g$  na camada  $d_1$  do solo, a massa específica da água  $\rho_w$ , os coeficientes hidráulicos de *force-restore* do solo  $C_1$  e  $C_2$ , a precipitação que atinge o solo  $P_g$ , a evaporação a partir do solo nu  $E_g$ , a umidade de equilíbrio entre forças gravitacionais e capilares  $w_{geq}$ , a umidade da zona de raízes  $w_2$ , a profundidade da zona de raízes  $d_2$ , a transpiração da fração seca das folhas  $E_{tr}$ , a umidade nas folhas  $w_r$ , a altura da vegetação  $d_r$ , a precipitação interceptada  $P_r$ , a evaporação na superfície das folhas  $E_r = E_v - E_{tr}$ , a evapotranspiração da vegetação  $E_v$ , o *runoff* da vegetação para o solo  $R_r$ , a umidade  $w_3$  da terceira camada de solo, a profundidade  $d_3$  em que a umidade do solo é insensível a oscilações diurnas,  $D_2$  é a difusão entre as camadas,  $K_2$  e  $K_3$  são drenagens gravitacionais. Os detalhes das deduções, formulações e os valores dos parâmetros acima podem ser encontrados em Manzi e Planton (1994), Clapp e Hornberger (1978), Prevedello (1996), van Genuchten (1980), Mascart *et al.* (1995), Businger *et al.* (1971), Noilhan e Mahfouf (1996), Habets *et al.* (1999b), Habets e Saulnier (2001) e Vissotto (2003).

A resistência estomática  $R_s$  do ISBA original proposta por Jarvis (1976) é:

$$R_s = \frac{R_{smin}}{IAF} F_1 F_2^{-1} F_3^{-1} F_4^{-1} \quad (7)$$

onde  $R_{smin}$  é a resistência mínima do estômato,  $IAF$  é o índice de área foliar e  $F_1$ ,  $F_2$ ,  $F_3$ ,  $F_4$ , coeficientes que parametrizam a resposta do estômato à radiação, ao estresse hídrico do solo, ao déficit na pressão de vapor da atmosfera e à temperatura do ar. A partir de  $R_s$ , as perdas

de água, a evapotranspiração e a assimilação de carbono é diagnosticada. O modelo integrado a este módulo será denominado de ISBA-gs. O fluxo de calor latente  $LE$  é calculado por:

$$LE = L(E_g + E_v) \quad (8)$$

onde  $L$  é o calor latente de evaporação da água.

Além do modelo  $g_s$ , o presente trabalho também implementa um modelo mais fisiológico (Jacobs *et al.*, 1996) chamado de A-gs. Após o acoplamento com o ISBA, as denominações dos modelos serão ISBA-A-gs e ISBA-gs, seguindo uma tendência de denominação da literatura.

O modelo A-gs foi proposto originalmente para processos fisiológicos na escala da folha, onde a assimilação fotossintética líquida  $A_n$  responde a fatores ambientais, e através do seu valor é calculada a condutância de vapor de água nos estômatos  $g_s$  ou o seu inverso, a resistência estomática  $R_s$ , e a conseqüente transpiração (Collatz *et al.*, 1991). Com a condutância estomática  $g_s$  calculada, é possível se estimar a transpiração que acopla o módulo A-gs ao balanço de massa e energia do ISBA.

A abertura dos estômatos é influenciada pelas condições ambientais e por propriedades das plantas: luz,  $CO_2$  disponível, temperatura, umidade do ar, idade da folha e umidade do solo. A condutância estomática  $g_s$  é calculada a partir da assimilação fotossintética por:

$$g_s = \frac{1,6 A_n}{C_s - C_i} \quad (9)$$

sendo  $A_n$  a taxa líquida de fotossíntese, e  $C_i$  e  $C_s$  as concentrações de  $CO_2$  dentro e fora da folha respectivamente.

A concentração atmosférica  $C_s$  de  $CO_2$  foi fixada neste trabalho em 744,8 mg m<sup>-3</sup>. O fator 1,6 na Eq. (9) é devido à diferença entre a difusividade do  $CO_2$  e do vapor d'água. Uma vez calculado  $A_n$ , calcula-se  $g_s$  e  $E_{tr}$  pelas relações acima.

A condutância dos estômatos e a assimilação líquida de  $CO_2$  dependem das concentrações interna e externa de  $CO_2$  nas folhas. Van Wijk *et al.* (2000) demonstraram que a utilização da umidade relativa do ar  $y_a$  não é adequada para a modelagem dos fluxos gasosos foliares, e usaram o déficit de saturação folha-ar  $D_s$  para caracterizar o efeito da umidade do ar na condutância estomática. Outras variáveis que governam a abertura do estômato e sua sensibilidade para o déficit de saturação folha-ar são: a condutância do mesófilo  $g_m$ , o déficit máximo de saturação  $D_{max}$  e o fator de conexão  $f_0$  para  $D_s = 0$ . A Tabela 1 apresenta a faixa de valores dos parâmetros do A-gs dependendo do tipo de planta. Usando o valor típico para  $D_{max}$  de 45 g kg<sup>-1</sup>,  $f_0$  pode ser estimado. Foi definido um valor para  $f_0$  de 0,85 para plantas C3, o que é razoável à luz da literatura. Goudriaan *et al.* (1985) sugerem, para plantas C3, o valor da eficiência máxima de conversão da luz  $\epsilon_0$  de aproximadamente 0,017 mg J<sup>-1</sup> na banda de comprimento de onda da radiação fotossinteticamente ativa (RFA). A dependên-

cia da condutância estomática à temperatura da folha é calculada através de um parâmetro  $Q_{10}$  definido como o crescimento proporcional de um valor do parâmetro em relação ao aumento de 10 °C na temperatura, aplicada às variáveis do modelo fotossintético A-gs. A influência da temperatura na fotossíntese é calculada através das dependências em relação à temperatura do ponto de compensação  $\Gamma$ , à condutância do mesófilo  $g_m$  e à capacidade máxima de fotossíntese  $A_{m,max}$ :

$$X(T) = X(25 \text{ °C}) Q_{10}^{\frac{T-25}{10}} \quad (10)$$

sendo  $T$  a temperatura em graus Celsius,  $X(T)$  o valor da variável  $X$  na temperatura  $T$  e  $X(25 \text{ °C})$  o valor de  $X$  na temperatura  $T = 25 \text{ °C}$ . A Eq. (10) é utilizada diretamente para descrever a resposta do ponto de compensação  $\Gamma$  à temperatura. Para os parâmetros  $g_m$  e  $A_{m,max}$ , a Eq. (10) é modificada utilizando-se os parâmetros de inibição dados por Collatz *et al.* (1992):

$$X(T) = \frac{X(25 \text{ °C}) Q_{10}^{\frac{T-25}{10}}}{\{1 + \exp[0,3(T_1 - T)]\} \{1 + \exp[0,3(T - T_2)]\}} \quad (11)$$

onde  $T_1$  e  $T_2$  (ver Tabela 1) são as temperaturas a partir das quais são verificadas características fisiológicas de inibição da condutância estomática. É suposta uma proporcionalidade com a capacidade catalítica da enzima Rubisco, segundo Collatz *et al.* (1992). Para temperaturas fora da faixa ideal de cada espécie, as plantas apresentam inibição da fotossíntese, translocação mais lenta de carboidratos, menor respiração, inibição do metabolismo de proteínas, geração de espécies reativas de oxigênio, crescimento lento e murcha foliar. Estas modificações são causadas por disfunções em processos metabólicos e pela inibição de reações enzimáticas.

A parte fotossintética do modelo A-gs é baseada em Goudriaan *et al.* (1985) que pressupõem a distinção entre duas condições: RFA como fator limitante na saturação de  $\text{CO}_2$ , e  $\text{CO}_2$  como fator limitante na saturação de intensi-

dade de luz. Com RFA sendo fator limitante,  $A_n$  é linearmente relacionada com a quantidade absorvida. Segundo Thornley *et al.* (1976), para altas intensidades de luz e concentrações limitadas de  $\text{CO}_2$ , a taxa de fotossíntese coincide com o valor assintótico da curva de resposta da luz  $A_m$ . Assim, para valores pequenos de  $C_i$ ,  $A_m$  é relacionado linearmente com a concentração  $C_i$  de  $\text{CO}_2$ . Propõe-se assim uma função resposta empírica para combinar as respostas da assimilação fotossintética líquida  $A_n$ , da concentração de  $\text{CO}_2$  e da luz. A assimilação fotossintética líquida  $A_n$  é limitada pelo déficit de luz de acordo com a equação de saturação aplicada à RFA representada por  $I_a$ :

$$A_n = (A_m + R_d) \left\{ 1 - \exp \left[ \frac{-\epsilon I_a}{A_m + R_d} \right] \right\} - R_d \quad (12)$$

A Eq. (12) prediz uma taxa ilimitada de fotossíntese para altas intensidades de luz e altas concentrações de  $\text{CO}_2$ . Porém, a taxa de fotossíntese será limitada por um valor máximo  $A_{m,max}$  relacionado com a habilidade real das plantas em alocar os produtos do ciclo de Calvin. Baseado em Thornley *et al.* (1976),  $A_m$  é obtida utilizando uma resposta saturada similar à Eq. (12).

Goudriaan *et al.* (1985), entre outros, observaram que a umidade deve afetar diferentemente  $A_n$  e  $g_s$ . Com o aumento de  $D_s$ ,  $g_s$  pode ter seu valor reduzido antes que o valor de  $A_n$  seja reduzido. Mesmo se ambos tiverem seus valores reduzidos, a taxa com que  $g_s$  diminui pode ser maior do que a taxa com que  $A_n$  diminui, o que resulta em um decréscimo na razão  $C_i/C_s$ . Ambos os efeitos podem ser levados em conta pela equação a seguir, que é utilizada para completar o conjunto de equações do modelo A-gs. Assim, as concentrações de  $\text{CO}_2$  fora e dentro da folha obedecem à seguinte relação:

$$f \equiv \frac{C_i - \Gamma}{C_s - \Gamma} = f_0 \left( \frac{1 - D_s}{D_{max}} \right) \quad (13)$$

A Eq. (13) descreve o efeito da concentração relativa de  $\text{CO}_2$  dentro e fora da folha e modela também a resposta do estômato com relação à umidade, gerando a solução simultânea da  $A_n$  e da razão  $C_i/C_s$ , permitindo soluções iterativas ou analíticas, e onde, no presente trabalho usou-se  $D_{max} = 45 \text{ g kg}^{-1}$  e  $f_0 = 0,85$ . No módulo A-gs, a variável aplicada para caracterizar o efeito da umidade do ar nos estômatos é o déficit de saturação folha-ar  $D_s$  porque segundo Van Wijk *et al.* (2000) a umidade relativa do ar não é apropriada para a modelagem da troca gasosa nas folhas.

O modelo A-gs até aqui descrito não contempla o estresse hídrico no solo, e, portanto, calcula a assimilação de  $\text{CO}_2$  e a condutância estomática potenciais. Se as camadas de solo na zona de raízes não forem capazes de fornecer água o suficiente para o pleno desenvolvimento

**Tabela 1** - Valores típicos dos parâmetros utilizados no modelo A-gs para plantas C3.

Variável (X)	$X(25 \text{ °C})$	$Q_{10}$	$T_1$ (°C)	$T_2$ (°C)
$\epsilon_0$ (mg $\text{CO}_2 \text{ J}^{-1}$ RFA)	0,017	—	—	—
$\Gamma$ ( $\mu\text{mol mol}^{-1}$ )	45	1,5	—	—
$A_{m,max}$ (mg $\text{m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ )	2,2	2,0	8	38
$g_m$ (mm $\text{s}^{-1}$ )	0,1-20	2,0	5	36
$f_0$	0,2-1	—	—	—
$D_{max}$ (g $\text{kg}^{-1}$ )	10-600	—	—	—
$g_c$ (mm $\text{s}^{-1}$ )	0,0-1,5	—	—	—

da vegetação, a transpiração será reduzida mesmo se os estômatos estiverem abertos por conta de condições atmosféricas favoráveis. O ISBA-A-gs do presente trabalho usa a ideia proposta por Calvet *et al.* (2004) para incluir o estresse hídrico do solo através de nova parametrização da condutância do mesófilo  $g_m$ . Biologicamente, a queda dos níveis de umidade do solo na zona de raízes afeta de maneira diferente a condutância estomática de diferentes espécies que possuem defesas específicas para enfrentar o estresse hídrico.

A modelagem gs tipo Jarvis é uma alternativa simplificada ao modelo A-gs acima. Nesta abordagem, a partir da condutância estomática calculada a partir da Eq. (7), assimilação fotossintética  $A_n$  é calculada por

$$A_n = \frac{g_s(C_s - C_i)}{1,6} \quad (14)$$

onde  $C_i$  é calculado pela Eq. (13) com parâmetros dados pela Tabela 1 e respectivas correções dadas pela Eq. (10).

A seguir são mostrados resultados de fluxos de calor latente e de calor sensível calculados com os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs, comparados a medições feitas em uma plantação de soja. Serão mostrados também fluxos de CO<sub>2</sub> calculados por cada modelo.

### 3. Resultados e Discussão

Os modelos foram aplicados a duas safras (2001 e 2002) de plantação de soja na Fazenda São Lourenço (o conjunto de experimentos são referidos doravante por SLOU, e as duas séries por SLOU2001 e SLOU2002) no oeste do estado do Paraná. O objetivo foi o de se modelar fluxos de calor latente (evapotranspiração) e sensível e comparar com medições em SLOU. Também foi possível modelar a assimilação líquida de CO<sub>2</sub>  $A_n$ , embora não tenha havido medições de fluxos de CO<sub>2</sub> para fins de validação. Portanto comparações com dados de CO<sub>2</sub> não foram feitas. Em SLOU foram utilizados para as condições iniciais dados de medições da temperatura na superfície e no solo, bem como de umidades medidas em 3 níveis de solo. Para a umidade retida na vegetação não houve dados de medição. O modelo simulou continuamente toda a safra de soja nos respectivos anos, sendo que nosso interesse é apenas no período de pleno desenvolvimento da cultura de soja para o qual o modelo já estava em regime estabilizado. Assim sendo, o período modelado não sofreu influência das condições de inicialização. Durante o processo de calibração e validação, ficou evidente que os modelos funcionam melhor em condições meteorológicas sem chuva, e, portanto, os resultados mostrados a seguir se restringem a tais condições de tempo.

Os experimentos micrometeorológicos SLOU foram realizados no município de Santa Terezinha do Itaipu, no oeste do estado do Paraná com posição geográfica 25°-

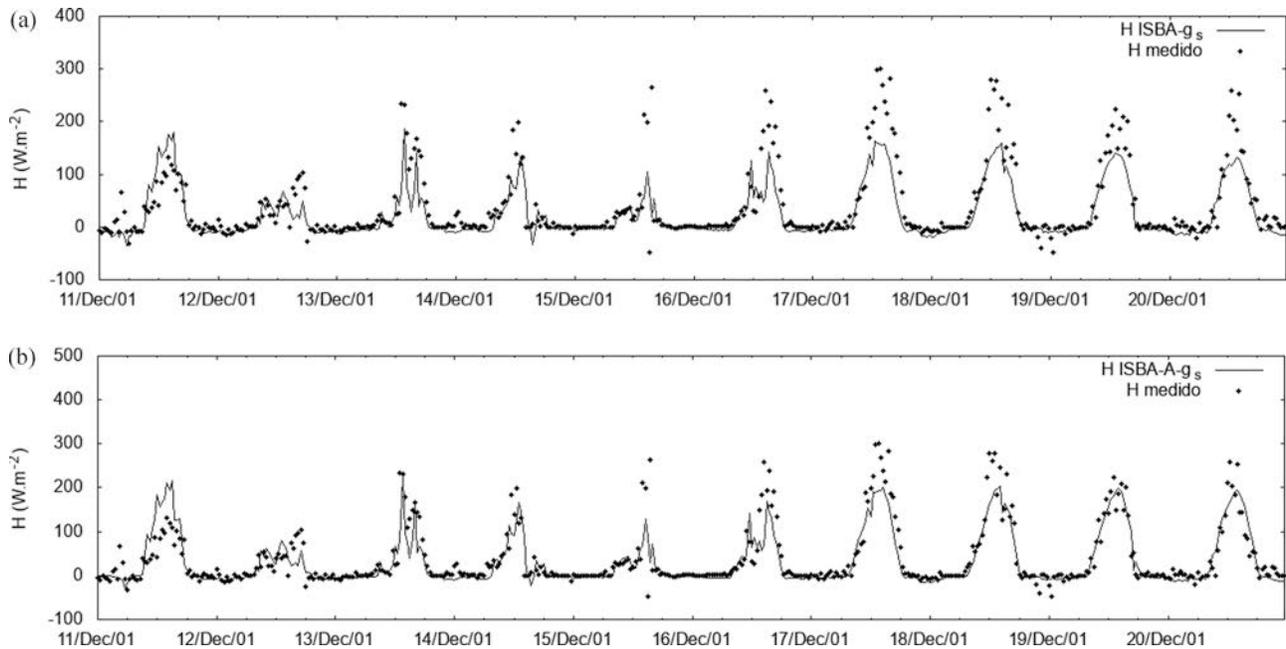
27,929' S e 54°24,651' W, a uma altitude de 285 m e aproximadamente 10 km de distância do lago de Itaipu. Foram medidas séries de dados tanto para forçar quanto para testar os modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs. Os detalhes encontram-se em Vissotto (2003).

A calibração manual foi realizada usando-se a primeira metade dos dados das duas séries. Uma análise de sensibilidade inicial foi necessária para se testar vários parâmetros. Essa fase de análise de sensibilidade assim como a calibração envolveu centenas de simulações cujos resultados não estão mostrados aqui. Os detalhes desta fase podem ser encontrados em Santos (2016). Notou-se que a espessura das camadas de raízes e subraízes foram os parâmetros mais impactantes nos resultados e os valores adotados após calibração de cada um dos dois modelos foram, para o ISBA-gs:  $d_1 = 0,1$  m,  $d_2 = 0,85$  m,  $d_3 = 2,5$  m, e  $d_r = 0,5$  m; e para o ISBA-A-gs:  $d_1 = 0,1$  m,  $d_2 = 1$  m,  $d_3 = 1,6$  m, e  $d_r = 1$  m. Todos os outros parâmetros foram mantidos os mesmos nos dois modelos, exceto pela diferença conceitual na modelagem da resistência estomática.

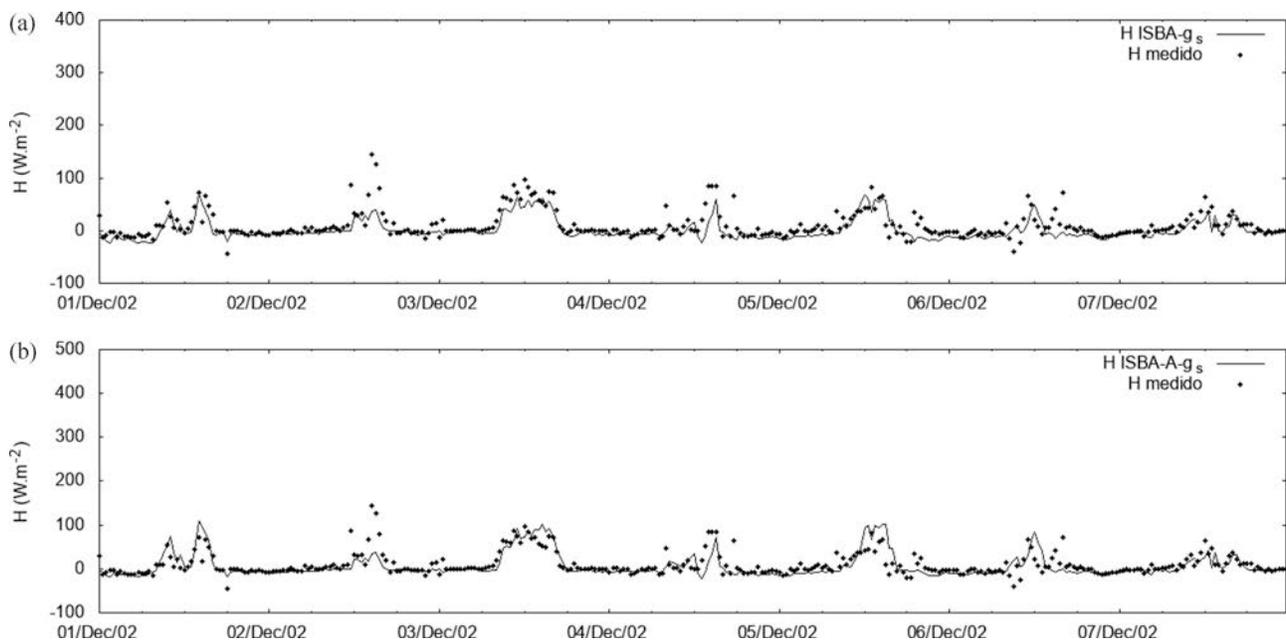
As Figs. 1-4 mostram os fluxos de calor sensível e latente na superfície calculados pelos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs para 2001 e 2002, juntamente com as observações. Cada figura apresenta resultados dos dois modelos (ISBA-gs no painel superior e ISBA-A-gs no inferior) para facilitar a comparação visual. Na Fig. 5 são mostradas séries da assimilação líquida de CO<sub>2</sub>, calculadas por ambos os modelos e nota-se uma deficiência do modelo ISBA-gs advinda da modelagem do tipo Jarvis da condutância no estômato, que é o fato da mesma não contemplar a respiração celular realizada pela vegetação no período noturno, e conseqüentemente não há valores negativos de  $A_n$ . Além dessa diferença nos valores noturnos, também nos picos é possível notar uma clara discrepância entre os dois modelos, principalmente no ano de 2002, onde as diferenças chegam à ordem de 100%.

Para quantificar a acurácia dos modelos ISBA-gs e ISBA-A-gs foram calculadas as estatísticas: viés (EM), erro absoluto médio (EAM), raiz do erro quadrático médio (REQM), coeficiente de correlação (R), e eficiência de Nash-Sutcliff (ENS), dos fluxos de calor latente e sensível. Estes resultados estão resumidos na Tabela 2. É possível notar que os modelos apresentam desempenhos similares em termos destas estatísticas, mas houve uma tendência clara do modelo ISBA-A-gs apresentar melhoria mais significativa em  $H$  do que em  $LE$  quando comparado ao ISBA-gs. É interessante notar que após calibração de cada modelo, os fluxos de calor obtidos foram bastante similares, porém isso não é necessariamente verdadeiro para a assimilação de carbono, que se mostrou bastante diferente em cada modelo, devido a diferentes modelagens dos processos de fotossíntese.

Foram feitas também simulações com valores comuns de alturas de camadas de solo e vegetação ( $d_1, d_2, d_3$



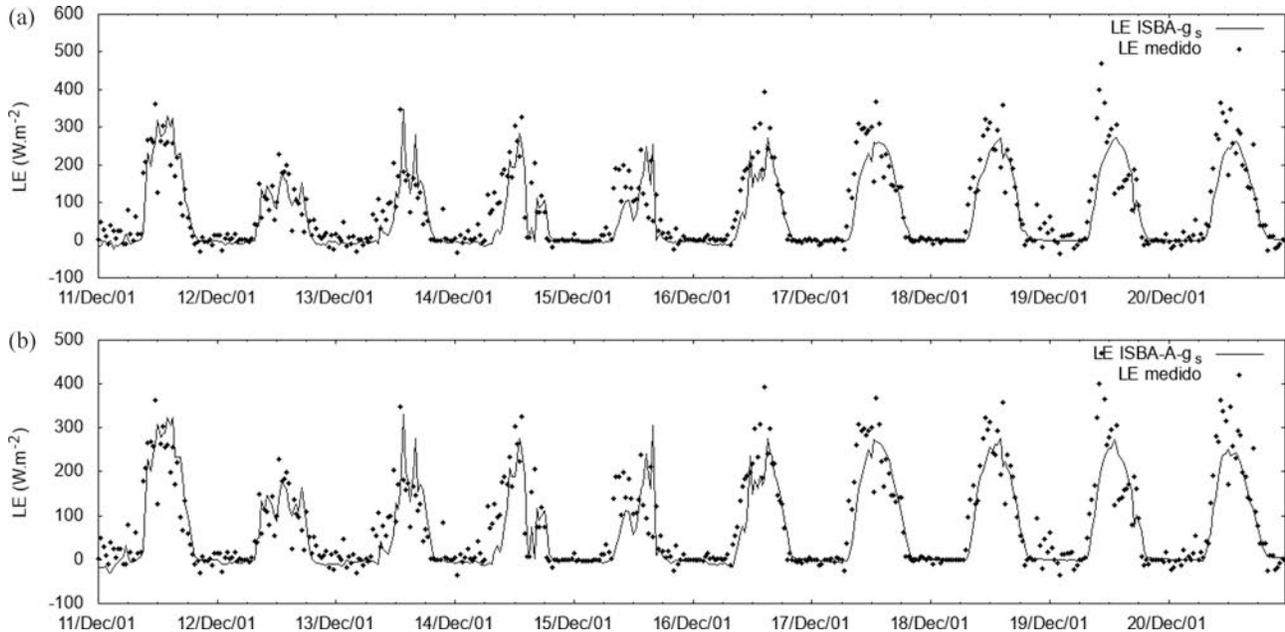
**Figura 1** - Fluxo de calor sensível modelado (a) ISBA-gs/(b) ISBA-A-gs e medido, dezembro/2001.



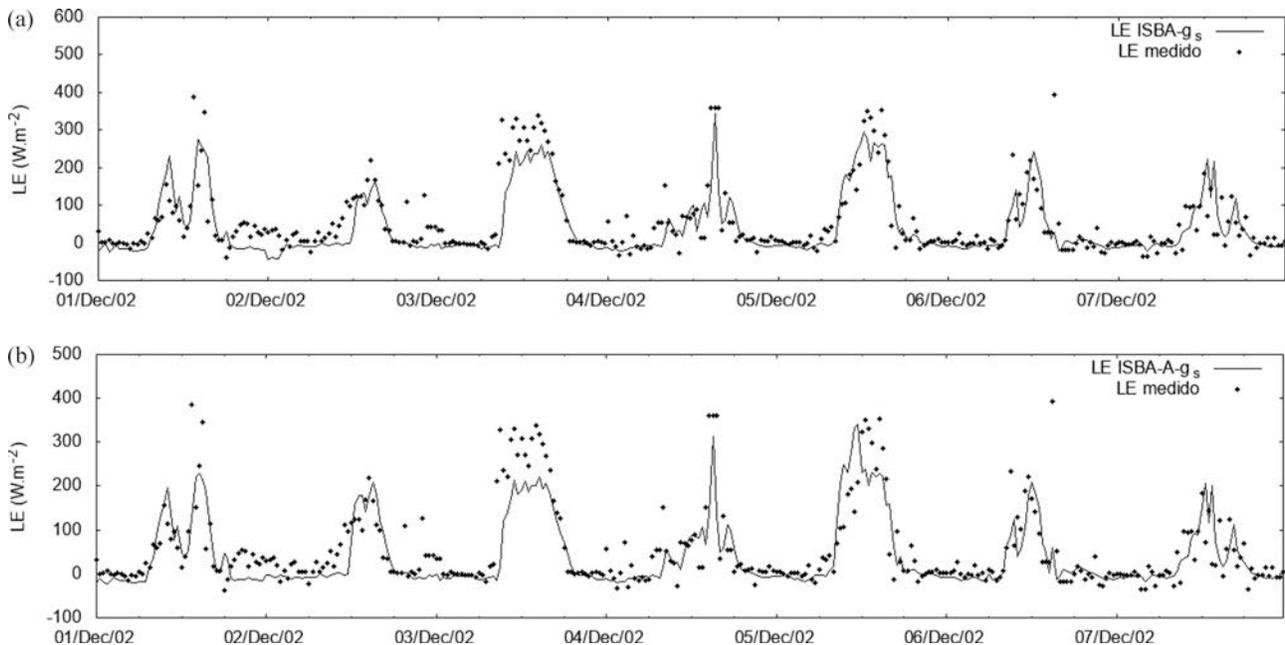
**Figura 2** - Fluxo de calor sensível modelado (a) ISBA-gs/(b) ISBA-A-gs e medido, dezembro/2002.

e  $d_r$ ) para os dois modelos, ou seja, mantendo todos os parâmetros idênticos exceto pelas diferentes modelagens para a resistência estomática. Estes resultados não estão mostrados aqui por brevidade, mas os resultados mostraram grande diferenças entre os modelos para  $H$ ,  $LE$ , e também para os fluxos de carbono, o que comprova a importância na modelagem dos processos que controlam os estômatos das plantas.

Embora não tenha sido apresentada qualquer comparação de fluxos de  $CO_2$  com dados medidos (devido à falta destes últimos no experimento realizado), a comparação feita entre os dois modelos mostra o maior potencial de realismo do ISBA-A-gs, que, entre outras vantagens, quantifica fluxos negativos noturnos, inexistentes no modelo ISBA-gs.



**Figura 3** - Fluxo de calor latente modelado (a) ISBA-gs/(b) ISBA-A-gs e medido, dezembro/2001.



**Figura 4** - Fluxo de calor latente modelado (a) ISBA-gs/(b) ISBA-A-gs e medido, dezembro/2002.

#### 4. Conclusão

Os modelos apresentam diferenças nos valores de fluxos de calor e de evapotranspiração. Pela comparação com os dados medidos, o modelo ISBA-A-gs apresentou vantagem em relação ao ISBA-gs. A grande sensibilidade dos modelos com relação às alturas das camadas de solo que compreende a zona de raízes parece ser um desafio importante a ser enfrentado, já que pelo menos para a vegetação em estudo (cultura agrícola), este parâmetro

precise ser variável de acordo com o crescimento das raízes. Acredita-se que a modelagem do crescimento dinâmico da vegetação, incluindo a espessura de solo na zona de raízes, possa resolver esta questão, e este tema encontra-se em desenvolvimento pelos autores. Futuramente, também, os modelos serão comparados com medições em outros tipos de vegetação e as comparações irão incluir fluxos de carbono e variabilidade da fitomassa.

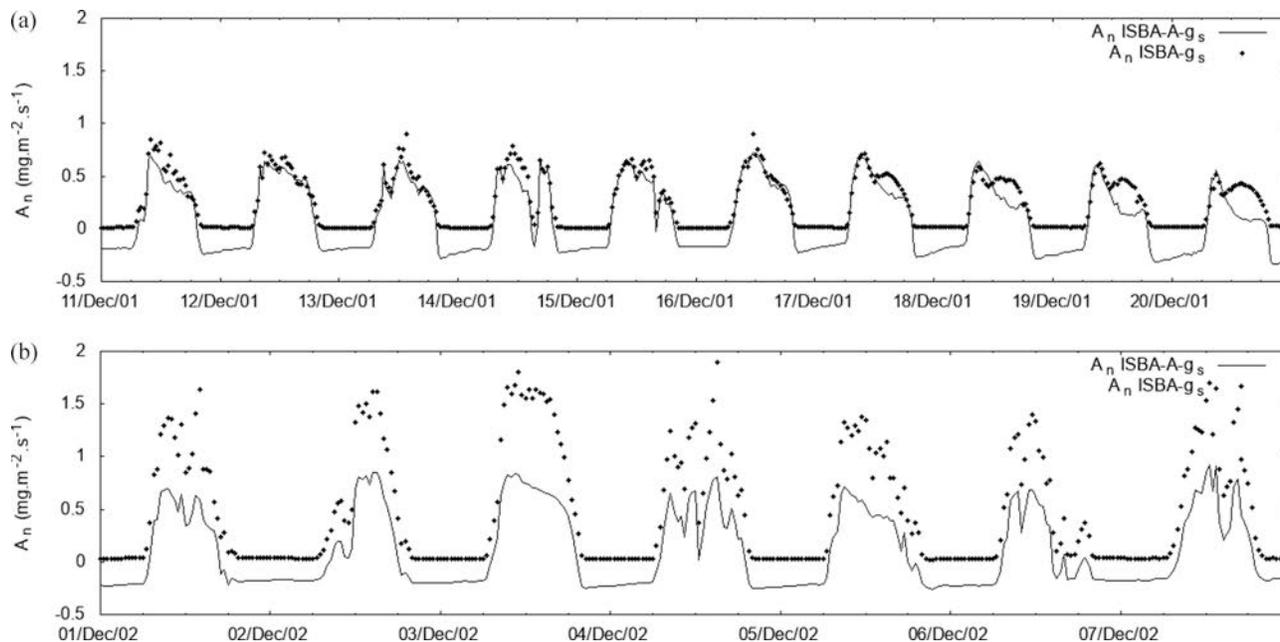


Figura 5 - Fluxo de carbono ( $A_n$ ) modelado ISBA-gs/ISBA-A-gs, (a) dez/2001 e (b) dez/2002.

Tabela 2 - Estatísticas dos erros entre fluxos medidos e modelados ISBA-A-gs e ISBA-gs.

	H ( $W m^{-2}$ )		LE ( $W m^{-2}$ )	
	gs	Ags	gs	Ags
EM	-17,40980	-8,95887	-18,73421	-18,81778
EAM	27,48160	25,99520	40,88320	40,95096
REQM	53,45829	49,19980	65,27476	65,08369
R	0,66817	0,70150	0,82524	0,82743
ENS	0,37666	0,47409	0,52551	0,50438

## Agradecimentos

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001. Os recursos para a realização das medições foram proporcionados pelo CNPq (Projeto de Pesquisa 400171/95-3) e por ITAIPU BINACIONAL (contratos 5322/97 e AS/CT/0009/00). Os autores agradecem também aos revisores anônimos pelas contribuições ao texto.

## Referências

BARBU, A.L.; CALVET, J.C.; MAHFOUF, J.F.; LAFONT, S. Assimilation of soil wetness index and leaf area index into the ISBA-A-gs land surface model: grassland case study. *Biogeosciences*, v. 8, n. 7, p. 1971-1986, 2011.

BARBU, A.L.; CALVET, J.C.; MAHFOUF, J.F.; LAFONT, S. Integrating ASCAT surface soil moisture and GEOV1 leaf area index into the SURFEX modelling platform: a land

data assimilation application over France. *Hydrol. Earth Syst. Sci.*, v. 18, n. 1, p. 173-192, 2014.

BERRY, J.; RAISON, J. Responses of macrophytes to temperature. *Encyclopedia of Plant Physiology*, v. 12A, Springer-Verlag: Berlin, p. 277-338, 1981.

BOONE, A.; CALVET, J.C.; NOILHAN, J. Inclusion of a Third Soil Layer in a Land Surface Scheme Using the Force-Restore Method. *J. Appl. Meteorol.*, v. 38, n. 11, p. 1611-1630, 1999.

BOSILOVICH, M.G.; SUN, W.Y. Formulation and verification of a land surface parameterization for atmospheric models. *Boundary-Layer Meteorology*, v. 73, n. 4, p. 321-341, 1995.

BRUT, A.; RUDIGER, C.; LAFONT, S.; ROUJEAN, J.L.; CALVET, J.C.; JARLAN, L.; GIBELIN, A.L.; ALBERGEL, C.; LE MOIGNE, P.; SOUSSANA, J.; *et al.* Modelling LAI at a regional scale with ISBA-A-gs: comparison with satellite-derived LAI over southwestern France. *Biogeosciences*, v. 6, n. 8, p. 1389-1404, 2009.

BUSINGER, J.A.; WYNGAARD, J.C.; IZUMI, Y.; BRADLEY, E.F. Flux-profile relationships in the atmospheric surface layer. *J. Atmos. Sci.*, v. 28, n. 2, p. 181-189, 1971.

CALVET, J.C.; NOILHAN, J.; ROUJEAN, J.L.; BESSEMOULIN, P.; CABELGUENNE, M.; OLIOSO, A.; WIGNERON, J.P. An interactive vegetation SVAT model tested against data from six contrasting Sites. *Agric. For Meteorol.*, v. 92, n. 2, p. 73-95, 1998.

CALVET, J.C., RIVALLAND, V., PICON-COCHARD, C., E GUEHL, J.M. Modelling forest transpiration and CO2 fluxes-response to soil moisture stress. *Agricultural and forest meteorology*, v. 124, n.3, p. 143-156, 2004.

CARRER, D.; ROUJEAN, J.L.; LAFONT, S.; CALVET, J.C.; BOONE, A.; DECHARME, B.; DELIRE, C.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J.P. A canopy radiative transfer scheme with explicit FAPAR for the interactive vegetation

- model ISBA-A-gs: Impact on carbon fluxes. **Journal of Geophysical Research**, v. 118, n. 2, p. 888-903, 2013.
- CLAPP, R.B.; HORNBERGER, G.M. Empirical equations for some soil hydraulic properties. **Water Resour. Res.**, v. 14, n. 4, p. 601-604, 1978.
- COLLATZ, G.J.; BALL, J.T.; GRIVET, C.; BERRY, J.A. Physiological and environmental regulation of stomatal conductance, photosynthesis and transpiration: a model that includes a laminar boundary layer. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 54, n. 2, p. 107-136, 1991.
- COLLATZ, G.J.; RIBAS-CARBO, M.; BERRY, J. Coupled photosynthesis-stomatal conductance model for leaves of C4 plants. **Functional Plant Biology**, v. 19, n. 5, p. 519-538, 1992.
- CANAL, N.; CALVET, J.C.; DECHARME, B.; CARRER, D.; LAFONT, S. Evaluation of root water uptake in the ISBA-A-gs land surface model using agricultural yield statistics over France. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 18, n. 12, p. 4979-4999, 2014.
- COX, P.; HUNTINGFORD, C.; HARDING, R. A canopy conductance and photosynthesis model for use in a GCM land surface scheme. **Journal of Hydrology**, v. 212, n. 1, p. 79-94, 1998.
- DINIZ, A.L. Cálculo do fluxo de CO2 com modelo de interação superfície-vegetação-atmosfera ISBA. **Dissertação de Mestrado**, UFPR, Curitiba, 2016.
- FOLEY, J.A.; PRENTICE, I.C.; RAMANKUTTY, N.; LEVIS, S.; POLLARD, D.; SITCH, S.; HAXELTINE, A. An Integrated Biosphere Model of Land Surface Processes, Terrestrial Carbon Balance and Vegetation Dynamics. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 10, n. 4, p. 603-628, 1996.
- FURUSHO, C.; CHANCIBAULT, K.; ANDRIEU, H. Adapting the coupled hydrological model ISBA-TOPMODEL to the long-term hydrological cycles of suburban rivers: Evaluation and sensitivity analysis. **Journal of Hydrology**, v. 485, n. 1, p. 139-147, 2013.
- GARRIGUES, S.; OLIOSO, A.; CALVET, J.C.; MARTIN, E.; LAFONT, S.; CHANZY, A.; MARLOIE, O.; BUIS, S.; DESFONDS, V.; BERTRAND, N.; RENARD, D.; *ET AL.* Evaluation of land surface model simulations of evapotranspiration over a 12-year crop succession: impact of soil hydraulic and vegetation properties. **Hydrol. Earth Syst. Sci.**, v. 19, n. 7, p. 3109-3131, 2015a.
- GARRIGUES, S.; OLIOSO, A.; CARRER, D.; DECHARME, B.; CALVET, J.C.; MARTIN, E.; MOULIN, S.; MARLOIE, O. Impact of climate, vegetation, soil and crop management variables on multi-year ISBA-A-gs simulations of evapotranspiration over a Mediterranean crop site. **Geosci. Model Dev.**, v. 8, n. 10, p. 3033-3053, 2015.
- GETIRANA, A.C.V.; DUTRA, E.; GUIMBERTEAU, M.; KAM, J.; LI, H.Y.; DECHARME, B.; ZHANG, Z.; DUCHARNE, A.; BOONE, A.; BALSAMO, G.; RODELL, M.; TOURE, A.M.; XUE, Y.; PETERS-LIDARD, C.D.; KUMAR, S.V.; ARSENAULT, K.; DRAPPEAU, G.; LEUNG, L.R.; RONCHAIL, J.; SHEFFIELD, J. Water Balance in the Amazon Basin from a Land Surface Model Ensemble. **Journal of Hydrometeorology**, v. 15, n. 6, p. 2586-2614, 2014.
- GIBELIN, A.L.; CALVET, J.C.; ROUJEAN, J.L.; JARLAN, L.; LOS, S.O. Ability of the land surface model ISBA-A-gs to simulate leaf area index at the global scale: Comparison with satellites products. **Journal of Geophysical Research**, v. 111, n. D18, p. 1984-2012, 2006.
- GIBELIN, A. L.; CALVET, J. C.; VIOVY, N. Modelling energy and CO2 fluxes with an interactive vegetation land surface model-Evaluation at high and middle latitudes. **Agricultural and forest meteorology**, v. 148, n. 10, p. 1611-1628, 2008.
- DECHARME, B.; ALKAMA, R.; PAPA, F.; FAROUX, S.; DOUVILLE, H.; PRIGENT, C. Global off-line evaluation of the ISBA-TRIP flood model. **Clim. Dyn.**, v. 38, v. 7, p. 1389-1412, 2012.
- GOUDRIAAN, J.; VAN LAAR, H.; VAN KEULEN, H.; LOUWERSE, W. Photosynthesis, CO2 and plant production. In: W. Day & R.K. Atkin (Eds.), **Wheat growth and modeling**. NATO ASI Series, Series A, vol. 86. Plenum Press: New York, p. 107-122, 1985.
- HABETS, F.; NOILHAN, J.; GOLAZ, C.; GOUTORBE, J.P.; LACARRÈRE, P.; LEBLOIS, E.; LEDOUX, E.; MARTIN, E.; OTTLÉ, C.; VIDAL-MADJAR, D. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part I: Model and database. **J. of Hydrology**, v. 217, n. 1, p. 75-96, 1999a.
- HABETS, F.; NOILHAN, J.; GOLAZ, C.; GOUTORBE, J.P.; LACARRÈRE, P.; LEBLOIS, E.; LEDOUX, E.; MARTIN, E.; OTTLÉ, C.; VIDAL-MADJAR, D. The ISBA surface scheme in a macroscale hydrological model applied to the Hapex-Mobilhy area. Part II: Simulation of streamflows and annual water budget. **J. of Hydrology**, v. 217, n. 1, p. 97-118, 1999b.
- HABETS, F.; SAULNIER, G.M. Subgrid Runoff Parameterization. **Physics and Chemistry on Earth (B)**, v. 26, n. 5-6, p. 455-459, 2001.
- JACOBS, C. Direct impact of atmospheric CO2 enrichment on regional transpiration. **Tese de Doutorado**, Department of Meteorology, Wageningen Agricultural University, Netherlands, 1994.
- JACOBS, C.M.; VAN DEN HURK, B.J.; DE BRUIN, H.A. Stomatal Behaviour and Photosynthetic Rate of Unstressed Grapevines in Semi-arid Conditions. **Agric. For. Meteorol.**, v. 80, n. 2-4, p. 111-134, 1996.
- JARVIS, P.G. The interpretation of the variations in leaf water potential and stomatal conductances found in canopies in the field. **Phil. Trans. Roy. Soc. B**, v. 273, n. 927, p. 593-610, 1976.
- JOETZJER, E.; DELIRE, C.; DOUVILLE, H.; CIAIS, P.; DECHARME, B.; CARRER, D.; VERBEECK, H.; DE WEIRDT, M.; BONAL, D. Improving the ISBACC land surface model simulation of water and carbon fluxes and stocks over the Amazon forest. **Geosci. Model Dev.**, v. 8, n. 6, p. 1709-1727, 2015.
- LOUIS, J.F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. **Bound. -Lay. Meteorol.**, v. 17, n. 2, p. 187-202, 1979.
- MAHFOUF, J.F.; NOILHAN, J. Inclusion of gravitational drainage in a land surface scheme based on the restore method. **J. Appl. Meteorol.**, v. 35, p. 987-992, 1996.
- MANZI, A.O.; PLANTON, S. Implementation of the isba parameterization scheme for land surface process in a GMC - an annual cycle experiment. **J. of Hydrology**, v. 155, n. 3-4, p. 353-387, 1994.

- MASCART, P.; NOILHAN, J.; GIORDANI, H. A modified parameterization of flux-profile relationships in the surface layer using different roughness length values for heat and momentum. **Bound. -Lay. Meteorol.**, v. 72, n. 4, p. 331-344, 1995.
- NAPOLY, A.; BOONE, A.; SAMUELSSON, P.; GOLLVIK, S.; MARTIN, E.; SEFERIAN, R.; CARRER, D.; DECHARME, B.; JARLAN, L. The Interactions between Soil-Biosphere-Atmosphere (ISBA) land surface model Multi-Energy Balance (MEB) option in SURFEX - Part 2: Model evaluation for local scale forest sites. **Geosci. Model Dev. Discuss.**, v. 10, n.4, p. 1621-1644, 2016.
- NIYOGI, D.S.; RAMAN, S. Comparison of four different stomatal resistance schemes using FIFE observations. **Journal of Applied Meteorology**, v. 36, n 7, p. 903-917, 1997.
- NOILHAN, J.; MAHFOUF, J.F. The Isba Land Surface Parameterisation Scheme. **Global and Planetary Change**, v. 13, n. 1-4, p. 145-159, 1996.
- NOILHAN, J.; PLANTON, S. A simple parameterization of land surface processes for meteorological models. **Monthly Weather Review**, v. 117, p. 536-549, 1989.
- PLEIM, J.E.; XIU, A. Development and testing of a surface flux and planetary boundary layer model for application in mesoscale models. **Journal of Applied Meteorology**, v. 34, n. 1, p. 16-32, 1995.
- PREVEDELLO, C.L. **Física dos Solos com problemas resolvidos**. Salesward Discovery: Curitiba, 1996.
- SELLERS, P.J.; RANDALL, D.A.; COLLATZ, C.J.; BERRY, J.A.; FIELD, C.B.; DAZLICH, D.A.; ZHANG, C.; COLLELO, G.D. A Revised Land Surface Parameterization (SiB2) for Atmospheric GCMs, Part I: Model Formulation. **Journal of Climate**, v. 9, n. 4, p. 676-705, 1996.
- SARRAT, C.; NOILHAN, J.; LACARRERE, P.; CESCHIA, E.; CIAIS, P.; DOLMAN, A.J.; ELBERS, J.A.; GERBIG, C.; GIOLI, B.; LAUVAUX, T.; MIGLIETTA, F.; NEININGER, B.; RAMONET, M.; VELLINGA, O.; BONNEFOND, J.M. Mesoscale modelling of the CO2 interactions between the surface and the atmosphere applied to the April 2007 CERES field experiment. **Biogeosciences**, v. 6, n. 1, p. 633-646, 2009.
- THORNLEY, J.H. **Mathematical models in plant physiology**. Academic Press: London, Ltd., London, 1976.
- VAN GENUCHTEN, M.T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, v. 44, n. 5, p. 892-898, 1980.
- VAN WIJK, M.; DEKKER, S.; BOUTEN, W.; BOSVELD, F.; KOHSIEK, W.; KRAMER, K.; MOHREN, G. Modeling daily gas exchange of a Douglas-fir forest: comparison of three stomatal conductance models with and without a soil water stress function. **Tree Physiology**, v. 20, n. 2, p. 115-122, 2000.
- VISSOTTO, D. Modelagem numérica para interações superfície-atmosfera no estado do Paraná. **Dissertação de Mestrado**, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- VITERBO, P.; BELJAARS, A.C. An improved land surface parameterization scheme in the ECMWF model and its validation. **Journal of Climate**, v. 8, n. 11, p. 2716-2748, 1995.