

LEONARDO DE OLIVEIRA NEVES

**ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE MASSA E ENERGIA EM UMA CULTURA DE  
SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) NO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2011

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

**T**

**N518e  
2011**

Neves, Leonardo de Oliveira, 1974-

Estimativa dos fluxos de massa e energia em uma cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no Rio Grande do Sul / Leonardo de Oliveira Neves. – Viçosa, MG, 2011. xvi, 83f. : il. (algumas col.) ; 29cm.

Orientador: José Maria Nogueira da Costa.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 74-83.

1. Meteorologia agrícola. 2. Soja - Fatores climáticos.
  3. Soja - Efeito da temperatura. 4. Soja - Cultivo - Modelos matemáticos. 5. Dióxido de carbono. 6. Radiação solar.
  7. Climatologia. I. Universidade Federal de Viçosa.
- II. Título.

CDD 22. ed. 630.2515

LEONARDO DE OLIVEIRA NEVES

**ESTIMATIVA DOS FLUXOS DE MASSA E ENERGIA EM UMA CULTURA DE  
SOJA (*Glycine max* (L.) Merrill) NO RIO GRANDE DO SUL**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

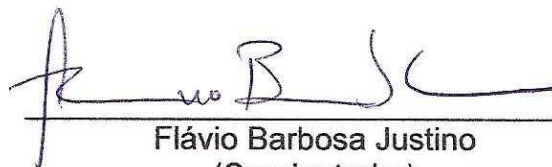
APROVADA: 16 de fevereiro de 2011.



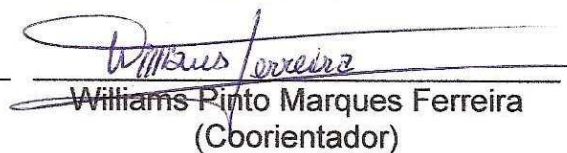
Débora Regina Roberti  
(Coorientadora)



Hernani José Brazão Rodrigues



Flávio Barbosa Justino  
(Coorientador)



Williams Pinto Marques Ferreira  
(Coorientador)



José Maria Nogueira da Costa  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

Aos meus pais, pelos ensinamentos fundamentais para minha vida, pelo apoio, pelo carinho e pelo amor.

Ao professor José Maria Nogueira da Costa, pela orientação, pela paciência, pela dedicação, pela amizade e pela honestidade.

À Universidade Federal de Viçosa e à área de Meteorologia Agrícola, pertencente ao Departamento de Engenharia Agrícola, pela oportunidade de realização do Programa de Pós-Graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão da bolsa de estudo.

Aos professores coorientadores Dr. Flávio Barbosa Justino e Dr. Williams Pinto Marques Ferreira, pelas sugestões e pelas informações necessárias à correção deste trabalho.

A rede SULFLUX (Rede Sul Brasileira de Fluxos Superficiais e Mudanças Climáticas), em especial à professora DSc. Débora Regina Roberti, por acreditar na parceria com a UFV, na realização deste trabalho.

Aos amigos que me apoiaram durante realização do mestrado e do doutorado, Jonatan Tasch Dupont (USP) e Ricardo Acosta (FURG).

Aos colegas e amigos de república Arthur e Pedro, pelos momentos de alegria, pela descontração, pelo companheirismo e pela convivência no mesmo apartamento durante o período em Viçosa.

Aos meus amigos Rafael, Rose Ane, Douglas, Stefeson, Olga, Marcos Paulo, Santiago, Kellen, Leonardo e tantos outros que, direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao Grupo de Pesquisa de Micrometeorologia de Ecossistemas da Universidade Federal de Viçosa, formado por Evandro, Leonardo Aguiar, Paulo Ciclone, Marcos Vanderlei, Walter, Vanda, Junior e Sérgio que, durante os quatro anos de doutorado, estiveram sempre dispostos a ajudar.

Em especial, a duas pessoas que me ajudaram a passar por mais essa etapa, o Prof. Evandro Chaves de Oliveira e os alunos Hélton Fernandes e Mauricio Rodrigues.

Ao Instituto Federal Catarinense – Campus Rio do Sul (IFC), pela liberação para o término do Doutorado.

Aos colegas de trabalho do IFC que me apoiaram durante o ano de 2010, na obtenção deste título.

## **BIOGRAFIA**

LEONARDO DE OLIVEIRA NEVES, filho de Cláudio Martins Neves e Maria Helena Lahn de Oliveira, nasceu em 14 de novembro de 1974, em Umuarama, PR.

Em maio de 2004, graduou-se em Meteorologia, pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em Pelotas, RS.

Em agosto de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas.

Em agosto de 2006, iniciou o curso de Doutorado em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, MG, na área de Micrometeorologia de Ecossistemas, submetendo-se à defesa de tese em 16 de fevereiro de 2011.

Em fevereiro de 2010, assumiu o cargo de professor efetivo do Instituto Federal Catarinense, Campus Rio do Sul, no curso de Agronomia.

## SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS .....	viii
LISTA DE FIGURAS .....	x
RESUMO .....	xiii
ABSTRACT .....	xv
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Soja.....	4
2.1.1. A soja no mundo.....	4
2.1.2. A soja no Brasil.....	5
2.1.3. A soja no Rio Grande do Sul .....	7
2.2. Exigências climáticas da soja .....	7
2.3. Exigências térmicas da soja .....	9
2.4. Temperatura e dióxido de carbono .....	10
2.5. Método da covariância dos vórtices turbulentos .....	12
2.6. Modelos de simulação .....	13
2.7. Modelo biofísico CABLE .....	15
2.8. Testes estatísticos .....	17

3. MATERIAL E MÉTODOS.....	18
3.1. Localização e descrição do sítio experimental.....	18
3.2. Medições e sistema de aquisição de dados .....	20
3.2.1. Medições na cultura da soja .....	20
3.3. Cálculo dos fluxos.....	20
3.4. Modelo biofísico CABLE .....	22
3.4.1. Equações básicas para processos na superfície.....	23
3.5. Método do balanço de energia .....	23
3.6. Partição de energia.....	24
3.6.1. Análise estatística.....	24
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	27
4.1. Características climáticas de Cruz Alta-RS .....	27
4.2. Análise do balanço de radiação .....	32
4.2.1. Radiação solar global e saldo de radiação .....	32
4.3. Variação dos componentes do balanço de energia .....	35
4.3.1. Estádio de emergência .....	36
4.3.1.1. Variação diária.....	36
4.3.1.2. Variação horária .....	37
4.3.2. Estádio vegetativo .....	41
4.3.2.1. Variação diária.....	41
4.3.2.2. Variação horária .....	44
4.3.3. Estádio reprodutivo.....	47
4.3.3.1. Variação diária.....	47
4.3.3.2. Variação horária .....	49
4.3.4. Estádio de maturação.....	52
4.3.4.1. Variação diária.....	52
4.3.4.2. Variação horária .....	53



4.4. Simulação do modelo CABLE.....	56
4.4.1. Calibração do modelo CABLE .....	56
4.4.2. Análise dos fluxos de massa e energia .....	57
4.4.3. Teste do modelo CABLE .....	59
4.4.3.1. Saldo de radiação (Rn).....	59
4.4.3.2. Fluxo de calor latente (LE).....	61
4.4.3.3. Fluxo de calor sensível (H) .....	63
4.4.3.4. Fluxo de calor no solo (G).....	66
4.4.3.5. Fluxo de CO <sub>2</sub> (NEE).....	68
5. CONCLUSÕES .....	71
6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS .....	73
REFERÊNCIAS.....	74

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Variáveis meteorológicas coletadas na Estação Meteorológica Automática (EMA) com unidade de medida, identificação dos sensores e altura/profundidade de instalação .....	21
Tabela 2 - Dados mínimos necessários para aplicação do modelo CABLE .....	23
Tabela 3 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação .....	25
Tabela 4 - Período correspondente a cada estágio da cultura da soja .....	35
Tabela 5 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e suas relações com Rn, durante o estágio de emergência da cultura da soja .....	36
Tabela 6 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e suas relações com Rn, durante o período vegetativo da cultura da soja .....	43
Tabela 7 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e suas relações com Rn, durante o estágio reprodutivo da cultura da soja .....	48
Tabela 8 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e suas relações com Rn, durante o estágio de maturação da cultura da soja .....	53

Tabela 9 - Raiz do erro quadrado médio (RMSE), desvio médio do erro (MBE), coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância de Willmott (d) para os fluxos de massa e energia após a calibração do modelo CABLE .....	59
Tabela 10 - Resultado da análise estatística dos valores simulados e observados para o saldo de radiação (Rn) acima da cultura da soja durante os quatros estádios fenológicos .....	61
Tabela 11 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os observados para o fluxo de calor latente acima da cultura da soja, nos quatros estádios da cultura da soja.....	63
Tabela 12 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de calor sensível (H) acima da cultura da soja nos quatro estádios da cultura .....	66
Tabela 13 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de calor no solo (G) acima da cultura da soja, nos quatro estádios da cultura .....	68
Tabela 14 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de CO <sub>2</sub> acima da cultura da soja, para os quatro estádios da cultura .....	70

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Densidade da produção da soja no Brasil. ....	7
Figura 2 - Localização do sítio experimental no município de Cruz Alta, no Estado do Rio Grande do Sul.....	18
Figura 3 - Diagrama das normais climatológicas (1961-1990) do município de Cruz Alta (RS).....	19
Figura 4 - Total diário acumulado da precipitação pluvial e da temperatura média do ar durante o período experimental.....	28
Figura 5 - Valores mensais da precipitação pluvial (P) (2008/09) e precipitação pluvial (PN) (1961-1990), Cruz Alta, RS. ....	28
Figura 6 - Valores mensais da temperatura do ar (T) (2008/09) e temperatura do ar (TN) (1961-1990), Cruz Alta, RS.....	29
Figura 7 - Variação diária da velocidade média do vento (a), umidade relativa (b) e déficit de pressão de vapor (c), para o período experimental.....	30
Figura 8 - Variação diária do conteúdo de água no solo durante o período experimental.....	31
Figura 9 - Variação diária da temperatura média do solo durante o período experimental.....	31
Figura 10 - Valores médios horários da radiação solar global (R <sub>g</sub> ) e do saldo de radiação (R <sub>n</sub> ), durante o período experimental.....	32
Figura 11 - Relação entre os valores horários do saldo de radiação (R <sub>n</sub> ) e da radiação solar global (R <sub>g</sub> ), para a cultura da soja, em Cruz Alta (RS).....	33

Figura 12 - Totais diários da radiação solar global (Rg) e do saldo de radiação (Rn) para o período experimental, de novembro de 2008 a abril de 2009. ....	34
Figura 13 - Relação entre os valores diários do saldo de radiação (Rn) e da radiação solar global (Rg), para cultura da soja, em Cruz Alta (RS).....	35
Figura 14 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e, do fluxo de calor no solo (G), para o estágio de emergência da cultura da soja.....	37
Figura 15 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no sol (G) para o estágio de emergência da cultura de soja. ....	38
Figura 16 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível, correspondente ao saldo de radiação (Rn) subtraindo o fluxo de calor no solo (G), durante o estágio de emergência da soja. ....	39
Figura 17 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período diurno do estágio de emergência da cultura da soja.....	41
Figura 18 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estágio vegetativo da cultura da soja. ....	44
Figura 19 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação (Rn) em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) para o estágio vegetativo da cultura da soja. ....	45
Figura 20 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível correspondente o saldo de radiação (Rn) menos o calor no solo acima da cultura da soja, para o período vegetativo. ....	46
Figura 21 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período diurno do estágio de vegetativo da cultura da soja. ....	46
Figura 22 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estágio reprodutivo.....	49
Figura 23 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) para o estágio reprodutivo. ....	50
Figura 24 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível correspondente ao saldo de radiação (Rn) menos o calor no solo (G) acima da cultura da soja, para o estágio reprodutivo. ....	51
Figura 25 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o estágio reprodutivo acima da cultura da soja. ....	51

Figura 26 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G), para o estágio de maturação acima da cultura da soja. ....	54
Figura 27 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estágio de maturação da cultura da soja. ....	54
Figura 28 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível correspondente o saldo de radiação (Rn) subtraindo o calor do solo (G), durante o estágio de maturação. ....	55
Figura 29 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o estágio de maturação acima da cultura da soja. ....	56
Figura 30 - Saldo de Radiação Simulado (RnS), Saldo de Radiação Observado (RnO), Fluxo de Calor Latente Simulado (LES) e do Fluxo de Calor Latente Observado (LEO), Fluxo de Calor Sensível Simulado (HS) e Fluxo de Calor Sensível Observado (HO), Fluxo de Calor no Solo Simulado (GS) e do Fluxo de Calor no Solo Observado (GO). ....	58
Figura 31 - Saldo de Radiação Simulado (RnS) e do Saldo de Radiação Observado (RnO), para os quatro estádios fenológicos da cultura da soja. ....	60
Figura 32 - Fluxo de calor latente simulado (LES) e do Fluxo de calor latente observado (LEO), para os quatro estádios da cultura da soja. ....	62
Figura 33 - Valores médios horários do fluxo de calor sensível simulado (HS) e do fluxo de calor sensível observado (HO), para os quatro estádios da cultura da soja. ....	65
Figura 34 - Variação média horária do fluxo de calor no solo simulado (GS) e do fluxo de calor sensível observado (GO), para os quatro períodos da cultura da soja. ....	67
Figura 35 - Valores médios horários do fluxo de CO <sub>2</sub> simulado (NEES) e do fluxo de CO <sub>2</sub> obtido (NEEO), para os quatro estádios da cultura da soja. ....	69

## RESUMO

NEVES, Leonardo de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2011. **Estimativa dos fluxos de massa e energia em uma cultura de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) no Rio Grande do Sul.** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Coorientadores: Flávio Barbosa Justino, Williams Pinto Marques Ferreira e Débora Regina Roberti.

Foram realizadas medições contínuas dos fluxos de massa e energia para um ciclo completo da cultura da soja durante o período de novembro de 2008 a abril de 2009, na região central do Rio Grande do Sul, no município de Cruz Alta. Os dados de fluxos de calor latente, de calor sensível e dióxido de carbono foram medidos usando a técnica da covariância dos vórtices turbulentos. Essas informações foram complementadas com medições do saldo de radiação, radiação solar global, temperatura do ar e do solo, umidade relativa, velocidade e direção do vento, obtidas em uma estação micrometeorológica automática, instalada na área experimental da FUNDACEP (Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô). Para simulação dos fluxos de calor latente, calor sensível, calor no solo e dióxido de carbono foi utilizado o modelo Biofísico CABLE (Csiro Atmosphere Biophysic Land Exchange). Foram realizados quatro testes estatísticos para testar o modelo CABLE. Durante todo o ciclo da cultura, a maior parte do saldo de radiação sobre a cultura da soja foi utilizada como fluxo de calor latente, seguido do

fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo. Os resultados obtidos com o índice da Razão de Bowen indicaram que a soja não sofreu com déficit hídrico durante os estádios fenológicos. O modelo CABLE conseguiu reproduzir satisfatoriamente durante o período de calibração os valores dos dados observados dos componentes do balanço de energia, demonstrando um bom desempenho ao simular, principalmente o saldo de radiação. Entretanto, durante os estádios fenológicos da cultura da soja, o modelo apresentou resultados satisfatórios para as simulações dos fluxos de calor sensível, de calor Latente e de calor no Solo. O modelo CABLE também apresentou resultados satisfatórios para a simulação do fluxo de CO<sub>2</sub> durante os quatro estádios fenológicos da soja, obtendo coeficientes de correlação, “r”, acima de 0,70.



## ABSTRACT

NEVES, Leonardo de Oliveira, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, February, 2011. **Estimative of mass and energy flows in a soybean crop (*Glycine max* L. Merrill) at Rio Grande do Sul, Brazil.** Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-advisers: Flávio Barbosa Justino, Williams Pinto Marques Ferreira and Débora Regina Roberti.

There have been performed continuous measurements of mass and energy flows for a complete cycle of soybeans cultivation during the period within November, 2008 to April, 2009, in central Rio Grande do Sul state, in Brazil, in the municipality of Cruz Alta. Data from the latent heat flow, sensible heat and carbon dioxide were measured using the technique of eddy covariance. These data were complemented with measurements from net radiation, solar radiation, air temperature and soil moisture, wind speed and direction, obtained from a micrometeorological station automatically installed in the experimental area of FUNDACEP (Experimental Centre for Research in Wheat Foundation). For the simulation of latent heat flows, sensible heat, soil heat and carbon dioxide model was used Biophysical CABLE (Csiro Atmosphere Biophysic Land Exchange). Four statistical tests were performed to test the model CABLE. Throughout the cultivation cycle, most of the net radiation on the soybean crop was used as latent heat flow, followed by sensible heat flow and heat flow in the soil. The results obtained with the index

of Bowen's ratio indicated that soybean did not suffer from drought during the growth stages. The model CABLE was able to successfully reproduce, during the calibration period, the observed data values of the components of energy balance, showing a good performance to simulate, particularly the radiation net. However, during the growth stages of soybean, the model showed satisfactory results for the simulations of the flow of sensible heat, latent heat and heat in the soil. The CABLE model also showed satisfactory results for the simulation of CO<sub>2</sub> flow over the four soybean stages, obtaining correlation coefficients, "r" greater than 0.70.

## 1. INTRODUÇÃO

A soja (*Glycine max* (L) Merrill) constitui-se em uma das principais culturas da agricultura mundial e brasileira, é uma excelente fonte de proteínas, apresentando todos os aminoácidos essenciais, carboidratos, vitaminas e minerais, além de possuir uma grande quantidade de fibras dietéticas e baixa quantidade de gordura, que lhe dá uma gama de aplicações, tanto na alimentação humana, como na animal, com relevante papel sócio-econômico brasileiro.

A busca de respostas das culturas à dinâmica de interações do sistema solo-planta-atmosfera para auxiliar no planejamento e condução no cultivo da soja, vem sendo o maior desafio para os pesquisadores. Durante o ciclo a cultura é submetida a condições meteorológicas que podem ser favoráveis ou adversas, interferindo em processos relacionados ao crescimento e desenvolvimento, refletindo no seu rendimento final.

Os ecossistemas terrestres e o clima na escala local, regional e global estão intimamente ligados através de vários processos, como: processo físicos e químicos, da variação da partição de energia disponível em calor sensível e latente, pela variação na rugosidade da superfície, e pela variação da absorção da radiação da superfície da Terra.

Informações sobre fluxos de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>), vapor d'água e energia em ecossistemas agrícolas, como o da soja, no Estado do Rio Grande

do Sul até recentemente eram muito escassos, devido a grande carência de dados experimentais, necessários à caracterização das variações horárias e diárias desses fluxos. Nos últimos anos esse quadro vem mudando devido à implantação de projetos de pesquisas, na qual tem como principal meta, a criação de uma nova base de conhecimento, necessária para entender o funcionamento climático, ecológico, biogeoquímico e hidrológico de ecossistemas agrícolas.

As simulações computacionais são ferramentas importantes para o estudo do balanço massa e de energia na superfície da terra. Simular as interações entre a biosfera, a atmosfera e o ciclo hidrológico é uma tarefa complexa devido a não-linearidade dos processos de transferência de água e de calor, a gama de escalas envolvidas que vão desde a microescala até a escala global, e as incertezas dos dados de entrada, causando erros (SOARES, 2009).

Segundo Bormann (2008), os efeitos dos erros inerentes as incertezas depende da região e da cultura a ser modelada, é necessária uma investigação da sensibilidade do modelo, que é uma ferramenta que permite concentrar os esforços experimentais nos parâmetros mais importantes.

Nas últimas décadas, muitos modelos têm sido desenvolvidos para descrever a interação entre a biosfera e a atmosfera e vários desses modelos de superfície sendo acoplados em modelos de clima regional e global (DICKINSON et al., 1986; SELLERS et al., 1986, 1992 e 1996; KOWALCZYK et al., 1991 e 1994; GARRATT et al., 1993). Esses modelos de superfície são normalmente constituídos de submodelos que buscam representar os diferentes processos envolvidos no sistema solo-planta-atmosfera, de forma qualitativa e quantitativa, com objetivo de prever o crescimento, o desenvolvimento e a produção das culturas.

Dentre os vários modelos conhecidos, o modelo “*two-leaf*” CABLE (CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange Model) destaca-se por seu grande detalhamento físico do sistema solo-planta-atmosfera (KOWALCZYK et al., 2006). Esse modelo vem sendo utilizado em diversas condições de clima e solo. As primeiras versões do modelo foram testadas usando medidas dos fluxos para pastagens e culturas agrícolas (LEUNING et al., 1998; WANG et al., 2001), e a última versão tem sido calibrado através de uma série de dados

observacionais acima de florestas ao redor do mundo (WANG et al., 2006). No entanto, poucos desses modelos, incluindo o modelo CABLE, foram avaliados nas condições ambientais na região sul do Brasil.

O presente trabalho teve como objetivos:

- a) Quantificar as magnitudes dos componentes do balanço de energia, durante o ciclo da cultura da soja;
- b) Analisar o balanço de energia e a partição do saldo de radiação em suas componentes de fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo;
- c) Avaliar o desempenho do modelo CABLE na estimativa dos componentes do balanço de energia (saldo de radiação, fluxo de calor latente, de calor sensível e de calor no solo), e fluxos de CO<sub>2</sub>, durante o ciclo da cultura da soja, através de testes estatísticos.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Soja**

#### **2.1.1. A soja no mundo**

A soja é uma planta C3 pertencente à família das leguminosas e ao gênero *Glycine* L, sendo classificada como *Glycine max* (L) Merrill. A soja hoje cultivada mundo afora é muito diferente dos ancestrais que lhe deram origem. Nos seus primórdios, a soja era uma planta rasteira e habitava a costa leste da Ásia, principalmente a região norte da China. Sua evolução ocorreu de plantas oriundas de cruzamentos naturais entre duas espécies de soja selvagem, que foram domesticadas e melhoradas por cientistas da antiga China. Apesar de conhecida como um grão sagrado e explorada intensamente na dieta alimentar do Oriente há mais de cinco mil anos, o Ocidente ignorou o seu cultivo até a segunda década do século vinte, quando os EUA iniciaram sua exploração comercial – primeiro como forrageira e, posteriormente, como grão (AGNOL, 2008).

Em 1940, no auge do seu cultivo como forrageira foram cultivados, naquele país, cerca de dois milhões de hectares com tal propósito. A partir de 1941, a área cultivada para grãos superou a cultivada para forragem, cujo cultivo declinou rapidamente até desaparecer em meados dos anos 60, enquanto a área cultivada para a produção de grãos crescia de forma

exponencial, não apenas nos EUA, como também no Brasil e na Argentina, principalmente. Os três países são responsáveis por mais de 80% da produção mundial.

### **2.1.2. A soja no Brasil**

O desenvolvimento da soja no Brasil iniciou-se quando os primeiros materiais genéticos foram introduzidos no país e testados no Estado da Bahia (BA), em 1882. O germoplasma fora trazido dos EUA, não era adaptado para as condições de baixa latitude daquele estado (12°S) e não teve êxito na região. Uma década mais tarde (1891), novos materiais foram testados para as condições do Estado de São Paulo (SP - latitude de 23°S) onde teve relativo êxito na produção de feno e grãos. Em 1900, a soja foi testada no Rio Grande do Sul (RS), o mais setentrional dos estados brasileiros (latitudes 28°S a 34°S), onde as condições climáticas são similares às aquelas prevalentes na região de origem dos materiais avaliados (sul dos EUA). Assim como ocorreu nos EUA durante as décadas de 1920 a 1940, as primeiras cultivares de soja introduzidas no Brasil foram estudadas, mais com o propósito de avaliar seu desempenho como forrageiras, do que como plantas produtoras de grãos para a indústria de farelos e óleos (AGNOL, 2008).

A pequena produção da oleaginosa, até os anos 50, era consumida como forragem para bovinos ou como grão para o engorde de suínos nas pequenas unidades produtoras do interior gaúcho. Sua trajetória de crescimento, sem paralelo na história do país, começou na década de 1960 e, em menos de vinte anos, converteu-se na cultura líder do agronegócio brasileiro.

A primeira referência de produção comercial de soja no Brasil data de 1941 (área cultivada de 640 ha, produção de 450 toneladas e rendimento de 700 kg/ha) e, o primeiro registro internacional do Brasil como produtor de soja data de 1949, com uma produção de 25 mil toneladas. Alcançou as 100 mil toneladas em meados dos anos 50 e na década de 1960, a soja se estabeleceu definitivamente como cultura economicamente importante para o Brasil, passando de 206 mil toneladas (1960) para 1,06 milhão de toneladas (1969). Cerca de 98% desse volume era produzido nos três estados da região

sul, em áreas onde prevalecia a combinação: trigo no inverno e soja no verão. Apesar do expressivo crescimento da produção ao longo dos anos 60, foi na década seguinte que a produção da soja mais cresceu e se consolidou como a principal cultura do agronegócio nacional, passando de 1,5 milhão de toneladas, em 1970, para mais de 15 milhões de toneladas, em 1979 (AGNOL, 2008).

Esse crescimento se deve, não apenas ao aumento da área cultivada (1,3 milhões de hectares para 8,8 milhões de hectares), mas, também, ao expressivo incremento da produtividade (1.140 kg/ha para 1.730 kg/ha). No final dos anos 70, mais de 80% da produção brasileira de soja ainda se concentrava nos três estados da região sul, embora o Cerrado, na região central do país, sinalizasse que participaria como importante ator no processo produtivo da oleaginosa, o que efetivamente ocorreu a partir da década de 1980.

Em 1970, menos de 2% da produção nacional foi colhida nessa região e estava concentrada no Estado de Mato Grosso do Sul (MS). Em 1980, essa porcentagem passou para 20%, em 1990 já era superior a 40% e, em 2007 contribuiu com 58,5%, com tendências a ocupar maior espaço a cada nova safra.

Segundo a Companhia Nacional de Abastecimento – CONAB (2011), a produção de soja de 2010 foi aproximadamente oito vezes maior (7,3 milhões de toneladas para 60 milhões de toneladas) que a produção média considerada dos anos 70, enquanto que o da região central do Brasil cresceu 100 vezes (500 toneladas para 54 milhões de toneladas). Essa transformação promoveu e consolidou o Estado de Mato Grosso (MT) como o líder nacional da produção de soja.

A Figura 1 indica a localização da produção dentro dos estados produtores (áreas com tom de vermelho seguido pelo amarelo, indicam maior concentração), que, com raras exceções, concentra-se em terras altas e planas, no interior do continente (planaltos do RS, SC, PR, GO, MG e Chapadas do MS, MT, BA, MA e PI). Das 10 principais culturas agrícolas brasileiras, a área cultivada com soja foi, destacadamente, a que teve o crescimento mais expressivo (1,3 milhões de hectares, em 1970, para 48 milhões de hectares, em 2011 (CONAB, 2011).





Fonte: Agnol, 2008.

Figura 1 - Densidade da produção da soja no Brasil.

### **2.1.3. A soja no Rio Grande do Sul**

A soja é a principal cultura plantada no Rio Grande do Sul, com uma área em torno 7,5 milhões de hectares (CONAB, 2011). Segundo Melo (2005), a soja é cultivada em 32 microrregiões geográficas, respondendo por aproximadamente 20% da produção de grãos do Estado. A produção de soja tem sido crescente e isto é demonstrado pela boa tecnologia aplicada a cultura, pelo emprego de materiais genéticos de bom potencial produtivo e pela crescente profissionalização dos produtores rurais. A área colhida de soja no Estado do Rio Grande do Sul na safra de 2010/11 (7.445,7 ha) obteve uma variação de 1,3% em relação a safra de 2009/10 (CONAB, 2011). As variações em produção e produtividade são determinadas por microclimas, solos e diversidade de sistemas tecnológicos empregados.

### **2.2. Exigências climáticas da soja**

O clima pode ser considerado um regulador da produção agrícola. Os parâmetros climáticos exercem influência em todos os estágios dos processos agrícolas, desde o preparo da terra, semeadura, crescimento das plantas e colheita até o armazenamento, transporte e comercialização (AYOADE, 1986). Para Dallacort et al. (2005), dados climáticos disponíveis e confiáveis, obtidos

através de estações meteorológicas, são fundamentais em uma eficaz previsão do desenvolvimento, do crescimento e da produção das culturas agrícolas.

As estações meteorológicas automáticas têm sido utilizadas para medir e registrar os parâmetros meteorológicos, em nível de superfície, de forma precisa e acurada, em intervalo de tempo programável, eliminando com isto, erros humanos na leitura de sensores, erros de digitação, perdas de dados, possuindo também, sincronismo de leitura entre vários instrumentos e frequência de leitura com intervalos precisos (FARIA, 1998). Esse sistema automatizado tem sido utilizado para monitorar o controle de irrigação em diferentes culturas (FERNANDES et al., 1995).

A água constitui aproximadamente 90% do peso da planta, atuando em, praticamente, todos os processos fisiológicos e bioquímicos. Desempenha a função de solvente, através do quais gases, minerais e outros solutos entram nas células e movem-se pela planta. Tem, ainda, papel importante manutenção e distribuição do calor. A disponibilidade de água é importante, principalmente, em dois períodos de desenvolvimento da soja: germinação-emergência e floração-enchimento de grãos (KUDREV, 1994).

Durante o primeiro período, tanto o excesso quanto o déficit de água são prejudiciais à obtenção de uma boa uniformidade na população de plantas. A semente de soja necessita absorver, no mínimo, 50% de seu peso em água para assegurar boa germinação. Nessa fase, o conteúdo de água no solo não deve exceder a 85% do total máximo de água disponível e nem ser inferior a 50% (SALINAS et al., 1996). A necessidade de água na cultura da soja vai aumentando com o desenvolvimento da planta, atingindo o máximo durante a floração-enchimento de grãos (7 a 8 mm/dia), decrescendo após esse período. Déficits hídricos expressivos, durante a floração e o enchimento de grãos, provocam alterações fisiológicas na planta, como o fechamento estomático e o enrolamento de folhas e, como consequência, causam a queda prematura de folhas e de flores e abortamento de vagens, resultando, por fim, em redução do rendimento de grãos (EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA, 2008).

A necessidade total de água na cultura da soja, para obtenção do máximo rendimento, varia entre 450 a 800 mm/ciclo, dependendo das condições climáticas, do manejo da cultura e da duração do ciclo

(DOORENBOS; KASSAM, 1979; REICHARDT, 1990). Para minimizar os efeitos do déficit hídrico, indica-se semear apenas cultivares adaptadas à região e à condição de solo; semear em época recomendada e de menor risco climático; semear com adequada umidade em todo o perfil do solo; e adotar práticas que favoreçam o armazenamento de água pelo solo. A irrigação é medida eficaz, porém de custo elevado (EMBRAPA, 2008).

### **2.3. Exigências térmicas da soja**

A temperatura é uma das variáveis meteorológicas mais importantes afetando não apenas o acúmulo de fitomassa como também, a duração dos vários estádios de desenvolvimento da espécie, uma vez que, para completar cada subperíodo de desenvolvimento, as plantas necessitam um determinado acúmulo térmico (SCHÖFFEL; VOLPE, 2002).

A soja melhor se adapta a temperaturas do ar entre 20°C e 30°C; a temperatura ideal para seu crescimento e desenvolvimento está em torno de 30°C. Sempre que possível, a semeadura da soja não deve ser realizada quando a temperatura do solo estiver abaixo de 20°C porque prejudica a germinação e a emergência. A faixa de temperatura do solo adequada para semeadura varia de 20°C a 30°C, sendo 25°C a temperatura ideal para uma emergência rápida e uniforme (FARIAS et al., 2001). O crescimento vegetativo da soja é pequeno ou nulo a temperaturas menores ou iguais a 10°C. Temperaturas acima de 40°C têm efeito adverso na taxa de crescimento, provocam distúrbios na floração e diminuem a capacidade de retenção de vagens. Esses problemas se acentuam com a ocorrência de déficits hídricos (EMBRAPA, 2008).

A floração da soja somente é induzida quando ocorrem temperaturas acima de 13°C. As diferenças de data de floração, entre anos, apresentadas por uma cultivar semeada numa mesma época, são devido às variações de temperatura. Assim, a floração precoce ocorre, principalmente, em decorrência de temperaturas mais altas, podendo acarretar diminuição na altura de planta. Esse problema pode se agravar se, paralelamente, houver insuficiência hídrica e/ou fotoperiódica durante a fase de crescimento. Diferenças de data de floração entre cultivares, numa mesma época de semeadura, são devido,

principalmente, à resposta diferencial das cultivares ao comprimento do dia (fotoperíodo) (EMBRAPA, 2008).

A maturação pode ser acelerada pela ocorrência de altas temperaturas. Quando vêm associadas a períodos de alta umidade, as altas temperaturas contribuem para diminuir a qualidade da semente e, quando associadas a condições de baixa umidade, predispõem a semente a danos mecânicos durante a colheita. Temperaturas baixas na fase da colheita, associadas a período chuvoso ou de alta umidade, podem provocar atraso na data de colheita, bem como haste verde e retenção foliar. A adaptação de diferentes cultivares a determinadas regiões depende, além das exigências hídricas e térmicas, de sua exigência fotoperiódica.

A sensibilidade ao fotoperíodo é característica variável entre cultivares, ou seja, cada cultivar possui seu fotoperíodo crítico, acima do qual o florescimento é atrasado. Por isso, a soja é considerada planta de dia curto. Em função dessa característica, a faixa de adaptabilidade de cada cultivar varia à medida que se desloca em direção ao norte ou ao sul. Entretanto, cultivares que apresentam a característica “período juvenil longo” possuem adaptabilidade mais ampla, possibilitando sua utilização em faixas mais abrangentes de latitudes (locais) e de épocas de semeadura (EMBRAPA, 2008).

O conhecimento dos aspectos ligados à fisiologia da produção da cultura de soja torna-se importante para os pesquisadores que buscam de alguma forma modelar, simular ou prever resultados. As plantas de soja apresentam aspectos muito interessantes como a fotorrespiração, que devem ser levadas em consideração para realizar previsões corretas no que diz respeito à modelagem.

#### **2.4. Temperatura e dióxido de carbono**

A temperatura do planeta aumentou de 3°C a 4°C, principalmente devido a maior concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera terrestre (TAYLOR; MacCRACKEN, 1990; WATSON et al., 1990). No início do século passado, os níveis de CO<sub>2</sub> na atmosfera eram de 280 ppm e, atualmente chegam a 370 ppm, uma taxa de crescimento de 1,8 ppm por ano (MENDELSON; H,

ROSENBERG, 1994; ETHERIDGE et al., 1996; KEELING; WHORF, 2000). Estima-se que no final deste século a concentração de CO<sub>2</sub> na atmosfera atinja de 600 a 1000 ppm (COX et al., 2000). Diversas alterações no clima do planeta devem ocorrer, principalmente com relação à temperatura.

A temperatura exerce o principal efeito determinante no crescimento, desenvolvimento e produção das plantas de soja. O incremento na respiração das plantas de soja é muito pouco influenciado pelo incremento na temperatura, apesar dos incrementos na taxa relativa de crescimento (BUNCE; ZISKA, 1996). O crescimento e desenvolvimento da cultura de soja são otimizados quando a temperatura varia de 20°C a 30°C (HOFSTRA, 1972; HESKETH et al., 1973). O incremento de área foliar em soja é devido ao enriquecimento de CO<sub>2</sub> e temperaturas (SIONIT et al., 1987). Na análise temporal de características individuais de crescimento, verifica-se que a elevada concentração de CO<sub>2</sub> é dependente da temperatura. Além disso, em temperaturas mais baixas (20-15°C) apresentaram as maiores taxas de crescimento e aumento da área foliar para elevada concentração de CO<sub>2</sub>. A produtividade final de grãos possui uma forte influência da interação entre a concentração de CO<sub>2</sub> e temperatura, alterando a massa e o número de sementes por planta (HEINEMANN et al., 2005).

A concentração de CO<sub>2</sub> da atmosfera terrestre tende a aumentar, com o resultado direto das atividades humanas, a uma taxa de 0,4-0,5% por ano ou 1–1,8 μmolCO<sub>2</sub>mol<sup>-1</sup> por ano (IPCC, 2007). Como resultado desse fato, a temperatura média do ar do Planeta poderá, também, aumentar neste período, graças ao efeito estufa do CO<sub>2</sub> atmosférico. Embora o aumento na temperatura global previsto para o futuro, em consequência do aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico, ainda seja um assunto em debate, estudos numéricos com modelos de circulação geral da atmosfera (GCM) indicam que é bastante provável que se verifique um aumento de 1°C a 6°C na temperatura média do ar, até o final deste século, em vários locais do Planeta (IPCC, 2007), inclusive no Brasil (SIQUEIRA et al., 1994 e 2000).

Em plantas, o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> atmosférico causa aumento da taxa de crescimento, pois o CO<sub>2</sub> é o substrato primário para a fotossíntese (TAIZ; ZEIGER, 1991). Plantas com metabolismo C<sub>3</sub> são mais beneficiadas pelo aumento de CO<sub>2</sub> atmosférico do que plantas com

metabolismo C4 (TUBIELLO et al., 2000; SIQUEIRA et al., 2001; STRECK, 2005). No entanto, se o aumento da concentração de CO<sub>2</sub> for acompanhado de aumento da temperatura do ar, poderá não haver aumento no crescimento e no rendimento das culturas, principalmente em razão do encurtamento do seu ciclo de desenvolvimento (BUTTERFIELD; MORISON, 1992; SIQUEIRA et al., 2001) e aumento da respiração (fotorrespiração e fase escura da respiração) do tecido vegetal (TAIZ; ZEIGER, 1991; STRECK, 2005).

Portanto, em estudos de impactos das mudanças climáticas sobre os agroecossistemas, deve se dar especial atenção ao efeito do aumento de temperatura (aquecimento global) no desenvolvimento vegetal e assim caracterizar mudanças no ciclo das culturas em diferentes cenários meteorológicos.

Estudos do impacto das mudanças climáticas na agricultura do Brasil têm aumentado nos últimos anos, e estimativas de rendimento de várias culturas agrícolas obtidas em diversas regiões brasileiras diante de cenários de mudança climática já foram relatadas (SIQUEIRA et al., 1994, 2000 e 2001; ASSAD et al., 2004). No entanto, não se constatou na literatura qualquer trabalho que indicasse o impacto da mudança climática no ciclo da cultura da soja em condições brasileiras, envolvendo a quantificação dos fluxos de massa e energia, o que constituiu o incentivo para esse esforço científico.

A proposta de um estudo que englobe toda essa problemática, e a busca de todas as repostas envolvendo as concentrações de CO<sub>2</sub> é um desafio, trata-se de um assunto de várias pontas, e através desse estudo mostrar, de maneira sucinta, a função e a importância do CO<sub>2</sub> na natureza.

## **2.5. Método da covariância dos vórtices turbulentos**

O Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos é um método de medição dos fluxos de massa e energia da superfície (SWINBANK, 1951 e 1955). Tem como objetivo principal estimar o transporte turbulento entre a superfície e a atmosfera. Segundo Burba e Anderson (2007), o Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos é um método que realiza medições diretas de forma mais precisa das transferências de calor e momentum para a atmosfera, através de sofisticada instrumentação de resposta rápida.

Atualmente, esse método é reconhecido como a forma mais confiável para obtenção fluxos momentum, calor e massa em longo prazo para diferentes ecossistemas (MALHI et al., 2002).

O monitoramento da turbulência através de um único ponto de observação baseia-se na hipótese de "congelamento" da turbulência, conhecida como hipótese de Taylor, isto implica que os vórtices não sofrerão mudanças enquanto estiverem sendo medidos (STULL, 1988).

A aplicação do Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos envolve assuntos relacionados com a seleção do local, localização dos instrumentos, frequência, calibração e pós-processamento dos dados (MOORE, 1986; BALDOCCHI et al., 1988; FOKEN; WICHURA, 1996; MONCRIEFF et al., 1997; AUBINET et al., 2000). Idealmente o campo experimental deve ser plano, com um extenso "*fetch*" de vegetação homogênea. Segundo Kaimal e Finnigan (1994), todos os locais devem ter "*fetch*" suficiente para gerar uma camada limite onde os fluxos são constantes com a altura.

Efeito da localização dos instrumentos é explicado por Burba e Anderson (2007), e um entendimento da área de cobertura "*footprint*" dos instrumentos é essencial para o próprio planejamento e execução do Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos. A altura da instalação dos instrumentos vai depender da altura da vegetação, da extensão do "*fetch*", da direção e velocidade do vento, e da resposta de frequência dos instrumentos. Para ver as reais distâncias e contribuições, devemos levar em conta a dependência dos fluxos sobre a área de cobertura com altura das medidas, rugosidade das superfícies e estabilidade atmosférica.

## **2.6. Modelos de simulação**

A interação entre as plantas e o meio ambiente envolve uma complexidade de processos físicos, químicos e biológicos. A fim de se obter maior conhecimento das respostas da planta ao meio ambiente, modelos de simulação são utilizados como ferramenta de grande potencial em áreas cultivadas, possibilitando o estudo e o entendimento dessa interação, avaliando e estimando o desempenho das plantas em diferentes áreas e situações.

Segundo Rodrigues (2006), o desenvolvimento, aplicação e popularização de modelos para simulação de fluxos, têm se desenvolvido a partir das três últimas décadas, em conjunto com o crescimento de dados da área micrometeorológica e medidas fisiológicas.

Modelos de superfície acoplados aos modelos climáticos globais da CSIRO (GCM) evoluíram a partir de um esquema simples de representações complexas da interação atmosfera terrestre. Em 1990, o modelo da CSIRO (GCM), teve um único tipo de solo, utilizava um comprimento de rugosidade constante e sem vegetação ao longo da terra, para realizar as simulações. O modelo utilizava o regime de umidade do solo de Deardorff (1977) e o método das forçantes de Deardorff (1978) para calcular a temperatura da superfície terrestre. Em 1991, um simples modelo autônomo de solo-vegetação com base em uma descrição do modelo “big leaf” e de um modelo de solo foram descritos por Kowalczyk et al. (1991).

O modelo foi implementado na CSIRO (GCM) em 1993 (KOWALCZYK et al., 1994). A última versão incluía uma série de funcionalidades adicionais, tais como tipo de solo (propriedades térmicas e de umidade para diferentes tipos de solo), albedo, comprimento de rugosidade, a resistência do dossel, interceptação do dossel da chuva, escoamento superficial, percolação profunda no solo, e acúmulo e derretimento da neve. O dossel foi representado por um simples modelo “*big leaf*”. A temperatura do dossel foi calculado pela resolução de equações do balanço de energia e a resistência estomática calculada em função da radiação, déficit de pressão de saturação do vapor d’água, da temperatura do ar na camada superficial e do conteúdo de água no solo.

Em 1995, uma versão melhorada do modelo de neve no solo foi acoplado ao modelo GCM e no modelo regional CSIRO, *Division of Atmospheric Research Limited Area Model* (DARLAM). Em 1997, Raupach et al. (1997) desenvolveram um modelo solo-vegetação-atmosfera (SCAM). O SCAM incluía um dossel acima da superfície do solo; formulação da condutância aerodinâmica para cálculo da transferência turbulenta entre a vegetação, solo e atmosfera (que representam as trocas turbulentas no dossel) e as respostas dos estômatos do dossel para radiação, déficit de saturação, temperatura e estresse hídrico. SCAM foi acoplado a DARLAM, e em 1998 usado para simular fluxos de massa e energia, durante o o programa



observacional da CSIRO denominado OASIS (observações em diversas escalas de interação), descrito por Finkel et al. (2003).

Em 1998, um modelo “*two-leaf*” de uma camada foi formulado (WANG; LEUNING, 1998) com base em um modelo de multi-camadas. Comparação do modelo “*two-leaf*” com o modelo de multicamadas (LEUNING et al., 1995) mostraram uma boa concordância em simular dos fluxos da condutância estomatal, o fluxo de CO<sub>2</sub>, fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível através do índice de área foliar e das condições de água no solo. Assim, o modelo de uma camada foi considerado 10 vezes mais eficiente na parte computacional que os modelos de multicamadas que são mais usados em modelo de circulação geral.

O modelo “*two-leaf*” diferencia as folhas sombreadas das não-sombreadas. Deste modo, duas séries de parâmetros físicos e fisiológicos eram formulados para representar as propriedades das folhas sombreadas e não-sombreadas. Várias melhorias foram feitas para dar subsídio ao modelo, ou seja, descrição na melhoria nas trocas de radiação, alterações no modelo de condutância estomática de Leuning et al. (1995), incluindo os efeitos do déficit hídrico do solo sobre a fotossíntese e a respiração dos ecossistemas. Esse modelo foi aperfeiçoado por Wang et al. (2001). Deste modo, os modelos de circulação geral da atmosfera (CGM) necessitavam de uma descrição detalhada dos fluxos de momentum, de calor latente, de calor sensível, de dióxido de carbono e de radiação entre a superfície terrestre e a atmosfera.

O aumento do interesse público nas mudanças climáticas tem levado para o desenvolvimento de modelos completos do sistema climático, incluindo o ciclo do carbono. E um modelo de ciclo do carbono acoplado, pode dar respostas de como as plantas afetam o clima e a concentração de CO<sub>2</sub>, em contrapartida, como o clima afeta os parâmetros fisiológicos das plantas e a produtividade.

## **2.7. Modelo biofísico CABLE**

Em 2003, foi lançado, o modelo “*The CSIRO Atmosphere Biosphere Land Exchange*” (CABLE) (KOWALISCK et al., 2006), que incluiu um modelo de dossel de “*two-leaf*”, modelo de turbulência no dossel, modelo de carbono e

um modelo de solo. É um modelo que descreve o sistema solo-planta-atmosfera, e foi desenvolvido para melhorar as estimativas dos fluxos de radiação, calor latente, calor sensível e dióxido de carbono entre a superfície e a atmosfera. Essas trocas são influenciadas por parâmetros tais como albedo, rugosidade, índice de área foliar, condutância estomatal, na qual controlam os fluxos de vapor d'água entre o ecossistema e a atmosfera. O CABLE consiste de um número de submodelos: (a) processo no dossel do ecossistema, (b) solo, (c) carbono e respiração do solo.

E suas principais características do CABLE são:

- Permite uma total interação aerodinâmica e radiativa entre o solo e a vegetação;
- Possui um modelo acoplado de condutância estomatal, fotossíntese e saldo de radiação;
- O modelo diferencia folhas sombreadas das não sombreadas;
- Possui um submodelo de radiação para calcular a Radiação Fotossinteticamente ativa (PAR), radiação térmica e infravermelha;
- Possui um modelo de turbulência da planta de Raupach et al. (1997) para calcular a temperatura e a umidade dentro do dossel;
- A produtividade primária líquida é determinada da assimilação de carbono corrigida pelas perdas respiratórias. O crescimento/decréscimo sazonal da biomassa é determinada pela partição do produto de assimilação entre folhas, raízes e caule. O fluxo de dióxido de carbono entre o solo e a vegetação é descrito por um modelo simples de carbono descrito por Dickinson et al. (1998).
- Possui um modelo de multicamadas do solo. As equações de Richards são resolvidas para o solo, enquanto as equações de condução de calor são usadas para temperatura do solo.

As primeiras versões do modelo foram testadas usando medidas dos fluxos para pastagens e culturas agrícolas (LEUNING et al., 1998; WANG et al., 2001), e a última versão tem sido calibrado através de uma série de dados observacionais acima de florestas ao redor do mundo (WANG et al., 2006). O desempenho do modelo CABLE foi comparado a outros modelos de superfície (ABROMOWITZ, 2005).

## 2.8. Testes estatísticos

A estatística RMSE (*Root Mean Square Error*) é a raiz quadrada do erro quadrático médio e a estatística MBE (*Mean Bias Error*) é o erro absoluto médio de previsão. Ambos os testes estatísticos dependem da escala da variável dependente. Essas medidas devem ser usadas para comparar diferentes modelos de estimativa.

O RMSE fornece informações sobre o desempenho à curto prazo das correlações permitindo a comparação termo a termo dos desvios entre os valores simulados pelo modelo e os medidos em campo. Dessa maneira, quanto menor o valor do desvio, melhor é o desempenho do modelo. Já o MBE fornece informações sobre o desempenho a longo prazo, assim um baixo MBE é desejado. Um valor positivo dá a quantidade média de superestimativa de uma observação individual, que cancelará uma subestimativa em uma observação separada.

Assim, quanto menor as estatísticas RMSE e MBE, melhor é a habilidade do modelo de fazer previsões. Logo, o MBE é uma indicação do desvio médio dos valores preditos dos valores medidos, enquanto o RMSE é uma medida da variação dos valores preditos ao redor dos valores medidos. O ideal é que o valor de MBE e o de RMSE seja o mais próximo a zero.

Os indicadores estatísticos coeficiente de correlação “r”, faz referência a precisão, e o índice de Willmott “d”, à exatidão.

O coeficiente de correlação “r” varia no intervalo  $(-1 \leq r \leq 1)$  e mede a proximidade da amostra de uma linha reta. Quanto mais próxima a amostra estiver de uma linha reta, mais próximo “r” estará de 1 e mais próximos estarão os pontos previstos do comportamento da amostra.

O índice de concordância de Willmott, “d”, está relacionado ao afastamento dos valores estimados em relação aos observados, variando de 0 para nenhuma concordância a 1 para a concordância perfeita. Segundo Melo (2009), o índice de concordância de Willmott visa avaliar o desempenho do modelo, comparando os dados simulados com os dados observados.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Localização e descrição do sítio experimental

O sítio experimental está localizado na FUNDACEP (Fundação Centro de Experimentação e Pesquisa Fecotrigô) ( $28^{\circ}36'S$ ;  $53^{\circ}40'O$ ; altitude 409 m), no município de Cruz Alta, no Estado do Rio Grande do Sul, conforme indicação em destaque na Figura 2.

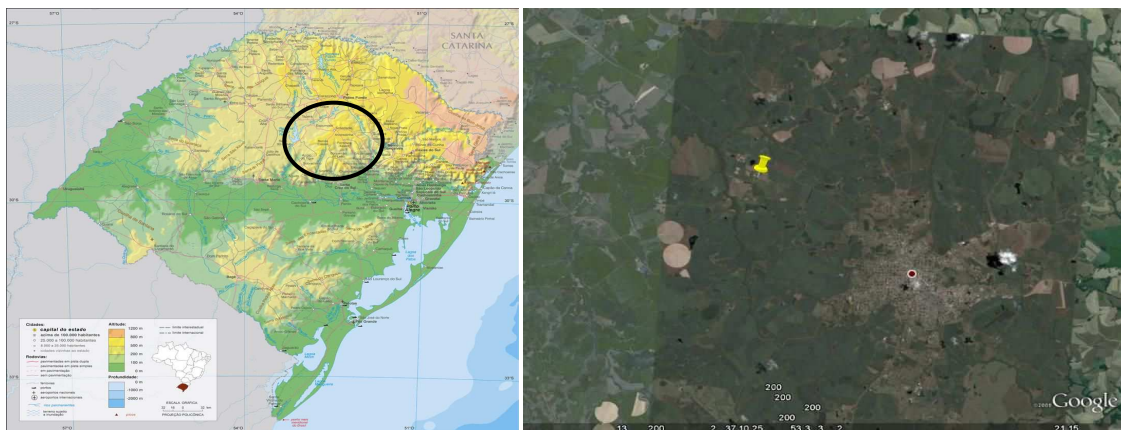


Figura 2 - Localização do sítio experimental no município de Cruz Alta, no Estado do Rio Grande do Sul.

Todos os elementos meteorológicos (exceto precipitação), juntamente com as medidas dos fluxos, foram coletados por instrumentos instalados em uma torre micrometeorológica de 6 m de altura do Laboratório de Micrometeorologia da Universidade Federal de Santa Maria (Lµmet-UFSM). Os dados de precipitação foram obtidos a partir da estação do INMET (localizada aproximadamente a 400 m da torre).

O clima em Cruz Alta é subtropical úmido, Cfa, conforme a classificação climática de Köppen. A precipitação média anual fica em torno de 1.774 mm, com chuvas bem distribuídas durante o ano. O mês mais quente do ano é janeiro, com o máximo normal de 30°C, e julho o mês mais frio, com mínima normal de 8,6°C. Na Figura 3 pode ser observado o diagrama das Normais Climatológicas, ilustrando temperatura média do ar e precipitação pluvial para todos os meses do ano.

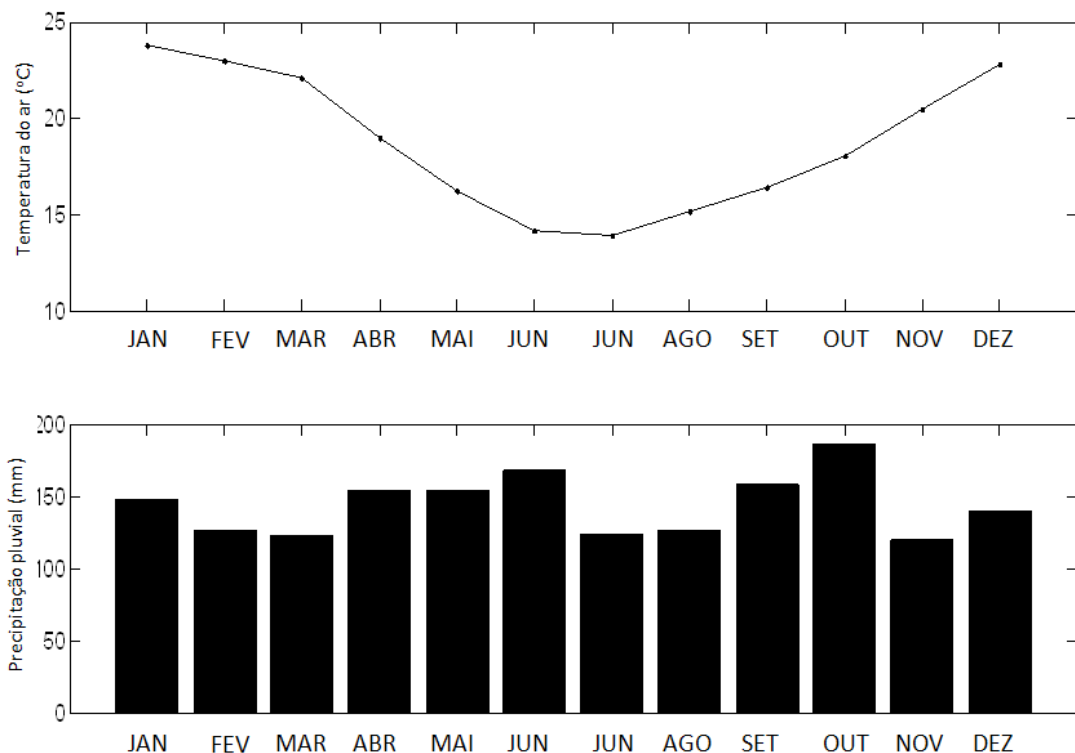


Figura 3 - Diagrama das normais climatológicas (1961-1990) do município de Cruz Alta (RS).

## 3.2. Medições e sistema de aquisição de dados

### 3.2.1. Medições na cultura da soja

A série de dados utilizada no presente estudo corresponde ao período de novembro de 2008 a abril de 2009. Para medição das variáveis meteorológica, necessárias à caracterização do microclima do ecossistema de soja e também para utilização como dados de entrada no modelo biofísico CABLE, foram instalados sensores em uma torre micrometeorológica, onde as variáveis geradas a cada 30 minutos, e estão apresentadas na Tabela 1. Todos os fluxos (calor sensível, calor latente e CO<sub>2</sub>) foram medidos através do método da covariância dos vórtices turbulentos (BALDOCCHI et al., 1988). Composto de um analisador de gás infravermelho (IRGA) (LI-7500, Licor, Inc., Lincoln, NE) acoplado a um anemômetro sônico tridimensional (CSAT-3, Campbell Scientific, Inc., Logan, UT), usado para medir as flutuações dos componentes da velocidade do vento. Os sinais digitais desses instrumentos foram obtidos numa frequência de 10 Hz e, as médias obtidas em intervalos de 30 minutos usando um datalogger CR23X da Campbell Scientific, onde os dados foram armazenados para o posterior processamento.

### 3.3. Cálculo dos fluxos

O fluxo de uma grandeza escalar “c” pode ser escrito:

$$F_c = \overline{w\rho_c} \quad (1)$$

em que  $F_c$  é fluxo escalar “c”;  $w$ , componente vertical da velocidade do vento; e  $\rho_c$ , densidade ou a concentração do escalar “c”.

A barra representa a média do produto sobre um intervalo de amostragem.

Tabela 1 - Variáveis meteorológicas coletadas na Estação Meteorológica Automática (EMA) com unidade de medida, identificação dos sensores e altura/profundidade de instalação

Medidas	Unidade	Instrumento/Modelo	Altura
Temperatura do ar	(°C)	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Direção do vento	( ° )	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Velocidade do vento	(m.s <sup>-1</sup> )	Campbell Scientific - CSAT 3	3 m
Umidade relativa	( % )	Probe HMP45C	2 m
Radiação solar global	(W.m <sup>-2</sup> )	Kipp & Zonen- CMP6	2 m
Saldo de radiação	(W.m <sup>-2</sup> )	Kipp & Zonen NR LITE	2 m
Precipitação	(mm)	Texas Instruments, INC	1,5 m
Radiação PAR	(μmol.m <sup>-2</sup> .s <sup>-1</sup> )	PAR LIT Kipp & Zonen	2 m
Temperatura do solo	(°C)	Termopar Tipo E – TCAV-L Campbell Scientific	5 cm*
Pressão	(mba)	Vaisala PTB220A piezo-resistance	1 m

\*Abaixo do solo.

Registros de velocidade do vento, temperatura do ar e concentração, apresentam forma irregular ou turbulenta, é conveniente, portanto considerar a soma das partes médias e das flutuações destas variáveis. Este processo é conhecido como decomposição de Reynolds; que aplicada para a velocidade do vento e a concentração pode ser escrita como:

$$w = \overline{w} + w' \quad (2)$$

$$\rho_c = \overline{\rho_c} + \rho_c' \quad (3)$$

Então, reescrevendo a equação (1) temos:

$$F_c = \overline{w\rho_c} + \overline{w'\rho_c'} \quad (4)$$

Na equação (4) pode ser observado que o fluxo vertical total de uma grandeza escalar é dado pela soma do fluxo vertical médio  $\overline{w\rho_c}$  e o fluxo turbulento  $\overline{w'\rho_c'}$ . Por definição, a média de flutuações  $\overline{w'}$  e  $\overline{\rho_c'}$  é igual a 0 (zero), porém, termos envolvendo o produto da média de dois componentes de flutuação, raramente são iguais à zero.

Uma hipótese normalmente feita, é que sobre certo intervalo de tempo não existe nenhum movimento regular de massa de ar na vertical, isto é,  $\overline{w}$  é igual a zero ( $\overline{w} = 0$ ). Com esta hipótese, nós obtemos da equação (5) da covariância de vórtices turbulentos:

$$F_c = \overline{w' \rho_c'} + (\text{termos de correção}) \quad (5)$$

Na equação (5) verifica-se que é necessário ter instrumentação capaz de para medir as flutuações da componente vertical da velocidade do vento e a densidade da concentração escalar da amostra de ar para a determinação do fluxo.

O algoritmo de cálculo dos fluxos turbulentos calcula previamente a rotação de coordenadas nos dados brutos do anemômetro, para avaliar o componente “u”, “v” e “w”.

### **3.4. Modelo biofísico CABLE**

O modelo CABLE foi utilizado para simular os fluxos de massa e energia durante todos os estádios fenológicos da cultura. Na Tabela 2 encontra-se descrito a quantidade mínima das variáveis de entrada necessárias para que o modelo consiga simular os fluxos de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H), fluxo de calor no solo (G), e o fluxo de dióxido de carbono.



Tabela 2 - Dados mínimos necessários para aplicação do modelo CABLE

---

Radiação global  
Temperatura do ar  
Umidade específica  
Velocidade do vento  
Precipitação  
Vento  
Pressão atmosférica  
Longitude  
Latitude

---

### 3.4.1. Equações básicas para processos na superfície

O CABLE calcula a evolução temporal dos fluxos de dióxido de carbono, de calor latente, de calor sensível e de radiação na superfície. Os fluxos turbulentos verticais de calor, vapor d'água e momentum são dependentes das propriedades médias dos fluxos multiplicado pelo uso das resistências aerodinâmicas. As formulações básicas para os processos de transferência entre o solo-vegetação-atmosfera é descrito por Kowalczyk et. al. (2006).

### 3.5. Método do balanço de energia

O método do balanço de energia usado para quantificar os fluxos entre a cultura do caupi e a atmosfera, foi baseado na Equação 6.

$$R_n = H + LE + G \quad (6)$$

em que  $R_n$  é saldo de radiação [ $W.m^{-2}$ ];  $H$ , fluxo de calor sensível [ $W.m^{-2}$ ];  $LE$ , fluxo de calor latente [ $W.m^{-2}$ ]; e  $G$ , fluxo de calor no solo [ $W.m^{-2}$ ].

### 3.6. Partição de energia

A partição da energia disponível em função dos fluxos de calor sensível e calor latente foi expressa pela razão de Bowen ( $\beta$ ), conforme a Equação 7:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (7)$$

O valor da Razão de Bowen (adimensional) depende essencialmente das condições hídricas da superfície evaporante. Para uma superfície úmida, o valor resultante da Razão de Bowen deverá ser pequeno, uma vez que a maior parte do saldo de radiação ( $R_n$ ) será utilizada para evaporar a água superficial e, portanto, sendo utilizado na forma de calor latente. Se a superfície estiver seca, o valor resultante da Razão de Bowen deverá ser grande, uma vez que neste caso, a maior parte de saldo de radiação será utilizada para o aquecimento do ar (PEREIRA et al., 1997).

#### 3.6.1. Análise estatística

O desempenho do modelo CABLE, aplicado para simular o balanço de energia, foi avaliado estatisticamente por meio da utilização de quatro testes estatísticos: Raiz do Erro Quadrado Médio (RMSE); Desvio Médio do Erro (MBE); precisão – Coeficiente de Correção ( $r$ ), e exatidão – Índice de Concordância de Willmott ( $d$ ) (WILLMOTT et al., 1985).

A raiz do erro quadrado médio (RMSE) é definida pela equação (8):

$$RMSE = \left( \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n di^2 \right)^{\frac{1}{2}} \quad (8)$$

em que  $n$ , número de dados da amostra; e  $d_i$ , diferença entre o valor estimado e o valor medido.

O desvio médio do erro (MBE) é definido pela equação (9):

$$MBE = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n di \quad (9)$$

O MBE fornece informações sobre o desempenho a longo prazo, assim um baixo MBE é desejado. Um valor positivo expõe a quantidade média de superestimativa de uma observação individual, que cancelará uma subestimativa em uma observação separada.

A precisão é dada pelo coeficiente da correlação, “r”, que indica o grau de dispersão dos dados obtidos em relação à medida, ou seja, o erro aleatório. O coeficiente de correlação é descrito pela equação (10):

$$r = \frac{n \sum M.O - (\sum M)(\sum O)}{\sqrt{[n \sum M^2 - (\sum M)^2][n \sum O^2 - (\sum O)^2]}} \quad (10)$$

sendo “M” os valores calculados pelo modelo, “O” os valores experimentais e “n” numero de dados. Os valores de coeficientes de correlação encontrados foram classificados seguindo a metodologia de Hopkins (2009) (Tabela 3).

Tabela 3 - Classificação das correlações de acordo com o coeficiente de correlação

Coeficiente de correlação “r”	Correlação
0,0 – 0,1	Muito Baixa
0,1 – 0,3	Baixa
0,3 – 0,5	Moderada
0,5 – 0,7	Alta
0,7 – 0,9	Muito Alta
0,9 – 1,0	Quase perfeita

O Índice de Concordância de Willmott, “d”, mede a dispersão dos dados em relação à reta “1:1”, isto é, mede a exatidão dos valores simulados em relação aos medidos. Este índice varia de “0 a 1”, sendo que quanto mais próximo de 1, menor a amplitude dos erros. O Índice de Concordância de Willmott, “d”, é descrito pela equação (11):

$$d = 1 - \frac{\sum M_i - O_i^2}{\sum \left| M_i - \bar{O} \right| + \left| O_i - \bar{O} \right|^2} \quad (11)$$

sendo “ $M_i$ ” os valores calculados pelo modelo, “ $O_i$ ” os valores experimentais.

## **4. RESULTADOS E DISCUSSÃO**

### **4.1. Características climáticas de Cruz Alta-RS**

O total diário acumulado da precipitação pluviométrica e temperatura média do ar para o período experimental são apresentados na Figura 4. As Normais Climatológicas (1961-1990) e os dados observados da precipitação pluvial (acumulado mensal) e temperatura do ar (média mensal) para o município de Cruz Alta-RS, durante o período experimental, são apresentadas nas Figuras 5 e 6, respectivamente. A variação da temperatura do ar durante o período experimental apresentou tendência semelhante as das Normais Climatológicas com valores variando de 17,1°C a 23,1°C, com média de  $21,3 \pm 2,1^\circ\text{C}$ . Já a precipitação pluvial observada ficou bem abaixo dos valores normais do período, especialmente do último decêndio de fevereiro, correspondente ao estágio reprodutivo, em que é observado baixa ocorrência de chuvas, caracterizando um período seco dentro do período do experimento. Isso pode ser explicado ao fenômeno “La nina” predominante no ano de 2009, esse fenômeno é caracterizado com baixa pluviosidade para a região sul.

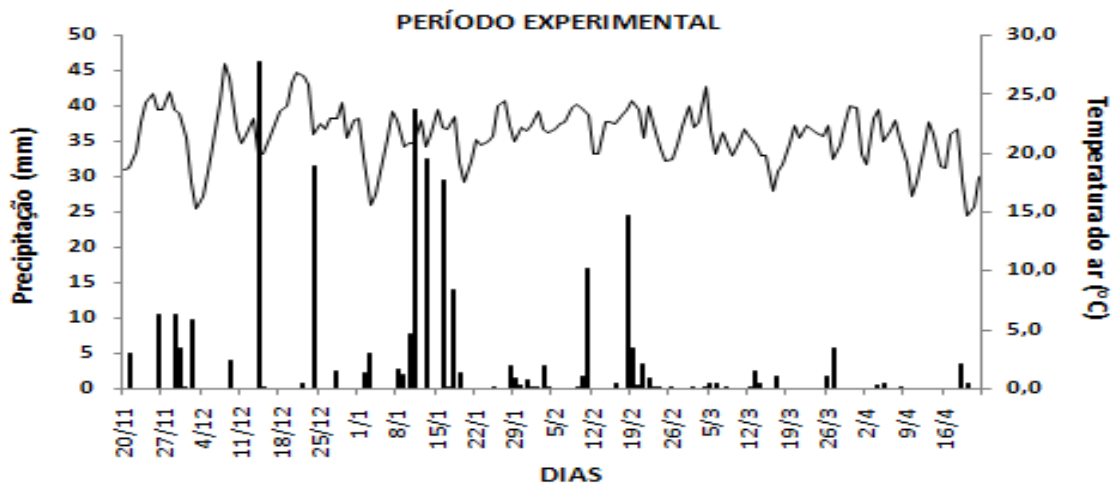


Figura 4 - Total diário acumulado da precipitação pluvial e da temperatura média do ar durante o período experimental.

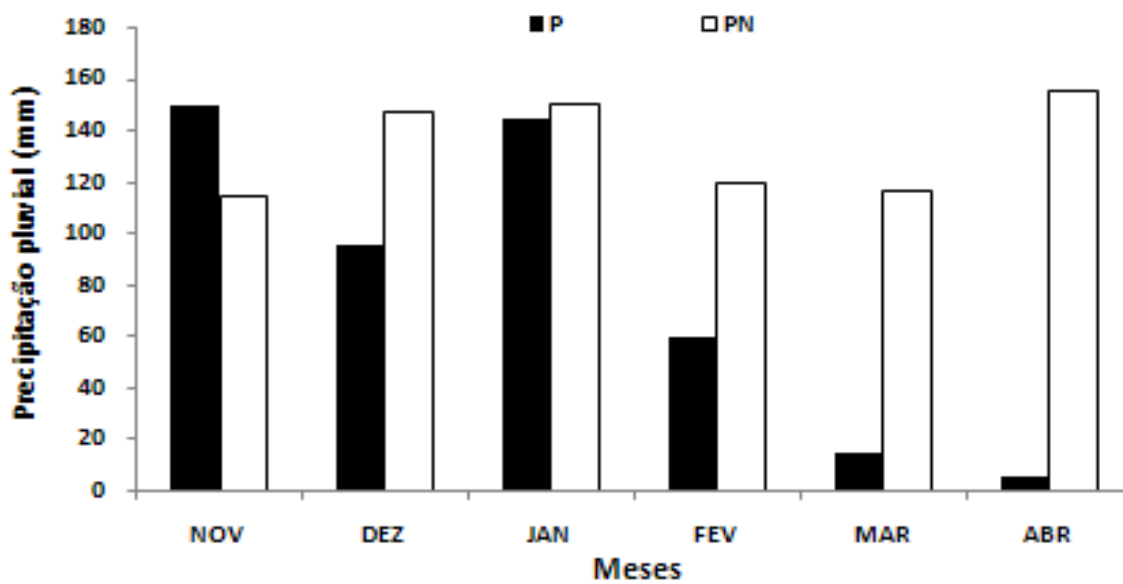


Figura 5 - Valores mensais da precipitação pluvial (P) (2008/09) e precipitação pluvial (PN) (1961-1990), Cruz Alta, RS.

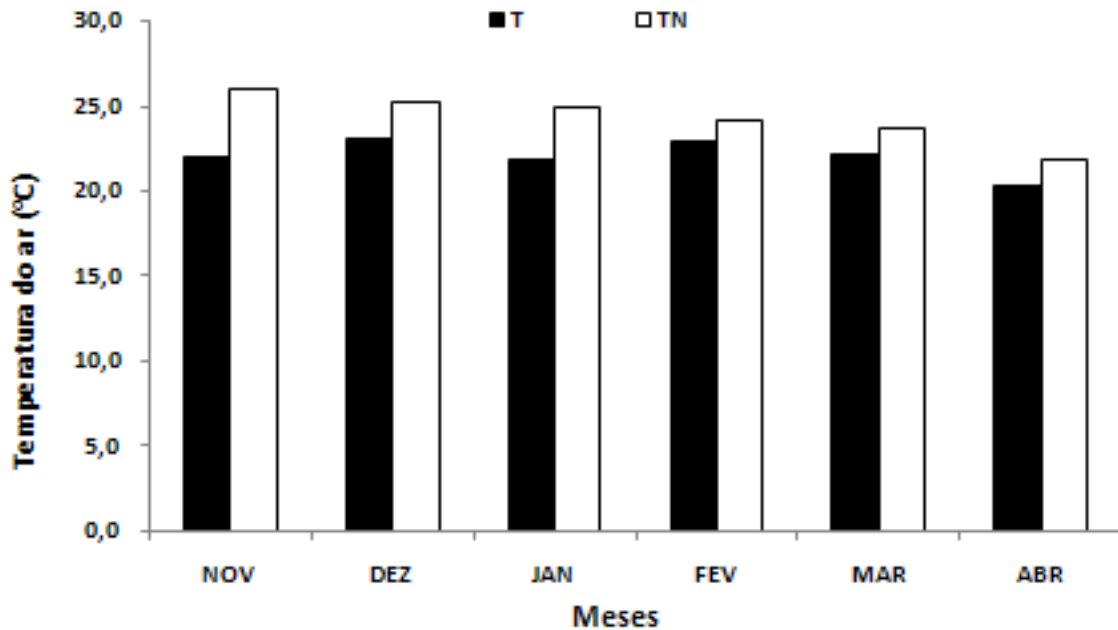


Figura 6 - Valores mensais da temperatura do ar (T) (2008/09) e temperatura do ar (TN) (1961-1990), Cruz Alta, RS.

Os valores médios diários da velocidade média do vento, umidade relativa do ar e déficit de pressão de vapor, durante o período experimental estão respectivamente apresentados na Figura 7.

A velocidade média diária do vento variou entre  $0,75 \text{ m.s}^{-1}$  e  $8,8 \text{ m.s}^{-1}$ , com valor médio de  $3,3 \pm 1,36 \text{ m.s}^{-1}$  (Figura 7a). A umidade relativa variou entre 31,9% a 90,2%, com valor médio de  $67,5 \pm 11,12\%$  (Figura 7b). O déficit de pressão de vapor variou entre 0,18 kPa a 2,88 kPa, com média de  $0,94 \pm 0,44 \text{ kPa}$  (Figura 7c).

A distribuição da precipitação no período experimental condicionou as variações de umidade relativa e déficit de pressão de vapor e, conseqüentemente, as taxas de evapotranspiração. A partir do último decêndio de fevereiro com a redução nos totais de precipitação ocorreu uma tendência de aumento do déficit de pressão de vapor e concomitantemente a redução da umidade relativa. Hirasawa e Hsiao (1999) observaram decréscimo na fotossíntese da cultura do milho, quando o déficit de pressão de vapor atingiu valores acima de 2,0 kPa.

Os dados observados da velocidade do vento, com média de  $3,3 \text{ m.s}^{-1}$ , durante o período experimental, ficou bem acima do valor crítico de  $2,5 \text{ m.s}^{-1}$  que, segundo Barford et al. (2001), assegura uma mistura turbulenta adequada para o bom desempenho do sistema de covariância dos vórtices turbulentos.

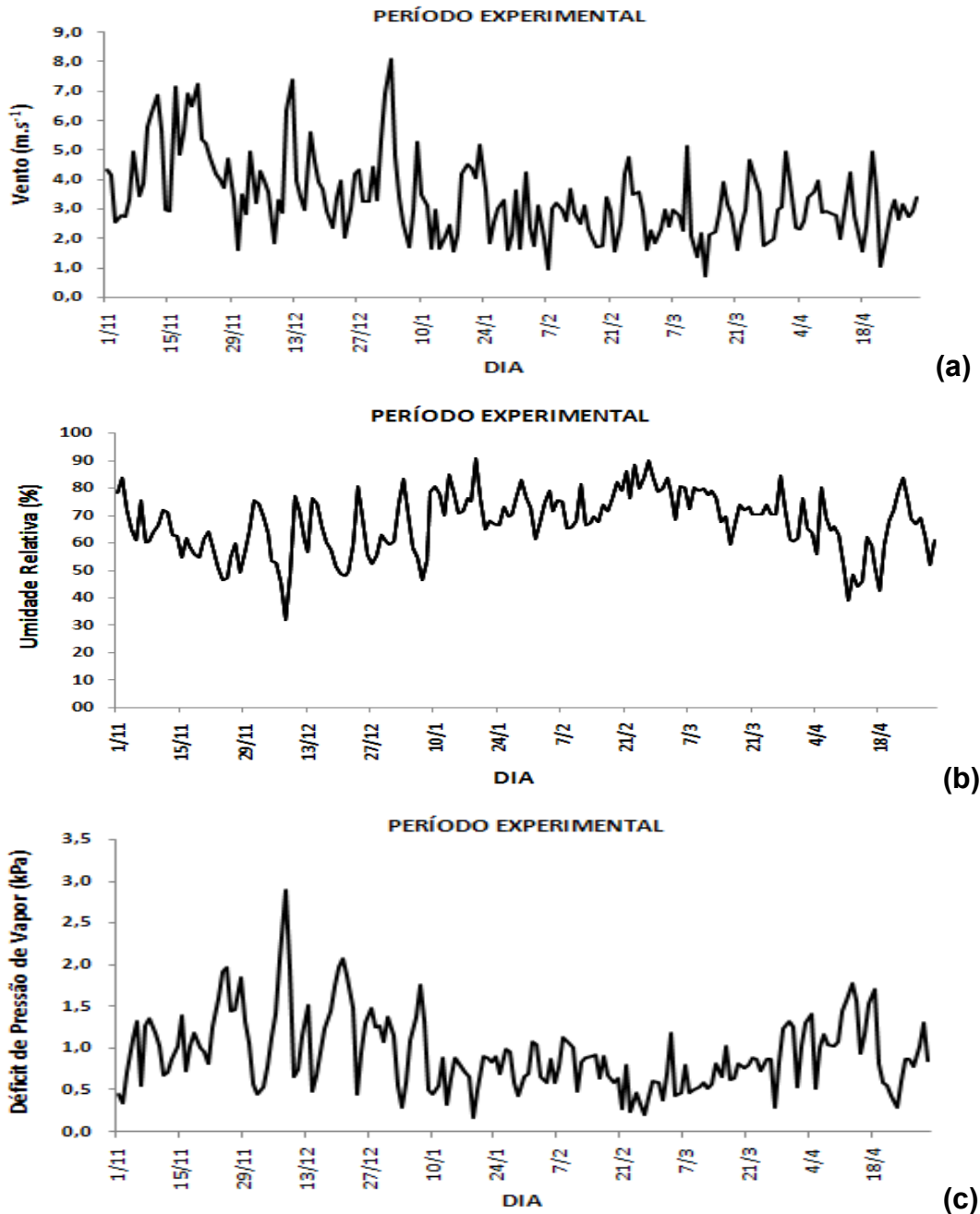


Figura 7 - Variação diária da velocidade média do vento (a), umidade relativa (b) e déficit de pressão de vapor (c), para o período experimental.



Nas Figuras 8 e 9, estão ilustradas a variação do conteúdo de água no solo e a temperatura média do solo, respectivamente. O solo do local é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico com textura franco – argilosa (EMBRAPA, 1999). Para o período experimental a média do conteúdo de água no solo foi de  $0,22 \pm 0,04$ , oscilando entre 0,14 e 0,31. A temperatura do solo apresentado na Figura 9 para todo o período experimental obteve uma média de  $23,60 \pm 1,43$ , variando entre 18,98 e 27,47.

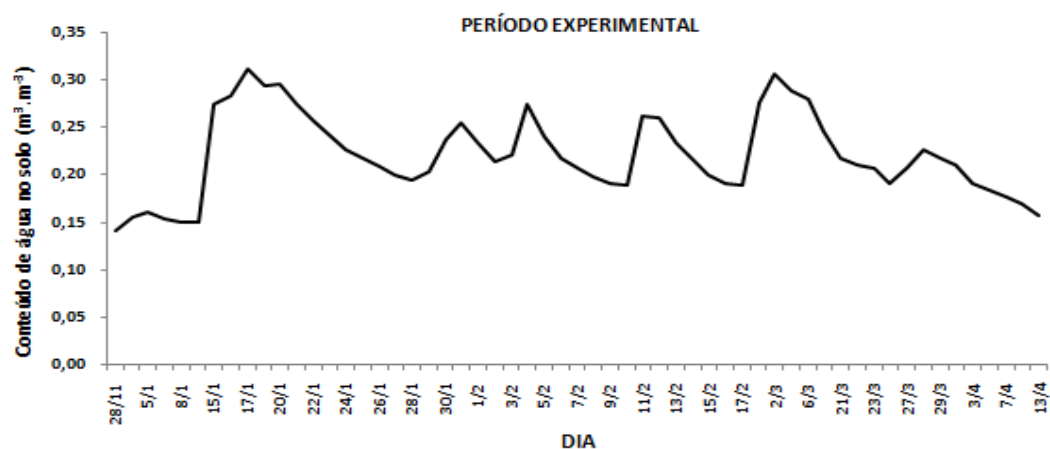


Figura 8 - Variação diária do conteúdo de água no solo durante o período experimental.

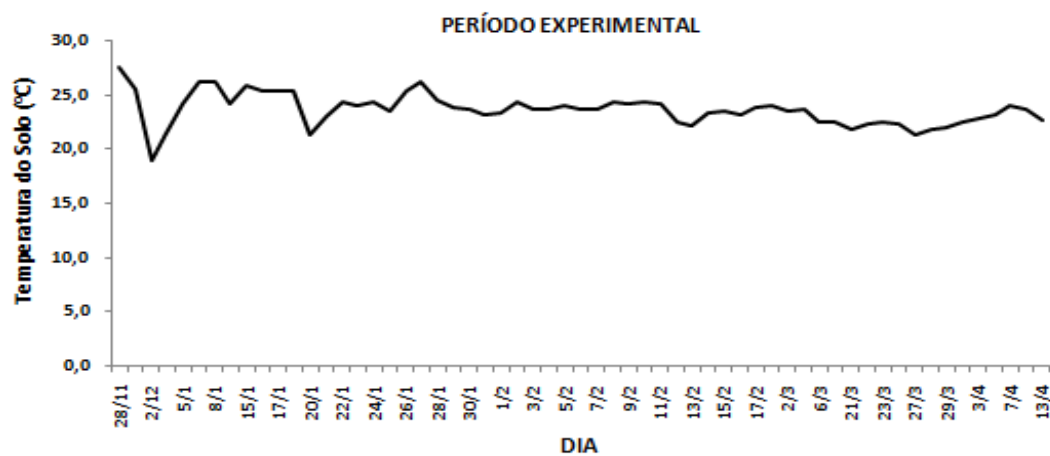


Figura 9 - Variação diária da temperatura média do solo durante o período experimental.

## 4.2. Análise do balanço de radiação

### 4.2.1. Radiação solar global e saldo de radiação

Os valores médios horários da radiação solar global ( $R_g$ ) e do saldo de radiação ( $R_n$ ), para o período experimental, referente aos meses de novembro de 2008 a abril de 2009, são apresentados na Figura 10. Os valores de  $R_g$  e  $R_n$  apresentaram mesma tendência durante o ciclo da cultura, com valores médios para o período de diurno (8 às 17 horas) de  $590,4 \text{ W.m}^{-2}$  e  $344,1 \text{ W.m}^{-2}$ , respectivamente. A variação média de  $R_n$  entre às 19:00 e 7:00 h foi de  $-1,6 \text{ W.m}^{-2}$  a  $-45,4 \text{ W.m}^{-2}$ , com valor médio de  $-36,9 \text{ W.m}^{-2}$ .

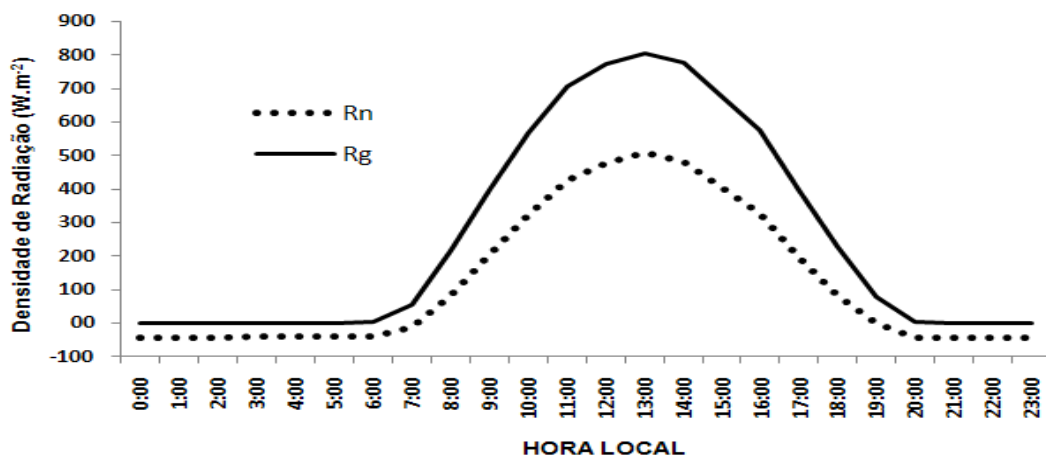


Figura 10 - Valores médios horários da radiação solar global ( $R_g$ ) e do saldo de radiação ( $R_n$ ), durante o período experimental.

A regressão linear entre os valores médios horários durante o período diurno do saldo de radiação e da radiação solar global para a cultura da soja em Cruz Alta-RS resultou na equação (12):

$$R_n = 0,68.R_g - 55,94 \quad r^2 = 0,95 \quad (12)$$

Na Figura 11 está apresentada a relação entre  $R_n$  e  $R_g$  em base horária para a cultura da soja em Cruz Alta (RS). Segundo Cunha et al., (1993), a estimativa do saldo de radiação, torna-se confiável quando o coeficiente de determinação obtido é superior a 0,90.

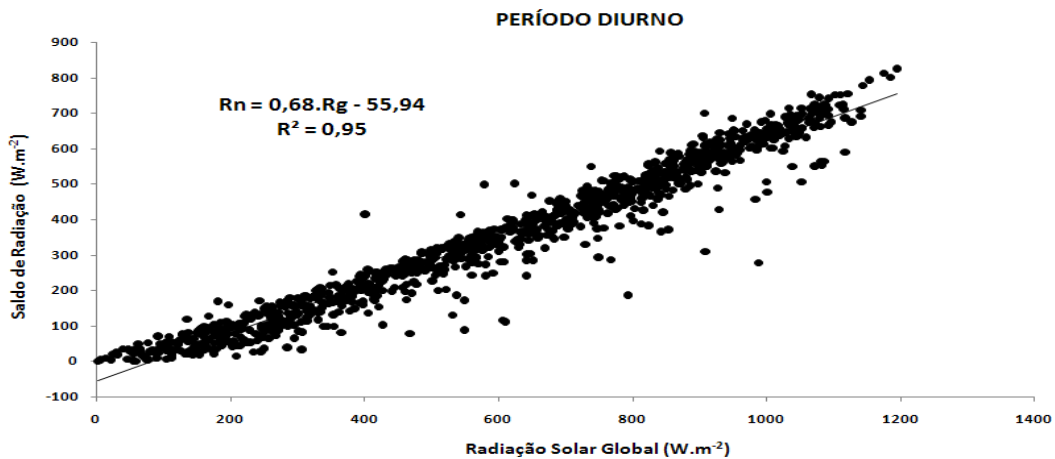


Figura 11 - Relação entre os valores horários do saldo de radiação ( $R_n$ ) e da radiação solar global ( $R_g$ ), para a cultura da soja, em Cruz Alta (RS).

A variação dos totais diários de  $R_g$  e  $R_n$  durante o período experimental está apresentada na Figura 12. Os totais diários de  $R_g$  variaram de  $7,54 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$  (19/01/2009) a  $31,7 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$  (05/01/2009), com valor médio de  $21,43 \pm 4,91 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ . O saldo de radiação variou de  $18,21 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$  (26/01/2009) a  $3,26 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$  (19/01/2009), com valor médio de  $12,36 \pm 3,42 MJ.m^{-2}.dia^{-1}$ . Os valores obtidos ao longo do período experimental foram similares ao encontrados em literatura (FONTANA, 1991; FRISINA et al., 1999; TEIXEIRA, 2001; SAN JOSE et al., 2003; NEVES et al., 2008; SILVA et al., 2011).

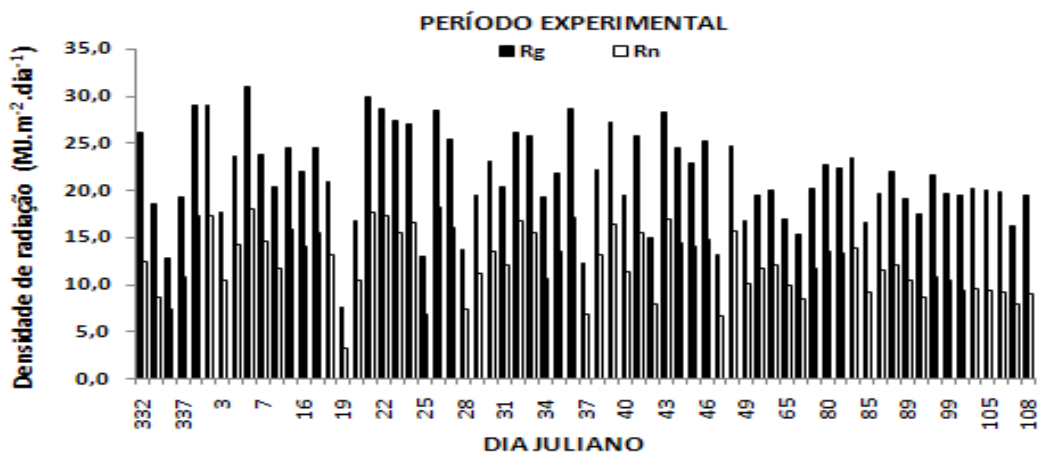


Figura 12 - Totais diários da radiação solar global (Rg) e do saldo de radiação (Rn) para o período experimental, de novembro de 2008 a abril de 2009.

Na Figura 13 está apresenta a relação entre os valores diários do saldo de radiação e da radiação solar global acima da cultura da soja. Durante o período de medições, a razão entre o saldo de radiação e a radiação solar global (Rn/Rg) variou entre 0,42 e 0,66. A equação de regressão obtida considerando o coeficiente linear igual a zero, foi:

$$Rn = 0,59.Rg \quad r^2 = 0,91 \quad (13)$$

Teixeira (2001) constatou o aumento da razão (Rn/Rg), de 0,55 para 0,75 no cultivo de banana ao final do primeiro ano de produção, com valor médio de 0,64. Pezzopane e Júnior (2003), no cultivo de videira, obtiveram valores entre 0,54 e 0,85, enquanto Neves et al. (2008) para o cultivo do feijão caupi na região de Bragança-PA, encontraram valores médios de 0,62.

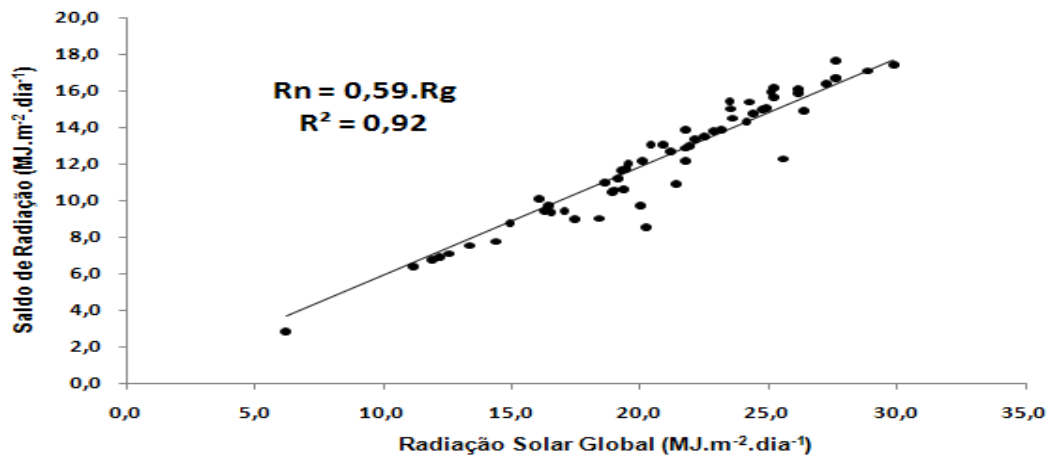


Figura 13 - Relação entre os valores diários do saldo de radiação (Rn) e da radiação solar global (Rg), para cultura da soja, em Cruz Alta (RS).

#### 4.3. Variação dos componentes do balanço de energia

A análise dos componentes do balanço de energia foi realizada com base nos dados obtidos acima da cultura da soja representativos dos estádios dessa cultura. Os períodos correspondentes a cada estágio da cultura da soja estão ilustrados na Tabela 4.

Tabela 4 - Período correspondente a cada estágio da cultura da soja

Estádios	Período
Emergência	28/11 a 04/12/2008
Vegetativo	22/12/2008 a 07/02/2009
Reprodutivo	09/02 a 07/04/2009
Maturação	08/04 a 14/04/2009

### 4.3.1. Estádio de emergência

#### 4.3.1.1. Variação diária

Na Tabela 5 são apresentados durante o estágio de emergência acima da cultura da soja, os valores diários dos componentes do balanço de energia no período diurno, compreendido entre 8 e 17 horas.

Tabela 5 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em  $\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e suas relações com Rn, durante o estágio de emergência da cultura da soja

Data	Rn	LE	H	G	LE/Rn	H/Rn	G/Rn
	$\text{MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$						
28/11/2008	12,48	4,05	6,79	0,10	0,32	0,54	0,01
29/11/2008	8,60	3,53	4,42	1,48	0,41	0,51	0,17
1/12/2008	7,38	3,93	3,11	0,60	0,53	0,42	0,08
2/12/2008	10,83	2,57	4,56	0,09	0,24	0,42	0,01

Os valores do saldo de radiação (Rn) apresentaram média de  $9,82 \pm 2,28 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , enquanto o valor médio do fluxo de calor latente (LE) foi de  $3,52 \pm 0,67 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , e os valores do fluxo de calor sensível (H) foi  $4,72 \pm 1,52 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ .

A partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE/Rn), variou entre 0,24 e 0,53, com média de  $0,38 \pm 0,13$ . Do saldo de radiação em fluxo de calor sensível (H/Rn), variou entre 0,42 e 0,54, com média de  $0,48 \pm 0,06$ . Do saldo de radiação em fluxo de calor no solo (G/Rn), variou entre 0,01 e 0,17, com média de  $0,07 \pm 0,05$ . Assim, o principal componente do saldo de radiação para esse estágio da cultura, no período diurno, foi o fluxo de calor sensível (H), contribuindo para o aquecimento da atmosfera acima da cultura da soja. Tal fato possivelmente ocorreu pela maior exposição e baixos índices

de umidade do solo. Valores encontrados por Lima et al. (2005) em estudo com o feijão, uma  $C_3$ , foram similares aos encontrados para cultura da soja. Segundo o autor, a maior exposição do solo descoberto, contribuiu para os valores mais altos do fluxo de calor sensível para esse estágio da cultura.

#### 4.3.1.2. Variação horária

Os padrões típicos de variação dos componentes do balanço de energia no estágio de emergência da cultura da soja baseado nos valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G), estão ilustrados na Figura 14.

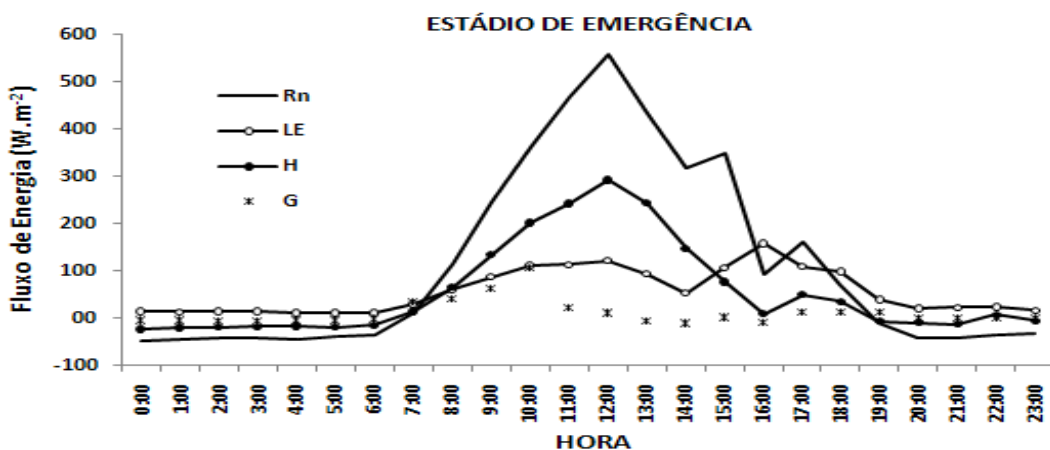


Figura 14 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e, do fluxo de calor no solo (G), para o estágio de emergência da cultura da soja.

Os valores médios horários dos componentes do balanço de energia para o estágio de emergência (28/11 a 04/12/2008), apresentaram a mesma tendência do saldo de radiação (Rn), com valores máximos ocorrendo próximo ao meio-dia, seguido de decréscimo gradual até o final da tarde. Valores do saldo de radiação variaram entre  $90,84 \text{ W.m}^{-2}$  e  $560,24 \text{ W.m}^{-2}$ , com média de

310,14 ±156,18 W.m<sup>-2</sup>. Nesse estágio fenológico, o fluxo de calor sensível (H) foi o componente predominante do saldo de radiação, variando de 8,53 W.m<sup>-2</sup> a 292,25 W.m<sup>-2</sup>, com média de 145,99 ±96,10 W.m<sup>-2</sup>. O fluxo de calor latente (LE) variou entre 52,70 W.m<sup>-2</sup> e 158,32 W.m<sup>-2</sup>, com média 101,15 ±30,44 W.m<sup>-2</sup>. Segundo Lima et al. (2005), o comportamento dos fluxos de massa e energia no estágio de emergência é influenciado, principalmente, pelas condições de cobertura do solo.

A partição do saldo de radiação nos fluxos de calor latente, sensível e no solo, durante o estágio de emergência da cultura da soja, são apresentados na Figura 15.

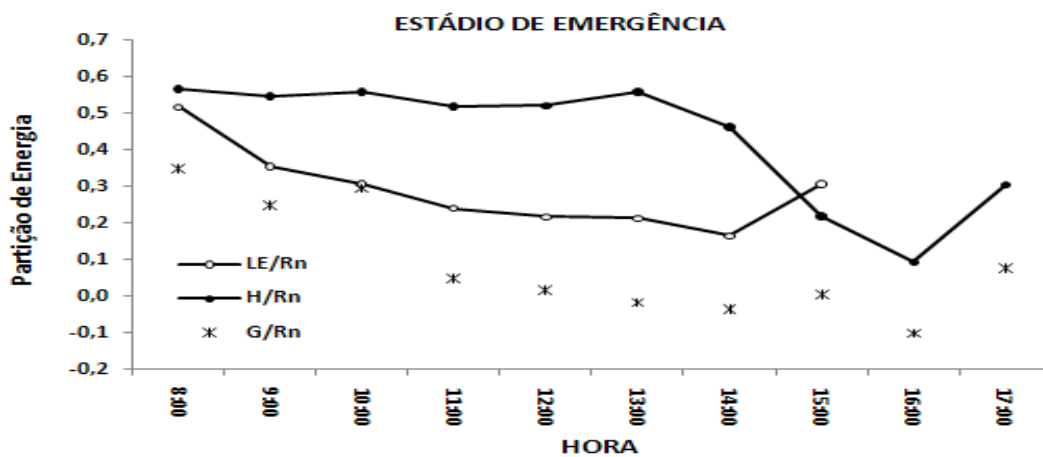


Figura 15 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no sol (G) para o estágio de emergência da cultura de soja.

Nesse estágio, a maior parte da energia foi utilizada para aquecer a atmosfera acima da cultura. A partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível (H/Rn) variou entre 0,09 e 0,57, com média de 0,44 ±0,17. A partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE/Rn) variou entre 0,17 e 0,52, com média 0,29 ±0,11. Já a partição do fluxo de calor no solo (G/Rn) variou de -0,10 e 0,35, com média de 0,21±0,04. Resultados similares para o estágio de emergência foram encontrados na literatura, tanto para soja (FONTANA, 1991), feijão caupi (LIMA et al., 2005; NEVES et al., 2008) e trigo (ZHANG, 2002).



Uma avaliação do fechamento do balanço de energia no estágio de emergência da soja está ilustrada na Figura 16. Essa avaliação consiste na comparação das somas dos fluxos de calor latente e de calor sensível (LE+H), medidas pela técnica da covariância dos vórtices turbulentos, e a energia disponível, expressa pela diferença entre o saldo de radiação (Rn) e o fluxo de calor no solo (G). A estimativa do fechamento do balanço de energia corresponde ao coeficiente de declividade da regressão linear entre (LE+H) e (Rn-G).

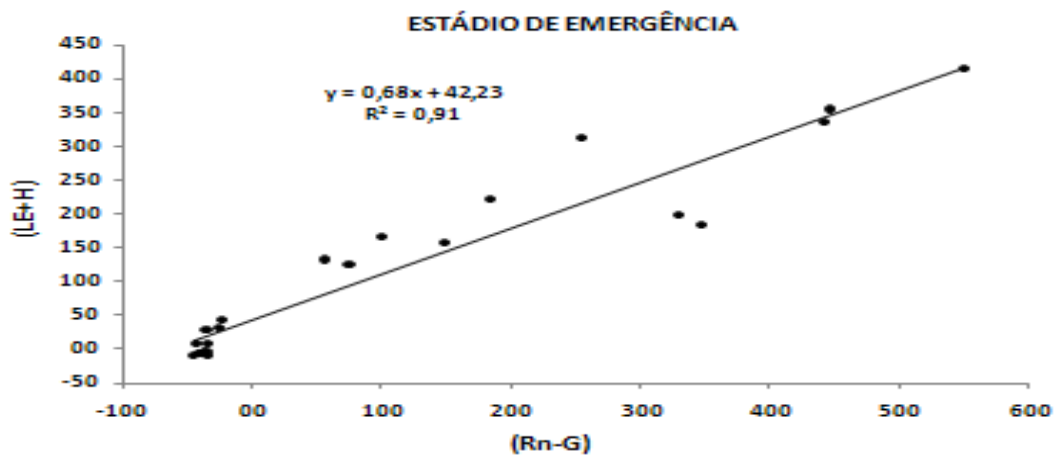


Figura 16 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível, correspondente ao saldo de radiação (Rn) subtraindo o fluxo de calor no solo (G), durante o estágio de emergência da soja.

Os resultados apresentados na Figura 17 indicam um coeficiente de declividade da regressão linear no estágio de emergência de 0,68. Esse valor relativamente baixo na emergência pode ter sido devido à pequena cobertura do solo pela cultura. Segundo Aubinet et al. (2000), é esperado que não ocorra o fechamento total do balanço de energia, porque na contabilização dos resultados nem todas as trocas e processos envolvidos são considerados no sistema solo-planta-atmosfera. Baseado em estudos com diferentes coberturas vegetais, Aubinet et al. (2000) obtiveram coeficientes de declividade de regressão linear que variaram entre 0,84 e 0,93.

Em estudo com o trigo, Kjaersgaard (2007) comparou medidas realizadas pelo método da covariância dos vórtices turbulentos com medidas pontuais do saldo de radiação, e verificou que o fechamento do balanço de energia variou entre 55% e 75%.

Medições feitas e vegetação de cerrado, próximo a Brasília, por Giambelluca et al. (2009), resultaram em coeficientes de 0,78 e 0,85, para o cerrado denso e o campo cerrado, respectivamente. Verma et al. (2005) obtiveram resultados bem satisfatórios sobre o fechamento do balanço de energia para os resultados de milho e soja, tendo obtido coeficiente de declividade da regressão que variaram de 0,91 a 1,05. San José et al. (2007) obtiveram resultados sobre o fechamento do balanço de energia para a cultura de abacaxi, com coeficiente de 0,99.

Segundo Meyes e Hollinger (2004), os termos de energia armazenada no dossel afetam os resultados sobre o fechamento do balanço de energia. Os mesmos autores obtiveram um coeficiente de declividade da regressão de 0,84 para a cultura do milho, sem incluir os termos de energia armazenada no dossel. Ao incluir os termos de energia armazenada o coeficiente de declividade passou para 0,94. Resultados semelhantes foram obtidos pelos mesmos autores para a cultura de soja, em que um coeficiente de 0,90 foi obtido sem incluir os termos de energia armazenada no dossel, passando a 0,97 com adição dessa energia armazenada.

É fundamental que se amplie a compreensão das causas que afetam o fechamento do balanço de energia não apenas devido à interpretação das medições dos fluxos de energia, mas também devido às comparações com resultados obtidos como modelos biofísicos dos fluxos de energia. Uma avaliação do fechamento do balanço de energia em 22 sítios da rede FLUXNET, realizada por Wilson et al. (2002), indicou um valor médio do coeficiente de declividade da regressão de 0,80. Nesse estudo foi verificado melhora do fechamento com o aumento da velocidade de fricção, sendo que o não fechamento prevalece na maioria das condições, especialmente à noite, quando a intensidade turbulenta é menor.

Esses resultados experimentais são relevantes no contexto de modelos como o SEBAL (Surface Energy Balance Algorithm for Land) (BASTIAANSEN

et al., 2000), que estima os componentes do balanço de energia assumindo um perfeito fechamento.

Na Figura 17 pode ser observada a variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período diurno do estágio de emergência da cultura da soja. Como era esperado, os valores para esse período foram altos, sugerindo um período com baixa umidade do solo. Valores da Razão de Bowen variaram entre 0,05 e 2,79 com valor médio de  $1,56 \pm 0,95$ . Resultados semelhantes foram observados para o mesmo período, com pesquisa realizada com feijão caupi (NEVES et al., 2008). Para o mesmo período em estudo com o trigo, Zhang et al. (2002) obtiveram valor do índice da razão de Bowen de 1,80 no estágio inicial da cultura.

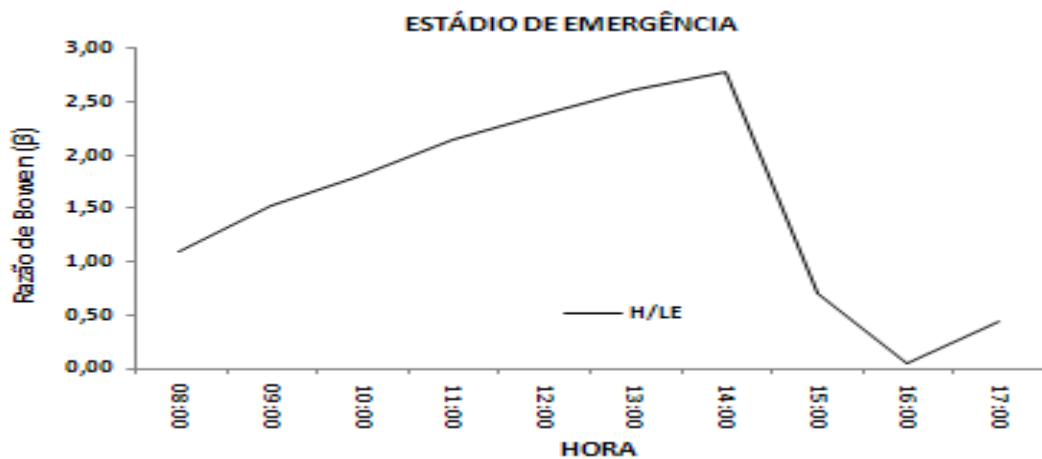


Figura 17 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período diurno do estágio de emergência da cultura da soja.

#### 4.3.2. Estádio vegetativo

##### 4.3.2.1. Variação diária

Na Tabela 6 está apresentado o resumo dos valores médios diários (período entre 8 e 17 horas) dos componentes do balanço de energia e da partição do saldo de radiação ( $R_n$ ) em fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível (H) e fluxo de calor no solo (G). O saldo de radiação variou entre 3,26

MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> a 18,21 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com um valor médio de 13,62±3,79 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. No estágio vegetativo, o fluxo de calor latente foi predominante em todo o período em contraste com o estágio de emergência, em que existe predominância do fluxo de calor sensível. O fluxo de calor latente variou entre 2,92 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> a 11,84 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com um valor médio de 8,24±2,19 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. San José et al. (2003), em pesquisa realizada com duas espécies de feijão caupi, encontrou valores médios do saldo de radiação de 12,00 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> e de fluxo de calor latente de 8,45 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, ou seja, valores próximos aos encontrados no presente estudo.

As magnitudes do fluxo de calor sensível no estágio vegetativo foram pouco menores do que os observados durante o estágio de emergência da soja, variando de 0,62 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> a 5,82 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com valor médio de 2,49±1,38 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Os maiores valores do fluxo de calor sensível nesse estágio fenológico foram observados na parte inicial devido, possivelmente, ao índice de área foliar não ter atingido o valor de cobertura total do solo.

As magnitudes do fluxo de calor no solo foram ligeiramente superiores no estágio vegetativo comparado com o estágio de emergência, com ocorrência dos maiores valores também no início do estágio vegetativo, em função da maior exposição do solo. O fluxo de calor no solo variou de -0,57 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> a 2,58 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, com valor médio de 0,98 ±0,74 MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>.

A contribuição do fluxo de calor latente na liberação de energia na atmosfera no estágio vegetativo da soja fica mais evidente ao se analisar a partição do saldo de radiação em seus componentes do balanço de energia. Os valores médios da partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo foram respectivamente, 0,62, 0,18 e 0,07. Esses resultados mostram que a energia utilizada na evapotranspiração foi mais de três vezes àquela utilizada para aquecer o ar no estágio vegetativo acima da cultura da soja. Esses resultados foram semelhantes aos obtidos por Fontana et al. (1991) para a cultura da soja nesse mesmo estágio fenológico.

Tabela 6 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, e suas relações com Rn, durante o período vegetativo da cultura da soja

Data	MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>				LE/Rn	H/Rn	G/Rn
	Rn	LE	H	G			
31/12/2008	17,39	8,59	5,50	2,58	0,49	0,32	0,15
2/1/2009	17,39	8,06	5,64	2,26	0,46	0,32	0,13
4/1/2009	10,42	4,51	3,95	-0,54	0,43	0,38	0,05
5/1/2009	14,23	6,00	4,99	0,86	0,42	0,35	0,06
6/1/2009	17,98	9,45	5,82	2,22	0,53	0,32	0,12
8/1/2009	14,58	7,64	3,35	1,96	0,52	0,23	0,13
9/1/2009	11,63	7,86	2,65	1,67	0,68	0,23	0,14
16/1/2009	15,95	10,14	2,13	1,27	0,64	0,13	0,08
17/1/2009	14,01	9,17	1,44	1,11	0,65	0,10	0,08
18/1/2009	15,51	8,51	2,46	1,33	0,55	0,16	0,09
19/1/2009	13,26	6,97	1,72	1,17	0,53	0,13	0,09
20/1/2009	3,26	2,92	1,05	-0,57	0,89	0,32	0,08
21/1/2009	10,48	6,78	1,83	0,24	0,65	0,18	0,02
22/1/2009	17,66	11,48	2,70	1,30	0,65	0,15	0,07
23/1/2009	17,26	11,84	2,66	1,51	0,69	0,15	0,09
24/1/2009	15,45	10,40	2,59	1,06	0,67	0,17	0,07
25/1/2009	16,58	10,85	2,71	1,47	0,65	0,16	0,09
26/1/2009	6,92	6,20	0,62	0,63	0,90	0,09	0,09
27/1/2009	18,21	10,16	2,14	1,50	0,56	0,12	0,08
28/1/2009	16,15	8,56	2,01	1,28	0,53	0,12	0,08
29/1/2009	7,36	6,04	1,25	0,37	0,82	0,17	0,05
30/1/2009	11,25	6,34	1,83	0,59	0,56	0,16	0,05
31/1/2009	13,54	7,56	2,66	0,31	0,56	0,20	0,02
1/2/2009	12,12	7,22	1,96	0,33	0,60	0,16	0,03
2/2/2009	16,72	9,90	1,78	1,06	0,59	0,11	0,06
3/2/2009	15,55	10,83	1,53	0,80	0,70	0,10	0,05
4/2/2009	10,70	7,68	1,13	0,43	0,72	0,11	0,04
5/2/2009	13,49	8,19	1,84	0,58	0,61	0,14	0,04
6/2/2009	17,16	11,61	2,79	0,85	0,68	0,16	0,05
7/2/2009	6,91	4,79	0,83	0,21	0,69	0,12	0,03
8/2/2009	13,20	9,19	1,58	0,66	0,70	0,12	0,05

#### 4.3.2.2. Variação horária

A variação média horária dos componentes do balanço de energia no período diurno, para o estágio vegetativo, está ilustrada na Figura 18. Os valores do saldo de radiação ( $R_n$ ) variaram entre  $69,09 \text{ W.m}^{-2}$  e  $549,11 \text{ W.m}^{-2}$ , com média de  $373,2 \pm 161,46 \text{ W.m}^{-2}$ . O fluxo de calor latente (LE) variou entre  $70,69 \text{ W.m}^{-2}$  e  $321,35 \text{ W.m}^{-2}$ , com média de  $227,41 \pm 84,89 \text{ W.m}^{-2}$ . O fluxo de calor sensível (H) variou entre  $13,89 \text{ W.m}^{-2}$  e  $103,92 \text{ W.m}^{-2}$ , com média de  $66,66 \pm 33,02$ , enquanto o fluxo de calor no solo (G) variou entre  $-7,72 \text{ W.m}^{-2}$  e  $59,18 \text{ W.m}^{-2}$ , com média de  $25,60 \pm 20,40 \text{ W.m}^{-2}$ . Nesse estágio fenológico foi registrado um total de 148 mm de chuva (Figura 5) resultando em condições sem restrição hídrica o que contribuiu juntamente com o aumento do índice de área foliar para a maior utilização de energia sob a forma de fluxo de calor latente.

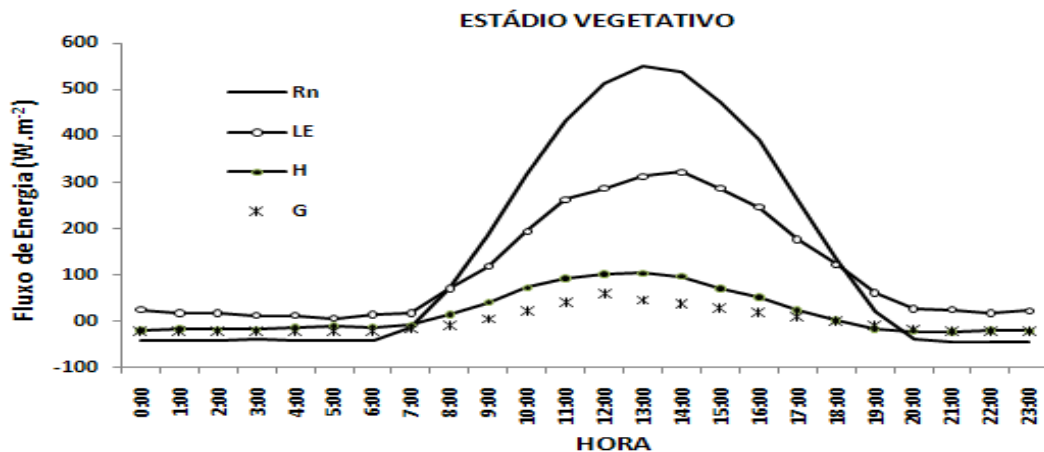


Figura 18 - Valores médios horários do saldo de radiação ( $R_n$ ), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estágio vegetativo da cultura da soja.

A Figura 19 apresenta a variação da partição do saldo de radiação em seus componentes, em base horária, para o período diurno, referente ao estágio vegetativo da cultura da soja. A partição do saldo de radiação em seus componentes praticamente se manteve constante entre as 9 e 17 h. Os resultados da partição em base horária são consistentes com o obtido em base diária, apresentado anteriormente. Os valores médios da partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo foram 0,65, 0,18 e 0,09, respectivamente.

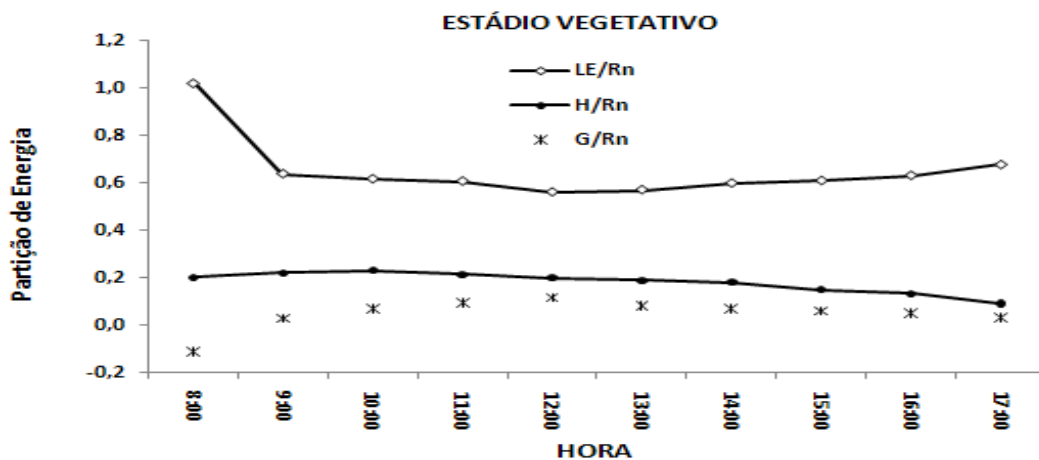


Figura 19 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação ( $R_n$ ) em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) para o estágio vegetativo da cultura da soja.

A avaliação do fechamento do balanço de energia no estágio vegetativo está ilustrada na Figura 20. Foi obtido o coeficiente de declividade da regressão linear entre a soma dos fluxos de calor latente e calor sensível com a energia disponível de 0,80, bem superior ao obtido no estágio de emergência. As razões desse aumento estão relacionadas com uma maior cobertura do solo, devido ao crescimento da cultura e condições hídricas no solo mais adequadas do que no estágio de emergência.

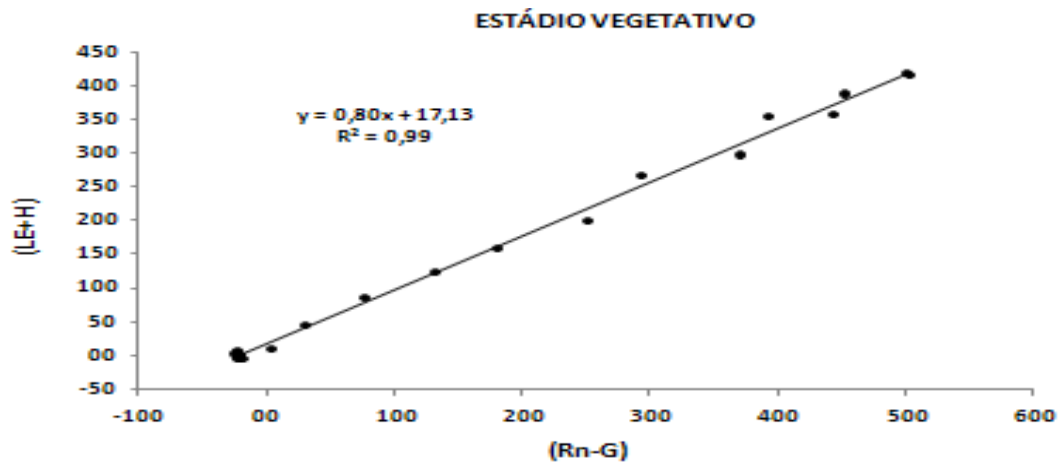


Figura 20 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível correspondente o saldo de radiação (Rn) menos o calor no solo acima da cultura da soja, para o período vegetativo.

Essas condições estão ilustradas na Figura 21, que apresenta a variação da Razão de Bowen ( $\beta$ ) no período diurno no estágio vegetativo.

A Razão de Bowen aumenta a partir das 8 h até atingir um máximo em torno das 10 h apresentando uma tendência de queda até 17 h. A Razão de Bowen apresentou uma variação no estágio vegetativo de 0,13 a 0,37, permanecendo acima de 0,25 na maior parte do período diurno. Esses valores apresentam um grande contraste em relação aos obtidos no estágio de emergência.

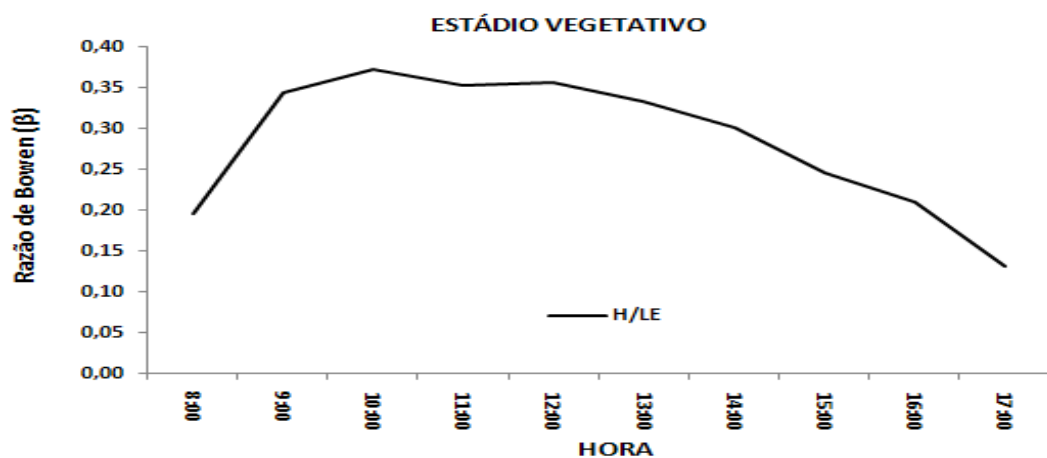


Figura 21 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período diurno do estágio de vegetativo da cultura da soja.



### 4.3.3. Estádio reprodutivo

#### 4.3.3.1. Variação diária

Na Tabela 7 são apresentados os valores diários dos componentes do balanço de energia no período diurno, compreendido entre as 8 e 17 h, para o estágio reprodutivo acima da cultura da soja.

As variações do fluxo de calor latente (LE) tiveram a mesma tendência das variações do saldo de radiação (Rn). Essa tendência sugere, que através da obtenção ou estimativa dos valores do saldo de radiação sobre a cultura, durante diferentes períodos do ciclo da cultura, o produtor terá condições de determina o consumo de água pela cultura, para possível manejo de irrigação. Os valores do saldo de radiação oscilaram entre  $6,74 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $16,88 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , com média de  $12,11 \pm 2,79 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , enquanto os valores do fluxo de calor latente variaram entre  $1,73 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $11,27 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , com média de  $7,62 \pm 2,25 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ . San José et al. (2003), trabalhando em experimento com feijão caupi, encontraram valores semelhantes para o saldo de radiação,  $12,00 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , e para o fluxo de calor latente de  $8,45 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ . Os valores do fluxo de calor sensível variaram entre  $0,61 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $6,21 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , com média de  $1,95 \pm 1,11 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ . O mesmo comportamento apresenta o fluxo de calor no solo (G), com valores oscilando entre  $0,17 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $0,83 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ , com média de  $0,57 \pm 0,22 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$ . San Jose et al. (2003) encontraram valores médios acima de  $3,24 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  e  $0,31 \text{ MJ.m}^{-2}\text{dia}^{-1}$  para os fluxos de calor sensível e do solo, respectivamente.

O fluxo de calor latente (LE/Rn) foi o componente predominante do saldo de radiação (Rn) durante todo o estágio reprodutivo, oscilando entre 0,20 e 0,75, com média de  $0,63 \pm 0,11$ . A partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível (H/Rn) oscilou entre 0,05 e 0,72, com média de  $0,17 \pm 0,09$ . Já a partição do saldo de radiação em fluxo de calor no solo (G/Rn) oscilou entre 0,01 e 0,10 com média de  $0,05 \pm 0,02$ , para o estágio reprodutivo.

Tabela 7 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, e suas relações com Rn, durante o estágio reprodutivo da cultura da soja

Data	MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>				LE/Rn	H/Rn	G/Rn
	Rn	LE	H	G			
9/2/2009	16,42	11,27	2,08	0,78	0,69	0,13	0,05
10/2/2009	11,38	8,58	0,61	0,41	0,75	0,05	0,04
11/2/2009	15,49	10,67	1,79	0,81	0,69	0,12	0,05
12/2/2009	8,00	5,14	1,10	0,17	0,64	0,14	0,02
13/2/2009	16,88	10,08	2,98	0,25	0,60	0,18	0,01
14/2/2009	14,43	8,74	2,57	0,66	0,61	0,18	0,05
15/2/2009	13,99	9,26	2,03	0,67	0,66	0,15	0,05
16/2/2009	14,76	10,64	2,04	0,52	0,72	0,14	0,04
17/2/2009	6,74	4,95	0,68	0,25	0,73	0,10	0,04
18/2/2009	15,65	9,33	1,71	0,70	0,60	0,11	0,05
19/2/2009	10,14	6,37	1,47	0,43	0,63	0,14	0,04
2/3/2009	11,76	7,41	1,40	0,68	0,63	0,12	0,06
6/3/2009	12,05	7,34	1,75	0,28	0,61	0,15	0,02
7/3/2009	9,83	6,82	1,23	0,20	0,69	0,13	0,02
12/3/2009	8,52	6,05	1,18	0,33	0,71	0,14	0,04
21/3/2009	11,75	7,20	1,35	0,64	0,61	0,12	0,05
22/3/2009	13,57	8,74	1,57	0,72	0,64	0,12	0,05
23/3/2009	13,42	9,01	1,48	0,73	0,67	0,11	0,05
24/3/2009	13,88	9,43	1,65	0,73	0,68	0,12	0,05
27/3/2009	9,27	6,59	2,05	0,65	0,71	0,22	0,07
29/3/2009	11,49	5,95	2,11	0,80	0,52	0,18	0,07
30/3/2009	12,16	6,20	3,12	0,82	0,51	0,26	0,07
31/3/2009	10,48	5,27	2,55	0,67	0,50	0,24	0,06
5/4/2009	8,67	1,73	6,21	0,83	0,20	0,72	0,10

#### 4.3.3.2. Variação horária

Os valores médios horários dos componentes do balanço de energia para o estádio reprodutivo estão ilustrados na Figura 22. Os fluxos de calor latente (LE), e de calor sensível (H) e de calor no solo (G) oscilaram de forma semelhante ao saldo de radiação, com valores mínimos ocorrendo no nascer do sol e no pôr-do-sol, e valores máximos ocorrendo próximo ao meio-dia. Valores horários médios do saldo de radiação oscilaram entre 97,31  $W.m^{-2}$  e 455,01  $W.m^{-2}$ , com média de 318,83  $W.m^{-2}$ . Os fluxos de calor latente oscilaram entre 73,91  $W.m^{-2}$  e 269,56  $W.m^{-2}$ , com média de  $196,45 \pm 67,16$   $W.m^{-2}$ . Já os valores médios horários dos fluxos de calor sensível e de calor no solo foram de  $63,77 \pm 38,13$  e  $25,41 \pm 10,48$ , respectivamente. Para o estádio vegetativo, como era esperado, o principal componente do balanço de energia foi o fluxo de calor latente (LE).

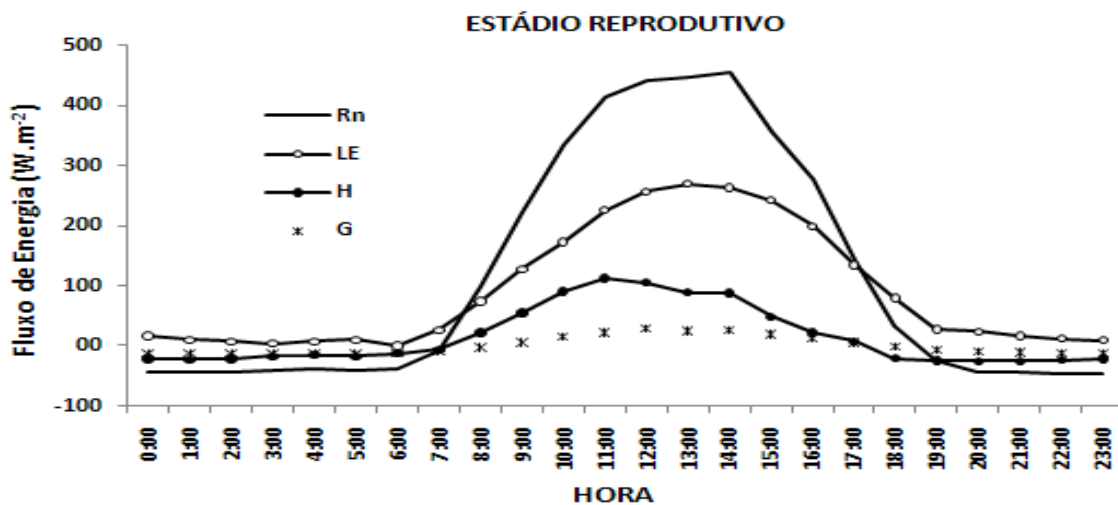


Figura 22 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estádio reprodutivo.

Na Figura 23 pode ser observada a variação da partição de energia para o período diurno acima da cultura da soja, referente ao estádio reprodutivo.

A partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE/Rn), variou entre 0,51 e 0,94, com média de  $0,65 \pm 0,13$ . A partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível (H/Rn) oscilou entre 0,05 e 0,27, com média de  $0,19 \pm 0,08$ . A partição do saldo de radiação em fluxo de calor no solo (G/Rn) variou entre 0,04 e 0,07, com média de  $0,04 \pm 0,03$ . Resultados encontrados por Zhang et al. (2002) indicaram valores superiores para o estágio reprodutivo, acima de 0,80, que segundo o autor esse valor encontrado deve-se principalmente o maior índice de área foliar, aumentando assim o processo de evapotranspiração da cultura (LE).

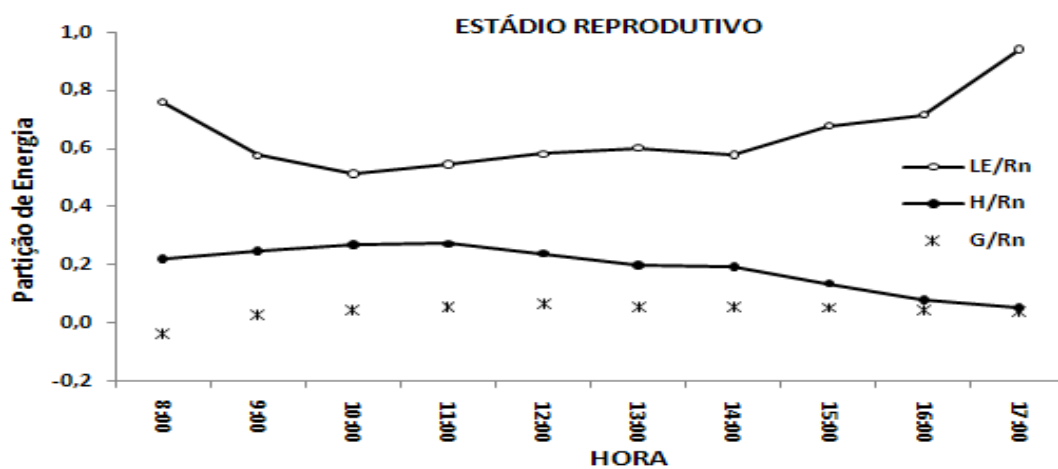


Figura 23 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G) para o estágio reprodutivo.

Na Figura 24 é apresentado a regressão linear entre a energia utilizada (LE+H) e a disponível (Rn-G), para o estágio reprodutivo da cultura da soja. Os resultados obtidos para o estágio reprodutivo foram similares para o estágio vegetativo, e pode ser explicado devido o total fechamento do dossel nesse estágio o resultado obtido do coeficiente de declividade da regressão linear para o estágio reprodutivo foi de 0,80, valor esse similar aos encontrados na literatura (WILSON et al., 2002; MEYES; HOLLINGER, 2004; GIAMBELLUCA et al., 2009).

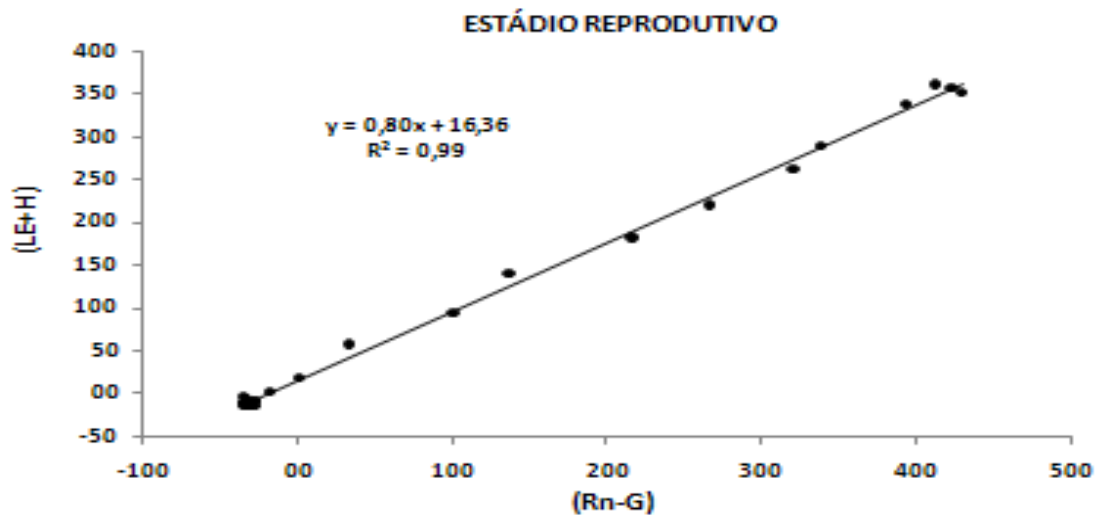


Figura 24 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível (H) e latente (LE) e a energia disponível correspondente ao saldo de radiação (Rn) menos o calor no solo (G) acima da cultura da soja, para o estágio reprodutivo.

A variação do índice da Razão de Bowen para o período diurno do período reprodutivo da cultura da soja está ilustrada na Figura 25. Valores da Razão de Bowen variaram entre 0,06 e 0,52, permanecendo acima de 0,30 na maior parte do período diurno.

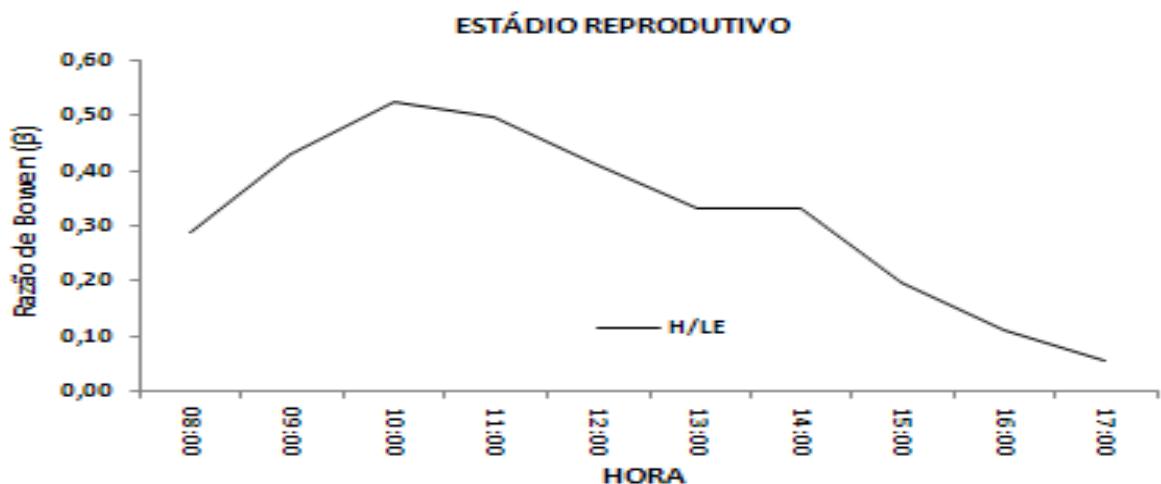


Figura 25 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o estágio reprodutivo acima da cultura da soja.

#### 4.3.4. Estádio de maturação

##### 4.3.4.1. Variação diária

Os valores diários dos componentes do balanço de energia para o período diurno, compreendido entre os horários das 8 e 17 h, referente ao estágio de maturação acima da cultura da soja, está ilustrada na Tabela 8. O fluxo de calor sensível (H) para esse período da cultura foi o componente predominante do balanço de energia, contribuindo para o aquecimento da atmosfera acima da cultura da soja.

Os valores do saldo de radiação oscilaram entre  $7,90 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $10,83 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , com média de  $9,59 \pm 0,97 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , já os valores diários do fluxo de calor sensível variaram entre  $5,85 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $7,47 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , com média de  $6,82 \pm 0,51$ . A razão média entre o fluxo de calor sensível (H) e o saldo de radiação foi igual a  $0,71 \pm 0,03$ , com valores variando entre 0,65 e 0,75. Entretanto, os valores diários do fluxo de calor latente (LE) apresentaram valores muito baixos para o estágio de maturação, com valores oscilando entre  $0,49 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$  e  $1,93 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{dia}^{-1}$ , com média de  $0,97 \pm 0,57$ . A razão média entre o fluxo de calor latente (LE) e o saldo de radiação (Rn) foi igual a  $0,10 \pm 0,05$ . Os baixos valores encontrados para o fluxo de calor latente (LE) foi possivelmente devido ao período em que a cultura não realizava seus processos fisiológicos, aos baixos índices de pluviosidade e a menor cobertura do solo pela vegetação. Por outro lado o fluxo de calor no solo (G) manteve-se constante durante o período analisado uma razão média com o saldo de radiação (Rn) igual a  $0,14 \pm 0,04$ . Essa variação dos fluxos de calor latente, de calor sensível e de calor no solo, é característica ao estágio de maturação, onde a cultura não está mais realizando os processos fisiológicos, e os altos valores do fluxo de calor sensível ficou mais evidenciado com a baixa pluviosidade registrada no período estudado. Os valores encontrados foram semelhantes aos encontrados na literatura. Neves et al. (2008), em estudo realizado com feijão caupi, encontraram valores médios de 0,68 e 0,21 para os fluxos de calor sensível e calor latente para o mesmo período analisado esses autores destacaram, principalmente, a influência da baixa pluviosidade nas magnitudes dos fluxos de energia.

Tabela 8 - Variação diária no período diurno do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G) em MJ.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, e suas relações com Rn, durante o estágio de maturação da cultura da soja

Data	MJ.m <sup>-2</sup> .dia <sup>-1</sup>				LE/Rn	H/Rn	G/Rn
	Rn	LE	H	G			
8/4/2009	10,83	1,93	7,47	0,86	0,18	0,69	0,08
9/4/2009	10,41	1,05	6,77	1,17	0,10	0,65	0,11
12/4/2009	9,23	0,73	6,78	1,60	0,08	0,73	0,17
13/4/2009	9,58	0,70	6,62	1,58	0,07	0,69	0,17
15/4/2009	9,46	0,61	7,05	1,22	0,06	0,75	0,13
16/4/2009	9,23	0,55	6,95	1,64	0,06	0,75	0,18
17/4/2009	7,90	0,49	5,85	1,42	0,06	0,74	0,18
18/4/2009	8,93	0,71	6,38	1,52	0,08	0,72	0,17

#### 4.3.4.2. Variação horária

Na Figura 26 pode ser observado os valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), do fluxo de calor no solo (G), para o estágio de maturação acima da cultura da soja.

Durante o período de maturação (08/04 a 19/04/2009), o fluxo de calor sensível passa a ser o principal componente do balanço de energia, apesar da menor cobertura do solo pela vegetação, a cultura não está mais realizando seus processos fisiológicos. Os valores do fluxo de calor sensível (H) para o período diurno variaram entre 11,31 a 306,36 W.m<sup>-2</sup>, com média de 193,98 ±108,18 W.m<sup>-2</sup>. Já os valores do fluxo de calor latente (LE) e do fluxo de calor no solo (G) apresentaram similares durante o período de maturação, LE e G obtiveram uma média de 28,01 ±10,96 e 37,73 ±27,76, respectivamente. Os valores obtidos foram similares aos encontrados na literatura para outras culturas.

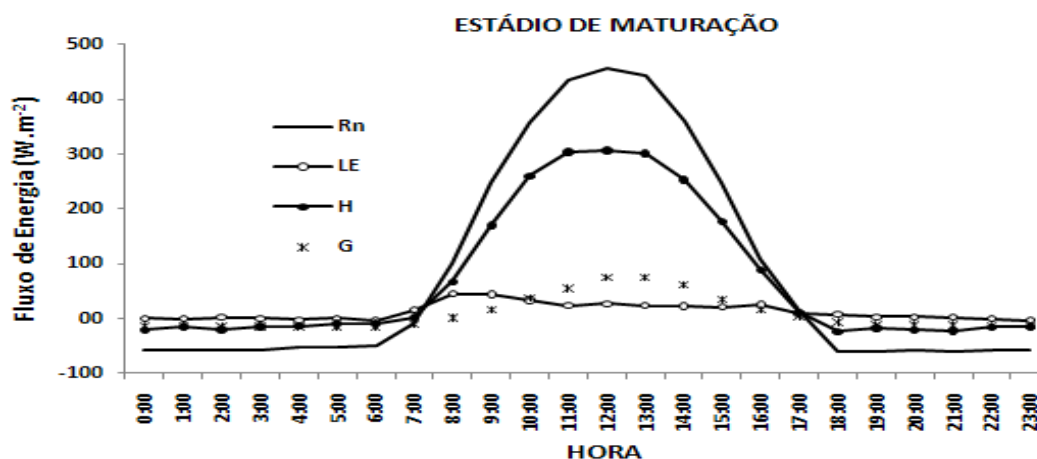


Figura 26 - Valores médios horários do saldo de radiação (Rn), do fluxo de calor latente (LE), do fluxo de calor sensível (H), e do fluxo de calor no solo (G), para o estágio de maturação acima da cultura da soja.

A partição de energia nos fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e de calor no solo (G), acima da cultura da soja, durante o estágio de maturação, são apresentados na Figura 27.

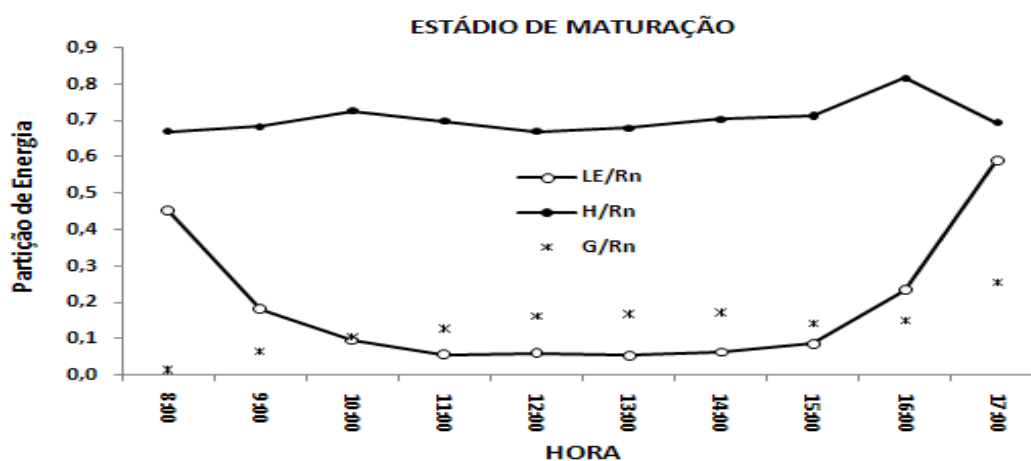


Figura 27 - Valores médios horários da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente (LE), de calor sensível (H) e do fluxo de calor no solo (G) para o estágio de maturação da cultura da soja.



A variação dos componentes do balanço de energia na cultura durante o estágio de maturação, a partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível ( $H/R_n$ ) variou entre 0,67 e 0,82, com média de  $0,71 \pm 0,04$ . A partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente ( $LE/R_n$ ) oscilou entre 0,05 e 0,59, com média de  $0,19 \pm 0,09$ . A partição do saldo de radiação em fluxo de calor no solo ( $G/R_n$ ) variou entre 0,02 e 0,24, com média de  $0,10 \pm 0,09$ . O estágio de maturação a cultura já não realiza seus processos fisiológicos, e toda a energia é utilizada para aquecer a atmosfera acima da cultura.

Na Figura 28 está representada a regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) e a energia disponível correspondente o saldo de radiação ( $R_n$ ) menos o calor no solo ( $G$ ), para o período de maturação acima da cultura da soja.

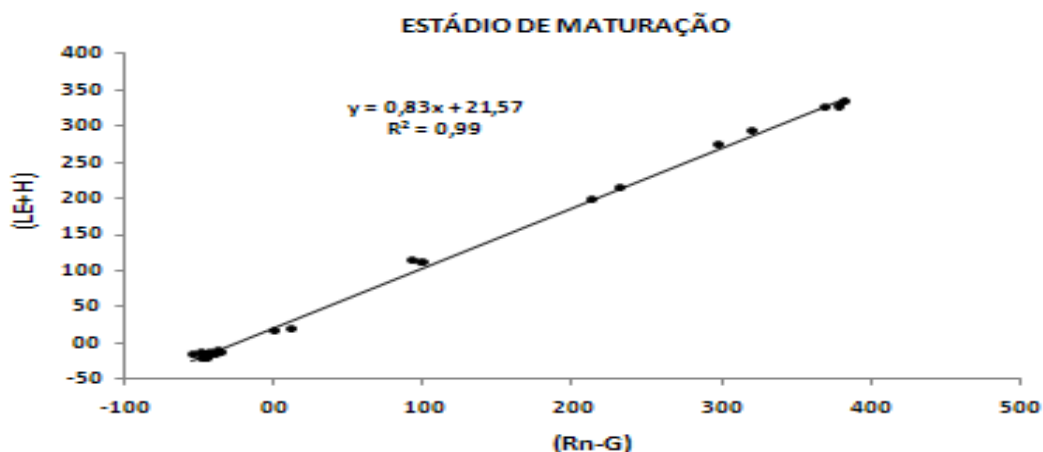


Figura 28 - Regressão linear entre a soma dos fluxos de calor sensível ( $H$ ) e latente ( $LE$ ) e a energia disponível correspondente o saldo de radiação ( $R_n$ ) subtraindo o calor do solo ( $G$ ), durante o estágio de maturação.

Os resultados apresentados na Figura 27 indicam um coeficiente de declividade da regressão linear no estágio de maturação de 0,83. Segundo Aubinet et al. (2000), é esperado que não ocorra o fechamento total do balanço de energia porque na contabilização dos resultados nem todas as trocas e processo são envolvidos são considerados no sistema solo-planta-atmosfera. Baseado em estudos com diferentes coberturas vegetais, Aubinet et al. (2000)

obtiveram coeficiente de declividade da regressão similar aos encontrados no estudo, com valores variando entre 0,84 e 0,93.

A variação diurna da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o período de maturação acima da cultura da soja está ilustrada na Figura 29. Valores do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para esse estágio da cultura foram valores positivos altos, indicando que a cultura estava sobre estresse hídrico. Valores da Razão de Bowen oscilaram entre 1,17 e 12,53, com média de  $7,30 \pm 4,50$ . Valores encontrados nesse estudo ficaram de acordo aos encontrados na literatura para outros ecossistemas, para o mesmo estágio de maturação (NEVES et al., 2008).

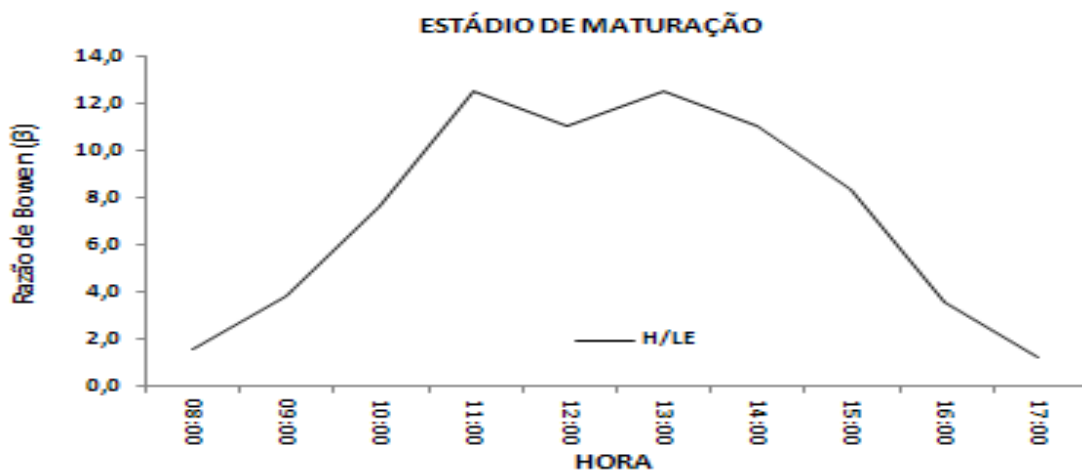


Figura 29 - Variação do índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) para o estágio de maturação acima da cultura da soja.

#### 4.4. Simulação do modelo CABLE

##### 4.4.1. Calibração do modelo CABLE

O modelo foi calibrado durante três períodos de três dias consecutivos, com dados dos fluxos de massa e energia durante o ciclo da cultura da soja. A primeira calibração foi para o período de solo descoberto (28 a 30/11/2008), a segunda e a terceira para o período em que o solo estava completamente

coberto pela cultura, referente ao período de 23 a 25/01/2009 e 23 a 25/03/2009, respectivamente.

#### **4.4.2. Análise dos fluxos de massa e energia**

A variação do saldo de radiação ( $R_n$ ), do fluxo de calor latente (LE) e do fluxo de calor sensível (H), obtidos pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos, e os simulado pelo modelo CABLE no período de calibração, estão apresentados na Figura 30. As condições atmosféricas durante os diferentes períodos de calibração foram semelhantes. No primeiro período choveu 36,4 mm enquanto nos outros dois períodos não choveu e prevaleceram condições de céu claro.

No processo de calibração o modelo CABLE apresentou uma tendência de superestimar os dados observados do saldo de radiação e fluxo de calor sensível e subestimar os dados observados referentes ao fluxo de calor latente.

A Tabela 9 apresenta um resumo do desempenho estatístico das simulações dos componentes do balanço de energia em relação aos dados observados.

Os resultados estatísticos apresentados na Tabela 9 pelo modelo CABLE após calibração revela que com exceção das simulações do saldo de radiação o desempenho do modelo não foi considerado satisfatório na estimativa dos componentes do balanço de energia da cultura da soja. É bem possível que a quantidade de dados utilizados na calibração não tenha sido suficiente para obter melhores resultados.

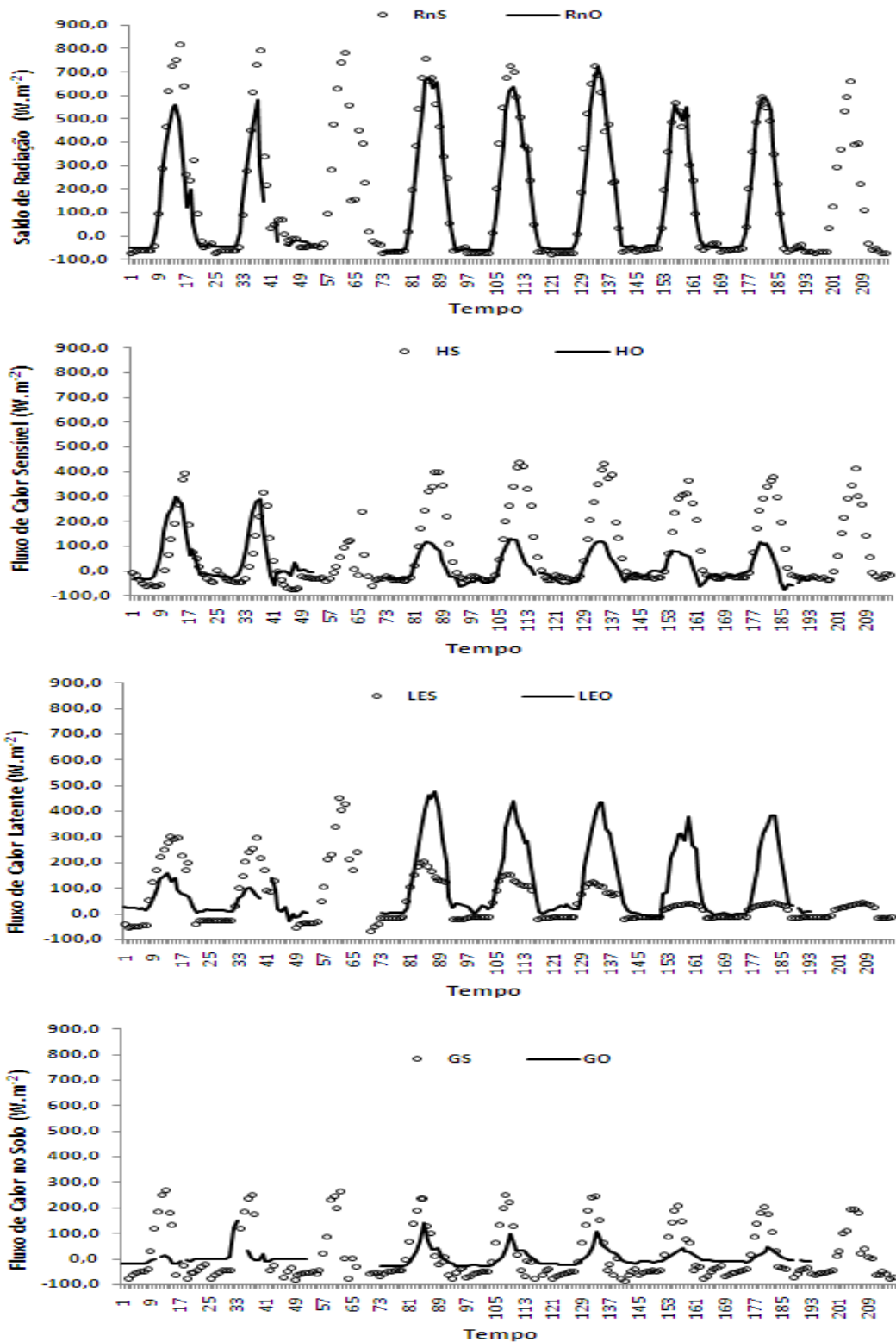


Figura 30 - Saldo de Radiação Simulado (RnS), Saldo de Radiação Observado (RnO), Fluxo de Calor Latente Simulado (LES) e do Fluxo de Calor Latente Observado (LEO), Fluxo de Calor Sensível Simulado (HS) e Fluxo de Calor Sensível Observado (HO), Fluxo de Calor no Solo Simulado (GS) e do Fluxo de Calor no Solo Observado (GO).

Tabela 9 - Raiz do erro quadrado médio (RMSE), desvio médio do erro (MBE), coeficiente de correlação (r) e o índice de concordância de Willmott (d) para os fluxos de massa e energia após a calibração do modelo CABLE

Estádio	MBE	RMSE	r	d
	W.m <sup>-2</sup>			
Emergência	2,73	132,61	0,96	0,93
Vegetativo	5,31	128,24	0,61	0,64
Reprodutivo	-5,81	142,14	0,51	0,50
Maturação	9,64	98,74	0,65	0,42

#### 4.4.3. Teste do modelo CABLE

Será apresentado a seguir, os resultados obtidos pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos e os simulados pelo modelo CABLE, descritos para cada estágio fenológico da cultura da soja.

##### 4.4.3.1. Saldo de radiação (Rn)

A Figura 31 apresenta as comparações entre as medições do saldo de radiação e as simulações obtidas pelo modelo CABLE nos quatro estágios fenológicos da soja destacados em nosso trabalho.

Os resultados apresentado na Figura 31 mostra um bom desempenho do modelo CABLE em reproduzir as principais características da variação diária do saldo de radiação, embora tenham apresentado uma tendência em superestimar os valores extremos, especialmente em torno do meio-dia.

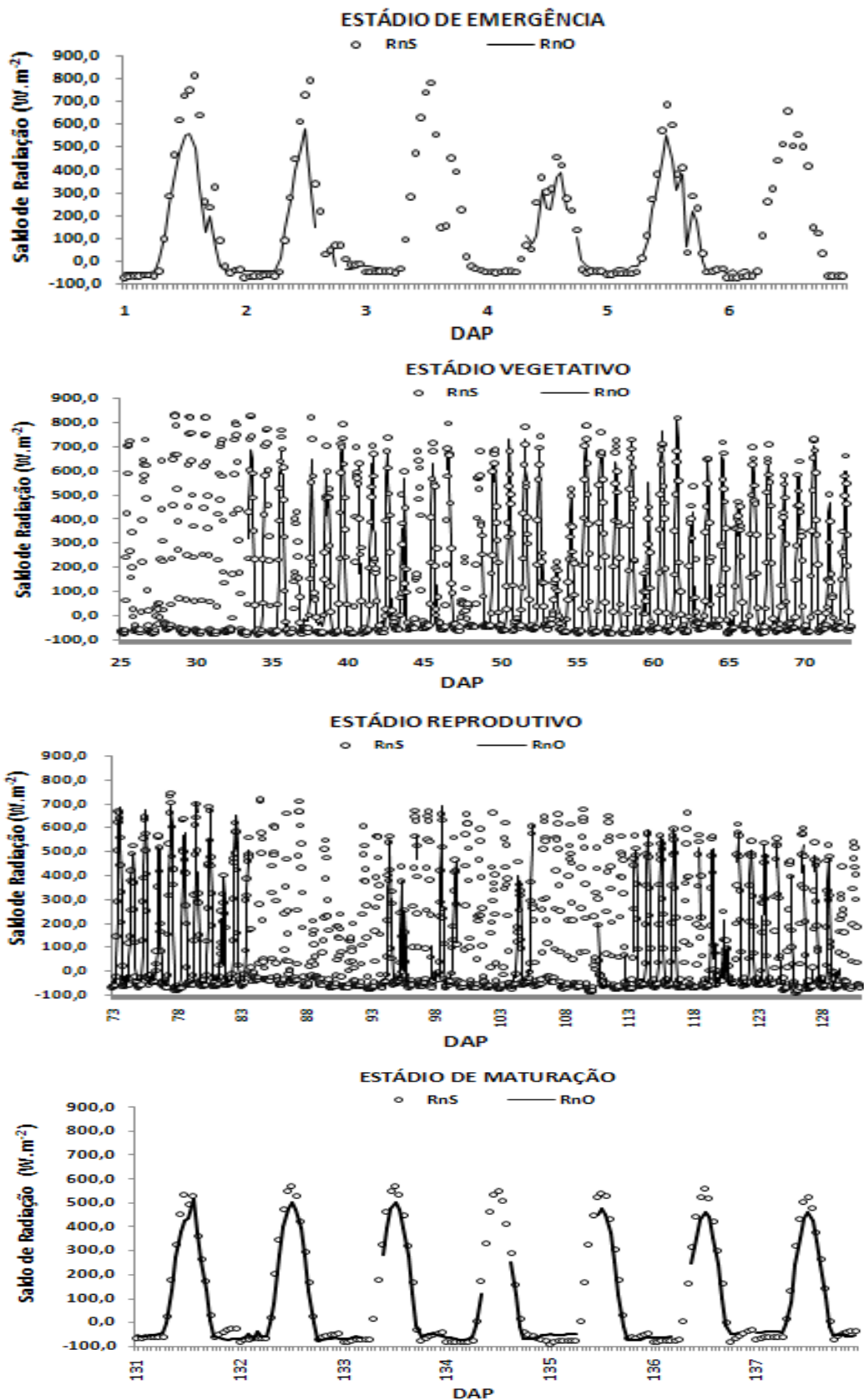


Figura 31 - Saldo de Radiação Simulado (RnS) e do Saldo de Radiação Observado (RnO), para os quatro estádios fenológicos da cultura da soja.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 10 ilustra o bom desempenho do modelo em simular o saldo de radiação, com índice de concordância de Willmott “d” acima de 0,78, e forte correlação “r”, acima de 0,90. Resultados obtidos nas simulações com o saldo de radiação realizadas por Leuning et al. (1998) e Wang (2001) em estudo com trigo e pastagem, foram similares aos encontrados deste estudo, utilizando-se de um modelo similar “two-leaf”.

Tabela 10 - Resultado da análise estatística dos valores simulados e observados para o saldo de radiação (Rn) acima da cultura da soja durante os quatros estádios fenológicos

Estádio	MBE	RMSE	r	d
	W.m <sup>-2</sup>			
Emergência	56,10	200,91	0,96	0,78
Vegetativo	12,76	177,49	0,98	0,86
Reprodutivo	3,32	178,13	0,98	0,79
Maturação	28,68	109,07	0,99	0,92

#### 4.4.3.2. Fluxo de calor latente (LE)

As comparações entre as simulações das variações do fluxo de calor latente pelo modelo CABLE e as medições feitas pela técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos estão ilustrados na Figura 32.

Embora o modelo apresente razoavelmente a tendência de variação diária do fluxo de calor latente, é todavia muito impreciso com relação à magnitude desses fluxos, particularmente em torno do meio-dia.

O resumo estatístico apresentado na Tabela 11 indica um desempenho inferior do modelo CABLE em simular as variações dos fluxos de calor latente comparado com as simulações do saldo de radiação apresentados no item anterior.

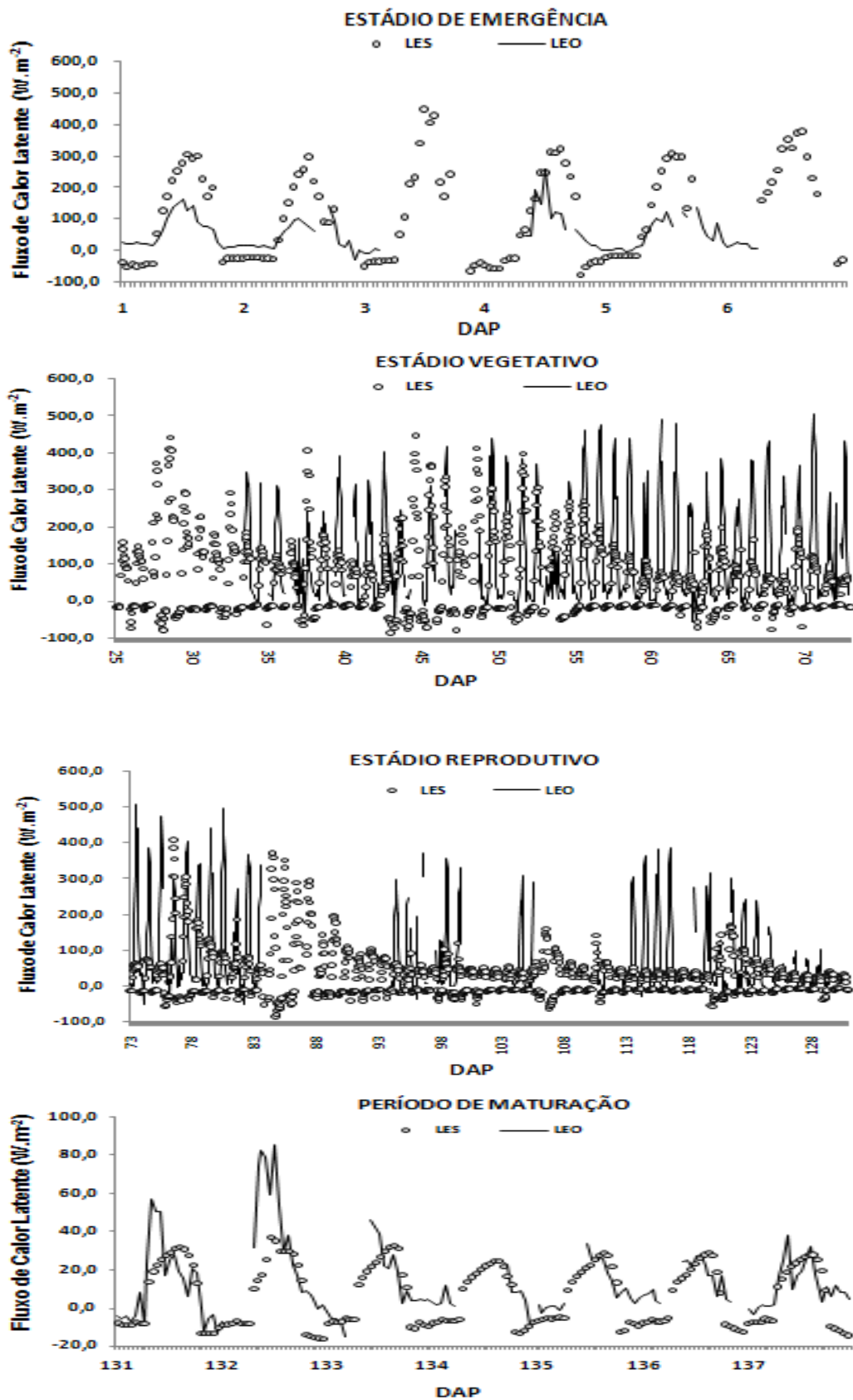


Figura 32 - Fluxo de calor latente simulado (LES) e do Fluxo de calor latente observado (LEO), para os quatro estádios da cultura da soja.



Tabela 11 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os observados para o fluxo de calor latente acima da cultura da soja, nos quatros estádios da cultura da soja

Estádio	BEM	RMSE	r	d
	W.m <sup>-2</sup>			
Emergência	62,11	142,98	0,81	0,51
Vegetativo	-53,05	117,24	0,69	0,72
Reprodutivo	-63,25	95,60	0,64	0,72
Maturação	-7,66	15,58	0,68	0,77

O estágio de maturação apresentou melhores resultados, ou seja, bom índice de concordância de Willmott “d”, acima de 0,75, com forte coeficiente de correlação “r”, acima de 0,65, e baixo RMSE. De forma geral, em todos os estádios analisados o modelo CABLE subestimou os valores observados, exceto no período de emergência onde os valores superestimaram, esse resultado possivelmente deve-se as características no estágio de emergência, na qual a cultura encontrava-se com baixo índice de área foliar e o solo exposto predominava. Em estudo realizado com trigo Leuning et al. (1998) obtiveram resultados semelhantes ao presente estudo, utilizando-se de um modelo “two-leaf”.

#### 4.4.3.3. Fluxo de calor sensível (H)

A Figura 33 apresenta os resultados da comparação das simulações do fluxo de calor sensível e as medições feitas pela técnica da covariância dos vórtices turbulentos. O desempenho do modelo CABLE em reproduzir as variações dos fluxos de calor sensível é ligeiramente superior as simulações apresentadas em relação ao fluxo de calor latente, porém, também demonstra grande imprecisão nos valores simulados, especialmente nos valores extremos.

Para os estádios de emergência e maturação o índice de concordância de Willmott, “d”, foram respectivamente de 0,82 e 0,91, os coeficientes de correlação, “r”, foram de 0,73 e 0,95, respectivamente, e os valores da raiz quadrada do erro médio “RMSE” foram baixos. Valores de “d” e “r” indicaram alta exatidão e precisão entre os dados simulados pelo modelo CABLE e os obtidos pelo Método da Covariância dos vórtices turbulentos.

Já para os estádio vegetativo e reprodutivo os índice de concordância de Willmott, “d”, foram de 0,57 e 0,46, respectivamente, os coeficientes de correlação, “r”, de 0,79 e 0,75, respectivamente, e os valores de RMSE foram relativamente altos quando comparados aos estádios de emergência e maturação. Valores de “d” e “r” indicaram boa exatidão e precisão entre os dados simulados pelo modelo CABLE e os obtidos pelo Método da Covariância dos vórtices turbulentos. De modo geral, para os quatro estádios analisados o modelo superestimou os valores observados pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos, exceto no estádio de emergência no qual o modelo subestimou os resultados observados. Leuning et al., (1998), em experimento realizado com trigo encontraram resultados similares nas simulações dos fluxos de calor sensível.

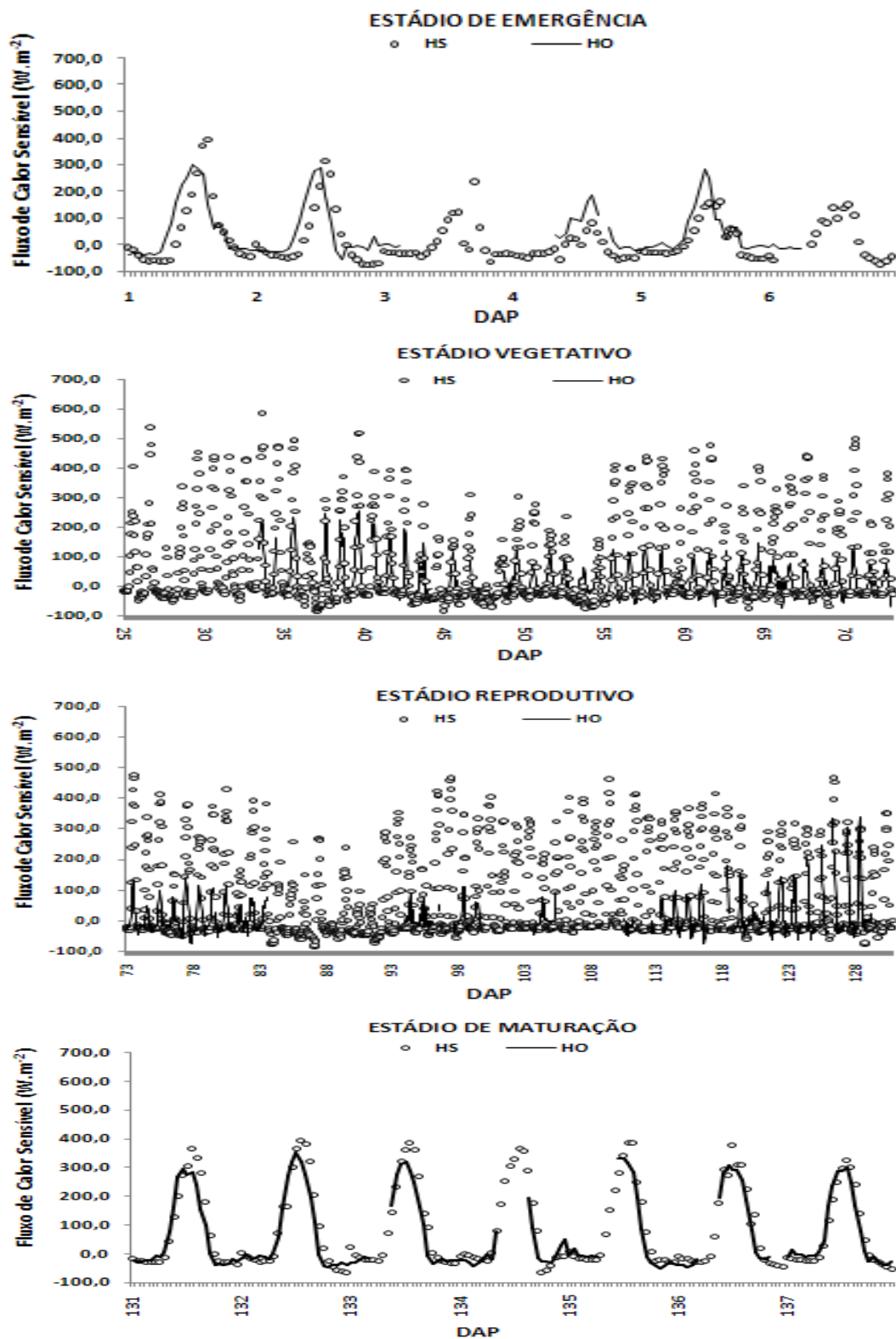


Figura 33 - Valores médios horários do fluxo de calor sensível simulado (HS) e do fluxo de calor sensível observado (HO), para os quatro estádios da cultura da soja.

A Tabela 12 apresenta um resumo estatístico do desempenho do modelo CABLE em simular os fluxos de calor sensível nos quatro estádios fenológicos da soja.

Tabela 12 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de calor sensível (H) acima da cultura da soja nos quatro estádios da cultura

Estádio	MBE	RMSE	r	d
	W.m <sup>-2</sup>			
Emergência	-30,74	74,58	0,73	0,82
Vegetativo	44,03	121,47	0,79	0,57
Reprodutivo	44,93	122,84	0,75	0,46
Maturação	17,58	76,21	0,95	0,91

#### 4.4.3.4. Fluxo de calor no solo (G)

As comparações entre as simulações do fluxo de calor no solo pelo modelo CABLE e as medições estão apresentadas na Figura 34.

Os resultados obtidos expressaram os mesmos problemas dos observados em relação aos fluxos de calor latente e calor sensível. A tendência do modelo em superestimar os fluxos de calor no solo são até mais evidentes dos resultados em relação aos fluxos de calor latente e calor sensível.

O resultado da análise estatística para os valores obtidos pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos e os simulados pelo modelo CABLE estão apresentados na Tabela 13.

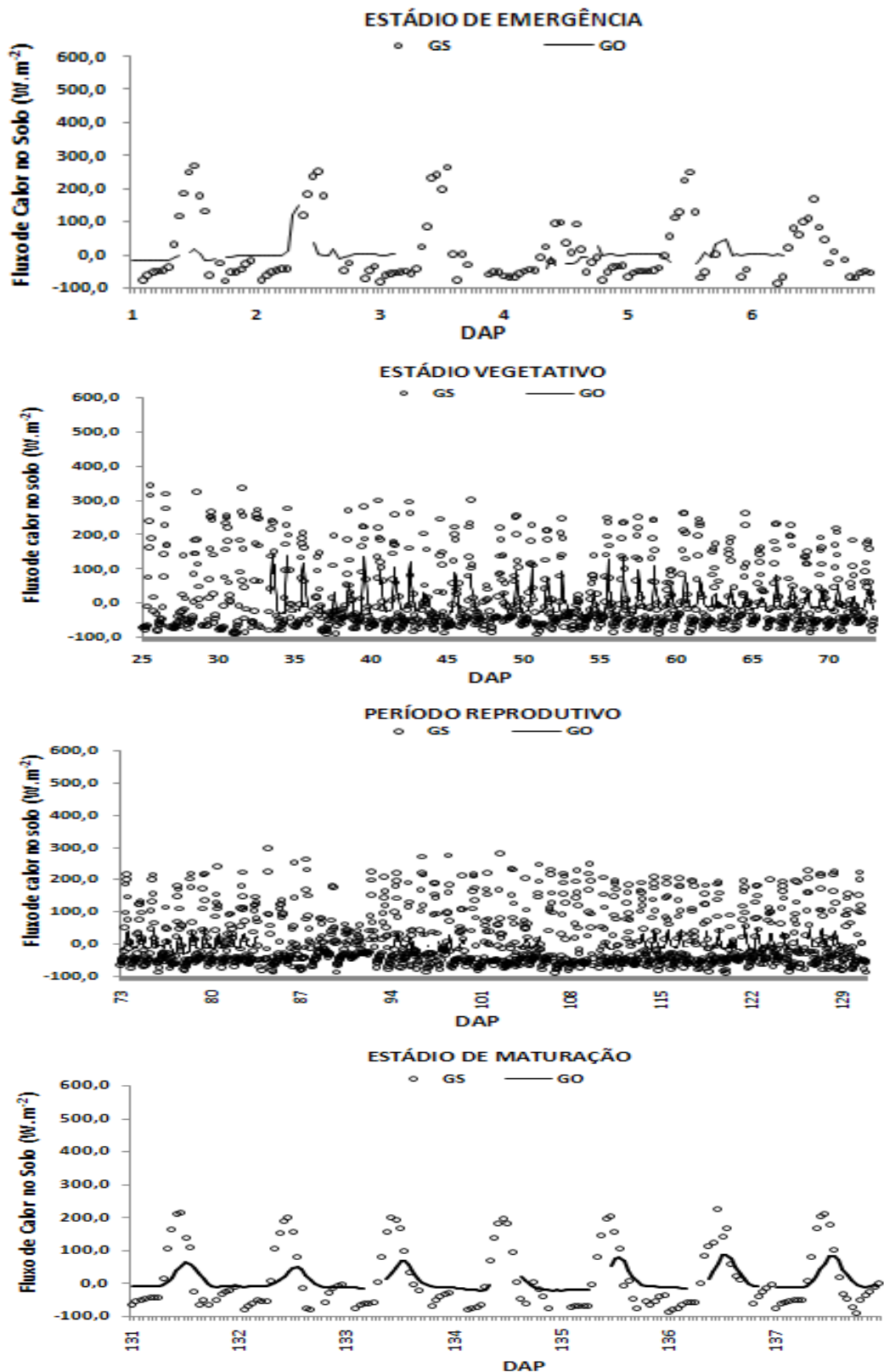


Figura 34 - Variação média horária do fluxo de calor no solo simulado (GS) e do fluxo de calor sensível observado (GO), para os quatro períodos da cultura da soja.

Para os quatro estádios analisados os valores simulados pelo modelo superestimaram os valores obtidos, com resultados mais satisfatórios para o estádio vegetativo e de maturação da cultura da soja, sendo que os valores dos índices de concordância de Willmott, “d”, ficaram acima de 0,50; e os do coeficiente de correlação acima de 0,77. Valores de “d” e “r” indicaram razoável exatidão e alta precisão, respectivamente, entre os dados simulados pelo modelo CABLE e os obtidos pelo Método da Covariância dos vórtices turbulentos.

Tabela 13 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de calor no solo (G) acima da cultura da soja, nos quatro estádios da cultura

Estádio	MBE	RMSE	r	d
	W.m <sup>-2</sup>			
Emergência	10,70	90,38	0,11	0,08
Vegetativo	10,86	78,60	0,77	0,51
Reprodutivo	4,61	75,26	0,74	0,26
Maturação	5,66	73,62	0,71	0,54

#### 4.4.3.5. Fluxo de CO<sub>2</sub> (NEE)

A Figura 35 apresenta a comparação entre as simulações dos fluxos de CO<sub>2</sub> e as medições dos fluxos de CO<sub>2</sub> pela técnica da Covariância dos Vórtices Turbulentos.

Os resultados das simulações dos fluxos de CO<sub>2</sub> são inferiores aos obtidos em relação aos fluxos de calor latente e calor sensível conforme pode ser observado pela Tabela 14 sobre o desempenho do modelo CABLE em reproduzir as variações dos fluxos de CO<sub>2</sub>.

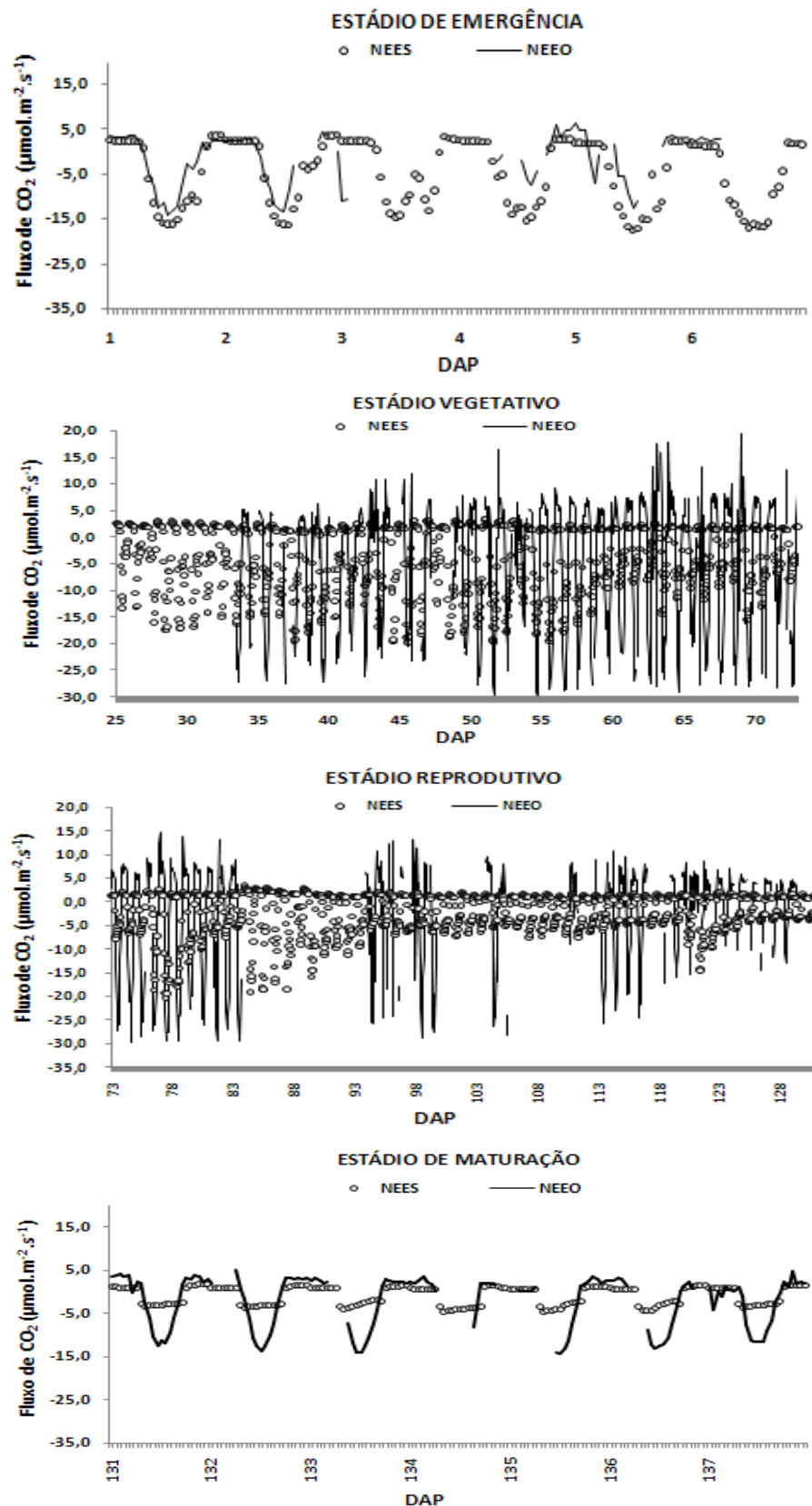


Figura 35 - Valores médios horários do fluxo de CO<sub>2</sub> simulado (NEES) e do fluxo de CO<sub>2</sub> obtido (NEEO), para os quatro estádios da cultura da soja.

Os melhores resultados encontrados foram para o estágio vegetativo da cultura, com bom índice de concordância de Willmott, “d”, igual a 0,77, bom coeficiente de correlação, “r”, igual a 0,80, e baixo RMSE, inferior a 8,00. Durante a noite os valores foram praticamente constantes, variando de 3 a 5  $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ , para todos os estádios analisados. Essa variação do modelo CABLE está associada às características atmosféricas noturnas, em que no período noturno existe dificuldade em se obter consistência dos dados de entrada.

De forma geral, para os quatro estádios analisados o modelo superestimou aqueles obtidos pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos, exceto no período de emergência em que os valores simulados subestimaram aos observados (Tabela 14). Resultados encontrados por Leuning et al. (1998) em simulações realizadas com um modelo “two-leaf” acima da cultura do trigo, em uma região de clima temperado, foram similares aos do presente trabalho, na pesquisa o autor encontrou satisfatória concordância nas simulações feitas com os fluxos de dióxido de carbono.

Tabela 14 - Resultados da análise estatística dos valores simulados com os obtidos para o fluxo de CO<sub>2</sub> acima da cultura da soja, para os quatro estádios da cultura

Estádio	MBE	RMSE	r	d
	$\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$			
Emergência	-3,21	7,36	0,70	0,63
Vegetativo	1,64	7,65	0,80	0,77
Reprodutivo	0,74	6,76	0,73	0,62
Maturação	1,14	4,34	0,79	0,65



## 5. CONCLUSÕES

O saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a cultura da soja, para valores horários e diários podem ser estimados a partir dos valores de radiação solar global ( $R_g$ ).

Durante todo o ciclo da cultura, a maior parte do saldo de radiação ( $R_n$ ) sobre a cultura da soja foi utilizada como fluxo de calor latente, seguido do fluxo de calor sensível e fluxo de calor no solo.

Os resultados obtidos com o índice da Razão de Bowen ( $\beta$ ) indicaram que as menores restrições hídricas ocorreram durante os estádios fenológicos vegetativo e reprodutivo. Todavia a cultura não sofreu com déficit hídrico em nenhum dos estádios ao longo do ciclo.

A correlação entre a energia utilizada ( $LE+H$ ) e a disponível ( $R_n-G$ ) durante o período experimental indicou boa qualidade nos dados observados pelo Método da Covariância dos Vórtices Turbulentos, bem como adequado fechamento do balanço de energia.

O modelo CABLE demonstrou bom desempenho ao simular os componentes do balanço de energia, principalmente o Saldo de Radiação. Entretanto, durante os estádios fenológicos da cultura da soja o modelo apresentou resultado satisfatório nas simulações dos fluxos de Calor Sensível, de Calor Latente e de Calor no Solo.

Durante os estádios fenológicos o modelo CABLE simulou de forma satisfatória o fluxo de CO<sub>2</sub>, obtendo coeficientes de correlação, “r”, superiores a 0,70.

Os resultados apresentados das simulações do modelo CABLE, para todos os estádios da cultura da soja, de um modo geral apresentaram um resultado satisfatório. Esse resultado satisfatório reflete aos parâmetros fisiológicos da cultura que foram forçados no modelo CABLE, a falta dos dados fisiológicos da cultura, foram determinantes para uma resposta do modelo para determinação dos fluxos.

## **6. SUGESTÕES PARA TRABALHOS FUTUROS**

- Comparação do modelo CABLE com demais modelos biofísicos de interação superfície- planta-atmosfera;
- Avaliação da influência de todos os parâmetros de entrada do modelo CABLE, em todas as suas saídas;
- Aplicação do modelo CABLE para outras culturas e outros tipos de condições climáticas no território brasileiro;
- Utilização do modelo CABLE como condição de fronteiras para modelos de previsões climáticas.

## REFERÊNCIAS

ABRAMOWITZ, G. Towards a benchmark for land surface models. **Geophysical Research Letters**, v. 32, n. 22, p. 702, 2005.

ÁCS, F.; HANTEL, M. The land-surface flux model PROGSURF. **Global and Planetary Change**, Amsterdam, v. 19, p. 19-34, 1998.

AGNOL, A.D. **Realidade e perspectivas do Brasil na produção de alimentos e agroenergia, com ênfase na soja 2008**. Disponível em: <<http://www.agrolink.com.br/colunistas/ColunaDetalhe.aspx?CodColuna=3271>> Acesso em: 20 ago. 2009.

ASSAD, E.D. et al. Impacto das mudanças climáticas no zoneamento agroclimático do café no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 11, 2004.

AUBINET, M. et al. Estimates of the annual net carbon and water exchange of forest: the EUROFLUX methodology. **Advances in Ecological Research**, v. 30, p. 113-175, 2000.

AYOADE, J.O. **Introdução à climatologia para os trópicos**. São Paulo: Difel, 1986. 332 p.

BALDOCCHI, D.A. A comparative study of mass and energy exchange over a closed C3 (wheat) and an open C4 (corn) canopy: I. The partitioning of available energy into latent and sensible heat exchange. **Agriculture and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 67, p. 191-220, 1994.

- BALDOCCHI, D.D. et al. Measuring biosphere-atmosphere exchanges of biologically related gases with micrometeorological methods. **Ecology**, v. 69, p. 1331-1340, 1988.
- BARFORD, C.C. et al. Factors controlling long- and short-term sequestration of atmospheric CO<sub>2</sub> in a mid-latitude. **Forest. Science**, v. 294, p. 1688-1691, 2001.
- BASTIAANSEN, W.G.M. SEBAL-based sensible and latent heat fluxes in the irrigated Gediz Basin, Turkey. **Journal of Hydrology**, v. 229, p. 87-100, 2000.
- BORMANN, H. Sensitivity of a soil-vegetation-atmosphere transfer scheme to input data resolution and data classification. **Journal of Hydrology**, v. 351, p. 154-169, 2008.
- BRASWELL, B.H. et al. Estimating ecosystem process parameters by assimilation of eddy flux observations of NEE. **Global Change Biology**, v. 11, p. 335-355, 2005.
- BUNCE, J.A.; ZISKA, L.H. Responses of respiration to increase in carbon dioxide concentration and temperature in three soybean cultivars. **Annals of Botanical**, Jülich, v. 77, p. 507-514, 1996.
- BURBA, G.; ANDERSON, D. Introduction to the eddy covariance method: general guidelines and conventional workflow. **LI-COR Biosciences**, p. 141, 2007.
- BUTTERFIELD, R.E; MORISON, J.I.L. Modeling the impact of climatic warming on winter cereal development. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 62, p. 241-261, 1992.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, quarto levantamento**. Brasília, 2011.
- COX, P.M. et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. **Nature**, London, v. 408, p.184-187, 2000.
- CUNHA, G.R. et al. Balanço de radiação em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 1, p. 1-10, 1993.
- DALLACORT, R. et al. Ajuste e teste dos coeficientes genéticos do modelo de simulação Cropgro-soybean, para a região Noroeste do Estado do Paraná. **Acta Scientiarum. Agronomy**, v. 27, n. 2, p. 363-371, 2005.

DEARDORFF, J.W. A parameterization of ground-surface moisture content for use in atmospheric prediction models. **Journal Applied Meteorology**, v. 16, p. 1182-1185, 1977.

DEARDORFF, J.W. Efficient prediction of ground surface temperature and moisture, with inclusion of a layer of vegetation. **Journal Geophysic Research**, v. 83, p. 1889-1903, 1978.

DICKINSON, R.E. et al. **Biosphere atmosphere transfer scheme (BATS) for the NCAR community climate model**. NCAR, 1986.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A.H. **Yield response to water**. Roma: FAO, 1979. 193 p. (Irrigation and Drainage Paper, 33).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Soja. **Tecnologias de produção de soja – região central do Brasil – 2009 e 2010**. Londrina: EMBRAPA-CNPSo/CPAC/CPAO, 2008. 261 p. (Sistemas de Produção, 13).

ETHERIDGE, D.M. et al. Natural and anthropogenic changes in atmospheric CO<sub>2</sub> over the last 1000 years from air in Antarctic ice and firn. **Journal Geophysical Research**, Washington, v. 101, p. 4115-4128, 1996.

FALGE, E. et al. Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 107, p. 43-69, 2001.

FARIA, M.A. Monitoramento para manejo da irrigação: instrumentação, automação e métodos. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA AGRÍCOLA, 27, 1998, Poços de Caldas. **Anais...** Lavras: UFLA/SBEA, 1998. p. 133-237.

FARIAS, J.R.B. et al. Caracterização de risco de déficit hídrico nas regiões produtoras de soja no Brasil. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 9, n. 3, p. 415-421, 2001.

FERNANDES, A.L.T. et al. Uso de estações automáticas para controle da irrigação no Estado de São Paulo. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 9, 1995, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Sociedade Brasileira Agrometeorologia, 1995. p. 1-3.

FINKELE, K.J. et al. Modelling of the OASIS energy flux measurements using two canopy concepts. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 107, p. 49-79, 2003.

FOKEN, T.; WICHURA, B. Tools for quality assessment of surface-based flux Measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 78, p. 83-105, 1996.

FONTANA, D.C. et al. Balanço de radiação da soja em região subtropical do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 3, p. 411-418, 1991.

FRISINA, V.A. et al. Balanço de radiação e balanço de energia da cultura de alface (*Latuca sativa* L.) em estufa de polietileno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 10, p. 1775-1786, 1999.

GARRATT, J.R. et al. The surface energy balance at local and regional scales—a comparison of general circulation model results with observations. **Journal of Climate**, v. 6, p. 1090-1109, 1993.

GARRATT, J.R. **The atmospheric boundary layer**, Cambridge: Cambridge University Press, 1992.

GIAMBELLUCA, T.W. et al. Evapotranspiration and energy balance of Brazilian savannas with contrasting tree density. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 149, p. 1365-1376, 2009.

GOVE, J.H.; HOLLINGER, D.Y. Application of a dual unscented Kalman filter for simultaneous state and parameter estimation in problems of surface-atmosphere exchange. **Journal Geophysic Research**, v. 111, 2006.

GRÜNHAGE, L.; HAENEL, H.D. PLATIN (plant-atmosphere interaction) I: a model of plant-atmosphere interaction for estimating absorbed doses of gaseous air pollutants. **Environmental Pollution**, v. 98, n. 1, p. 37-50, 1997.

HEINEMANN, A.B. et al. Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.) growth and development response to CO<sub>2</sub> enrichment under different temperature regimes. **European Journal Agronomy**, Amsterdam, v. 23, n. 3, p. 1-13, 2005.

HESKETH, J.D. et al. Temperature control of time intervals between vegetative and reproductive events in soybean. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 250-254, 1973.

HIRASAWA, T.; HSIAO, T.C. Some characteristics of reduced leaf photosynthesis at midday in maize growing in the field. **Field Crops Research**, v. 62, p. 53-62, 1999.

HOFSTRA, G. Response of soybeans to temperature under high light intensities. **Canadian Journal Plant Science**, Ottawa, v. 52, p. 535-543, 1972.

HOLLINGER, D.Y. et al. Spatial and temporal variability in forest-atmosphere CO<sub>2</sub> exchange. **Global Change Biology**, v. 10, p. 1689-1706, 2004.

HOPKINS, W.G. **Correlation coefficient**. Disponível em: <<http://www.sportsci.org/resource/stats/correl.html>>. Acesso em: 10 ago. 2010.

HUI, D.; WAN, S.; SU, B.; KATUL, G.; MONSON, R.; LUO, Y. Gap filling missing data in eddy covariance measurements using multiple imputation (MI) for annual estimations. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 121, p. 93-111, 2004.

INTERNATIONAL PANEL ON CLIMATE CHANGE – IPCC. **Climate change 2007: the physical science basis**. Paris, 2007.

KAIMAL, J.C.; FINNIGAN, J.J. **Atmospheric boundary layer: their structure and measurement**. Oxford University Press, 1994. 304 p.

KEELING, C.D.; WHORF, T.P. Atmospheric CO<sub>2</sub> records from the SIO air sampling network. In: KEELING, C.D.; WHORF, T.P. **Trends: a compendium of data on global change**. Oak Ridge: Oak Ridge National Laboratory, 2000. 245 p.

KJAERGAARD, J. **Estimation of energy balance components for surfaces with low vegetation**. 2004. 62 f. Tese (PhD) – University of Copenhagen, Copenhagen.

KNORR, W.; KATTGE, J. Inversion of terrestrial ecosystem model parameter values against eddy covariance measurements by Monte Carlo sampling. **Global Change Biology**, v. 11, p. 1333-1351, 2005.

KOWALCZYK, E.A. et al. **CSIRO - atmosphere biosphere land exchange (CABLE) model for use in climate models and as an offline model**. 2006. (CMAR Research Paper, 13).

KOWALCZYK, E.A.; GARRATT, J.R.; KRUMMEL, P.B. **A soil-canopy scheme for use in a numerical model of the atmosphere**. 1991. (CSIRO Atmospheric Research Technical, 23).

KOWALCZYK, E.A.; GARRATT, J.R.; KRUMMEL, P.B. **Implementation of a soil-canopy scheme into the CSIRO GCM – regional aspects of the model response**. 1994. (CSIRO Atmospheric Research Technical, 32).

KUDREV, T.G. **Água: vida das plantas**. São Paulo: Cone, 1994. 178 p.

LEUNING, R. et al. Leaf nitrogen, photosynthesis, conductance and transpiration: scaling from leaves to canopies. **Plant Cell Environ.**, v. 18, p. 1183-1200, 1995.

LEUNING, R. et al. A two-leaf model for canopy conductance, photosynthesis and partitioning of available energy. II. Comparison with measurements. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 91, p. 113-125, 1998.



LIMA, J.R.S. et al. Balanço de energia em um solo cultivado com feijão caupi no brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 4, 2005.

LOUIS, J.F. A parametric model of vertical eddy fluxes in the atmosphere. **Boundary Layer Meteorology**, v. 17, p. 187-202, 1979.

MAJOR, D.J. et al. Evaluation of eleven thermal unit methods for predicting soybean development. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 172-174, 1975a.

MAJOR, D.J.; JOHNSON, D.R.; TANNER, J.W.; ANDERSON, I.C. Effects of daylength and temperature on soybean development. **Crop Science**, Madison, v. 15, p. 174-179, 1975b.

MALHI, Y. et al. The energy and water dynamics of a central Amazonian rain forest. **Journal of Geophysical Research**, v. 107, 2002.

MELO, R.W. **Parametrização de modelo para estimação da produtividade da soja nas regiões do Planalto Médio, das Missões e do Alto Vale do Uruguai, Rio Grande do Sul**. 2005. 196 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, SP.

MENDELSON, R.; ROSENBERG, N.J. Framework for integrated assessments of global warming impacts. **Climate Change**, Amsterdam, v. 28, p.15-44, 1994.

MEYERS, T.P.; HOLLINGER, S.E. An assessment of storage terms in the surface energy balance of maize and soybean. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 125, p. 105-115, 2004.

MIHAILOVIC, D.T. Description of a land-air parameterization scheme (LAPS). **Global and Planetary Change**, v. 13, p. 207-215, 1996.

MONCRIEFF, J.B.; MASSHEDER, J.M.; DE BRUIN, H.; ELBERS, J.; FRIBORG, T.; HEUSINKVELD, B.; KABAT, P.; SCOTT, S.; SOEGAARD, H.; VERHOEF, A. A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide. **Journal of Hydrology**, p. 589-611, 1997.

MONIN, A.S.; OBUKHOV, A.M. Osnovnye zakonomernosti turbulentnogo peremesivaniya v prizemnom sloe atmosfery (basic laws of turbulent mixing in the atmosphere near the ground). **Trudy Geofiz. Inst.**, v. 24, n. 151, p. 163-187, 1954.

MONTEITH, J.L. The quest for balance in crop modeling. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 695-697, 1996.

MOORE, C.J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. **Boundary Layer Meteorology**, v. 37, p. 17-35, 1986.

NEVES, L.O. et al. Balanço de energia em uma cultura de feijão caupi (*Vigna unguiculata* L.) no estado do Para. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 16, p. 21-30, 2008.

NOORMETS, A. et al. Age-dependent changes in ecosystem carbon fluxes in managed forests in northern Wisconsin, USA. **Ecosystems**, v. 10, p. 187-203, 2007.

OOBA, M. et al. Comparisons of gap-filling methods for carbon flux dataset: a combination of a genetic algorithm and an artificial neural network. **Ecol. Modell.**, v. 198, p. 473-486, 2006.

PAPALE, D.; VALENTINI, R. A new assessment of European forests carbon exchanges by eddy fluxes and artificial neural network spatialization. **Global Change Biology**, v. 9, p. 525-535, 2003.

PEREIRA, A.R. et al. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183 p.

PEZZOPANE, J.R.M.; P. JÚNIOR, M.J. Balanço de energia em vinhedo de "Niagara Rosada". **Bragantia**, Campinas, v. 62, n. 1, p. 155-161, 2003.

RAUPACH, M.R.; FINKELE, K.; ZHANG, L. **SCAM (Soil-Canopy-Atmosphere Model): description and comparison with field data**. CSIRO, 1997. (Centre for Environment Mechanics Technic. Rep., 132).

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Manole, 1990. 188 p.

REICHSTEIN, M. et al. On the separation of net ecosystem exchange into assimilation and ecosystem respiration: review and improved algorithm. **Global Change Biol.**, v. 11, p. 1424-1439, 2005.

RICHARDSON, A.D.; BRASWELL, B.H.; HOLLINGER, D.Y.; BURMAN, P.; DAVIDSON, E.A.; EVANS, R.S.; FLANAGAN, L.B.; MUNGER, J.W.; SAVAGE, K.; URBANSKI, S.P.; WOFSY, S.C. Comparing simple respiration models for eddy flux and dynamic chamber data. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 141, p. 219-234, 2006b.

RODRIGUES, H.J.B. **Balanço de radiação, energia e fluxo de CO<sub>2</sub> em ecossistema de manguezal na Amazônia**. 2006. 227 f. Tese (Doutorado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

SALINAS, A.P.R. et al. Respostas fisiológicas que caracterizam el comportamiento de diferentes cultivares de soja a la deficiencia hídrica. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 31, n. 5, p. 331-338, 1996.

SAN JOSÉ, J.J. et al. Comparative energy exchange from cowpeas (*Vigna unguiculata* (L.) Walp cvs. TC-9-6 and M-28-6-6) with differences in canopy architectures and growth durations at the Orinoco llanos. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 116, p. 197-219, 2003.

SAN JOSÉ, J.J. et al. Diurnal patterns of carbon dioxide, water vapour, and energy fluxes in pineapple [*Ananas comosus* (L.) Merr. cv. Red Spanish] field using eddy covariance. **Photosynthetica**, v. 45, p. 370-384, 2007.

SCHÖFFEL, E.R.; VOLPE, C.A. Relação entre a soma térmica efetiva e o crescimento da soja. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 10, n. 1, p. 89-96, 2002.

SCHWALM, C.R. et al. A method for deriving net primary productivity and component respiratory fluxes from tower-based eddy covariance data: a case study using a 17-year data record from a Douglas-fir chronosequence. **Global Change Biology**, v. 13, p. 370-385, 2007.

SELLERS, P.J. et al. A simple biosphere model (SiB) for use within general circulation models. **Journal of Atmospheric Sciences**, v. 43, n. 6, p. 505-531, 1986.

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.

SELLERS, P.J. et al. Canopy reflectance, photosynthesis and transpiration. III: A reanalysis using improved leaf models and a new canopy integration scheme. **Remote Sensing of Environment**, v. 42, p. 187-216, 1992.

SILVA, T.G.F. et al. Variação do balanço de radiação e de energia da cana-de-açúcar irrigada no semi-árido brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 2, p.139-147, 2011.

SIONIT, N. et al. Interaction of temperature and CO<sub>2</sub> enrichment on soybean: photosynthesis and seed yield. **Canadian Journal of Plant Science**, Ottawa, v. 67, n. 5, p. 629-636, 1987.

SIQUEIRA, O.J.F. et al. Potential effects of global climate changes for Brazilian agriculture and adaptative strategies for wheat, maize and soybean. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 2, p. 115-129, 1994.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Efeitos potenciais das mudanças climáticas na agricultura brasileira e estratégias adaptativas para algumas culturas. In: LIMA, M.A.; CABRAL, O.M.R.; MIGUEZ, J.D.G. **Mudanças climáticas globais e a agropecuária brasileira**. Jaguariúna: Embrapa Meio Ambiente, 2001. p. 33-63.

SIQUEIRA, O.J.W. et al. Mudanças climáticas projetadas através dos modelos GISS e reflexos na produção agrícola brasileira. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v. 8, p. 311-320, 2000.

SOARES, W.B. **Fluxos de água e de energia em feijão macassar e mamona no nordeste do Brasil**. 2009. 136 f. Tese (Doutorado em Tecnologias Energéticas e Nucleares) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE.

STAUCH, V.J. et al. Estimation of net carbon exchange using eddy covariance CO<sub>2</sub> flux observations and a stochastic model. **Journal Geophysic. Research**, 2006.

STRECK, N.A. Climate change and agroecosystems: the effect of elevated atmospheric CO<sub>2</sub> and temperature on crop growth, development, and yield. **Ciência Rural**, v. 35, p. 734-744, 2005.

STULL, R.B. An introduction to Boundary Layer Meteorology. **Atmospheric Sciences Library**, 1988.

SWINBANK, W.C. **Eddy transports in the lower atmosphere**. Melbourne, Australia: Division of Meteorological Physics, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, 1955. 30 p. (Tech. Paper, 2).

SWINBANK, W.C. Measurement of vertical transfer of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere. **Journal Meteorology**, v. 8, p. 135-145, 1951.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Plant physiology**. Redwood City: Benjamin/Cummings, 1991. 559 p.

TAYLOR, K.E.; MacCRACKEN, M.C. Projected effects of increasing concentrations of carbon dioxide and trace gases on climate. In: KIMBALL, B.A.; ROSENBERG, N.J.; ALLEN JR., L.H. (Eds.). **Impact of carbon dioxide, trace gases, and climate change on global agriculture**. Madison: American Society of Agronomy, 1990. p. 1-17. (ASA Special Publication, 53).

TEIXEIRA, A.H.C. Avaliação dos componentes do balanço de energia durante o primeiro ano de cultura da banana. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 5, n. 1, p. 28-32, 2001.

TUBIELLO, F.N. et al. Effects of climate change and elevated CO<sub>2</sub> on cropping systems: model predictions at two Italian locations. **European Journal of Agronomy**, v. 13, p. 179-189, 2000.

VERMA, S.B. et al. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 131, p. 77-96, 2005.

VILLA NOVA, N.A. et al. **Estimativa de graus-dia acumulado acima de qualquer temperatura basal, em função das temperaturas máxima e mínima**. São Paulo: USP/Instituto de Geografia, 1972. 8 p. (Caderno de Ciência da Terra).

VISSOTTO JR., D. **Modelagem numérica para interações superfície-atmosfera no Estado do Paraná**. 2003, 174 f. Dissertação (Mestrado em Modelagem) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

WANG, Y.P. et al. Estimating parameters in a land surface model by applying nonlinear inversion to eddy covariance flux measurements from eight FLUXNET sites, Global. **Change Biology**, v. 12, 2006.

WANG, Y.P. et al. Parameter estimation in surface exchange models using nonlinear inversion: how many parameters can we estimate and which measurements are most useful? **Global Change Biology**, v. 7, p. 495-510, 2001.

WATSON, R.T. et al. Greenhouse gases and aerosols. In: HOUGHTON, J.T.; JENKINS, G.J.; EPHRAUMS, J.J. (Eds.). **Climate change: the IPCC scientific assessment**. Cambridge: Cambridge University Press, 1990. p. 1-40.

WILLMOTT, C.J. et al. Statistics for the evaluation and comparison of models. **Journal of Geophysical Research**, Ottawa, v. 90, p. 8995-9005, 1985.

WILSON, K. et al. Energy balance closure at FLUXNET sites. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 113, p. 223-243, 2002.

YANG, Z.L.; DICKINSON, R.E. Descriptions of the biosphere-atmosphere transfer scheme (bats) for the soil moisture workshop and evaluation of its performance. **Global and Planetary Change**, v. 13, p. 117-134, 1996.

ZHANG, Y. Measurement of evapotranspiration in a winter wheat **Field**. **Hydrological Processes**, v. 16, p. 2805-2817, 2002.