

LEONARDO DE OLIVEIRA NEVES

**FLUXOS DE CO₂, CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE NA CULTURA DE
CAUPI (*Vigna unguiculata* L.)**

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

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2006

LEONARDO DE OLIVEIRA NEVES

**FLUXOS DE CO₂, CALOR SENSÍVEL E CALOR LATENTE NA CULTURA DE
CAUPI (*Vigna unguiculata* L.)**

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

APROVADA: 14 de agosto de 2006.

Prof. Williams Pinto Marques Ferreira
(Co-orientador)

Prof. Antonio Carlos Lola da Costa
(Co-orientador)

Prof. Gilberto Chohaku Sedyama

Prof. João Batista Miranda Ribeiro

Prof. José Maria Nogueira da Costa
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

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

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

À Universidade Federal de Viçosa e à área da 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 conselheiros Dr. Antonio Carlos Lola da Costa e Dr. Williams Pinto Marques Ferreira, pelas sugestões e informações necessárias à correção deste trabalho.

Aos colegas e amigos de República Sabrina, Evandro, Lucía, Mábio, Vitor, Gyraia, Vinicius, pelos momentos de alegria, pela descontração, pelo companheirismo e pela convivência na mesma casa durante o período em Viçosa.

Aos meus amigos Rafael, Carlinhos, Joyce e Rosandro (Mula), que direta e indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

Em especial, a três grandes amigos que me ajudaram a passar por mais essa etapa, o Jornalista Daniel Neves da Silveira e os Meteorologistas Ricardo Acosta e Jonatan Dupont.

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, Paraná.

Em Maio de 2004, graduou-se em Meteorologia, pela Universidade Federal de Pelotas (UFPel), em Pelotas, Rio Grande do Sul.

Em Agosto de 2004, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Meteorologia Agrícola na Universidade Federal de Viçosa, na área de micrometeorologia de ecossistemas.

CONTEÚDO

	Página
LISTA DE TABELA	v
LISTA DE FIGURAS	vi
LISTA DE SIMBOLOS.....	ix
LISTA DE UNIDADES.....	x
RESUMO	xi
ABSTRACT.....	xiii
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Cultura de Caupi	3
2.2. Balanço de Energia.....	4
2.3. Fluxo de CO ₂	6
2.4. Eficiência do Uso da água (EUA).....	7
3. MATERIAIS E MÉTODOS	8
3.1. Localização.....	8
3.2. Classificação Climática.....	8
3.3. Área plantada e manejo.....	8
3.4. Medições meteorológicas e micrometeorológicas.....	9
3.4.1. Método do Balanço de Energia.....	9
3.4.2. Método da covariância dos vórtices turbulentos.....	10
3.4.3. Método de estimativa da EUA.....	12
3.5. Processamento dos dados.....	12
4. RESULTADOS E DISCUSSÕES	13
4.1. Características climáticas da localidade	13
4.2. Variação das componentes do balanço de energia.....	16
4.2.1. Período Vegetativo.....	16
4.2.2. Período de Maturação.....	17
4.2.3. Período de Senescência.....	19
4.4. Fluxos de CO ₂ durante o período noturno.....	24
4.5. Estimativa do saldo de radiação a partir da Radiação solar Global.....	28
4.6. Eficiência do Uso da Água.....	30
4.7. Relações de dependência entre os fluxos de CO ₂ , calor latente, calor sensível e as variáveis meteorológicas.....	31
5. Conclusões.....	35
6. Revisão Bibliográfica.....	37

LISTA DE TABELA

		Página
1	Instrumentos utilizados no sistema EDISOL.....	11
2	Instrumentos utilizados na estação meteorológica automática...	12
3	Dados referentes às normais climatológicas para a cidade de Tracuateua – PA.....	13
4	Parâmetros da equação para estimativa do saldo de radiação pela radiação global ($R_n=a+bR_g$; em $W.m^{-2}$).....	28

LISTA DE FIGURAS

	Página
1 Torre micrometeorológica no centro da cultura de caupi.....	10
2 Sistema <i>EDISOL</i> , desenvolvido por MONCRIEFF et al. (1997).....	12
3 Variação horária da radiação solar global e do saldo de radiação, correspondente aos meses de agosto e setembro de 2002.....	14
4 Variação dos totais diários da radiação solar global e do saldo de radiação para o período experimental, de agosto e setembro de 2002.....	15
5 Variação da partição da radiação solar global em saldo de radiação para todo o período.....	15
6 Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de crescimento vegetativo.....	16
7 Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de crescimento vegetativo da cultura de caupi.....	17
8 Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de maturação durante o período de estudo.....	18
9 Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de maturação da cultura de caupi.....	19

10	Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de senescência.....	20
11	Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de senescência da cultura de caupi.....	20
12	Variação da média horária do fluxo de CO ₂ para os dias 22/08/2002, 15/09/2002 e 22/09/2002.....	22
13	Variação horária dos fluxos de CO ₂ durante o fotoperíodo.....	23
14	Variação dos valores médios horários dos fluxos de CO ₂ para todo o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.....	24
15	Variação média horária das taxas de respiração e da temperatura média do ar para o período experimental.....	25
16	Variação horária das taxas de respiração para o período noturno, durante os dias 22 e 23/08/2002, 15 e 16/09/2002 e 22 e 23/09/2002.....	26
17	Variação da média diária das taxas de respiração e da temperatura média do ar para o período noturno, durante os três estádios da cultura.....	27
18	Relação entre o saldo de radiação e a radiação global para todo o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.....	29
19	Relação entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente e sensível durante todo o período experimental.....	29

20	Varição média da Eficiência do Uso da Água ao longo de todo período experimental, referente aos meses de agosto a setembro de 2002.....	30
21	Relação de dependência entre a radiação solar global e os fluxos de calor sensível e calor latente, durante o período experimental, referente aos meses de agosto a setembro de 2002.....	32
22	Relação de dependência entre o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e calor latente, durante o período estudado.....	33
23	Relação de dependência entre o saldo de radiação e a radiação solar global com o fluxo de CO ₂ , durante o período estudado.....	34

LISTA DE SÍMBOLOS

R_g	Radiação Solar Global (W.m⁻²)
H	Fluxo de calor Sensível (W.m⁻²)
G	Fluxo de calor no Solo (W.m⁻²)
LE	Fluxo de calor Latente (W.m⁻²)
R_n	Saldo de Radiação (W.m⁻²)
T	Temperatura do ar (°C)
F_c	Fluxo de CO₂ (μmol.m⁻².s⁻¹)
CO₂	Dióxido de Carbono
EUA	Eficiência do Uso da Água (μmolCO₂.mmolH₂O⁻¹)

LISTA DE UNIDADES

m	Metro
s	Segundo
W	Watt
Hz	Hertz
cm	centímetro
μ	micro
°C	Celsius
ha	hectare

RESUMO

NEVES, Leonardo de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2006. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata L.*)** Orientador: José Maria Nogueira da Costa. Conselheiros: Antonio Carlos Lôla da Costa e Williams Pinto Marques Ferreira.

Medições dos fluxos de CO₂, calor latente e calor sensível foram feitos durante o ciclo fenológico da cultura de caupi, na cidade de Tracuateua, no estado do Pará, durante os meses de agosto e setembro de 2002. Os objetivos do presente trabalho foram: 1 - Quantificar as magnitudes dos fluxos de CO₂, de calor latente e de calor sensível durante o ciclo de desenvolvimento da cultura de caupi; 2 - Analisar o Balanço de Energia e a partição do saldo de radiação em suas componentes de fluxo de calor latente e de calor sensível; 3 - Estimar a eficiência do uso da água para a cultura de caupi. Os fluxos de CO₂ e de energia foram medidos usando o método da covariância dos vórtices turbulentos. Essas informações foram complementadas com medições do saldo de radiação, radiação solar global, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa, velocidade e direção do vento, obtidas em uma estação meteorológica automática. Os valores médios horários dos fluxos de CO₂, de calor sensível e de calor latente no período estudado foram de $-2,34 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, 206 W.m^{-2} e 76 W.m^{-2} , respectivamente. Os valores médios diários dos fluxos de calor sensível e de calor latente no período estudado foram de $7,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$ e $2,7 \text{ MJ.m}^{-2}.\text{d}^{-1}$, respectivamente. A partição do saldo de radiação em fluxo de calor sensível apresentou um valor médio de 0,58, enquanto a partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente apresentou um valor médio de 0,21, para todo o período experimental. A partição dos componentes do balanço de energia expressa pela razão de Bowen, variou

entre 1,52 a 4,88, com uma média diária de 2,82. Os valores médios das taxas de respiração durante todo o ciclo da cultura de caupi foram de $1,9 \mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$. A Eficiência do Uso da Água definida pela razão entre os fluxos simultâneos de CO_2 e o fluxo de calor latente, apresentou um valor médio de $1,35 \mu\text{molCO}_2\cdot\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ durante todo o período experimental. Os fluxos de calor sensível foram superiores aos fluxos de calor latente durante o ciclo da cultura. As condições de deficiência hídrica predominantes durante o ciclo da cultura resultaram em baixos valores nos fluxos de CO_2 e de calor latente, afetando conseqüentemente a eficiência do uso da água da cultura.

ABSTRACT

NEVES, Leonardo de Oliveira, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2006. **Carbon dioxide, sensible heat and latent heat fluxes in the cowpea crop (*Vigna Unguiculata* L.)**. Adviser: José Maria Nogueira da Costa. Co-Advisers: Antonio Carlos Lôla da Costa and Williams Pinto Marques Ferreira.

Measurements of carbon dioxide, latent heat and sensible heat fluxes were made during the cycle of the cowpea crop, in Tracueteua-PA, during the months of the august and September of 2002. The objectives of the present work were: 1 – To quantify the magnitudes of the carbon dioxide, latent heat and sensible heat fluxes, during the development cycle of the cowpea crop; 2 - To analyze the energy balance and the net radiation partition in their components of latent heat and sensible heat fluxes; 3 – To evaluate the water use efficiency for a cowpea crop. The fluxes of carbon dioxide and energy were measured using the eddy covariance method. These informations were supported with measurements of net radiation, global solar radiation, precipitation, air temperature, relative humidity and wind speed and direction, using an automatic weather. The hourly mean value of the carbon dioxide, sensible heat and latent heat fluxes in the studied period were $-2.34 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, 206 W.m^{-2} and 76 W.m^{-2} , respectively. The daily mean value of the sensible heat and latent heat fluxes in the studied period were $7.7 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$ e $2.7 \text{ MJ.m}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectively. The partition of the net radiation in sensible heat flux showed a mean value of 0.58, while a partition of the net radiation in latent heat flux showed a mean value of 0.21 during all the experimental period. The partition of the energy balance components expressed by the Bowen ratio, varied between 1.52 to 4.88, with a mean

value of 2.82. The mean values of the respiration rate was of $1.9 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. The water use efficiency, defined by the ratio between the carbon dioxide and latent fluxes, presented a mean daily value of $1.35 \mu\text{molCO}_2.\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ during the experimental period. The sensible heat fluxes were higher than the latent heat fluxes during the cycle of the cowpea crop. The predominant conditions of water deficiency during the cycle of the crop resulted in low values in the carbon dioxide and latent heat fluxes, affecting the water use efficiency of the cowpea crop.

1. INTRODUÇÃO

O Caupi (*Vigna Uniguiculata* L.) 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, constituindo-se em um importante alimento da dieta alimentar nas regiões Norte e Nordeste do Brasil. Pelo seu valor nutritivo, o feijão caupi é cultivado principalmente para a produção de grãos secos e verdes, visando ao consumo humano.

Nas últimas décadas, a região amazônica vem passando por significativas mudanças do uso do solo, tal como a expansão de áreas agrícolas cultivadas. Com isso, os fluxos superficiais de energia e massa variam bastante, intensificando as mudanças no clima local. Enquanto a caracterização dessas interações já vem sendo estudada satisfatoriamente em ecossistemas de floresta e manguezal, há uma necessidade urgente de estudos desse tipo na agricultura.

Segundo FEARNside (1996), cerca de 20% da área desmatada na região amazônica são substituídas por culturas anuais e o restante por pastagem. O mesmo autor afirma que as magnitudes dos estoques de carbono nesta região e a maneira como esses estoques variam com o tempo têm importantes implicações para o balanço de carbono na região.

Esse estudo fez parte do projeto LBA (Experimento de Grande Escala da Biosfera-Atmosfera na Amazônia), e que contou com a cooperação institucional da Universidade Federal de Viçosa (Departamento de Engenharia Agrícola), Universidade Federal do Pará (Departamento de Meteorologia), Museu Paraense Emílio Goeldi (Departamento de Ecologia), University of

Edinburgh (*Institute of Ecology and Resource Management*) e Oxford University.

O presente trabalho teve como objetivos: **1-** Quantificar as magnitudes dos fluxos de CO₂, de calor latente e de calor sensível durante o ciclo de desenvolvimento da cultura de caupi; **2-** Analisar o Balanço de Energia e a partição do saldo de radiação em suas componentes de fluxo de calor latente e calor sensível; **3-** Estimar a eficiência do uso da água para a cultura de caupi durante o ciclo fenológico.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 A CULTURA DE CAUPI

O caupi (*Vigna unguiculata* L.) é uma importante fonte de proteínas para a população das regiões Norte e Nordeste do Brasil, especialmente para as de baixa renda, e também para as populações das regiões de outros países, onde é cultivado. Segundo DAVIS et al., (1991), o teor de nutriente de uma semente de caupi é constituído de 63,6% de carboidratos, 24,8% de proteínas, 6,3% de fibras e 1,9% de gordura. Esses valores foram obtidos com base em análises feitas com grãos de oito variedades de caupi.

Pelo seu valor nutritivo, o caupi é cultivado principalmente para a produção de grãos, secos ou verdes, visando ao consumo humano, na forma de conserva ou desidratado. Além disso, o caupi também é utilizado como forragem verde, feno, ensilagem, farinha para alimentação animal e, ainda, como adubação verde e proteção do solo (ARAÚJO e WATT, 1988; VIEIRA et al., 2001).

O caupi adapta-se facilmente a solos de baixa fertilidade devido às suas altas taxas de fixação de nitrogênio (ELOWAD e HALL, 1987). Também é uma importante fonte de matéria orgânica, utilizada como adubo verde na recuperação de solos naturalmente pobres em fertilidade ou esgotados pelo uso intensivo. Segundo EHLERS e HALL (1997), o caupi tem grande tolerância a altas temperaturas e à seca, quando comparado a outras culturas. De acordo com CARVALHO et al., (1998), essa tolerância do caupi à seca está relacionada com a diminuição das perdas de água pelo controle da abertura dos estômatos. Todavia, enquanto vários estudos têm mostrado que o caupi

pode manter o potencial de água na folha em valores relativamente altos durante estresse hídrico devido ao fechamento estomatal, CHAVES (1991) adverte que essa estratégia pode acarretar redução em assimilação de CO₂ e, conseqüentemente, no seu crescimento e produtividade.

A importância da cultura de caupi para o estado do Pará pode ser destacada pela geração de mais de 70 mil empregos diretos e um volume de negócios que gira em torno de 30 milhões de dólares por ano (SAGRI, 2006). Só na região Bragantina paraense são mais de 30 mil pessoas, em 16 municípios, que dependem diretamente dessa cultura. A estimativa de produção de caupi em 2005 na região Bragantina do Pará foi de 30 mil toneladas, sendo que, 90% dessa produção é comercializada na região Nordeste do Brasil (SAGRI, 2006).

Segundo estimativas da FAO (2006), a produção mundial da cultura de caupi é de aproximadamente 3,7 milhões de toneladas, em uma área cultivada de cerca de 8,7 milhões de hectares. A Nigéria é o maior produtor de caupi, com aproximadamente 57% do total da produção mundial, seguido pelo Brasil que contribui com 17% da produção mundial (PEREIRA et al., 2001).

A maioria dos trabalhos realizados a respeito da cultura de caupi no Brasil enfatiza aspectos agrônômicos, particularmente relacionados com manejo, fitossanidade e adubação, não tendo sido encontrada nenhuma referência relacionada com fluxos de CO₂.

2.2 – BALANÇO DE ENERGIA

O método da covariância dos vórtices turbulentos atualmente está sendo muito utilizada pelos pesquisadores para análise dos fluxos de massa e energia entre a cultura e a atmosfera. Esse método constitui em uma importante ferramenta na quantificação dos fluxos de CO₂, vapor d'água e energia, sendo reconhecido atualmente como a forma mais direta e confiável para o monitoramento de longo prazo dos fluxos em ecossistemas agrícolas. (RUNNING et al., 1999; CANADELL et al., 2000; BALDOCCHI, 2003).

O único estudo encontrado na literatura sobre o balanço de energia para a cultura do caupi, utilizando o método da covariância dos vórtices turbulentos, foi realizado por SAN JOSE et al., (2003). Nesse estudo, foi feita uma

comparação sobre variação dos fluxos de energia durante o ciclo fenológico para duas variedades da cultura de caupi. Constatou-se que o fluxo de calor latente foi o principal termo do balanço de energia, representado 82% e 86% da energia disponível para as duas variedades analisadas.

Outro método muito utilizado na quantificação do balanço de energia é o método da razão de Bowen (FONTANA 1991; HEILMAN et al., 1994; CUNHA et al., 1996; TRAMBOUZE et al., 1998; GALVANI et al., 2000; TODD et al., 2000; LOPES et al., 2001; TEIXEIRA, 2001; CUNHA et al., 2002; LIMA et al., 2004; YOSHIMOTO et al., 2005). LIMA et al., (2004) utilizou esse método com a cultura de caupi na Paraíba, e constatou que o fluxo de calor latente aumentou com o aumento da cobertura do solo pela cultura, sendo que 71% do saldo de radiação foi utilizado sob a forma de calor latente, 19% sob a forma de calor sensível, e 10% como fluxo de calor no solo.

FONTANA et al., (1991), em estudo realizado com soja irrigada e não irrigada, utilizando o método do balanço de energia, constataram que o fluxo de calor latente representou a maior porção do saldo de radiação, sendo 95% na parcela irrigada e 78% na parcela não irrigada. TEIXEIRA (2001) avaliou os componentes do balanço de energia durante o primeiro ano da cultura de banana, utilizando o método do balanço de energia expressa pela razão de Bowen. Foi constatado por esse autor que a maior porção do saldo de radiação foi usada como fluxo de calor latente, 87%, enquanto o fluxo de calor sensível contribuiu com 11%. Ainda, segundo o mesmo autor, o baixo percentual do saldo de radiação usado como fluxo de calor sensível ocorreu devido à advecção de umidade para a cultura proveniente do Rio São Francisco.

CUNHA et al., (1996) mediram os componentes do balanço de energia na cultura do milho, tendo verificado que a maior fração do saldo de radiação foi utilizada para o fluxo de calor latente 80%, enquanto o fluxo de calor sensível, contribuiu com 14%. Resultados semelhantes foram encontrados por outros pesquisadores para as culturas de alface (FRISINA e ESCOBEDO, 1995), pepino (GALVANI et al., 2000) e pimentão (CUNHA et al., 2002).

2.3. FLUXOS DE CO₂

A quantificação dos fluxos de CO₂ de uma cultura é de grande importância pela sua relação com o crescimento e a produtividade. Segundo BALDOCCHI (1994) as variáveis meteorológicas mais relevantes nas trocas de CO₂ entre uma vegetação e a atmosfera são a radiação solar global, o saldo de radiação, a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor.

PASTENES e HORTON (1999) constataram, em variedades de feijão, que temperaturas elevadas, associadas ao aumento do déficit de pressão de vapor, afetam as reações bioquímicas da planta, exercendo influência direta sobre o fechamento estomatal, contribuindo para o decréscimo das taxas de assimilação de CO₂. RIBEIRO et al., (2004), em experimento realizado com cinco variedades de feijão, em ambiente controlado, constataram que o curso diário da taxa de assimilação de CO₂, para todas as espécies foi similar, com um aumento nas primeiras horas do dia e um decréscimo após o meio-dia, quando a temperatura do ar e o déficit de pressão de vapor foram elevados.

ASSENG e HSIAO (2000) analisaram a variação da taxa de assimilação de CO₂ para a cultura da alfafa, relacionado com a nebulosidade. As taxas de assimilação de CO₂ para os dias de céu claro foram de aproximadamente 39 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, enquanto para dias nublados os valores foram de aproximadamente, 55 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Segundo os mesmos pesquisadores, a diferença observada foi devido à temperatura do dossel, que é maior em dias de céu claro, ocasionando o fechamento estomatal.

Vários pesquisadores também constataram a influência do teor de água no solo na variação dos fluxos de CO₂ de culturas agrícolas. Em pesquisa realizada com dez variedades de caupi, em ambiente controlado, ANYIA e HERZOG (2004) verificaram que a taxa de assimilação de CO₂ diminuiu sob condições de estresse hídrico. Esse decréscimo foi associado, principalmente, ao fechamento dos estômatos, acarretando também diminuição da evapotranspiração. Resultados semelhantes foram constatados por SASSAKI e MACHADO (1999) em estudo realizado com duas variedades de trigo, em ambiente controlado.

STEDUTO e HSIAO (1998) analisaram a variação das taxas de assimilação de CO₂ na cultura de milho sob duas condições de umidade do

solo. Sob condições úmidas, foi constatado uma taxa de assimilação de CO₂ de -25 μmol.m⁻².s⁻¹, enquanto sob condições de pouca umidade obteve-se uma taxa de -20 μmol.m⁻².s⁻¹.

Em estudos realizados com arroz e utilizando o método da covariância dos vórtices turbulentos, SAITO et al., (2005) constataram que a variação dos fluxos de CO₂ aumentaram com o crescimento da planta, alcançando valores de -1,3 mg.m⁻².s⁻¹ (-30 μmol.m⁻².s⁻¹), enquanto a taxa de respiração noturna foi de 0,3 mg.m⁻².s⁻¹ (6,75 μmol.m⁻².s⁻¹).

BALDOCCHI (1994) comparou os fluxos de CO₂ nas culturas de trigo e milho, tendo encontrado os valores de -2,0 mg.m⁻².s⁻¹ (-45 μmol.m⁻².s⁻¹) e -1,5 mg.m⁻².s⁻¹ (-34 μmol.m⁻².s⁻¹), respectivamente. As taxas de respiração para a cultura de trigo e milho foram respectivamente de 0,15 e 0,2 mg.m⁻².s⁻¹ (3,4 - 4,5 μmol.m⁻².s⁻¹).

2.4. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA (EUA)

Uma das formas de se expressar a eficiência do uso de água de uma cultura consiste em estabelecer a relação entre os fluxos simultâneos de CO₂ e de calor latente. Trata-se de um importante índice relacionado com a produtividade das culturas, sendo muito utilizado em manejo de irrigação (WANG et al., 2001; NORWOOD e DUMLER, 2002).

Estudos sobre a EUA já foram realizados para várias culturas, como o milho e o trigo (BALDOCCHI, 1994), a cana-de-açúcar (INMAN-BAMMER e McGLINCHEY, 2003), a soja e o milho (Yu et al., 2003), sorgo (MASTRORILLI et al., 1995), abóbora (ROUPHAEL e COLLA, 2005). Na presente revisão bibliográfica não foi encontrado nenhum trabalho, sobre a EUA para a cultura de caupi.

BALDOCCHI (1994) comparou a EUA para as culturas do milho e do trigo, tendo obtido resultados similares para as duas culturas, com valores de -15 mg(CO₂).g(H₂O)⁻¹ nas primeiras horas do dia, com decréscimo no decorrer do dia, devido ao aumento do déficit de pressão de vapor. Segundo BALDOCCHI (1994), a EUA do trigo foi inversamente proporcional ao déficit de pressão de vapor, enquanto do milho essa relação foi relativamente independente.

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1. LOCALIZAÇÃO

O sítio experimental está localizado à (01° 00` 38.6`` S; 46° 50` 58.1`` W), na fazenda Amaniteua, na cidade de Tracuateua – PA.

3.2. CLASSIFICAÇÃO CLIMÁTICA

Na região de Bragança no Estado do Pará, há estações bem definidas de chuva, onde do período de junho a dezembro é caracterizado como seco, e o período chuvoso inicia no mês de dezembro até o mês de junho. Segundo o método de classificação climática de THORNTHWAITE e MATHER (1955) para a cidade de Tracuateua, o clima é classificado como sendo do tipo **CwC₁ “d”**, subúmido seco, com excesso de d’água pequeno ou nula.

3.3. ÁREA PLANTADA E MANEJO

O projeto foi implantado em uma área de 70 ha de forma mecanizada, onde as sementes foram distribuídas em sulco de plantio com o espaçamento de 60 cm entre linhas e 20 cm nas linhas de plantio. Foi feita a adubação de nitrogênio, fósforo e potássio (NPK) na proporção de 40-20-20. Foi realizado um monitoramento da variação de matéria seca, a cada período de dez dias. Foram coletadas amostras de plantas em um metro quadrado de superfície do solo, que posteriormente foram levadas para estufa do laboratório do campus

da Universidade Federal do Pará (UFPA), em Bragança. Também foi realizado um monitoramento da umidade do solo à 15 cm de profundidade pelo método gravimétrico, a cada período de dez dias. A última coleta de amostra de solo também foi utilizada para análise granulométrica e de fertilidade do solo.

3.4 MEDIÇÕES METEOROLÓGICAS E MICROMETEOROLÓGICAS

3.4.1. MÉTODO DO BALANÇO DE ENERGIA

As medições das variáveis meteorológicas foram feitas em uma estação meteorológica automática, instalada no topo de uma torre micrometeorológica de 5 m de altura (Figura 1). Esses dados foram coletados no período de agosto e setembro de 2002 durante o ciclo fenológico da cultura.

O método do balanço de energia usado para quantificar os fluxos entre a cultura do caupi e a atmosfera, foi baseado na Equação 1.

$$R_n = H + LE + G \quad (1)$$

em que

R_n = Saldo de radiação [$W.m^{-2}$];

H = Fluxo de calor sensível [$W.m^{-2}$];

LE = Fluxo de calor latente [$W.m^{-2}$];

G = Fluxo de calor no solo [$W.m^{-2}$];

A partição da energia disponível em função dos fluxos de calor sensível e calor latente foi expressa pela razão de Bowen (β), conforme a equação 2:

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (2)$$



Figura 1. Torre micrometeorológica no centro da cultura de caupi.

3.4.2. MÉTODO DA COVARIÂNCIA DOS VÓRTICES TURBULENTOS

Os fluxos de CO₂ foram medidos usando-se a técnica de covariância dos vórtices turbulentos. Este método consiste no princípio de determinação direta dos fluxos, onde calcula as covariâncias entre os desvios da velocidade vertical do vento e os desvios da temperatura (fluxo de calor sensível) e de vapor d'água (fluxo de calor latente). Na Equação 3, "F_c" representa o fluxo turbulento vertical de "c" (nesse caso, "c" pode ser CO₂, H₂O), e "w" é a componente vertical da velocidade do vento. O termo w' indica os desvios de curto prazo com relação ao valor médio de um determinado período. A barra superior sobre w'c' indica o valor médio desse produto ao longo de um determinado período de tempo.

$$F_c = \overline{w'c'} \quad (3)$$

Foi utilizado o sistema EDISOL (Figura 2), desenvolvido na *University of Edinburgh* por John Moncrieff. O sistema, descrito por MONCRIEFF et al., (1997), utiliza-se de instrumentação comercialmente disponível para medição das concentrações de CO₂ e de vapor d'água (Tabela 1).



Figura 2. Sistema EDISOL, desenvolvido por MONCRIEFF et al. (1997).

Tabela 1. Instrumentos utilizados no sistema *EDISOL*

Instrumento	Marca
Anemômetro sônico três eixos	Gill (Solent A1012R3)
Analizador de gás	LI-COR 6262

O sistema *EDISOL* foi controlado pelo software EDIRE desenvolvido especificamente para este sistema, o qual calcula os fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente em tempo real. Os fluxos foram determinados a partir das covariâncias calculadas em um período médio de 30 minutos. Essas informações foram complementadas com medições do saldo de radiação, radiação solar global, precipitação, temperatura do ar, umidade do ar e direção e velocidade do vento, obtida em uma estação meteorológica automática (Tabela 2).

Tabela 2. Instrumentos utilizados na estação meteorológica automática.

Variável	Instrumento	Marca
Saldo de radiação	Saldo Radiômetro	REBS Q*6
Radiação Solar Global	Piranômetro	Kipp & Zonen CM21
Velocidade do vento	Anemômetro	Wind Sentry Modelo 03001
Direção do vento	Anemômetro	Wind Sentry Modelo 03001
Umidade Relativa e Temperatura do ar	Higrômetro	HMP 45C
Precipitação	Pluviógrafo	Modelo CS 700-L

3.4.4. MÉTODO DE ESTIMATIVA DA EUA

A EUA foi determinada pela razão entre os fluxos simultâneos de CO₂ (F_c) e de calor latente (LE) (Equação 4).

$$EUA = \frac{F_c}{LE} \quad (4)$$

3.5. PROCESSAMENTO DOS DADOS

Os dados de fluxos de massa e de energia, e das variáveis meteorológicas utilizadas durante o ciclo da cultura de caupi, coletados no período de agosto e setembro de 2002, foram processados e organizados em médias horárias, médias diárias para o ciclo da cultura de caupi. O processamento inicial dos dados brutos de fluxos de massa e de energia foi realizado utilizando-se o software EDIRE. Esses dados foram organizados em planilhas no Excel para processamento e análises estatísticas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1. CARACTERÍSTICAS CLIMÁTICAS DA LOCALIDADE

As normais climatológicas (1961-1990) de precipitação, temperatura máxima, temperatura mínima e temperatura média do ar para os meses de agosto e setembro da cidade de Tracuateua - PA, estão apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Dados referentes às normais climatológicas para a cidade de Tracuateua - PA

Mês	Precipitação	Temp. Máxima	Temp. Mínima	Temp. Média
	(mm)	(°C)	(°C)	(°C)
AGOSTO	101,2	31,2	20,5	25,6
SETEMBRO	28,6	31,6	20,4	25,8

De acordo com a Tabela 3, os meses de agosto e setembro de 2002 foram atipicamente secos, com registro total de precipitação, nesse período, inferior a 2 mm. A temperatura média do ar variou de 24,1 °C a 25,6 °C, com média para o período de $24,8 \pm 0,3$ °C. A velocidade média diária do vento para o período diurno variou entre 1,6 m/s a 7,0 m.s⁻¹, com uma média de $4,9 \pm 0,92$ m.s⁻¹, enquanto no período noturno a variação da velocidade média do vento

foi de 1,4 m/s a 3,4 m.s⁻¹, com um valor médio de 2,0±0,61 m.s⁻¹ para o período experimental.

Os valores horários da radiação solar global e do saldo de radiação, referentes ao período de agosto e setembro de 2002, estão ilustrados na Figura 3. Os valores médios horários, em torno do meio-dia, da radiação solar global e do saldo de radiação foram de 875 W.m⁻² e 548 W.m⁻², respectivamente. A variação média do saldo de radiação entre as 19:00 e 7:00 horas foi de -45 W.m⁻² a -23 W.m⁻², com um valor médio de -36 W.m⁻².

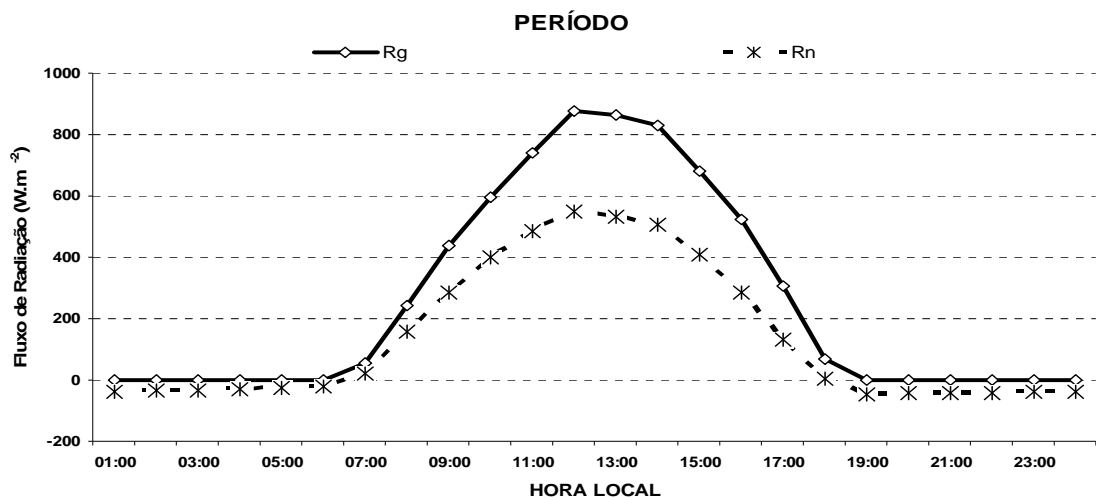


Figura 3. Variação horária da radiação solar global e do saldo de radiação, correspondente aos meses de agosto e setembro de 2002.

A variação dos totais diários da radiação solar global e do saldo de radiação durante o período experimental está apresentada na Figura 4. Os totais diários de radiação solar global variaram de 17,03±1,0 MJ.m⁻²d⁻¹ (21 de agosto) a 26,39±1,4 MJ.m⁻²d⁻¹ (25 de setembro), tendo-se obtido um valor médio diário para o período de 22,31±2,4 MJ.m⁻²d⁻¹. O saldo de radiação, variou entre 9,47 MJ.m⁻²d⁻¹ no dia 21 de agosto a 14,5 MJ.m⁻²d⁻¹ no dia 25 de setembro, com um valor médio de 11,92±1,13 MJ.m⁻²d⁻¹. SAN JOSÉ et al., (2003) fez medições do saldo de radiação em duas variedades de caupi na Venezuela (9°45'N; 63°21'W), tendo encontrado um valor médio de 11,3 MJ.m⁻²d⁻¹.

A variação da fração entre o saldo de radiação e a radiação solar global está ilustrado na Figura 5. Essa relação apresentou uma tendência de

decréscimo a partir da fase de vegetativa, em agosto, até a maturação fisiológica, em setembro. A variação média dessa relação para todo o período experimental foi de $0,62 \pm 0,02$. Resultados obtidos por LIMA et al., (2004) em pesquisa realizada com a cultura do caupi, no brejo paraibano ($6^{\circ}58' S$; $35^{\circ}41' W$), apresentaram valores médios para essa relação de 0,71.

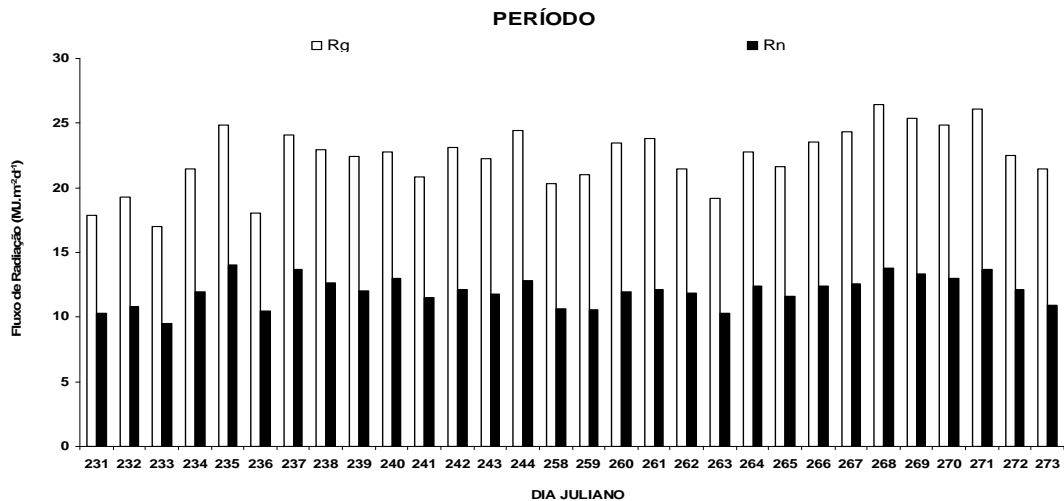


Figura 4. Variação dos totais diários da radiação solar global e do saldo de radiação para o período experimental, de agosto e setembro de 2002.

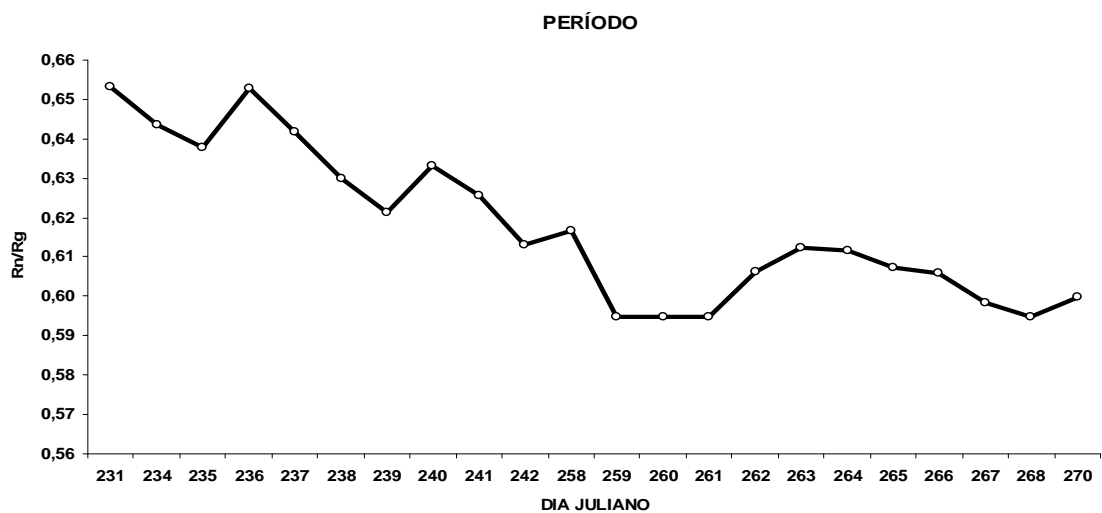


Figura 5. Variação da partição da radiação solar global em saldo de radiação para todo o período.

4.2. VARIAÇÃO DAS COMPONENTES DO BALANÇO DE ENERGIA

4.2.1 – PERÍODO VEGETATIVO

A análise dos componentes do balanço de energia foi realizada com base em dados representativos de medições feitas no período vegetativo do caupi, na fase de maturação e senescência. Na Figura 6 pode ser observado a variação dos fluxos de calor latente, de calor sensível e do saldo de radiação para dois dias típicos do período vegetativo do caupi. O predomínio do fluxo de calor sensível sobre o fluxo de calor latente na partição do saldo de radiação é bem evidenciado nesses dias, devido às condições de baixa umidade do solo em consequência da não ocorrência de chuva.

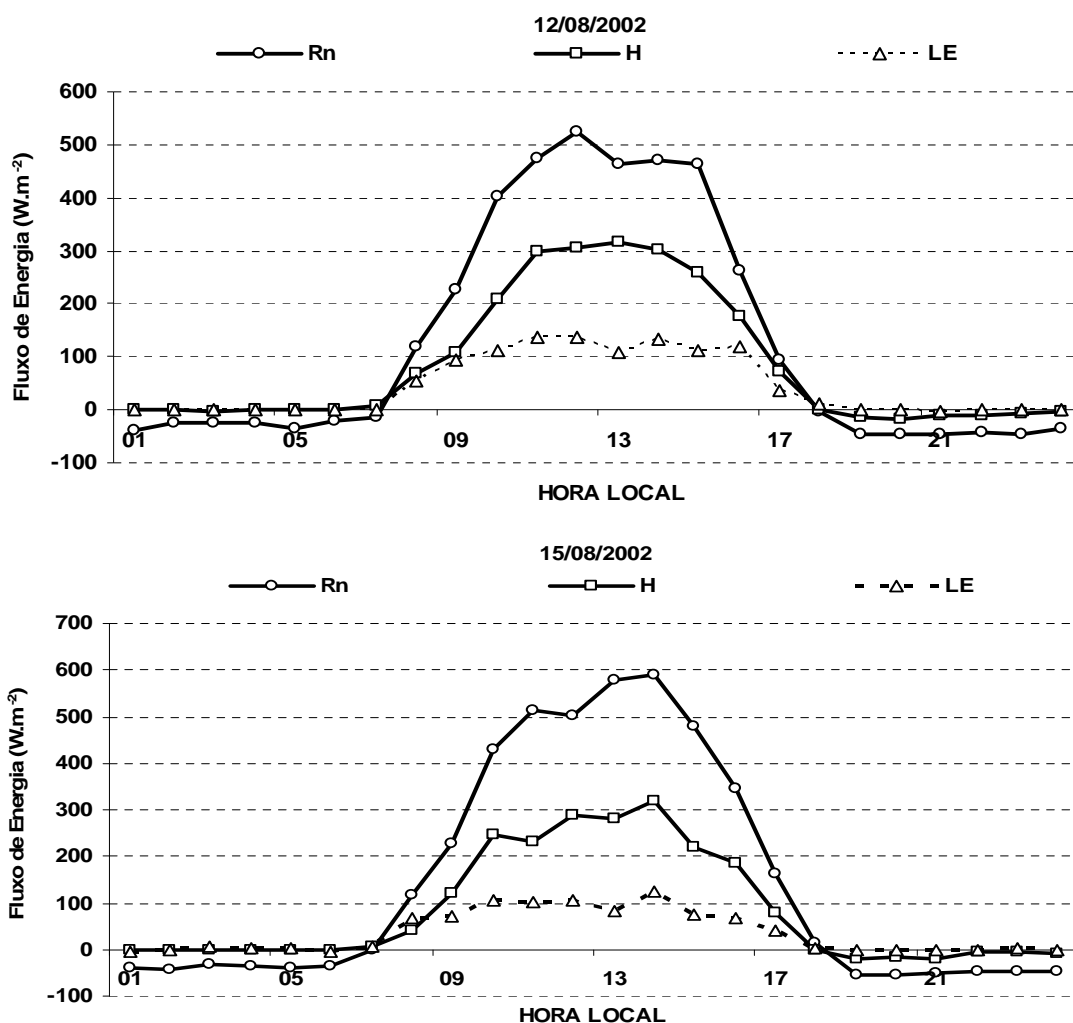


Figura 6. Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de crescimento vegetativo.

A variação da partição do saldo de radiação em fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível pode ser visualizada na Figura 7. A partição do saldo de radiação, em relação ao fluxo de calor sensível, variou de 0,42 a 0,63, com uma média de $0,56 \pm 0,07$, e em relação ao fluxo de calor latente variou de 0,21 a 0,45, com uma média de $0,28 \pm 0,07$. Esses resultados contrastaram com os obtidos por SAN JOSE et al., (2003), na Venezuela, sob condições irrigadas.

A variação da relação entre os fluxos de calor sensível e de calor latente expressa pela razão de Bowen nessa fase de crescimento vegetativo variou de 0,97 às 8:00 horas até 2,81 às 13:00 horas, com um valor médio de 2,12. SAN JOSE et al., (2003) obteve um valor médio para a razão de Bowen de 0,39 no mesmo período vegetativo.

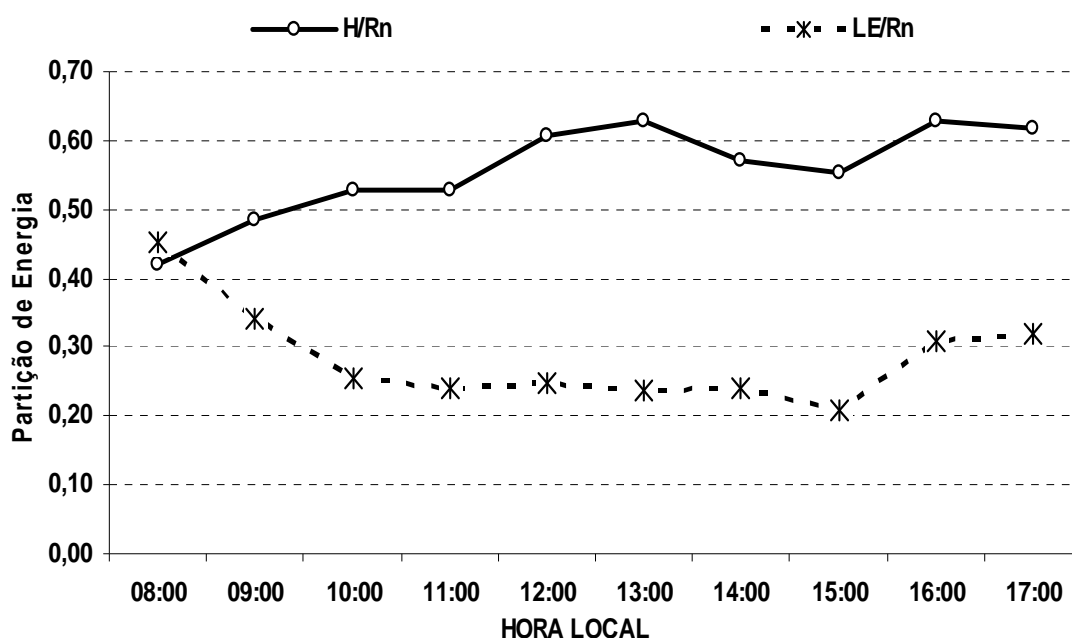


Figura 7. Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de crescimento vegetativo da cultura de caupi.

4.2.2 – PERÍODO DE MATURAÇÃO

Durante a fase de maturação, ilustrada pelos dados dos dias 17 e 20 de setembro na Figura 8, observou-se um pequeno aumento na fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor sensível e conseqüentemente diminuição na fração utilizada como fluxo de calor latente. A partição do saldo de radiação, sob a forma de fluxo calor sensível (Figura 9), variou de 0,41 a

0,73 com uma média de 0,60, enquanto a fração do saldo de radiação utilizada como fluxo de calor latente (Figura 9) variou de 0,14 a 0,26 com um valor médio de 0,20. Esses resultados causaram um ligeiro aumento na razão de Bowen, que variou de 1,5 a 3,3, com um valor médio de 2,4.

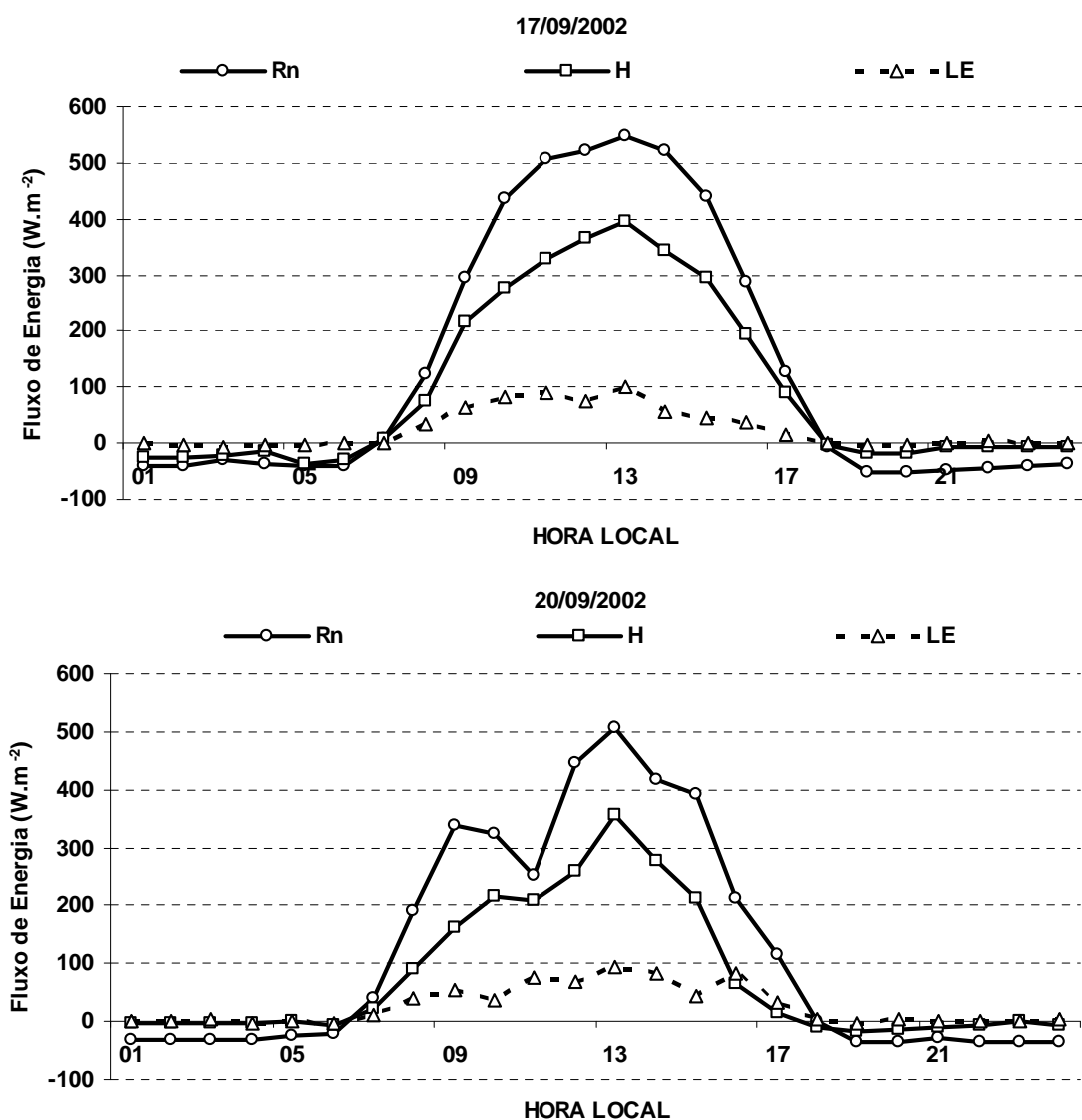


Figura 8. Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de maturação durante o período de estudo.

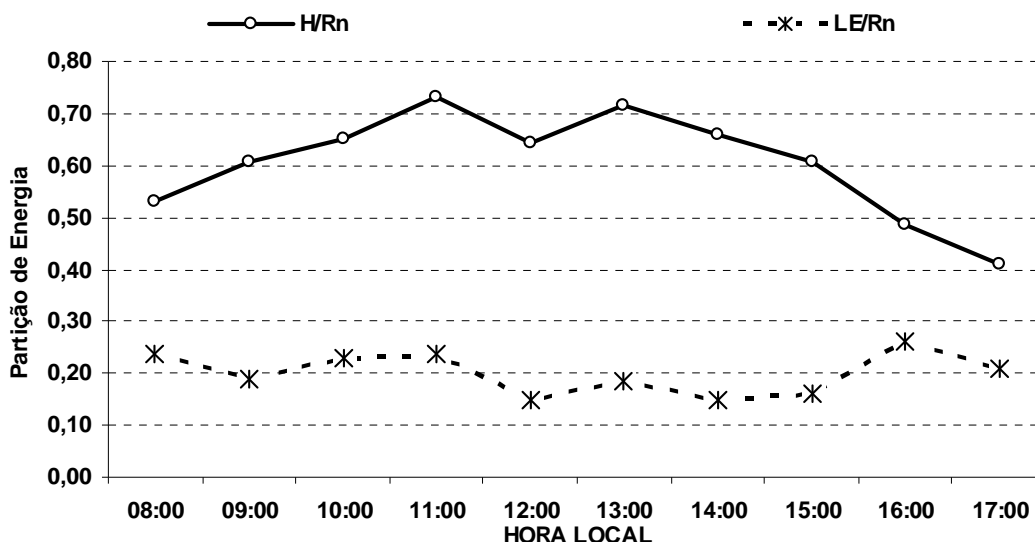


Figura 9. Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de maturação da cultura de caupi.

4.2.3 – PERÍODO DE SENESCÊNCIA

A Figura 10 ilustra a variação do saldo de radiação, do fluxo de calor sensível e do fluxo de calor latente no fim do ciclo da cultura, em condições de senescência. Observou-se que a fração do saldo de radiação utilizada sob a forma de calor sensível aumentou com a conseqüente redução da fração sob a forma de calor latente. O valor médio da fração do saldo de radiação utilizada sob a forma de calor sensível atingiu 0,69, com uma variação de 0,52 a 0,83, enquanto a fração convertida em calor latente variou de 0,11 a 0,24, com um valor médio de 0,15 conforme pode ser observado na Figura 11. A razão de Bowen atingiu seu maior valor durante o ciclo da cultura, com uma variação de 3,5 a 6,8 correspondendo um valor médio de 5,12.

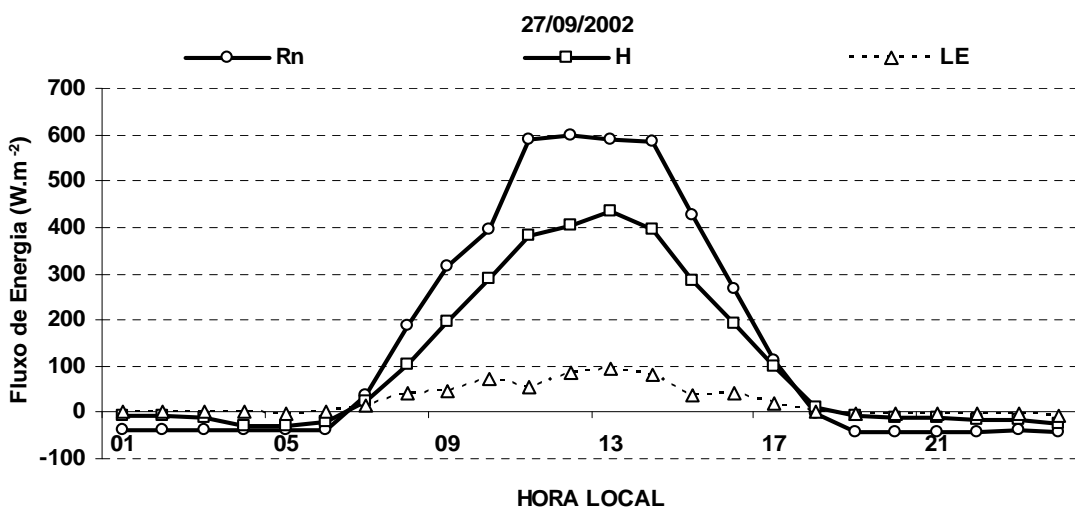
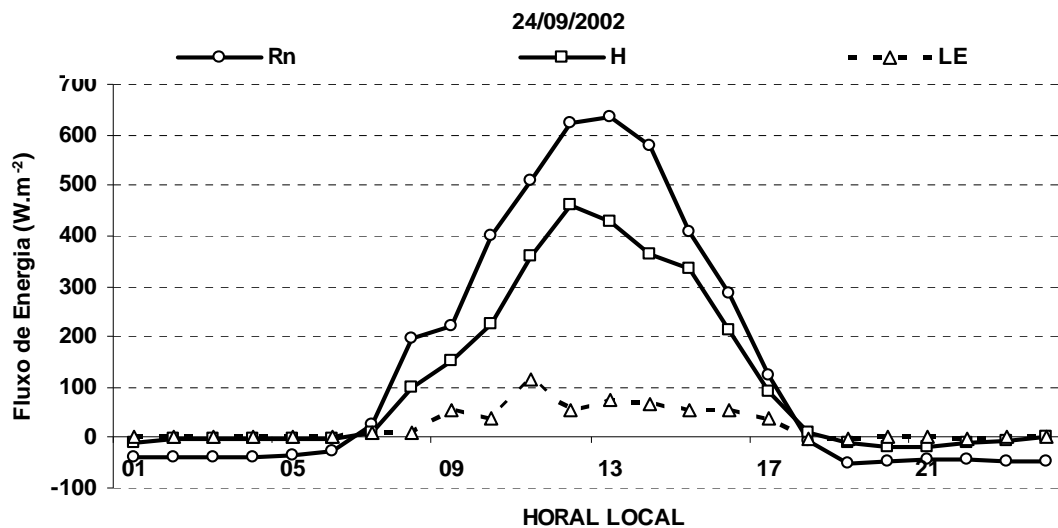


Figura 10. Variação horária dos componentes do balanço de energia na cultura de caupi na fase de senescência.

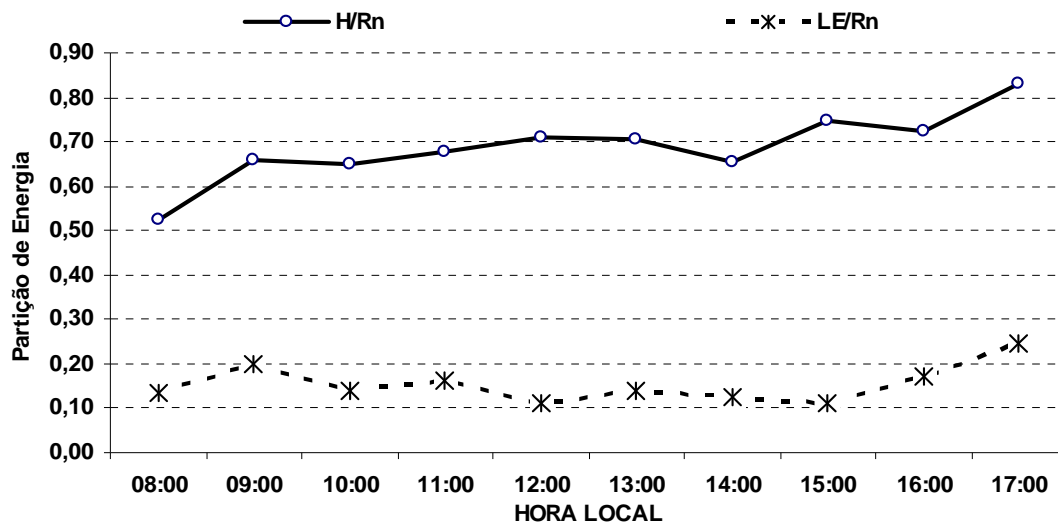


Figura 11. Variação horária da partição do saldo de radiação em fluxos de calor latente e calor sensível para a fase de senescência da cultura de caupi.

4.3. FLUXOS DE CO₂ DURANTE O PERÍODO DIURNO

As variações diurnas dos fluxos de CO₂ da cultura de caupi estão ilustradas em três dias típicos do período vegetativo, maturação e senescência na Figura 12. A magnitude dos fluxos apresentou uma tendência de queda do período vegetativo até o fim do ciclo da cultura. Os valores médios dos fluxos de CO₂ entre 8:00 horas e 17:00 horas variaram de $-4,30 \pm 1,15 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ no período vegetativo a $-1,38 \pm 0,50 \mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$ na senescência. De um modo geral os fluxos de CO₂ apresentaram uma tendência de aumento a partir do nascer do sol decrescendo até o final da tarde.

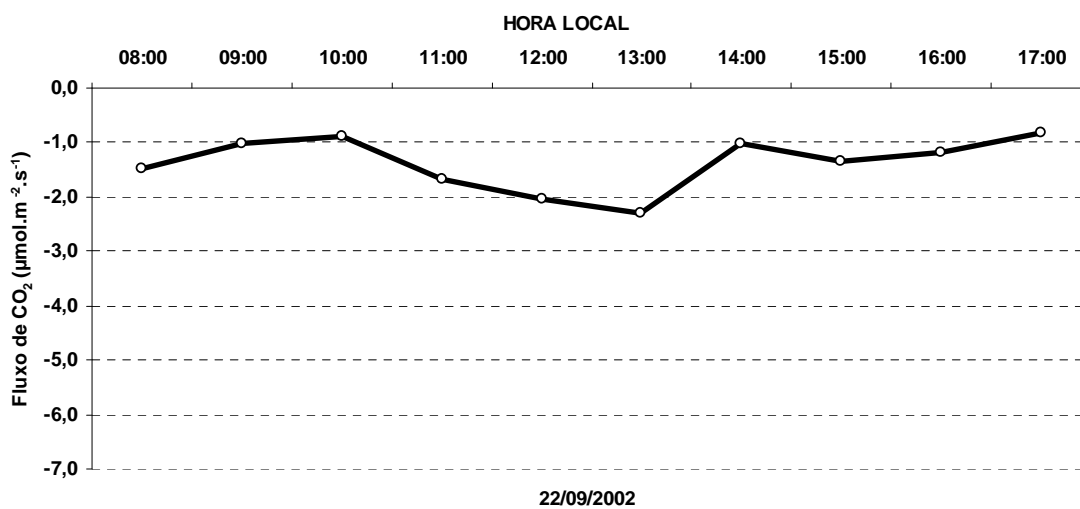
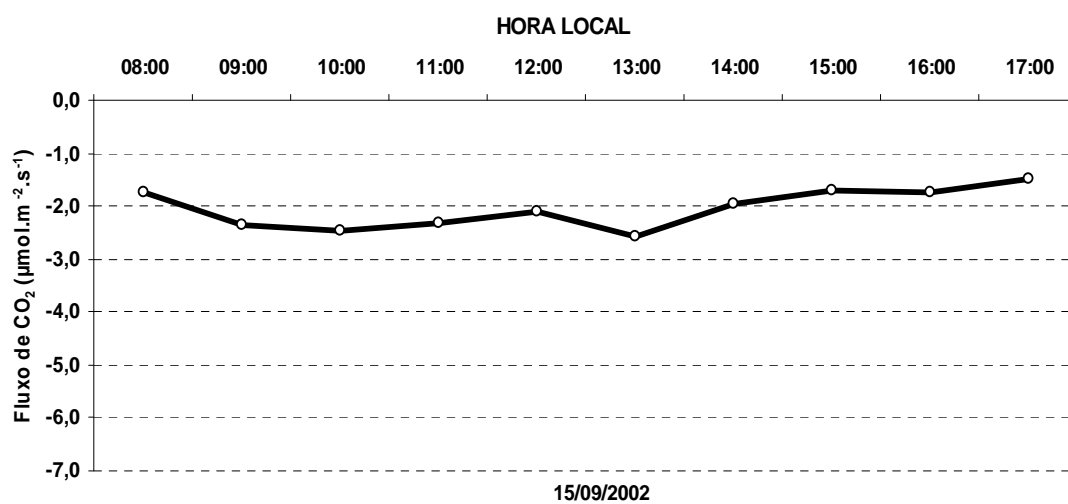
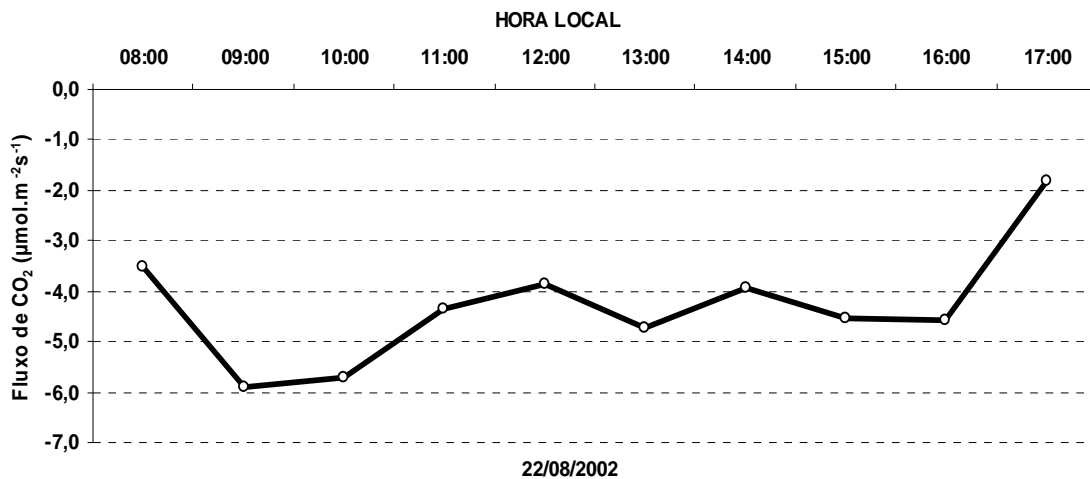


Figura 12. Variação da média horária do fluxo de CO₂ para os dias 22/08/2002, 15/09/2002 e 22/09/2002.

Os valores horários dos fluxos de CO₂ da cultura de caupi durante todo o período experimental estão ilustrados na Figura 13. A variação horária dos fluxos de CO₂ variou de -3,83 μmol.m⁻².s⁻¹ a -1,49 μmol.m⁻².s⁻¹, com uma média para o período de medições de -2,34±0,71 μmol.m⁻².s⁻¹. A radiação solar global e o saldo de radiação foram as variáveis mais fortemente correlacionada com os fluxos de CO₂. Na Figura 14 encontra-se as variações médias horárias durante as medições dos fluxos de CO₂ durante o ciclo da cultura. A variação dos valores médios apresentou um comportamento bem caracterizado, com decréscimo dos valores a partir da fase vegetativa até a fase de senescência. Os valores médios variaram entre -6,65 μmol.m⁻².s⁻¹ no dia 10 de agosto (dia 222) e -1,02 μmol.m⁻².s⁻¹ no dia 20 de setembro (dia 263). A variação média foi de -2,83±1,60 μmol.m⁻².s⁻¹ para todo o período de estudo.

Os valores dos fluxos de CO₂ obtidos sob condições de grande déficit hídrico são bem inferiores aos obtidos por outros pesquisadores para outras culturas. De acordo com STEDUTO e HSIAO (1998), os fluxos de CO₂ na cultura de milho, sem restrição hídrica variaram de -30 μmol.m⁻².s⁻¹ a -35 μmol.m⁻².s⁻¹. Segundo BALDOCCHI (1994), os fluxos de CO₂ para as culturas de trigo e milho foram respectivamente de -45 μmol.m⁻².s⁻¹ e -34 μmol.m⁻².s⁻¹.

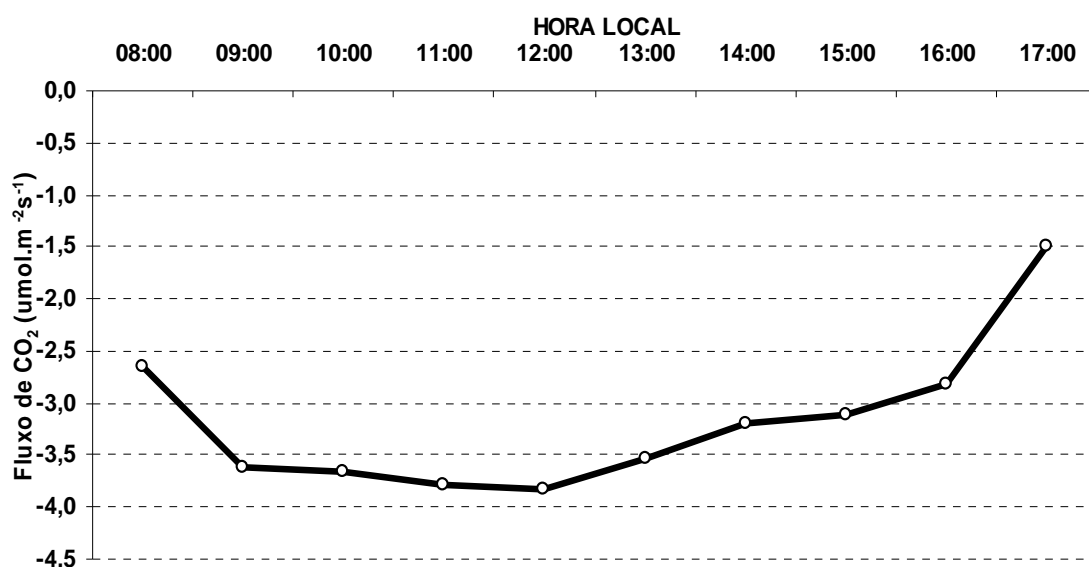


Figura 13. Variação horária dos fluxos de CO₂ durante o fotoperíodo.

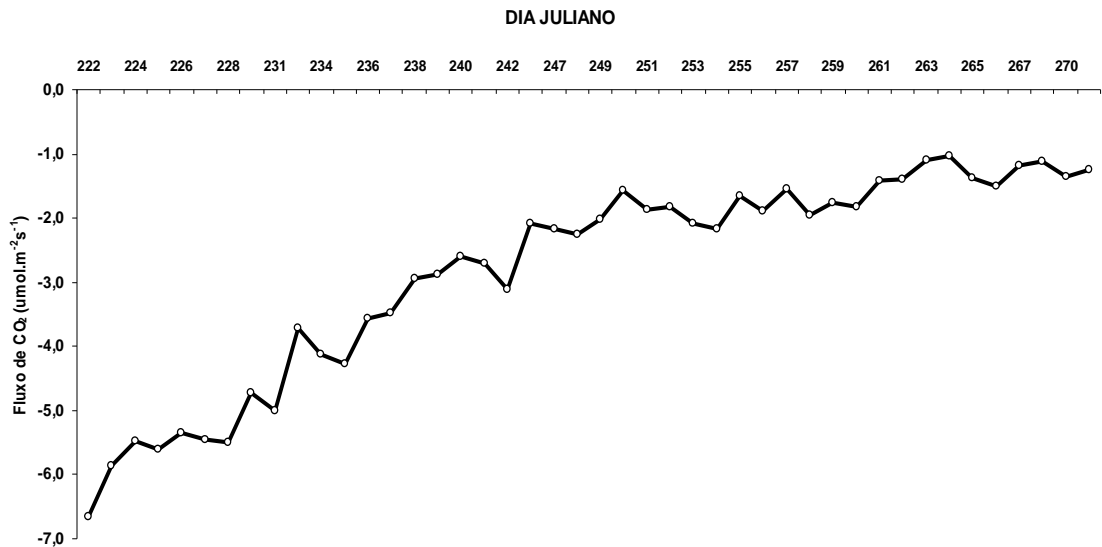


Figura 14. Variação dos valores médios horários dos fluxos de CO₂ para todo o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.

4.4. FLUXOS DE CO₂ DURANTE O PERÍODO NOTURNO

Os fluxos de CO₂ medidos durante a noite indicaram as taxas de respiração da cultura de caupi. A Figura 15 ilustra a variação horária dos fluxos de CO₂ e da temperatura média do ar durante o período noturno. Diminuindo a partir das 19:00 horas a taxa de respiração é acompanhado pelo decréscimo da temperatura do ar, evidenciando a relação de dependência entre a taxa de respiração da cultura e a temperatura do ar. Durante o período noturno a taxa de respiração foi maior às 19:00 horas, horário em que a temperatura do ar foi mais elevada (25,0°C), decrescendo até atingir o mínimo às 5:00 horas, quando a temperatura do ar foi menor (22,6°C). A taxa de respiração média horária noturna para a cultura do caupi durante todo o período experimental foi de $1,9 \pm 0,24 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$.

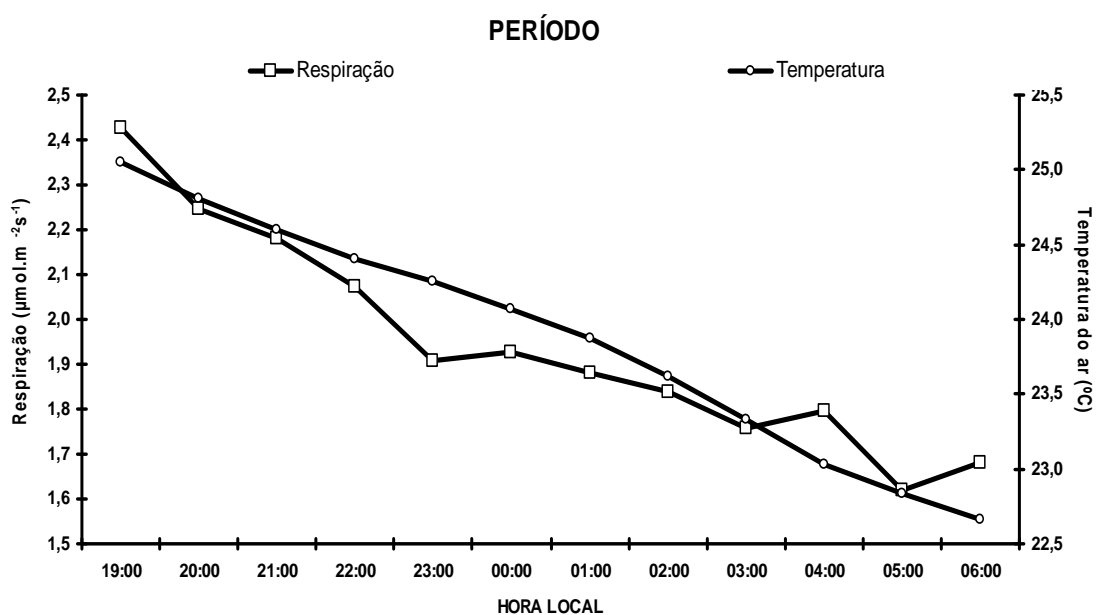


Figura 15. Variação horária das taxas de respiração e da temperatura média do ar para o período experimental.

Pode ser visualizada na Figura 16 a variação típica das taxas de respiração em três dias típicos durante a fase vegetativa, maturação e senescência. As taxas de respiração aumentaram em média do período vegetativo ao período de maturação decrescendo até a senescência. No dia 22/08, que correspondeu ao período vegetativo as taxas de respiração noturna variaram de 0,94 a 2,84 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com um valor médio de $1,86 \pm 0,70 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. O dia 15/09 representa as condições típicas do período de maturação fisiológica. Nesse período, as taxas de respiração noturna variaram de 1,21 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ a 2,39 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com uma média de $1,92 \pm 0,31 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. No dia 22/09 que representa condições de início da fase de senescência, as taxas de respiração variaram de 0,82 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e 2,86 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com uma média de $1,78 \pm 0,56 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Os fluxos noturnos de CO_2 durante todo o período experimental uma forte correlação com a temperatura média do ar.

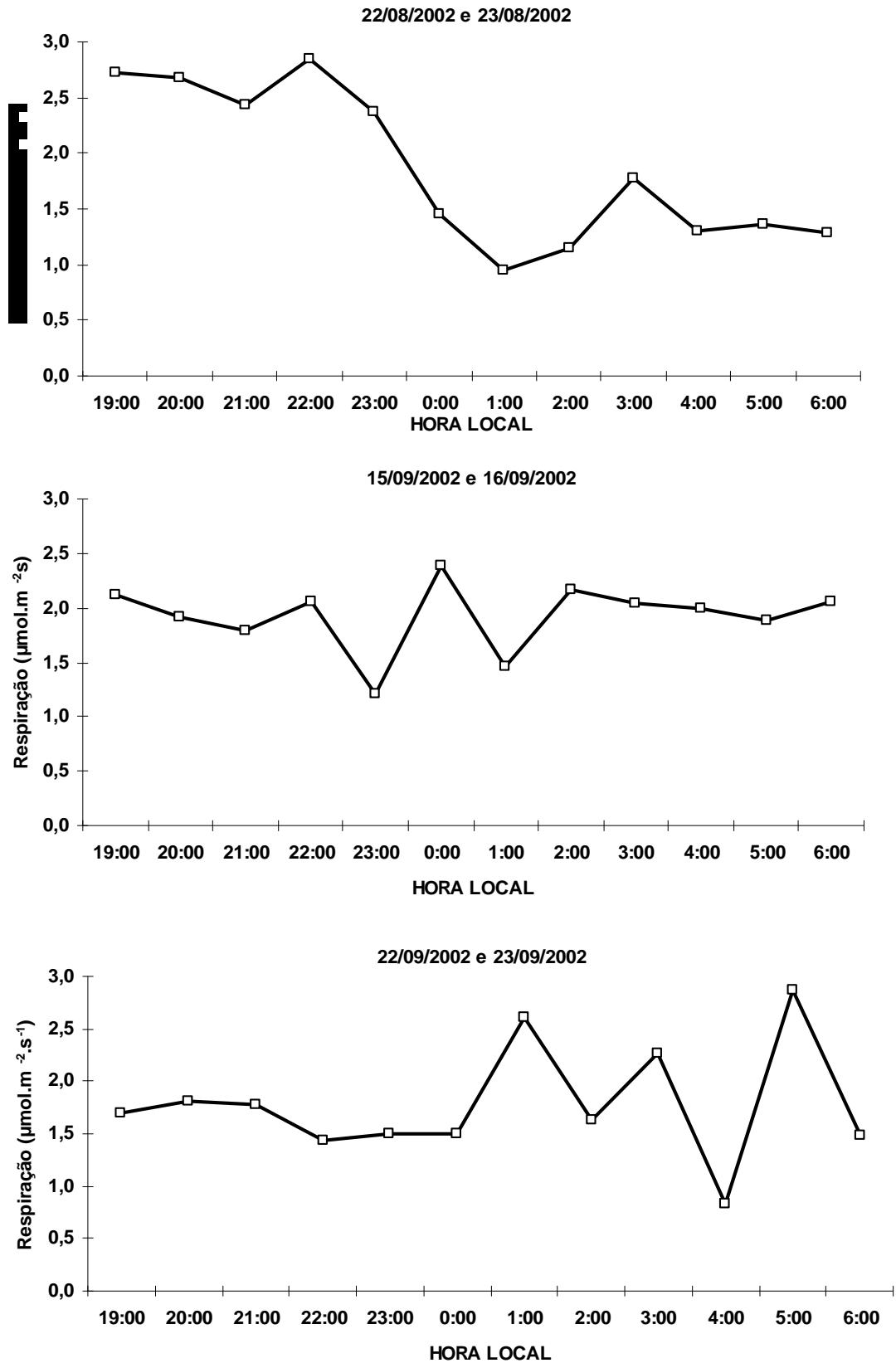


Figura 16. Variação horária das taxas de respiração para o período noturno, durante os dias 22 e 23/08/2002, 15 e 16/09/2002 e 22 e 23/09/2002.

Observa-se na Figura 17 apresenta as variações médias horárias durante os períodos noturnos dos dias em que foram feitas as medições dos fluxos de CO₂ e da temperatura do ar durante o ciclo da cultura. Conforme esperado, as variações das taxas de respiração acompanharam aproximadamente as variações da temperatura média do ar evidenciando a relação de dependência entre essas variáveis. Considerando-se as médias horárias dos períodos noturnos em que foram feitos as medições de fluxos de CO₂, as taxas de respiração da cultura de caupi variaram de 1,2 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e 3,1 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, com uma média de $2,0 \pm 0,5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$. Medições das taxas de respiração para a cultura de trigo e milho obtidas por BALDOCCHI (1994) apresentaram valores médios de 3,4 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ e 4,5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$, respectivamente.

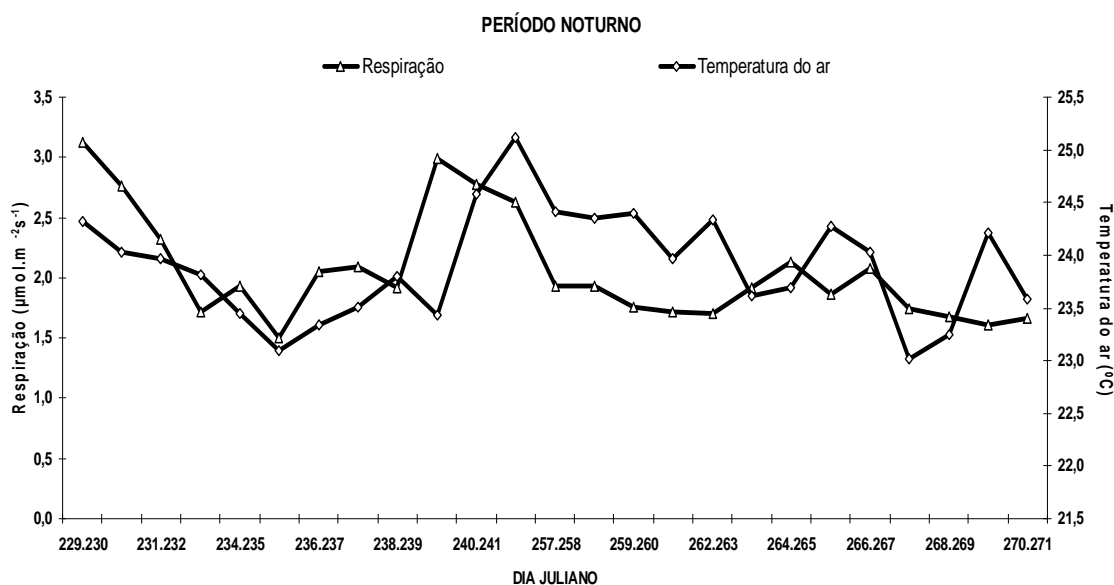


Figura 17. Variação da média horária das taxas de respiração e da temperatura média do ar para o período noturno, durante os três estádios da cultura.

4.5. RELAÇÕES DE DEPENDÊNCIA ENTRE OS FLUXOS DE CO₂, CALOR LATENTE, CALOR SENSÍVEL E AS VARIÁVEIS METEOROLÓGICAS

Dentre todas as variáveis meteorológicas analisadas neste estudo, a radiação solar global e o saldo de radiação foram as mais fortemente correlacionadas com os fluxos de CO₂, calor latente e calor sensível. Os resultados apresentados durante todo o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002 para o período diurno, estão ilustrados nas Figuras 21, 22 e 23. Os coeficientes de determinação entre os fluxos de CO₂, de calor sensível e de calor latente a radiação solar global e o saldo de radiação apresentaram valores satisfatórios, mostrando uma boa relação de dependência dos fluxos de massa e energia com essas variáveis meteorológicas.

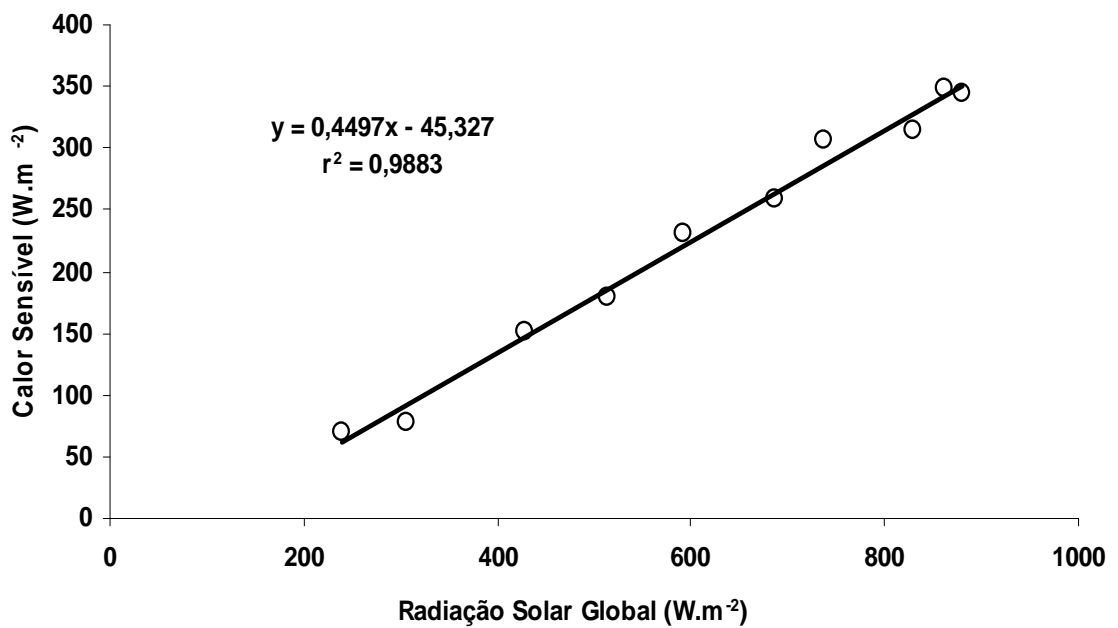
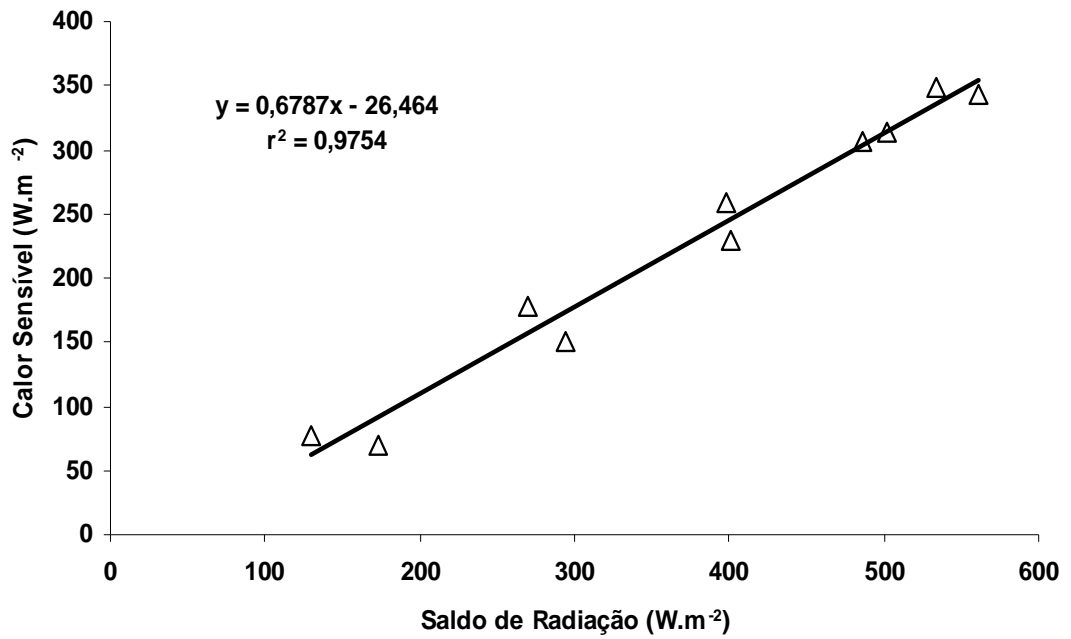


Figura 18. Relação de dependência entre a radiação solar global e os fluxos de calor sensível e calor latente durante o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.

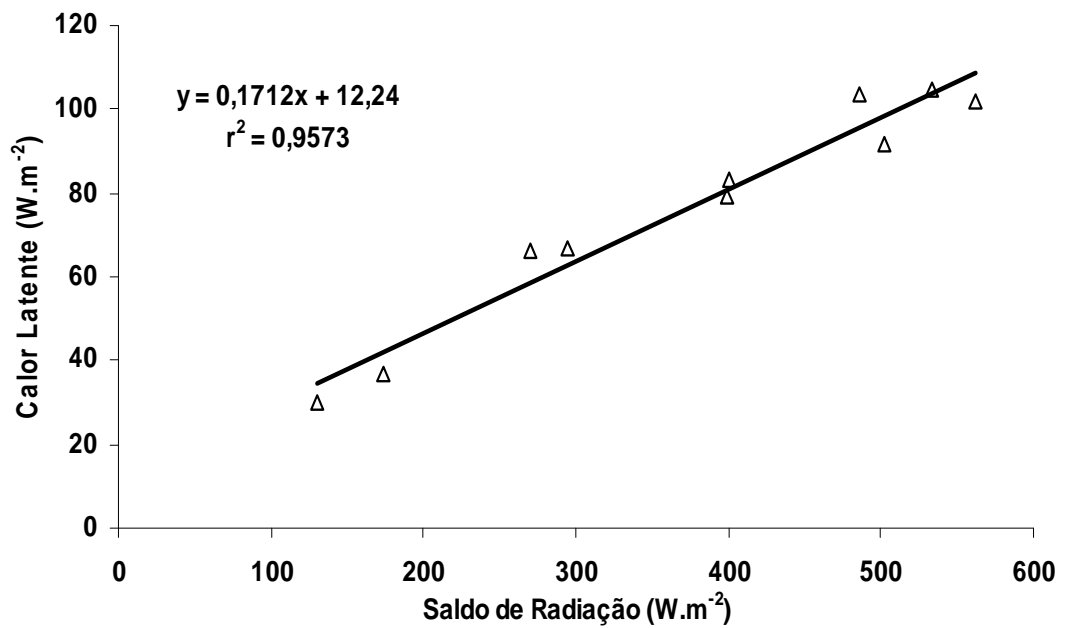
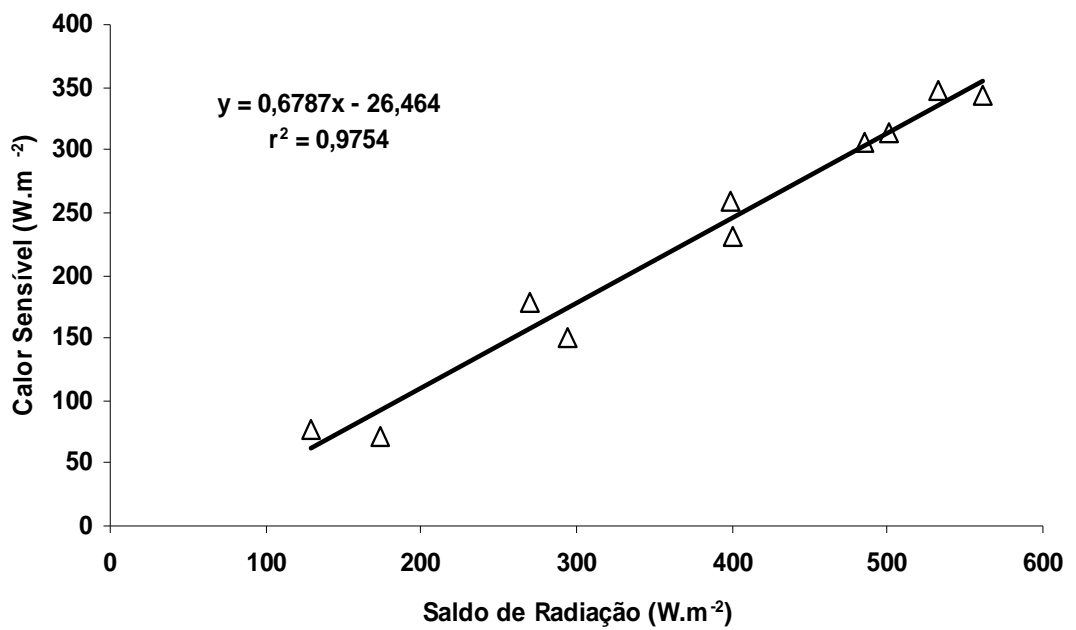


Figura 19. Relação de dependência entre o saldo de radiação e os fluxos de calor sensível e calor latente durante o período estudado.

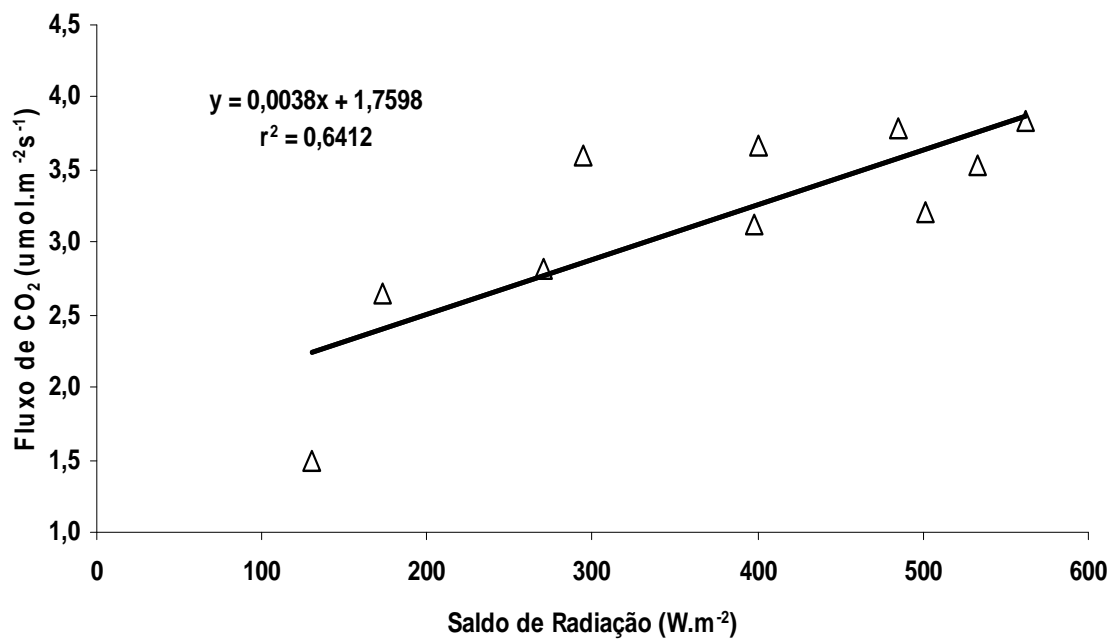
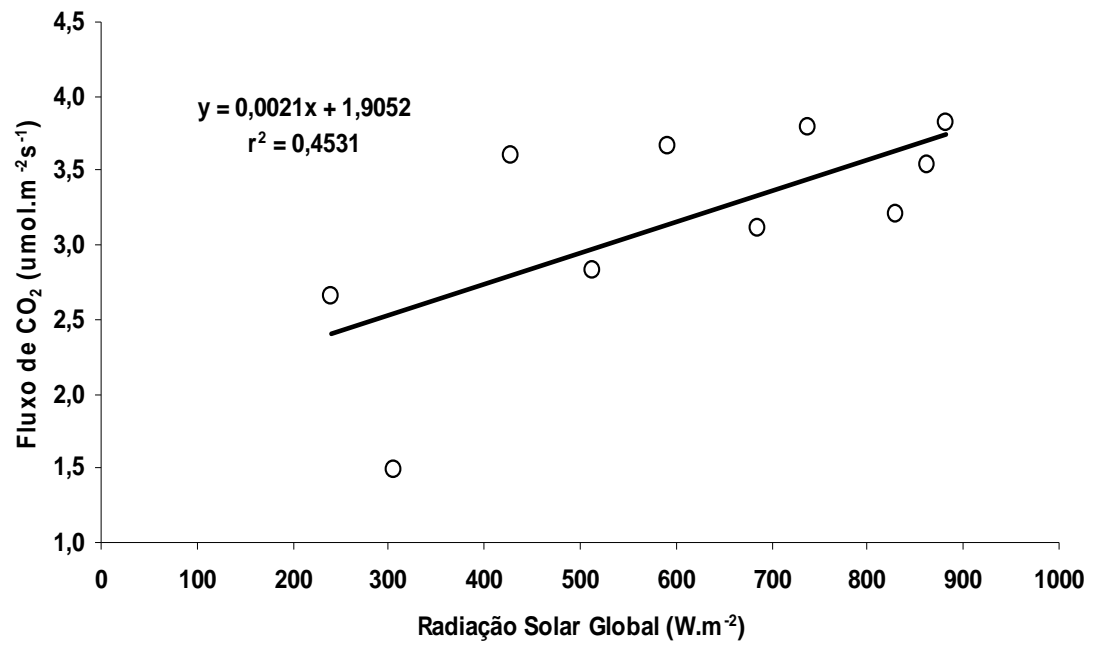


Figura 20. Relação de dependência entre o saldo de radiação e a radiação solar global com o fluxo de CO₂ durante o período estudado.

4.6. ESTIMATIVA DO SALDO DE RADIAÇÃO A PARTIR DA RADIAÇÃO SOLAR GLOBAL

Utilizou-se o método da regressão linear para obtenção da relação entre o saldo de radiação e a radiação solar global medidas sobre a cultura de caupi durante o seu ciclo, conforme está ilustrada na Figura 18. Os parâmetros da regressão linear estão apresentados na Tabela 4, juntamente com os resultados obtidos para outras culturas. Os valores dos coeficientes expressam a influência da cultura e da localidade. Foi obtido um coeficiente de determinação de 0,94, considerado bastante satisfatório nesse tipo de relação.

Tabela 4. Parâmetros da equação para estimativa do saldo de radiação pela radiação global ($R_n = a + bR_g$; em $W.m^{-2}$)

Cultura	a	b	Referência
Videira	-14,03	0,64	Azevedo et al., (1997)
Soja	-13,42	0,67	Fontana, (1987)
Alfafa	-23,06	0,78	Cunha et al., (1993)

Segundo FONTANA (1987), as funções estabelecidas são um bom determinante do saldo de radiação diurna em função da radiação solar global com ótima aproximação. Tais equações são válidas apenas para a região de estudo. Observa-se na Figura 19 a regressão linear entre os fluxos de calor latente e calor sensível com o saldo de radiação durante o ciclo da cultura. O coeficiente de determinação foi de 0,88, valor bastante satisfatório, representando um bom fechamento do balanço de energia para todo o período experimental.

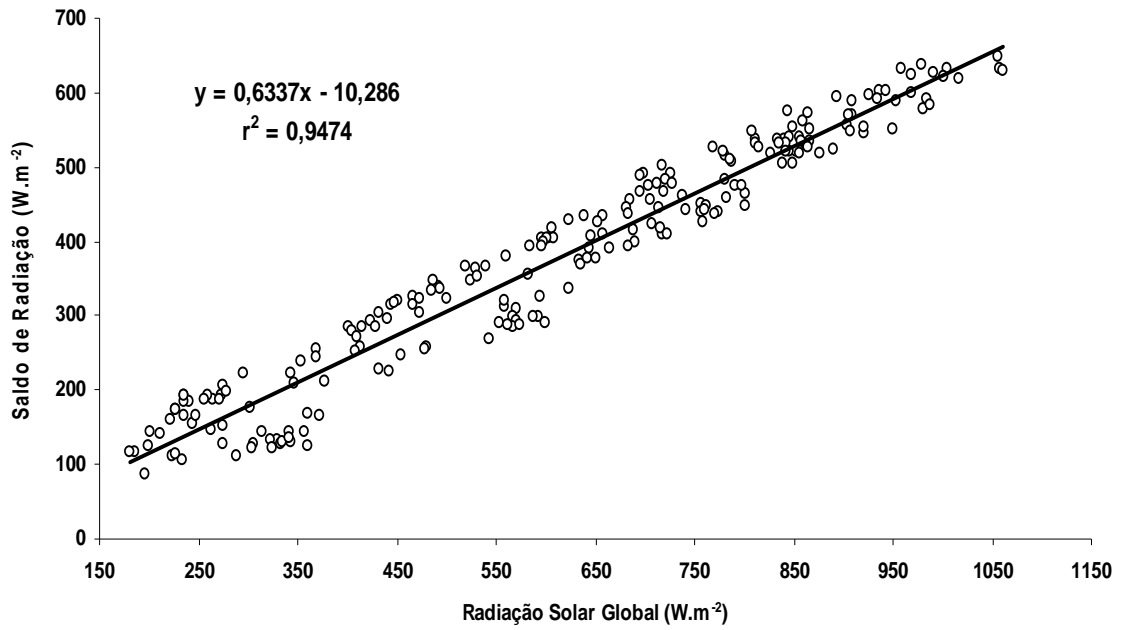


Figura 18. Relação entre o saldo de radiação e a radiação solar global para todo o período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.

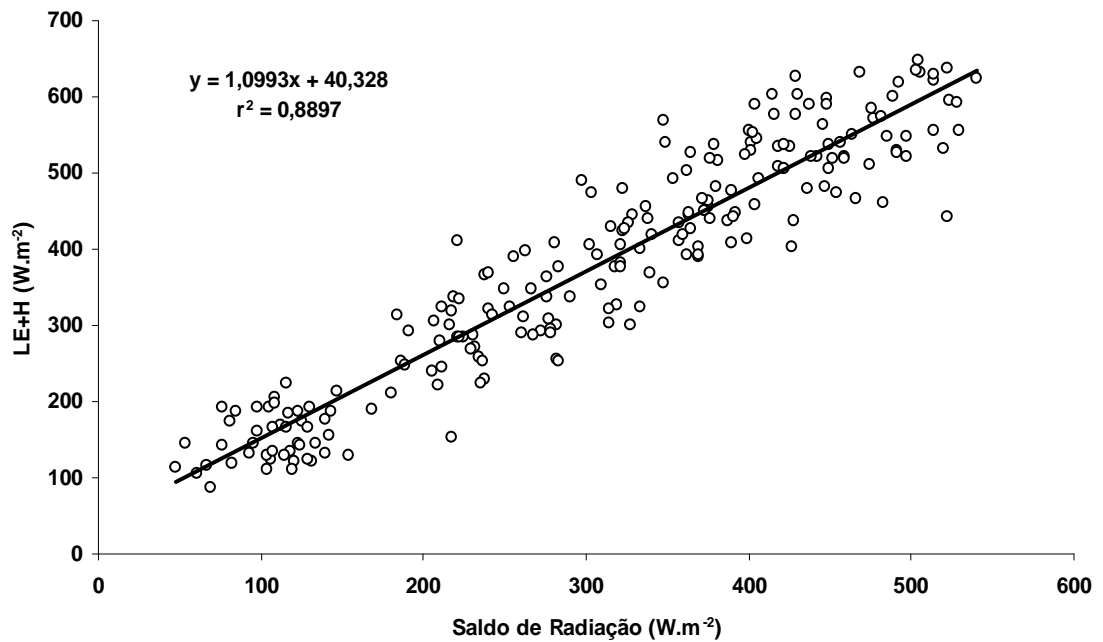


Figura 19. Relação entre o saldo de radiação e os fluxos de calor latente e sensível durante todo o período experimental.

4.6. EFICIÊNCIA DO USO DA ÁGUA (EUA)

Pode ser visualizada na Figura 20 a variação da média horária da EUA durante o período de agosto e setembro de 2002. A EUA expressa a eficiência com que a vegetação utiliza água ao mesmo tempo em que realiza a fotossíntese. Constatou-se uma tendência de decréscimo da EUA a partir da fase vegetativa, em agosto, até o fim do ciclo da cultura, em setembro. Os valores médios de EUA variaram entre $2,59 \mu\text{molCO}_2.\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$ e $0,53 \mu\text{molCO}_2.\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$, com uma média de $1,35 \pm 0,51 \mu\text{molCO}_2.\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$. Valores maiores foram encontrados para o mês de agosto, durante o período vegetativo em que, apesar da deficiência hídrica dominante durante todo o período experimental as taxas de assimilação de CO_2 foram maiores.

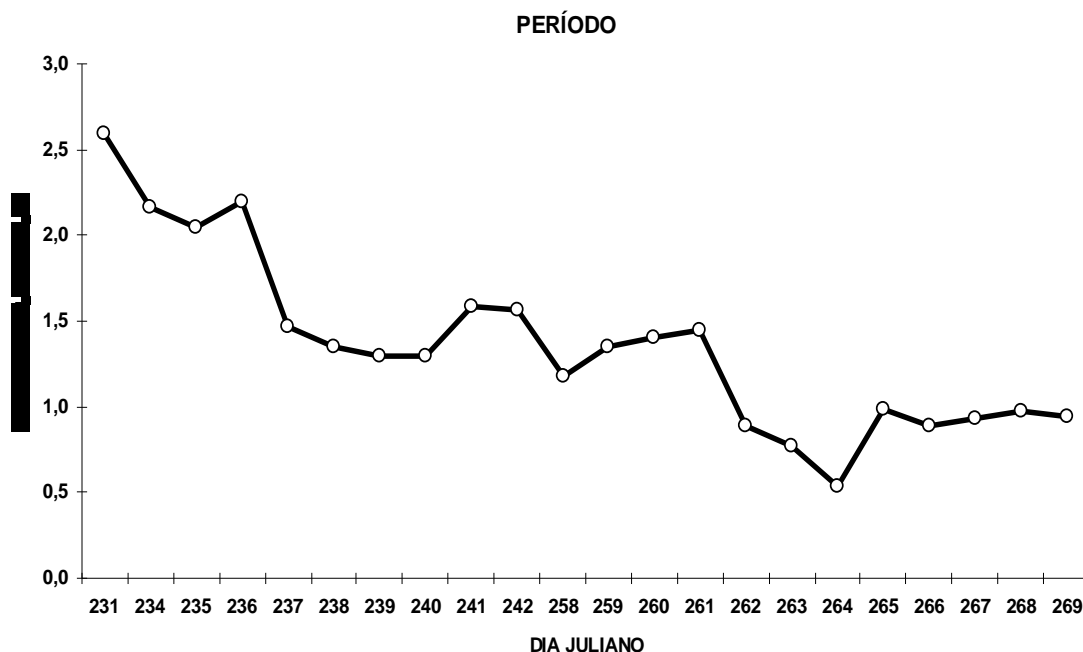


Figura 20. Variação média horária da eficiência do uso da água ao longo de todo período experimental, referente aos meses de agosto e setembro de 2002.

5. CONCLUSÕES

1. Os fluxos de CO₂ e de calor latente, durante o período diurno, foram muitos baixos em consequência das condições de deficiência hídrica que predominaram durante todo o período experimental.
2. O fluxo de calor sensível foi o termo dominante no balanço de energia com uma contribuição superior a duas vezes à contribuição do fluxo de calor latente.
3. Os valores médios horários dos fluxos de CO₂, de calor sensível e de calor latente durante o período diurno no ciclo da cultura de caupi foram respectivamente -2,34 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$, 206 W.m^{-2} e 76 W.m^{-2} .
4. Os fluxos noturnos de CO₂ que representam as taxas de respiração do ecossistema foram de 2,0 $\mu\text{mol.m}^{-2}\text{s}^{-1}$. A dependência entre as taxas de respiração da cultura e a temperatura do ar foi bem estabelecida.
5. A radiação solar global e o saldo de radiação foram as variáveis mais fortemente correlacionadas com os componentes do balanço de energia e com os fluxos diurnos de CO₂, enquanto os fluxos noturnos de CO₂ foram bem correlacionados com a temperatura do ar.

6. A razão de Bowen, que expressa a partição do balanço de energia em fluxo de calor sensível e de calor latente, apresentou um valor médio de 2,82 durante o ciclo da cultura.

7. A eficiência do uso da água da cultura de caupi sob condições de deficiência hídrica, apresentou um valor médio durante o ciclo de 1,35 $\mu\text{molCO}_2.\text{mmolH}_2\text{O}^{-1}$.

6. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

ANIYIA, A.O. & HERZOG H. Water-use efficiency, leaf area and leaf gas exchange of cowpeas under mid-season drought. *European Journal Agronomy*. v.20, p 327-339, 2004.

ARAÚJO, J.P.P. & WATT,E.E. O Caupi no Brasil. Brasília, IITA/EMBRAPA, 1988. 722p.

ASSENG, S. & HSIAO, C., Canopy CO₂ assimilation, energy balance, and water use efficiency of an alfalfa crop before and after cutting. *Field Crops Research*. v. 67, p. 191-206, 2000.

AZEVEDO, P.V., TEIXEIRAS, A.H.C., SILVA, B.B., SOARES, J.M., SARAIVA, F.A.M. Avaliação da reflectância e do saldo de radiação sobre um cultivo de videira européia. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 5, n. 1, p. 1-7, 1997.

BALDOCCHI, D. D. A comparative study of mass and energy exchange rates over a closed C₃ (wheat) and a open C₄ (corn) crop: II. CO₂ exchange and water use efficiency. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.67, p.291-321, 1994.

- BALDOCCHI, D.D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, v. 9, p.479-492, 2003.
- CANADELL, J., MOONEY, H., BALDOCCI, D.D. Carbon metabolism of the terrestrial biosphere. *Ecosystems*. v.3, p. 115-130, 2000.
- CARVALHO, M.H.C., LAFFRAY, D., LOUGUET, P. Comparison of the physiological responses of *Phaseolus vulgaris* and *Vigna unguiculata* cultivars when submitted to drought conditions. *Environmental and Experimental Botany*. v.40, p.197-207, 1998.
- CHAVES, M.M. Effects of water deficits on carbon assimilation. *Journal of Experimental Botany*. v.42, p.1-16, 1991.
- CUNHA, G.C., de PAULA, R.F., BERGAMASCHI, H., SAIBRO, J.C., BERLATO, M.A. Balanço de radiação em alfafa. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 1, n. 1, p. 1-10, 1993.
- CUNHA, G.R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M.A.A. Balanço de energia em cultura de milho. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v.4, n.1, p.1-14, 1996.
- CUNHA, A.R.; ESCOBEDO, J.F., KLOSOWSKI, E.S. Estimativa do fluxo de calor latente pelo balanço de energia em cultivo protegido de pimentão. *Pesquisa Agropecuária Brasileira de Agrometeorologia*, Brasília, v.37, n.6, p.735-743, 2002.
- DAVIS, D.W., OELKE, E.A., OPLINGER, E.S., DOLL, J.D., HANSON, C.V., PUTNAM, D.H. COWPEA. *Field crops manual*. University of Wisconsin – Madison, College of Agricultural and life Sciences and Cooperative Extension Service, p.10, 1991.

- EHLERS, J.D. & HALL, A.E. Cowpea (*Vigna unguiculata* L. Walp.). *Field Crops Research*, v.53, p.187-204, 1997.
- ELOWAD, H.O.A., HALL, A.E. Influences of early and late nitrogen fertilization on yield and nitrogen fixation of cowpea under well-watered and dry field conditions. *Field Crops Research*, v.15, p.229-244, 1987
- FAO, Food and Agriculture Organization, 2006. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) statistics. <http://apps.fao.org/page/collections?subset=agriculture>. Acesso em 02/05/2006.
- FEARNSIDE, P.M. Amazonian deforestation and global warming: carbon stocks in vegetation replacing Brazil Amazon forest. *Forest Ecology and Management*, v.80, p.21-34, 1996.
- FONTANA, D.C. Balanço de radiação e balanço de energia em soja (*Glycine Max (L.) Merrill*) irrigada e não irrigada. 1987. 121p. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS.
- FONTANA, D.C. & BERLATO, M.A., BERGAMASCHI, H. 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.; ESCOBEDO, J.F. Albedo no ciclo completo da cultura de alface. In: Congresso Brasileiro de Biometeorologia, 1., 1995, Jaboticabal. Anais. Jaboticabal: Legis Summa, 1995. p.204-214.
- GALVANI, E., ESCOBEDO, J.F., AGUIAR E SILVA, M.A., KLOSOWSKI, S. Balanço de energia em cultura de pepino (*Cucumis sativus* L.) em meio protegido por polietileno. XI Congresso Brasileiro de Agrometeorologia, 2000.

- HEILMAN, J.L., McINNIS, K.J., SAVAGE, M.J., GESH, R.W., LASCANO, R.J.
Soil and canopy energy balance in a west Texas vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.71, p. 99-114, 1994.
- INNMAN-BAMBER, N.G., McGLINCHEY, M.G. Crop coefficients and water-use estimates for sugarcane based on long-term bowen ratio energy balance measurements. *Field Crops Research*. v. 83, p. 125-138, 2003.
- LIMA, J.R.S., ANTONINO, A.C.D., SOARES, W.A., BORGES, E., SILVA, I.F., LIRA, C.A.B.O., SOUZA, C. Balanço de energia em solo cultivado com feijão caupi no brejo Paraibano. XIII Congresso Brasileiro de Meteorologia, 2004.
- LOPES, P.M.O.; SILVA, B.B. da; AZEVEDO, P.V.; SILVA, V.P. R. da; TEIXEIRA, A.H.C.; SOARES, J. M.; SOBRINHO, J.E. Balanço de Energia num pomar de mangueira irrigado. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, Santa Maria, v. 9, n.1, p. 1-8, 2001.
- MASTRORILLI, M., KATERJI, N., RANA, G., STEDUTO, P. Sweet sorghum in Mediterranean climate: radiation use and biomass water use efficiencies. *Industrial Crops and Products*. v.3, p. 253-260, 1995.
- 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.
- NORWOOD, C.A., DUMLER, T.J. Transition to dry land agriculture. Limited irrigation versus dryland corn. *Agronomy Journal*. v. 94, p. 310–320, 2002.
- PASTENES, C.; HORTON, P. Resistance of photosynthesis to high temperature in two bean varieties. *Photosynthesis Research*, v.62, p.197-203, 1999.

- PEREIRA, P.A.A., Del PELOSO, da COSTA, M.J., FERREIRA, J.G.C., YOKOYAMA, L.P. Beans product: Perspectives for production, consumption and genetic improvement. Anals of the Cowpea Research National Meeting. Embrapa Rice and Beans. Teresina, PI, Brazil, 2001.
- RIBEIRO, R.V., SANTOS, M.G., SOUZA., G.M., MACHADO, E.C., OLIVEIRA, R.F., ANGELOCCI, L.R., PIMENTEL, C. Environmental effects on photosynthetic capacity of bean genotypes. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.39, n.7, p. 615-623, 2004.
- ROUPHAEL, Y., COLLA, G., Radiation and water use efficiencies of greenhouse zucchini squash in relation to different climate parameters. European Journal Agronomy, 2005.
- RUNNING, S.W., BALDOCCHI, D.D., TURNER, D. A global terrestrial monitoring network, scaling tower fluxes with ecosystem modeling and EOS satellite data. Remote Sensing Environmental, v.70, p.108-127, 1999.
- SAGRI, Secretaria Executiva de Agricultura. Pará, 2006. Disponível em: <http://www.sagri.pa.gov.br/>. Acesso em 15/03/2006.
- SAITO, M., MIYATA, A., NAGAI, H., YAMADA, T. Seasonal variation of carbon dioxide exchange in rice paddy field in Japan. Agricultural and Forest Meteorology, 2005.
- SAN JOSÉ, J.J., BRACHO, R., MONTES, R., NIKONOVA N. 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.
- SASSAKI, R.M., MACHADO E.C. Trocas gasosas e condutância estomática em duas espécies de trigo em diferentes teores de água no solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.34, n.9, p.1871-1579, 1999.

- STEDUTO, P. & HSIAO, T.C. Maize canopies under two soil water regimes. I. Diurnal patterns of energy balance, carbon dioxide flux, and canopy conductance. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.89, p. 169-184, 1998.
- 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.
- TODD, R.W., EVETT, S.R., HOWELL, T.A. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.103, p. 335–348, 2000.
- TRAMBOUZE, W.; BERTUZZI, P.; VOLTZ, M. Comparison of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. *Agricultural and Forest Meteorology*, Amsterdam, v.91, p. 193-208, 1998.
- VIEIRA, R.F., ROGÉRIO, F.V., CIBLAS, V., ROSANA, F.V. Leguminosas graníferas. – Viçosa: UFV, 2001.
- WANG, H., ZHANG, L., DAWES, W.R., LIU, C. Improving water use efficiency of irrigated crops in the North China plain-measurements and modeling. *Agricultural Water Manage*. v. 48, p. 151–167. 2001.
- YOSHIMOTO, M., OUE, H., KOBAYASHI, K. Energy balance and water use efficiency of rice canopies under free-air CO₂ enrichment. *Agricultural and Forest Meteorology*. v.133, p.226-246, 2005.
- YU, G.R., WANG, Q.F., ZHUANG, J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *J. Plant Physiol*. v. 161, p. 303-318, 2004.