

**BALANÇO DE ENERGIA SOLAR NA
CULTURA DA MAMONEIRA
IRRIGADA**

GERVÁSIO FERNANDO ALVES RIOS

2009

GERVÁSIO FERNANDO ALVES RIOS

**BALANÇO DE ENERGIA SOLAR NA CULTURA DA MAMONEIRA
IRRIGADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

Orientador

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

LAVRAS
MINAS GERAIS – BRASIL
2009

**Ficha Catalográfica Preparada pela Divisão de Processos Técnicos da
Biblioteca Central da UFLA**

Rios, Gervásio Fernando Alves.

Balanço de energia solar na cultura da mamoneira irrigada /
Gervásio Fernando Alves Rios. – Lavras : UFLA, 2009.

111 p. : il.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Lavras, 2009.

Orientador: Luiz Gonsaga de Carvalho.

Bibliografia.

1. Razão de Bowen. 2. Coeficiente de cultura. 3. Irrigação
localizada. I. Universidade Federal de Lavras. II. Título.

CDD – 633.851

GERVÁSIO FERNANDO ALVES RIOS

**BALANÇO DE ENERGIA SOLAR NA CULTURA DA MAMONEIRA
IRRIGADA**

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, para a obtenção do título de “Mestre”.

APROVADA em 27 de fevereiro de 2009

Prof. Dr. Antônio Carlos Fraga

UFLA

Pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende

UFLA

Prof. Dr. Gilberto C. Sedyama

UFV

Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho

UFLA

(Orientador)

LAVRAS

MINAS GERAIS – BRASIL

Ao nosso Deus, pelo bom encontro e a luz do Sol.

Aos meus avôs, em especial, a minha avó Dona Evilásia Alves da Mata (*in memoriam*), pelo legado e grande esforço em possibilitar aos seus, numa época tão dura da história recente desse país, o mínimo de estudo e conhecimento.

Aos meus tios, com todo carinho; a minha tia, madrinha e incentivadora, Maria das Graças Alves Oliveira, pela dedicação e ajuda.

Aos meus irmãos, amigos e familiares, pela paciência e experiências vividas.

Aos professores que, com muita luta e dedicação, orientam para o caminho da luz.

OFEREÇO

Aos meus pais, Gervásio e Sena, pelo amor;

E a todos aqueles que, antes de mim, vieram, pensaram e foram além,

DEDICO

A prática faz o mestre, o desafio a grandeza espiritual, a escolha de nossos amigos nossa fortaleza e a identificação de nossos inimigos, a sabedoria de viver.

“Gervásio F. A. Rios”

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo bom encontro e aos meus pais.

À Universidade Federal de Lavras (UFLA) e ao Departamento de Engenharia, pela abertura de novos caminhos em prol do conhecimento humano e da sociedade brasileira.

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

À Fundação de Amparo a Pesquisa e Extensão do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), pelo financiamento do projeto.

Ao Financiador de Estudos e Projetos (FINEP), pelo auxílio e disponibilidade de recursos.

Ao meu orientador, professor Luiz Gonsaga de Carvalho, pela paciência, tolerância, compreensão e dedicação e aos coorientadores Antônio Augusto Aguiar Dantas, Antônio Carlos Fraga, Elio Lemos da Silva, Geraldo Magela Pereira, pela atenção e ajuda. Aos professores Pedro Castro Neto e Luiz Antônio Lima e à pesquisadora Dra. Fátima Conceição Rezende, pela atenção e desprendimento em ajudar.

Ao Flávio de Carvalho Magina, Tecnologista Senior do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), pela configuração do sistema de aquisição de dados e ao bolsista/Fapemig, João Furtado de Medeiros, pelo acompanhamento do projeto em sua fase inicial.

A minha namorada, Fabiana Carmanini Ribeiro, pelo incentivo, paciência, ajuda e companheirismo.

Aos estagiários Bruno Montoani Silva e Welington Freire dos Santos e ao doutorando Welington Gomes da Silva, pela contribuição na condução do experimento. Assim como pela ajuda decisiva, ao estagiário Pedro Augusto Negrini da Costa e aos amigos Adriano Mendonça, Bruno Soares e Evandro Schoninger, aos estagiários do grupo G-óleo, Danilo, Júlio, Rogner e Osmária. Aos funcionários que, com muito desprendimento, deram, de alguma forma, sua contribuição, em especial Adão, Daniela, José Luiz, Mário José, “o manguinho”, Neném e aos demais agentes promotores deste processo...

Meu muito obrigado!

BIOGRAFIA

GERVÁSIO FERNANDO ALVES RIOS, filho de Gervásio Flores Rios e Sena Alves Rios, nasceu em 25 de abril de 1978, em Brasília-DF, porém, seus pais residiam em Unai, MG, onde também residia a família de sua mãe.

Em sua infância, também morou em outras cidades, como Pedrálva, MG, Caldas, MG, Sagarana, MG, Arinos, MG, Itacarambi, MG e, em 1994, em Riachão das Neves, BA, onde completou o ensino primário, na Escola Municipal Dr. Cleriston Andrade.

De volta a Unai, concluiu o ensino fundamental em 1997 na “Escola Estadual Domingos Pinto Brochado. No final desse mesmo ano, mudou-se para em Florestal, MG, e, no ano seguinte, ingressou no curso Técnico em Agropecuária, concomitante ao ensino médio, na Escola Técnica Central de Desenvolvimento Agrário de Florestal (CEDAF), completando-o em janeiro de 2001.

No mesmo ano, transferiu-se para Viçosa, MG onde, em março de 2002, matriculou-se no curso de Agronomia da Universidade Federal de Viçosa (UFV). Em agosto de 2007 colou grau e concluiu o curso, ingressando, consecutivamente, no mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, área de concentração em Engenharia de Água e Solo, na Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, MG.

SUMÁRIO

RESUMO.....	i
ABSTRACT.....	ii
1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REFERENCIAL TEÓRICO.....	4
2.1 Cultura da mamona.....	4
2.1.1 Origem e distribuição geográfica.....	4
2.1.2 Descrição botânica, morfológica e fisiológica.....	5
2.1.3 Requerimentos ambientais.....	6
2.1.4 Principais produtores mundiais e nacionais.....	7
2.1.5 Uso e importância econômica.....	8
2.1.6 Irrigação da mamoneira.....	10
2.2 Evapotranspiração.....	12
2.2.1 Conceito da evapotranspiração.....	12
2.2.2 Fatores inerentes à evapotranspiração.....	14
2.2.3 Evapotranspiração de referência.....	16
2.2.4 Coeficiente de cultura.....	18
2.3 Radiação solar.....	23
2.3.1 Radiação solar incidente.....	24
2.3.2 Radiação solar refletida e albedo.....	26
2.3.3 Balanço de energia e razão de Bowen.....	27
3 MATERIAL E MÉTODOS.....	37
3.1 Caracterização geral.....	37
3.1.1 Localização.....	37
3.1.2 Clima e base de dados.....	38
3.1.3 Solo.....	39
3.1.4 Formação de mudas, plantio e tratamentos culturais.....	42

3.1.5 Sistema de irrigação e manejo	43
3.1.6 Instalação do sistema de balanço de energia.....	45
3.2 Balanço de energia e razão de Bowen	47
3.3 Radiação solar incidente, refletida e albedo	53
3.4 Evapotranspiração.....	53
3.4.1 Evapotranspiração de referência	54
3.4.2 Evapotranspiração da cultura.....	55
3.4.3 Coeficiente de cultura	56
3.5 Variáveis vegetativas e reprodutivas	59
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	61
4.1 Caracterização das condições meteorológicas e da cultura	61
4.2 Balanço de energia.....	69
4.2.1 Radiação solar incidente e albedo.....	70
4.2.2 Caracterização da razão de Bowen	75
4.2.3 Componentes do balanço de energia.....	78
4.3 Evapotranspiração da cultura.....	93
4.4 Coeficiente da cultura	95
5 CONCLUSÕES	99
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

RESUMO

RIOS, Gervásio Fernando Alves. **Balço de energia solar na cultura da mamoneira irrigada**. 2009. 111 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola, Engenharia de Água e Solo) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

Esse trabalho foi realizado com o objetivo de quantificar os componentes do balanço de energia pelo sistema da razão de Bowen, BERB, sobre a cultura da mamona irrigada por gotejamento em três fases de cultivo como forma de subsídio para a determinação da evapotranspiração (ETc) e do coeficiente da cultura (Kc) sob as condições climatológicas de Lavras, Minas Gerais. Para tal, foi implantado experimento no qual foram instalados sensores de temperatura e umidade relativa em dois níveis do dossel da cultura e sensores de radiação solar incidente (Rs), radiação solar refletida (Rr) e saldo de radiação (Rn) sobre o dossel da cultura e sensor de fluxo de calor no solo (G), no centro da área. Os dados medidos foram armazenados em sistema automático de aquisição de dados a cada 10 minutos e integralizados para o período diário. Os resultados permitiram concluir que, em média, o albedo foi de 0,14 (Rr/Rs); a relação Rs/Rn de 49,67; a partição LE/Rn consistiu em -71,99%, seguidos de -32,54% para H/Rn e -4,38% para G/Rn. O somatório dos componentes (LE, H e G) em relação ao Rn foi de 108,92%, com superestimação de 8,92%, possivelmente devido às pressuposições teóricas do método; correntes advectivas de LE e ou H; integralização dos dados no período noturno e a erros de mensuração dos sensores. Verificaram-se os seguintes valores médios diários em MJ m⁻² d⁻¹ nas fases I, II e III, respectivamente: Rs (17,27; 18,25; 20,66); Rn (9,34; 9,51; 8,84); LE (-6,02; -6,02; -7,40); H (-3,76; -3,21; -2,09) e G (-0,36; -0,16; -0,67); partições médias em porcentagem de Rr/Rs (11,8; 12,5; 15,7); Rn/Rs (54,09; 52,10; 42,81); LE/Rn (-64,42; -67,86; -83,70); H/Rn (-40,24; -33,75; 23,63) e, para a evapotranspiração da cultura - ETc (2,48; 2,68; 3,04 mm d⁻¹) e coeficiente da cultura - Kc (0,27; 0,46; 0,87).

Palavras chave: razão de Bowen, coeficiente de cultura, irrigação localizada.

¹Comitê orientador: Luiz Gonsaga de Carvalho – UFLA (orientador); Elio Lemos da Silva – UFLA; Antônio Augusto Aguilar Dantas – UFLA; Geraldo Magela Pereira – UFLA e Antônio Carlos Fraga – UFLA (coorientador).

ABSTRACT

RIOS, Gervásio Fernando Alves. **Energy balance solar on irrigated castor bean crop**. 2009. 111 p. Dissertation (Master in Agricultural Engineering. Water and Soil Engineering) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, MG.¹

This study was carried out aiming to quantify the Bowen Ratio Energy Balance (BREB) components over an irrigated castor bean crop in three stages of cultivation to help in the determination of the crop evapotranspiration (ET_c) rates and crop coefficient (K_c) under the weather conditions of Lavras, Minas Gerais, Brazil. For this purpose, an experiment was carried out in an area under drip irrigation system. To determine the components of energy balance and the evapotranspiration rates sensors of temperature and relative humidity were installed at two levels above the crop canopy. Other sensors for incident solar radiation (R_s), reflected radiation (R_r) and net radiation (R_n) on the canopy and a soil heat flux (G) sensor in the center of the area were installed. The data measured by these sensors were stored in the data logger every 10 minutes and integrated for the day term. The results showed that, in average, the albedo was 0.14 (R_r/R_s); about 49.67% of incident solar radiation (R_s) was converted into net radiation (R_n); -71.99% of the partition of R_n (LE/R_n) consisted in latent heat of evaporation, followed by -32.54% for the flow of sensible heat (H/R_n) and -4.38% for the flow of heat in the soil (G/R_n). The sum of the components (LE, G and H) as compared to R_n was 108.92%, showing an over-estimation of 8.92%, possibly due to the model assumptions, LE or H advection problems, and due to the data integration during the night period or errors in sensors' measurements. The following daily average values in MJ m⁻² d⁻¹ in stages I, II and III were, respectively: R_s (17.27, 18.25, 20.66); R_n (9.34, 9, 51, 8.84); LE (-6.02, -6.02, -7.40); H (-3.76, -3.21, -2.09) and G (-0.36; -0.16, -0.67); average partitions in percentage of R_r/R_s (11.8, 12.5, 15.7); R_n/R_s (54.09, 52.10, 42.81); LE/R_n (-64.42, -67.86, -83.70); H/R_n (-40.24, -33.75, 23.63) and to crop evapotranspiration - ET_c (2.48; 2.68, 3.04 mm d⁻¹) and crop coefficient - K_c of (0.27, 0.46, 0.87).

Key words: Bowen ratio, crop coefficient, drip irrigation.

¹Guidance Commite: Prof. Dr. Luiz Gonsaga de Carvalho – UFLA (Adviser), Prof. Dr. Elio Lemos da Silva – UFLA, Prof. Dr. Antônio Augusto Aguilar Dantas – UFLA, Prof. Dr. Geraldo Magela Pereira – UFLA, Prof. Dr. Antônio Carlos Fraga – UFLA.

1 INTRODUÇÃO

A mamona, espécie *Ricinus communis L.*, família *Euphorbiaceae*, é conhecida no Brasil e no mundo por diferentes nomes e, embora seja considerada de clima quente, é extremamente adaptável às mais variadas condições ambientais, desenvolvendo-se muito bem em climas tropicais e subtropicais. No território brasileiro, a mamoneira se desenvolve espontaneamente em muitas áreas como plantas invasoras. Entretanto, a utilização da mamoneira como cultura produtiva depende das condições ambientais e tecnológicas para que o seu máximo potencial genético, em termos de produtividade, se expresse.

O principal produto da mamoneira, desde a antiguidade, é o óleo extraído de suas sementes, utilizado como combustível para iluminação por meio das “lâmparas ou candeeiros” e na fabricação de cosméticos e medicamentos. A extração do óleo da mamona pode chegar a 55%, sendo o subproduto, denominado torta ou farelo de mamona, de até 50% em teor de proteínas. Porém, devido às suas propriedades tóxicas para alimentação animal, é utilizado, comumente, como fonte de nutrientes na adubação de solo.

Na indústria, o óleo de mamona é utilizado para a fabricação de cosméticos, medicamentos, fabricação do náilon e revestimentos resistentes a incêndio, aditivos anticongelantes de combustíveis de aeronaves e lubrificantes entre outros. Atualmente, dentre as oleaginosas, o óleo de mamona vem sendo utilizado como fonte de energia para motores de ciclo diesel, o biodiesel.

O processo de produção do biodiesel a partir de frutos ou sementes oleaginosas foi primeiramente patenteado por um brasileiro, o professor Expedito José de Sá Parente, da Universidade Federal do Ceará (Parente, 1983). A obtenção do biodiesel é feita, em linhas gerais, pelo processo de

transesterificação, gerando uma mistura de ésteres metílicos ou etílicos dos ácidos graxos e liberando, como subproduto, a glicerina, que é de grande valor na indústria de sabões, sabonetes e cosméticos.

Na Europa, o consumo do biodiesel atende, principalmente, à produção interna e, nos Estados Unidos, além dos estados cujo consumo não é obrigatório, leis aprovadas em Minnesota e Carolina do Norte obrigam que, a partir de 01/01/2002, todo o diesel consumido tivesse 2% de biodiesel (Oliveira, 2001). A meta do Brasil foi a incorporação de 2% até 2008, devendo chegar a 5% em 2013, podendo ser antecipada conforme a produção. Para atender ao primeiro percentual, a área de plantio de oleaginosas foi estimada em 1.500.000 de hectares, equivalente a 1% da área plantada e disponível para agricultura no Brasil (Brasil, 2008). A atual produção brasileira de mamona é de 103.900 toneladas em 147.900 hectares, sendo o Nordeste responsável por 92,1% da produção, com área cultivada de 142.200 hectares, e produtividade de 673,0 kg/ha (Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB, 2008).

A implementação de um programa energético com biodiesel abre oportunidades para grandes benefícios sociais; geração de emprego por capital investido; demandas por mão-de-obra qualificada para o processamento; promoção do trabalhador rural, particularmente no sistema de agricultura familiar e vantagens ambientais inerentes, como a redução de emissão de poluentes e de enxofre, o que evita custos com saúde pública e de gases responsáveis pelo “efeito estufa”. Entretanto, para que esses benefícios econômicos, sociais e ambientais do Programa Nacional do Biodiesel sejam efetivamente consolidados, diversos estudos de pesquisa deverão ser implementados para que ele estenda as áreas de cultivos no país e, ainda, com aumento de produtividade. No Brasil, em particular no estado de Minas Gerais, faltam informações da interação da cultura da mamona com as condições

climáticas locais e, principalmente, da necessidade hídrica da cultura, com poucos relatos de áreas irrigadas no país.

A determinação da demanda hídrica de uma cultura para fins de um adequado planejamento, dimensionamento e manejo de sistemas de irrigação ou, mesmo, para fins de estudos climáticos e hidrológicos de uma região, envolve a estimativa da evapotranspiração. A evapotranspiração de uma cultura representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais, podendo ser estimada por inúmeros métodos, dentre eles os relativos ao balanço de energia, que estão relacionados com as trocas de massa e de energia no sistema solo-planta-atmosfera, por meio do estudo da partição do saldo de radiação nos diversos processos que ocorrem na cultura.

Atualmente, devido aos avanços dos sensores eletrônicos e computacionais, uma das técnicas para determinar a evapotranspiração de uma cultura utilizando-se balanço de energia é a aplicação da razão de Bowen BERB. Esta metodologia já foi avaliada e recomendada por diferentes autores, a partir de sistemas automáticos. Na determinação da evapotranspiração da cultura, destaca-se também o uso do coeficiente de cultura (K_c) associado às estimativas da evapotranspiração de referência (E_{To}). As metodologias e os procedimentos de cálculo para determinação do K_c têm sido apresentados e recomendados pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977; Doorenbos & Kassam, 1979; Allen et al., 1998). Neste contexto, realizou-se um estudo com a cultura da mamona, cultivar Al Guarany-2002 (seleção UFLA), sem limitação hídrica no solo, visando quantificar os componentes do balanço de energia pelo método da razão de Bowen, a evapotranspiração da cultura e a estimativa do coeficiente de cultura, sob as condições de demanda atmosférica no município de Lavras, Minas Gerais.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 Cultura da mamona

2.1.1 Origem e distribuição geográfica

A mamona (*Ricinus communis* L.) também é denominada, no Brasil, carrapateira, palma-cristi e enxertia. Em espanhol, é conhecida como *higuerilla*, *higuerete*, *palma christi*, *higuera* e *tártago*; em francês, *ricinus*; em inglês, *castor bean* e *castor seed* e, em alemão, *wunderbaun*. Trata-se de uma das 7.000 espécies da família das Euforbiáceas (Beltrão et al., 2001).

Existem controvérsias na determinação, com precisão, da origem da mamoneira, o que é decorrente da sua ampla adaptação às mais distintas condições climáticas. Apesar de ser uma cultura de regiões predominantemente quentes, é encontrada em locais de clima ameno. Atualmente, a hipótese mais aceita é a de que o centro de origem da mamona seja a Etiópia, no leste da África (Lorenzi, 2000; Beltrão et al., 2001).

É uma espécie conhecida desde os tempos remotos e cujas primeiras sementes foram encontradas em urnas funerárias de sacerdotes egípcios. Acredita-se que esta civilização já cultivava a mamona há mais de 4.000 anos, para fins medicinais e também para a iluminação, com o óleo extraído de suas sementes (Rodrigues et al., 2002).

Não existem informações precisas sobre a época da introdução da cultura no Brasil, mas alguns autores acreditam que a mamoneira tenha sido introduzida no país pelos colonizadores portugueses, no primeiro século do descobrimento (Gonçalves et al., 1981; Vasconcelos, 1990). Azevedo et al. (2001) destacam a adaptação da mamona a quase todas as regiões do país e ressaltam que as regiões nordeste, sudeste e sul, especificamente os estados da Bahia, São Paulo e Paraná, respectivamente, sejam os principais produtores da oleaginosa.

2.1.2 Descrição botânica, morfológica e fisiológica

A mamona pertence à família Euphorbiaceae, que abrange vasto número de tipos de plantas nativas da região tropical, sendo a espécie *Ricinus communis* L. a única conhecida (Savy Filho et al., 1999; Savy Filho, 2003). É uma planta de elevada complexidade morfológica e fisiológica (Beltrão & Silva, 1997) e também de hábito de crescimento variado, com diversas colorações de caule, folhas e racemos (cachos), podendo ou não possuir cera no caule e no pecíolo. Os frutos, em geral, possuem espinhos e, em alguns casos, são inermes. As sementes apresentam diferentes tamanhos, formatos e grande variabilidade de coloração, além de variação no seu conteúdo de óleo, que pode chegar a 55% (Rodrigues Filho, 2000).

Nos trópicos e subtropicais, comporta-se como uma planta semiperene e pode atingir até 13 metros de altura e diâmetro do caule de 7,5 a 15 centímetros. Em zonas temperadas, é uma planta anual com altura média entre 1 a 3 metros (Távora, 1982; Beltrão et al., 2001). No território brasileiro, ocorre espontaneamente em muitas áreas e tem porte variado, mas, sob cultivo, apresenta hábito de crescimento arbustivo (Rodrigues et al., 2002).

O ambiente tem grande influência no crescimento radicular da mamona. É pivotante, podendo chegar a até 3 metros de profundidade e as raízes laterais são bem desenvolvidas e situam-se a poucos centímetros da superfície do solo. Em condições de pouca disponibilidade hídrica, o sistema radicular se desenvolve a grandes profundidades, com as raízes laterais explorando um grande volume de solo. Sob irrigação ou em condições de elevada disponibilidade de umidade, o sistema radicular é menos desenvolvido e mais compactado (Távora, 1982; Carvalho, 2005).

É uma planta de metabolismo fotossintético C₃, com elevada taxa de fotorrespiração e que necessita de dias longos com, pelo menos, 12 horas de luz

por dia, para produzir satisfatoriamente (Azevedo et al., 2001; Beltrão et al., 2001). Mas, segundo Daí et al. (1992), a mamoneira é uma planta de elevada capacidade fotossintética, em especial sob condições adequadas de disponibilidade hídrica, uma vez que o processo fotossintético é sensivelmente afetado quando ocorrem demandas atmosféricas elevadas.

2.1.3 Requerimentos ambientais

Embora seja considerada de clima quente, a mamoneira é extremamente adaptável às mais variadas condições ambientais. Desenvolve-se muito bem em climas tropicais e subtropicais, podendo ser produzida também em zonas temperadas. Sua área de cultivo está normalmente compreendida entre os 40°N e 40°S. Nas zonas temperadas, com verões secos, encontra as condições mais favoráveis para a produção máxima. Pode ser cultivada em muitos tipos de solo, porém, como a maioria das culturas agrícolas, dá preferência a solos bem drenados, de textura franca e bem balanceados, do ponto de vista nutricional (Távora, 1982). Uma das causas do baixo rendimento da mamoneira no Brasil é a utilização de solos de baixa fertilidade natural, além da pouca adoção de práticas mais racionais de preparo, adubação e correção da acidez do solo.

Sua produção e rendimento dependem das condições ambientais, sendo os elementos climáticos precipitação pluvial, temperatura e umidade relativa do ar, associados à altitude, os que mais contribuem para que expressem o seu máximo potencial genético, em termos de produtividade (Silva et al., 2000). Segundo Carvalho (2005), a altitude é um dos fatores mais importantes a serem levados em consideração e recomenda a exploração comercial em áreas com altitudes entre 300 a 1.500 metros acima do nível do mar, onde, teoricamente, estaria o ótimo para a cultura, o que não descarta o seu cultivo em locais com altitudes diferentes das mencionadas.

Apesar de a mamona ser resistente à seca, no mínimo cinco meses de estação chuvosa ao ano são necessários. De acordo com Távora (1982), é necessário que ocorra, no mínimo, uma precipitação de 600 a 750 mm durante o ano. A falta de água no solo, mesmo que na fase de maturação dos frutos, implica em sementes com baixo peso e teor de óleo.

Devido à mais recente e crescente demanda pela expansão da cultura da mamona, assim como para outras regiões do Brasil, no estado de Minas Gerais, faltam informações sobre a interação da cultura com as condições climáticas locais, como também de suas necessidades hídricas. Conforme Dantas et al. (2004), a região de Lavras, no sul do estado, tem um regime hídrico típico da região Sudeste brasileira, pois apresenta um período seco bem definido como também o período chuvoso, época apropriada para o cultivo de várias culturas, entre elas a mamoneira. Comparado ao balanço hídrico climatológico, efetuado com os dados normais, ou seja, médios do período de 1961 a 1990, verificou-se que, no período estudado, o início da estação chuvosa se atrasou e, por outro lado, se estendeu praticamente até o mês de maio.

2.1.4 Principais produtores mundiais e nacionais

O Brasil foi, durante décadas, o maior produtor mundial de mamona em grão e exportador de óleo. Contudo, em 1982 e 1993, Índia e China superaram o Brasil e tornaram-se, respectivamente, o primeiro e o segundo maiores produtores de mamona do mundo. A partir desse período, o Brasil passou a ocupar o terceiro lugar; sua produção caiu de cerca de 300 mil toneladas, no final da década de 1980, para 80 mil toneladas, em 1997. Esta produção está concentrada, principalmente, na Bahia e nos estados do Nordeste (Silva et al., 2000; Corrêa et al., 2004). Nos estados em que os rendimentos médios são maiores, São Paulo, Paraná e Minas Gerais, a área colhida e a produção de

mamona são insignificantes, apesar de um pequeno incremento ocorrido entre 1998 e 2001.

Mas, no Brasil, depois de sucessivas reduções de produção e área colhida, a mamoneira evidenciou recuperação nas safras de 2004 e 2005. Nestes anos, a área plantada no país representou, respectivamente, 14% e 15% do total mundial e a produção correspondeu a 11% e a 13% do montante produzido mundialmente (Santos & Kouri, 2006). A mamoneira contribui com cerca de 0,8% na matriz oleaginosa no Brasil, com cerca de 160.000 hectares plantados, principalmente na região Nordeste, em condições climáticas mais secas e com produtividade média baixa, em torno de 350 litros de óleo por hectare. Entretanto, é uma planta que pode ser utilizada em sistemas mecanizados e também em sistemas de agricultura familiar, nos quais poderá ser conduzida em sistemas associados com outras culturas, de ciclo anual ou perene.

2.1.5 Uso e importância econômica

O principal produto da mamoneira é o óleo extraído de suas sementes, utilizado pelo homem desde a antiguidade. Por apresentar elevado teor de ácido ricinoleico (90%), este óleo difere dos demais pela alta viscosidade e estabilidade à oxidação, mantidas mesmo com grande variação de temperatura, além de ser o único óleo vegetal solúvel em álcool, à baixa temperatura. Dessa forma, tem facilitada sua utilização por empresas do ramo químico. Os demais óleos vegetais perdem viscosidade em altas temperaturas e solidificam em baixas (Freire & Severino, 2006).

O processo de produção do biodiesel a partir de frutos ou sementes oleaginosas foi primeiramente patenteado por um brasileiro, o professor Expedito José de Sá Parente, da Universidade Federal do Ceará (Parente, 1983).

Na Europa, o consumo do biodiesel (atendido, principalmente, pela produção interna) foi da ordem de 195.000 toneladas, em 1998, atingindo o consumo de 427.000 toneladas em 2002. Nos Estados Unidos, além dos estados cujo consumo não é obrigatório, leis aprovadas em Minnesota e Carolina do Norte obrigam a que, a partir de 01/01/2002, todo o diesel consumido tenham 2% de biodiesel (Oliveira, 2001).

A meta para o Brasil foi a incorporação de 2% até 2008, devendo chegar a 5% em 2013, de biodiesel ao diesel vendido no país, podendo ser antecipada conforme produtividade. Para atender ao primeiro percentual, a área de plantio de oleaginosas é estimada em 1,5 milhão de hectares, equivalente a 1% dos 150 milhões plantados e disponíveis para agricultura (Brasil, 2008). A atual produção brasileira de mamona é de 103,9 mil toneladas, em 147,9 mil hectares, sendo o Nordeste responsável por 92,1% da produção, com área cultivada de 142,2 mil hectares e produtividade de 673,0 kg/ha (CONAB, 2008).

Para cada 100 kg de óleo de mamona extraído, são produzidos mais ou menos 130 kg de um importante subproduto, denominado torta ou farelo de mamona, que é um excelente adubo orgânico, com teor médio de macronutrientes da ordem de 4,4% de nitrogênio, 1,8% de fósforo e 1,4% de potássio (Freire, 2001). Por outro lado, além da produção de óleos vegetais, é importante a demonstração dos aspectos de recuperação de solos improdutivos, por meio da nitrogação natural a partir do cultivo de espécies oleaginosas.

Acredita-se que a cultura da mamona no Brasil, por meio de sua utilização para a produção de biodiesel, possa trazer grande contribuição, de modo a alavancar a geração de emprego e renda como cultura alternativa de exploração econômica e, principalmente, de massiva participação da agricultura familiar.

2.1.6 Irrigação da mamoneira

Uma agricultura irrigada eficiente pressupõe a utilização da água e do sistema de irrigação da melhor maneira possível, no intuito de se obter a máxima produção por unidade de água aplicada. Torna-se necessária a adoção de um manejo de irrigação racional e criterioso, que permita um perfeito fornecimento de água durante o crescimento da cultura (Andrade Júnior & Klar, 1996).

A irregularidade das chuvas nas várias regiões produtoras de mamona, aliada aos períodos de estiagem durante a época chuvosa, tem prejudicado a cultura. A maior evidência disso são as baixas produtividades obtidas, cerca de 600 kg ha⁻¹ a média mundial e 722 kg ha⁻¹ a média brasileira (Silva et al., 2000). Desse modo, para minimizar problemas decorrentes do estresse hídrico e garantir produtividades mais elevadas, a adoção da tecnologia de irrigação passa a ser uma excelente alternativa, que pode propiciar estabilidade da produção agrícola.

Para Ribeiro Filho (1966), citado por Beltrão (2004), a mamoneira é bastante exigente quanto à umidade do solo, em especial no período de enchimento dos frutos. O manejo da irrigação deve ser ministrado com pouca água em intervalos curtos, devendo ser suspensa um mês antes da colheita.

A irrigação da mamoneira pode ser realizada por diversos métodos. Contudo, segundo Andrade Júnior & Klar (1996), no sistema por gotejamento, no qual a água é aplicada diretamente sobre a zona radicular da planta, observa-se uma economia de água, em geral, entre 20% e 30%, podendo atingir até 60% em culturas frutíferas com grande espaçamento, em relação ao sistema por aspersão.

As realizações de pesquisas de evapotranspiração fornecem informações da quantidade de água consumida pelas plantas, fornecendo dados para o manejo da água e para o dimensionamento dos sistemas de irrigação (Curi & Campelo

Júnior, 2004). Lima et al. (2004) salientam que, apesar da grande importância da cultura da mamona na atualidade, ainda não foram realizados, até o momento, estudos com relação à eficiência do uso da água pela cultura. Estes autores verificaram, em seu trabalho, que, para as condições do Brejo Paraibano, o valor médio da evapotranspiração da mamoneira é de 1,84 mm dia⁻¹.

Baranov (1986), em experimentos realizados na Rússia, confirmou que a mamoneira responde bem à irrigação, com incrementos bastante consideráveis, de até mais de oito vezes a mais que o cultivo em regime de sequeiro, produzindo cerca de 1.800 kg de baga ha⁻¹ em sequeiro e em irrigado, o aumento foi de 1.650 kg de baga ha⁻¹, podendo aumentar, dependendo do solo, da cultivar, das condições do tempo e do clima do local.

No Brasil, as áreas irrigadas com mamona são poucas, com alguns registros na Bahia, no Rio Grande do Sul e no Maranhão, atingindo até mais de 6,0 t de baga ha⁻¹, em alguns casos. No caso do uso da irrigação na mamona, este fato somente se justifica quando se utiliza elevada tecnologia para tirar o máximo possível de produtividade, com elevado teor de óleo de boa qualidade (Beltrão, 2004). Mas, apesar da prática de irrigação na mamoneira ser pouco utilizada em cultivos extensivos, ela é muito empregada nos campos de produção de sementes, obtendo-se rendimentos de até 5.400 kg ha⁻¹, em cultivos comerciais na Bahia com a cultivar BRS 149 Nordestina (Carvalho, 2005).

Dentre as vantagens da irrigação está à possibilidade de antecipar a época de plantio, para que a colheita seja realizada nos meses mais secos do ano (Curi & Campelo Júnior, 2004; Carvalho, 2005). Favorece também a produção de mais racemos por planta, haja vista o aumento do ciclo cultural.

Laureti et al. (1998) estudaram o comportamento de cultivares de mamona em condições irrigadas e sob sequeiro e encontraram maiores valores de produtividade total, rendimento do racemo primário e massa de mil sementes

em regime de irrigação. A produtividade máxima obtida foi de 2.080 kg ha⁻¹ de grãos. Observaram também que, no cultivo de sequeiro, ocorreu menor produção de racemos por planta e que o teor de óleo das sementes foi afetado positivamente pela irrigação, obtendo valores médios de até 49,3% de óleo na semente.

Segundo Beltrão & Cardoso (2006), a mamoneira tem potencial produtivo de 10.000 kg ha⁻¹ de grãos e, em algumas localidades, já foram obtidas produtividades de 8.500 kg ha⁻¹, com cultivares anãs em regime de irrigação. Dias et al. (2006) testaram quatro densidades populacionais e quatro lâminas de irrigação na mamoneira e verificaram que o rendimento do racemo secundário foi fortemente desfavorecido nas duas menores quantidades de água aplicadas, promovendo redução no rendimento total.

Para a cultivar BRS 149 Nordestina, cujo rendimento médio, em condições de sequeiro, é de 1.500 kg ha⁻¹, a utilização da irrigação pode ampliar este valor para 3.500 kg ha⁻¹ ou, até mesmo, 4.500 kg ha⁻¹ (Beltrão, 2001).

2.2 Evapotranspiração

2.2.1 Conceito da evapotranspiração

Originalmente, o termo evapotranspiração, como se conhece hoje, foi introduzido por Thornthwaite, em 1948 e teve grande importância e impacto nas áreas de agricultura, climatologia e hidrologia. Ele é definido, segundo necessidades do autor, como um elemento meteorológico padrão fundamental, representando a chuva necessária para atender às carências de água da vegetação, expressa na mesma unidade de medida (mm). Sua preocupação principal era explicar as variações sazonais do balanço de água no solo e tentar definir as diferenças regionais do clima (Sediyama, 1996; Pereira et al., 1997).

A evapotranspiração é um fenômeno bastante estudado, sendo sua determinação um dado básico para o adequado planejamento, dimensionamento e prática de manejo de sistemas destinados à irrigação, assim como também se faz de grande importância para estudos climáticos, hidrológicos e na avaliação de recursos hídricos de uma região (Bernardo et al., 2005; Sedyama, 1996; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998; Tucci & Beltrame, 2000; Camargo & Camargo, 2000).

A evapotranspiração é definida, de forma geral, como a quantidade de água transferida, do estado líquido, de uma superfície vegetada ou cultura, para a atmosfera, na forma de vapor, pelos processos de evaporação do solo e transpiração das plantas (Bernardo et al., 2005; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998). Segundo Allen et al. (1998), os processos de evaporação e transpiração em um solo cultivado ocorrem simultaneamente, tendo predominância de um sobre o outro em fases distintas do desenvolvimento vegetativo e não existe, de modo prático ou sob condições naturais, nenhum método para separar esses dois processos um do outro.

Segundo Sedyama (1996), Dalton, em 1802, representou um marco no estudo da evaporação, teorizando as bases do entendimento do processo evaporativo de uma superfície úmida qualquer. A partir de suas ideias, foi formulada a equação que descreve a evaporação em lâmina d'água por unidade de tempo. A evaporação é o processo físico de mudança da água de sua fase líquida para a fase gasosa e ocorre tanto numa massa contínua (rio, lago e represa) como numa superfície úmida (planta e solo), sendo um fenômeno que utiliza energia externa ao sistema e a transforma em calor latente (Soares et al., 2001).

A transpiração, por sua vez, corresponde à evaporação da água que foi utilizada nos processos metabólicos necessários ao crescimento e ao

desenvolvimento da planta, ocorrendo, predominantemente, nas superfícies das folhas, através de estruturas microscópicas ($<50 \mu\text{m}$) denominadas de estômatos (5 a 200 estômatos mm^{-2}) e que permitem a comunicação entre a parte interna da planta e a atmosfera. Por meio dessas estruturas ocorre a passagem de gás carbônico, oxigênio e vapor d'água. Na maioria das espécies, os estômatos permanecem abertos durante o dia e fechados durante a noite e em condições de acentuado estresse hídrico. Esta condição ocorre quando o solo não tem disponibilidade de água para as plantas e quando a tem, mas a planta não consegue absorvê-la em quantidade e velocidade suficiente para atender à demanda atmosférica (Pereira et al., 1997).

Segundo David et al. (2002), a transpiração depende da evaporação que se processa na interface folha/atmosfera e do abastecimento hídrico à folha, função do gradiente de potencial hídrico e da resistência hidráulica total entre o solo e a folha. Assim, embora, a priori, o processo de transpiração das plantas seja similar ao processo evaporativo, aquele se distingue deste devido a características da planta e ou da cultura (Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998).

2.2.2 Fatores inerentes à evapotranspiração

A evapotranspiração é um processo governado por fatores meteorológicos (disponibilidade de energia e demanda atmosférica), fatores relacionados à cultura e fatores ligados ao manejo e a condições ambientais de cultivo (Allen et al., 1998). Segundo esses autores, os principais parâmetros meteorológicos são radiação, umidade do ar e velocidade do vento. A radiação solar direta depende do local (latitude e altitude), do relevo (orientação da face exposta aos raios solares) e da época do ano (estações climáticas do ano), fatores esses que potencializam a disponibilidade de energia necessária promover a evapotranspiração e, por isso, são denominados, por Pereira et al. (1997), de

“disponibilidade de energia”, acrescentando o poder refletor da superfície (albedo).

A umidade do ar e a velocidade do vento são os demais parâmetros que, juntos, compõem uma função chamada de “poder evaporante do ar”, a qual fornece a energia capaz de secar uma superfície evaporante, mesmo não havendo incidência direta de raios solares (efeito varal, semelhante ao procedimento de secar uma roupa, mesmo ao abrigo da luz solar direta), mantendo-se a movimentação atmosférica. Outro efeito semelhante causado pelo poder evaporante do ar atmosférico é o efeito oásis, que ocorre na bordadura de uma área vegetada e úmida, circundada por outra seca, promovido pelo transporte horizontal (transporte advectivo ou advecção) do calor sensível (componente do balanço de energia, chamada de propriedade atmosférica) para dentro da área úmida. Nessa bordadura, também chamada de “área tampão”, “fetch” ou “buffer”, logo na transição com a área seca ocorre o efeito varal; nesse momento, a evapotranspiração é exageradamente alta e, na medida em que se caminha para o seu interior, na direção predominante do vento, ela diminui acentuadamente até um valor limite inferior, que é resultante apenas do balanço de energia vertical. A extensão dessa bordadura depende do clima da região e do porte da vegetação (Pereira et al., 1997).

Entre outros fatores ligados à cultura estão aqueles relacionados à espécie ou à variedade da cultura, fase de desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular, mecanismo de resistência à transpiração, altura e aspereza da cultura, cobertura do solo ou índice de área foliar e albedo. Já aqueles ligados a manejo e condições ambientais são os relacionados a salinidade, fertilidade e aplicação de fertilizantes do solo, presença de horizontes de solo duros ou impermeáveis, controle de pragas e doenças, densidade de plantas e cobertura do solo, disponibilidade de água no solo e método de irrigação e utilização de

cobertura morta sobre o solo (Bernardo et al., 2005; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998).

2.2.3 Evapotranspiração de referência

A evapotranspiração pode ser determinada por inúmeros métodos, ditos como métodos diretos e indiretos. Os métodos diretos são, normalmente, empregados para medir a evapotranspiração por meio de lisímetros, balanço hídrico e controle de umidade no solo, porém, são, geralmente, utilizados em projetos de pesquisa extensos, devido ao elevado custo dos equipamentos (Bernardo et al., 2005; Pereira et al., 1997; Mendonça et al., 2003). Os indiretos, utilizados para estimativas, são menos onerosos e se baseiam na aplicação de métodos matemáticos que utilizam dados climatológicos medidos em estações meteorológicas. De acordo com os princípios envolvidos no seu desenvolvimento, estes métodos podem ser agrupados em: empírico, aerodinâmico, balanço de energia, combinados e correlação dos turbilhões. Os métodos combinados combinam os efeitos do balanço de energia ao do poder evaporante do ar (Pereira et al., 1997).

Embora existam variados fatores inerentes e influentes ao processo de evapotranspiração, o que, do ponto de vista prático, dificulta sua mensuração. Muitos estudos e métodos foram propostos segundo as necessidades locais, com a finalidade de quantificar ou apenas estimar essa transferência d'água para atmosfera. Numerosas publicações, em revistas técnicas e livros, registram que a evaporação, e ou a evapotranspiração, é uma das matérias mais populares, estudada e reestudada em várias áreas da ciência (Sediyama, 1996). Com isso, inúmeros conceitos e métodos de estimativa da evapotranspiração surgiram, ao ponto que, neste trabalho, não há a pretensão e nem o objetivo de se detalhar todos os métodos. Assim, um bom aprofundamento nesse sentido pode ser dado

por Sedyama (1996), Pereira et al. (1997), Allen et al. (1998), Camargo & Camargo (2000) e Tucci & Beltrame (2000), entre outros.

Entretanto, a primeira e mais importante definição de evapotranspiração foi feita por Thornthwaite, em 1948, que ele cunhou de evapotranspiração potencial (ETp) e definiu como sendo a ocorrida em uma superfície extensa e completamente coberta por vegetação de porte baixo em pleno desenvolvimento e bem suprida de água (Kobyama & Vestena, 2006). Essa definição (apesar de contornar e padronizar os efeitos de difícil mensuração da evapotranspiração sob condições reais, atendendo aos objetivos do autor) apresentava algumas indefinições e limitações de ordem prática à sua aplicação em diferentes locais e regiões e finalidades, tais como a escolha da vegetação mais adaptada (grama, alfafa, etc.), o manejo adequado da cultura para garantir sempre o seu pleno desenvolvimento e a disponibilidade de água, e que fosse realizado numa extensa área (cujas dimensões não são especificadas).

Dessa definição de evapotranspiração (ETp) surgiram variados métodos de quantificação, além do próprio método do autor, que a utilizava em função de diferentes variáveis climáticas (temperatura, umidade relativa, velocidade do vento, etc.) e cujas aplicações em locais diferentes estavam sujeitas a calibrações laboriosas e caras, além de erros e imprecisão. Até que surgiu a necessidade de um conceito mais geral e que garantisse a uniformização dos fatores ligados à cultura e ao solo, permitindo, assim, que métodos diferentes, aplicados sob as mesmas condições, fossem comparados e avaliados (Bernardo et al., 2005; Sedyama, 1996; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998). Surgia assim, o termo evapotranspiração de referência (ETo), definido por Smith (1991) como sendo um conceito padrão, definindo a evapotranspiração de uma cultura hipotética, com altura fixa de 0,12 m, albedo de 0,23 e resistência da superfície igual a 69 s m^{-1} , sendo representativa da evapotranspiração de um gramado verde, de altura

uniforme, em crescimento ativo, cobrindo totalmente a superfície do solo e sem restrição de água. Com isso, em consulta de especialistas realizada em 1990, a Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO) recomendou o uso do método de Penman-Monteith para a estimativa da evapotranspiração de referência como sendo o método padrão e de estimativa mais precisa, denominado de método Penman-Monteith-FAO (Allen et al., 1998).

O método de Penman-Monteith é baseado no método de Penman, desenvolvido em 1948 (primeiro método indireto, baseado em princípios físicos corretos, combinando os efeitos do balanço de energia com o poder evaporante do ar, denominados de método combinado) e no método de Monteith, desenvolvido em 1965, resultante da generalização do método anterior para estresse hídrico de culturas, introduzindo a resistência da superfície à difusão do vapor d'água. Portanto, o método Penman-Monteith envolve fatores físicos e biológicos, sendo adotado pela FAO como o método mais adequado, tanto para a estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) quanto para a evapotranspiração da cultura (ET_c). Especificamente para a determinação da ET_o, o método o método Penman-Monteith sofreu algumas parametrizações em 1990, propostas pela FAO, recebendo a denominação de FAO Penman-Monteith.

2.2.4 Coeficiente de cultura

A evapotranspiração de qualquer cultura é uma das principais informações necessárias para o manejo racional da irrigação e para fins de planejamento do uso da água. Dentre as abordagens disponíveis para a estimativa do consumo de água pelas plantas, se destaca o uso de coeficientes da cultura (K_c) associados a estimativas da evapotranspiração de referência (ET_o).

Esse coeficiente é o quociente entre a evapotranspiração da cultura (ETc) e a ETo (Allen et al., 1998; Bernardo et al., 2005).

A evapotranspiração de uma cultura (ETc) é a quantidade de água consumida por uma cultura sem restrição hídrica em qualquer fase de seu desenvolvimento, sob condições e cuidados agronômicos recomendados. Desde o plantio até a colheita, a cultura vai progressivamente crescendo e ocupando a área disponível. A cultura deve ser bem conduzida agronomicamente para que o consumo de água ocorra conforme o potencial evapotranspirativo de cada fase. Portanto, a ETc pode ser entendida como sendo a evapotranspiração potencial que ocorre em cada fase de desenvolvimento da cultura. O conhecimento da ETc é fundamental em projetos de irrigação, pois ela representa a quantidade de água que deve ser reposta ao solo para manter o crescimento e a produção em condições ideais.

Segundo Allen et al. (1998), o coeficiente de cultura é a relação entre ETc e ETo e representa uma integração dos efeitos de quatro características principais que distinguem a ETc da ETo, quais sejam: (1) altura da planta (plantas de porte maior influenciam o aumento do termo de resistência aerodinâmico (r_a) da equação de Penman-Monteith e a transferência turbulenta do vapor d'água); (2) resistência de superfície (r_s , função da área foliar, considerada uma "big-leaf", número de estômatos, idade, condição sanitária e grau de controle dos estômatos pela planta); (3) evaporação da água do solo, principalmente solo exposto à radiação solar e (4) albedo da cultura.

O coeficiente Kc está relacionado aos fatores ambientais e fisiológicos das plantas, devendo, preferencialmente, ser determinado para as condições locais nas quais será utilizado. Todavia, sua determinação sob condições de campo exige um grande esforço de pessoal e técnico, equipamentos e custos, em virtude da quantidade de informações, controles e monitoramentos necessários

ao balanço hídrico em uma área irrigada (Medeiros et al., 2004). Para a obtenção de K_c ao longo do ciclo da cultura, normalmente se utilizam lisímetros. Pereira et al. (2002) descrevem que o lisímetro é constituído de uma caixa impermeável, contendo um volume de solo que possibilita conhecer, com detalhe, alguns termos do balanço hídrico do volume amostrado. Os mais empregados são os de drenagem, lençol freático constante e o de pesagem; neste último, é possível utilizar células de carga para a medição automatizada da variação do peso do sistema.

Os valores de K_c durante a fase inicial (K_{cini}) estão sujeitos aos efeitos de grandes variações, devido à frequência e à magnitude da disponibilidade de água no solo, assim como da fração de molhamento do solo (f_w) e textura do solo. Isso acontece porque, nesta fase da cultura, o solo está exposto à radiação solar (R_s) e à velocidade do vento (U) diurna e sazonal e aos efeitos de molhamento da superfície por chuvas e, ou irrigações, principalmente em regiões de clima árido, onde a demanda atmosférica é maior, refletindo em maiores variações e magnitudes do comportamento evaporativo ($K_e \cdot E_{To}$) (Allen et al., 1998).

As metodologias e os procedimentos de cálculo para determinação do K_c têm sido apresentados e recomendados pela FAO (Doorenbos & Pruitt, 1977; Doorenbos & Kassam, 1994; Allen et al., 1998). Essas metodologias, basicamente, se referem à obtenção de K_c único ou, ainda, baseando-se na partição da evapotranspiração da cultura (E_{Tc}), nos componentes evaporação do solo ($K_e \cdot E_{To}$) e transpiração da cultura ($K_{cb} \cdot E_{To}$), obtidos sob condições padrão (potencial), porém, nessa última, exige maior detalhamento das variáveis envolvidas. Para o método de partição da E_{Tc} , é recomendado, ainda, o método proposto por Ritchie (1972), que calcula separadamente a evaporação direta da água do solo (E_p) e a transpiração da cultura (E_s), determinadas também por

elementos climáticas (temperatura máxima e mínima, radiação solar), propriedades físicas do solo e características de crescimento das plantas (como o índice de área foliar, IAF), (Pereira et al., 1997; Soares et al., 2001).

A escolha entre o Kc único ou dual depende do nível de precisão exigido (irrigações mais frequentes) e recursos computacionais e possibilidades de detalhamento de um número maior de variáveis, além da finalidade. O Kc único por incorporar as características da cultura e efeitos médios da evaporação é mais recomendado para manejos de irrigação com turnos de rega maiores e para fins de programação básica de irrigação e estudos hidrológicos (Allen et al., 1998). Segundo esses autores, uma curva de Kc único pode ser confeccionada a partir de, no mínimo, três valores de Kc determinados de dados médios (geralmente calculados em intervalos maiores que dez dias) em três (fase I, III e IV) das quatro fases distintas do ciclo da cultura (fase I, II, III e IV).

A duração dessas fases é determinada, preferencialmente, para cada região de interesse e seus intervalos são demarcados em função de características, tais como fração de cobertura do solo (f_c) ou índice de área foliar (IAF), altura da planta (h), estágio do florescimento e graus de maturação dos frutos e das folhas. A duração da fase inicial de crescimento, designada de fase I, é determinada para culturas com fração de cobertura (f_c) inferior a 10% (0,1) e a fase de crescimento vegetativo acentuado, fase II, vai até o início da fase de produção ou intermediária, fase III, quando a cultura começa a florescer e a f_c é máxima, variando entre 0,1 e 0,8, em culturas com altura (h) maior que 0,5 m. Imediatamente, a fase III começa a fase maturação, senescência ou fase final, fase IV, terminando ao final do ciclo de cultivo. A determinação do início da fase IV depende das práticas culturais, do tipo de cultura e da frequência de irrigação. Na curva do coeficiente de cultura (Kc) da fase I, os valores da curva de Kc (Kc_{ini}) são praticamente constantes e apresentam seu valor mínimo. Já na

fase II os valores da curva de K_c variam de forma linear, crescendo acentuadamente até a fase III em que, assim como na fase I, os valores de K_c (K_c int) são praticamente constantes, porém, apresentando K_c máximo. Na fase final, fase IV, ao contrário da fase II, os valores da curva de K_c variam de forma descendente e linear, até atingir, ao final do ciclo da cultura, o menor valor de K_c (K_c final), (Allen et al., 1998).

Apesar de serem considerados constantes na curva de K_c durante a fase inicial (K_{cini}), os valores de K_c nessa fase estão sujeitos aos efeitos de grandes variações, devido à frequência e à fração de molhamento, disponibilidade de água e textura do solo, o que reflete no maior valor do componente evaporativo ($K_e \cdot ETo$) (Allen et al., 1998). A evaporação direta da água no solo começa a ser limitada pelas características hidráulicas do solo, quando o conteúdo de água nas camadas superficiais do perfil do solo encontra-se abaixo de certo valor mínimo. Já o processo de transpiração pode continuar, mesmo quando a umidade do solo se encontra abaixo desse valor. Para a fase de cobertura incompleta da superfície do solo, o problema da modelagem da E_{Tc} é complexa, a menos que se considerem os componentes evaporação e transpiração separadamente (Pereira et al., 1997).

Os valores de K_c da fase inicial (K_{cini}) e da fase intermediária (K_{cint}) estão mais sujeitos às condições climáticas, às práticas culturais e aos efeitos aerodinâmicos, sendo tanto esses como o K_c da fase IV (K_{cfinal}) apresentados em tabelas no boletim da FAO, número 56, para as condições de clima subúmido. Portanto, estão sujeitos a correções conforme tabelas e equações de ajustes apresentadas para diversos tipos de cultura e condições climáticas (Allen et al., 1998).

Allen et al. (1998) apresentam, no boletim FAO 56, os valores de K_c tabelados das fases I, III e IV para uma gama de tipos de culturas diferentes e

procedimentos de ajuste para as condições e as situações locais distintas, em que não estão disponibilizadas maiores informações. Entretanto, esses mesmos autores afirmam que, apesar de as informações locais serem mais representativas, os valores encontrados não devem diferir dos tabelados em mais de 0,2. Andrade Júnior et al. (2008) determinaram, no município de Alvorada do Gurgueia, Piauí, com a E_{Tc} determinada por meio do balanço de água no solo, os K_c médios entre 0,15 a 0,75, respectivamente aos 12 e 150 dias após o plantio da cultivar BRS-Nordestina e o K_c máximo da mamoneira em consórcio com feijão na formação e no enchimento de vagens de 1,2. Já Curi & Campelo Júnior (2004), avaliando os K_c ao longo de várias fases de desenvolvimento da mamona, híbrido Íris, nas condições da Baixada Cuiabana (Santo Antônio do Leverger, MT), determinaram ET_m média do ciclo de $4,0 \text{ mm.dia}^{-1}$ e consumo médio acumulado de água de 439,67 mm, com K_c variando entre 0,15 e 1,37.

2.3 Radiação solar

A radiação é uma forma de energia decorrente das oscilações de campos eletromagnéticos. Essas oscilações podem ser consideradas como ondas que viajam da superfície solar através do espaço e que são caracterizadas pelo seu comprimento de onda (λ) e respectiva frequência (f). A radiação proveniente do sol se estende de $0,15 \mu\text{m}$ (ultravioleta) até, aproximadamente, $3,0 \mu\text{m}$ (próximo ao infravermelho), enquanto, no sistema Terra-Atmosfera, as ondas radiantes se estendem de $3,0 \mu\text{m}$ a $100 \mu\text{m}$, ou seja, no limite da radiação infravermelha (Liou, 1980).

A atmosfera é uma camada relativamente fina de gases e material particulado (aerossóis) que envolve a Terra. Cerca de 99% da massa da atmosfera está contida numa camada de 32 km. Essa camada é essencial para a vida e o funcionamento ordenado dos processos físicos e biológicos sobre a

Terra. A composição do ar não é constante nem no tempo, nem no espaço. O nitrogênio e o oxigênio ocupam até 99% do volume do ar seco e limpo e a maior parte do restante (1%) é ocupada pelo gás inerte argônio. O dióxido de carbono, o vapor d'água, o ozônio e os aerossóis ocorrem em pequenas concentrações, mas são importantes para os fenômenos meteorológicos. A atmosfera, que protege os organismos da exposição a níveis arriscados de radiação ultravioleta, contém os gases necessários para os processos vitais de respiração celular e fotossíntese (Liou, 1980).

2.3.1 Radiação solar incidente

Para um determinado local da superfície terrestre, a quantidade de radiação solar diária que chega ao topo da atmosfera de forma perpendicular é chamada de constante solar ($G_{sc} = 0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$ ou $R_a = 1367 \text{ W m}^{-2}$) e, dependendo do ângulo de incidência dos raios solares, que varia com a latitude do local, as estações do ano e o horário, recebe o nome de radiação solar extraterrestre (R_a). A radiação extraterrestre (R_a) pode ser estimada pela equação 1, (Allen et al., 1998).

$$R_a = \frac{24 \cdot (60)}{\pi} \cdot G_{sc} \cdot dr \cdot (\omega_s \sin\phi \sin\delta + \cos\phi \cos\delta \sin\omega_s) \quad (1)$$

em que: R_a é a radiação no topo da atmosfera ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); G_{sc} é a constante solar, $0,082 \text{ MJ m}^{-2} \text{ min}^{-1}$; dr é o inverso da distância relativa Terra-sol; ω_s o ângulo horário do nascer ou do por do sol (rad); ϕ a latitude do local (rad): (-) Sul e (+) Norte e δ a declinação solar (rad).

A radiação solar extraterrestre (R_a), ao atravessar a atmosfera, sofre os fenômenos seletivos de reflexão, difusão e absorção pelos gases atmosféricos, nuvens, partículas de poeira e cristais de sal (aerossóis). Parte dessa radiação, ao atingir a superfície do solo ou vegetação, é chamada de radiação solar incidente

(Rs), correspondente à soma da radiação solar que chega à superfície diretamente (radiação direta, Rdr) e da radiação solar resultante do processo de difusão na atmosfera (radiação solar difusa, Rdf). A radiação solar incidente pode ser estimada (Equação 2) pela fórmula de Angström-Prescott (Allen et al., 1998).

$$R_s = \left(a + b \frac{n}{N} \right) R_a \quad (2)$$

em que: R_s é a radiação solar incidente ($\text{MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$); n é o número de horas de brilho solar (h); N é a duração astronômica do dia (h), sendo n/N a razão de insolação e a e b são parâmetros de regressão que podem ser substituídos por $a = 0,25$ e $b = 0,50$, quando não se dispuser de dados de calibração.

Segundo Allen et al. (1998), parâmetros “a” e “b” da equação 2 expressam as frações da radiação solar extraterrestre (R_a) que chega na superfície do solo. Ou seja, para um dia de céu aberto, sem nuvens, 75% da R_a poderia chegar à superfície do solo na ausência de nebulosidade, fração essa denominada de radiação solar de dia de céu aberto ($R_{so} = 0,75 * R_a$), correspondente à soma das frações de radiação solar direta ($a * R_{dr} = 0,25$ de R_a) e da radiação solar difusa ($b * R_{df} = 50\%$ da R_a). Por outro lado, se o dia for nublado, mesmo com cobertura extremamente densa de nuvens, a fração radiação solar pode chegar à superfície da Terra apenas na forma de radiação solar difusa ($a * R_{df}$), correspondente a 25% da R_a ($a = 0,25$). Dessa forma, esses autores indicam as relações (n/N) e (R_s/R_{so}), ou seja, a razão de insolação e a relação entre a radiação solar incidente (R_s) e a radiação solar que chegaria à superfície sob condição de céu aberto, respectivamente, como forma de expressar a nebulosidade atmosférica. Em dias nublados, a relação (n/N) pode ser zero ($n = 0$) e, em dias de céu sem nuvens ($n = N$), pode ser um, sendo n

medido no heliógrafo e N calculado em função do ângulo horário do nascer ou do por do sol (ω_s , rad), variável com a posição do sol, latitude e períodos do ano. Já a relação de radiação de ondas curtas (R_s/R_{so}), varia entre aproximadamente 0,33 ($0,33 = 0,25/0,75$), em dias nublados e 1 ($0,75/0,75$), para dias de céu sem nuvens.

2.3.2 Radiação solar refletida e albedo

Do total de radiação que chega a uma superfície, parte dela pode ser imediatamente refletida, transmitida ou absorvida de forma diferenciada, dentro do espectro solar. A razão entre a radiação de ondas curtas refletida (R_r) que chega a essa superfície e a radiação incidente (R_s) é denominada coeficiente de reflexão ou albedo (α), um parâmetro fundamental na determinação do balanço de radiação à superfície (Allen et al., 1998; Leitão & Oliveira, 2000a; Leitão & Oliveira, 2000b). A radiação solar incidente à superfície e a refletida são usualmente monitoradas por meio de sensores específicos de medição de radiação de ondas curtas, denominados de piranômetros.

O saldo de radiação de ondas curtas e, conseqüentemente, o albedo sobre determinada superfície vegetada estão relacionados com o tipo de cobertura do solo, a umidade do solo, a espécie cultivada, o ângulo de incidência dos raios solares, a época do ano e a hora do dia e com o tipo e quantidade de radiação (Galvani et al., 2002). Em algumas superfícies, o albedo pode ser tão grande quanto 0,95 para superfícies com neve recém-precipitado e tão pequeno quanto 0,05, para solo descoberto úmido (Allen et al., 1998).

Nesse mesmo aspecto Leitão & Oliveira (2000b), observaram que o albedo de uma superfície vegetada varia ao longo do período diurno, em função do ângulo de elevação do sol, apresentando valores elevados após o nascer e antes do pôr do sol, enquanto seus menores valores ocorrem em torno do meio

dia. Segundo esses autores, ao longo do ciclo de desenvolvimento da cultura, o albedo varia em função do grau de cobertura vegetal, da umidade e da textura do solo, das condições de umidade do ar e da quantidade e tipo de cobertura de nuvens. Destacam, ainda, que, se, na fase inicial da cultura, quando o solo ainda não estiver totalmente coberto e apresentar textura arenosa na superfície, haverá maior reflexão e à medida que a cultura se desenvolve, passando a cobrir o solo, o albedo diminui. O albedo pode ser influenciado também pela irrigação e, por consequência, pode afetar diretamente o balanço de radiação à superfície e, indiretamente, o balanço de energia, o que pode produzir erros significativos, principalmente nas estimativas da evapotranspiração (Leitão & Oliveira, 2000a; Leitão & Oliveira, 2000b).

2.3.3 Balanço de energia e razão de Bowen

Após o descobrimento da natureza energética do processo de evaporação, no século XVI, e, em seguida, com o desenvolvimento das bases para o entendimento do balanço de energia na atmosfera terrestre, vários estudos se iniciaram, visando o entendimento e a correlação entre os processos evaporação, transpiração e fluxo de energia, muitos dos quais implícitos em trabalhos de agronomia e de climatologia, já no século XIX (Sedyama, 1996). Segundo esse mesmo autor, os trabalhos de Schmidt e, posteriormente, de Ångström foram os precursores de um estudo detalhado do balanço de energia e evaporação. Ambos entendiam que o conhecimento do fluxo de energia envolvida na evaporação era de fundamental importância. Foram, então, avaliados os componentes da radiação solar à superfície e sua componente refletida (albedo), a radiação de ondas longas das nuvens e da superfície, o fluxo de calor no solo e a transferência de calor sensível. Essas contribuições vieram numa época em que rápidos avanços científicos e tecnológicos estavam

acontecendo sobre o entendimento da radiação e, com as descobertas de Stefan e Boltzmann e o desenvolvimento adicional dos procedimentos do balanço de energia por intermédio dos trabalhos de Schmidt, em 1915, de Bowen, em 1926 e de outros, iniciou-se a era moderna dos estudos dos fenômenos da evaporação.

O balanço de energia das superfícies vegetadas permite dimensionar as trocas de massa e energia no sistema solo-planta-atmosfera, por meio do estudo da partição do saldo de radiação nos diversos processos que ocorrem na cultura. O método autoriza que se avaliem as alterações no microclima da vegetação, em função dos estádios de desenvolvimento da cultura e das condições de solo e da atmosfera (Fontana et al., 1991).

O balanço de energia tem como base a contabilização dos diversos tipos de energia em interação com a superfície terrestre, sendo a energia solar a principal fonte e o saldo resultante, denominado de saldo de radiação (R_n), normalmente positivo durante o dia e negativo durante a noite, definido como a diferença entre as perdas e os ganhos de energia nessa superfície (Sediyama, 1996; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998).

Esse balanço de energia pode ser determinado pela soma do balanço de ondas curtas (BOC) e longas (BOL), muitas vezes indistintamente denominado de balanço de radiação, ou pela partição do saldo de radiação (R_n) nos componentes de energia disponibilizados aos processos de evaporação (fluxo de calor latente, LE), de aquecimento do ar (fluxo de calor sensível do ar, H), do solo (fluxo de calor sensível do solo, G) e das plantas (calor sensível armazenado no dossel das plantas, P) e para o processo de fotossíntese (energia fotoquímica, F), conforme as Equações 3 e 4, (Sediyama, 1996; Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998). Normalmente, a unidade de fluxo de energia, pelo sistema internacional de unidades, é dada em $W\ m^{-2}$ (para uma medida instantânea) ou $MJ\ m^{-2}\ d^{-1}$ (para uma medida diária).

$$R_n = BOC + BOL \quad (3)$$

$$R_n = LE + H + G + P + F \quad (4)$$

Encontram-se também outras unidades, como, por exemplo, $\text{cal cm}^{-2} \text{d}^{-1}$, ou, mesmo, na forma do equivalente de evaporação, mm d^{-1} , obtida multiplicando-se o valor em $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ pelo fator 0,408, correspondente ao inverso do calor latente de evaporação ($1/\lambda$), normalmente uma função fraca entre 10° e 30°C (Pereira et al., 1997; Allen et al., 1998), sendo λ em MJ kg^{-1} e T a temperatura, em $^\circ\text{C}$, Equação 5.

$$\lambda = 2,501 - (0,002361) \cdot T \quad (5)$$

O balanço de radiação de ondas curtas (BOC, Equação 3) é o saldo entre a radiação solar incidente (R_s) e a radiação refletida (R_r) numa superfície ou pode ser facilmente determinado em função apenas de R_s e do albedo (α) (Equação 6):

$$BOC = R_s - R_r = (1 - \alpha)R_s \quad (6)$$

Entretanto, a determinação da parte (BOL) proveniente das trocas de radiação de ondas longas entre a superfície e a atmosfera, a qual é comumente estimada pela fórmula de Brunt, Equação 7, tendo como base a lei de Stefan-Boltzmann, depende de várias aproximações, tais como considerar a temperatura do ar (T , temperatura média diária absoluta, em K) representativa da temperatura da superfície, a emissividade atmosférica (ϵ_a) como função da pressão atual de vapor ($[a + b(e_a)^{0.5}]$, e_a em kPa, mmHg, mbar...) e a interferência de nuvens ($[c + d(n/N)]$), estimada pela razão de insolação (n/N), sendo “a, b, c e d” os parâmetros de ajuste, conforme Pereira et al.(1997).

$$BOL = -[a + b(e_a)^{0.5}] \sigma T^4 [c + d \frac{n}{N}] \quad (7)$$

Na partição do balanço de energia (Equação 4), o componente do processo fotossintético (F) não supera 3% do saldo de radiação (R_n), sendo esse

valor relativamente maior para períodos curtos de tempo, como pela manhã ou à tarde, dependendo, ainda, do estágio de desenvolvimento da cultura. O calor armazenado nas plantas (P) depende da vegetação, podendo ser desprezível no caso de culturas anuais, com exceção da vegetação de grande porte, como as florestas, podendo P variar entre 3% e 10% de Rn. Assim, devido ao erro associado às estimativas e aos baixos valores alcançados, os termos P e F podem ser considerados desprezíveis na Equação 4 (Alfonsi et al., 1986; Fontana et al., 1991) resultando a Equação 8:

$$R_n = LE + H + G \quad (8)$$

Na prática, o uso mais comum da equação da partição do balanço de energia é para estimar (LE) e, por conseguinte, o fluxo de calor sensível (H) e a evapotranspiração. A solução dessa equação é obtida por meio de medições do saldo de radiação (Rn) e do fluxo de calor no solo (G) e de estimativas dos fluxos turbulentos LE e H, a partir da razão entre o fluxo de calor sensível (H) e o fluxo de calor latente (LE) H/LE, proposta por Bowen (1926), Equação 9. Esta relação tornou-se conhecida como razão de Bowen (β) e tem sido largamente utilizada em estudos de fluxo de calor, em estimativas de evapotranspiração e, também, para estimar a resistência imposta pelo sistema planta-atmosfera ao fluxo de vapor d'água (Fontana et al., 1991).

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (9)$$

No balanço de energia determinado por meio da razão de Bowen (BERB), as medições de Rn e G são, geralmente, realizadas por meio de instrumentos chamados saldo-radiômetros ou fluxímetros, respectivamente, os quais, graças aos avanços dos instrumentos eletrônicos e computacionais nas décadas de 1960 e 70, puderam ser aperfeiçoados (Sediyama, 1996). Por outro lado, os fluxos LE e H, individualmente, são difíceis de serem mensurados

diretamente (Cunha & Bergamaschi, 1994). Dessa forma, a equação prática da razão de Bowen pode ser definida, baseada: (1) no método aerodinâmico (extensão da Lei de Fick); (2) nos gradientes das propriedades psicrométricas do ar atmosférico; (3) na hipótese da similaridade, isto é, a ideia de que no mesmo escoamento os coeficientes de transporte turbulento das diferentes propriedades atmosféricas são iguais e (4) nos fluxos verticais (convectivos) (Pereira et al., 1997). Seguindo esse método e fazendo-se as devidas considerações e cálculos necessários, chega-se a uma das formas de determinação prática da razão de Bowen, a Equação 10:

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (10)$$

em que: γ é o coeficiente psicrométrico do ar; ΔT e Δe_a são as diferenças de temperatura e pressão atual de vapor, em dois níveis, Z_1 e Z_2 , acima da superfície vegetada, respectivamente. Poderia ser também em função das temperaturas de bulbo seco e de bulbo molhado ou, mesmo, da concentração de vapor d'água nesses dois níveis.

Nesse modelo (BERB), o ganho de energia por advecção (fluxos horizontais), geralmente, é omitido em função das dificuldades de quantificá-lo, podendo causar incorreções na aplicação do método do balanço de energia e, conseqüentemente, na estimativa do volume de água consumido por uma comunidade vegetal. Entretanto, a advecção pode ser minimizada quando as medidas são realizadas próximo da superfície da cultura e com uma adequada bordadura de altura uniforme, a barlavento (Chang, 1971).

Assim, determinados os valores da razão de Bowen e feitas as devidas substituições e rearranjos na equação do balanço de energia (Equação 8), determinam-se os fluxos LE e H:

$$LE = -\frac{Rn+G}{1+\beta} \quad (11)$$

$$H = -\frac{\beta}{1+\beta} \cdot (Rn-G) \quad (12)$$

sendo, β diferente de -1 e o sinal negativo nas equações, devido aos sentidos dos fluxos indicando sentido de entrada (positivo) ou saída (negativo) de fluxos verticais da camada atmosférica entre Z_1 e Z_2 .

O método da razão de Bowen apresenta as seguintes vantagens: é direto, possui medições simples, integra LE de extensas áreas (centenas e milhares de metros quadrados), estima LE em pequenos períodos de tempo (menor que uma hora) e fornece medições contínuas. As desvantagens desse método são: sensibilidades a erros sistemáticos dos instrumentos que medem os gradientes dos termos do balanço de energia; possibilidade de descontinuidade dos dados, quando o valor da razão de Bowen se aproxima de -1 e requerer uma adequada bordadura para assegurar as considerações assumidas pelo método (Todd et al., 2000). Essa bordadura (“fetch”) deve estar numa distância em relação à direção predominante do vento, tal que a altura de medida dos sensores esteja numa ordem de 1:100 em relação a ela (Monteith & Unsworth, 1990; Horst & Weil, 1992). Entretanto, estudos demonstram que as relações entre 1:47 e 1:12 foram adequadas para superfícies rugosas, como florestas, não sendo recomendada para superfícies heterogêneas e declivosas (Brutsaert, 1982).

Alguns autores, tendo em vista os erros de estimativa dos fluxos inerentes ao erro instrumental dos sensores, tais como aqueles em que as medidas de gradientes são menores que a resolução dos sensores, recomendam eliminar valores de β abaixo de -0,75 ou $-1,3 < \beta < -0,7$ (Ortega-Farias et al., 1996; Unland et al., 1996). Dependendo da exatidão de medida dos sensores usados e, para uma adequada estimativa da evapotranspiração, o BERB requer

consideráveis gradientes de pressão de vapor d'água ($>0,03 \text{ kPa m}^{-1}$) e temperatura do ar, comuns em ambiente com forte advecção (Perez et al., 1999). Ou, ainda, devido às diferenças nos processos de transferência de energia e de estabilidade atmosférica entre os períodos do dia e da noite, alguns autores consideram reais apenas os dados de gradientes ou amostragens calculadas no período do dia, excluindo as demais medidas (Heilman & Brittin, 1989; Cellier et al., 1996; Unland et al., 1996).

A eficiência do BERB é maior em culturas de pequeno porte, como trigo e milho (Mokate et al., 1995; Cunha et al., 1996). Mesmo assim, o BERB tem sido utilizado em culturas de grande porte, porém, com menor frequência, devido às seguintes restrições do método: i) a igualdade entre os coeficientes de transferência turbulenta de calor sensível (K_H) e latente (K_E), válida apenas para condições de estabilidade atmosférica próximo à neutralidade e ii) as medidas de temperatura do ar e pressão de vapor d'água devem ser efetuadas dentro da camada limite superficial (vegetação-atmosfera), com ausência de gradientes horizontais, implicando na necessidade de uma bordadura adequada (fetch). Este método funciona bem em condições úmidas, o que não ocorre em condições secas porque a razão de Bowen (β) é, geralmente, alta e positiva, enquanto, na presença de advecção de energia, ela é negativa (Angus & Watts, 1984).

A condição hídrica da superfície evaporante afeta diretamente o valor de β , interferindo, assim, na partição do saldo de radiação (R_n). Dessa maneira, quando a superfície apresentar restrição hídrica, o valor de β será elevado, devido à maior parte de R_n ser utilizada no aquecimento do ar (H). Caso a umidade da superfície seja elevada, uma parte maior de R_n será destinada para a evaporação de água (LE) e, conseqüentemente, o valor β será reduzido. Valendo-se do mesmo raciocínio, Pereira et al. (1997) concluíram que o sinal de β , em uma superfície evaporante, depende apenas do sinal do calor sensível (H),

pois consideram-se como negativos os fluxos da superfície para a atmosfera que a envolve, e positivo no sentido inverso. Portanto, quando β é negativo, o valor H é positivo, significando que está ocorrendo transporte de calor sensível do ar mais quente para a superfície mais fria, caracterizando uma condição de convecção. Nesta situação, R_n pode, até mesmo, ser superado pelo valor de LE , pois o calor sensível transportado representa um acréscimo na energia disponível para o processo de evaporação.

Se o solo estiver totalmente coberto, a porcentagem de G gira em torno de 5% a 10% do saldo de radiação (R_n); caso o solo esteja coberto parcialmente, este valor aumenta bastante, podendo variar de 20% a 40% do saldo de radiação (Kustas et al., 2000). A partição do saldo de radiação em G está relacionada à cobertura vegetal, à umidade do solo e à posição dos fluxímetros no solo, ou seja, o fluxo de calor no solo não pode ser medido diretamente na superfície do solo, pois o fluxímetro não pode ficar exposto diretamente à radiação solar (Silans et al., 1997); por este motivo, Stannard et al. (1994) sugeriram a utilização de, pelo menos, três sensores: um na área coberta pela vegetação, outro na área exposta e um terceiro na área intermediária, posicionado entre o solo exposto e a cobertura vegetal. Dependendo também da vegetação e do estágio de desenvolvimento, o fluxo de calor sensível do solo (G) é quantitativamente pequeno, principalmente devido à cobertura do solo pelas plantas (o que evita o aquecimento do mesmo pelos raios solares) (Pereira et al., 1997).

Estudos da variação diária dos valores dos componentes do balanço de energia (R_n , LE , H e G), em três regiões distintas dos Estados Unidos, permitiram que Thompson (1998) fizesse algumas generalizações: em plantações em crescimento, LE correspondeu a uma fração de R_n entre 80% e 85%; em desertos, a curva de LE é próximo de zero e a de H é maior que G ,

situação similar a de locais pavimentados. Porém, nessa, as curvas de G e H são aproximadamente iguais; em solo coberto com resíduos de folhas (serrapilheira), as folhagens servem como um protetor contra a radiação solar e mantém os valores de G baixos (quando secas, as folhas agem como uma barreira à evaporação d'água e a curva de H é que se torna predominante); em corpos d'água (lagos ou barragens), as curvas de LE e G são maiores que a de H, isso devido, possivelmente, às temperaturas da água e do ar e G maior devido à transparência e ao armazenamento de calor pela água (alto calor específico da água); em locais cobertos por gelo ou neve (maiores altitudes e latitudes, ou médias), as curvas dos componentes são pequenas sendo que LE e G se aproximam de zero e H e Rn são aproximadamente iguais, porém, com sinais opostos (com H positivo e Rn negativo), devido, possivelmente, ao alto albedo, às baixas temperaturas do ar próximo ao gelo ou neve e às baixas pressões de vapor.

Diversos trabalhos recentes têm mostrado a aplicabilidade do método balanço de energia razão de Bowen (BERB), em estudos visando à determinação do consumo de água pelas culturas de baixo e pequeno porte (Kobayashi, 2001; Hayashi et al., 2002; Teixeira et al., 2002; Marin, 2003; Moura et al., 2003). Essa metodologia do BERB já foi avaliada e recomendada por diferentes autores, a partir de sistemas automáticos de determinação da razão de Bowen (Kroon, 1989; Moura & Martins, 1992; Steduto & Hsiao, 1998; Azevedo, 1999).

Entretanto, devido à precisão e Pa simplicidade operacional em relação aos demais métodos de estimativa da evapotranspiração (Trambouze et al., 1998; Azevedo et al., 2003; Silva et al., 2006), os sistemas automáticos disponíveis comercialmente (que dispõem de instrumentação para medições locais, com alta frequência, do saldo de radiação, gradientes verticais de temperatura e pressão de vapor do ar) apresentam elevado custo, podendo ser substituídos por

psicrômetros confeccionados a partir de termopares (Cunha et al., 1996; Alves & Pereira, 2000).

Todos esses autores evidenciaram que o saldo de radiação foi utilizado prioritariamente como calor latente (evapotranspiração), em proporções que foram afetadas pela disponibilidade de água no solo e pelas condições meteorológicas regionais.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização geral

3.1.1 Localização

O experimento com o cultivo de mamona (*Ricinus communis* L.) da variedade AL Guarany 2002 (seleção UFLA) foi instalado e conduzido na área de pesquisa do Setor de Agrometeorologia e Climatologia, no Departamento de Engenharia da Universidade Federal de Lavras (UFLA), em Lavras, no período entre 24/01 a 30/08/2008. O município de Lavras situa-se no sul do estado de Minas Gerais, tendo como referência as seguintes coordenadas geográficas: latitude 21°14'S, longitude 45°00'W e altitude 918,841 m.

O cultivo da mamona foi estabelecido em uma área experimental de, aproximadamente, 0,07 ha, sendo circundada por bosques, a própria bordadura, cultivo de café, construções e estufas, apresentando topografia uniforme e declividade inferior a 2%, em sentido perpendicular às linhas de plantio (nordeste para sudoeste). A cultura foi implantada em cinco linhas de plantio, irrigadas por sistema de irrigação localizada por gotejamento e monitoradas por tensiômetros, sendo instalada no centro da área experimental, uma torre metálica para suporte de sensores de medida (estação meteorológica), conforme representação da Figura 1.

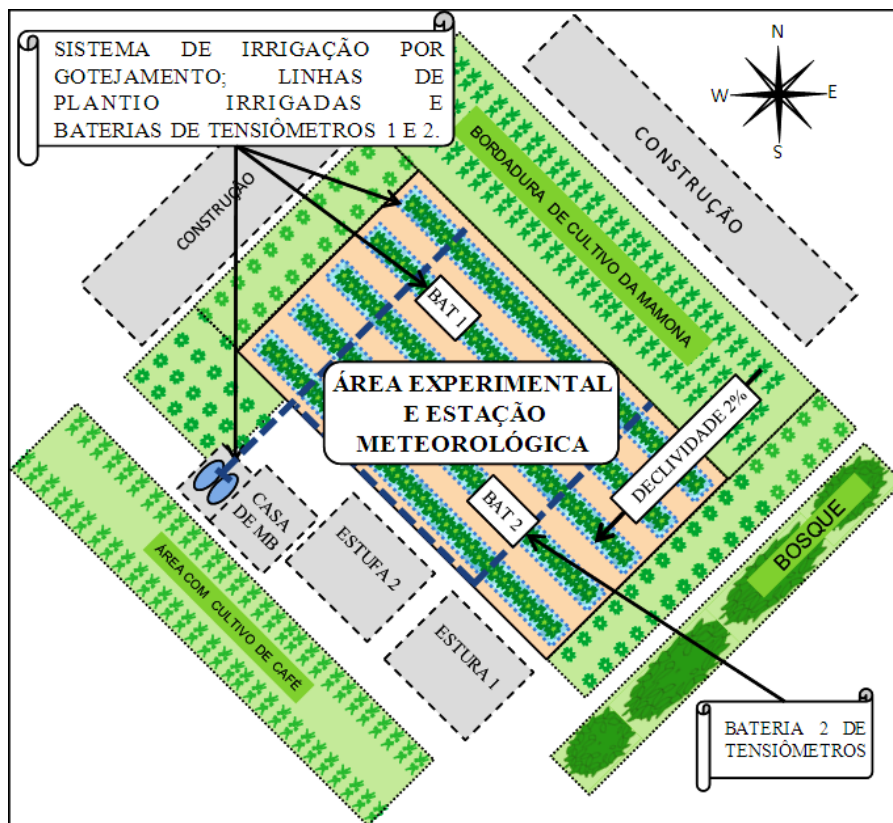


FIGURA 1 Croqui ilustrativo da área experimental, demonstrando orientação de plantio, localização da estação meteorológica, sistema de irrigação, bateria de tensiômetros e área circunvizinha.

3.1.2 Clima e base de dados

Segundo a classificação climática proposta por Köppen (Dantas et al., 2007), baseado nas Normais Climatológicas (1961 a 1990) (Brasil, 1992), o clima de Lavras é classificado como Cwa, ou seja, clima temperado chuvoso com inverno seco e chuvas predominantes no verão. A temperatura do ar média anual é de 19,4°C, a umidade relativa do ar média anual é de 76,2%, a

precipitação total anual de 1.529,7 mm e a evaporação total anual de 1.043,3 mm.

Neste estudo, os dados referentes aos elementos meteorológicos tiveram duas fontes: as mensuradas na própria área experimental, obtidas por uma estação meteorológica instalada no centro da área (Figura 1) e as mensuradas nas proximidades dessa área, pela Estação Climatológica Principal (ECP), pertencente à rede de observações meteorológicas de superfície do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), em convênio com a UFLA.

Os dados acessados da ECP contribuíram para o cálculo da evapotranspiração de referência (ET_o) e a caracterização das condições meteorológicas no período experimental. Foram obtidos dados de temperatura, umidade relativa, pressão atmosférica e velocidade do vento, mensurados em três horários do dia (09h00, 15h00 e 21h00 do horário local), além de insolação e precipitação diária. Já os dados coletados da estação meteorológica, na área experimental, foram utilizados para o cálculo do balanço de energia e evapotranspiração na mamona.

3.1.3 Solo

O tipo de solo predominante na região em que esse experimento foi conduzido é classificado como Latossolo Vermelho Distroférrico (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999). A implantação do experimento foi iniciada pelo preparo convencional do solo, consistindo seqüencialmente de uma subsolagem de cerca de 0,40 m de profundidade, seguida por uma aração e gradagem com arado de discos a 0,20 m profundidade e plantio de mudas de mamona, previamente formadas.

Amostras de solo da área experimental foram coletadas e levadas ao Laboratório do Departamento de Ciência do Solo da UFLA para análises

química e física, e para a obtenção da curva de retenção de água no solo. As análises, química e física, das amostras coletadas nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m (Tabela 1) indicaram um solo de textura argilosa e a não necessidade de correção do pH (Ribeiro et al., 1999).

TABELA 1 Resultados das análises químicas e físicas de duas amostras de solo da área experimental, coletadas nas camadas de 0 a 0,2 e 0,2 a 0,4 m.

Símbolo	Descrição	Unidade	0 - 0,20 m	0,20 - 0,40 m
pH	Em água, KCl e CaCl ₂	-	7,1	7,2
P	Fósforo (Extr. Mehlich 1)	mg/dm ³	5,8	2,8
K	Potássio(Extr. Mehlich 1)	mg/dm ³	61	50
Ca ²⁺	Cálcio (Extr.: KCl)	cmol _c /dm ³	5,8	5,3
Mg ²⁺	Magnésio (Extr.: KCl)	cmol _c /dm ³	0,3	0,7
Al ³⁺	Alumínio (Extr.: KCl)	cmol _c /dm ³	0,0	0,0
H+Al	Ac. Potencial (Extr.: SMP)	cmol _c /dm ³	1,0	1,1
SB	Soma de bases	cmol _c /dm ³	6,3	6,1
t	CTC efetiva	cmol _c /dm ³	6,3	6,1
T	CTC a pH=7,0	cmol _c /dm ³	7,3	7,2
V	Índ. de sat. de bases	%	86,2	84,8
m	Índ. de sat. de alumínio	%	0,0	0,0
Zn	Zinco(Extr. Mehlich 1)	mg/dm ³	2,9	2,3
Mn	Manganês(Extr. Mehlich 1)	mg/dm ³	58,2	50,9
Cu	Cobre(Extr. Mehlich 1)	mg/dm ³	3,0	3,0
B	Boro(Extr.: água quente)	mg/dm ³	0,3	0,3
S	Enxofre(Extr.: PO ₄ Ca em ác.acético)	mg/dm ³	8,0	22,0
Mo	Mat. Orgânica	dag/kg	2,5	2,1
P-rem	Fósforo remanescente	mg/L	3,9	3,3
Areia	Areia	dag/kg	18,0	15,0
Silte	Silte	dag/kg	34,0	31,0
Argila	Argila	dag/kg	48,0	54,0
Textura	Classificação textural	-	Argilosa	Argilosa

Para a determinação da curva de retenção de água no solo (Figura 2), segundo modelo de Genuchten (1980), amostras foram coletadas nas camadas

de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, determinando-se, em laboratório, oito pares de pontos coordenados de tensão e umidade do solo. Empregando-se o modelo computacional SWRC, desenvolvido por Dourado Neto et al. (1995), determinaram-se as curvas em cada camada, Equações 13 e 14, respectivamente.

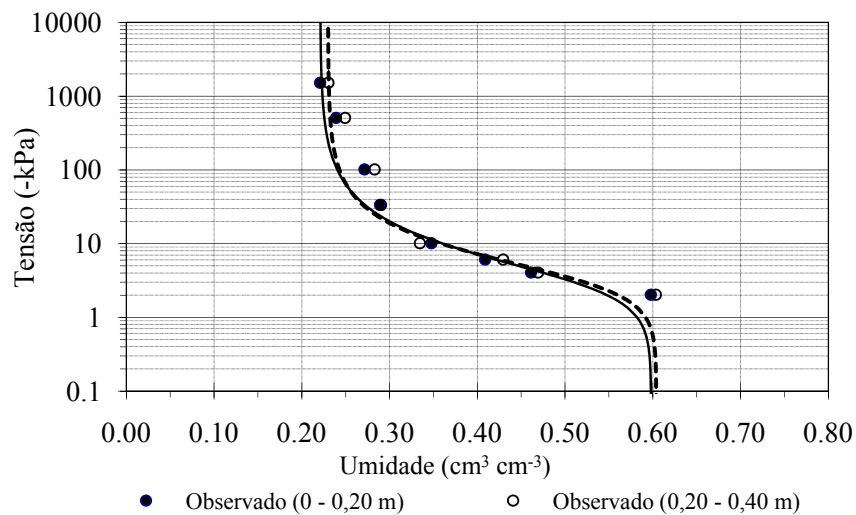


FIGURA 2 Curva de retenção de água no solo, em duas camadas, de 0 a 0,20 e de 0,20 a 0,40 m.

$$\theta = 0,221 + \frac{(0,598 - 0,221)}{[1 + (0,288 \cdot |\Psi_m|)^{1,879}]^{0,468}} \quad r^2 = 0,962 \quad (13)$$

$$\theta = 0,230 + \frac{(0,604 - 0,230)}{[1 + (0,265 \cdot |\Psi_m|)^{2,024}]^{0,506}} \quad r^2 = 0,957 \quad (14)$$

em que,

θ - umidade do solo atual (cm³ cm⁻³);

Ψ_m - tensão ou potencial matricial da água no solo (kPa);

r^2 - coeficiente de determinação estatístico.

A tensão, ou o potencial matricial (Ψ_m), da água do solo na capacidade de campo (θ_{cc}) foi considerada de 10 kPa (Carvalho et al, 1996), correspondentes às umidades de 0,361 e 0,359 $\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$ nas camadas de 0 a 0,20 m e de 0,20 a 0,40 m, respectivamente.

3.1.4 Formação de mudas, plantio e tratos culturais

O plantio da mamona foi realizado, primeiramente, com sementes em dois plantios sucessivos sem êxito (setembro e novembro de 2007). Nesses plantios, as sementes não emergiam do solo ou, se emergiam, não se desenvolviam. Após amostra de algumas plantas pré-emergidas, constatou-se que a área estava infestada com fungo de solo do gênero *Fusarium*. Assim, devido à dificuldade ou à falta de meios de controle químico desse fungo, a alternativa adotada foi a produção de mudas.

A formação das mudas foi realizada em viveiro, tendo este processo ocorrido em duas etapas: uma de pré-germinação e a outra de formação da muda propriamente dita. Na etapa de pré-germinação, as sementes foram semeadas na profundidade e espaçamentos de 0,05 m, respectivamente, em bandejas plásticas de 0,3 x 0,6 x 0,15 m, preenchidas com camada de 0,1m de areia fina umedecidas diariamente com uso de um regador manual. O ambiente do viveiro apresentou-se com pouca flutuação de temperatura (entre 20° e 25°C).

Após uma semana, iniciou-se a formação de mudas, quando essas, apresentaram raízes primárias com mais de 0,02 m, sendo transplantadas, a 0,05m de profundidade, para tubetes de 120 mL preenchidos com substrato comercial Plantmax[®]. Os tubetes foram mantidos suspensos por bancada de malha de arame de 1,0 x 10,0 x 1,0 m sobre abrigo de sombrite com capacidade

de 50% da interceptação de luz solar e as mudas irrigadas por sistema de microaspersão em suspensão. Essa etapa terminou com as mudas atingindo mais de 0,1 m de altura e 0,005 m de diâmetro de caule, quando, por fim, foram transplantadas em definitivo para o campo experimental.

Em campo, com o solo já preparado, as mudas foram plantadas em cinco fileiras espaçadas de 2,40 m, contendo, cada uma, aproximadamente setenta covas abertas manualmente, com enxada, na profundidade média de 0,15 m e espaçadas de 0,75 m. Imediatamente ao plantio das mudas, foi realizada a adubação de plantio na dosagem de 0,05 kg/cova (300 kg ha^{-1}) do adubo formulado NPK 8-28-16, distribuído em dois sulcos transversais às linhas de plantio, cada um deles distanciados a 0,10 m da muda, à profundidade de 0,05 m em média e cobertos com terra, após distribuição do adubo.

O controle de plantas daninhas no campo foi feito manualmente, com enxada e o ataque de pragas e de doenças não foi significativo, ao ponto de exigir o controle químico recomendado. A adubação de cobertura, realizada 30 dias após o plantio, com 0,045 kg de sulfato de amônio por planta e os demais tratamentos culturais seguiram os recomendados para a cultura, conforme Rodrigues Filho (2000).

3.1.5 Sistema de irrigação e manejo

O sistema de irrigação utilizado foi o gotejamento, instalado com os seguintes componentes: unidade de bombeamento, filtro de discos, manômetro, válvula reguladora de pressão, temporizador digital (*timer*), linha principal e lateral, registros e acessórios. As linhas laterais de 16 mm de diâmetros, compostas gotejadores autocompensantes inclusos, espaçados de 0,75 m e operaram à vazão e pressão nominal de $2,2 \text{ L h}^{-1}$ e 200 kPa, respectivamente. As linhas laterais foram distribuídas na linha de plantio com gotejadores entre duas

plantas, formando uma faixa molhada (fw) de 33,3% mantida praticamente constante (0,8 m de diâmetro molhado por 2,4 m de espaçamento entre linhas).

O momento de irrigação foi definido pelo potencial matricial da água no solo, medido em tensiômetros instalados a 0,30 m de profundidade. As irrigações foram realizadas toda vez que o potencial mátrico a 0,30 m de profundidade atingisse o valor de 15 kPa, considerando a umidade na capacidade de campo como sendo de 10 kPa (Carvalho et al., 1996). Foram instaladas duas baterias de tensiômetros na profundidade de 0,30 e 0,40 m, em dois locais da área experimental (na segunda e na quarta linha de plantio, em sentido diagonal). As leituras dos tensiômetros foram realizadas diariamente entre seis e oito horas da manhã, utilizando-se um leitor digital de punção (tensímetro). A lâmina de irrigação e o tempo de aplicação foram calculados com base nas Equações 15, 16 e 17.

$$LL = (\theta_{cc} - \theta_a) \cdot z \cdot fw \quad (15)$$

$$LB = \frac{LL}{Ea \cdot CUC} \quad (16)$$

$$t = \frac{LB \cdot Ap}{e \cdot q} \quad (17)$$

em que:

LB - lâmina bruta de irrigação (mm);

θ_{cc} - umidade do solo na capacidade de campo ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

θ_a - umidade atual do solo no momento de irrigação ($\text{cm}^3 \text{cm}^{-3}$);

z - profundidade efetiva do sistema radicular (mm);

fw - fração de área molhada (0 a 1);

LL - lâmina líquida de irrigação (mm);

Ea - eficiência de aplicação de água do sistema de irrigação (0 a 1);

CUC - coeficiente de uniformidade do sistema de irrigação (0 a 1);

- t - tempo de irrigação (horas);
- A_p - área útil ocupada por planta (m^2);
- e - número de emissores (gotejadores) por planta;
- q - vazão média dos emissores (gotejadores) ($L h^{-1}$).

A eficiência de aplicação de água pelo sistema de irrigação (E_a) foi considerada de 90%, conforme Bernardo et al. (2005) e o coeficiente de uniformidade de Christiansen (CUC) avaliado em 95%, conforme método proposto por Keller e Karmeli, em 1975 (Mantovani et al., 2006).

3.1.6 Instalação do sistema de balanço de energia

Para medições e cálculo dos componentes do balanço de energia pelo método da razão de Bowen, sensores de saldo de radiação (R_n), temperatura e umidade relativa em dois níveis (Z_1 e Z_2), fluxo de radiação solar incidente (R_s) e refletida (R_r) e sistema automático de aquisição de dados foram instalados sobre uma torre metálica no cento da área cultivada (Figura 3).

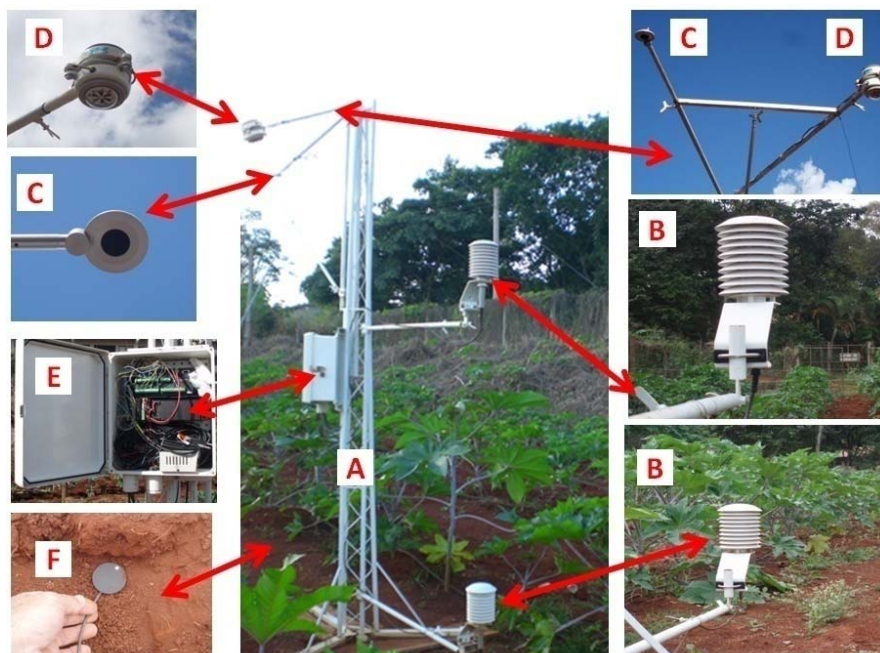


FIGURA 3 Torre suporte (A) dos sensores de temperatura e umidade relativa (B), saldo radiômetro (C), piranômetros de radiação solar incidente e refletida (D), sistema de aquisição de dados (E) e fluxímetro (F).

O sensor de saldo de radiação (R_n), modelo NRLITE-L25, da marca Kipp & Zonen, foi instalado na parte superior da torre em um braço metálico horizontal de 1,5 m, a 3,0 m do solo e posicionado acima da linha de plantio voltado para a direção norte, para evitar o efeito do sombreamento. O sensor de fluxo de calor do solo (G), fluxímetro, da marca Campbell Scientific, Inc., modelo HFT3, foi instalado no solo, a 0,08 m de profundidade, próximo ao alinhamento da projeção vertical do sensor do saldo de radiação.

Os sensores (piranômetros) de radiação solar incidente (R_s) e refletida (R_r) foram acoplados juntos e instalados também na parte superior da torre em

um braço metálico horizontal de 1,5m, a 3,0m de altura do solo, voltado para a direção noroeste, sendo um instalado voltado para cima interceptando a radiação solar incidente e o outro, acoplado a este, voltado para o dossel da cultura, interceptando a radiação solar refletida. Esses piranômetros de termopilha estrela são da marca Theodor Friedrichs.

Os pares de sensores de temperatura e umidade relativa foram instalados sobre a torre metálica, do lado oposto aos radiômetros, em dois braços metálicos horizontais de 1,5 m, voltados para a direção central da entrelinha de plantio, na posição central da cultura em dois níveis: Z1 a 0,5 m de altura do solo e Z2 a 1,5 m. Esses sensores são da marca Vaisala, modelo HMP45C-L20, instalados em abrigos higrotermométricos. O sistema automático de aquisição de dados, Datalogger modelo CR -1000, foi fixado na parte mediana e central da estrutura da torre dentro de uma caixa metálica selada, ambos de fabricação pela Campbell Scientific, Inc. Os dados foram armazenados a cada 10 minutos.

3.2 Balanço de energia e razão de Bowen

O estudo do balanço de energia pelo método da razão de Bowen na cultura da mamona foi realizado no período compreendido entre 14/02 a 03/06/2008, correspondentes aos 22 e 132 dias após o plantio (DAP), respectivamente.

As alturas de posições dos sensores de temperatura e umidade relativa (nos níveis Z1 e Z2, respectivamente), dos radiômetros, o saldo radiômetro e os sentidos dos componentes do balanço de energia estão representados na Figura 4.

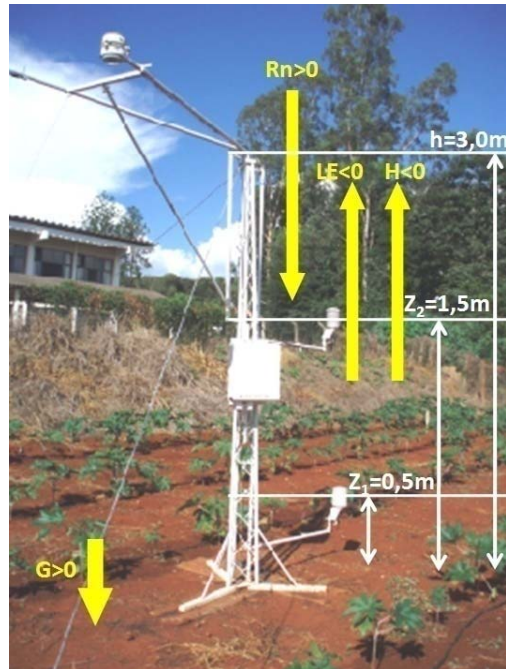


FIGURA 4 Representação dos sentidos positivos dos fluxos do saldo de radiação (R_n) e fluxo de calor no solo (G), e negativos dos fluxos de calor latente de evaporação (LE) e fluxo de calor sensível (H), normalmente de ocorrência durante o dia, e das alturas de instalação dos sensores de temperatura e umidade relativa do ar (em dois níveis, inferior Z_1 , e superior, Z_2), radiômetros e saldo radiômetros.

A partir das medições do saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível no solo (G), pressão atmosférica (p) e das temperaturas (T) e umidades relativas (UR), medidas em dois níveis no dossel da cultura (Z_1 e Z_2), utilizando-se a Equação 18, referente ao balanço de energia, foram calculados os fluxos de calor latente (LE) e de calor sensível do ar (H), segundo o método da razão de Bowen (β) (Equação 19) (Bowen, 1926), conforme deduções, aplicações e considerações das equações subsequentes.

$$R_n + LE + H + G = 0 \quad (18)$$

$$\beta = \frac{H}{LE} \quad (19)$$

$$LE = -\frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (20)$$

$$H = -\frac{\beta}{1 + \beta} \cdot (R_n - G) \quad (21)$$

em que:

R_n - saldo de radiação ($W m^{-2}$);

LE - fluxo de calor latente ($W m^{-2}$);

H - fluxo de calor sensível ($W m^{-2}$);

G - fluxo de calor no solo ($W m^{-2}$);

β - razão de Bowen (adimensional).

Os sinais negativos, nas Equações 20 e 21, são devido à convenção de sentido adotada, em que fluxos positivos fluem da atmosfera ou do subsolo para a superfície (entrada dos fluxos no sistema solo-planta) e os fluxos negativos da superfície para a atmosfera ou subsolo (saída dos fluxos do sistema solo-planta), conforme representado na Figura 4. Os componentes R_n e G foram mensurados e os componentes LE e H expressos na razão de Bowen (β), Equação 19, são estimados pelo método em questão.

A razão de Bowen pode também ser expressa em termos de gradiente de temperatura e pressão atual de vapor, como demonstrado na sequência. Segundo o método aerodinâmico (extensão da Lei de Fick), os fluxos de calor latente (LE) e sensível (H) podem ser determinados pelas Equações 22 e 23, respectivamente, (Pereira et al., 1997).

$$LE = -K_E \cdot \rho \cdot \lambda \cdot \frac{dq}{dZ} \quad (22)$$

$$H = -K_H \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{dT}{dZ} \quad (23)$$

em que:

LE - fluxo de calor latente ($W m^{-2}$);

H - fluxo de calor sensível no ar ($W m^{-2}$);

K_E - coeficiente de transporte turbulento do calor latente ($m^2 s^{-1}$);

K_H - coeficiente de transporte turbulento do calor sensível ($m^2 s^{-1}$);

ρ - densidade do ar seco ($1,26 kg m^{-3}$);

λ - calor latente de evaporação da água ($\lambda \approx 2,45 MJ kg^{-1}$);

C_p - calor específico do ar à pressão constante ($0,001013 MJkg^{-1} °C^{-1}$);

dT - diferencial da temperatura do ar T ($°C$);

dZ - diferencial da altura Z acima da superfície do solo (m);

dq - diferencial da umidade específica do ar q ($m^3 m^{-3}$);

A umidade específica do ar (q) foi calculada pela Equação 24.

$$q = 0,622 \cdot \left(\frac{e_a}{p} \right) \quad (24)$$

em que:

q - umidade específica do ar ($m^3 m^{-3}$);

e_a - pressão atual de vapor d'água (kPa);

p - pressão atmosférica (kPa).

Substituindo-se as Equações 24, 22 e 23, na Equação 19, resulta a Equação 25.

$$\beta = \left(\frac{p \cdot C_p}{0,622 \cdot \lambda} \right) \cdot \left(\frac{-K_H}{-K_E} \right) \cdot \left(\frac{dT}{de_a} \right) \quad (25)$$

Na Equação 25, o primeiro termo do produto do segundo membro é denominado de coeficiente psicrométrico (γ) (Equação 26):

$$\gamma = \frac{p \cdot C_p}{0,622 \cdot \lambda} \quad (26)$$

Substituindo-se, na Equação 26, o calor específico do ar à pressão constante ($C_p = 0,001013 \text{ MJ kg}^{-1} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$), tem-se:

$$\gamma = 0,0016286 \cdot \left(\frac{p}{\lambda} \right) \quad (27)$$

O calor latente de evaporação da água (λ), embora seja praticamente constante ($\lambda = 2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$) entre 10° e 30°C , pode ser calculado, segundo (Pereira et al. 1997), pela Equação 28:

$$\lambda = 2,501 - (0,002361) \cdot T_z \quad (28)$$

em que T_z , no cálculo do calor latente de evaporação da água (λ), foi considerada a média das temperaturas medidas nos dois níveis (Z_1 e Z_2).

Para o cálculo do coeficiente psicrométrico (γ), utilizaram-se as Equações 27 e 28. Os valores de pressões atmosféricas aplicadas na Equação 27 foram considerados como constantes em quatro períodos do dia: p1 (06h00 às 11h50), p2 (12h00 às 17h50), p3 (18h00 às 23h50) e p4 (00h00 às 05h50) obtidos de três medidas diárias m1 (9h00), m2 (15h00) e m3 (21h00, horário local) realizadas na Estação Climatológica Principal (ECP). Neste caso, a pressão atmosférica do período p1 corresponde à medida m1, p2 a m2 e p3 a m3, sendo p4 a pressão atmosférica correspondente à média de m1 e m3. Esse

critério foi adotado por julgar que, entre m1, m2 e m3, as pressões m1 e m3 são mais representativas e próximas do período p4.

Assim, substituindo-se, na Equação 25, o termo correspondente a Equação 27 e considerando os coeficientes de transporte turbulento do calor latente (K_E) e de transporte turbulento do calor sensível (K_H) iguais, tem-se a equação prática da razão de Bowen (Equação 29):

$$\beta = \gamma \cdot \frac{\Delta T}{\Delta e_a} \quad (29)$$

em que:

γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

ΔT - diferença de temperatura entre os dois níveis de medição ($^\circ\text{C}$);

Δe_a - diferença de pressão atual de vapor entre dois níveis Z1 e Z2 (kPa).

A diferença de temperatura (ΔT) foi calculada pela subtração das temperaturas medidas nos dois níveis Z1 e Z2, assim como a diferença da pressão atual de vapor (Δe_a), sendo esta, nesses dois níveis, estimada a partir dos valores de umidade relativa do ar (UR), substituídos na Equação 30 (Vianello & Alves, 1991) e dos valores de temperatura (T) na Equação 31, de Tetens (1930), citado por Allen et al. (1998).

$$\text{UR} = \frac{e_a}{e_s} \cdot 100 \quad \therefore e_a = \frac{\text{UR} \cdot e_s}{100} \quad (30)$$

$$e_s = 0,6108 \cdot 10^{\left(\frac{7,5T}{237,3+T}\right)} \quad (31)$$

em que:

UR - umidade relativa do ar (em %);

e_s - pressão de saturação do vapor d'água (kPa);

T - temperatura do ar (em $^\circ\text{C}$).

No cálculo da razão de Bowen, Equação 29, valores maiores que -0,9 e menores que -1,1, assim como valores maiores que 20 e menores que -20 foram eliminados, à semelhança do intervalo (-0,7; -1,3) recomendado por Ortega-Farias et al.(1996) e Unland et al.(1996).

3.3 Radiação solar incidente, refletida e albedo

Complementando o estudo do balanço de energia, mediu-se o albedo a cada intervalo de dez minutos (α_i), em percentagem (%), obtido pela razão entre a radiação refletida (Rr) e a radiação incidente (Rs), conforme Equação 32.

$$\alpha_i = \frac{Rr}{Rs} \cdot 100 \quad (32)$$

O albedo médio para determinado dia, com n observações, em percentagem (%), foi obtido com leituras efetuadas entre as 6 h e 18 h, a partir da média das leituras, em intervalos de dez minutos, pela Equação 33:

$$\alpha = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=6h}^{18h} (\alpha_i) \quad (33)$$

3.4 Evapotranspiração

Foram calculadas a evapotranspiração de referência (ET_o), pelo método FAO Penman-Monteith; a evapotranspiração da cultura (ET_c); pelo método do balanço de energia - razão de Bowen e o coeficiente de cultura (K_c), estimado segundo as condições experimentais e critérios de K_c dual particionado nos componentes de evaporação da água do solo (K_eET_o) e de transpiração da cultura (K_{cb}ET_o), segundo Allen et al. (1998).

3.4.1 Evapotranspiração de referência

Segundo Allen et al. (1998), o método FAO Penman-Monteith para estimativa da evapotranspiração de referência diária, E_{To} , é representado pela Equação 34:

$$E_{To} = \frac{s}{s + \gamma^*} \cdot (R_n - G) \cdot \frac{1}{\lambda} + \frac{\gamma}{s + \gamma^*} \cdot \frac{900}{(T + 273)} \cdot U_2 \cdot (e_s - e_a) \quad (34)$$

em que:

E_{To} - evapotranspiração de referência (mm d^{-1});

s - declividade da curva de pressão de saturação de vapor ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ - coeficiente psicrométrico ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

γ^* - coeficiente psicrométrico modificado ($\text{kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$);

R_n - saldo de radiação ($\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$);

G - fluxo de calor no solo ($G = 0,0 \text{ MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, na escala diária);

λ - calor latente de evaporação da água (MJ kg^{-1});

T - temperatura média diária do ar ($^\circ\text{C}$);

U_2 - velocidade média do vento à altura de 2 m (m s^{-1});

e_s - pressão de saturação de vapor d'água (kPa);

e_a - pressão atual de vapor d'água (kPa);

$(e_s - e_a)$ - déficit de pressão de vapor d'água (kPa).

Os parâmetros da Equação 34 foram calculados com os dados obtidos da Estação Climatológica Principal (ECP, Inmet/UFLA), seguindo os passos e procedimentos recomendados por Allen et al. (1998), com exceção da temperatura e da umidade relativa, cujos dados foram calculados segundo a recomendação do Instituto Nacional de Meteorologia (Inmet), conforme as Equações 35 e 36.

$$T = \frac{T_9 + T_x + T_n + 2 \cdot T_{21}}{5} \quad (35)$$

$$UR = \frac{UR_9 + UR_{15} + 2 \cdot UR_{21}}{4} \quad (36)$$

em que:

T - temperatura média diária do ar (°C);

T₉, T₂₁, T_x e T_n - temperaturas medidas às 9h00 e às 21h00, máxima e mínima, respectivamente (°C);

UR - umidade relativa média diária do ar (%);

UR₉, UR₁₅ e UR₂₁ - umidades relativas medidas às 9h00, 15h00 e 21h00, respectivamente (%).

3.4.2 Evapotranspiração da cultura

A evapotranspiração diária da cultura (ET_c) foi determinada pelo valor absoluto do somatório da razão entre o fluxo de calor latente de evaporação (LE) e o calor latente de evaporação da água (λ), calculadas a cada 10 minutos durante as 24 horas do dia, Equação 37, sendo o calor latente de evaporação da água calculado pela Equação 28.

$$ET_c = \left| 0,0006 \cdot \sum_{i=1}^{n=144} \left(\frac{LE}{\lambda} \right) \right| \quad (37)$$

em que,

ET_c - evapotranspiração da cultura (mm d⁻¹);

LE - fluxo de calor latente de evaporação (W m⁻²);

λ - calor latente de evaporação da água (MJ kg⁻¹);

O valor constante de 0,0006 da Equação 37 é devido à conversão de unidades do fluxo de calor latente de evaporação (LE) e do calor latente de

evaporação da água (λ), calculados a cada 10 minutos, ou seja, $0,0006 \text{ s MJJ}^{-1} = 60 \text{ s minuto}^{-1} \times 10 \text{ minutos} \times 10^{-6} \text{ MJJ}^{-1}$.

3.4.3 Coeficiente de cultura

O coeficiente de cultura foi estimado segundo os critérios (Allen et al., 1998) e condições experimentais e meteorológicas do local no período avaliado. O coeficiente de cultura diário, representativo do potencial máximo da evapotranspiração da cultura ($K_{c_{\text{máx}}}$), foi calculado segundo a relação entre a evapotranspiração diária da cultura (ET_c), obtida pelo método da razão de Bowen e a evapotranspiração de referência diária (ET_o), obtida pelo método FAO Penman-Monteith, Equação 38:

$$K_{c_{\text{máx}}} = \frac{ET_c}{ET_o} \quad (38)$$

em que:

$K_{c_{\text{máx}}}$ - coeficiente de cultura máximo (adimensional);

ET_c - evapotranspiração da cultura (mm d^{-1});

ET_o - evapotranspiração de referência (mm d^{-1}).

A partir dos valores de $K_{c_{\text{máx}}}$ calculados pela Equação 38, foram calculados os componentes da partição de ET_c , os quais correspondem, separadamente, em termos médios, à evaporação da água do solo ($K_e \cdot ET_o$) e à transpiração das plantas ($K_{cb} \cdot ET_o$), sendo K_e e K_{cb} os coeficientes individualizados, respectivamente. Esse último coeficiente (K_{cb}), aqui foi considerado como equivalente K_c único, obtido por procedimentos de não partição da ET_c , por conter resíduos médios de evaporação do solo ($K_e \cdot ET_o$) ocorrido na fração de área molhada (f_w) e ou sobre a fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura (f_c), promovido pelas condições experimentais e

meteorológicas favoráveis à aproximação desses coeficientes ($K_c \approx K_{cb}$), segundo recomendações de cálculos propostos por Allen et al. (1998). Assim, segundo esses autores e a devida substituição do termo K_{cb} , tem-se:

$$K_{c_{\text{máx}}} = K_c + K_e \quad (39)$$

$$K_e = K_r \cdot (K_{c_{\text{máx}}} - K_c) \leq f_{ew} \cdot K_{c_{\text{máx}}} \quad (40)$$

$$f_{ew} = \text{mín}(1 - f_c, f_w) \quad (41)$$

em que:

K_c - coeficiente único de cultura, sem partição (adimensional);

$K_{c_{\text{máx}}}$ - coeficiente máximo da cultura (adimensional);

K_e - coeficiente de evaporação da água do solo (adimensional);

K_r - coeficiente de redução da evaporação (0-1);

f_{ew} - fração do solo exposta e molhada (0,01-1);

f_c - fração média de cobertura do solo pelo dossel da planta (0,0-1);

f_w - fração média do solo molhada por irrigação/precipitação (0,01-1);

$\text{mín}(1-f_c; f_w)$ - função de mínimo entre “1- f_c ” e “ f_w ”.

Nas condições de condução do experimento, f_w foi mantido praticamente constante e igual a 0,333, favorecido pelo tipo de solo, pelo sistema de irrigação e pelo manejo, conforme recomendação de Allen et al. (1998). K_r foi mantido sempre constante e igual a um ($K_r = 1$), devido às irrigações localizadas que constantemente mantiveram a umidade do solo na fração de molhamento (f_w) próxima à capacidade de campo (θ_{cc}) e a fração de cobertura do solo (f_c) foi estimada pela projeção de cobertura do dossel da cultura. Segundo Allen et al. (1998), em culturas de cobertura incompleta, a evaporação não ocorre de forma uniforme em toda a superfície cultivada. Na sua maior parte, ela é potencializada na fração combinada pela fração do solo

exposta à luz solar ($1 - fc$) e a molhada por irrigação ou chuva (fw), denominada de fração do solo exposta e molhada (few), na qual é disponibilizada a maior parcela de energia ao processo de evaporação do solo (no caso, correspondente ao coeficiente evaporação do solo, Ke), devido aos efeitos conjuntos da radiação solar e ventilação do ar.

Para o caso de irrigação localizada, Allen et al. (1998) sugerem que a função da fração exposta e molhada (Equação 41) seja modificada multiplicando-se fw pelo fator $[1 - (2/3) \cdot fc]$, resultando na Equação 42 para o cálculo da Equação 40. Esse procedimento é necessário porque a função de few (Equação 41) assume que a fração do solo molhada pela irrigação ou chuva ocorre dentro da fração do solo exposta à luz solar. Geralmente esse é o caso para irrigação por aspersão ou de superfície, exceto para irrigação localizada por gotejamento e assim, nesse caso, deve ser corrigida (Equação 42).

$$few = \text{mín} [(1 - fc), (1 - 2/3 \cdot fc) \cdot fw] \quad (42)$$

Para o cálculo do coeficiente evaporativo do solo (Ke), foi considerada a segunda igualdade da Equação 40 e as restrições expressas a seguir (Equação 43), devido às condições de condução do experimento.

$$Ke = \begin{cases} few \cdot Kc_{\text{máx}} & \text{se } fc \leq fw \\ 0 & \text{se } fc > fw \end{cases} \quad (43)$$

O cálculo do coeficiente de cultura (Kc , equivalente a Kcb) foi obtido por rearranjo e substituição de $Kc_{\text{máx}}$ e Ke na Equação 39, obtendo-se os valores médios de Kc das fases I, II, III e IV e a curva estimada do coeficiente da cultura da mamona, utilizando-se a Equação 44 (Allen et al., 1998).

$$Kc_i = Kc_{\text{prev}} \cdot \frac{[i - \sum L_{\text{prev}}]}{L_{\text{estádio}}} \cdot (Kc_{\text{próx}} - Kc_{\text{prev}}) \quad (44)$$

em que:

- i - número do dia dentro do estágio de crescimento (DAP: 1, 2, 3...);
- Kc_i - coeficiente da cultura no dia i (adimensional);
- Kc_{prev} - coeficiente da cultura do final do estágio anterior (adimensional);
- $\sum L_{prev}$ - somatório das durações de todos os estágios anteriores (dias);
- $L_{estádio}$ - duração do estágio ao qual o dia i pertence (dias);
- $Kc_{próx}$ - coeficiente da cultura do próximo estágio ou estágio final.

A curva dos coeficientes médios da cultura da mamona (Kc) por fase (fases I, II, III e IV) foi determinada pelos cálculos das médias de Kc da cultura nas fases I, II e III. Entretanto, os valores de Kc 's médios das fases I e III foram calculados apenas nos períodos de 22 a 36 e 87 a 132 dias após o plantio (DAP), respectivamente e, a média da fase IV, estimada pela média aritmética entre os coeficientes das fases I e III. Esse procedimento foi adotado devido a não coleta de dados na fase de maturação.

3.5 Variáveis vegetativas e reprodutivas

Durante o ciclo de cultivo, foram mensuradas, mensalmente, as médias da altura de planta (h) e o raio médio de cobertura do dossel pela fileira das plantas (RCob). A altura de planta (h) e o raio de cobertura (RCob) foram mensurados com régua graduada, sendo h definido como sendo a altura vertical do meristema apical (gema) mais alto em relação ao solo e RCob a distância horizontal entre o caule e a projeção no solo, do ramo mais externo à fileira de plantas. Também foi definida a data (dia e mês) em que mais de 50% das plantas apresentou o racemo primário (86 dias após o plantio, DAP, 18/04/2008) para definir o limite entre as fases de crescimento, fase II, e a fase intermediária, fase III e a data em que mais de 50% das plantas apresentou os frutos dos racemos terciários na fase de maturação fisiológica (166 DAP, 07/07/2008), definindo-se

o limite entre as fases III e a fase de maturação dos frutos, fase IV. O limite entre a fase inicial de crescimento, fase I e a fase II foi definida pela data em que a fração de cobertura do solo (fc) estimada foi de 10% (36 DAP, 28/03/2008), conforme Allen et al. (1998). Com o raio de projeção do dossel da cultura (RCob) foi calculada a fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura em relação à área útil da planta (fc, em %), definida pelos espaçamentos da cultura e delineada a curva de desenvolvimento dessa variável fenológica ao longo do ciclo da cultura. O cálculo de fc foi realizado em duas etapas como mostrado na Equação 45.

$$fc = \begin{cases} \frac{\pi \cdot Rcob^2}{(Sp \cdot Sf)} \cdot 100 & \text{se } Rcob \leq \frac{Sp}{2} \\ \frac{2 \cdot Rcob}{Sf} \cdot 100 & \text{se } Rcob > \frac{Sp}{2} \end{cases} \quad (45)$$

em que:

fc - fração de cobertura do solo pelo dossel da planta (%);

RCob - raio de cobertura do dossel pela fileira de plantas (m);

Sp - espaçamento entre plantas dentro da fileira de plantio (m);

Sf - espaçamento entre fileiras de plantio (m).

Ao final do ciclo produtivo, um mês após suspensão da irrigação, foi realizada a última das três colheitas dos frutos maduros com tesoura manual e a produtividade da cultura (em kg ha⁻¹) calculada pelo produto da produção média por planta (em kg por planta) e o número de plantas por hectare, 5556 plantas ha⁻¹ (considerando 1,8 m² planta⁻¹, ou seja, espaçamento Sp x Sf = 2,40 x 0,75 m como a área útil por planta).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Caracterização das condições meteorológicas e da cultura

Os componentes do balanço de energia e, por conseguinte, o saldo de radiação (R_n), são, direta ou indiretamente, resultantes da radiação solar incidente (R_s), da natureza e das condições em que se encontra uma superfície e da interferência das condições meteorológicas ao longo do dia ou período. Entre outros elementos meteorológicos inerentes a essa interferência, destacam-se a precipitação pluvial e a cobertura de nuvens ou nebulosidade (Allen et al., 1998).

Para o período de condução da cultura da mamona (janeiro a agosto de 2008), os elementos relativos às condições meteorológicas do local e do experimento estão relacionados na Tabela 2. Durante o período em que foram realizadas as medições dos componentes do balanço de energia pela razão de Bowen (14/fevereiro a 03/junho), os valores médios das temperaturas mínima e máxima foram de $12,6^\circ$ e $28,9^\circ\text{C}$, respectivamente; da umidade relativa mínima do ar, variando entre 45,9% e 52,5%; velocidade do vento variando entre 1,7 a $1,4\text{ m s}^{-1}$ e a precipitação pluvial acumulada nesse período foi de 402,5 mm.

TABELA 2 Valores médios mensais de temperatura máxima ($T_{\text{máx}}$), mínima ($T_{\text{mín}}$), umidade relativa mínima ($UR_{\text{mín}}$), velocidade do vento a 2 m de altura do solo (U_2) e insolação (n); valores acumulados de evapotranspiração de referência (ETo), precipitação pluvial(PPT) e lâmina de irrigação (IRR) e tensões de água no solo média ($\Psi_{\text{méd}}$), mínima ($\Psi_{\text{mín}}$) e máxima ($\Psi_{\text{máx}}$), ao longo do período experimental

Mês	$T_{\text{máx}}^1$ °C	$T_{\text{mín}}^1$ °C	$UR_{\text{mín}}^1$ %	U_2^1 m s ⁻¹	n ¹ h	ETo ¹ mm	PPT ¹ mm	IRR ^{2*} mm	$\Psi_{\text{méd}}^2$ kPa	$\Psi_{\text{mín}}^2$ kPa	$\Psi_{\text{máx}}^2$ kPa
Jan	27,7	17,7	55,6	1,9	5,1	87,6	263,0	8,6	-	-	-
Fev	28,8	17,9	52,5	1,5	6,3	86,0	243,3	8,6	-	-	-
Mar	28,9	17,2	50,1	1,7	7,0	111,1	194,2	10,3	-	-	-
Abr	27,8	16,6	51,7	1,5	6,2	105	110,6	9,6	-	-	-
Mai	25,4	12,6	45,9	1,4	6,9	110,6	2,8	84,2	12,7	5,6	18,6
Jun	25,1	12,8	47,0	1,5	6,8	105,4	14,4	76,8	12,3	5,6	19,6
Jul	25,4	9,9	38,1	1,6	8,7	119,9	0,0	101,1	11,9	8,6	15,6
Ago	28,2	13,1	40,3	1,8	8,3	127,1	9,6	68,0	13,2	8,6	22,6

(¹) Medidas de dados obtidos da Estação Climatológica Principal ECP, em Lavras, MG, sendo a umidade relativa mínima do ar ($UR_{\text{mín}}$) obtida por recomendações do boletim FAO-56 (Equação 64 do boletim); (²) Medidas determinadas com dados mensurados na própria área experimental; (*) As lâminas de irrigação suplementar no meses de janeiro a abril (24/01 a 28/04/2008) foram definidas pelo tempo de 2 horas de funcionamento do sistema e (-) Tensões de água no solo não monitoradas.

Na Figura 5 podem-se observar os valores da precipitação e da nebulosidade atmosférica. Os valores de nebulosidade foram estimados pela relação percentual entre o número de horas de radiação solar direta na superfície (n, insolação) e o número máximo de horas possível dessa radiação ao longo do dia (N, insolação máxima possível em dias de céu aberto ou na ausência de nuvens), simbolizada por (n/N) e denominada de razão de insolação. Em dias de céu aberto, isto é, de céu não coberto por nuvens, essa relação é de um ou 100% (n=N horas), correspondendo a, aproximadamente, a 75% da radiação solar

extraterrestre (R_a , radiação solar que chega ao topo superior da atmosfera) e, em dias de céu extremamente nublado a nublado (céu coberto com muitas nuvens), essa relação é de zero ($n = 0$ hora) e corresponde a, aproximadamente, 25% da R_a , segundo Allen et al. (1998).

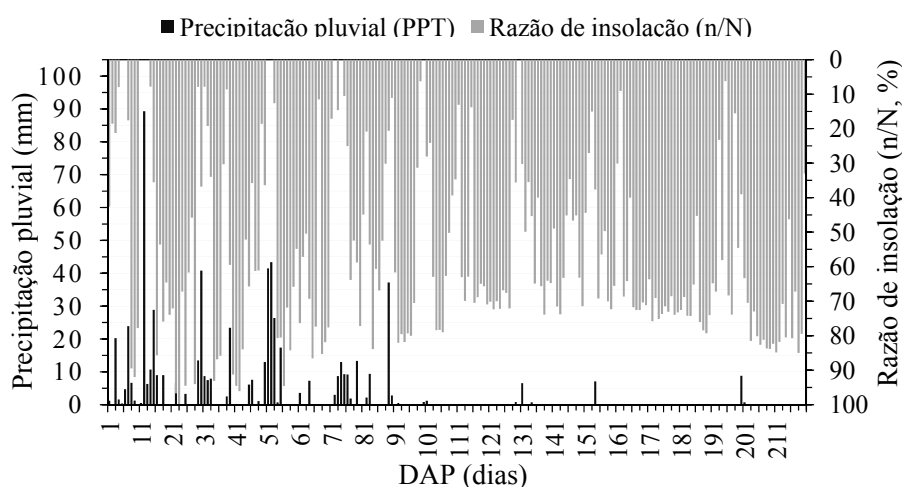


FIGURA 5 Precipitação pluvial diária (PPT) e razão de insolação diária estimada (n/N) durante o ciclo da cultura em dias após o plantio DAP, (24/01 a 30/08/2008).

Observando-se a Figura 5, é possível perceber dois períodos distintos de comportamento dessas variáveis. No primeiro, compreendido entre 1 e 110 dias após o plantio (DAP), que inclui as três primeiras fases do ciclo da cultura (fase I, II e III, entre 24/01 e 12/05/2008), verificou-se maior distribuição alturas de precipitação pluviais (PPT) com tendência de queda ao longo desse período. Esse comportamento é semelhante ao da nebulosidade (n/N), oscilando bastante entre valores extremos menores que 25% (dias de céu mais nublados) e maiores que 75% (dias de céu mais aberto), típico de verão quente e chuvoso. Entretanto,

no período restante do ciclo da cultura (13/05 a 30/08/2008, fases III e IV), outono-inverno, esse padrão muda e as chuvas são mais escassas e de menores alturas, com nebulosidade de menores intensidades e frequência (Tabelas 2). Para esse primeiro período do ciclo da cultura, de janeiro a abril, registrou-se altura de precipitação acumulada de 811,1 mm, composta pelas alturas mensais de 263,0%, 243,3%, 194,2% e 110,6 mm, respectivamente (Tabela 2) e, no período subsequente (maio a agosto), somente um acumulado de 26,8 mm sendo distribuídos em 2,8; 14,4 e 9,6 mm, nos meses de maio, junho e agosto, respectivamente.

Esses valores diferem das alturas médias mensais de precipitação encontradas por Dantas et al. (2007), avaliando duas séries entre os anos de 1961 a 1990 (dados normais) e de 1991 a 2004. As alturas ocorridas de fevereiro a abril foram superiores às alturas médias das duas séries avaliadas, destacando-se o mês de abril, diferindo-se, em média, pelo menos duas vezes em relação à série mais recente, sendo a altura de janeiro intermediária e o acumulado nesses meses superior em pelo menos 56 mm em média. Por outro lado, nos meses seguintes, entre maio e agosto, todas as alturas de precipitação acumuladas foram inferiores às dos valores médios das séries, destacando-se o mês de maio, com uma diferença de, no mínimo, 38 mm, sendo o acumulado total no período com um déficit de, pelo menos, 67 m em relação ao acumulado médio das séries. Ou seja, faltou chover nos meses de maio a agosto, em termos médios, o que choveu entre janeiro a abril.

A demanda atmosférica relativa à evapotranspiração de referência (ET_o) também foi diferenciada ao longo do ciclo em dois períodos distintos, como observado para precipitação e nebulosidade. Porém, ao contrário dessas, teve um comportamento ligeiramente constante e inverso, aumentando, em média, seus valores ao longo dos meses (Tabela 2). Entre janeiro e abril, essa demanda foi

inferior às alturas de chuvas precipitadas, sendo a altura demandada de 389,7 mm contra 811,1 mm da precipitação no mesmo período. Esse comportamento foi contrário ao dos meses entre maio e agosto, quando a evapotranspiração acumulada foi de 462,9 mm, contra apenas 26,6 mm advindos das chuvas nesse período. Por esse motivo é que as irrigações tiveram maior importância a partir do dia 28/04/2008, suprindo assim o déficit de água no solo para garantir o desenvolvimento e ou crescimento potencial da cultura.

A diferença entre esses dois períodos também pode ser notada verificando-se, na Tabela 3, o aumento das frequências percentuais da ocorrência de dias sem chuvas ([PPT = 0]) com a diminuição das frequências de ocorrência de dias com chuva, ao longo das fases da cultura nesses dois períodos. Prevaleceu, entretanto, a maior ocorrência de alturas menores ou iguais a 10 mm e as de menor ocorrência, aquelas maiores que 40 mm.

TABELA 3 Frequência do número de dias de ocorrência, em porcentagem, da precipitação pluvial (PPT) e da nebulosidade da atmosfera estimada pela razão de insolação diária (n/N), por fase da cultura e intervalos de classes desses parâmetros

Classes		Frequência de precipitação (%)			
PPT (mm)	Fase I	Fase II	Fase III	Fase IV	Ciclo
0	39	54	88	94	74
]0-10]	42	30	11	6	19
]10-40]	14	12	1	0	5
> 40	6	4	0	0	2
n/N (%)		Frequência de nebulosidade (%)			
n/N = 0	14	8	3	0	5
]0-25]	22	16	11	6	13
]25-50]	14	10	28	7	16
]50-75]	14	34	49	54	41
n/N>75	36	32	10	33	25
Total dia	36	50	80	54	220

A nebulosidade, também de acordo com dados da Tabela 3, teve comportamento semelhante ao da não ocorrência de chuvas ao longo do ciclo ou fases da cultura, com tendência de diminuição das frequências de dias nebulosos, principalmente para valores de (n/N) menores ou iguais a 50%, sendo essas de 50%, 34%, 42% e 13%, respectivamente, para as fases I, II, III e IV e na classe de n/N entre 50% e 75% observa-se um aumento das frequências ao longo das fases (14%, 34%, 49% e 54%, para I, II, III e IV, respectivamente) e dentro de cada fase.

Com relação à cultura, a evolução do crescimento vegetativo e as mudanças de fases da cultura tiveram seu comportamento descrito, em parte, pela altura da planta (h) e pela fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura em relação à área útil por planta (fc). Na Figura 6 são observadas essas variáveis e destacada a divisão do ciclo de cultivo da mamona nas quatro fases, I, II, III e IV, sendo, respectivamente, fase inicial, fase de crescimento, intermediária e de maturação. Os limites de cada uma foram determinados por critérios relacionados à fração de cobertura do solo (fc) e a características fenológicas das plantas, conforme recomendações de Allen et al. (1998). O limite da fase inicial (fase I), em DAP, foi determinado pela estimativa da fração de cobertura do solo menor ou igual a 10% (fc, estimado da curva de regressão dos pontos observados) e os das fases II e III, pelas frações de cobertura estimadas, relacionadas aos DAPs, em que mais de 50% das plantas apresentaram seus cachos primários (racemos primários) e terciários em estado de maturação (racemos secos). Assim, essas fases I, II, III e IV foram de 1 aos 36 DAP (24/01 a 28/02/2008), dos 37 aos 86 DAP (29/02 a 18/04/2008), dos 87 aos 166 DAP (19/04 a 07/07) e, completando o ciclo produtivo, dos 167 aos 220 DAP (08/07 a 30/08/2008), com duração de 36, 50, 80 e 54 dias após o plantio, respectivamente, sendo a fase intermediária de maior duração e a fase de

maturação mais prolongada devido, provavelmente, à irrigação, como esclarecido por Allen et al. (1998). As médias de fc e h estimadas nas fases I, II, III e IV foram de 3,29% e 0,10%; 28,68% e 0,32%; 62,53% e 0,92% e 53,07% e 1,28 m, respectivamente, sendo mínimo e máximo durante o ciclo de, aproximadamente, 0,08 a 1,30 m, para h e de 1% a 67% para fc , respectivamente.

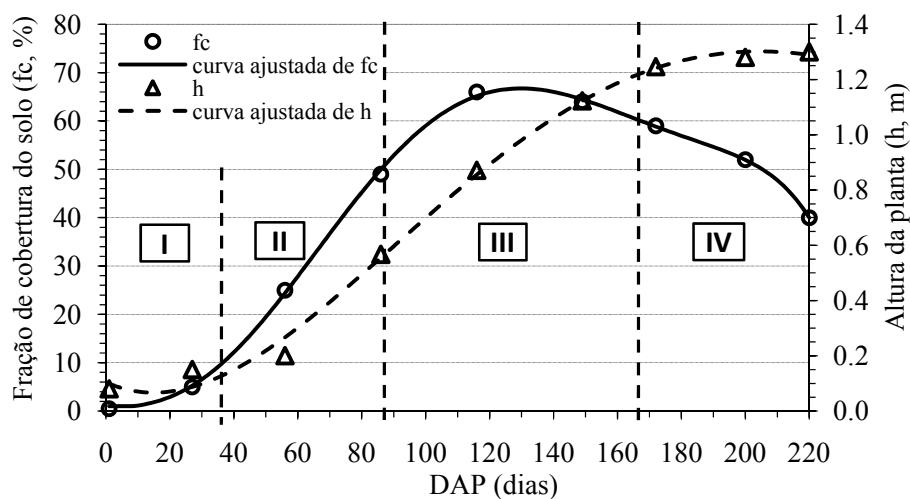


FIGURA 6 Fração de cobertura do solo pela cultura (fc) e altura da planta (h), ao longo das fases de cultivo (fases I, II, III, IV) em dias após o plantio (DAP) (24/01a 30/08/2008).

Observando-se a Figura 6, verifica-se que a fração de cobertura do solo (fc) e a altura da planta (h) têm taxas de crescimento lentas na fase I e altas na fase II e, na fase III, a fração fc atinge patamares mais elevados de cobertura do solo. Na transição e durante a fase seguinte, fase de maturação (fase IV), essa cobertura do solo reduz-se progressivamente a taxas cada vez menores até o

mínimo de 40%, enquanto a altura da planta (h) ainda cresce, estabiliza-se e atinge o seu valor máximo, 1,3 m. Contudo pode se observar que, de maneira geral, a cobertura do solo pela cultura (fc) é acompanhada de perto pelo crescimento das plantas em altura (h), exceto na fase de maturação (fase IV) quando as folhas da mamona começam a senescer e a cair sobre o solo, formando sobre ele uma leve camada de folhas mortas (serrapilheira), apesar de a planta continuar a crescer. Esse comportamento é semelhante ao observado por Lima et al. (2005), na cultura do feijão e por Monteiro (2005), avaliando o “túnel de crescimento” da cultivar Al Guarany 2002, sob diferentes densidades de plantio e espaçamento.

A produção média de frutos de mamona secos ao sol foi de 0,3825 kg planta⁻¹, correspondendo a uma estimativa de produtividade de 2.125,0 kg ha⁻¹, maior que a média mundial de 600 kg ha⁻¹ (Santos et al., 2001) e nacional de 722 kg ha⁻¹ conforme Silva et al. (2000). Esta produtividade está próxima da de 2.176,0 kg ha⁻¹, encontrada por Andrade Júnior et al. (2008), no município de Alvorada do Gurgueia, PI, para a cultivar BRS-Nordestina sob irrigação por aspersão convencional e a de 2.342,5 kg h⁻¹, a 13% de umidade na base úmida, por Curi & Campelo Junior (2004) no município de Santo Antônio do Leverger, MT para o híbrido Íris. Sousa et al. (2008), porém, encontraram, para a cultivar BRS-Energia, sob irrigação localizada, nas condições de Mossoró, RN, produtividade máxima potencial de 3.974 kg ha⁻¹.

Importante destacar aqui que, para comparações de produtividade de qualquer cultura, devem se considerar, além da relativa igualdade de condições dos fatores de produção, ou seja, fertilidade do solo, tratos culturais, espaçamento e densidade de plantas, sistemas e manejo de irrigação, também a variedade, o clima da região e, principalmente, a época de plantio, os quais

permitem uma adequada ponderação de comparação entre diferentes produtividades alcançada pela cultura.

Com relação à época de plantio, cabe destacar que o plantio foi realizado tardiamente, incluindo o ciclo produtivo da cultura num período (janeiro a agosto) em que notadamente há redução das temperaturas médias e das chuvas. Ressalta-se, ainda, que a cultura não cobriu totalmente a área útil possível de ser explorada (restando 33% do máximo de cobertura na fase III, 67%). Vários autores destacam a necessidade de ajuste da época de plantio e do ciclo da cultura, principalmente das fases de floração e frutificação (fase III) ao período do ano mais propício à disponibilidade hídrica do solo e ao regime térmico da região (zoneamento climático da cultura), aliado ao ajuste do espaçamento para que a cultura expresse o seu potencial máximo produtivo (Gonçalves et al., 1981; Távora, 1982; Silva, 1981; Silva et al., 2000; Beltrão 2001). Portanto, produtividades maiores dessa cultivar, com a redução do espaçamento (ou consócio com outra cultura na entrelinha inexplorada) e plantio em época adequada, podem ser alcançadas na região de Lavras, MG.

4.2 Balanço de energia

Com base nos dados de radiação incidente e refletida (R_s e R_r , respectivamente) e nos componentes do balanço de energia (saldo de radiação R_n , fluxo de calor no solo G , fluxo de calor latente de evaporação LE e fluxo de calor sensível do ar H), foram avaliadas as variações no período estudado e em dias característicos, escolhidos por fase da cultura e por condições meteorológicas distintas. O objetivo foi compreender o comportamento, as interações e as proporções entre cada um deles sobre o cultivo da mamona e nas condições experimentais deste estudo.

4.2.1 Radiação solar incidente e albedo

Na Figura 7 são apresentados os dados diários de radiação incidente (R_s), radiação refletida (R_r) e da relação entre esse e aquele, em termos médios, o albedo (α), assim como a razão de insolação (n/N) e também a fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura (f_c) apresentada na Figura 6, referentes ao período de coleta de 110 dias, entre 14/02 e 03/06/2008, dos 22 aos 132 DAP.

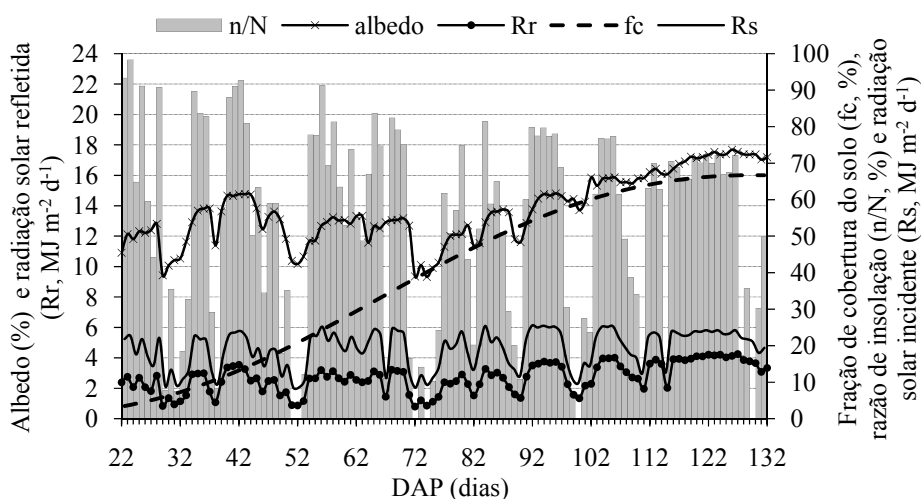


FIGURA 7 Radiação solar incidente (R_s) e refletida (R_r), razão de insolação (n/N), fração de cobertura do solo pelo dossel da cultura (f_c) e albedo (α), no período entre 22 e 132 dias após o plantio (DAP) (14/02 a 03/06/2008).

Durante esse período, os valores médios de R_s e R_r foram de 18,7 e 2,7 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, sendo os máximos de 25,5 e 4,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e os mínimos de 8,5 e 0,8 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, respectivamente. Os menores valores de R_s e R_r ocorreram nos dias de menor razão de insolação (n/N), no período em que n/N oscilou entre dias de céu extremamente nublados a dias de céu totalmente aberto (período anterior aos

72 DAP), isto é, nos 29, 51 a 52, e de 71 a 75 DAP (21/02, 14 a 15/03 e 03 a 07/04) em que a nebulosidade foi alta, sendo os valores de n/N de 8,0% e 0%, respectivamente. Por outro lado, os maiores valores de R_s e R_r não ocorrem apenas nos primeiros 72 DAP, ou seja, não ocorreram somente nos dias de céu totalmente desprovidos de nuvens (maiores n/N). Apesar de serem influenciados por essa condição, foram observados os maiores valores de R_s bem distribuídos em todo o período, a exemplo dos 56, 84, 92 a 96 e de 104 a 106 DAP (relacionados aos n/N de 91%, 81%, de 77% a 80% e 77%, respectivamente). Já os maiores valores R_r ocorreram após os 72 DAP, principalmente ao final do período, entre os 120 e 127 DAP (devendo-se observar um tendência de crescimento da curva de R_r , com n/N variando de 67% a 72%). Entretanto, o comportamento de R_s e R_r pode ser melhor compreendido pela razão entre R_r e R_s (R_r/R_s), o albedo (α), não apenas pela interferência da nebulosidade mas também pelo crescimento/desenvolvimento da cultura, expresso pela fração de cobertura do solo (f_c) na Figura 7. Maiores valores de albedo foram alcançados com maiores valores de f_c , principalmente na menor interferência da nebulosidade, conforme também observado por Alves et al. (1998), Azevedo et al. (1997) e Galvani et al. (2002).

No comportamento do albedo observado na Figura 7, podem ser destacados dois períodos distintos, à semelhança do observado para as condições meteorológicas de nebulosidade e de precipitação pluvial: o primeiro período até os 70 DAP (22/02 a 02/04/2008, fases I e II) e o segundo, após esse DAP (03/04 a 03/06/2008, fases II e III). O primeiro período corresponde aos dias anteriores aos 70 DAP, coincidente com a maior ocorrência de chuvas e nebulosidade (Figura 5) e com a fase da cultura apresentando maior fração do solo exposta à radiação solar incidente (f_c menor que 36%). Sob essas condições, com maiores alternâncias de dias de alta nebulosidade (menores n/N) e ou maiores alturas de

precipitações, o albedo foi menor, variando pouco em torno da média de $12,6 \pm 0,3$ contra $14,6 \pm 0,6\%$, do período após os 70 DAP, não tendo sido observado qualquer acompanhamento à curva de fração de cobertura do solo. Nesse primeiro período, as chuvas também contribuíram para redução do albedo, à semelhança do estudo de Leitão & Oliveira (2000b) para albedo do amendoim irrigado por aspersão convencional e não irrigado, confirmando que a umidade do solo promove a redução do albedo. Essa redução é explicada pela menor radiação refletida, RR, em virtude da maior absorção da radiação solar incidente pelo solo úmido. Segundo esses autores, essa redução é ainda maior, cerca de 6,4%, quando a irrigação se processa pela manhã.

Por outro lado, após os 70 DAP (Figura 7), correspondente ao período em que a ocorrência de nebulosidade e de chuvas diminui, os valores de albedo (α) crescem, acompanhando o crescimento da cultura expresso pela fração de cobertura do solo (f_c), exceto em alguns dias com pequenas oscilações observadas (71 a 76, 82, 88 a 90 e 98 a 102 DAP), em que menores valores de albedo estão associados com alta nebulosidade (n/N menores, próximos a zero). Apesar dessa interferência de nebulosidade, o coeficiente de determinação linear entre f_c e α para esse segundo período em questão foi de $r^2 = 0,87$. Em todo o período de mensuração do albedo, a média foi de 13,7%, apresentando maiores valores ao final do período, com máximo de 17,7%, ocorrido aos 126 DAP (28/05/2008), quando f_c estimado foi de 67% e os menores valores de α na fase inicial de crescimento da cultura, com mínimo de 9,3%, ocorrido nos 72 DAP (04/04/2008), quando n/N foi de 0%, à altura de precipitação de 13 mm. Esse comportamento também foi observado por Maciel (1992), citado por Alves et al. (1998), em algodão herbáceo. Na cultura do melão, estes autores encontraram, para as condições de cultivo do melão em Mossoró, RN, média de 20%,

variando entre 18%, na fase inicial de crescimento da cultura e de 23% para a época de floração e de maturação.

Com relação à variação diária de albedo, observam-se, na Figura 8, as respectivas ao longo do dia entre 6:h00 e 18h00, obtidas de três dias escolhidos como representativos de cada uma das fases, I, II e III, e sob condições meteorológicas de céu aberto (não nublado) e de céu nublado. Para os dias de céu nublado 30 DAP (22/02), 71 DAP (03/04) e 100 DAP (02/05/2008), a razão de insolação (n/N) foi de 35,5%, 16,6% e 0%, com altura de precipitação (PPT) de 40,8; 0,0 e 0,8 mm, respectivamente. Para os dias de céu aberto, 22 DAP (14/02), 80 DAP (12/04) e 105 DAP (07/05/2008), n/N foi de 93,4%, 74,8% e 76,7%, com PPT de 6,6; 0,0 e 0,0 mm, respectivamente. Verifica-se que tanto para dias nublados como para não nublados, os valores de albedo se elevam nas primeiras e últimas horas do período diurno, tendendo a estabilizar-se em torno da média próximo ao meio dia (12h00), assim como apresentam valores médios crescentes ao longo das fases I, II e III. Esse comportamento também foi observado por Leitão & Oliveira (2000b), Alves et al. (1998) e Azevedo et al. (1997). Nota-se também que as curvas de albedo para os dias não nublados, assim como para a variação no período após 70 DAP, são mais suaves (sem picos, sem oscilações bruscas) em relação às curvas dos dias nublados.

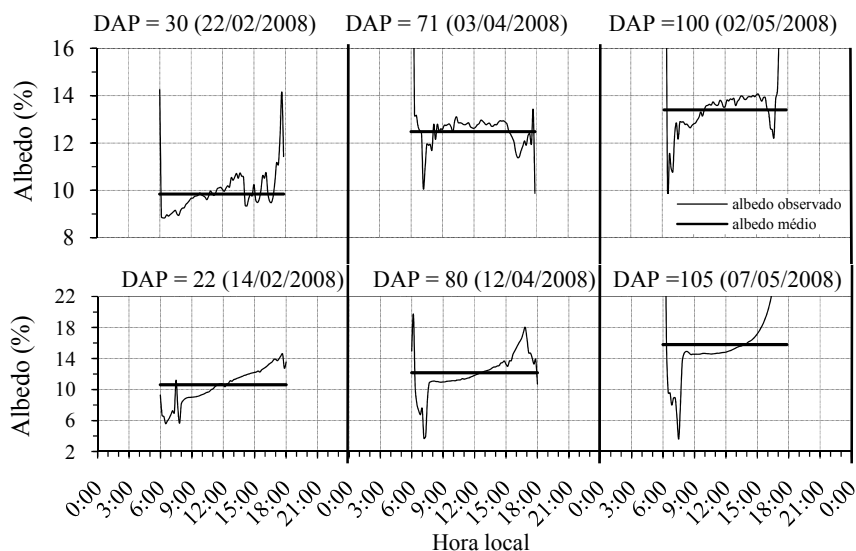


FIGURA 8 Variação diária do albedo (α) medido entre as 6h00 e 18h00 e a média calculada entre as 7h00 e 17h00, para os dias representativos das fases I, II, III com céu claro (DAP = 22, 14/02/2008; DAP = 80, 12/04/2008; DAP = 105, 07/05/2008) e nublados (DAP = 30, 22/02/2008; DAP = 71, 03/04/2008; DAP = 100, 02/05/2008).

Para a condição de céu não nublado, os valores mínimos, médios e máximos (calculados com base em valores entre 8h00 e 16h00 para evitar os grandes desvios das primeiras e últimas hora do dia) foram de 5,6%, 10,6% e 13,6%, aos 22 DAP (fase inicial, fase I); 3,7%, 12,2% e 18,0%, aos 80 DAP (fase II) e de 3,6%, 15,8% e 31,4%, aos 105 DAP (na fase III), respectivamente. Já para a condição de céu nublado de 9,0%, 9,8% e 10,7%, aos 30 DAP (fase I); 10,1%, 12,5% e 13,1%, aos 71 DAP (fase II) e de 10,8%, 13,4% e 14,2%, aos 100 DAP (na fase III), respectivamente, (Figura 8). Nota-se, portanto, que os valores médios de albedo são crescentes com as fases, assim como as amplitudes de variação, independente das condições de céu nublado ou não nublado. Porém,

para os dias não nublados, tanto os valores médios quanto as amplitudes de variação (8,0%, 14,3% e 27,8%, das fases I, II e III, respectivamente) em todas as fases foram superiores aos apresentados para a condição de dias nublados. Destacam-se também (Figura 8) as grandes variações de albedo em relação à média nas primeiras horas do dia (entre 6h00 e 9h00), atingindo valores muito baixos, principalmente a partir dos dias referentes às fases II e III, quando as irrigações realizadas nesses horários se tornaram mais frequentes, devido à diminuição das chuvas (Tabela 3). Essa grande redução do albedo nesses horários é explicada por Leitão & Oliveira (2000b) como sendo devida à menor radiação refletida em consequência à maior absorção da radiação solar incidente pelo solo úmido, principalmente nas primeiras horas da manhã. As médias de albedo em cada fase, I, II e III, foram de 11,8%, 12,5% e 15,7%, respectivamente.

4.2.2 Caracterização da razão de Bowen

Os componentes do balanço de energia da cultura da mamona, utilizando o método da razão de Bowen (β), foram determinados a partir do dia 14/02/2008 (22 dias após o plantio, DAP) até o dia 03/06/2008 (132 DAP). Esse período está compreendido em três das quatro fases estabelecidas no ciclo da cultura da mamona, isto é, fase inicial, de crescimento e intermediária (fases I, II, III), exceto a fase de maturação (fase IV).

Para melhor entender e determinar os componentes de fluxo de calor latente (LE) e sensível (H), confeccionou-se o gráfico da razão de Bowen (β), em termos de valores médios diários (Figura 9), isto é, cada dado de β foi calculado pela média dos valores, de todo o período de coleta de dados, obtido no respectivo intervalo de tempo (10 minutos). Pelo gráfico dessa figura podem ser observados três períodos distintos e dois de transição entre eles, e que, nos

períodos noturnos que vão de 0h00 às 5h50 e das 18h00 às 23h50, existe maior amplitude de variação dos valores em torno das médias de -0,13 e -2,04, respectivamente e, no período diurno, que vai de 6h00 às 17h50, pequena variação da amplitude em torno da média de 0,42, exceto na transição entre os períodos noturnos e diurno, ou seja, nas proximidades das primeiras e últimas horas do dia (6h00 às 8h00 e de 17h00 às 19h00), respectivamente.

Esses maiores desvios noturnos e nas primeiras e últimas horas do período diurno ocorrem devido, mais provavelmente, às inversões térmicas da temperatura do ar e do solo nesses horários e ou às menores diferenças dos gradientes de temperatura e pressão de vapor, tornando os gradientes de temperatura e pressão de vapor muito baixos. Contudo, nas primeiras horas da manhã, esse efeito tem maiores desvios, possivelmente em virtude da maior nebulosidade e irrigações realizadas nesses horários. Esse comportamento já foi observado por vários autores, como Heilman & Brittin (1989), Cunha & Bergamaschi (1994), Cellier et al. (1996), Ortega-Farias et al. (1996), Unland et al. (1996), Perez et al. (1999), Lima et al. (2005), Borges et al. (2008) e Souza et al. (2008).

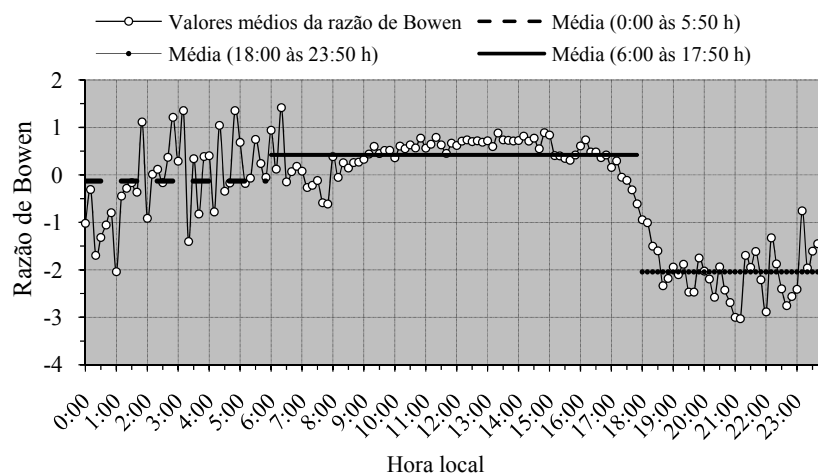


FIGURA 9 Curva dos valores médios (estimados a cada 10 minutos) da razão de Bowen (β) calculada e separada em três partes, durante o dia de 24 horas, das 0h00 às 5h50 (madrugada), das 6h00 às 17h50 (dia) e das 18h00 às 23h50 (noite), durante o período de mensuração dos dados microclimáticos no dossel da cultura da mamona.

Os valores de β (Tabela 4) observados próximo do intervalo de indeterminação ($\beta = [-0,9; -1,1]$) e aqueles discrepantes ($[\leq -20]$ e $[\geq 20]$), para os períodos noturno, entre 21h00 e 5h00 e os de transição entre 5h00 e 9h00 e entre 17h00 e 21h00 horas, somam-se em uma frequência de ocorrência de cerca 5,7%. A frequência do período noturno contribui com cerca de 3,4% desse total e apenas cerca de 0,1% dos valores nesses intervalos ocorreu no período diurno, entre 9h00 e 17h00, totalizando, assim, 5,8% do total de ocorrência desses intervalos em 24 horas do dia.

TABELA 4 Distribuição de frequência absoluta e percentual da razão de Bowen (β), calculada nos intervalos extremos e no intervalo próximo à indeterminação do cálculo dos componentes de fluxo de calor latente (LE) e fluxo de calor sensível (H) na equação do balanço de energia para três períodos do dia (8 horas cada um)

Períodos do dia	Intervalos da razão de Bowen (β)						Total	
	<-20		[-0,9; -1,1]		>20			
	Freq.	%	Freq.	%	Freq.	%	Freq.	%
Diurno (9h00-17h00)	5	0,03	5	0,03	8	0,05	5328	0,11
(5h00-9h00) e (17h00-21h00)	91	0,57	208	1,30	70	0,44	5328	2,31
Noturno (21h00-5h00)	205	1,28	176	1,10	160	1,00	5328	3,38
Dia (0h00 – 24h00)	301	1,88	389	2,43	238	1,49	15984	5,81

4.2.3 Componentes do balanço de energia

a) Variação dos componentes no período estudado

Na Figura 10 estão representadas as curvas dos valores de fluxos diários dos componentes do balanço de energia (R_n , LE, H e G), radiação solar incidente (R_s), alturas de precipitação pluvial (PPT) e razão de insolação (n/N) para o período de coleta dos dados entre 22 a 132 DAP (14/02 a 03/06/2008). Verifica-se que o comportamento das curvas de radiação solar incidente (R_s) e o saldo de radiação (R_n) acompanharam as mesmas oscilações da nebulosidade estimada por (n/N), ocorridas com maiores frequências no início do período, estando a curva de R_s sempre acima da curva de R_n . Essa interferência da nebulosidade também foi observada por Lopes et al. (2001) em um pomar de mangueiras. As curvas de R_s e R_n atingiram os valores máximos de 25,5 e 15 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$ e mínimos de 8,5 e 0,1 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$, com médias respectivas de 18,7 e 9,2 $\text{MJ m}^{-2} \text{d}^{-1}$.

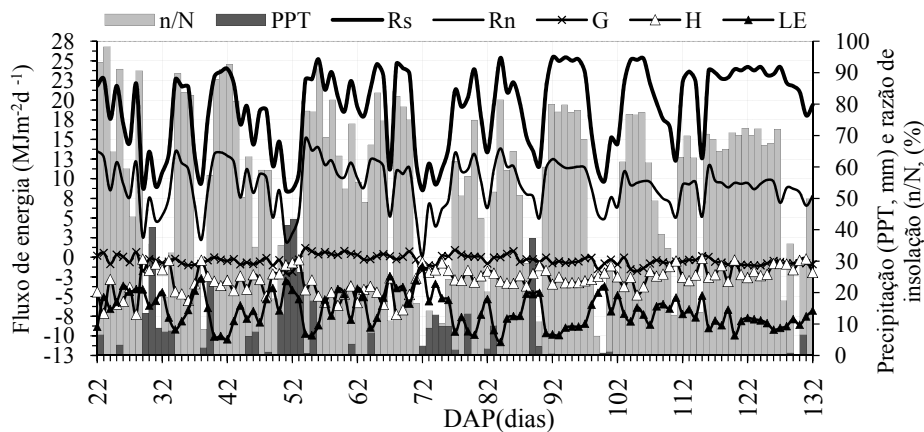


FIGURA 10 Variação da radiação solar incidente (R_s) e dos componentes do balanço de energia, saldo de radiação (R_n), fluxo de calor sensível no solo (G), fluxo de calor sensível do ar (H), fluxo de calor latente de evaporação (LE), precipitação pluvial diária (PPT) e razão de insolação (n/N) observados no período entre 22 e 132 dias após o plantio da mamona (DAP).

Por outro lado, o fluxo de calor sensível do ar (H) e o fluxo de calor latente (LE) também acompanharam as oscilações de R_n , porém, de forma simétrica, apresentando valores negativos e indicando que ocorreu transferência de energia na forma de calor sensível e de calor latente de evaporação da camada limite do dossel da cultura para as camadas superiores da atmosfera em todo o período (Figura 10). A simetria entre LE e R_n sugere que, assim como recomendado por Teixeira (2001), essa relação pode servir de critérios para a determinação do consumo de água pela cultura sob manejo de irrigação. Os valores máximos de LE e H foram de $-1,2$ e $-0,1 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e mínimos de $-10,8$ e $-7,3 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ e os médios de $-6,6$ e $-3,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente.

Observa-se também (Figura 10) que a curva de LE se manteve abaixo da curva de H , indicando que, ao longo do período estudado, a maior parte da

energia disponibilizada pelo saldo de radiação diário (R_n) foi consumido pelo processo de evapotranspiração, exceto nos dias 23, 25 a 26, 28, 57, 59, 62 e 66 a 69 DAP, anteriores aos 70 DAP. Essas exceções coincidem com o período de desenvolvimento da cultura, em que a fração de cobertura solo (f_c) não ultrapassou os 36% (fase inicial, Figura 6), dias de céu aberto (n/N maiores) e sem alturas significativas de precipitação pluvial para o completo molhamento da fração de solo exposta e não irrigada (lembrando que as irrigações foram realizadas apenas numa pequena fração do solo, $f_w = 33\%$, e que foi realizado o controle das plantas invasoras). Assim, também coincidem com elevado albedo, contribuindo para a redução do balanço de ondas curtas (Figura 7).

Sob essas condições, para os dias em que os valores de H , em módulo, foram maiores aos de LE , a maior parte da energia disponível (R_n) passa a ser consumida mais pelo fluxo de calor sensível (H) que pelo fluxo de calor latente de evaporação (LE), resultando em valores da razão de Bowen diária (β) mais elevados. Esse comportamento também foi verificado por Lima et al. (2005), em cultivo de feijão no brejo paraibano e por Neves (2006), também com feijão, em Tracuateua, PA.

Durante todo o período estudado, os valores mínimo, médio e máximo de G foram de $-2,0$; $-0,4$ e $1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Os maiores e os menores valores de G foram observados ainda nas fases de menor crescimento da cultura (fases I e II), sendo o maior valor absoluto registrado ($-2,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) coincidente com o valor mínimo de R_s ($8,5 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), no dia 14/03 (51 DAP), quando houve altura de precipitação de 41,5 mm e alta nebulosidade ($n/N = 0\%$). O valor máximo ($G = 1,2 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$) é coincidente com o valor máximo de R_n ($15,0 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$), no dia 17/03 (54 DAP), quando nebulosidade foi baixa ($n/N = 78\%$), apesar da pequena precipitação ocorrida (0,7 mm).

O fluxo de calor no solo (G), da mesma forma que Rn, também acompanha as variações de Rs (Figura 10), porém, em proporções menores que as variações desses fluxos. Verifica-se também que a curva do fluxo de calor sensível H, com frequência, fica abaixo da curva de G, sendo verificada a ocorrência de alguns dias em que a curva de G se igualou ou, até mesmo, foi ultrapassada pela curva de H, à semelhança do que ocorre entre as curvas de LE e H. Nesses dias (29, 30, 39, 50 a 52, 71, 90 111 e 130 a 131 DAP), os valores de G foram menores que os valores de H, ou seja, em módulo G maior que H e, portanto, comparativamente ao H, consome a maior parte do saldo de radiação (Rn). Esse fato também foi observado por Cunha & Bergamaschi (1994). Observa-se, pela Figura 10, que esses dias estão relacionados, de forma simultânea, à ocorrência de alta nebulosidade ($0 \leq n/N < 17\%$) e ao maior molhamento do solo pela ocorrência de precipitações pluviais (PPT de até 43,4 mm no 52 DAP, Figura 10) e ou à menor cobertura do solo pela cultura.

Borges et al. (2008) encontraram, para a cultura da mangueira irrigada por microaspersão, no município de Petrolina, PE, as seguintes variações médias ao longo das fases de cultivo (em Wm^{-2}) para Rn, LE, H e G, respectivamente: 17,74 a 30,85 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (209,7 a 364,7 Wm^{-2}); -30,95 a -12,43 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (-365,9 a -147,0 Wm^{-2}); -5,96 a -0,54 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (-70,5 a -6,4 Wm^{-2}) e de -0,220 a -0,118 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$ (-2,6 a -1,4 Wm^{-2}). Já Cunha & Bergamaschi (1994) encontraram variações mais próximas das encontradas neste trabalho, em cultivo da alfafa irrigada por aspersão, entre fevereiro e agosto, no município de Eldorado do Sul, RS: para Rn, LE, H e G as variações foram de 8,33 a 16,82; -14,4 a -6,65; -2,33 a +1,53 e de -1,58 a -0,5 $\text{MJ m}^{-2}\text{d}^{-1}$, respectivamente.

b) Variação relativa dos componentes no período estudado

A partir dos dados diários de R_s , R_r , R_n , LE , H e G (Figura 7 e Figura 10), calcularam-se as médias decendiais para gerar as curvas da Figura 11 referentes às partições dos componentes LE , H e G do balanço de energia em relação ao saldo de radiação (R_n) e desse em relação à radiação solar incidente (R_s), isto é, LE/R_n , H/R_n , G/R_n e R_n/R_s , e também as partições do fluxo de calor sensível do ar (H) em relação ao fluxo de calor latente, correspondente à razão de Bowen ($H/LE = \beta$) e da radiação solar refletida (R_r) em relação à radiação solar incidente (R_s) correspondente ao albedo (R_r/R_s).

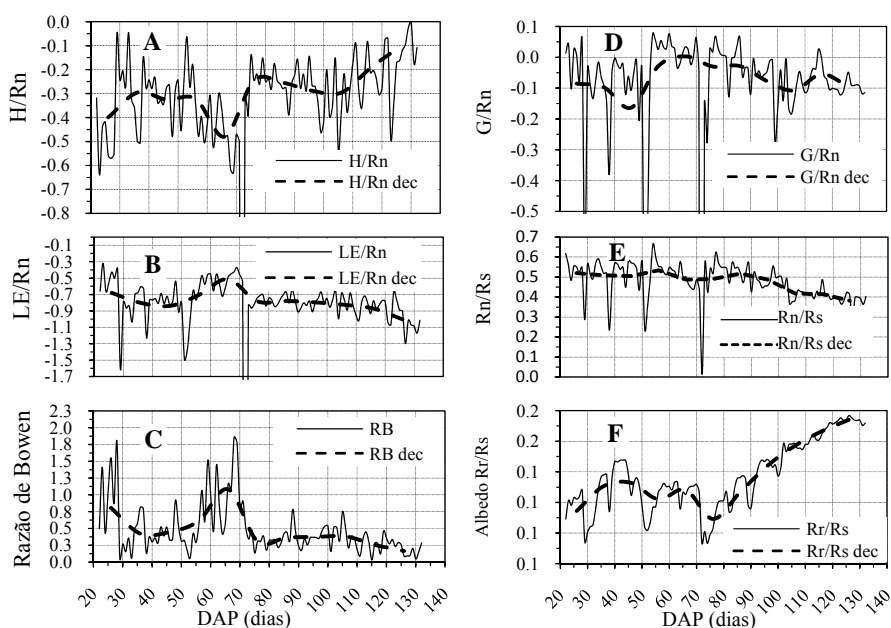


FIGURA 11 Variação das partições do saldo de radiação (R_n) em fluxo de calor sensível (H/R_n , A), fluxo de calor latente (LE/R_n , B), razão de Bowen ($\beta = H/LE$, C) e fluxo de calor no solo (G/R_n , D), albedo (R_r/R_s , E), razão entre R_n e radiação solar incidente (R_n/R_s , F), em valores diários observados e médios decendiais, no período entre os 22 e 132 DAP (14/02 a 03/06/2008).

Observando-se a curva dos valores medos da razão de Bowen β (Figura 11, C), verificam-se dois períodos marcantes: um primeiro, que vai até os 70 dias após o plantio DAP (02/04/2008) e o outro que vai além desse DAP. No primeiro período, são observados os maiores valores médios de β , variando entre 0,42 e 0,81 e a partição R_n/R_s , praticamente estável em torno de 0,5 (Figura 11 E). No período seguinte, após os 70 DAP, os valores médios de β reduzem-se acentuadamente no início, estabilizando-se rapidamente em seguida, com valores variando entre 0,17 e 0,38 e a partição R_n/R_s (Figura 11 E) cai ligeiramente, em torno de 0,4, ao final do período de observações. Esse comportamento de β é evidenciado claramente pela simetria entre as curvas das partições H/R_n e LE/R_n (Figura 11, A e B), respectivamente.

Nesse primeiro período anterior aos 70 DAP, observa-se que os valores médios na curva de β (Figura 11, C) são elevados nos extremos, de 22 a 28 DAP e de 56 a 70 DAP (β , em torno de 0,80) e baixos nos dias intermediários entre 29 a 55 DAP (β , em torno de 0,42). Esse primeiro período anterior aos 70 DAP coincide com as fases iniciais da cultura em que a cobertura do solo pela cultura é pouco expressiva (f_c , estimada em menos de 10% na fase I e menos de 36% na fase II, Figura 6) e quando observa-se maior concentração e distribuição das chuvas e alta frequência de dias nublados (Figura 10 e Tabela 3). No início das observações, entre os 22 e 29 DAP, a nebulosidade é baixa com céu aberto (n/N variando entre 44% a 98%) e a precipitação pluvial nesse período também (9,9 mm acumulados ou 1,4 mm média/dia). Nessas condições, há um maior aquecimento da superfície do solo exposta (não irrigada na entrelinha de plantio) em relação às camadas superiores da atmosfera, verificando-se assim, nesses dias, maior fração da energia em módulo, disponibilizada pelo saldo de radiação (R_n), sendo utilizada sob a forma de calor sensível (Figura 11, A).

No período subsequente, entre os 29 e 55 DAP, a cobertura do solo ainda é inexpressiva, a nebulosidade é variável, alternando dias de céu aberto e nublado, porém, com maior frequência de dias com céu aberto ($[50 < n/N < 100\%]$, maior que 50%, Tabela 3) e a precipitação aumenta (261,7 mm acumulados ou 9,7 mm média/dia). Sob essas novas condições, a superfície do solo fica completamente molhada, absorvendo maior energia da radiação incidente R_s , apesar dos altos valores de albedo (Figura 11, F), o que favorece mais significativamente a evaporação da água do solo exposto sob a forma de fluxo de calor latente (LE), observando-se, com isso, a redução dos valores médios de β (Figura 11, C) com o aumento, em módulo, da partição utilizada na forma de fluxo de calor latente (Figura 11, B). Nota-se também, entre os 29 e 55 DAP, redução, em módulo, dos menores valores da partição G/R_n (Figura 11, D), possivelmente devido ao resfriamento da camada superficial do solo, tornando-se mais fria que as camadas subsuperficiais, o que, segundo Souza et al. (2008), está relacionado com a maior umidade do solo.

Nos demais dias, entre os 56 e 70 DAP, as condições voltaram a ser semelhantes às ocorridas entre 22 e 28 DAP, com maior frequência dos dias de céu aberto (com mais 90% dos dias, n/N variando entre 50% e 91%), menor frequência de dias chuvosos e de menores alturas de precipitação (10,9 mm acumulados ou 0,7 mm média/dia), repercutindo no retorno do aumento de β (Figura 11, C), com a redução, em módulo, da partição do fluxo de calor latente (Figura 11, B).

Na transição e, logo após os 70 DAP, os valores médios da curva de β diminuem acentuadamente até os 80 DAP (Figura 11, C) para, em seguida [com a diminuição das chuvas, dias nublados (Figura 10) e o intenso desenvolvimento da cultura, em termos de altura da planta (h) e fração de cobertura do solo (f_c)

(Figura 6)] variarem entre 0,17 e 0,38, com tendência de redução ao final do período de observações (132 DAP, quando o valor de β atingiu o mínimo de 0,17 e h e fc , os maiores valores, respectivamente de 0,97 m e 67%). Dessa tendência de redução de β resultaram o aumento em módulo, da partição LE/Rn (Figura 11, B) e a redução da partição H/Rn (Figura 11, A), estando, ao final desse período (132 DAP), o menor valor absoluto da partição H/Rn próximo do menor valor absoluto da partição G/Rn (cerca de -0,1). Cunha & Bergamaschi (1994), avaliando o balanço de energia na cultura da alfafa sob condições ótimas de umidade, mantidas por sistema de irrigação por aspersão, observaram que, sob menor grau de cobertura do solo, o fluxo de calor no solo, em módulo, aumenta a ponto de igualar ou, até mesmo, superar o fluxo de calor sensível. Observa-se também, nesse segundo período, que a partição Rn/Rs (Figura 11, E), ao contrário do anterior (praticamente estável em torno de 0,5), tende a diminuir, assim como a a partição G/Rn (Figura 11, D), atingindo ao final os respectivos valores médios de 0,38 e -0,09. O albedo (Figura 11, F), ao contrário das partições Rn/Rs e G/Rn nesse segundo período, tende a aumentar, refletindo num comportamento inverso ao dessas partições.

A partir dos dados médios decendiais da Figura 11 (à exceção do albedo e da razão de Bowen) foram calculados, nas fases I, II e III, os valores médios, as partições e o somatório das partições dos componentes do balanço de energia em relação ao saldo de radiação (Rn), isto é, $(LE+H+G)/Rn$, apresentados na Tabela 5.

TABELA 5 Fluxos médios diários da radiação solar incidente (Rs), saldo de radiação (Rn), calor latente (LE), calor sensível do ar (H) e calor no solo (G) e os percentuais das partições Rn/Rs, LE/Rn, H/Rn, G/Rn e do somatório ((LE+H+G)/Rn), correspondentes às fases I, II e III

Fases	Fluxos médios (MJ m ⁻² d ⁻¹)					Partições de fluxos médios (%)				
	Rs	Rn	LE	H	G	Rn/Rs	LE/Rn	H/Rn	G/Rn	(LE+H+G)/Rn
I	17,27	9,34	-6,02	-3,76	-0,36	54,09	-64,40	-40,20	-3,87	-108,57
II	18,25	9,51	-6,45	-3,21	-0,16	52,10	-67,90	-33,80	-1,72	-103,26
III	20,66	8,84	-7,40	-2,09	-0,67	42,81	-83,70	-23,60	-7,55	-114,93
Média	18,73	9,23	-6,62	-3,02	-0,40	49,67	-72,00	-32,50	-4,38	-108,92

Avaliando a variação dos valores médios das partições por fases (fases I, II e III), em todo o período de observação, nota-se que (Tabela 5) as partições do saldo de radiação (Rn) em fluxos de calor latente (LE) e fluxo de calor no solo (G) tenderam a aumentar, em módulo, enquanto a partição fluxo de calor sensível (H) tende a diminuir. Nota-se também que, pelo somatório das três partições em relação a Rn (LE+H+G)/Rn, há uma superestimação média do somatório dos componentes do balanço de energia (LE, H e G) em relação ao saldo de radiação (Rn), revelando um desvio médio absoluto de 8,92%.

Esse desvio pode ser atribuído a inúmeros fatores, como já comentado ou avaliado por vários autores (Heilman & Brittin, 1989; Cunha & Bergamaschi, 1994; Cellier et al., 1996; Ortega-Farias et al., 1996; Unland et al., 1996; Perez et al., 1999). O mais evidente deles está relacionado, segundo Cunha & Bergamaschi (1994), às pressuposições teóricas relacionadas ao método da razão de Bowen, utilizado na sua estimativa, além de não integrarem os demais componentes, como armazenamento de calor na planta, fotossíntese, etc., desprezados na equação simplificada do balanço de energia. Outra explicação

provável são os baixos gradientes de pressão de vapor e temperatura que, como comentado por Perez et al. (1999), ocorrem em regiões úmidas e sob baixa velocidade do vento, devido a chuvas ou irrigações e inversão térmica no nascer, por do sol e à noite, o que tende elevar muito os valores da razão de Bowen. Segundo esses autores, a obtenção de bons resultados com a razão de Bowen requer gradientes maiores que $0,03 \text{ kPa m}^{-1}$, devendo ser rejeitados os dados noturnos e obtidos após precipitação ou irrigação.

Outro fato a ser considerado é a precisão das medições dos fluxos R_n , G e gradientes de temperatura e umidade relativa realizadas pelos respectivos sensores, ou em virtude dos fluxos advectivos de LE e H , tendo em vista o pequeno tamanho da área, apesar das baixas velocidades médias do vento a dois metros de altura, no período de observações (U_2 de $1,4$ a $1,7 \text{ m s}^{-1}$, Tabela 2, velocidades baixas, segundo Allen et. al., 1998). Dessa forma, visto que, neste estudo, os dados foram considerados para o período de 24 horas, não excluídos dados de período noturno ou de dias chuvosos, justifica-se essa superestimação do saldo de radiação (R_n) pelo somatório dos componentes do balanço de energia e, grosso modo, esse desvio não compromete a avaliação do balanço de energia.

Borges et al. (2008) encontraram, para a cultura da mangueira irrigada por microaspersão, no município de Petrolina, PE, as seguintes variações das partições de LE , H e G em relação a R_n : $13,32\%$ a $97,91\%$, $1,56\%$ a $40,89\%$ e $0,19\%$ a $6,7\%$, respectivamente. Já, Cunha & Bergamaschi (1994), em cultivo da alfafa irrigada por aspersão, entre fevereiro e agosto, no município de Eldorado do Sul, RS, encontraram as respectivas frações médias de R_n em LE , H e G de 86% , 9% e 5% e Souza et al. (2008) encontraram, para abacaxi, durante o período analisado, valores médios de $74,95\%$, $18,38\%$ e $6,68\%$, com fluxos médios de $13,44$; $10,01$; $2,42$ e $0,91 \text{ MJ m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, respectivamente. Esses valores,

similares aos da partição do saldo de radiação, foram obtidos por Borges et al. (2008), em experimento com a mangueira irrigada na região submédia do rio São Francisco. Neves (2006), em Tracuateua, PA, encontrou, para a cultura do feijão-caupi, na fase de crescimento vegetativo, valores médios diurnos de β variando entre 2,81 e 0,97 e das partições de LE/Rn e H/Rn, de 0,21 a 0,45 e 0,42 a 0,63, respectivamente e, na fase de maturação β , LE/Rn e H/Rn variando entre 0,33 e 1,5, 0,14 a 0,26 e de 0,41 a 0,73. Lima et al. (2004), no município de Areia, PB, sob condições do Brejo Paraibano em cultivo da mamona cultivar BRS Nordeste, encontraram, para as partições de Rn em Rs e de LE, H e G em RN, os respectivos valores médios de 65%, 51%, 38% e 11%.

c) Variação dos componentes durante o dia, por fase e condição de nebulosidade

Nas Figuras 12 e 13 encontram-se as curvas de variação diária de Rs, Rn, LE, H, G e β (sendo esta última em duas escalas para melhor visualização de sua variação diurna), para as condições meteorológicas de dia de céu aberto (Figura 12) e dia nublado (Figura 13), escolhidos em cada uma das três fases da cultura em que se realizou o estudo do balanço de energia (fases I, II e III). Na Tabela 6, observam-se os fluxos e as partições integralizadas durante as 24 horas do dia. Para os dias de céu aberto (Figuras 12), 22 DAP (14/02), 80 DAP (12/04) e 105 DAP (07/05/2008), a razão de insolação (n/N) foi de 93,4%, 74,8% e 76,7%, com altura de precipitação (PPT) de 6,6; 0,0 e 0,0 mm, respectivamente e, para os dias de céu nublado (Figuras 13), 30 DAP (22/02), 71 DAP (03/04) e 100 DAP (02/05/2008), n/N foi de 35,5%, 16,6% e 0%, com PPT de 40,8; 0,0 e 0,8 mm, respectivamente.

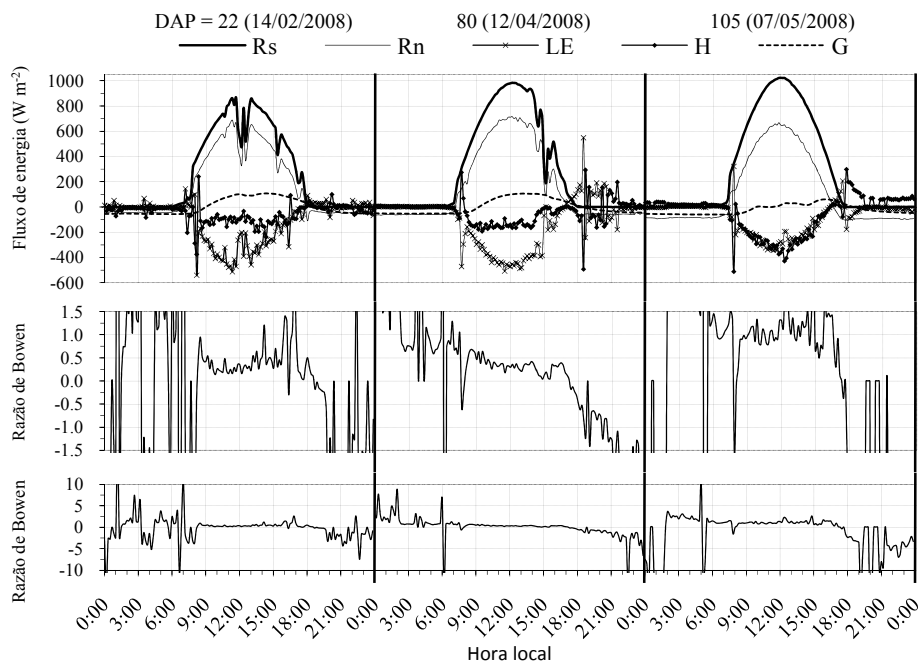


FIGURA 12 Gráficos das curvas da radiação solar incidente (R_s), saldo de radiação (R_n), fluxo de calor latente (LE), fluxo de calor sensível do ar (H), fluxo calor sensível no solo (G) e razão de Bowen (β , em duas escalas diferentes) para dias de céu aberto representativos das fases I, II e III para 14/02/2008 (DAP = 22), 12/04/2008 (DAP = 80) e 07/05/2008 (DAP = 105), respectivamente.

Nas Figuras 12 e 13 observam-se que, para qualquer que sejam as condições meteorológicas e fases da cultura, as curvas de R_n , LE e H acompanham as variações de R_s que, por sua vez, oscilam (apresentam picos) com a cobertura do céu por nuvens. O R_n tem o mesmo sentido de R_s (normalmente positivos durante o dia, indicando entrada de energia no sistema solo-planta) e sentidos contrários para LE e H (normalmente negativos durante o dia, indicando saída de energia do sistema solo-planta). Para os dias de céu

aberto (Figura 12), observa-se que os valores instantâneos das curvas de R_s e R_n não sofrem oscilações diurnas significativas, com exceção dos 22 DAP, por volta das 12h00 e dos 80 DAP, por volta das 15h00 h, horários esses em que se verifica maior depressão das curvas de R_s e R_n o que pode estar associado à cobertura do céu por nuvens nesses horários.

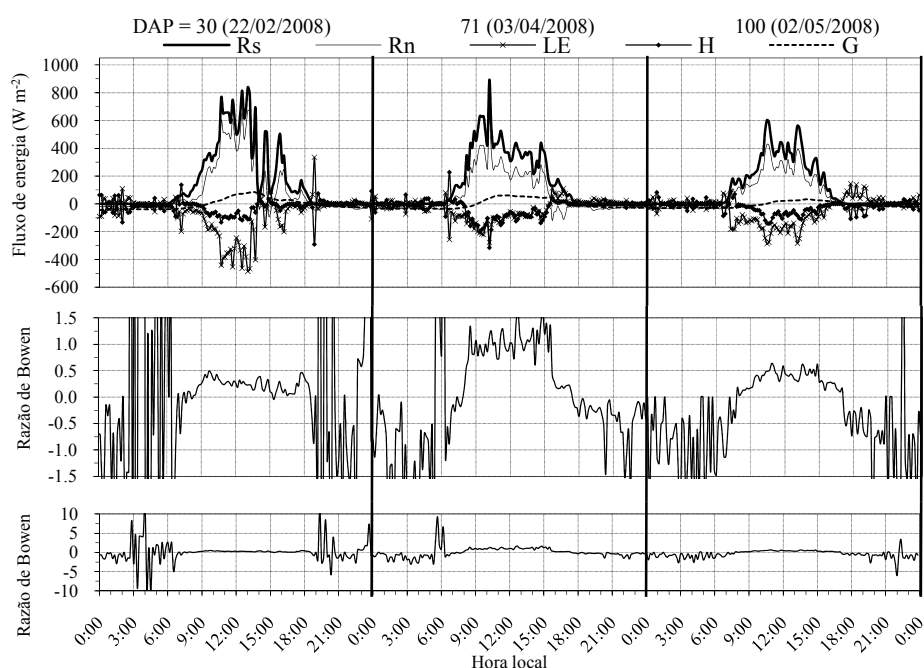


FIGURA 13 Gráficos das curvas de radiação solar incidente (R_s), saldo de radiação (R_n), fluxo calor no solo (G), calor latente (LE), calor sensível (H) e razão de Bowen (β , em duas escalas diferentes) para dias de céu nublado representativos das fases I, II e III, nos respectivos dias do ano, 22/02/2008 (DAP=30), 03/04/2008 (DAP=71) e 02/05/2008 (DAP=100).

Nota-se, ainda, nas Figuras 12 e 13, que tanto nos dias de céu aberto como nos de céu nublado, as curvas de R_s se mantiveram superiores às curvas de R_n . Por outro lado, os valores absolutos das curvas de LE (Figuras 12 e 13) foram superiores aos valores de H durante o período diurno, principalmente nos 22 e 80 DAP (dias de céu aberto) e 30 e 100 DAP (dias de céu nublado), o que poder ser notado também nos gráficos da razão de Bowen (β) de menor escala, com variação positiva dos valores de β em torno da média de 0,4. Ainda como relação às curvas de LE e H nota-se que tanto aos 105 DAP (dia de céu aberto, Figura 12), quanto aos 71 DAP (dia de céu nublado, Figura 13), ao contrário dos demais dias de céu aberto (22 e 80 DAP, Figura 12) e nublado (30 e 100 DAP, Figura 13), os fluxos LE e H se aproximaram bastante durante a maior parte do período diurno, e as curvas praticamente se sobrepuseram.

Essa diferença de comportamento entre LE e H aos 71 e 105 DAP com os 22, 30, 80 e 100 DAP pode ser explicada pelas condições de umidade do solo nesses dias. Nos 22 e 30 DAP (fase I, com menos de 10% de cobertura do solo, fc) choveu, nesses e nos dias anteriores, às alturas acumuladas de 161,6 mm nos 13 dias anteriores aos 22 DAP (dos 243,3 mm para o mês de fevereiro, Tabela 2) e, 57,6 mm nos 7 dias anteriores aos 30 DAP. Para os 80 e 100 DAP (fases II e III, respectivamente, com cobertura do solo inferior a 60%) choveu, nos 8 dias anteriores aos 80 DAP, o acumulado de 58,4 mm (dos 110,6 mm para o mês de abril) e nos 11 dias anteriores aos 100 DAP, 40,6 mm. Sob essas condições, dos 22, 30, 80 e 100 DAP, o solo apresentou-se bastante úmido (especialmente na entrelinha de plantio, exposta à radiação solar incidente), favorecendo os maiores fluxos de LE em relação aos fluxos de H. Por outro lado, nos 71 e 105 DAP (fases II e III, respectivamente), o solo apresentou-se mais seco na entrelinha de plantio exposta à radiação solar, devido às poucas chuvas ocorridas nos dias anteriores, sendo apenas 10,9 mm acumulados nos 14 dias anteriores

aos 71 DAP e 5,4 mm nos 13 dias anteriores aos 105 DAP. Nessas condições, os fluxos de calor sensível ganham maiores proporções, podendo até ultrapassar em módulo a curva de LE, o que já foi constatado também por Cunha & Bergamaschi (1994) e por Lima et al. (2005) na cultura do feijão sob estresse hídrico. Cabe observar, ainda, que, para os 71 e 105 DAP, os valores positivos de β variaram em torno da média de 1, na maior parte do período diurno.

Contudo, para o período noturno e de transição entre o dia e a noite, a diferença entre os valores absolutos de LE e H diminuem e seus valores se aproximam do eixo zero. Nesses horários noturnos e de transição, os valores de β oscilam bastante, alternando entre sentidos positivos e negativos, o que poder ser notado nos gráficos da razão de Bowen (Figuras 12 e 13). Esse comportamento já foi observado por vários autores, como Heilman & Brittin (1989), Cunha & Bergamaschi (1994), Cellier et al. (1996), Ortega-Farias et al. (1996), Unland et al. (1996), Perez et al. (1999), Lima et al. (2005), Borges et al. (2008) e Souza et al. (2008).

Verifica-se, pelos dados da Tabela 6, que os fluxos integrais de energia, em valores absolutos de R_s , R_n , LE e H, para os dias de céu aberto, foram maiores que para os dias de céu nublado, independente da fase da cultura, à exceção de G que, para os dias de céu aberto (22 e 80 DAP), tiveram menores valores absolutos, porém, indicando, pelo sinal, maior entrada de energia do fluxo G no sistema solo-planta no período diário. Entretanto, observa-se que, para os dias de céu aberto, as partições médias diárias, em valor absoluto, dos fluxos LE, H e G em relação ao R_n , assim como o somatório dessas partições médias, são menores que as partições médias dos dias de céu nublado.

TABELA 6 Fluxos integrais e médios diários da radiação solar incidente (Rs), saldo de radiação (Rn), calor latente (LE), calor sensível do ar (H) e calor no solo (G) e os percentuais relativos de Rn/Rs, LE/Rn, H/Rn, G/Rn e somatório ((LE+H+G)/Rn) dos respectivos dias após o plantio (DAP) escolhidos para a condição meteorológica de dias de céu aberto e nublado, nas correspondentes fases I, II e III do período entre 14/02/2008 (22 DAP) e 03/06/2008 (132 DAP)

Condição meteorológica	Fluxo integral diário					Percentual relativo de fluxo integral diário				
	Rs	Rn	LE	H	G	Rn/Rs	LE/Rn	H/Rn	G/Rn	(LE+H+G)/Rn
Dia de céu aberto	(MJ m ⁻² d ⁻¹)					(%)				
DAP=22 (14/Fev)	21,83	13,49	-8,86	-4,41	0,19	61,81	-65,66	-32,67	1,38	-96,96
DAP=80 (12/Abr)	23,91	13,13	-9,88	-3,17	0,08	54,94	-75,24	-24,15	0,61	-98,78
DAP=105 (07/Mai)	25,13	9,46	-6,40	-4,81	-1,75	37,66	-67,67	-50,78	-18,46	-137,00
Média	23,62	12,03	-8,38	-4,13	-0,49	51,47	-69,52	-35,87	-5,49	-110,91
Dia de céu nublado	(MJ m ⁻² d ⁻¹)					(%)				
DAP=30 (22/Fev)	13,40	7,58	-6,18	-1,66	-0,25	56,40	-81,46	-21,84	-3,26	-106,55
DAP=71 (03/Abr)	12,30	5,30	-2,94	-2,68	-0,33	43,00	-55,42	-50,58	-6,02	-112,02
DAP=100 (02/Mai)	9,74	4,91	-3,71	-1,99	-0,80	50,39	-75,63	-40,65	-16,28	-132,56
Média	11,81	5,93	-4,27	-2,11	-0,46	49,93	-70,83	-37,69	-8,52	-117,04

4.3 Evapotranspiração da cultura

Na Figura 14 estão representadas as curvas de ETo e a ETc da cultura obtida pela razão de Bowen, as precipitações pluviais (PPT) e a razão de insolação (n/N) durante o período de estudo. Nota-se que, de forma geral, ETo e ETc variam juntas, oscilando em resposta às variações das chuvas. Os respectivos valores máximos, médios e mínimos de ETo e ETc no período de estudo foram de 4,85; 3,47; 1,47 mm d⁻¹ e de 4,89; 2,8; 0,57 mm d⁻¹, respectivamente. Os respectivos valores médios de ETc, nas fases I, II e III, foram de 2,48; 2,68 e 3,04 mm d⁻¹.

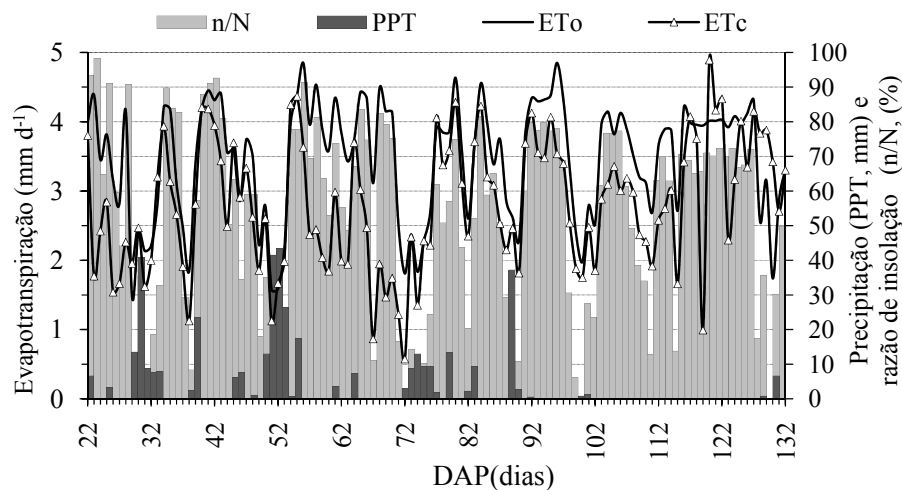


FIGURA 14 Evapotranspiração de referência (ETo), determinada por FAO Penman-Montheith e evapotranspiração da cultura da mamona (ETc), estimada pelo método do balanço de energia utilizando a técnica da razão de Bowen (β), altura diária de precipitação (PPT) e razão de insolação (n/N) no período entre 22 DAP (14/02) e 132 DAP (03/06/2008).

Curi & Campelo Júnior (2004) encontraram, para a cultura da mamona, híbrido Íris, evapotranspiração máxima média (ETm) de $4,0 \text{ mm.dia}^{-1}$, obtida em lisímetros de nível freático constante, nas condições da Baixada Cuiabana (Santo Antônio do Leverger, MT). Esse valor é bem superior à média de $2,68 \text{ mm.dia}^{-1}$ encontrada aqui, porém, é pertinente destacar que se trata de uma região com condições meteorológicas bem distintas das condições de Lavras, MG, além da variedade e da forma de irrigação utilizada por esses autores.

4.4 Coeficiente da cultura

Na Figura 15 estão representados os valores dos componentes evaporativos ($K_e \cdot ET_o$) e de transpiração das plantas ($K_{cb} \cdot ET_o$) e a curva estimada da fração de cobertura do solo durante o período de estudo. Nessa figura distingue-se o 67 DAP como sendo o dia em que a fração de cobertura do solo (f_c) ultrapassa a fração de solo irrigada na linha de plantio (f_w), resultando em um componente de evaporação ($K_e \cdot ET_o$) praticamente nulo e que, por definição, está incorporado no componente de transpiração ($K_{cb} \cdot ET_o$), K_c . Essa condição foi propícia apenas depois dos 70 DAP, período que corresponde à diminuição das chuvas (Figura 5) e quando a evapotranspiração da cultura esteve restrita à faixa molhada pelo sistema de irrigação por gotejamento (f_w), visto que, na fração exposta e seca da entrelinha de plantio ($1-f_w$) e ou não sombreada ($1-f_c$), a evaporação do solo foi praticamente nula, considerando-se ainda a estiagem e o controle adequado das plantas invasoras. Por isso, verifica-se, na Figura 15, que o componente transpirativo ($K_{cb} \cdot ET_o$) acompanha, em termos médios, a curva de f_c em todo o período analisado e o componente ($K_e \cdot ET_o$), no período de maior concentração das chuvas e exposição do solo à radiação direta dos raios solares, contribuiu com a maior parcela da evapotranspiração da cultura ET_c .

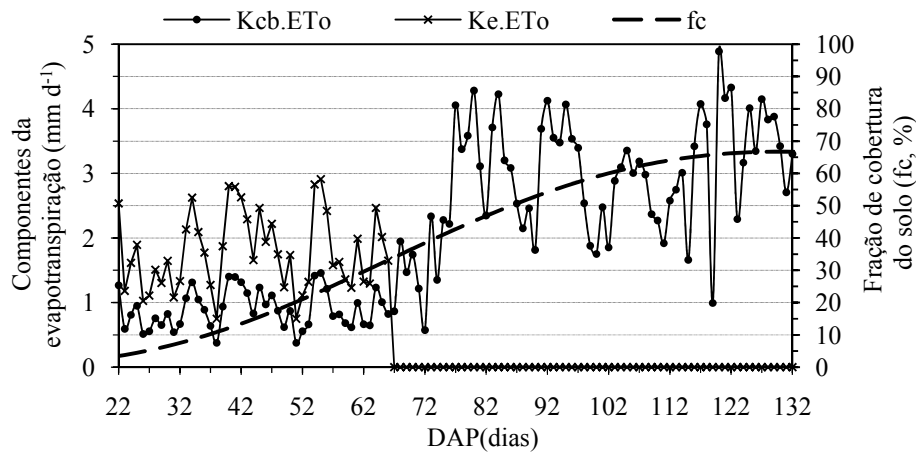


FIGURA 15 Curvas dos componentes de evaporação do solo ($K_e \cdot E_{To}$) e transpiração da cultura da mamona ($K_{cb} \cdot E_{To}$) e curva da fração de cobertura do solo pela cultura (f_c), no período entre 22 DAP (14/02) e 132 DAP (03/06/2008).

Com os dados da Figura 15 foi possível determinar os três pontos da curva de K_c (Figura 16), recomendados por Allen et al. (1998). Pelo gráfico da Figura 16 observa-se o comportamento das curvas da fração de cobertura do solo, K_c calculados e K_c médio, para cada fase da cultura, tendo o mesmo comportamento, principalmente após aos 70 DAP em que o K_c foi calculado apenas pela relação E_{Tc}/E_{To} . Verifica-se, ainda, que K_c acompanha, em termos médios, a curva de f_c em todo o período analisado, com ajuste da curva de segundo grau apresentando coeficiente de determinação (r^2) de 0,635.

Andrade Júnior et al. (2008), determinando K_c da mamoneira em sistema monocultivo, encontraram valores médios entre 0,15 a 0,75, entre 12 e 150 DAP, respectivamente, e de K_c máximo da mamoneira em consórcio com feijão, na fase de formação e enchimento de vagens, de 1,2.

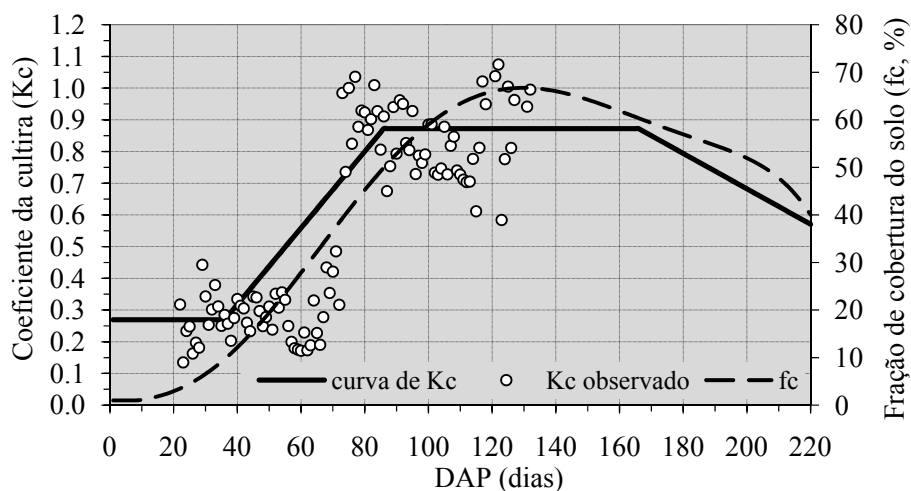


FIGURA 16 Curva do coeficiente único da cultura da mamona (K_c), estimada pelos valores médios calculados, segundo métodos e recomendações da FAO (Allen et al., 1998) e curva de regressão da fração de cobertura do solo pela cultura (f_c), durante o ciclo da cultura, em dias após o plantio (DAP) (24/01 a 30/08).

Allen et al. (1998) afirmam que, apesar das informações locais serem mais representativas, os valores encontrados não devem diferir dos tabelados em mais 0,2. Os K_c das fases I, III e IV obtidos neste estudo não ultrapassam esse limite, conforme pode ser verificado na Tabela 7. Nessa mesma tabela, verifica-se também que a duração das fases II e III é pouco maior que as correspondentes fornecidas pelo boletim FAO. Como ratificado por Allen et al. (1998), a tabela existente nesse boletim reflete apenas generalizações em termos médios e, portanto, as diferenças encontradas aqui são particularidades de fatores como variedade da cultura, condições meteorológicas da região e tipo de irrigação, entre outros.

TABELA 7 Valores médios do coeficiente dual da cultura da mamona (Kcb), estimados pelos valores médios calculados e os valores tabelados, segundo métodos e recomendações da FAO (Allen et al., 1998) por fases e duração de cada fase (I, II, III e IV) do ciclo da cultura, de 24/01 a 30/08/2008

Fase	Dados experimentais		Dados tabelados FAO 56*	
	Duração dias	Kcb adimensional	Duração dias	Kcb adimensional
I	36	0,27	25	0,15
II	50	0,46	40	0,6
III	80	0,87	65	1,05
IV	54	0,57	50	0,45

* Esses dados de duração por fase se referem à Tabela 11 do boletim FAO-56 (Allen et al., 1998), com plantio em março, em região de clima semiárido e de Kcb, nas fases I, III e IV, corrigidos da Tabela 12 (Kc, único) pelos critérios estabelecidos na Tabela 18 (Kcb), sob condições de clima subúmido (média da umidade relativa mínima $RH_{mín} \approx 45\%$, velocidade média do vento $U_2 \approx 2$ m s⁻¹) e altura máxima da planta de 0,3 m. O valor de Kc na fase II não é fornecido, apenas apresentado aqui como sendo a média dos Kcb das fases I e III. Essa referência (FAO-56, Allen et al., 1998) relata que os “dados experimentais” não podem diferir dos “dados tabelados FAO 56” em mais de 0,2.

5 CONCLUSÕES

Considerando as condições meteorológicas e experimentais em que se realizou este estudo, conclui-se que a determinação dos componentes do balanço de energia pela razão de Bowen foi satisfatória, resultando, para o período de medições, as partições médias do saldo de radiação utilizada pelo fluxo de calor latente, fluxo de calor sensível do ar e fluxo de calor no solo, de 71,99 %, 32,54%, 4,38 %, respectivamente. O somatório dessas partições médias foi de 108,92%, demonstrando uma superestimação média do saldo de radiação de 8,92%.

O fluxo médio diário da radiação solar incidente, saldo de radiação, calor latente, calor sensível do ar e do fluxo de calor no solo foi de 18,73; 9,23; -6,62; -3,02; -0,4 MJ m⁻² d⁻¹, respectivamente, e o albedo médio da cultura no período de medições foi de 0,14.

Os valores médios da evapotranspiração da cultura da mamona (ETc) e do coeficiente da cultura (Kc), nas fases inicial, crescimento e intermediária foram, respectivamente, de 2,48; 2,68; 3,04 mm d⁻¹, para a ETc e de 0,27; 0,46; 0,87 para o Kc. O coeficiente da cultura da mamona obtido está de acordo com os métodos e as recomendações do boletim FAO-56, podendo ser recomendado para condição semelhante em que se desenvolveu este experimento e para regiões de características climáticas COMO as do município de Lavras, MG.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ALFONSI, R. R. A.; SANTOS FILHO, B. G.; PEDRO JÚNIOR, M. J. P. et al. Balanço de energia em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.21, n.12, p.1233-1235, dez. 1986.
- ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).
- ALVES, A. V.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Balanço de energia e refletância de um cultivo de melão. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.6, n.2, p.139-146, 1998.
- ALVES, I.; PEREIRA, L. S. Modelling surface resistance from climatic variables? **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 42, n. 1, p. 371-385, Jan. 2000.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; KLAR, A. E. Produtividade da alface em função do potencial matricial de água no solo e níveis de irrigação. **Horticultura Brasileira**, Brasília, v.14, n.1, p.27-31, maio 1996.
- ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; MELO, F. de B.; MASCHIO, R.; RIBEIRO, V. Q.; MORAIS, E. L. da C. Coeficientes de cultivo da mamoneira em sistema monocultivo e consorciado com feijão-caupi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA MAMONA. 3., 2008, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 1 CD-ROM.
- ANGUS, D. E.; WATTS, P. J. Evapotranspiration: how good is the Bowen ratio method. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 8, n. 1-3, p. 133-150, 1984.
- AZEVEDO, B. M. **Evapotranspiração de referência obtida com a razão de Bowen, lisímetro de pesagem e equação de Penman-Monteith utilizando sistemas automáticos**. 1999. 81 p. Tese (Doutorado em Irrigação e Drenagem) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

AZEVEDO, D. M. P. de; NÓBREGA, M. B. da; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A. S.; BELTRÃO, N. E. de M. Manejo cultural. In: AZEVEDO, D. M. P. de; LIMA, E. F. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. cap. 6, p. 121-160.

AZEVEDO, P. V. de; TEIXEIRA, A. H. de C.; SILVA, B. B.; 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.

AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B.; SILVA, V. P. R. Water requirements of irrigated mango orchard in northeast Brazil. **Agricultural Water management**. Amsterdam, v. 58, n. 3, p. 241-254, Feb. 2003.

BARANOV, V. F. Irrigation. In: MOSHKIN, V. A. (Ed.). **Castor**. New Delhi: Amerind, 1986. p.237-248.

BELTRÃO, N. E. de M. Mamoneira e seu cultivo no Nordeste brasileiro: excelente opção para a agricultura familiar, em especial no Estado da Paraíba. **Bahia Agricola**, Salvador, v.4, n.2, p. 21-22, nov. 2001.

BELTRÃO, N. E. de M. **Sistema de produção de mamona em condições irrigadas: considerações gerais**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 14 p. (Comunicado Técnico, 132).

BELTRÃO, N. E. de M.; CARDOSO, G. D. **Informações sobre o sistema de produção utilizados na ricinocultura na região nordeste, em especial o semi-árido e outros aspectos ligados a sua cadeia**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 6 p. (Comunicado Técnico, 213).

BELTRÃO, N. E. de M.; SILVA, L. C. Os múltiplos usos do óleo da mamoneira (*Ricinus communis* L.) e a importância de seu cultivo no Brasil. **Revista Brasileira de Oleaginosas e Fibrosas**, Campina Grande, v. 1, n. 1, p. 73-79, 1997.

BELTRÃO, N. E. de M.; SILVA, L. C.; VASCONCELOS, O. L.; AZEVEDO, D. M. P.; VIEIRA, D. J. Fitologia. In: AZEVEDO, D. M. P. de; LIMA, E. F. (Ed.). **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. cap. 2, p. 37-62.

BERNADO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. 7.ed. Viçosa, MG: UFV, 2005. 611p.

BORGES, C. J. R.; AZEVEDO, P. V. de, SILVA, V. de P. R. da; CAMPOS, J. H. da C.; MOURA, M. S. B. de; SOARES, J. M.; SILVA, B. B. da. Influência do calor armazenado no sistema solo-planta no balanço de energia em pomar de mangueiras **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.12, n.4, p.393-399, out./dez. 2008.

BOWEN, I. S. The ratio of heat losses by conduction and by evaporation from any water surface. **Physical Review**, New York, v. 27, p. 779-787, 1926.

BRASIL. Ministério da Agricultura. **Normais climatológicas: 1961-1990**. Brasília, 1992. 84p.

BRASIL. Ministério do Desenvolvimento Agrário. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel**. Selo Combustível Social. Disponível em: <<http://www.biodiesel.gov.br/selo>>. Acesso em: 30 out. 2008.

BRUTSAERT, W. **Evapotranspiration into the atmosphere: theory, history and applications**. Dordrecht: D. Reidel, 1982. 229 p.

CAMARGO, A. P.; CAMARGO, M. B. P. Uma revisão analítica da evapotranspiração potencial. **Bragantia**, Campinas, v. 59, n. 2, p.125-137, 2000.

CARVALHO, B. C. L. **Manual do cultivo da mamona**. Salvador: EBDA, 2005. 65 p.

CARVALHO, L. G. de. SAMPAIO, S. C.; SILVA, A. M. da. Determinação da umidade na campo *in situ* de um Latossolo Roxo Distrófico. **Engenharia Rural**, Piracicaba, v. 7, n. 1, p. 1-97, dez. 1996.

CELLIER, P.; RICHARD, G.; ROBIN, P. Partition of sensible heat fluxes into bare soil and the atmosphere. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n. 82, n. 1-4, p. 245-265, Dec. 1996.

CHANG, J. **Climate and agriculture: an ecological survey**. 2. ed. Chicago: Aldine, 1971. 269 p.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Quinto levantamento de avaliação da safra 2006/2007**. Brasília: MAPA, 2007. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/5levsafra.pdf>>. Acesso em: 24 out. 2008.

CORRÊA, M. L. P.; SILVA, C. S. A. dos S.; TAVORA, F. J. A. F. Rendimento e uso eficiente da terra de duas cultivares de mamona consorciadas com sorgo granífero e caupi. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS, GORDURAS E BIODISEL, 1., 2004, Varginha. **Anais...** Varginha: UFLA, 2004.

CUNHA, G. R. da; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em alfafa. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 2, n. 1, p. 9-16, jan./jun. 1994.

CUNHA, G. R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Balanço de energia em cultura de milho, **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-14, jan./jun. 1996.

CURI, S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H. Evapotranspiração e coeficientes de cultura da mamoneira (*Ricinus Communis* L.), em Santo Antônio do Leverger-MT. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA MAMONA. NOVEMBRO, 1., 2004, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 1 CD-ROM.

DAÍ, Z.; EDWARDS, G. E.; KU, M. S. B. Control of photosynthesis and stomatal conductance in *Ricinus communis* L. (Castor Bean) by leaf to air vapor pressure deficit. **Plant Physiology**, Rockville, v. 99, n. 4, p. 1426-1434, Feb. 1992.

DANTAS, A. A. A.; CARVALHO, L. G.; FERREIRA, E. Classificação e tendência climática em Lavras, MG. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 6, p. 1862-1866, nov./dez. 2007.

DANTAS, A.A.A.; CASTRO NETO, P.C.; CARVALHO, L.G. de. Características hídricas da região de Lavras, Minas Gerais, no ano agrícola 2003-2004, para o cultivo da mmona (*Ricinus communis* L.). In: CONGRESSO BRASILEIRO – PLANTAS OLEAGINOSAS, ÓLEOS VEGETAIS E BIODIESEL, 1., 2004, Varginha. **Anais...** Varginha:UFLA, 2004. 1 CD-ROM.

DAVID, T. S.; FERREIRA, I.; PEREIRA, J. S.; COHEN, S.; DAVID, J. S. Transpiração em Árvores Isoladas de um Montado de Azinho. Evolução Sazonal e Condicionantes Hidráulicas. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 10, n. 2, p. 133-149, 2002.

DIAS, J. M.; SILVA, S. M. S.; GONDIM, T. M. de S.; SEVERINO, L. S.; BELTRÃO, N. E. de M.; BEZERRA, J. R. C.; VASCONCELOS, R. A. de. Efeitos de diferentes quantidades de água de irrigação e de densidade populacionais na cultura da mamona. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2., 2006, Aracaju. **Anais...**Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 1 CD-ROM.

DOORENBOS, J.; PRUITT, J. O. **Crop water requirement**. Rome: FAO, 1977. 179 p. (Irrigation and Drainage Paper, 24).

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Efeito da água no rendimento das culturas**. Campina Grande: UFPB, 1994. 306 p.

DOURADO NETO, D.; NIELSEN, D. R.; HOPANS, J. W.; PARLANGE, M. B. **Programa SWRC**: soil-water retention curve. Version 1.00. Piracicaba: ESALQ; Davis: University of Califórnia, 1995. Software.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412p.

FONTANA, D. C.; BERLATO, M. A.; BERGAMASCHI, H. Balanço de energia em soja irrigada e não irrigada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v. 26, n. 3, p. 403-410, mar. 1991.

FREIRE, R. M. M.; SEVERINO, L. S. Óleo de Mamona. In: SEVERINO, L. S.; MILANI, M.; BELTRÃO, N. E. M. **Mamona**: o produtor pergunta, a Embrapa responde. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2006. p. 243-248.

FREIRE, R. M. M. Ricinoquímica. In: AZEVEDO, D. M. P. de; LIMA, E. F. L. **O agronegócio da mamona no Brasil**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. p. 295-335.

GALVANI, E.; ANDRADE, S. C.; CUICCIO, M. R.; CHIARLE, I. B.; MATSUDA, G. Avaliação da radiação solar global e refletida e do albedo sobre areia em santos, SP – modelos de estimativa. **Revista Científica UNIMONTE**, Santos, v. 2, n. 1, p. 11-21, 2002.

GENUCHTEN, M. T. van. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.44, n. 5, p. 892-898, Sept./Oct. 1980.

GONÇALVES, N. P.; BENDEZÚ, J. M.; LELES, W. D. Época, espaçamento e densidade de plantio para a cultura da mamona. **Informe agropecuário**, Belo Horizonte, v. 7, n. 82, p. 33-35, 1981.

HAYASHI, M. M. S.; CAMPELO JÚNIOR, J. H.; PRIANTE FILHO, N.; NOGUEIRA, J. de S.; LOUISVOURLITIS, G. Balanço de energia da *Crotalaria juncea* L. no período seco e no período úmido do ano, em condições de cerrado. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 2, p. 197-205, jul./dez. 2002.

HEILMAN, J. L.; BRITTIN, C. L. Fetch requirements for Bowen ratio measurements of latent and sensible heat fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n. 44, n. 3-4, p. 261-273, Jan. 1989.

HORST, T. W.; WEILL, J. C. Footprint estimation of scalar flux measurements in the atmospheric surface layer. **Boundary-Layer Meteorology**, Dordrecht, v. 59, n. 1-3, p. 279-296, 1992.

KOBAYASHI, M. K. **Parametrização da resistência do dossel da cultura do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.) utilizando a razão de Bowen associada à termometria infravermelho**. 2001. 66 p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

KOBYAMA, M.; VESTENA, L. R. Aplicação do método de PENMAN modificado no cálculo da evapotranspiração potencial para quatro estações meteorológicas do estado do Paraná. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, Santa Maria, v. 8, n. 1, jan./jun. 2006.

KROON, L. J. M. Profile derived estimation of evaporation after a change in vegetative cover: a numerical approach. **IAHS-Publication**, v. 177, p. 175-183, 1989.

KUSTAS, W. P.; PRUEGER, J. H.; HATFIELD, J. L.; RAMALINGAM, H.; HIPPS, L. E. Variability in soil heat flux from a mesquite dune site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 1, p. 249-264, June 2000.

LAURETI, D.; FEDELI, A. M.; SCARPA, G. M.; MARRAS, G. F. Performance of castor (*Ricinus communis* L.) cultivars in Italy. **Industrial Crops and Products**, Amsterdam, v.7, n. 2-3, p. 91-93, Jan. 1998.

LEITÃO, M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. de. Estimativas de evapotranspiração e as conseqüências devido aos erros na determinação de saldo de radiação e efeitos advectivos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, v. 4, n. 3, p. 343-347, set./dez. 2000a.

LEITÃO, M. V. B. R.; OLIVEIRA, G. M. de. Influência da irrigação sobre o albedo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, n. 2, p. 214-218, maio/ago. 2000b.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, I. de F. da; SOUZA, C. de; LIRA, C. A. B. de O. Avaliação dos componentes do balanço de energia num solo cultivado com mamona no Brejo Paraibano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 1., 2004, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: Embrapa Algodão, 2004. 1 CD-ROM.

LIMA, J. R. de S.; ANTONINO, A. C. D.; SOARES, W. de A.; BORGES, E.; SILVA, I. de F. da; LIRA, C. A. B. de O. 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, p.527-534, out./dez. 2005.

LIOU, K.N. **An introduction to atmospheric radiation**. New York: Academic, 1980. 392p.

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, jan./jun. 2001.

LORENZI, H. (Ed.). **Plantas daninhas do Brasil: aquáticas, terrestres e tóxicas**. 3. ed. Nova Odessa: Plantarum, 2000. 608 p.

MACIEL, G. L. **Medidas e estimativas dos componentes do balanço de radiação sobre o cultivo do algodão herbáceo irrigado**. 1992. 92 p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia) - Universidade Federal da Paraíba, Campina Grande.

MANTOVANI, E. C.; BERNARDO, S.; PALARETTI, L. F. Irrigação localizada. In: _____. **Irrigação: princípios e métodos**. Viçosa, MG: UFV, 2006. p. 207-238.

MARIN, F. R. **Evapotranspiração e transpiração máxima em cafezal adensado**. 2003. 118 p. Tese (Doutorado em Agronomia) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E. Relações entre o coeficiente de cultura e cobertura vegetal do feijoeiro: erros envolvidos e análises para diferentes intervalos de tempo. **Acta Scientiarum**, Maringá, v. 26, n. 4, p. 513-519, Oct./Dec. 2004.

MENDONÇA, J. C.; SOUSA, E. F. de.; BERNARDO, S.; DIAS, G. P.; GRIPPA, S. Comparação entre métodos de estimativa da evapotranspiração de referência (ET_o) na região Norte Fluminense, RJ. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 7, n. 2, p. 275-279, 2003.

MOKATE, A. S.; VARSHNEYA, M. C.; NAIDU, T. R. V. Evapotranspiration and energy balance studies over wheat crop by Bowen ratio energy balance method. **Journal Maharashtra Agricultural Universities**, Poona, v. 20, n. 2, p. 273-276, 1995.

MONTEIRO, J. V. **Produtividade da mamoneira 'Al Guarany 2002' (*Ricinus communis* L.) em função de diferentes arranjos populacionais**. 2005. 89 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

MONTEITH, J. L.; UNSWORTH, M. H. Principles of environmental physics, 2.ed. London: E. Arnold, 1990. 291p.

MOURA, A. L.; MARTINS, D. Comparação da estimativa horária da evapotranspiração através de diferentes métodos. **Energia na Agricultura**, Piracicaba, v. 7, n. 3, p. 4-11, 1992.

MOURA, M. S. B.; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, B. B. da; SOARES, J. M. da. Balanço de energia em goiabeira irrigada no submédio do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 13., 2003, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: UFSM, 2003. p. 639-640.

NEVES, L. de, O. **Fluxos de CO₂, calor sensível e calor latente na cultura de caupi (*Vigna unguiculata* L.)**. 2006. 58p. Dissertação (Mestrado em Meteorologia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG.

OLIVEIRA, L.B. Biodiesel-combustível limpo para o transporte sustentável. In: RIBEIRO, S. K. (Coord.). **Transporte sustentável: alternativas para ônibus urbanos**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 2001.

ORTEGA-FARIAS, S. O.; CUENCA, R. H.; EK, M. Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bula aerodynamic method over a grass Canopo. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 81, n. 1-3, p. 131-143, Sept. 1996.

PARENTE, E. J. S. **Processo de produção de combustíveis a partir de frutos ou sementes oleaginosas: biodiesel**, 1980. Patente: privilégio de inovação. PI8007957, 14 jun. 1983, 08 out.1983.

PEREIRA, A. L.; MOREIRA, J. A. A.; KLAR A. E. Efeitos de níveis de cobertura do solo sobre o manejo da irrigação do feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Irriga**, Botucatu, v. 7, n. 1, p. 42-52, jun./mar. 2002.

PEREIRA, A. R.; VILLA NOVA, N. A.; SEDIYAMA. G. C. **Evapo(transpi)ração**. Piracicaba: FEALQ, 1997. 183p.

PEREZ, P. J.; CASTELLVI, F.; IBAÑEZ, M.; ROSELL, J. I. Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, n. 97, n. 3, p. 141-150, Nov. 1999.

RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. Sugestões de Adubação para Grandes Culturas Anuais ou Perenes. In: RIBEIRO, A. C.; GUIMARÃES, P. T. G.; ALVAREZ, V. H. (Ed.). **Recomendações para uso de corretivos e fertilizantes em Minas Gerais: 5ª aproximação**. Viçosa, MG: UFV, 1999. p. 169-257.

- RITCHIE, J.T. Model to predicting evaporation from a row crop with incomplete cover. **Water Resource Research**, Canberra, v. 8, n. 5, p. 1204-1213, Oct. 1972.
- RODRIGUES FILHO, A. **A cultura da mamona**. Belo Horizonte: EMATER-MG, 2000. 20 p. (Boletim Técnico).
- RODRIGUES, R. F. de O.; OLIVEIRA, F. de; FONSECA, A. M. As folhas de Palma Christi – *Ricinus communis* L. Euphorbiaceae Jussieu. **Revista Lecta**. Bragança Paulista, SP, v. 20, n. 2, p. 183-194, 2002.
- SANTOS, R. F. dos; BARROS, M. A. L.; MARQUES F. M. FIRMINO, P. T. Análise econômica. In: AZEVEDO, D. M. P. DE; LIMA, E. F. **O Agronegócio da mamona no Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2001. p.17-35.
- SANTOS, R. F. dos; KOURI, J. Panorama mundial do agronegócio da mamona. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE MAMONA, 2., 2006, Aracaju. **Anais...**Campina Grande: Embrapa Algodão, 2006. 1 CD-ROM.
- SAVY FILHO, A. **Mamona**. Campinas: Instituto Agronômico, 2003. 4 p. Folheto.
- SAVY FILHO, A.; PAULO, E.M.; MARTINS, A.L.M.; GERIN, M.A.N. **Variedades de mamona do Instituto Agronômico**. Campinas: Instituto Agronômico, 1999. 12 p. (Boletim Técnico, 183).
- SEDIYAMA, G. C. Estimativa da evapotranspiração: histórico, evolução e análise crítica. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**. Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 1-7, jan./jun. 1996.
- SILANS, A. P.; MONTENY, B. A.; LHOMME, J. P. The correction of soil heat flux measurements to derive an accurate surface energy balance by the Bowen ratio method. **Journal of Hydrology**, Amsterdam, n. 188-189, p. 453-465, Feb. 1997.
- SILVA, L. C.; AMORIM NETO, M. S.; BELTRÃO, N. E. de M. **Recomendações técnicas para o cultivo e época de plantio de mamona cv. BRS 149 (Nordestina) na micro-região de Irecê, Bahia**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2000. 6 p. (Comunicado Técnico, 112).

SILVA, V. P. R.; AZEVEDO, P. V.; SILVA, B. B. Seasonal patterns of the energy balance components in a mango (*Mangifera indica* L.) orchard grown in northeast Brazil. **Agricultural Journal**, Peshawar, v. 1, n. 1, p. 18-23, 2006.

SILVA, W. J. da. Aptidões climáticas para as culturas do girassol, da mamona e do amendoim. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.7, n. 82, p. 24-28, out. 1981.

SMITH, M. **Report on the expert consultation on procedures for revision of FAO guidelines of crop water requirements**. Rome: FAO, 1991. 549 p.

SOARES, W. R.; SEDIYMA, G. C.; RIBEIRO, A.; COSTA, J. M. N. da Dependência do coeficiente de cultura no estágio inicial de desenvolvimento ($K_{c_{mi}}$) à lâmina de irrigação e textura do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, n. 1, p. 23-27, jan./abr. 2001.

SOUZA, C. B. de; SILVA, B. B. da; AZEVEDO, P. V. de; SILVA, V. de, P. R. da. Fluxos de energia e desenvolvimento da cultura do abacaxizeiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 400-407, out./dez. 2008.

SOUSA, P. S. de; PORTO FILHO, F. de Q.; MEDEIROS, J. F. de; MESQUITA, T. de O.; OLIVEIRA, C. J. da S; ALMEIDA NETO, A. J. de; DIAS, F. de S. Eficiência do uso da água pela mamoneira sob diferentes lâminas de irrigação. In: CONGRESSO BRASILEIRO DA MAMONA. NOVEMBRO, 3., 2008, Campina Grande. **Anais...**Campina Grande: Embrapa Algodão, 2008. 1 CD-ROM.

STANNARD, D. I.; BLANFORD, J. H.; KUSTAS, W. P. Interpretation of surface flux measurements in heterogeneous terrain during the monsoon '90 experiment. **Water Resources Research**, Canberra, v. 30, n. 5, p. 1227-1239, Oct. 1994.

STEDUTO, P.; HSIAO, T. C. Maize canopies under two soil water regimes. IV. Validity of Bowen ratio energy balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 89, p. 215- 228, 1998.

TÁVORA, F.J.A.F. **A cultura da mamona**. Fortaleza: EPACE, 1982. 111p.

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

TEIXEIRA, A. H. C.; BASSOI, L. H.; COSTA, W. P. L. B.; SILVA, J. A. M.; SILVA, E. E. G. Consumo hídrico da bananeira no Vale do São Francisco estimado pelo método da razão de Bowen. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 10, n. 1, p. 45-50, 2002.

THOMPSON, R. D. **Atmospheric processes and systems**. Routledge, New York, 29 west 35th street, New York, NY 10001, (1 edic), 1998. Disponível em: <<http://www.books.google.com/books?id=jSsu8eVx298C&hl=pt-BR>>. Acesso em: 24 out. 2008.

TODD, R. W.; EVETT, S. R.; HOWELL, T. A. The bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat-ux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 103, n. 4, p. 335 – 348, July 2000.

TRAMBOUZE, W.; BERTUZZI, P.; VOLTZ, M. Comparision of methods for estimating actual evapotranspiration in a row-cropped vineyard. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 91, p. 193-208, 1998.

TUCCI, C. E. M.; BELTRAME, L. F. S. Evaporação e Evapotranspiração. In: TUCCI, C. E. M. **Hidrologia ciência e aplicação**. Porto Alegre: UFRGS/ABRH, 2000. p. 253-287.

UNLAND, H. E.; HOUSER, P. R.; SHUTTLEWORTH, W. J.; YANG, Z. L. Surface flux measurement and modeling at a semi-arid Sonoran Desert site. **Agricultural and Forest Meteorology**, Amsterdam, v. 82, n. 3-4, p. 119-153, June 1996.

VASCONCELOS, M. A. C. de. **Informações sobre o cultivo da mamona (*Ricinus communis* L.)**. Fortaleza: EMATECE, 1990. 19 p.

VIANELLO, R. L.; ALVES, A. R. **Meteorologia básica e aplicações**. Viçosa, MG: UFV, 1991. 449p.