

ESTIMATIVA DO CONSUMO HÍDRICO DA MAMONEIRA CULTIVADA, EM CONDIÇÕES DE SEQUEIRO, NO BREJO PARAIBANO

José Romualdo de Sousa Lima¹; Antonio Celso Dantas Antonino²; Iane Andrade de Oliveira³; Cícero de Souza⁴; Antonio Marques da Silva⁵; Gilberto da Cruz Gouveia Neto⁶ & José Madson da Silva⁶

RESUMO --- O trabalho teve como objetivo determinar a evapotranspiração da cultura da mamona, cultivada em condições de sequeiro, por meio dos métodos dos balanços de água e de energia. Para a realização do balanço hídrico, foram instalados numa área de 4 ha do CCA/UFPB, Areia-PB (latitude 6°58'12" S, longitude 35°42'15" O, altitude: 620 m), três sítios tensio-neutrônicos contendo em cada um deles um tubo de acesso para a sonda de nêutrons e oito tensiômetros. Além disso, foram realizados ensaios de infiltração para a determinação da condutividade hidráulica do solo. Para a realização do balanço de energia foi instalada uma torre micrometeorológica no centro da área contendo um pluviógrafo, um piranômetro, um radiômetro, além de termohigrógrafos e anemômetros, em dois níveis acima da superfície do solo. Verificou-se que ambos os métodos podem ser usados para determinar a evapotranspiração, sendo que o balanço hídrico pode ter superestimado a evapotranspiração nos períodos mais chuvosos. A evapotranspiração da mamoneira durante todo seu ciclo fenológico foi de 334,2 mm e 310,3 mm, sendo que os valores médios diários foram 2,61 mm d⁻¹ e 2,42 mm d⁻¹, obtidos pelo balanço hídrico e pelo balanço de energia, respectivamente.

ABSTRACT --- The objective of this study was to estimate the castor bean (*Ricinus communis* L.) evapotranspiration by water and energy balance methods. To determine the water balance in a 4 ha area of the CCA/UFPB, Areia-PB (latitude 6°58'12" S, longitude 35°42'15" W, altitude: 620 m), in three plots, a one-meter access tube for neutron probe measurements, and 8 tensiometers were installed in each plot. Infiltration tests were performed for the determination of the soil hydraulic conductivity. To determine the energy balance, the area was instrumented with a rain gauge, a pyranometer, a net radiometer, and sensors for measuring air temperature and humidity, and wind speed in two levels. The results show that the energy and water balance can be used to determine the crop evapotranspiration, but the values of evapotranspiration could have been over estimated in the rainy periods by water balance. The total actual evapotranspiration of castor bean were 334.2 and 310.3 mm and average was 2.61 and 2.42 mm d⁻¹, obtained by using the water balance and energy balance methods, respectively.

Palavras-chave: evapotranspiração, balanço hídrico, balanço de energia

1) Pós-Doutorando do Departamento de Energia Nuclear da Universidade Federal de Pernambuco. Av. Prof. Luís Freire, 1000, Cidade Universitária, Recife/PE, 50740-540. e-mail: romualdo_solo@yahoo.com.br

2) Professor Associado do DEN/CTG/UFPE. Recife/PE. e-mail: acda@ufpe.br

3) Mestre em Manejo do Solo e Água, DSER/CCA, Universidade Federal da Paraíba. Areia/PB. e-mail: iane_andrade@yahoo.com.br

4) Doutorando em Agronomia, CCA, Universidade Federal da Paraíba. Areia/PB. e-mail: cicerosolos@yahoo.com.br

5) Bolsista de Apoio Técnico do CNPq, DEN/CTG/UFPE. Recife/PE. e-mail: antmarques@yahoo.com.br

6) Graduando em Agronomia, Bolsista PIBIC/CNPq, DSER/CCA/UFPB. Areia/PB. e-mail: neto_gouveia@hotmail.com, jose_madson@yahoo.com.br

1 - INTRODUÇÃO

Uma das grandes preocupações na atualidade tem sido à busca de alternativas energéticas para se desenvolver um combustível renovável e menos agressivo ao meio ambiente. Nesta busca, a produção de combustíveis a partir de oleaginosas ganha espaço na economia brasileira, tal como o biodiesel.

Procurando atender a demanda desse biocombustível, a mamona se destaca com grande potencialidade de produção por possuir grande capacidade de adaptação às condições edafoclimáticas do Nordeste. Essa cultura apresenta potencial tanto para produção de óleo vegetal, como para desenvolvimento e aquecimento de economias regionais, gerando, portanto empregos diretos principalmente no meio rural, melhorando inclusive a agricultura familiar.

Sabe-se que a produção de qualquer cultura, é dependente de uma série de fatores. A mamona como cultura comercial não é diferente, exigindo para produtividades elevadas, condições climáticas e edáficas favoráveis, onde a presença de água e nutrientes é exigida em momentos e em quantidades apropriadas. O conhecimento da quantidade de água retirada do solo pelos vegetais é de grande interesse, principalmente, para os estudos sobre o uso da água pela cultura (evapotranspiração), como também sobre a dinâmica da absorção dos nutrientes pela cultura.

A cultura da mamona sofre bastante influência dos elementos do clima. Dentre esses elementos, a precipitação é um dos que mais afeta a produção agrícola, face sua grande variabilidade espacial e temporal. Porém, para prover as disponibilidades hídricas no solo necessárias à agricultura não basta considerar somente os dados pluviométricos do período. Estes correspondem apenas ao processo de suprimento de água no solo para uso das plantas. É necessário considerar também o processo oposto, ou seja, a perda de água para atmosfera devido à evapotranspiração.

De acordo com Rana e Katerji (2000) a evapotranspiração pode ser medida utilizando-se métodos hidrológicos (balanço hídrico do solo e lisímetro de pesagem), micrometeorológicos - balanço de energia (razão de Bowen, método aerodinâmico, correlação dos turbilhões) e fisiológicos em vegetais (método do fluxo de seiva e câmara de pressão).

Os lisímetros apresentam a vantagem de medição direta da evapotranspiração, até mesmo em pequenos intervalos de tempo. No entanto, não são muito utilizados no campo devido ao seu alto custo de instalação e ao fato de que parte do ecossistema em estudo fica desconectado do restante, o que pode causar, por exemplo, uma alteração da disponibilidade de água para as raízes pela interrupção da ascensão capilar do lençol freático.

O método do balanço hídrico pode ser descrito por meio da determinação dos fluxos de entrada (precipitação e irrigação) e de saída (drenagem e evapotranspiração) e do armazenamento

de água no solo, para uma determinada cultura num determinado tempo. Todos esses componentes, com exceção da evapotranspiração, são medidos, estimados, ou negligenciados, e então, a evapotranspiração é obtida como termo residual. O intervalo de tempo no qual a evapotranspiração é obtida, geralmente, é de dias a semanas, devido à resolução temporal na qual os dados são obtidos.

Um grande problema no método do balanço hídrico é a variabilidade espacial dos seus componentes: armazenamento de água no solo, condutividade hidráulica e gradientes de potencial total. Villagra *et al.* (1995) encontraram que a variabilidade desses parâmetros conferiu um coeficiente de variação da ordem de 40% nas estimativas da evapotranspiração, concluindo, que em áreas extensas, a melhor escolha para o cálculo da evapotranspiração seria por métodos aerodinâmicos ou empíricos.

Os métodos micrometeorológicos, tais como o balanço de energia – razão de Bowen, produzem boas estimativas da evapotranspiração em intervalos de tempo muito curto (minutos), principalmente, se certas condições, relacionadas com os requerimentos de fetch, são satisfeitas.

O balanço de energia – razão de Bowen é um método indireto quando comparado com o método da correlação dos turbilhões, que mede diretamente os fluxos turbulentos, ou com os lisímetros de pesagem, que medem a variação da massa de um volume isolado de solo. As principais vantagens do método do balanço de energia - razão de Bowen são: medições simples e diretas; não requerer informações a respeito das características aerodinâmicas da superfície de interesse; podem integrar fluxos de calor latente sobre grandes áreas; podem estimar os fluxos de calor latente sobre grandes áreas; além de fornecer medições contínuas. As suas desvantagens incluem a sensibilidade às predisposições dos instrumentos que medem os gradientes e os componentes do balanço de energia, a possibilidade de descontinuidade de dados quando a razão de Bowen aproxima-se de -1, e o requerimento de um fetch adequado, comuns aos métodos micrometeorológicos (Todd *et al.*, 2000).

A estimativa da evapotranspiração, obtida pelo método da razão de Bowen, pode ser influenciada pela ausência de gradientes de temperatura e umidade em períodos chuvosos e também pela contribuição de energia advectiva provinda de áreas secas circunvizinhas, principalmente em regiões de clima seco e com ventos fortes (Silva *et al.*, 2005).

No entanto, os métodos dos balanços de água e de energia vêm sendo muito utilizados, devido a sua robustez e menores custos, e de apresentarem concordâncias de até 90% quando comparados com os lisímetros de pesagem (Pruegger *et al.*, 1997).

Diante do exposto, este estudo teve como objetivo quantificar a evapotranspiração da cultura da mamona, cultivada em condições de sequeiro, pelos métodos do balanço hídrico e do balanço de energia.

2 – MATERIAL E MÉTODOS

2.1 – Localização, clima e solo da área experimental

As medidas para a realização do balanço hídrico foram efetuadas numa área de 4,0 ha localizada na fazenda Chã de Jardim, pertencente ao Centro de Ciências Agrárias da Universidade Federal da Paraíba, situado na microrregião do Brejo Paraibano, no município de Areia, Estado da Paraíba ($6^{\circ}58'12''$ S e $35^{\circ}42'15''$ O). A altitude é de aproximadamente 619 m acima do nível do mar. O clima na região, pela classificação de Köppen, é do tipo As' (quente e úmido), com estação chuvosa no período outono-inverno, sendo as maiores precipitações nos meses de junho e julho (BRASIL, 1972). O solo da área é classificado como Latossolo Amarelo (EMBRAPA, 1999).

2.2 – Balanço Hídrico

2.2.1 Período de medição e instrumentação

O estudo dos componentes do balanço hídrico foi realizado em solo cultivado com a mamona (*Ricinus communis* L.), no período de 06 de julho a 11 de novembro de 2005.

Para a determinação do balanço hídrico foram instalados três sítios na área experimental. Em cada sítio foi instalado um tubo de acesso, em alumínio, para a sonda de nêutrons, e 8 tensiômetros nas profundidades de 10, 20, 30, 40, 60, 80, 120 e 160 cm. As medidas neutrônicas foram realizadas diariamente a cada 10 cm, até a profundidade de 80 cm, e de 20 em 20 cm até a profundidade de 160 cm, com uma sonda TROXLER série 4300, tendo a mesma uma fonte radioativa de Am-Be de atividade de 10 mCi (0,37 GBq). As leituras nos tensiômetros também foram realizadas diariamente.

A curva de calibração da sonda de nêutrons foi obtida do trabalho de Lima *et al.* (2005), que trabalharam na mesma área experimental e com a mesma sonda de nêutrons.

2.2.2 Componentes do balanço hídrico

O balanço hídrico em determinado volume de solo, num certo período de tempo (Libardi, 1995), é descrito pela equação:

$$\Delta A = P + I + AC - D \pm R - ET \quad (1)$$

A partir da equação do balanço hídrico (equação 1), a evapotranspiração da cultura (*ET*) pode ser obtida por:

$$ET = P + I + AC - D \pm R - \Delta A \quad (2)$$

sendo, ΔA a variação de armazenamento de água no perfil de solo (mm); P a precipitação pluvial (mm); I a irrigação (mm); AC a ascensão capilar (mm); D a drenagem profunda (mm) e R o escoamento superficial (mm).

O termo irrigação foi nulo, pois o trabalho foi realizado em condições de sequeiro. Considerou-se que não houve escoamento superficial de água, devido o solo apresentar declive suave e ser naturalmente bem drenado. A precipitação pluvial foi monitorada por meio de um pluviógrafo automatizado instalado numa torre no centro da área.

O armazenamento acumulado de água no solo foi calculado pela regra do trapézio, considerando-se que as medidas foram realizadas em intervalos igualmente espaçados, desde a superfície ($z = 0$) até a profundidade de interesse ($z = L$) (Libardi, 1995), por meio da equação:

$$A_L = \int_0^L \theta(z) dz = \left[0,50\theta(z_0) + \sum_{i=1}^{n-1} \theta(z_i) + 0,50\theta(z_n) \right] \Delta z \quad (3)$$

sendo θ a umidade volumétrica do solo.

A variação no armazenamento de água no perfil de solo (ΔA) foi determinada pela diferença dos valores de umidade volumétrica do solo obtidos do perfil nos tempos inicial e final de cada período considerado, sendo expressa pela seguinte equação:

$$\Delta A = [\theta_{(f)} - \theta_{(i)}] L = A_f - A_i \quad (4)$$

sendo A_f e A_i os armazenamentos acumulados de água final e inicial, respectivamente.

O fluxo de água através da base do perfil de solo estudado (drenagem profunda ou ascensão capilar) foi estimado com base na equação de Darcy – Buckingham:

$$q = -K(\theta) \nabla \phi_t \quad (5)$$

sendo $K(\theta)$ a condutividade hidráulica não saturada e $\nabla \phi_t$ o gradiente de potencial total na direção vertical.

Os dados experimentais das curvas de retenção da água no solo, obtidos por meio dos pares dos valores de umidade volumétrica do solo e de potencial matricial do solo, medidos, respectivamente, pela sonda de nêutrons e pelos tensiômetros, foram ajustados por intermédio da equação proposta por van Genuchten (1980):

$$\theta(h) = \theta_r + (\theta_s - \theta_r) \cdot [1 + (\alpha \cdot h)^n]^{-m} \quad \text{com } m = 1 - \frac{2}{n} \quad \text{Burdine (1953)} \quad (6)$$

sendo θ_s a umidade volumétrica saturada do solo ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); θ_r a umidade volumétrica residual ($\text{cm}^3 \text{ cm}^{-3}$); h o potencial matricial (cm); α representa o inverso da pressão de borbulhamento (cm^{-1}) a partir da qual a água começa a ser drenada do solo previamente saturado; n e m são parâmetros de ajuste da equação.

A condutividade hidráulica não saturada, $K(\theta)$, foi obtida por intermédio da equação de van Genuchten (1980), utilizando a hipótese de Burdine (1953).

$$K(\theta) = K_s S_e^2 \left[1 - (1 - S_e)^{\frac{1}{m}} \right]^m \quad \text{com} \quad S_e = (\theta - \theta_r) / (\theta_s - \theta_r) \quad (7)$$

sendo K_s a condutividade hidráulica saturada do solo e S_e a umidade efetiva.

Para estimar a condutividade hidráulica saturada do solo (K_s) realizaram-se ensaios de infiltração com infiltrômetro de anel simples com 15 cm de diâmetro na superfície e nas profundidades de 20, 40, 60 e 80 cm, utilizando-se o método proposto por Haverkamp *et al.* (1994). Este método consiste em anotar o tempo em que volumes constantes de água levam para infiltrar no solo, sendo que esses volumes de água podem variar de 70 a 250 ml dependendo da taxa de infiltração, a fim de evitar uma carga hidráulica e consequente fluxo forçado no solo. A infiltração acumulada é obtida calculando-se a razão entre o volume acumulado e a área do infiltrômetro de anel ($A = 176,71 \text{ cm}^2$).

Haverkamp *et al.* (1994) propuseram a seguinte equação para a infiltração acumulada para tempos longos:

$$I_{3D} = \left(K_s + \frac{\gamma \cdot S_o^2}{r \cdot \Delta \theta} \right) \cdot t + \frac{S_o^2}{2 \cdot (K_s) \cdot (1 - \beta c)} \cdot \ln\left(\frac{1}{\beta c}\right) \quad (8)$$

sendo r o raio do disco, K_s a condutividade hidráulica saturada, S_o a sorvidade, $\Delta \theta$ a variação de umidade, βc uma constante no intervalo ($0 < \beta c < 1$) (Haverkamp *et al.*, 1994) e γ uma constante teórica, cujo valor é igual a 0,75.

A condutividade hidráulica saturada (K_s) do solo foi obtida por intermédio do ajuste, da equação (8), aos dados da infiltração acumulada em função do tempo por meio da subrotina DBCONF da IMSL (IMSL, 1989).

2.3 - Balanço de energia

2.3.1 – Período de medição e instrumentação

As atividades relacionadas ao monitoramento dos termos do balanço de energia foram realizadas simultaneamente com as atividades do balanço hídrico, compreendendo o mesmo período de tempo.

Para a realização do balanço de energia foi instalada uma torre no centro da área contendo dois sensores de medidas da temperatura e da umidade relativa do ar, e dois sensores de medidas da velocidade do vento, ($z_1 = 35,0$ cm e $z_2 = 105,0$ cm) acima do dossel da cultura. Com a evolução da altura da cultura, ocorria uma elevação da altura desses sensores, de modo que os níveis de medições se mantivessem nas alturas estabelecidas. Além desses sensores, instalou-se um piranômetro, para a medida da radiação global, um radiômetro para as medições da radiação líquida e um pluviógrafo, para a medida da precipitação pluvial, sendo que estes sensores foram instalados na mesma torre, numa altura de 2,0 m da superfície do solo. Para a medida do fluxo de calor no solo, foram instalados fluxímetros em dois locais numa profundidade $z_1 = 5,0$ cm, juntamente com um sensor de umidade do solo na mesma profundidade, além de duas sondas térmicas instaladas horizontalmente nas profundidades de $z_1 = 2,0$ cm e $z_2 = 8,0$ cm. Todas as medidas citadas acima foram armazenadas como médias a cada 30 minutos, à exceção da pluviometria que foi seu valor total, em um sistema de aquisição de dados CR 10x da Campbell Scientific.

2.3.2 – Correção do fluxo de calor no solo

Como já foi dito anteriormente, o fluxo de calor no solo foi medido a 5 cm de profundidade, e tendo em vista se necessitar dos valores na superfície do solo, fez-se uma correção desses valores. Desse modo, o fluxo de calor na superfície do solo, foi obtido de acordo com Kustas *et al.* (2000):

$$G = G_p + \frac{\Delta T_S CD}{t} \quad (9)$$

sendo G_p a medição do fluxo de calor pelo fluxímetro (W m^{-2}), ΔT_S a variação na temperatura do solo ($^{\circ}\text{C}$) durante o período de medição, C a capacidade térmica volumétrica do solo ($\text{MJ m}^{-3} \text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$), D a profundidade do fluxímetro (m) e t a duração do período de medição (s).

O valor de C foi estimado somando as capacidades caloríficas dos vários constituintes do solo, ponderados de acordo com suas frações de volume, como dado por de Vries (1966):

$$C = 1,92 f_m + 2,51 f_0 + 4,18 \theta \quad (10)$$

sendo f_m a fração de volume dos minerais, f_0 a fração de volume da matéria orgânica e θ a umidade volumétrica do solo.

2.3.3 – Balanço de energia – método da razão de Bowen

O balanço de energia na superfície do solo pode ser escrito através da seguinte equação (Perez *et al.*, 1999; Todd *et al.*, 2000):

$$Rn = G + H + LE \quad (11)$$

sendo Rn a radiação líquida ou saldo de radiação (W m^{-2}); G o fluxo de calor no solo (W m^{-2}); H o fluxo de calor sensível (W m^{-2}) e LE o fluxo de calor latente (W m^{-2}).

A partição da energia disponível ($Rn - G$) entre fluxo de calor latente e fluxo de calor sensível pode ser obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen, baseado na razão das densidades de fluxo de calor sensível e calor latente, sendo determinada pela razão entre as diferenças na temperatura do ar e na pressão de vapor em dois níveis (Perez *et al.*, 1999):

$$\beta = \frac{H}{LE} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (12)$$

sendo γ a constante psicrométrica ($0,066 \text{ kPa } ^\circ\text{C}^{-1}$); ΔT a diferença de temperatura do ar ($^\circ\text{C}$) e Δe a diferença de pressão de vapor (kPa).

A partir das medições da radiação líquida (Rn), do fluxo de calor no solo (G) e das diferenças de temperatura do ar (ΔT) e de pressão de vapor (Δe), juntamente com a equação do balanço de energia (equação 11), utilizando-se a razão de Bowen (β) (equação 12), procedeu-se o cálculo dos fluxos de calor latente (LE) (equação 13) e calor sensível (H) (equação 14):

$$LE = \frac{Rn - G}{1 + \beta} \quad (13)$$

$$H = \frac{\beta}{1 + \beta} (Rn - G) \quad (14)$$

A taxa de evapotranspiração da cultura (mm) foi obtida dividindo-se o fluxo de calor latente pelo calor latente de vaporização, considerado como constante ($2,45 \text{ MJ kg}^{-1}$).

Para se evitar possíveis erros na estimativa dos fluxos de calor latente e de calor sensível, os valores da razão de Bowen menores do que $-0,75$ (Ortega-Farias *et al.*, 1996), bem como aqueles valores nos quais as medições dos gradientes de temperatura e de pressão de vapor estavam menores do que o limite de resolução dos sensores (Ohmura, 1982), foram eliminados, sendo estes substituídos por interpolação dos valores precedentes e subseqüentes válidos.

3 – RESULTADOS E DISCUSSÕES

A seguir serão apresentados os valores de evapotranspiração da cultura da mamona, cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano, obtidas pelos métodos dos balanços de água e de energia.

O balanço hídrico foi efetuado considerando o perfil de solo de 0-60 cm, tendo em vista essa profundidade englobar mais de 80% do sistema radicular da cultura, sendo que a raiz principal pode atingir profundidades acima de 1,50 m.

O período de estudo do balanço hídrico foi de 06/07/2005 a 11/11/2005, totalizando 128 dias, sendo que eles foram divididos em 13 subperíodos, como apresentado na Tabela 1. A não uniformidade dos subperíodos, ou seja, número de dias desiguais entre eles foi devido ao fato de que as leituras de umidade volumétrica e de potencial total do solo apresentaram algumas lacunas.

Tabela 1 – Subperíodos utilizados para o estudo do balanço hídrico

Subperíodos	Datas	Duração em dias
1	6/07-15/07/2005	9
2	15/07-25/07/2005	10
3	25/07-02/08/2005	8
4	2/08-15/08/2005	13
5	15/08-26/08/2005	11
6	26/08-5/09/2005	10
7	5/09-16/09/2005	11
8	16/09-26/09/2005	10
9	26/09-6/10/2005	10
10	6/10-18/10/2005	12
11	18/10-28/10/2005	10
12	28/10-07/11/2005	10
13	07/11-11/11/2005	4

Na Figura 1 são apresentados os dados da evapotranspiração da cultura da mamona estimada pelos métodos do balanço hídrico (ET_BH) e do balanço de energia - razão de Bowen (ET_BE), durante o período de 06/07/2005 a 11/11/2005, bem como os valores de precipitação pluvial durante esse período.

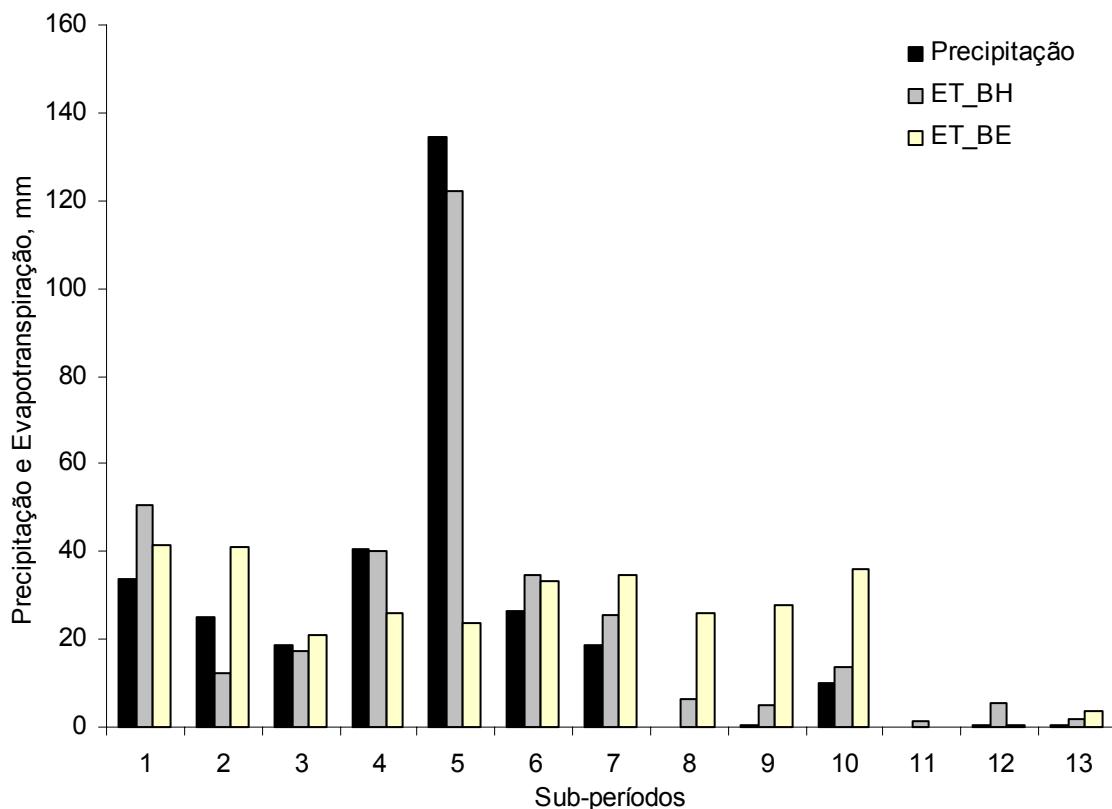


Figura 1 - Precipitação pluvial e evapotranspiração da mamoneira durante o período de 06/07/2005 a 11/11/2005 em Areia-PB, estimada pelos métodos do balanço hídrico (ET_BH) e do balanço de energia - razão de Bowen (ET_BE).

Observa-se nos subperíodos 1, 3, 6 e 7 que ocorreram excelentes concordâncias entre os valores de ET_BH e ET_BE, sendo que no subperíodo 5 os valores de ET_BH (122 mm) foram bem maiores que os valores de ET_BE (19,7 mm), enquanto que nos subperíodos 8, 9 e 10, ocorreu o inverso, ou seja, os valores de ET_BH foram menores que os valores de ET_BE. Já para os subperíodos 11, 12 e 13, os valores de ET_BH e ET_BE foram bem pequenos.

Os subperíodos em que os valores de ET_BH foram maiores que os valores de ET_BE foram aqueles que ocorreram os maiores eventos de precipitação pluvial, mostrando que o método do balanço hídrico ocasiona uma superestimativa da evapotranspiração da cultura nos subperíodos chuvosos, talvez devido a uma subestimativa dos valores de drenagem profunda nesses subperíodos. Além disso, essas maiores precipitações devem ter causado uma subestimativa nos valores de

evapotranspiração obtidos pelo método do balanço de energia - razão de Bowen, uma vez que esse método não funciona adequadamente em dias com grandes eventos de precipitação, devido aos problemas causados nos sensores que medem os gradientes de temperatura e, principalmente, de pressão de vapor.

O valor total da evapotranspiração da cultura da mamona obtido pelo método do balanço hídrico (ET_BH) foi de 334,2 mm, enquanto que o obtido pelo método do balanço de energia - razão de Bowen (ET_BE) foi de 310,3 mm, com uma diferença entre eles de apenas 24,0 mm. Os valores médios de ET_BH e ET_BE foram de 2,61 e 2,42 mm dia⁻¹, respectivamente, com uma diferença de apenas 0,19 mm.

Azevedo *et al.* (2003) aplicaram o método do balanço hídrico e do balanço de energia –razão de Bowen num pomar de mangueira irrigado em Petrolina-PE, sendo que esses autores encontraram valores totais e médios de evapotranspiração de 555,1 mm e 4,4 mm dia⁻¹, respectivamente, pelo método do balanço hídrico, enquanto pelo método do balanço de energia os valores foram de 551,6 mm e 4,4 mm dia⁻¹. Mastrorilli *et al.* (1998) encontraram para a cultura do sorgo, cultivado durante um período de 29 dias, valores totais de evapotranspiração de 73 e 69 mm, obtidos pelos métodos do balanço hídrico e do balanço de energia, respectivamente. Malek e Bingham (1993), também encontraram excelentes concordâncias entre os métodos do balanço hídrico e do balanço de energia – razão de Bowen, na determinação da evapotranspiração da alfafa.

Dados referentes à evapotranspiração média da mamona para as diferentes fases fenológicas são apresentados na Figura 2. Porém antes será apresentada a Tabela 2, identificando os períodos e duração de cada fase fenológica para um melhor entendimento da respectiva figura.

Tabela 2 – Períodos para o estudo da evapotranspiração em relação às fases fenológicas

Fase fenológica	Período	Duração em dias
Fase vegetativa	06/07 a 29/08/2005	54
Floração	29/08 a 12/09/2005	14
Enchimento das bagas	12/09 a 31/10/2005	49
Maturidade fisiológica	31/10 a 11/11/2005	11

Na Figura 2, observa-se que a evapotranspiração na fase vegetativa obtida pelo método do balanço hídrico (ET_BH) foi de 260,8 mm com um valor médio de 4,8 mm d⁻¹, já quando se utilizou o método do balanço de energia (ET_BE) o valor total nessa fase foi de 113,8 mm com um valor médio de 2,01 mm d⁻¹. Para essa fase fenológica não existiu concordância entre os valores de ET_BH e ET_BE, uma vez que os valores de ET_BH foram 129% maiores que os valores de

ET_BE. Essa grande diferença nos valores pode ser devido a uma superestimativa dos valores de ET_BH devido a uma provável estimativa do termo drenagem da equação do balanço hídrico, uma vez que os valores encontrados foram baixos, já que nessa fase os valores de precipitação pluvial foram elevados (261,9 mm), que correspondem a um total de 85% de toda a precipitação pluvial.

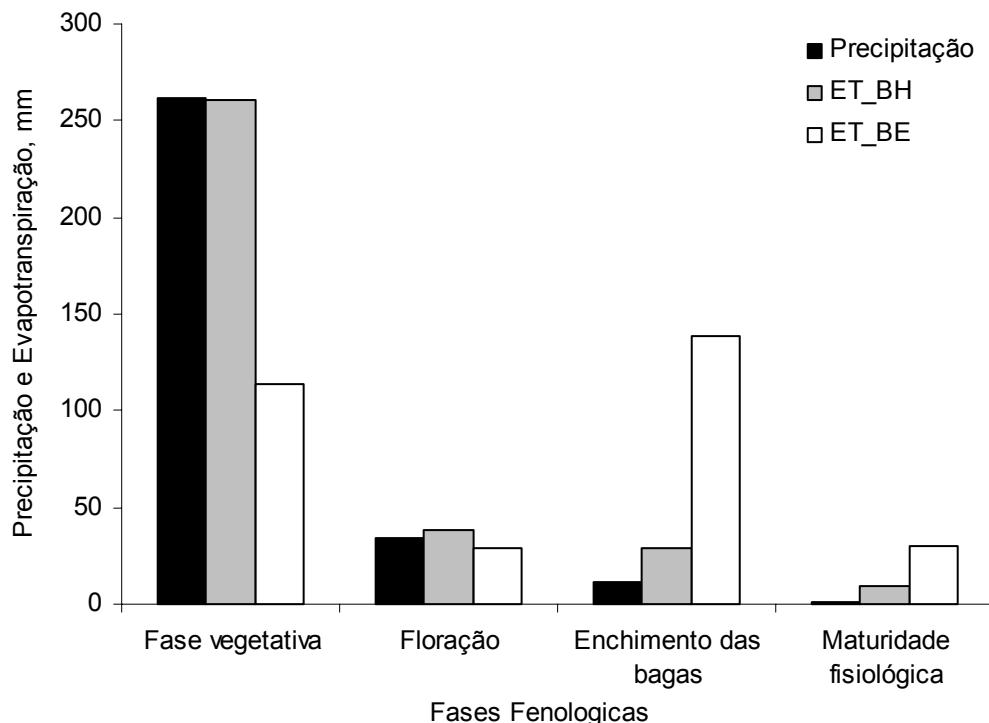


Figura 2 - Evapotranspiração média diária da cultura da mamona durante as diferentes fases fenológicas, estimada pelos métodos do balanço hídrico (ET_BH) e do balanço de energia - razão de Bowen (ET_BE).

Para a fase de floração o valor total de ET_BH foi de 38,6 mm e ET_BE foi de 28,6 mm, já os valores médios nessa fase foram $2,8 \text{ mm d}^{-1}$ e $2,0 \text{ mm d}^{-1}$, obtidos pelos balanços de água e de energia, respectivamente.

Na fase de enchimento das bagas o valor total de ET_BH foi de 28,5 mm com um valor médio de $0,6 \text{ mm d}^{-1}$, enquanto o valor total de ET_BE foi 138,3 mm com um valor médio de $2,8 \text{ mm d}^{-1}$. Enquanto na fase de maturidade fisiológica a ET_BH foi de 6,3 mm e o valor médio de $0,6 \text{ mm d}^{-1}$, sendo que a evapotranspiração total e média, obtida pelo método do balanço de energia – razão de Bowen (ET_BE) foram 29,6 mm e $2,7 \text{ mm d}^{-1}$, respectivamente.

O valor médio diário para todas as fases fenológicas foi de $2,2$ e $2,4 \text{ mm dia}^{-1}$, para ET_BH e ET_BE, respectivamente, ou seja, uma diferença média de $0,2 \text{ mm}$. Azevedo *et al.* (2003) encontraram, num pomar de mangueiras em Petrolina-PE, valores médios de $4,3$ e $4,1 \text{ mm d}^{-1}$, obtidos pelos métodos do balanço de energia e do balanço hídrico, respectivamente.

Pelos resultados obtidos, verifica-se que o método do balanço hídrico pode ser utilizado para a determinação da evapotranspiração do feijão caupi, sendo que poderá haver grandes melhorias nessas determinações, se houver uma melhor estimativa do fluxo de água através da base do perfil de solo estudado, ou seja, da drenagem profunda para os períodos mais chuvosos, e da ascensão capilar para os períodos mais secos.

4 – CONCLUSÕES

A evapotranspiração média da mamoneira, cultivada em condições de sequeiro no Brejo Paraibano, foi de $2,61 \text{ mm d}^{-1}$, obtida pelo método do balanço hídrico, e de $2,42 \text{ mm d}^{-1}$, obtida pelo método do balanço de energia. Já os valores totais foram 334,2 mm e 310,3 mm, obtidos pelos métodos dos balanços de água e de energia, respectivamente.

O método do balanço hídrico pode ter superestimado a evapotranspiração da mamoneira, principalmente, nos subperíodos mais chuvosos.

5 – AGRADECIMENTOS

O primeiro autor agradece a Fundação de Apoio a Pesquisa do Estado da Paraíba (FAPESQ) pelo apoio financeiro, bem como ao CNPq pela concessão da bolsa de DCR, que foram indispensáveis para a realização desse trabalho.

BIBLIOGRAFIA

- AZEVEDO, P.V.; SILVA, B.B.; SILVA, V.P.R. (2003). “*Water requirements of irrigated mango orchards in northeast Brazil*”. Agricultural Water Management 58, pp.241-254.
- BRASIL. Ministério da Agricultura. Equipe de Pedologia e Fertilidade do Solo. Divisão de Agrologia. (1972). *Levantamento exploratório – reconhecimento de solos do Estado da Paraíba*. SUDENE Rio de Janeiro, 670p.
- BURDINE, N. T. (1953) “*Relative permeability calculation from size distribution data*”. Trans. AIME 198, pp.71-78.
- de VRIES, D.A. (1966). “*Thermal properties of soils*”, In: *Physics of Plant Environment*. Org. por van Wijk, W.R., North-Holland, Amsterdam, pp. 210–233.
- EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (1999). *Sistema brasileiro de classificação de solos*. EMBRAPA Solos Rio de Janeiro - RJ, 412p.
- HAVERKAMP, R.; ROSS; P.J.; SMETTEM, K.R.J.; PARLANGE, J.Y. (1994). “*Three dimensional analysis of infiltration from the disc infiltrometer. 2. Physically based infiltration equation*”. Water Resource Research 30, pp.2931-2935.

- IMSL. (1989). *IMSL math/library; User manual*. IMSL, Houston.
- KUSTAS, W.P.; PRUEGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; RAMALINGAM, K.; HIPPS, L.E. (2000). “Variability in soil heat flux from a mesquite dune site”. Agricultural and Forest Meteorology 103, pp.249-264.
- LIBARDI, P.L. (1995). *Dinâmica da água no solo*. ESALQ Piracicaba - SP, 497p.
- LIMA, J.R.S.; ANTONINO, A.C.D.; SOUZA, C.; SOARES, W.A.; SILVA, I.F.; LIRA, C.A.B.O.; MACIEL NETTO, A.; SANTIAGO, R.D. (2005). “Estimativa da evapotranspiração do feijão caupi utilizando os métodos dos balanços de água e de energia”. In Anais do XVI Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, Nov. 2005, CD ROM.
- MALEK, E.; BINGHAM, G. (1993). “Comparison of the Bowen ratio-energy balance and the water balance methods for the measurement of evapotranspiration”. Journal of Hydrology 146, pp.209-220.
- MASTRORILLI, M.; KATERJI, N.; RANA, G.; NOUNA, B.B. (1998). “Daily actual evapotranspiration measured with TDR technique in Mediterranean conditions”. Agricultural and Forest Meteorology 90, pp.81-89.
- OHMURA, A. (1982). “Objective criteria for rejecting data for Bowen ratio flux calculations”. Journal of Applied Meteorology 21, pp.595-598.
- ORTEGA-FARIAS, S.O.; CUENCA, R.H.; EK, M. (1996). “Daytime variation of sensible heat flux estimated by the bulk aerodynamic method over a grass canopy”, Agricultural and Forest Meteorology 81, pp.131-143.
- PEREZ, P.J.; CASTELLVI, F.; IBÁÑEZ, M.; ROSELL, J.I. (1999). “Assessment of reliability of Bowen ratio method for partitioning fluxes”. Agricultural and Forest Meteorology 97, pp.141-150.
- PRUEGGER, J.H.; HATFIELD, J.L.; AASE, J.K.; PIKUL JR., J.L. (1997). “Bowen – Ratio comparisons with Lysimeter Evapotranspiration”. Agronomy Journal 89, pp.730-736.
- RANA, G.; KATERJI, N. (2000). “Measurement and estimation of actual evapotranspiration in the field under Mediterranean climate: a review”. European Journal of Agronomy 13, pp.125-153.
- SILVA, L.D.B.; FOLEGATTI, M.V; VILLA NOVA, N.A. (2005) “Evapotranspiração do capim Tanzânia obtida pelo método de razão de Bowen e lisímetro de pesagem.” Revista Engenharia Agrícola 25, pp. 705-712.
- van GENUCHTEN, M.Th. (1980) “A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils”. Soil Science Society of America Journal 44, pp.892-898.
- VILLAGRA, M.M.; BACHI, O.O.; TUON, R.L.; REICHARDT, K. (1995). “Difficulties of estimating evapotranspiration from the water balance equation.” Agricultural and Forest Meteorology 72, pp.317-325.