

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA  
CURSO DE MESTRADO**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA  
MAMONA (*Ricinus communis* L.), cv. BRS ENERGIA, NO  
RECÔNCAVO DA BAHIA**

**JULIANA ALCÂNTARA COSTA**

**CRUZ DAS ALMAS, BAHIA  
2018**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA  
MAMONA (*Ricinus communis* L.), cv. BRS ENERGIA, NO  
RECÔNCAVO DA BAHIA**

**Juliana Alcântara Costa**  
Engenheira Agrônoma  
Universidade Federal do Ceará, 2016

Dissertação apresentada ao Colegiado de Curso do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, como requisito parcial para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Agrícola, Agricultura Irrigada e Recursos Hídricos

Orientador: Prof. Dr. Hans Raj Gheyi  
Coorientador: Prof. Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira

**CRUZ DAS ALMAS, BAHIA  
2018**

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AGRÍCOLA**

**EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA  
MAMONA (*Ricinus communis* L.), cv. BRS ENERGIA, NO  
RECÔNCAVO DA BAHIA**

Comissão Examinadora da Defesa de Dissertação de Mestrado  
Juliana Alcântara Costa

Aprovada em: 16/01/2018

---

Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira - Coorientador

---

Dr. Alisson Jadavi Pereira da Silva - Membro Interno

---

Dra. Jucicléia Soares da Silva – Membro Externo

## AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal do Recôncavo da Bahia – UFRB, em especial aos que constroem o Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, que com competência e profissionalismo me oportunizaram esse feito.

Aos professores Dr. Hans Raj Gheyi e Dr. Francisco Adriano de Carvalho Pereira, pela orientação, suporte e confiança.

Aos colegas Edilson dos Santos (Boi), Lucas Batista, Gerlange Soares, Neilon Duarte, Magali Mota, Felipe, Gláuber Pontes, Anna Fridha, Ana Paula, Marcela e Maiara, pelo apoio na instalação e/ou condução do experimento.

Ao professor Dr. Aureo Silva de Oliveira e ao colega Dr. João Guilherme Araújo Lima, pela concessão dos dados meteorológicos.

À minha família, pelo amor, incentivo e apoio absoluto.

A Gláuber Pontes, pelo companheirismo de sempre.

Às cearenses Monikuely Mourato e Paula Viana, e ao potiguar João Guilherme que me recepcionaram e me acolheram em Cruz das Almas.

Às *roommates* Monikuely Mourato, Renata Velasques, Maria Ângela e Rejane Lima, pela amizade e apoio.

Ao programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Federal do Ceará, em especial aos professores Carlos Alexandre Gomes Costa, José Carlos de Araújo, Eunice Maia de Andrade e Fernando Bezerra Lopes, pelo acolhimento durante o processo de mobilidade acadêmica e pelo conhecimento compartilhado dentro e fora da sala de aula.

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

## EVAPOTRANSPIRAÇÃO E COEFICIENTE DE CULTIVO DA MAMONA (*Ricinus communis* L.), cv. BRS ENERGIA, NO RECÔNCAVO DA BAHIA

**RESUMO:** A mamona vem se destacando como uma cultura de grande potencial para o Nordeste, fazendo com que esta necessite de atenção em termos de determinação de suas necessidades ótimas de cultivo em diferentes locais da Região. Assim, buscar conhecer a evapotranspiração da mamona sob as condições climáticas do Recôncavo da Bahia se faz necessário. Para tanto, o lisímetro é empregado como um método direto de determinação da evapotranspiração. Portanto, objetivou-se determinar a evapotranspiração da cultura da mamona (*Ricinus communis* L.), cv. BRS Energia, e seu coeficiente de cultivo, sob as condições do Recôncavo da Bahia, utilizando lisímetros de drenagem e lençol freático constante. O experimento foi conduzido na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, em uma área de 816 m<sup>2</sup> com quatro lisímetros, dois de drenagem e dois de lençol freático constante. A evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) foi estimada por meio da equação de Penman-Monteith e pelo Tanque Classe "A". Ao longo do período foram realizadas leituras biométricas de variáveis de crescimento e desenvolvimento. O coeficiente da cultura (Kc) foi calculado para as quatro fases de desenvolvimento: I – emergência das plantas até a inflorescência do primeiro cacho; II – final da fase anterior ao surgimento da inflorescência do segundo cacho; III – final da fase II até o início da maturação dos racemos; e IV – período entre o início da maturação e o final do ciclo. O Kc e o índice de área foliar foram relacionados ao Graus-dia de desenvolvimento. Ao final do ciclo foram coletadas informações de produção da cultura e de consumo hídrico total. A evapotranspiração (ETc) mensurada pelo lisímetro de lençol freático constante foi de 3,86; 4,45; 6,95 e 3,99 mm d<sup>-1</sup> para as fases I, II, III e IV, respectivamente, com um consumo hídrico de 458,93 mm dos 30 dias após plantio ao final do ciclo. Os valores de ETc obtidos pelo lisímetro de drenagem foram superiores em todo o ciclo aos mensurados pelo lisímetro de lençol freático com uma discrepância média de 3,02 mm d<sup>-1</sup>. Os menores valores de Kc foram estimados pela relação entre a ETc obtida pelo lisímetro de lençol freático e a ET<sub>0</sub> estimada pelo tanque Classe A, e foram de 0,86; 1,06; 1,18 e 0,71 para as fases I, II, III e IV, respectivamente.

**Palavras-chave:** Lisímetro; Necessidade hídrica; Oleaginosa; Penman-Monteith

## EVAPOTRANSPIRATION AND CROP COEFFICIENTS OF CASTOR BEAN (*Ricinus communis* L.), cv. BRS ENERGIA, IN RECÔNCAVO OF BAHIA

**ABSTRACT:** Castor bean has emerged as a crop of great potential for the Brazilian Northeast, making it necessary to pay attention in terms of determining its optimal cultivation needs in different places in the Region. Thus, it is imperative to know the evapotranspiration of castor bean under the climatic conditions of the Recôncavo of Bahia. For this, the lysimeter is used as a direct method of evapotranspiration determination. Therefore, we aimed to determine the evapotranspiration of the castor bean (*Ricinus communis* L.), cv. BRS Energia, and its crop coefficient, in the Recôncavo of Bahia conditions using lysimeters of drainage and constant water table. The experiment was conducted at the Experimental Farm of the Federal University of Recôncavo of Bahia, in an area of 816 m<sup>2</sup> with four lysimeters: two of them were lysimeters of drainage and other two of constant water table. The reference evapotranspiration (ET<sub>0</sub>) was estimated using the Penman-Monteith equation and the Class "A" pan. Biometric readings of growth and development variables were performed throughout the period. The crop coefficient (K<sub>c</sub>) was calculated for the four stages of development: I - emergence of the plants up to the inflorescence of the first cluster; II - end of the preceding phase to the appearance of the inflorescence of the second cluster; III - end of phase II until the beginning of maturation of racemes; and IV - period between the beginning of maturation and the end of the cycle. K<sub>c</sub> and leaf area index were related to day-degrees of development. At the end of the cycle, information on crop production and total water consumption was collected. The ET<sub>c</sub> measured by the constant water table lysimeter was 3.86; 4.45; 6.95 and 3.99 mm d<sup>-1</sup> for phases I, II, III and IV, respectively, with a water consumption of 458.93 mm from the 30 days after planting until the end of the cycle. The evapotranspiration (ET<sub>c</sub>) values obtained by the drainage lysimeter were higher throughout the cycle than those measured by the water table lysimeter with an average discrepancy of 3.02 mm d<sup>-1</sup>. The lowest values of K<sub>c</sub> were estimated by the relation between the ET<sub>c</sub> obtained by the water table lysimeter and the ET<sub>0</sub> estimated by the Class A pan, and were 0.86; 1.06; 1.18 and 0.71 for phases I, II, III and IV, respectively.

**Keywords:** Lysimeter; Water requirement; Oleaginous; Penman-Monteith

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO .....	1
2	REVISÃO DE LITERATURA .....	3
2.1	A cultura da mamona ( <i>Ricinus communis</i> L.) .....	3
2.1.1	Importância econômica e social da cultura .....	3
2.1.2	Origem e descrição botânica .....	3
2.1.3	Cultivar BRS Energia .....	5
2.1.4	Necessidade hídrica da mamoneira .....	6
2.2	Evapotranspiração (ET) .....	7
2.2.1	Evapotranspiração de referência (ET <sub>0</sub> ) .....	8
2.2.1.1	Método do Tanque Classe “A” .....	9
2.2.1.2	Modelo de Penman-Monteith .....	9
2.2.2	Evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> ) .....	10
2.2.3	Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	10
2.2.3.1	Índice de área foliar (IAF) .....	11
2.2.3.2	Graus-dia de desenvolvimento cumulativo (GDD) .....	12
2.2.4	Lisimetria .....	12
2.2.4.1	Lisímetro de lençol freático constante .....	13
2.2.4.2	Lisímetro de drenagem .....	14
3	MATERIAL E MÉTODOS .....	17
3.1	Área experimental .....	17
3.2	Instalação e condução do experimento .....	22
3.3	Construção e calibração das sondas TDR .....	24
3.4	Determinação da evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> ) da mamona .....	25
3.5	Estimativa da evapotranspiração de referência (ET <sub>0</sub> ) .....	26
3.5.1	Penman-Monteith .....	26
3.5.2	Tanque Classe “A” .....	27
3.6	Determinação do coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	27
3.6.1	Índice de área foliar (IAF) .....	28
3.6.2	Graus-dia de desenvolvimento (GDD) .....	28
3.7	Coleta de dados .....	29
3.7.1	Dados diários .....	29
3.7.2	Dados meteorológicos .....	29
3.7.3	Parâmetros biométricos e fenológicos .....	30
3.7.4	Produção e produtividade .....	30
3.8	Análise estatística .....	30
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	31
4.1	Condições climáticas e de umidade do solo .....	31
4.2	Fenologia da mamoneira, BRS Energia .....	33
4.3	Evapotranspiração da cultura (ET <sub>c</sub> ) .....	34
4.4	Características Biométricas .....	39
4.5	Coeficiente de cultivo (K <sub>c</sub> ) .....	42
4.6	Produção e produtividade .....	46
5	CONCLUSÃO .....	48
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	49

## 1 INTRODUÇÃO

Lançado pelo Governo Brasileiro em 2004, o Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel (PNPB), além do aspecto econômico e ambiental, tem como preocupação a inclusão social de agricultores familiares pela geração de emprego e renda (MDA, 2011). Para a zona semiárida da região Nordeste a oleaginosa elencada para a produção de biodiesel foi a mamona. Sua escolha se deu pela rusticidade e adaptação da planta ao clima semiárido, desenvolvendo-se relativamente bem em regime de sequeiro e possibilitando o consórcio com outras culturas agrícolas cultivadas na região. Além da produção de biodiesel a mamona pode ser empregada para inúmeros outros fins, o que faz desta uma cultura de grande potencial para o Nordeste, que em 2016 apresentou área plantada com a cultura de 29,9 mil ha<sup>-1</sup>, correspondente 99% da nacional (CONAB, 2017). Dado seu grau de importância, percebe-se que a mamona merece atenção em termos de determinação de suas necessidades ótimas de cultivo em diferentes locais da Região.

A prática da irrigação, cada vez mais crescente, notadamente otimiza as produções agrícolas, e tende a ser uma ferramenta importante para alavancar a produtividade da mamoneira. Um dos aspectos mais importantes no manejo da irrigação em qualquer cultura é a tomada de decisão sobre o quanto irrigar, fator que está relacionado diretamente com o volume de água que a planta necessita, tendo em vista a condição climática em que se encontra, para o seu pleno desenvolvimento.

Pesquisas de referência nesta área (DOORENBOS; PRUITT, 1977; ALLEN et al. 1998), desenvolvidas tipicamente por pesquisadores de instituições estrangeiras, determinaram de forma genérica a necessidade hídrica de um significativo número de culturas agrícolas. Tais informações, de importância reconhecida, foram e continuam sendo testadas e adaptadas às condições brasileiras, entretanto, ainda existe uma grande necessidade de conhecimento sobre o consumo hídrico de inúmeras culturas a nível regional, dado a grande diversidade de solo, clima e espécies vegetais existentes no nosso país.

O consumo de água pela planta pode ser quantificado de forma direta através do uso de lisímetros, equipamentos que costumam apresentar dimensões e princípios de funcionamento diversos. Entre os tipos mais comuns têm-se os

lisímetros de drenagem e de lençol freático constante. É frequente a utilização de lisimetria em pesquisas, no entanto, poucos trabalhos comparam a determinação da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) empregando tipos diferentes de lisímetro, mesmo que sabidamente estes apresentem diferenças em suas determinações, provocadas geralmente por questões metodológicas. Nesse tipo de estudo é imprescindível o monitoramento da umidade do solo, visto que esta influencia diretamente na taxa de evaporação e, portanto, nas diferenças entre as determinações de ET<sub>c</sub>.

A partir da determinação da ET<sub>c</sub> pelo lisímetro, e conhecendo a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>), pode-se calcular o coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), comumente empregado para o cálculo da lâmina de irrigação, a ser aplicada em cada rega da determinada fase do ciclo na qual a planta se encontra. A importância de se determinar o K<sub>c</sub> para cada fase se dá pelo fato de que na utilização de um K<sub>c</sub> geral acaba-se adotando o valor calculado para o período de maior consumo, desse modo, no restante do ciclo, a planta recebe mais água do que necessita, gerando assim, desperdício de água e energia, fato preocupante já que a questão hídrica é um dos fatores mais limitantes para a produção agrícola no Nordeste, e o seu uso racional deve ser preconizado.

Isto posto, buscar conhecer a evapotranspiração da mamoneira sob as condições climáticas do Recôncavo da Bahia e, por conseguinte, sua necessidade hídrica, é dar um passo importante para a consolidação dessa cultura na região. Sendo assim, objetivou-se nesse trabalho determinar a necessidade hídrica da mamona (*Ricinus communis* L.), cv. BRS Energia, sob as condições do Recôncavo da Bahia, utilizando lisímetros de drenagem e lençol freático constante.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 A cultura da mamona (*Ricinus communis* L.)**

#### **2.1.1 Importância econômica e social da cultura**

Nos últimos anos o Governo Brasileiro vem incentivando a produção de culturas oleaginosas para a produção de biodiesel. No Nordeste, a cultura escolhida foi a mamona (*Ricinus communis* L.), devido às condições climáticas e edáficas da região. Além da adaptabilidade da mamona a tais condições, esta ainda apresenta elevada potencialidade para a geração de empregos e fixação do homem no campo (OLIVEIRA et al., 2009).

Além de ser utilizada na produção de biodiesel a mamona também é uma oleaginosa de valor comercial para utilização na fabricação de surfactantes, revestimentos, massas lubrificantes, fungicidas, produtos farmacêuticos, cosméticos e muitos outros produtos (PINHEIRO et al., 2008). Além disso, as folhas podem servir de alimento para o bicho da seda e as hastes são ricas em celulose podendo ser empregadas na fabricação de papel e confecção de tecidos grosseiros (AZEVEDO et al., 1997).

De acordo com dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB), a produção de mamona no Brasil em 2016 foi de aproximadamente 14,4 mil toneladas, sendo que a produção no Nordeste correspondeu a 97,9% deste total. No mesmo ano, o estado da Bahia, como maior produtor regional e nacional, apresentou uma produção de 88,9% em relação à do país. Entretanto, as áreas cultivadas vêm diminuindo nos últimos anos, com queda de 63% de 2015 para 2016 (CONAB, 2017), principalmente por causa da disponibilidade hídrica, o que evidencia a importância de estudos que tragam subsídio para o uso racional da água.

#### **2.1.2 Origem e descrição botânica**

A mamoneira é uma planta da família Euphorbiaceae, do gênero *Ricinus* e da espécie *Ricinus communis* L., e possui diversos nomes populares, podendo ser conhecida como mamona, carrapeteira, enxerida, palma-de-cristo e rícino (LARA, 2010).

É uma planta originada na África, provavelmente na Etiópia, tolerante às condições climáticas adversas de países tropicais, como a Índia, a China, o Brasil e Moçambique, os quais são responsáveis por 96% da produção mundial (SEVERINO; AULD, 2014).

Alguns autores julgam que a espécie tenha sido introduzida no Brasil no período de colonização portuguesa, visando a extração de óleo das sementes para iluminação e lubrificação dos eixos das carroças (AZEVEDO; BELTRÃO, 2007). A planta apresentou ampla adaptação às condições edafoclimáticas do país, e pode ser encontrada em quase todo o território nacional (LUZ, 2012).

Embora as principais regiões produtoras estejam nos trópicos, esta cultura tem sido cultivada comercialmente em grandes áreas em países de clima temperado, como os Estados Unidos, Rússia e Ucrânia (SEVERINO; AULD, 2014).

A cultura possui grande variabilidade em várias características botânicas. Assim, pode-se encontrar plantas com porte baixo ou arbóreo, ciclo anual ou semiperene, com folhas e caule verde, vermelho ou rosa, com a presença ou ausência de cera no caule, com frutos com ou sem espinhos, deiscentes ou indeiscentes, com sementes de diversos tamanhos e colorações e diferentes teores de óleo (COSTA et al., 2014).

A mamoneira apresenta crescimento indeterminado com floração e frutificação contínua e sucessiva ao longo do seu ciclo de desenvolvimento. Se houver disponibilidade satisfatória de água e nutrientes, a planta cresce continuamente de forma simpodial (SAVY FILHO, 2005).

A raiz principal da mamoneira é do tipo pivotante. Nas plantas jovens o caule é oco, formado por nós e entrenós, espesso e ramificado, findando com a inflorescência do tipo racemo. Geralmente, os ramos laterais se desenvolvem da gema da última folha, que fica abaixo da inflorescência (COSTA et al., 2014). O desenvolvimento de ramos secundários e terciários costuma variar em função do material genético, do nível de competição entre plantas devido à densidade de plantio, do arranjo de plantas no ambiente de cultivo, dentre outros fatores (SORATTO et al., 2011; SOUZA-SCHLICK et al., 2011).

Costa et al. (2014) afirmam que o caule da mamoneira apresenta grande variação na cor, presença de cera, rugosidade e definição dos nós, com cicatrizes foliares proeminentes. Os autores ainda comentam que quando a planta é jovem ele é brilhante, tenro e suculento, mas torna-se lenhoso à medida que a planta

envelhece. Já as folhas são simples e grandes e suas variações estão na cor, na cerosidade, no número de glândulas e na profundidade dos lóbulos.

O sistema reprodutivo da cultura é do tipo misto, pois ocorre tanto a autofecundação como a fecundação cruzada, com taxas de cruzamento variando com o seu porte. A planta emite inflorescência no ápice do ramo principal e nos ramos laterais, progressivamente, e é composta de uma haste, em que são distribuídas as flores, sendo que é mais comum que as da parte superior sejam femininas e as inferiores, masculinas (COSTA et al., 2014). A proporção de flores masculinas e femininas é variada (SAVY FILHO, 2005). O fruto da mamona tem três sementes que podem ser diferentes quanto à presença, ausência e quantidade de espinhos, além da coloração dos mesmos. Quanto à deiscência, as plantas se classificam em indeiscentes, semideiscentes e deiscentes (COSTA et al., 2014).

As características de crescimento da mamoneira afetam diretamente sua maturação, tornando-a desuniforme, já que enquanto os primeiros racemos encontram-se maduros, existem outros ainda em formação (MOSHKIN, 1986). Dessa forma, não há uma distinção marcante do período vegetativo e reprodutivo (FIOREZE et al., 2016).

### **2.1.3 Cultivar BRS Energia**

O uso de semente melhorada e de boa qualidade tem grande importância no estabelecimento de uma cultura. Da qualidade do material de propagação dependem a produtividade e a qualidade do produto. Por serem mais produtivas e apresentarem níveis de resistência a pragas e doenças conhecidas, as sementes selecionadas, de cultivares melhoradas e procedência conhecida, proporcionam maior retorno aos produtores de mamona e maior rendimento de óleo às indústrias. (COSTA et al., 2014).

A cultivar BRS Energia foi desenvolvida pela Embrapa, com a participação Empresa de Pesquisa Agropecuária do Rio Grande do Norte (EMPARN) na validação dos genótipos (COSTA et al., 2014).

De acordo com a Embrapa (2007) esta é uma cultivar caracterizada por apresentar maior precocidade em comparação às demais, com ciclo médio de 120 dias, tendo se mostrado adaptada a diferentes ecossistemas, desde que ocorram precipitações adequadas ao seu desenvolvimento, exigindo um acumulado mínimo

de 500 mm ao longo do ciclo, podendo apresentar uma produtividade média de 1800 kg ha<sup>-1</sup>, em sistema de sequeiro, e altura média de 140 cm.

O primeiro cacho aparece em torno de 30 dias após a germinação, podendo vir a ocorrer em períodos maiores dependendo das condições de temperatura e luminosidade. O peso de 100 sementes pode variar de 50 a 55 g. Quanto ao teor de óleo possui em média 48%. As folhas são verdes e com nervuras esverdeadas. O caule é verde e seroso. As sementes por sua vez são rajadas com as cores bege e marrom. Os cachos têm formato cônico com tamanho médio de 80 cm e os frutos apresentam uma densidade média de acúleos, os quais são verdes e com cera. Os frutos são indeiscentes (EMBRAPA, 2007).

#### **2.1.4 Necessidade hídrica da mamoneira**

A mamona, assim como as demais culturas comerciais, requer condições edafoclimáticas favoráveis, onde a presença de água e nutrientes é exigida em momentos e em quantidades apropriadas. A falta ou excesso desses fatores pode ocasionar uma baixa produção. De acordo com Gouveia Neto et al. (2011) o conhecimento da quantidade de água retirada do solo pelos vegetais é de grande importância, principalmente, para os estudos sobre o uso da água pela cultura, como também sobre a dinâmica da absorção dos nutrientes.

Campbell et al. (2015) afirmam que para que haja eficiência na aplicação da irrigação em um sistema de cultivo de mamona, é indispensável quantificar o uso da água em cada fase de cultivo para aquela determinada região.

Doorenbos e Pruitt (1977) determinaram coeficientes de cultivo para diversas culturas de interesse agrícola, dentre elas a mamoneira, caracterizando seus estádios de desenvolvimento da seguinte forma: Germinação e crescimento inicial, quando a superfície do solo muito pouco ou quase nada é coberto pela cultura, com Kc de 0,35; Do final da fase anterior até uma cobertura com sombreamento completo, com Kc de 0,75; Do estágio anterior até o início da maturação, cujo Kc é 1,05; E da fase anterior até a maturação completa ou colheita, Kc de 0,5. Entretanto, os autores recomendam que sejam realizadas pesquisa regionais para adequar os valores de Kc's às condições locais e as características varietais.

Rios et al. (2011) em estudo desenvolvido com o objetivo de avaliar a evapotranspiração e o coeficiente de cultivo da cultura da mamoneira (variedade AL

Guarany) irrigada por gotejamento, sob as condições climáticas de Lavras-MG, utilizaram o método do balanço de energia baseado na razão de Bowen para determinação da ET<sub>c</sub> e os métodos e recomendações da FAO 56 para determinação do K<sub>c</sub>, obtendo os seguintes valores da ET<sub>c</sub>: 2,48, 2,68 e 3,04 mm d<sup>-1</sup> para as fases inicial, de crescimento e intermediária, respectivamente; e de K<sub>c</sub>: 0,27; 0,46; 0,87 e 0,57 para as fases inicial, de crescimento, intermediária e final, respectivamente.

Conforme estudos de Gouveia Neto et al. (2011), realizados no município de Areia-PB com a cultivar BRS Nordestina, utilizando o método da razão de Bowen, a evapotranspiração da cultura durante todo o ciclo foi de 567,15 mm, com um valor médio de 3,40 mm dia<sup>-1</sup>.

Sob condições de sequeiro, também em Areia-PB, Lima et al. (2013) observaram um baixo rendimento e baixa eficiência no uso da água pela mamona, BRS Nordestina, e através do método da razão de Bowen, estimou-se um consumo hídrico total pela cultura de 299,5, 334,3 e 656,6 mm em 2004, 2005 e 2007, respectivamente.

Já Dias et al. (2015), em experimento realizado em Barbalha-CE para determinação das exigências hídricas da mamona, cultivar BRS Energia, utilizando também o método da razão de Bowen e a equação de Penman-Monteith, observaram que a ET<sub>c</sub> foi de 565,1 mm, com K<sub>c</sub> de 0,74; 0,93; 1,00; 1,18 e 0,92 para as cinco fases de desenvolvimento da cultura: I - Germinação até 10% de cobertura do solo; II - Até inflorescência do 1º cacho; III - Até inflorescência do 2º cacho; IV - Maturação do 1º cacho; V - Maturação do 2º cacho.

## **2.2 Evapotranspiração (ET)**

A evapotranspiração (ET) é um forte indicador que reflete a transferência de energia entre terra e atmosfera, desempenhando, dentre outras coisas, um papel importante na estimativa das necessidades hídricas das culturas irrigadas (XIE; ZHU, 2013). É um fenômeno complexo em seu âmago (AFANDI; ABDREBBO, 2015).

Ela representa a perda total de água, na forma de vapor, pela superfície de uma área vegetada (PEREIRA et al., 2013). Esta perda divide-se entre os processos de evaporação do solo e transpiração pelas plantas (AFANDI; ABDREBBO, 2015). O termo evapotranspiração foi introduzido pelo climatologista Thornwaite por volta de

1930. Outrora, utilizava-se o termo *uso consuntivo*, que também considera a água que fica retida na superfície da planta (JENSEN, 1973).

O volume de água evapotranspirada depende principalmente das características da cultura, como espécie e estágio de crescimento, das condições meteorológicas e climáticas, como a disponibilidade de energia solar, além de fatores de manejo, dentre outros (ALLEN et al., 1998; PEREIRA et al., 2013; AFANDI; ABDRABBO, 2015).

Segundo Allen et al. (1998) a estimativa da evapotranspiração é fundamental, tanto do ponto de vista dos fatores de produção quanto para fins de planejamento, outorga de água, dimensionamento e manejo dos sistemas de irrigação. Afandi e Abdrabbo (2015) comentam que o montante de água evapotranspirada desempenha um papel importante na agricultura, na hidrologia, - especialmente no ciclo hidrológico - e na meteorologia, determinando a formação de variados padrões de nuvens e controlando a precipitação em diferentes locais, e relatam que este é um tema que interessa pesquisadores de diferentes áreas como agronomia, hidrologia e meteorologia.

### **2.2.1 Evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )**

Desde o surgimento do termo *evapotranspiração de referência* ( $ET_0$ ) na literatura seu significado tem sofrido inúmeras alterações. Este foi introduzido por Jensen et al. (1971) que sugeriu que seu valor fosse empregado como referência para estimativa da evapotranspiração da cultura.

Sua primeira definição de acordo com Jensen (1973) é de que a  $ET_0$  fosse a evapotranspiração máxima, que ocorre em uma cultura de alfafa (*Medicago sativa* L.), com altura de 0,30 m a 0,50 m, e com aproximadamente 100 m de área tampão.

Mais tarde, Doorenbos e Pruitt (1977) e Doorenbos e Kassam (1979) a definiram como sendo a evapotranspiração de uma área extensa com grama de 0,08 a 0,15 m de altura, em crescimento ativo, cobrindo totalmente o solo e sem deficiência hídrica.

Por fim, Allen et al. (1998) conceituaram a  $ET_0$  como sendo a evapotranspiração que ocorre em uma superfície de cultura hipotética, com uma altura fixa de 0,12 m, albedo igual a 0,23 e resistência ao transporte de vapor

d'água constante e igual a  $70 \text{ s m}^{-1}$ . Ainda segundo os autores, a  $ET_0$  é um elemento climático que representa o poder evaporante da atmosfera.

#### 2.2.1.1 Método do Tanque Classe "A"

Conforme Cobaner (2013) e Sousa et al. (2016) o Tanque Classe "A" como um método indireto de determinação da evapotranspiração de referência é um dos mais utilizados em áreas irrigadas, por ser prático e de baixo custo de implantação. Cobaner (2013) comenta sobre a preferência do uso do tanque na gestão de recursos hídricos, agendamento de irrigação agrícola e avaliação ambiental.

Entretanto, este método exige o emprego de um coeficiente denominado coeficiente do tanque ( $K_p$ ), que é dependente das condições climáticas do local (ALLEN et al., 1998). Os modelos utilizados para o cálculo do  $K_p$  geralmente utilizam dados das variáveis: umidade relativa do ar, velocidade do vento, e comprimento da bordadura em torno do Tanque Classe "A" (SOUSA et al., 2016).

Em pesquisas, o Tanque Classe "A" foi utilizado, dentre inúmeros pesquisadores, por: Matzenauer et al. (1998) para determinar relações entre a evapotranspiração da cultura do milho e a evaporação do tanque e gerar coeficientes entre essas variáveis; Fernandes et al. (2004) para estimativa da  $ET_0$  em casa de vegetação; Rowshon et al. (2014) para o cálculo da  $ET_c$  do arroz, em que concluíram que o método apresentou estimativas confiáveis na fase de perfilhamento; e Afandi e Abdrabbo (2015) para estimativa da  $ET_0$  em comparação a outros métodos e observaram que não houve diferença estatística entre este e o de Penman-Monteith..

#### 2.2.1.2 Modelo de Penman-Monteith

O trabalho da FAO – *Food and Agriculture Organization of the United Nations* desempenhado por Allen et al. (1989), bem como o manual de práticas de engenharia da ASCE – *American Society of Civil Engineers* elaborado por Jensen et al. (1989) foram documentos decisivos para a utilização do modelo de Penman-Monteith (PM FAO-56) como método padrão para o cálculo da  $ET_0$ , por ser o mais completo, fornecendo estimativas confiáveis em qualquer condição climática.

O método de PM FAO-56 requer informações meteorológicas de temperatura, umidade do ar, radiação solar e velocidade do vento (ALLEN et al., 1998). Ele assume a definição de evapotranspiração e superfície de referência propostas por Allen et al. (1998) e conceituadas anteriormente neste trabalho.

Em virtude da parametrização pela FAO da equação de Penman-Monteith atualmente alguns métodos empíricos são avaliados tomando este como referência (PEREIRA et al., 2013).

### **2.2.2 Evapotranspiração da cultura (ETc)**

Conforme Doorenbos e Pruitt (1977), a evapotranspiração da cultura consiste no consumo hídrico de uma determinada planta ao longo do seu ciclo de desenvolvimento, em que esta vai crescendo e ocupando espaço que é limitado pela densidade imposta. Esta cultura deve estar em bom estado fitossanitário, e em boas condições hídrica e nutricional, para que possa desenvolver-se bem, expressando seu potencial genético.

A evapotranspiração da cultura é um fator importante para a irrigação, tanto no dimensionamento de projetos quanto no manejo. Ela constitui a quantidade de água a ser aplicada no solo, considerando o clima da região, para satisfazer a necessidade hídrica da planta, a fim de manter seu crescimento e produtividade em níveis compatíveis com o preestabelecido geneticamente (PEREIRA et al., 2013).

Segundo Pereira et al. (2013) a ETc pode ser bastante afetada pelo manejo da cultura. Como exemplo pode-se citar a prática da irrigação localizada e os cultivos em sistema de plantio direto, que reduzem drasticamente a ETc por provocarem diminuição na evaporação do solo.

### **2.2.3 Coeficiente de cultivo (Kc)**

A necessidade hídrica das culturas é geralmente calculada de acordo com a abordagem padrão da FAO (Allen et al., 1998) empregando a evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) e um coeficiente de cultivo (Kc).

De acordo com Doorenbos e Pruitt (1977) as informações do Kc estão amplamente disponíveis para muitas culturas e foram originalmente obtidos através da medição da evapotranspiração das culturas, normalmente com lisímetros, e em

seguida relacionando-a com  $ET_0$ . Porém, enquanto as principais culturas de campo têm sido objeto de muitos estudos em lisímetros, os valores de  $K_c$  de culturas de menor interesse agrícola são frequentemente estimados com base num número menor de estudos em que  $ET$  é determinada com métodos alternativos de menor precisão (LÓPEZ-URREA et al., 2009).

Além disso, os dados de  $K_c$  encontrados na literatura devem servir como referencial quando não houver dados da região onde a cultura foi instalada. Entretanto, é desejável a determinação de  $K_c$  para as condições reais da área em razão das condições climáticas e das práticas agrícolas adotadas em cada região (PEREIRA; ALLEN, 1997).

A curva de  $K_c$ , que representa a evolução do  $K_c$  ao longo do tempo durante o ciclo de cultivo (WRIGHT, 1985), pode ser expressa tanto em escala de tempo como de graus-dia de desenvolvimento (GDD) (WRIGHT, 1982; SLACK et al., 1996; PEREIRA et al., 2013), ou correlacionada ao índice de área foliar (IAF) (PEREIRA et al., 2013).

#### 2.2.3.1 Índice de área foliar (IAF)

Pereira et al. (2013) comentam que para que o manejo da irrigação seja adequado é importante que se tenha um método de estimativa do  $K_c$  que seja operacional e que permita a realização do balanço hídrico para o dimensionamento correto da lâmina de água a ser aplicada em cada rega. Dessa forma um dos meios de se obter o  $K_c$  é empregando modelos que o relacionam a fatores como área sombreada, índice de área foliar, graus-dias de desenvolvimento cumulativos dentre outros.

O índice de área foliar é uma maneira pela qual se pode expressar o tamanho da área foliar de uma cultura e representa a relação entre a área foliar de um dos lados da folha e a área da superfície disponível à planta. Em culturas anuais seu valor aumenta da germinação até o florescimento, quando ocorre a transição da fase vegetativa para a reprodutiva (PEREIRA et al., 2013).

Como o  $K_c$  é o coeficiente angular da reta que relaciona  $ET_c$  com  $ET_0$  em um gráfico de dispersão, subentende-se que quanto maior for a área foliar da planta mais inclinada será a reta, e maior será o  $K_c$  correspondente, já que, dessa forma, haverá uma maior transpiração pela planta (PEREIRA et al., 2013).

Em experimento conduzido com mamona na Florida por Campbell et al., (2014) encontrou-se um IAF máximo de 2,87 aos 76 dias após plantio (DAP), para a cultivar Hale de mamona, o qual foi mensurado de forma não destrutiva por meio do equipamento LiCor 2200.

#### 2.2.3.2 Graus-dia de desenvolvimento cumulativo (GDD)

De acordo com Lima e Silva (2008) o uso do  $K_c$  para determinação de lâmina de irrigação pode ser equivocado se as condições climáticas em que o  $K_c$  foi obtido e onde a cultura está implantada forem diferentes, podendo-se superestimar ou subestimar o consumo de água pela cultura.

Dessa forma, é mais apropriado converter a escala temporal dos cultivos por outra que inclua os efeitos do ambiente no crescimento e desenvolvimento vegetal. (PEREIRA et al., 2013). Segundo Severino e Auld (2014) a temperatura é um fator ambiental importante que influencia a taxa de crescimento e desenvolvimento. Por essa razão, o crescimento e desenvolvimento das plantas estão mais associados ao tempo térmico do que ao tempo cronológico.

Um índice térmico específico, gerado com a temperatura e o seu acúmulo ao longo do ciclo da cultura, tem sido empregado para conjeturar com antecipação alguns eventos fenológicos (PEREIRA et al., 2013).

O índice térmico mais utilizado é o graus-dia de desenvolvimento (GDD), que é determinado pela diferença entre a temperatura média diária e uma temperatura base ao longo de um dia. (PEREIRA et al., 2013; SEVERINO; AULD, 2014). Conforme Yang et al. (1995) o GDD baseia-se nos pressupostos de que o crescimento cessa abaixo de uma dada temperatura (temperatura de base,  $T_b$ ).

Uma vantagem de usar GDD é que a função  $K_c$  pode ser transmitida, independentemente da localização (AL-JAMAL et al., 1999).

#### **2.2.4 Lisimetria**

Há diversos métodos para determinação da evapotranspiração, os quais estimam, em sua maioria, a evapotranspiração potencial, que é aquela que ocorre quando as condições de umidade do solo encontram-se em níveis ótimos para a planta (BERNADO et al., 2006).

Segundo Bernardo et al. (2006) e Loos et al. (2007) a lisimetria é um método direto para determinação da evapotranspiração conforme as condições reais de campo, desde que instalados e operados corretamente.

A palavra lisímetro é derivada do grego *lysis* e significa dissolução ou movimento, e *metron* significa mensurar. Esse instrumento possibilita a determinação direta da evapotranspiração em condições controladas. Constituem-se de tanques preenchidos com solo e enterrados, de superfície descoberta ou vegetada, que representam as condições ambientais do campo onde se localizam. Podem ser utilizados tanto na determinação da evapotranspiração de uma cultura em crescimento, como de uma cultura de referência, ou ainda, na evaporação do solo nu (ABOUKHALED et al., 1982).

Entretanto, Allen et al. (1998) e Pereira et al. (2002) afirmam que tal estrutura é viável apenas em condições experimentais por ser um método caro e de difícil operação. Dessa forma, a utilização de lisímetros para o simples manejo de irrigação em pequenas propriedades rurais é injustificável.

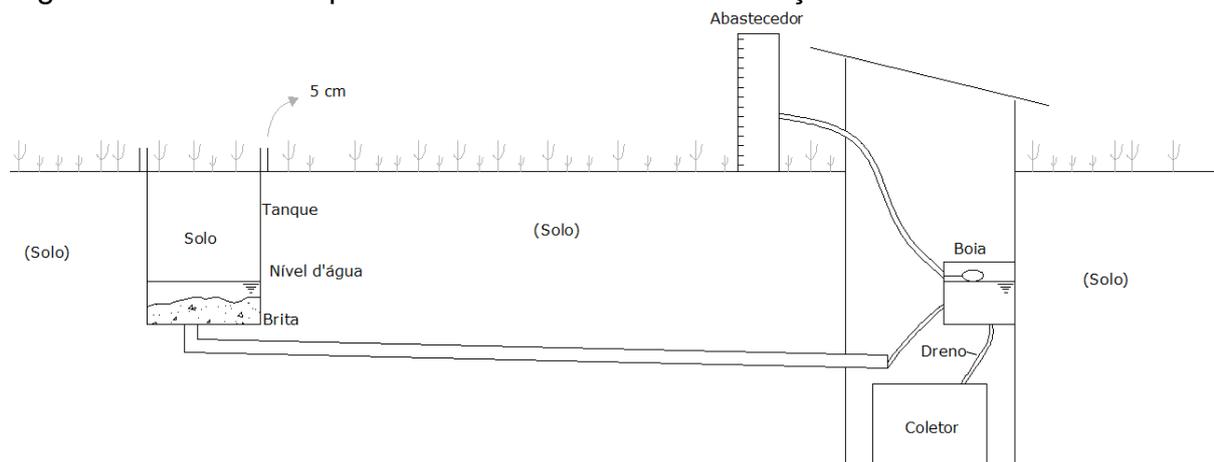
Os tipos mais comuns de lisímetro são os de lençol freático constante, de drenagem e de pesagem (ABOUKLED et al., 1982).

#### 2.2.4.1 Lisímetro de lençol freático constante

De acordo com Machado e Mattos (2001) os lisímetros de lençol freático constante têm sido bastante utilizados, pois apresentam uma boa precisão e facilidade em variar a profundidade do lençol no seu interior.

Neste tipo de lisímetro mantém-se, na camada inferior do tanque, um lençol freático de nível constante. Com a evapotranspiração a água da camada inferior se desloca por capilaridade para a zona radicular. Esse deslocamento provoca um decréscimo do lençol freático que é prontamente repostado por um dispositivo de alimentação. A quantidade de água necessária para repor a consumida por evapotranspiração é mensurada em um reservatório de abastecimento (VILLA NOVA; REICHARDT, 1989).

Figura 1: Desenho esquemático de um lisímetro de lençol freático constante



Fonte: Elaborado pela autora

Visando comparar valores de  $ET_c$  da cultura do *Tagetes patula* (cravo-de-defunto) medidos em lisímetro de lençol freático constante com os estimados através de balanço de energia, em ambiente protegido e em campo, Boueri (2007) inferiu que a  $ET_c$  pelo método da razão de Bowen superestimou a mensurada no lisímetro em 50% no ambiente protegido e em 55% na condição de campo. O autor justifica tal diferença pela lentidão na ascensão capilar até a superfície, provocando o prevalescimento da transpiração no lisímetro de lençol freático.

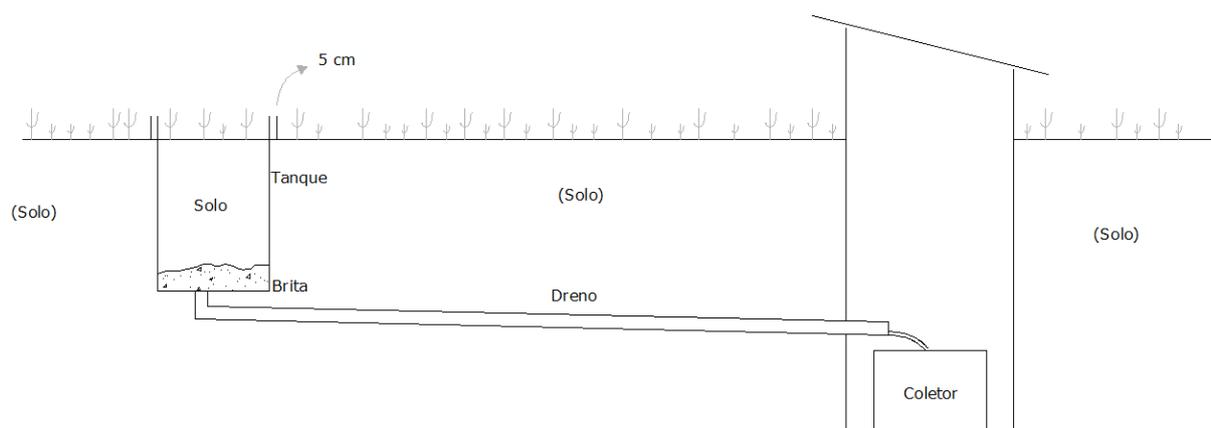
Vellame et al. (2012) em experimento com o objetivo construir e calibrar lisímetros de pesagem de pequena capacidade e comparar o funcionamento destes com lisímetros de lençol freático de nível constante, constataram que os lisímetros de lençol freático constante apresentam boa concordância com os valores de transpiração medidos por lisímetros de pesagem.

#### 2.2.4.2 Lisímetro de drenagem

Segundo Pereira et al. (2013) os lisímetros de drenagem foram utilizados primeiramente para medir a quantidade de nutrientes lixiviados pelas chuvas ou pelas irrigações excessivas abaixo da zona radicular.

Este dispositivo é constituído por um tanque enterrado no solo dotado de tubulações que conduzem a água drenada a um recipiente (BERNARDO et al., 2006).

Figura 2: Desenho esquemático de um lisímetro de drenagem



Fonte: Elaborado pela autora

Um inconveniente deste tipo de lisímetro é que são necessárias irrigações frequentes e em excesso, visando garantir que o solo esteja sempre em uma condição de umidade próxima à capacidade de campo, proporcionando, portanto, uma drenagem forçada que é utilizada no cálculo do balanço de água no lisímetro. A água drenada deve ser coletada e mensurada. Entretanto, existe um período para que água percorra o perfil de solo dentro de lisímetro, dessa forma em lisímetros de grande porte indica-se uma escala mínima semanal para a análise dos dados de evapotranspiração (PEREIRA et al., 2013).

Feltrin et al. (2011) empregaram lisímetro de drenagem em pesquisa realizada no Sul do Brasil, visando determinar o comportamento da precipitação, escoamento, drenagem, armazenamento de água no solo e variáveis de evapotranspiração envolvidas no balanço de água, e inferiram dentre outras coisas que os resultados obtidos por meio do lisímetro são importantes fontes de informação acerca das características físicas do solo e de dados de armazenamento de água no solo.

Miranda (2011) utilizou lisímetros de drenagem para determinar o coeficiente de cultivo da mamoneira, cv. Al Guarany, em plantio adensado. O trabalho foi realizado sob as condições climáticas de Lavras-MG e observou-se que os valores de  $ET_c$  encontrados nas fases inicial, de crescimento, intermediária e final foram 1,65; 3,07; 9,14 e 5,85  $mm\ d^{-1}$  respectivamente. Os valores de  $K_c$  para as fases correspondentes foram 0,98; 1,41; 2,11 e 1,65 respectivamente.

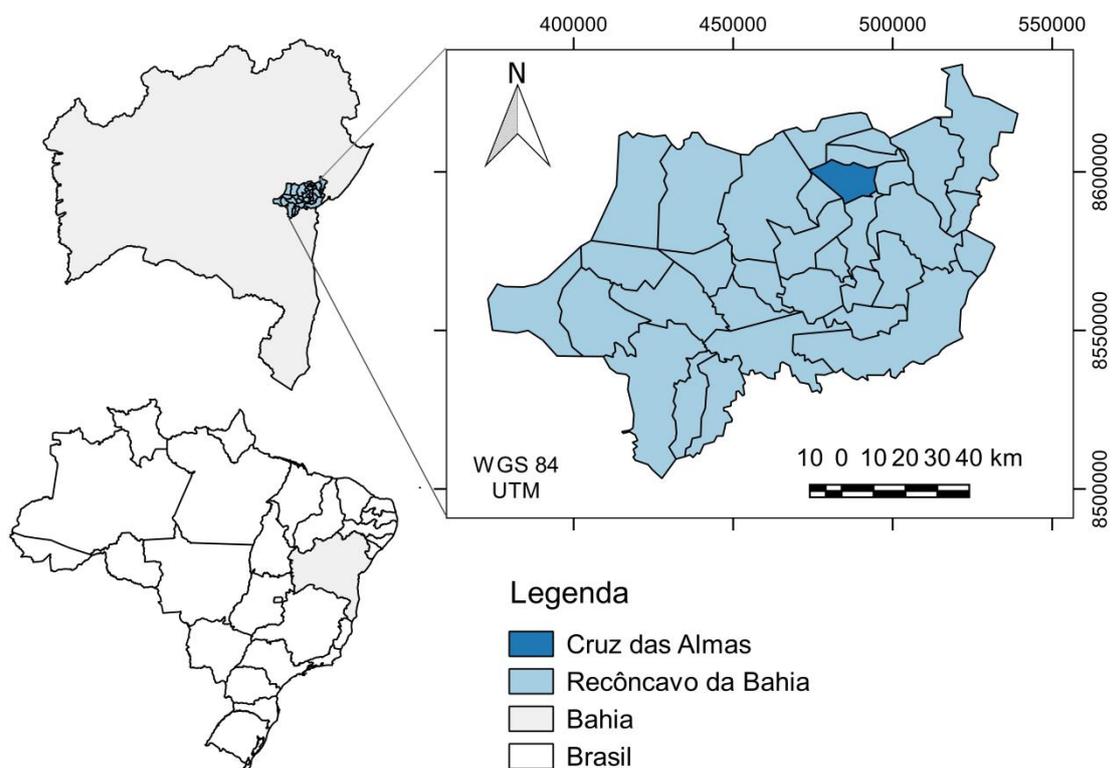
Centeno et al. (2012) objetivaram determinar o coeficiente de cultivo da mamona (cultivar BRS Energia) irrigada com água em diferentes níveis de salinidade sob as condições de Senhor do Bonfim-BA, utilizando lisímetros de drenagem, observaram que os Kc's no tratamento testemunha foram de 0,29; 0,41; 1,32; 2,67; 3,20 e 1,18, do plantio à emergência, aos 15, 30, 45, 60 e 79 dias após a emergência, respectivamente.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Área experimental

O experimento foi realizado na Fazenda Experimental da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB, localizada no município de Cruz das Almas - BA, pertencente a região do Recôncavo da Bahia e distante 150 km de Salvador, com coordenadas geográficas de 12° 40' 19" de latitude Sul, 39° 06' 23" de longitude Oeste e altitude média de 220 m.

Figura 3: Mapa de localização do Recôncavo da Bahia e do município de Cruz das Almas



Fonte: Elaborado pela autora

Conforme a classificação climática de Köppen Cruz das Almas está na categoria Af, clima equatorial, apresentando a seguinte normal climatológica, de acordo com dados de estação meteorológica convencional para os anos de 1971 a 2010 (SILVA et al, 2016):

Tabela 1: Normais climatológicas para Cruz das Almas, BA

Mês	Temperatura (°C)			Precipitação (mm)	Dias de Chuva	U.R. <sup>1</sup> (%)	Insolação (horas)	V.v. <sup>2</sup> (m s <sup>-1</sup> )
	Méd.	Máx.	Mín.					
Jan	25,6	31,4	21,7	72,5	9,6	75,6	7,1	3,0
Fev	25,6	31,2	21,8	79,1	11,4	76,8	6,9	2,9
Mar	25,6	31,1	21,9	96,1	13,6	78,6	6,9	2,7
Abr	24,7	29,3	21,5	125,4	17,2	83,7	6,1	2,8
Mai	23,5	27,7	20,5	132,4	19,7	86,5	5,5	2,7
Jun	22,1	26,1	19,2	138,6	22,0	87,6	5,0	2,7
Jul	21,4	25,6	18,3	115,5	21,7	86,3	5,3	2,8
Ago	21,5	26,0	18,2	85,5	19,4	84,3	5,7	2,7
Set	22,5	27,3	18,9	76,6	14,6	82,0	5,9	3,1
Out	23,8	29,0	20,2	64,1	11,4	79,0	6,5	3,1
Nov	24,7	30,1	21,1	72,1	9,9	77,4	6,2	3,0
Dez	25,3	31,0	21,5	73,4	8,6	76,2	6,5	3,1
Méd.	23,9	28,8	20,4	94,3	14,9	81	6,1	2,9
Total	-	-	-	1131,2	179	-	-	-

<sup>1</sup>U.R. – Umidade relativa do ar; <sup>2</sup>V.v. – Velocidade do vento

O experimento foi conduzido em quatro lisímetros, dois de drenagem (LD) e dois de lençol freático constante (LLF), instalados em uma área de 815,85 m<sup>2</sup>. Cada lisímetro é constituído de uma caixa de cimento amianto com as dimensões de 1,30 x 1,10 x 0,70m, possuindo uma área de cultivo de 1,43 m<sup>2</sup>.

Figura 4: Vista da área experimental mostrando os quatro lisímetros, o poço de coleta e o poço de observação

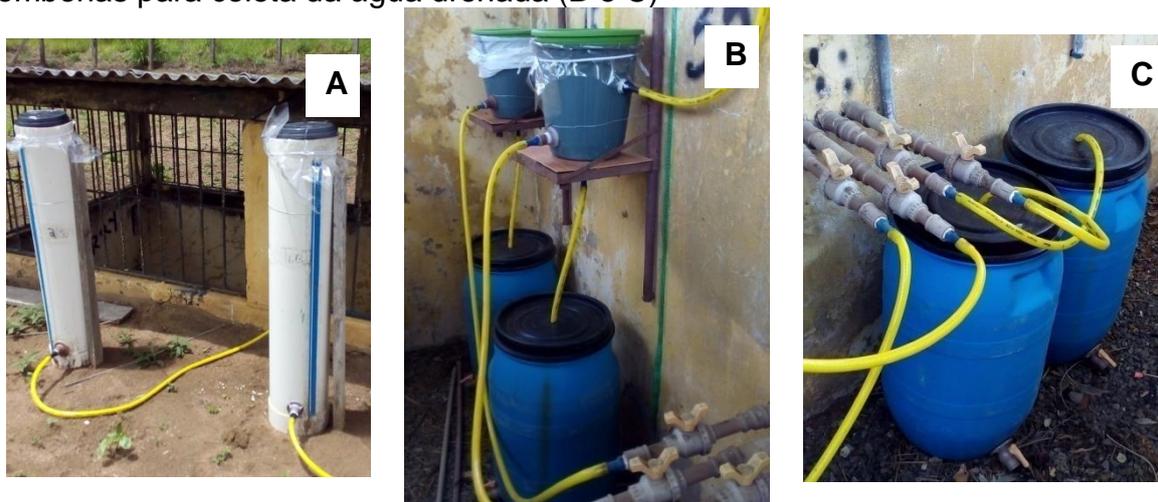


Os lisímetros foram instalados em 1994, apresentando um tempo de consolidação e acomodação dos horizontes do solo correspondente a vinte e três anos.

Cada lisímetro apresenta uma borda lateral de 5 cm acima da superfície do solo visando evitar o escoamento da água precipitada no entorno para o seu interior. Na sua parte inferior possuem uma camada de dois centímetros de brita zero e outra de igual espessura de areia lavada. Entre estas camadas está instalada uma tubulação ramificada de PVC de 32 mm perfurada em toda a sua extensão, constituindo o sistema de drenagem. O prolongamento desta tubulação leva a água percolada para um poço de coleta. Os lisímetros foram preenchidos com o solo de quatro trincheiras previamente abertas no mesmo local, tendo o cuidado de recolocar as camadas do solo obedecendo a mesma ordem dos horizontes.

Aos tanques que constituíram os lisímetros de lençol freático constante foram conectados, individualmente, a dois reservatórios: um reservatório intermediário (Figura 5B), cuja função é manter constante a profundidade do lençol, mediante utilização de uma boia e um extravasador para a drenagem da água excedente, e um reservatório de abastecimento (Figura 5A), que permite a recarga do lençol freático e a aferição da água evapotranspirada.

Figura 5: Reservatório abastecedor dos lisímetros de lençol freático (A), reservatório intermediário que mantém o nível constante nos lisímetros de lençol freático (B) e bombonas para coleta da água drenada (B e C)



A profundidade do lençol freático adotada foi de 55 cm, e foi estabelecida e acompanhada por meio do poço de observação instalado em ambos os lisímetros de

lençol freático constante. Os poços de observação são de tubos de PVC com 60 cm de comprimento abaixo do solo e 75 mm de diâmetro, perfurados na parte inferior para melhor permitir o fluxo da água.

Em cada lisímetro foram instaladas três sondas TDR (Reflectometria no Domínio do Tempo) (Figura 6), a 0,15; 0,30 e 0,45m de profundidade, visando acompanhar a umidade do solo.

A técnica da Reflectometria no Domínio do Tempo baseia-se na velocidade de propagação de ondas eletromagnéticas em sondas compostas por hastes condutoras e introduzidas no solo. A presença de descontinuidades (devido à geometria da linha de transmissão, para as propriedades dielétricas ou para a extremidade da sonda) induz um pulso refletido que é detectado por um osciloscópio. O desenvolvimento do pulso ao longo do tempo (forma de onda) é interpretado para obter a constante dielétrica do solo (REDER et al., 2014; SOUZA et al., 2016). Uma vez que a constante dielétrica ( $K$ ) dos componentes do solo são de 3 a 5 para o solo seco, 1 para o ar e cerca de 81 para a água livre (SILVA et al., 2012; LING et al., 2016), variações significativas na constante dielétrica do solo dependem fortemente das variações de umidade no solo ( $\theta$ ).

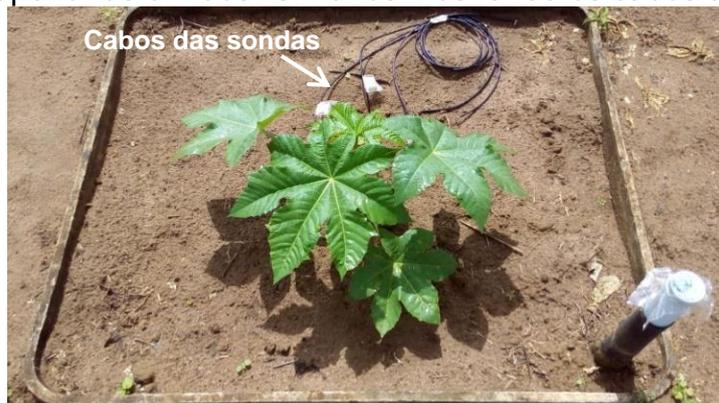
A constante  $K$  medida no sistema ar-solo-água é denominada de constante dielétrica aparente ( $K_a$ ), assim, conhecendo-a, pode-se determinar a umidade volumétrica do solo por meio de curvas de calibração obtidas a partir de dados de campo ou de laboratório (SOUZA; MATSURA, 2002; SOUZA et al., 2016).

A propagação de ondas eletromagnéticas é convertida para  $K_a$ , por meio da equação:

$$K_a = \left( \frac{t \times c}{2L} \right)^2 \quad (1)$$

Em que:  $t$  é o tempo de deslocamento da onda eletromagnética (s);  $c$  é velocidade da luz ( $3 \times 10^8 \text{ m s}^{-1}$ ); e  $L$  é o comprimento da haste da sonda (m).

Figura 6: Vista superior de um dos lisímetros mostrando os cabos das sondas TDR



Na área foram instalados também um evaporímetro do tipo Tanque Classe "A" e um pluviômetro tipo paulista (Figura 7).

Figura 7: Tanque Classe "A" (A) e pluviômetro (B) na área experimental



O solo da área experimental, incluindo o dos lisímetros, é classificado, segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos, como Latossolo Amarelo coeso argissólico, de textura média, que é caracterizado por ser um solo profundo, porém com baixa fertilidade e problemas físicos com horizontes subsuperficiais coesos.

Nas Tabelas 2 e 3 apresentam-se os atributos químicos e físicos do solo, respectivamente.

Tabela 2: Análise química do solo de uma amostra composta da área e individual de cada lisímetro realizada em 2016

Amostra	pH <sub>água</sub>	P mg dm <sup>-3</sup>	K	Ca	Mg	Ca+Mg	Al	Na	H+Al	SB	CTC	V %	M.O g kg <sup>-1</sup>
Composta 0-20	5,1	7	0,04	0,67	0,22	0,89	0,30	0,02	1,87	0,95	2,82	34	9,0
LLF1 0-20	5,2	6	0,02	0,58	0,14	0,72	0,30	0,02	2,20	0,76	2,96	26	8,0
LLF2 0-20	5,0	5	0,04	0,45	0,15	0,60	0,40	0,01	2,31	0,66	2,97	22	7,0
LD1 0-20	5,0	4	0,02	0,53	0,16	0,69	0,40	0,03	1,98	0,74	2,72	27	8,0
LD2 0-20	5,1	7	0,05	0,54	0,18	0,72	0,40	0,02	1,87	0,79	2,66	30	7,0

Tabela 3: Classificação textural do solo dos lisímetros e umidade volumétrica na capacidade de campo em três profundidades

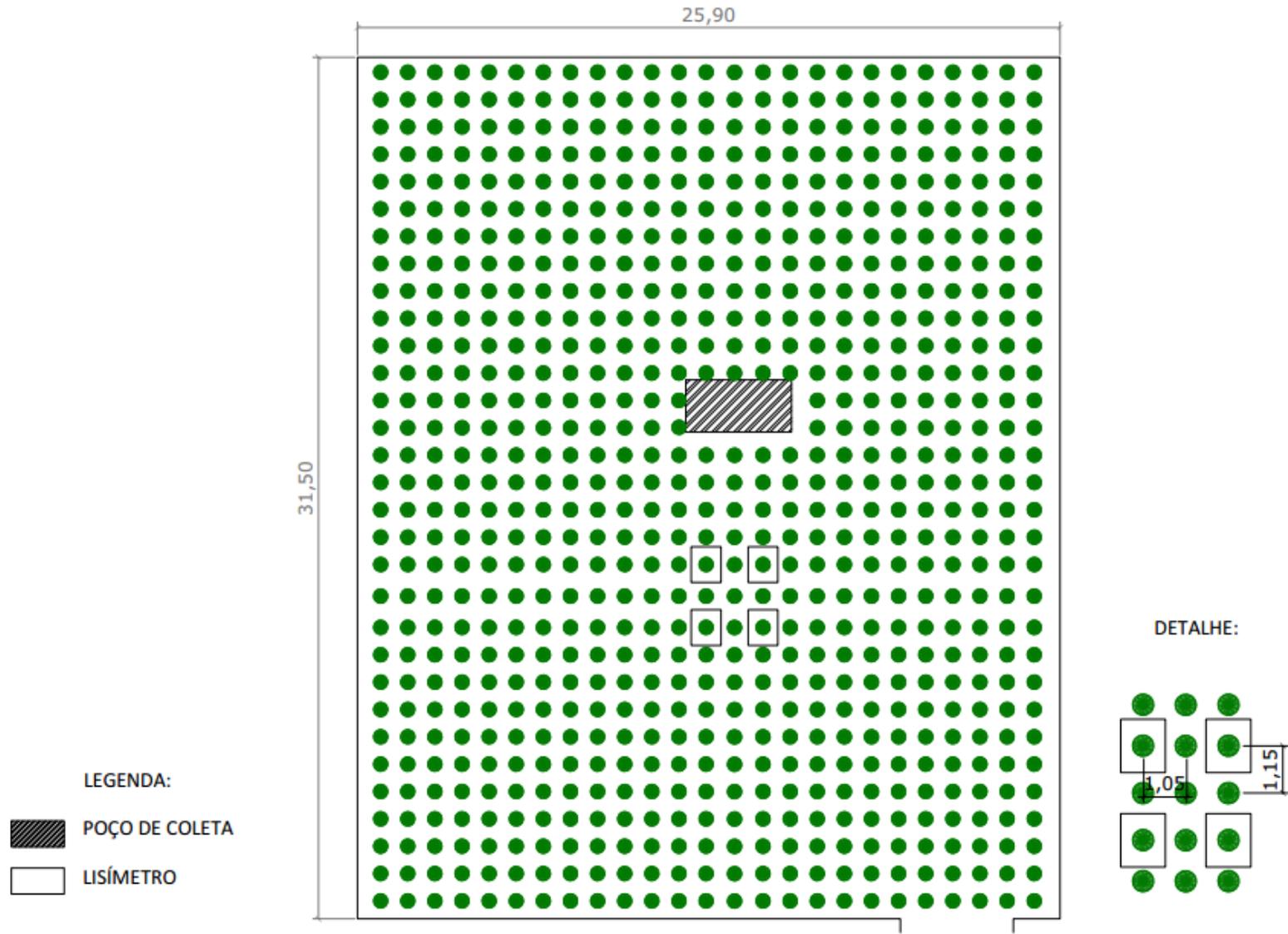
Lisímetro	Profundidade (cm)	Classificação textural	Capacidade de campo (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )
LLF1	0 - 15	Franco arenoso	0,19
	15 - 30		0,19
	30 - 45		0,25
LLF2	0 - 15	Franco arenoso	0,18
	15 - 30		0,18
	30 - 45		0,21
LD1	0 - 15	Franco arenoso	0,16
	15 - 30		0,16
	30 - 45		0,18
LD2	0 - 15	Franco arenoso	0,16
	15 - 30		0,19
	30 - 45		0,21

A umidade na capacidade de campo foi obtida a uma tensão de 10 kpa. A densidade aparente média dos solos dos lisímetros é de 1,55 g cm<sup>-3</sup>.

### 3.2 Instalação e condução do experimento

O preparo do solo para a implantação da cultura foi realizado manualmente com uso de enxada para não afetar a estrutura dos lisímetros. A semeadura foi realizada em covas espaçadas de 1,0 m x 1,0 m, de acordo com a recomendação para a cultivar pela Embrapa (2011). Devido às dimensões e a distância entre os lisímetros, o espaçamento de plantio na região destes teve que ser ajustada para 1,15 m entre plantas e 1,05 m entre linhas, como pode ser visto na Figura 8.

Figura 8: Croqui com a distribuição das plantas na área experimental



No ato da semeadura foram dispostas duas sementes por cova, com necessidade de posterior desbaste, que ocorreu aos 19 dias após plantio (DAP). Dessa forma, cada lisímetro conteve uma única planta.

A adubação foi realizada de acordo com a análise de solo e a recomendação para a cultura da mamona indicada pelo Manual de Adubação e Calagem para o Estado da Bahia (CEFSBA, 1989). Dessa forma foram aplicados em fundação 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e em cobertura 60 kg ha<sup>-1</sup> de N e 60 kg ha<sup>-1</sup> de K<sub>2</sub>O, aos 38 DAP. As fontes de NPK utilizadas foram: ureia, superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente.

Os tratos culturais, como capina, foram realizados periodicamente e de forma manual evitando danificar as estruturas. Durante o experimento houve a necessidade de aplicação de iscas para formigas, visando evitar que estas prejudicassem as plantas, visto que a área apresentava muitos formigueiros.

### **3.3 Construção e calibração das sondas TDR**

A construção e calibração das sondas TDR foram conduzidas no Núcleo de Engenharia de Água e Solos – NEAS da UFRB.

As sondas TDR foram construídas com três hastes de aço inoxidável de 13,5 cm, espaçadas 1,7 cm entre si, conectadas a um cabo coaxial com impedância de 50 ohm e com uma camada de resina de poliéster cobrindo 3,5 cm do início das hastes, ficando 10 cm de haste livre.

Para a calibração foram coletadas três amostras indeformadas de solo da camada superior dos lisímetros em colunas de PVC de 18 cm de altura e 71 mm de diâmetro interno. O fundo de cada coluna foi protegido por um tecido de malha fina preso por um elástico. As amostras foram colocadas para saturar por 24 horas. Após esse período foi introduzida em cada amostra uma sonda TDR. Foram realizadas leituras da constante dielétrica aparente (K<sub>a</sub>) pela TDR100 (Campbell Scientific Inc.) seguidas de pesagem das amostras com as sondas inseridas.

A leituras da K<sub>a</sub> foram feitas no computador por meio do software PCTDR. Inicialmente as amostras foram submetidas à secagem em condições naturais e as leituras da K<sub>a</sub> e pesagem foram coletadas periodicamente, com frequência maior no início. À medida que a água foi ficando mais fortemente retida ao solo, e, portanto a secagem mais demorada, as amostras foram colocadas em estufa com

temperaturas que não excederam 70 °C. A calibração teve fim quando os pesos das colunas passaram a ser constantes.

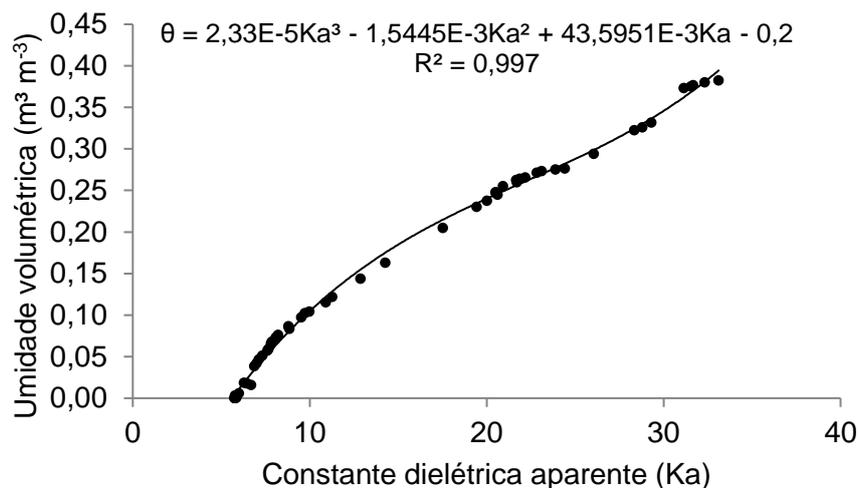
As umidades volumétricas ( $\theta_i$ ) foram obtidas por gravimetria, como segue:

$$\theta_i = \frac{PU_i - PS}{PS - PE} \times \frac{ds}{da} \quad (3)$$

Em que:  $PU_i$  é o peso do solo úmido atual + PE, sendo PE = peso da coluna de PVC + Peso das guias de onda + envoltórios (tecido e elástico); PS é o peso do solo seco + PE;  $ds$  é a densidade do solo; e  $da$  é a densidade da água.

Ao final da calibração elaborou-se uma curva de calibração (Figura 9) relacionando a umidade volumétrica à constante dielétrica aparente ( $K_a$ ). No ajuste da curva obteve-se uma equação polinomial de terceiro grau, como segue:

Figura 9: Curva de calibração das sondas TDR



### 3.4 Determinação da evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>) da mamona

Foram utilizadas as seguintes equações, adaptadas de Bernardo et al. (2006), para determinação da evapotranspiração nos lisímetros.

a) Lisímetro de drenagem:

$$ET_c = I + P - D \quad (4)$$

b) Lisímetro de lençol freático constante:

$$ET_c = P + RA - D \quad (5)$$

Em que:  $ET_c$  (mm) é a evapotranspiração da cultura;  $I$  (mm) é a irrigação;  $P$  (mm) é a precipitação;  $D$  (mm) é a água drenada; e  $RA$  é a recarga do aquífero.

Inicialmente os lisímetros de drenagem foram saturados e esperou-se até que cessasse a drenagem, iniciando o experimento com o solo a capacidade de campo.

As regas nos lisímetros de drenagem foram realizadas com frequência diária, utilizando-se de um regador plástico com crivo, tendo o volume aplicado convertido em lâmina de irrigação. Tal lâmina foi admitida como sendo a necessária para que houvesse volume drenado no dia posterior à aplicação, já que a equação do lisímetro de drenagem considerada necessita dessa informação que para que seja determinada a  $ET_c$ .

O volume de água percolada, proveniente dos lisímetros de drenagem, também foi convertido em lâmina de drenagem. E este foi reaproveitado nas regas do lisímetro, visto que a drenagem promove a lixiviação dos nutrientes do solo podendo deixa-lo pobre. Fora dos lisímetros a irrigação também se deu de forma manual buscando não interferir no balanço de água dentro destes.

A recarga do aquífero foi mensurada a partir das leituras diárias do nível de água nos reservatórios de abastecimento dos lisímetros de lençol freático constante, sendo posteriormente convertidas em lâminas de ascensão capilar em milímetros.

### **3.5 Estimativa da evapotranspiração de referência ( $ET_0$ )**

A evapotranspiração de referência ( $ET_0$ ) foi calculada por meio da Equação de Penman-Monteith (ALLEN et al., 1998) e pelo Tanque Classe "A".

#### **3.5.1 Penman-Monteith**

A evapotranspiração de referência foi estimada por meio da equação de Penman-Monteith parametrizada pela FAO 56 (ALLEN et al., 1998), de acordo com a seguinte expressão:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(Rn-G) + \gamma \frac{900}{T+273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0,34u_2)} \quad (6)$$

Em que:  $ET_0$  é a evapotranspiração de referência ( $\text{mm dia}^{-1}$ );  $Rn$  é a radiação líquida ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $G$  é o fluxo de calor no solo ( $\text{MJ m}^{-2} \text{dia}^{-1}$ );  $T$  é a média diária da temperatura do ar ( $^{\circ}\text{C}$ );  $u_2$  é a velocidade do vento a 2 m de altura ( $\text{m s}^{-1}$ );  $e_s$  é a pressão da saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );  $e_a$  é a pressão de vapor atual ( $\text{kPa}$ );  $(e_s - e_a)$  é o déficit de saturação de vapor ( $\text{kPa}$ );  $\Delta$  é a inclinação da curva da pressão de vapor versus temperatura ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ); e  $\gamma$  é a constante psicrométrica ( $\text{kPa } ^{\circ}\text{C}^{-1}$ ).

### 3.5.2 Tanque Classe “A”

A evapotranspiração de referência estimada a partir da evaporação da água no tanque Classe “A” ( $E_t$ ), foi mensurada diariamente por meio das medidas realizadas com a utilização de um parafuso micrométrico assentado sob um poço tranquilizador. A evaporação foi convertida em evapotranspiração utilizando-se um fator de ajuste, o coeficiente do tanque ( $K_p$ ) (Equação 7), o qual foi calculado através do modelo proposto por Snyder (1992) (Equação 8).

$$ET_0 = K_p \times E_t \quad (7)$$

$$K_p = 0,482 + 0,0553 \log(F) - 0,001354 V_v + 0,0045 (UR) \quad (8)$$

Em que:  $F$  é a largura da bordadura ao redor do tanque (m);  $V_v$  é a velocidade do vento ( $\text{m.s}^{-1}$ ) e  $UR$  é a umidade relativa do ar média (%).

### 3.6 Determinação do coeficiente de cultivo ( $K_c$ )

O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) foi calculado para cada fase de desenvolvimento utilizando a relação apresentada na Equação 9 (ALLEN et al., 1998), em que foi empregada a  $ET_0$  estimada tanto pelo método de Penman-Monteith quanto pelo do Tanque Classe A.

$$K_c = \frac{ET_c}{ET_0} \quad (9)$$

### 3.6.1 Índice de área foliar (IAF)

O coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) foi relacionado ao índice de área foliar (IAF), o qual foi obtido pela relação entre área foliar total da planta e área de terreno disponível a cada planta ( $m^2$  de área folhar/ $m^2$  de terreno). A área foliar foi calculada por meio do modelo (Equação 10) proposto por Severino et al. (2005), e utilizado por Santos et al. (2013) e Lima et al. (2014) para a cultivar BRS Energia, entre outros.

$$S = 0,2622 \times P^{2,4248} \quad (10)$$

Em que:  $S$  é a área foliar e  $P$  é o comprimento da nervura principal da folha.

Para o cálculo da área foliar total de cada planta, foi obtida primeiramente a área foliar de mais de 50% das folhas, mensurado o comprimento da nervura central e aplicando este valor na Equação 10, posteriormente foi calculada a área foliar média e esta multiplicada pelo número total de folhas da planta.

### 3.6.2 Graus-dia de desenvolvimento (GDD)

O coeficiente de cultivo foi relacionado ao graus-dia de desenvolvimento calculado a partir da Equação 11 proposta por Arnold (1959). Dessa forma torna-se possível extrapolar os dados do  $K_c$  para outras regiões.

$$GDD = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{T_{max} + T_{min}}{2} - T_{base} \right] \quad (11)$$

Em que:  $T_{max}$  é a temperatura máxima diária ( $^{\circ}C$ ),  $T_{min}$  é a temperatura mínima diária ( $^{\circ}C$ ) e  $T_{base}$  é a temperatura basal da cultura ( $15^{\circ}C$ , de acordo com Severino e Auld (2014)).

### 3.7 Coleta de dados

#### 3.7.1 Dados diários

A coleta de dados do Tanque Classe “A”, pluviômetro, TDR, reservatório abastecedor, e drenagem foram realizadas em escala diária sempre às 8 horas da manhã, e teve início aos 30 DAP (26/10/2016), visando a obtenção de um estande de plantas mais uniforme, posto que, a germinação das plântulas se deu em períodos diferentes. A obtenção dos dados teve fim aos 120 DAP (24/01/2017), com o final do ciclo.

Os dados de umidade de solo adquiridos através das sondas TDR foram coletados por meio da utilização da TDR100, acoplada a um *datalogger* CR1000 e este a um display digital (todos da Campbell Scientific Inc.), sempre antes da rega no lisímetro, ou seja, no instante do dia de menor umidade no solo.

Figura 10: Tomada de dados de umidade do solo por meio da TDR



#### 3.7.2 Dados meteorológicos

Os demais dados meteorológicos requeridos foram adquiridos em estação meteorológica automática, localizada na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, a aproximadamente 1,4 km da área experimental, para o período de 26/10/16 a 24/01/17. Os sensores foram acoplados a sistemas de aquisição de dados automático (*datalogger*) CR-1000 da Campbell Scientific. Foram obtidos dados diários das seguintes variáveis: temperatura máxima e mínima, umidade relativa máxima e mínima, velocidade do vento e saldo de radiação.

### **3.7.3 Parâmetros biométricos e fenológicos**

Durante o ciclo da cultura foram feitas avaliações biométricas das plantas do interior dos quatro lisímetros, com periodicidade de seis dias. Os atributos mensurados foram: altura da planta do colo a inserção da última folha, diâmetro do caule à 5 cm do colo, número de folhas, número de racemos e comprimento da nervura central.

### **3.7.4 Produção e produtividade**

Os dados de produção foram obtidos colhendo-se cada racemo separadamente na medida em que foram secando por completo. A colheita teve início aos 104 DAP com duração de 20 a 25 dias, para permitir que os racemos ainda verdes secassem por completo na planta. No período do final do ciclo ao final da colheita não houve rega nem recarga pelo abastecedor nos lisímetros de drenagem e lençol freático. Após a colheita, os racemos ficaram por três dias expostos ao sol para secagem. Posteriormente os frutos foram contados, descascados e as sementes foram contadas e pesadas em balança de precisão (0,01 g). Para o cálculo da produtividade, se considerou o espaçamento de 1,15 m x 1,05 m.

## **3.8 Análise estatística**

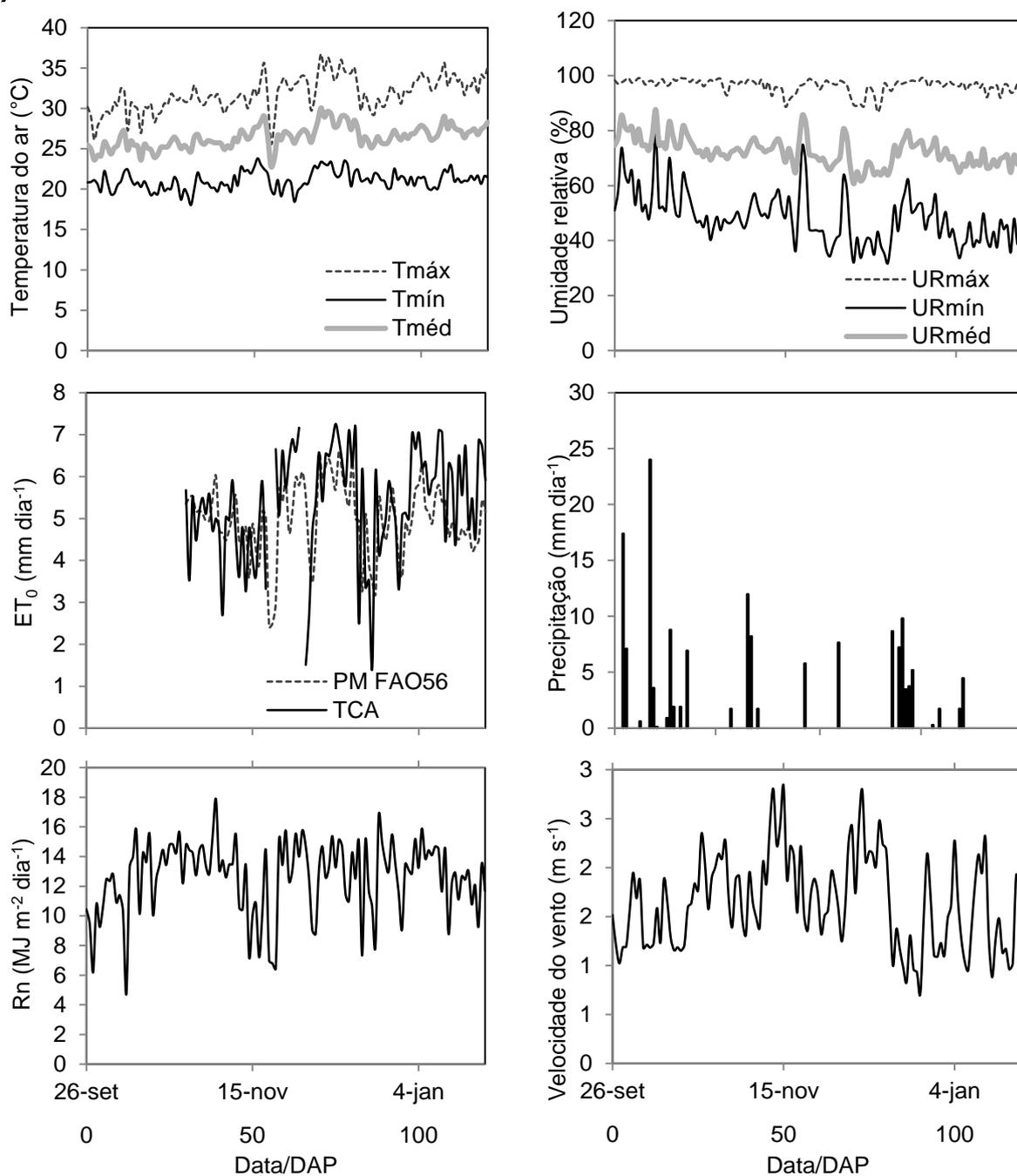
Realizou-se análise estatística descritiva empregando-se média aritmética para os dados de umidade do solo, evapotranspiração da cultura (ET<sub>c</sub>), coeficiente de cultivo (K<sub>c</sub>), produção e produtividade; análise de correlação para a ET<sub>c</sub> obtida pelos dois tipos de lisímetro e também regressão linear simples utilizando diagramas de dispersão para as variáveis biométricas, o índice de área foliar (IAF), K<sub>c</sub> e graus-dia de desenvolvimento (GDD), obtendo-se os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>).

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Condições climáticas e de umidade do solo

As condições climáticas manifestadas durante o período de cultivo da mamona, desde o plantio até o final do ciclo, estão expressas na Figura 11.

Figura 11: Condições climáticas do período de 26 de setembro de 2016 a 24 de janeiro de 2017



Observou-se a ocorrência de 27 dias de chuva e total acumulado de 156,6 mm de precipitação durante todo o período, com distribuição irregular. A temperatura média para o período foi de 26,44 °C, com máxima de 36,74 °C e mínima de 18,03 °C.

A maior taxa de fotossíntese líquida na mamoneira ocorre aos 23 °C (AZEVEDO; BELTRÃO, 2007) e a condição ideal para seu desenvolvimento está entre 20 e 30 °C (MOSHKIN 1986; WEISS, 2000), podendo ser cultivada em temperaturas de até 35 °C (SILVA et al., 2000). Aires et al. (2011) observaram que as maiores taxas de crescimento relativo da mamona, BRS Energia, ocorreram em condições de temperatura média de 22,5 a 25,7 °C. Isto indica que entre 05 e 15/12/2016 as plantas estiveram sob estresse térmico no horário de maior temperatura.

A umidade relativa média foi 72,26 %, com máxima de 99,20 % e a mínima de 31,73 %. De acordo com Azevedo e Beltrão (2007), a faixa de umidade relativa ideal para a mamona é de 50 a 65 %. Aires et al. (2011) observaram uma amplitude de variação da umidade relativa do ar de 64 a 73 % e constataram que a maior produtividade foi obtida nas épocas em que a umidade relativa foi menor, principalmente na fase reprodutiva.

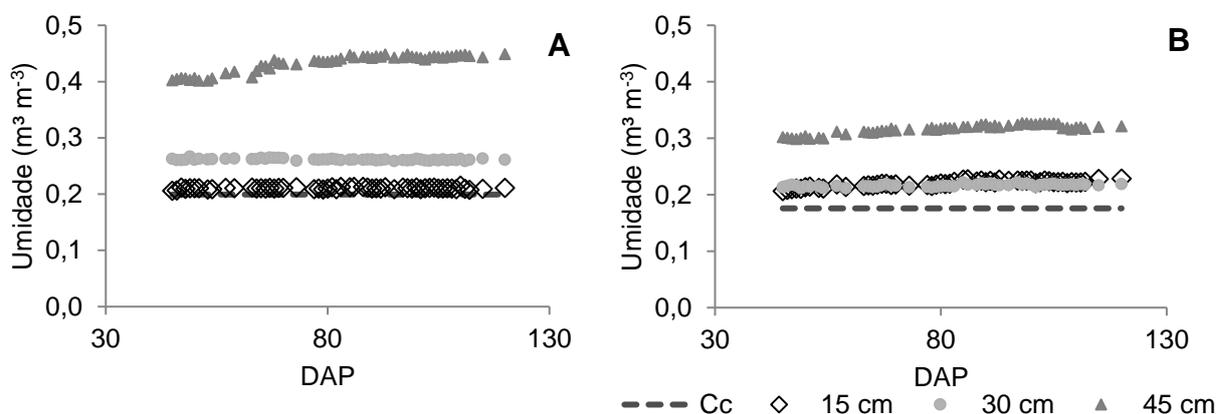
O saldo de radiação médio para o período foi de 12,60 MJ m<sup>-2</sup> dia<sup>-1</sup>. Os menores valores de radiação devem-se a ocorrência isolada ou simultânea de precipitações e forte nebulosidade. A média da velocidade do vento ao longo do ciclo da cultura foi de 1,65 m s<sup>-1</sup>.

Dados da evapotranspiração de referência (ET<sub>0</sub>) podem ser vistos também na Figura 11, onde se visualiza um comportamento bastante variável, com médias de 4,98 e 5,35 mm dia<sup>-1</sup>, para os métodos Penman-Monteith e do Tanque Classe "A", respectivamente. As variações observadas na ET<sub>0</sub> estão intimamente relacionadas com as demais variáveis meteorológicas apresentadas.

Aires et al. (2011) comentam que em condições meteorológicas desfavoráveis a mamoneira prolonga seu período vegetativo e em condições mais favoráveis as florações são antecipadas, diminuindo a duração do ciclo da planta. Desse modo, percebe-se que as condições meteorológicas não foram desfavoráveis já que a planta expressou duração do ciclo de 120 dias, estando dentro do esperado para a cultivar (EMBRAPA, 2007).

Na Figura 12 nota-se que a umidade do solo, em todas as profundidades estudadas, esteve sempre acima da capacidade de campo em ambos os tipos de lisímetros, permitindo uma evapotranspiração potencial pela planta. Nos lisímetros de lençol freático constante a umidade foi mais elevada quanto maior a profundidade do solo, com média de 0,21; 0,23 e 0,43  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para as profundidades 15, 30 e 45 cm, respectivamente. A figura indica que a umidade na camada de solo a 45 cm esteve bastante alta, já que tal camada era bem próxima ao nível do lençol, fazendo com que a ascensão capilar a saturasse. Já nos lisímetros de drenagem a umidade nas profundidades de 15 e 30 cm foram semelhantes, ambas com média de 0,22  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$  para o período avaliado, e o solo na profundidade de 45 cm apresentou umidade média de 0,32  $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ . As profundidades de 30 e 45 no lisímetro de drenagem apresentaram umidades menores do que no lisímetro de lençol freático constante, pois, não estavam sob efeito de ascensão capilar.

Figura 12: Umidade volumétrica no solo dos lisímetros de lençol freático constante (A) e drenagem (B)



## 4.2 Fenologia da mamoneira, BRS Energia

O ciclo produtivo da cultura foi caracterizado conforme a ocorrência dos principais eventos fenológicos, sendo dividido em quatro fases, cuja definição foi realizada de acordo com as observações de campo. Doorenbos e Pruitt (1977) recomendam, para culturas extensivas, que o período vegetativo total seja dividido em quatro fases: inicial, de crescimento, período intermediário e período final.

Verificou-se (Tabela 4) que a fase I teve duração de 34 dias (15 a 48 DAP) e correspondeu ao período da emergência das plantas até a inflorescência do primeiro

cacho. Sendo que a coleta de dados só teve início aos 30 DAP, ou seja, a fase inicial teve 19 dias de dados. A fase II foi a menor e teve duração de 8 dias, correspondeu à fase do início do desenvolvimento reprodutivo e compreendeu um intervalo que foi do surgimento da primeira inflorescência ao surgimento da inflorescência do segundo cacho ou racemo, esse intervalo foi bem menor do que o observado por Aires et al. (2011) e Dias et al. (2015) para essa fase (17 dias). A fase III se estendeu do final da fase II até o início da maturação dos racemos e teve uma duração de 32 dias. A fase IV, ou fase final do ciclo da cultura, durou também 32 dias e compreendeu o período entre o início da maturação e o final do ciclo, que se encerrou aos 120 DAP. Na Tabela 4 também são apresentados os graus-dia de desenvolvimento acumulados até o final de cada fase.

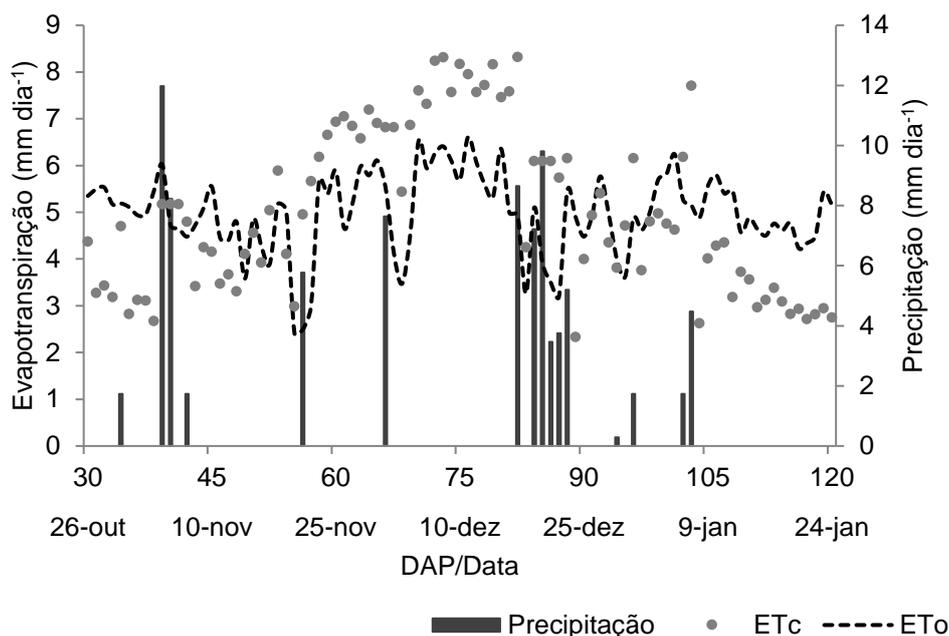
Tabela 4: Duração de fases fenológicas da mamoneira, cultivar BRS Energia, e graus-dia de desenvolvimento (GDD), no período de 11 de outubro de 2016 a 24 de janeiro de 2017, Cruz das Almas BA

Fase	Descrição fenológica da fase	Período (DAP)	Duração	GDD (°C)
I	Germinação até inflorescência do 1º cacho	15-48	34	512,16
II	Final da I fase até inflorescência do 2º cacho	49-56	8	604,73
III	Final da II fase até início da maturação	57-88	32	997,42
IV	Início da maturação até o fim do ciclo	89-120	32	1384,26

### 4.3 Evapotranspiração da cultura (ETc)

A Figura 13 apresenta a evapotranspiração (ETc) diária da mamoneira, cv. BRS Energia, mensurada nos lisímetros de lençol freático constante, assim como a evapotranspiração de referência (ET0), obtida pelo método de Penman-Monteith, e o aporte de água pela precipitação ao longo do ciclo, no período de 26 de outubro de 2016 a 24 de janeiro de 2017.

Figura 13: Evapotranspiração\* diária medida no lisímetro de lençol freático constante e precipitação pluviométrica indicada em barras verticais



\*Média de dois lisímetros

Nota-se que houve variação na evapotranspiração tanto ao longo do ciclo da mamoneira como também variações diárias. O primeiro tipo de variação citada deve-se principalmente a fatores de desenvolvimento da cultura, ao seu ganho de massa com conseqüente aumento da área foliar e a necessidade por maior quantidade de fotoassimilados para o desenvolvimento dos frutos na fase reprodutiva, que fazem com que a planta transpire em maior quantidade, como também a fatores meteorológicos como a temperatura máxima e velocidade do vento que tiveram seu pico nesse mesmo período (Figura 11). Já a variação diária da ETc dentro da mesma fase de crescimento deve-se as variações das condições climáticas, como pode ser observado também na Figura 11.

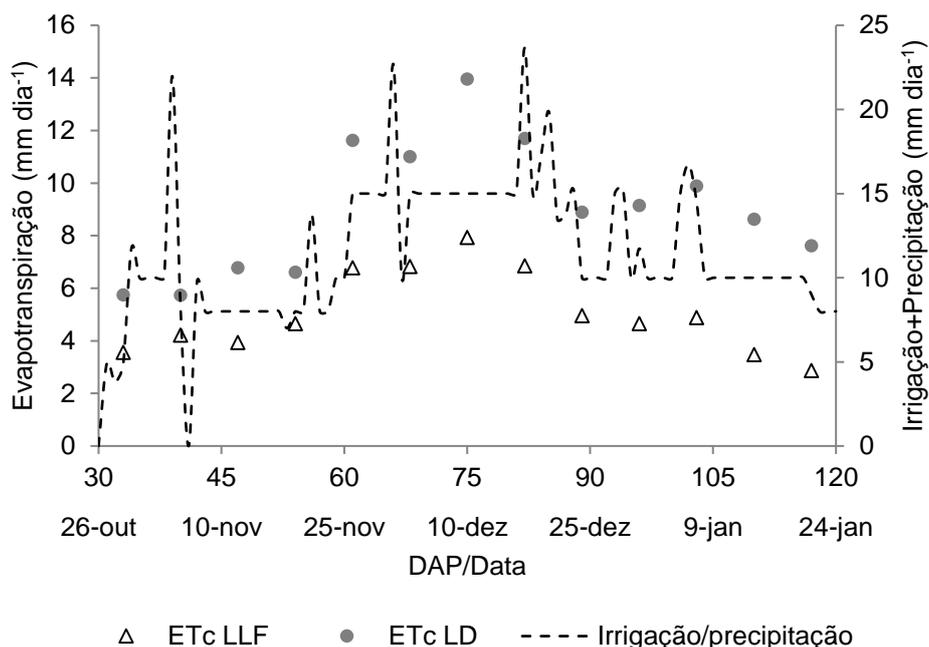
A média diária da evapotranspiração da cultura em todo o período foi de 5,04 mm dia<sup>-1</sup>, apresentando valores mínimos de 3,86 mm dia<sup>-1</sup> na primeira fase de desenvolvimento, fato esperado já que nesse período a área foliar era pequena proporcionando uma baixa cobertura do solo. Dessa forma, a maior contribuição para a evapotranspiração veio da evaporação de água da superfície do solo. Com o início da floração na segunda fase do ciclo houve um aumento gradual da ETc, com média de 4,45 mm dia<sup>-1</sup> para a seguinte fase.

Os valores máximos de evapotranspiração ocorreram na terceira fase, com média de  $6,95 \text{ mm dia}^{-1}$ . Esta fase foi a de maior desenvolvimento reprodutivo da mamoneira, e também o período em que a planta apresentou maior área foliar, provocando um acréscimo na transpiração em comparação ao restante do período. Em contraponto a maior área foliar possibilitou uma melhor cobertura do solo e, portanto, promoveu uma redução na evaporação deste. Sendo assim, infere-se que para esse período, a ETc recebeu mais contribuição da transpiração do que da evaporação. Com o início da maturação veio também a senescência das folhas, com consequente redução da área foliar havendo diminuição da ETc, já que a média para a fase final foi de  $3,99 \text{ mm dia}^{-1}$ .

O consumo hídrico total durante o período de coletas de dados iniciado aos 30 DAP foi de  $458,93 \text{ mm}$ . Dias et al. (2015) para os anos de 2005 e 2006 observaram uma ETc da mamoneira média de  $5,18$  e  $4,96 \text{ mm dia}^{-1}$ , valores mínimos de  $3,9 \text{ mm dia}^{-1}$ , máximos de  $6,3$  e  $5,7 \text{ mm dia}^{-1}$  e total acumulado de  $577,9$  e  $552,3 \text{ mm}$ , respectivamente. A comparação direta desses dados é problemática devido às diferenças climáticas e de metodologia utilizada para o cálculo da ETc, mas serve de referência para avaliar o desempenho deste tipo de lisímetro.

Na Figura 14 estão apresentadas médias, para um período de sete dias, dos valores de ETc nos lisímetros de drenagem e lençol freático constante, buscando comparar o comportamento dos dados ao longo do ciclo. A média semanal foi realizada já que, para o lisímetro de drenagem, avaliações de ETc diárias não são recomendadas e dentre as escalas de tempo analisadas o período de sete dias foi o que apresentou maior consistência dos dados. Esta é a escala de tempo mínima indicada por Pereira et al. (2013) para esse tipo de lisímetro. Miranda (2011) fez análises da ETc da mamona em lisímetros de drenagem com médias em escala mensal.

Figura 14: Evapotranspiração semanal medida nos lisímetros de drenagem (LD) e de lençol freático constante (LLF) e somatório da lâmina irrigada e precipitada



Os maiores eventos de irrigação nos lisímetros de drenagem foram de 15 mm dia<sup>-1</sup>, no período de maior consumo, que foram necessários para que houvesse percolação. Fica evidente que o comportamento da ETc durante o período foi semelhante em ambos os lisímetros. No entanto, o lisímetro de drenagem apresentou valores de ETc sempre superiores ao de lençol freático, com uma discrepância média de 3,02 mm dia<sup>-1</sup>.

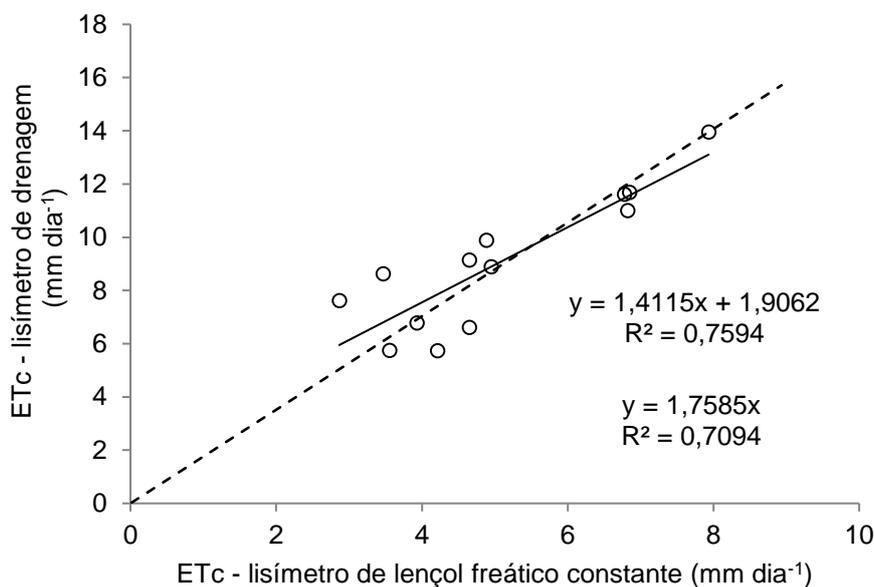
O consumo de água pela planta entre os 30 e 120 DAP, mensurado no lisímetro de drenagem foi de 821,24 mm. Tal fato pode ser justificado pela frequência de irrigação e altas lâminas aplicadas no lisímetro de drenagem para que houvesse percolação, fazendo com que a camada superior do solo estivesse sempre com umidade acima da capacidade de campo e acima da umidade para a mesma profundidade no lisímetro de lençol freático constante (Figura 12), favorecendo, portanto, a ocorrência de maiores taxas de evaporação. Ainda que a lâmina consumida tenha sido acentuada no lisímetro de drenagem em comparação ao de lençol freático, Centeno (2009), utilizando o mesmo tipo de lisímetro, também para a mamoneira, cv. BRS Energia, observou consumo de 1.525 mm até os 79 dias após a emergência.

Utilizando microlisímetros de pesagem em Argissolo no verão em Eldorado do Sul-RS, sob preparo convencional, Dalmago et al. (2010) observaram evaporação

superior a  $6 \text{ mm dia}^{-1}$  em lisímetros sem plantas e evaporação entre  $4$  e  $5 \text{ mm dia}^{-1}$  em lisímetros com planta. Sabendo-se que os solos argilosos possuem maior capacidade de retenção de água em relação a solos arenosos, que é o caso do solo do presente estudo, infere-se que a taxa de evaporação deve ter sido bastante elevada, contribuindo para uma evapotranspiração excessiva nos lisímetros de drenagem.

Na Figura 15, encontra-se a correlação entre a evapotranspiração da cultura da mamona estabelecida pelos dois tipos de lisímetro, em médias de sete dias. Observa-se que a superestimação dos valores de  $ET_c$  no lisímetro de drenagem em relação ao de lençol freático constante foi de  $75,85\%$ . Mesmo assim, devido ao comportamento semelhante dos dados, se obteve um coeficiente de correlação ( $r$ ) de  $0,87$ , indicando uma correlação forte. O coeficiente de determinação ( $R^2$ ) para as curvas de regressão linear completa e forçada pela origem foram de  $75,94$  e  $70,94$  %, respectivamente.

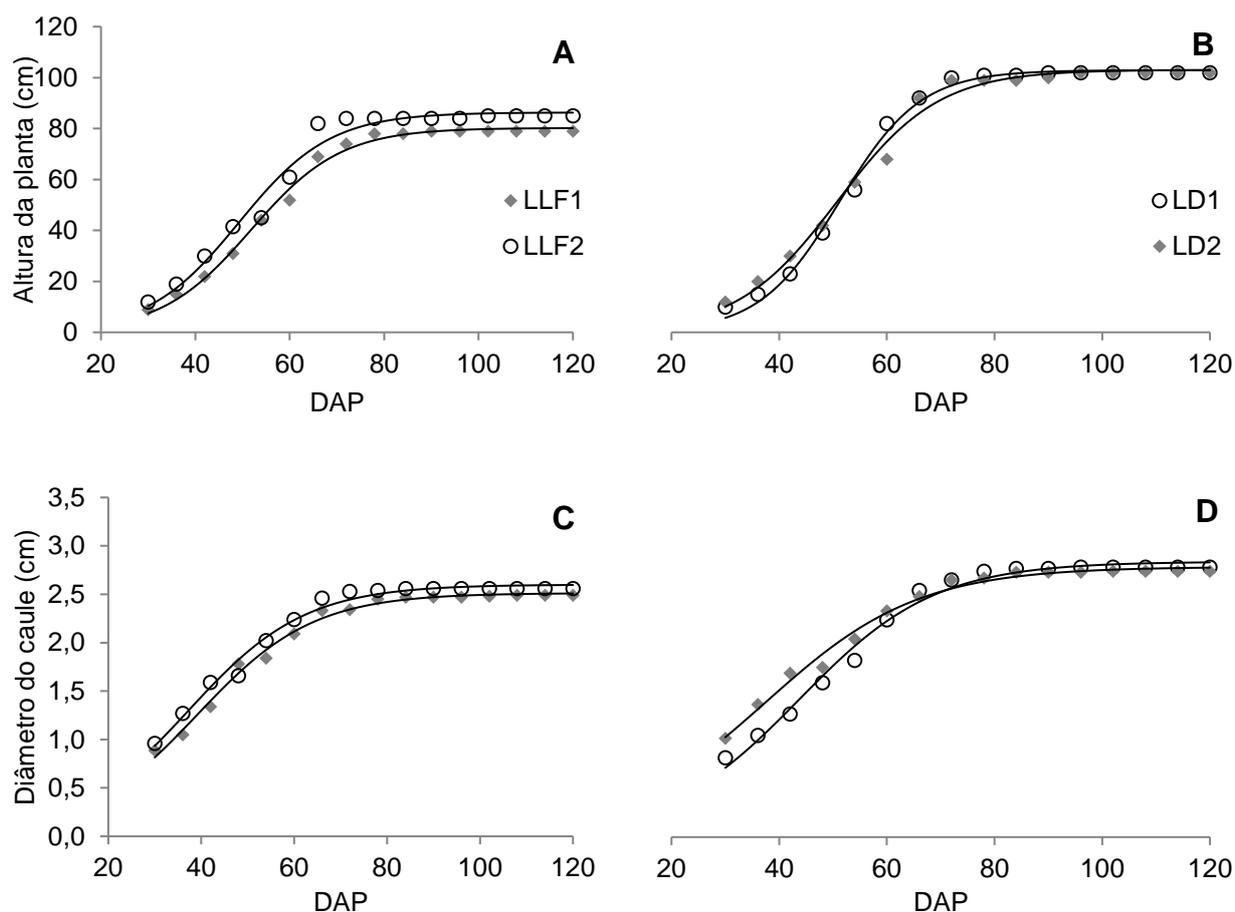
Figura 15: Correlação entre evapotranspiração da cultura da mamoneira, cv. BRS Energia (médias semanais) para os dois tipos de lisímetro



#### 4.4 Características Biométricas

Às variáveis de crescimento e desenvolvimento altura da planta e diâmetro do caule, empregou-se o modelo sigmoidal, do tipo  $y = a/(1-bEXP(cx))$ , também conhecido como modelo logístico (Figura 16A, B, C e D), assim como empregado por Silva et al. (2009) para a cultura da mamona, BRS Energia. Utilizou-se uma equação linear simples, do tipo  $y = ax + b$ , para o número de racemos (Figura 16E e F) e para a variável área foliar a curva foi ajustada com um modelo polinomial de segundo grau, do tipo  $y = ax^2 + bx + c$  (Figura 16G e H). Todos os parâmetros das equações, bem como os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) podem ser visualizados na Tabela 5.

Figura 16: Características biométricas de altura, diâmetro o caule, número de racemos e área foliar de plantas de mamona nos lisímetros de lençol freático constante (A, C, E, G) e de drenagem (B, D, F, H)



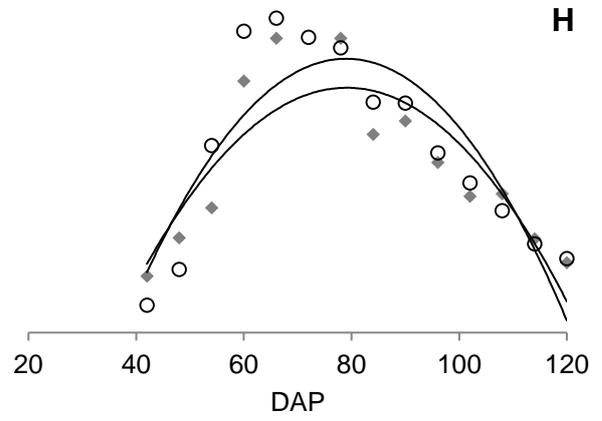
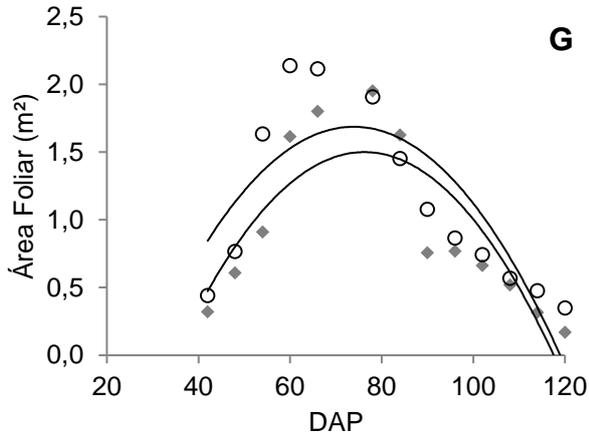
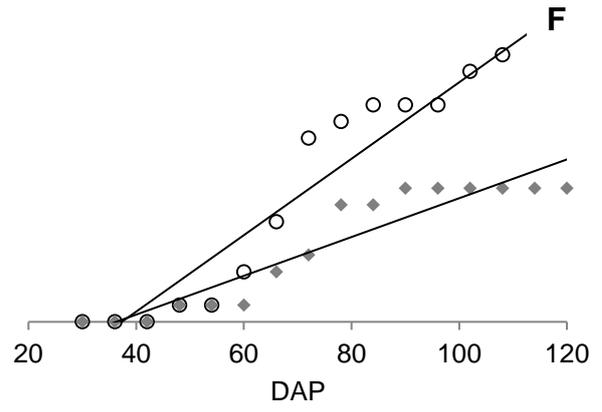
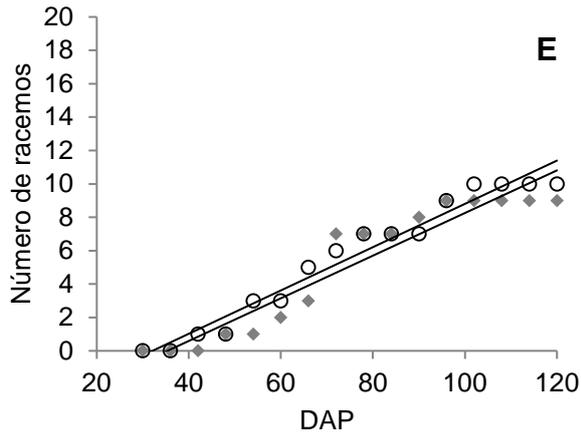


Tabela 5: Parâmetros das equações ajustadas para as características biométricas das plantas nos lisímetros

	Lisímetro de lençol freático							
	LLF1				LLF2			
	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>
Altura (cm)	80,2222	227,0150	-0,1048	0,9945	86,3145	164,7570	-0,1037	0,9804
Diâmetro do caule (cm)	2,5120	23,0899	-0,0802	0,9915	2,5999	19,3692	-0,0795	0,9872
Número de racemos	0,1277	-4,5147		0,9034	0,1297	-4,1618		0,9618
Área foliar (m <sup>2</sup> )	-0,0009	0,1338	-3,5972	0,7139	-0,0008	0,1225	-2,8376	0,6713
	Lisímetro de drenagem							
	LD1				LD2			
	a	b	c	R <sup>2</sup>	a	b	c	R <sup>2</sup>
Altura (cm)	103,0410	225,3650	-0,1066	0,9918	102,9000	959,3480	-0,1340	0,9961
Diâmetro do caule (cm)	2,7848	14,2218	-0,0707	0,9898	2,8380	32,1341	-0,0793	0,9897
Número de racemos	0,2289	-8,5441		0,9327	0,1162	-4,2132		0,8882
Área foliar (m <sup>2</sup> )	-0,0010	0,1505	-4,1308	0,7472	-0,0012	0,1832	-5,2010	0,7716

A altura máxima das plantas foi de 79 e 85 cm em LLF1 e LLF2, e 102 cm em LD1 e LD2. Silva et al. (2009) analisando diferentes lâminas de irrigação identificaram que houve diferença significativa entre elas e que a lâmina de 479,75 mm proporcionou a maior altura na mamona, BRS Energia, ao final do ciclo, a qual foi de 105,74 cm. Santos et al. (2010), estudando diferentes tipos de adubação na cultivar BRS Energia, observaram uma altura máxima de 113,48 cm para o tratamento com NPK e mínima de 77,78 cm para o tratamento sem adubação.

Na variável diâmetro do caule a 5 cm os valores máximos foram de 2,49; 2,56; 2,74 e 2,78 cm para as plantas no LLF1, LLF2, LD1 e LD2, respectivamente. Valores inferiores ao encontrado por Santos et al. (2013), que foi de 3,63 cm, e superiores aos encontrados por Dias (2009), que observaram diâmetros de 2,19 e 2,05 cm em 2005 e 2006, respectivamente. A área foliar das plantas foi maior entre 60 e 90 DAP, com valores máximos de 1,95; 2,12; 2,19 e 2,34 m<sup>2</sup> para as plantas no LLF1, LLF2, LD1 e LD2. Depois dos 60 DAP a área foliar para de aumentar, torna-se estável por certo período e tende a decair no final do ciclo. Silva et al. (2009) e Severino et al. (2010) atribuem o decréscimo no crescimento da área foliar, após os 60 dias, ao direcionamento dos fotoassimilados para a produção e enchimento de grãos e não mais ao crescimento foliar.

O primeiro racemo apareceu aos 42 DAP em LLF2. Aos 48 DAP todas as plantas dos quatro lisímetros estavam em fase de floração. Sendo que o número máximo de racemos foi de 9, 10, 17 e 8 em LLF1, LLF2, LD1 e LD2 respectivamente.

#### **4.5 Coeficiente de cultivo (Kc)**

Os coeficientes de cultivo, utilizando como método de estimativa da ET<sub>0</sub> o modelo de PM FAO-56 e o TCA, para as diferentes fases de desenvolvimento em um ciclo de cento e vinte dias, estão apresentados na Figura 17 e Tabela 6.

Figura 17: Coeficiente de cultivo da mamona, cv. BRS Energia, em função do número de dias após o plantio, mensurado através da  $ET_{CLLF}$  e  $ET_{0PM56}$  (A e C), da  $ET_{CLLF}$  e  $ET_{0TCA}$  (B e D), da  $ET_{CLD}$  e  $ET_{0PM56}$  (E) e da  $ET_{CLD}$  e  $ET_{0TCA}$  (F)

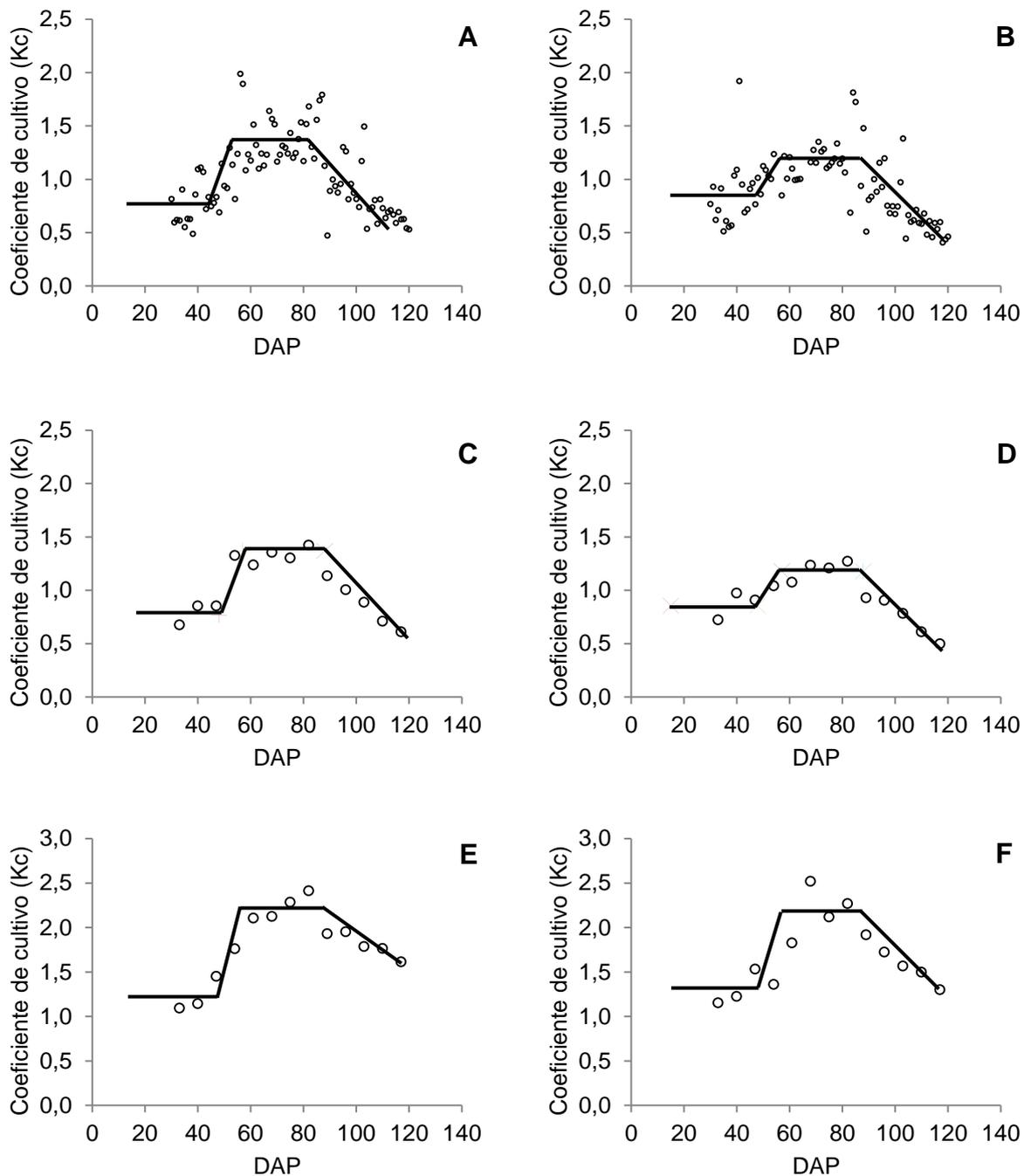


Tabela 6: Coeficiente de cultivo médio para as fases fenológicas da mamona

Fase	Descrição fenológica da fase	Kc A*	Kc B*	Kc C*	Kc D*
I	Germinação até inflorescência do 1º cacho	0,77	0,86	1,23	1,30
II	Final da I fase até inflorescência do 2º cacho	1,18	1,06	1,76	1,36
III	Final da II fase até início da maturação	1,37	1,18	2,23	2,18
IV	Início da maturação até o fim do ciclo	0,81	0,71	1,81	1,60

\*Kc A –  $ET_{CLLF}/ET_{OPM56}$ ; Kc B –  $ET_{CLLF}/ET_{OTCA}$ ; Kc C –  $ET_{CLD}/ET_{OPM56}$ ; Kc D –  $ET_{CLD}/ET_{OTCA}$

Na dispersão dos valores de Kc das Figuras 17A e B nota-se que em alguns dias os valores foram elevados, isso se deve à ocorrência de precipitações. Um inconveniente de se trabalhar com lisímetros de lençol freático em escala diária é que em dias de chuva, todo o volume precipitado é contabilizado como entrada, porém esta água que entra no perfil de solo do lisímetro pode levar um período maior que 24 horas para ser drenada. Isto posto, e buscando comparar os comportamentos do Kc em ambos os tipos de lisímetro foi que se realizou médias semanais apresentadas nas Figuras 17C e D.

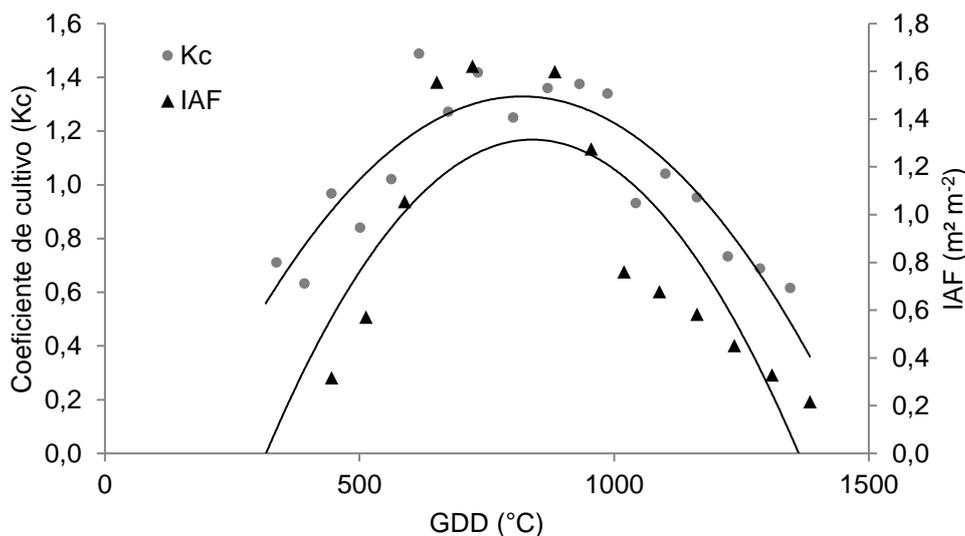
Observa-se uma pequena diferença entre os valores de Kc calculados com os dados de ETc obtidos pelo mesmo tipo de lisímetro, ou seja, a utilização do método TCA em comparação ao de PM FAO-56 foi satisfatória. Entretanto, como esperado diante dos dados de ETc, os Kc's calculados utilizando o lisímetro de drenagem foram expressivamente mais altos em todas as fases fenológicas da cultura, o que inviabiliza sua utilização para o manejo da irrigação. Mesmo assim se aproximam, e em algumas fases são até inferiores, aos valores encontrados por Miranda (2011) para a mamona cv. El Guarany e por Centeno et al. (2012) para a cv. BRS Energia, em que os autores também utilizaram lisímetro de drenagem.

Os valores de Kc, mesmo os obtidos pelo lisímetro de lençol freático, foram superiores aos indicados por Doorenbos e Pruitt (1977) em todas as fases fenológicas. Para a fase de semeadura a germinação Centeno et al. (2012), obtiveram Kc de 0,29, adotando um turno de rega de 2 dias. Esse valor pode ser tido como coeficiente de evaporação (Ke), já que o solo, nesta fase, se encontrava nu. Mesmo as condições de solo e regime de irrigação não tendo sido os mesmos empregados neste estudo, percebe-se que a evaporação pode ter um grande peso no valor no Kc.

Os valores de  $KcA$  e  $KcB$  (Tabela 6) foram relativamente elevados na fase inicial. Doorenbos e Pruitt (1977) comentam que, na fase de crescimento inicial, com a baixa cobertura do solo, a evaporação na superfície pode ser considerável, principalmente quando este permanece úmido a maior parte do tempo. Dias et al. (2015) observaram valores de  $Kc$ 's para a mamoneira de 0,72; 0,92; 1,00; 1,17 e 0,92, para o ano de 2005 e 0,76; 0,93; 1,00; 1,20 e 0,92, para o ano de 2006, para as fases descritas anteriormente. Considerando que as duas primeiras fases de desenvolvimento admitidas pelos autores correspondem à primeira fase admitida neste trabalho, os dados se mostram semelhantes.

A Figura 18 indica o coeficiente de cultivo da mamona, BRS Energia, bem como o índice de área foliar (IAF) em função do graus-dia de desenvolvimento (GDD). O  $Kc$  utilizado na relação foi o obtido através da  $ET_{CLLF}$  e da  $ET_{OPM56}$ . Aos 30 DAP quando teve início a coleta de dados dos lisímetros já haviam sido computados 305,72 GDD desde a data de plantio em 26 de setembro de 2016. A curva do  $Kc$  foi ajustada por meio da equação quadrática  $y = -3E-06x^2 + 0,005x - 0,7094$ , com coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,8082. O IAF também foi ajustado por meio de uma equação polinomial de segundo grau,  $y = -5E-06x^2 + 0,0081x - 2,0702$ , com  $R^2$  igual a 0,6964.

Figura 18: Coeficiente de cultivo, calculado pela  $ET_{CLLF}$  e  $ET_{OPM56}$ , e índice de área foliar (IAF) em função do graus-dia de desenvolvimento (GDD)



Visualiza-se que a tendência da curva ajustada de  $Kc$  em função de graus-dia de desenvolvimento é semelhante à verificada na curva do IAF, entretanto com

melhores ajustes. Isso demonstra que o coeficiente de cultura pode ser relacionado a índices térmicos, como o acúmulo de graus-dia, apresentando um bom desempenho. Medeiros et al. (2000), observaram relações altamente significativas entre coeficiente de cultivo e graus-dia de desenvolvimento em feijão carioca, cultivado em lisímetro de nível freático constante, no entanto, comentam que essa relação é fortemente afetada por fatores mesológicos, como densidade de plantio, suprimento de água e temperatura. Marques et al. (2015), que utilizaram lisímetro de drenagem para mensurar a necessidade hídrica do manjericão, também observaram estimativas de Kc e Índice de cobertura em função do GDD altamente significativas.

#### 4.6 Produção e produtividade

Os resultados de produção foram analisados separadamente por tipo de lisímetro e também de forma geral (Tabela 7). As plantas nos lisímetros de lençol freático constante apresentaram, juntas, uma produção de 0,49 kg, gerando uma média de 0,25 kg por planta, o que representa uma produtividade de 2043,85 kg ha<sup>-1</sup>. Já as plantas nos lisímetros de drenagem produziram uma soma 0,59 kg de grãos, com média de 0,29 kg por planta, representando 2431,47 kg ha<sup>-1</sup> de produtividade. De forma geral obteve-se uma produtividade média de 2237,66 kg ha<sup>-1</sup>. Os valores de produtividade foram calculados considerando uma densidade populacional de 8.281 plantas ha<sup>-1</sup>, de acordo com o espaçamento adotado nos lisímetros. A mesma foi superior as encontradas por Santos et al. (2010) e Alves et al. (2015), para a mesma cultivar e densidade populacional superior (em ambos os trabalhos a produtividade foi inferior a 1.000 kg ha<sup>-1</sup> com 10.000 plantas ha<sup>-1</sup>), e inferior as encontradas por Dias et al. (2015), que para a mesma cultivar e densidade populacional superior (45.000 plantas ha<sup>-1</sup>), obtiveram produtividade superior a 3.000 kg ha<sup>-1</sup>.

Tabela 7: Dados de produção e produtividade da mamoneira cultivada em lisímetro

Lisímetro	Nº frutos	Nº sementes	Produção (kg)	Produtividade (kg ha <sup>-1</sup> )	EUA (kg m <sup>-3</sup> )
Lençol freático constante	300	889,50	0,25	2043,85	0,54
Drenagem	413	1203,50	0,29	2431,47	0,36
Média	357	1046,50	0,27	2237,66	0,45

Aires et al. (2011), observou produtividade máxima de  $1.834 \text{ kg ha}^{-1}$ , para a mamona, BRS Energia, cultivada em densidade de  $8.333 \text{ plantas ha}^{-1}$ . Biscaro et al. (2012), utilizando diferentes lâminas de irrigação verificaram que a máxima lâmina,  $898,10 \text{ mm}$ , aplicada as cultivares IAC 80 e IAC 2028, proporcionou uma produtividade de  $1513,9$  e  $1452,4 \text{ kg ha}^{-1}$ , respectivamente. Dessa forma, percebe-se que as plantas neste estudo expressaram seu potencial produtivo, e exerceram o consumo de água necessário, através da transpiração, para que isto ocorresse.

Ainda que a produtividade por área tenha sido maior nos lisímetros de drenagem, a produtividade em termos de consumo hídrico, ou seja, a eficiência do uso da água (EUA) foi 50% maior nos lisímetros de lençol freático constante. Dias et al. (2015) observaram EUA de  $0,59$  e  $0,58 \text{ kg m}^{-3}$  para a mamoneira, BRS Energia, nos anos de 2005 e 2006, respectivamente. Centeno (2009) para a mamoneira, BRS Energia, cultivada em lisímetro de drenagem, encontrou eficiência de uso da água de  $0,46 \text{ kg m}^{-3}$ .

## 5 CONCLUSÃO

1. Os valores de  $ET_c$  obtidos pelo lisímetro de drenagem foram superiores em todo o ciclo ao mensurado pelo lisímetro de lençol freático com uma discrepância média de  $3,02 \text{ mm d}^{-1}$ .
2. A  $ET_c$  na mamona, BRS Energia, mensurada pelo lisímetro de lençol freático constante foi de 3,86; 4,45; 6,95 e 3,99  $\text{mm d}^{-1}$  para as fases inicial, de crescimento, intermediária e final, respectivamente, com um consumo hídrico de 458,93 mm dos 30 dias após plantio (DAP) ao final do ciclo.
3. Os menores valores de  $K_c$  para a mamoneira, BRS Energia, foram estimados pela relação entre a  $ET_c$  obtida pelo lisímetro de lençol freático e a  $ET_0$  estimada através do tanque Classe A, e foram de 0,86; 1,06; 1,18 e 0,71 para as fases inicial, de crescimento, intermediária e final, respectivamente.
4. Os  $K_c$ 's obtidos através do lisímetro de drenagem não são indicados para o manejo de irrigação da mamona, BRS Energia, visto que seus valores foram demasiadamente elevados.
5. O  $K_c$  e o IAF da mamoneira, BRS Energia, podem ser obtidos pela relação com o graus-dia de desenvolvimento (GDD).

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABOUKALED, A.; ALFARO, A.; SMITH, M. **Lysimeters**. Rome: FAO, 1982. 68p. FAO Irrigation and Drainage Paper: 39.

AFANDI, G. E.; ABDRABBO, M. Evaluation of reference evapotranspiration equations under current climate conditions of Egypt. **Turkish Journal of Agriculture – Food Science and Technology**, v.3, n.10, p.819-825, 2015.

AIRES, R. F.; SILVA, S. D. dos A.; EICHOLZ, E. D. Análise de crescimento de mamona semeada em diferentes épocas. **Ciência Rural**, v.41, n.8, p.1347-1353, 2011.

AL-JAMAL, M. S.; SAMMIS, T. W.; BALL, S.; SMEAL, D. Yield-based, irrigated onion crop coefficients. **Applied Engineering in Agriculture**, v.15, n 6, p.659–668, 1999.

ALLEN, R. G.; PEREIRA, L. S.; RAES, D.; SMITH, M. **Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements**. Rome: FAO, 1998. 297p. Irrigation and Drainage Paper: 56.

ALVES, G. da S.; TARTAGLIA, F. de L.; BELTÃO, N. E. de; SAMPAIO, L. R.; FREIRE, M. A. de O. Densidade populacional e seu efeito na produtividade da mamoneira BRS Energia sob cultivo irrigado. **Revista Ciência Agronômica**, v.46, n.3, p.546-554, 2015.

ARNOLD, C. Y. The determination and significance of the base temperature in a linear heat unit system. **Proceedings of the American Society for Horticultural Science**, v.74, p.430-445, 1959.

AZEVEDO, D. M. P.; BELTRÃO, N. E. M. **O agronegócio da mamona no Brasil**. 2. ed. rev. amp. Campina Grande: Embrapa Algodão; Brasília: Embrapa Informação Tecnológica, 2007. 506 p.

AZEVEDO, D. M. P.; LIMA, E. F.; BATISTA, F. A. S.; BELTRÃO, N. E. M.; SOARES, J. J.; VIEIRA, R. M.; MOREIRA, J. A. N. **Recomendações técnicas para o cultivo da mamoneira (*Ricinus communis* L.) no Nordeste do Brasil**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 1997. 52p. Circular Técnica, 25.

BERNARDO, S.; SOARES, A. A.; MANTOVANI, E. C. **Manual de irrigação**. Viçosa: Editora UFV, 8.ed. 2006. 625p.

BISCARO, G. A.; VAZ, M. A. B.; BIACON, G. M.; GOMES, E. P.; SILVA, S. B.; MOTOMIYA, A. V. A. Produtividade de duas cultivares de mamona submetidas a diferentes lâminas de irrigação suplementar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, n.9, p.925-930,2012.

BOUERI, M. A. **Estimativa da evapotranspiração da cultura do *Tagetes patula* pelo método da razão de Bowen, em ambiente protegido e a campo**. 2007. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” – UNESP, Botucatu, 2007. 66p.

CAMPBELL, D. N.; NA, C.; ROWLAND, D. L.; SCHNELL, R. W.; FERRELL, J. A.; WILKIE, A. C. Development of a regional specific crop coefficient (Kc) for castor (*Ricinus communis* L.) in Florida, USA by using the sap flow method. **Industrial Crops and Products**, v.74, p.465-471, 2015.

CAMPBELL, D. N.; ROWLAND, D. L.; SCHNELL, R. W.; FERREL, J. A.; WILKIE, A. C. Developing a castor (*Ricinus communis* L.) production system in Florida, U.S.: Evaluating crop phenology and response to management. **Industrial Crops and Products**, v.53, p.217-227, 2014.

CENTENO, C. R. M. **Consumo hídrico da mamoneira cultivar BRS Energia irrigada com água salina no Semiárido brasileiro**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2009. 79p.

CENTENO, C. R.; AZEVEDO, C. A. V.; SANTOS, D. B.; LIRA, V. M.; SANTOS, J. B. Determinação do coeficiente de cultivo da mamona BRS Energia irrigada com água salina. **Revista Verde de Agroecologia e Desenvolvimento Sustentável**, v.7, n.4, p.147-153, 2012.

COBANER, M. Reference evapotranspiration based on Class A pan evaporation via wavelet regression technique. **Irrigation Science**, v.31, p.119-134, 2013.

Comissão Estadual de Fertilidade Do Solo – CEFSBA. Manual de adubação e calagem para o Estado da Bahia. 2.ed. Salvador: CEPLAC/EMATERBA/EMBRAPA/EPABA/NITROFÉRTIL, 1989. 173p.

Companhia Nacional de Abastecimento - CONAB. **Mamona, safra 2015/2016**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br>>. Acesso em: 20 fev. 2017.

COSTA, A. G. F.; SOARES, D. J.; ALBUQUERQUE, F. A. de; ANDRADE, F. P. de; FERREIRA, G. B.; FREITAS, J. G.; ZONTA, J. H.; SEVERINO, L. S.; MILANI, M.; SILVA, O. R. R. F.; GONDIM, T. M. de S.; SOFIATTI, V.; CARTAXO, W. V. **Cultivo**

**da mamoneira.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2014. 24p. (Circular técnica 136).

DALMAGO, G. A.; BERGAMASCHI, H.; KRUGER, C. A. M. B.; BERGONCI, J. I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B. M. M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.45, n.8, p.780-790, 2010.

DIAS, J. M. **Eficiência do uso da água e rentabilidade da cultura da mamona irrigada.** 2009. Tese (Doutorado em Recursos Naturais) – Universidade Federal de Campina Grande – UFCG, Campina Grande, 2009. 120p.

DIAS, J. M.; AZEVEDO, P. V.; BEZERRA, J. R. C.; BELTRÃO, N. E. M.; OLIVEIRA, G. S.; CAVALCANTE, M. I. P. Consumo hídrico e coeficiente de cultivo da mamoneira, cultivar BRS Energia. **Irriga**, v.20, n.3, p.429-444, 2015.

DOORENBOS, J.; KASSAM, A. H. **Yield response to water.** Rome: FAO, 1979. 257p. Irrigation and Drainage Paper: 33.

DOORENBOS, J.; PRUITT, W.O. **Guidelines for predicting crop water requirements.** Rome: FAO, 1977. 144p. Irrigation and Drainage Paper: 24.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **BRS Energia.** Campina Grande: Embrapa Algodão, 2007.

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - EMBRAPA. **Tecnologias Embrapa para a cultura da mamoneira.** Embrapa Algodão: Campina Grande, 2011.

FELTRIN, R. M.; PAIVA, J. B. D.; PAIVA, E. M. C. D.; BELING, F. A. Lysimeter soil water balance evaluation for an experiment developed in the Southern Brazilian Atlantic Forest region. **Hydrological Processes**, v.25, p.2321–2328, 2011.

FERNANDES, C.; CORA, J. E.; ARAUJO, J. A. C. de. Utilização do tanque Classe A para a estimativa da evapotranspiração de referência dentro de casa de vegetação. **Engenharia Agrícola**, v.24, n.1, p.46-50, 2004.

FIOREZE, S. L.; LARA-FIOREZE, A. C. C.; PIVETTA, L. G.; RODRIGUES, J. D.; ZANOTTO, M. D. Características agrônômicas da mamoneira afetadas pelo método de condução de plantas e densidade de semeadura. **Revista Ciência Agrônômica**, v.47, n.1, p.86-92, 2016.

GOUVEIA NETO, G. C.; LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SILVA, J. M.; SOUZA, C.; SILVA, I. F. Estimativa da evapotranspiração da mamona e seus componentes (evaporação e transpiração) na microrregião do Brejo Paraibano. **Irriga**, v. 16, n. 3, p. 246-258, 2011.

HOOKE, W.R.; LIVINGSTON, N.J. Propagation velocity errors in time domain reflectometry measurements of soil water. **Soil Science Society of America Journal**, v. 59, n. 1, p. 92-96, 1995.

JENSEN, M. E. **Consumptive use of water and irrigation water requirements**. New York: American Society of Civil Engineers, 1973. 215p.

JENSEN, M. E.; WRINGHT, J. L.; PRATT, B. J. Estimating soil moisture depletion from climate, crop and soil data. **Transactions ASAE**, v. 14, n. 5, p. 954-959, 1971.

JENSEN, M. E.; BURMAN, R. D. ALLEN, R. G. **Evapotranspiration and irrigation water requirements**. New York: ASCE Manuals and reports on engineering practice 70, 1989. 332p.

LARA, A. C.C. **Expressão sexual em linhagens de mamona (*Ricinus communis* L.)**. 2010. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade Ciências Agrônomicas - UNESP, Botucatu, 2010. 62p.

LIMA, E. P.; SILVA, E. L. Temperatura base, coeficiente de cultura e graus-dia para cafeeiro arábica em fase de implantação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 3, p. 266-273, 2008.

LIMA, G. S.; NOBRE, R. G.; GHEYI, H. R.; SOARES, L. A. A.; LOURENÇO, G. S.; SILVA, S. S. Aspectos de crescimento e produção da mamoneira irrigada com águas salinas e adubação nitrogenada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.6, p.615-622, 2014.

LIMA, J. R. S.; ANTONINO, A. C. D.; SOUZA, E. S.; LIRA, C. A. B. O, SILVA, I. F. Seasonal and interannual variations of evapotranspiration, energy exchange, yield and water use efficiency of castor grown under rainfed conditions in Northeastern Brazil. **Industrial Crops and Products**, v. 20, p. 203-211, 2013.

LING, D.; ZHAO, Y.; WANG, Y.; HUANG, B. Study on relationship between dielectric constant and water content of rock soil mixture by Time Domain Reflectometry, **Journal of Sensors**, v.2016, p.1-10, 2016.

LOOS, C.; GAYLER, S.; PRIESACK, E. Assessment of water balance simulations for large-scale weighing lysimeters. **Journal of Hydrology**, v.335, p.259-270, 2007.

LÓPEZ-URREA, R.; MONTORO, A.; LÓPEZ-FUSTER, P.; FERERES, E. Evapotranspiration and responses to irrigation of broccoli. **Agricultural Water Management**, v.96, n.7, p.1155-1161, 2009.

LORDÉLLO NETO, A. V. **Evapotranspiração e coeficiente de cultivo (Kc) da cultura do fumo (Nicotiana tabacum L.) na região de Cruz das Almas-BA.** 1998. Dissertação (Mestrado em Ciências Agrárias) – Universidade Federal da Bahia – UFRB, Cruz das Almas, 1998. 55p.

LUZ, R. P. **Caracterização morfofisiológica, molecular e agronômica de cultivares de mamona.** 2012. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Lavras – UFLA, 2012. 94p.

MACHADO, R. E. E.; MATTOS, A. Construção e instalação de um lisímetro com sistema de drenagem. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.9, n.1, p.147-151, 2001.

MARQUES, P. A. A.; JOSÉ, J. V.; ROCHA, H. S. da.; FRAGA JÚNIOR, E. F. F.; SOARES, D. A.; DUARTE, S. N. Consumo hídrico do manjeriço por meio de lisímetro de drenagem. **Irriga**, v.20, n.4, p.745-761, 2015.

MATZENAUER, R.; BERGAMASCHI, H.; BERLATO, M. A. Evapotranspiração da cultura do milho. II – Relações com a evaporação do tanque Classe “A”, com a evapotranspiração de referência e com a radiação solar global, em três épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.6, n.1, p.15-21, 1998.

MEDEIROS, G. A.; ARRUDA, F. B.; SAKAI, E.; FUJIWARA, M.; BONI, N. R. Crescimento vegetativo e coeficiente de cultura do feijoeiro relacionados a graus-dia acumulados. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.35, n.9, p.1733-1742, 2000.

Ministério do Desenvolvimento Agrário - MDA. **Programa Nacional de Produção e Uso de Biodiesel: Inclusão social e desenvolvimento territorial.** 2011. Disponível em: <<http://www.mda.gov.br/biodiesel>>. Acesso em: 07 mar. 2017.

MIRANDA, W. L. **Coeficiente de cultura para a mamoneira em plantio adensado.** 2011. Dissertação (mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Lavras - UFLA, Lavras, 2011. 75p.

MOSHKIN, V. A. **Castor.** Moskow: Kolos Publisher, 1986. 315 p.

OLIVEIRA, I. A.; LIMA, J. R. S.; SILVA, I. F.; ANTONIO, A. C. D.; GOUVEIA NETO, G. C.; LIRA, C. A. B. O. Balanço de energia em mamona cultivada em condições de

sequeiro no Brejo Paraibano. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n. 2, p.185-191, 2009.

PEREIRA, A. R.; SANTIAGO, A. V.; MAGGIOTO, S. R.; FOLEGATTI, M. V. Problemas operacionais com lisímetros de pesagem durante a estação chuvosa e em dias secos com rajadas de vento. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, v.10, p.51-60, 2002.

PEREIRA, A. R.; SEDYAMA, G. C.; VILLA NOVA, N. A. **Evapotranspiração**. Campinas: FUNDAG, 2013. 323p.

PEREIRA, L. S.; ALLEN, R. G. Novas aproximações aos coeficientes culturais. **Engenharia Agrícola**, v.16, p.118-143, 1997.

PINHEIRO, H. A.; SILVA, J. V.; ENDRES, L.; FERREIRA, V. M.; CÂMARA, C. A.; CABRAL, F. F.; OLIVEIRA, J. F.; CARVALHO, L. W. T.; SANTOS, J. M.; SANTOS FILHO, B. G. Leaf gas exchange, chloroplastic pigments and dry matter accumulation in castor bean (*Ricinus communis* L) seedlings subjected to salt stress conditions. **Industrial Crops and Products**, v.27, p.385-392, 2008.

REDER, A.; RIANNA, G.; PAGANO, L. Calibration of TDRs and heat dissipation probes in pyroclastic soils. **Procedia Earth and Planetary Science**, v.9, p.171-179, 2014.

RIOS, G. F. A.; CARVALHO, L. G.; MAGINA, F. C.; CASTRO NETO, P. C.; SILVA, B. M.; FRAGA, A. C. Consumo hídrico e coeficiente de cultura da mamoneira na microrregião de Lavras, Minas Gerais. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.12, p.1275-1282, 2011.

ROWSHON, M. K.; AMIN, M. S. M.; MOJID, M. A.; YAJI, M. Estimated evapotranspiration of rice based on pan evaporation as a surrogate to lysimeter measurement. **Paddy Water Environment**, v.12, p.35-41, 2014.

SANTOS, J. B.; SANTOS, D. B.; AZEVEDO, C. A. V.; REBEQUI, A. M.; CAVALCANTE, L. F.; CAVALCANTE, I. H. L. Comportamento morfofisiológico da mamoneira BRS Energia submetida à irrigação com água salina. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.17, n.2, p.145-152, 2013.

SANTOS, J. F.; GRANGEIRO, J. I. T.; BRITO, L. M. P.; OLIVEIRA, M. E. C.; BEZERRA, S. A. Componentes de produção e produtividade de mamoneira 'BRS Energia' em função da adubação orgânica. **Tecnologia e Ciência Agropecuária**, v.4, n.1, p.1-7, 2010.

SAVY FILHO, A. **Mamona tecnologia agrícola**. Campinas: EMOPI, 2005. 105p.

SEVERINO, L. S, AULD, D. L. Study on the effect of air temperature on seed development and determination of the base temperature for seed growth in castor (*Ricinus communis* L.). **Australian Journal of Crop Science**, v.8, n.2, p.290-295, 2014.

SEVERINO, L. S.; FREIRE, M. A. O.; LUCENA, A. M. A.; VALE, L. S. Sequential defoliations influencing the development and yield components of castor plants (*Ricinus communis* L.). **Industrial Crops and Products**, v.32, n.3, p.400-404, 2010.

SEVERINO, L. S.; VALE, L. S.; CARDOSO, G. D.; BELTRÃO, N. E. DE M.; SANTOS, J. W. DOS. **Método para determinação da área foliar da mamoneira**. Campina Grande: Embrapa CNPA, 2005. 20p. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 55.

SILVA, B. M.; OLIVEIRA, G. C.; SERAFIM, M. E.; SILVA JÚNIOR, J. J.; COLOMBO, A.; LIMA, J. M. Acurácia e calibração de sonda de capacitância em Latossolo Vermelho cultivado com cafeeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.47, p.277-286, 2012.

SILVA, L. C.; AMORIM NETO, M. D. BELTÃO, N. E. M. **Recomendações técnicas para o cultivo e época de plantio da mamona cultivar BRS 149 Nordeste na região de Irecê – BA**. Campina Grande: Embrapa Algodão, 2000. 4p. Comunicado técnico, 112.

SILVA, S. M. S.; GHEYI, H. R.; BELTÃO, N. E. de M.; SANTOS, J. W. dos; SOARES, F. A. L. Dotações hídricas em densidades de plantas na cultura da mamoneira cv. BRS Energia. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v.4, n.3, p.338-348, 2009.

SILVA, T. S. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F. **Boletim meteorológico da estação convencional de Cruz das Almas, BA: variabilidade e tendências climáticas**. Cruz das Almas: Embrapa Mandioca e Fruticultura, 2016. 77p. Documentos 216.

SLACK, D. C., MARTIN, E. C., SHETA, A. E., FOX, F., CLARK, L. J., ASHLEY, R. O. **Crop coefficients normalized for climatic variability with growing-degree-days**. In: Proceedings of the International Evaporation and Irrigation Schedule Conference, San Antonio, Texas, November. ASAE, St. Joseph, MI, 1996. p. 892–898.

SNYDER, R. L. Equation for evaporation pan to evapotranspiration conversions. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, v.118, n.6, p.977-980, 1992.

SORATTO, R. P.; SOUZA-SCHLICK, G. D.; GIACOMO, M. S.; ZANOTTO, M. D.; FERNANDES, A. M. Espaçamento e população de plantas de mamoneira de porte baixo para colheita mecanizada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.3, p.245-253, 2011.

SOUSA, I. F.; FACCIOLI, G. G.; AGUIAR NETTO, A. O. Avaliação do coeficiente do tanque Classe "A" na estimativa da evapotranspiração de referência no Baixo São Francisco, SE. **Irriga**, Edição especial, p.47-58, 2016.

SOUZA, C. F.; CIRILO, L. S.; BASTOS, R. G.; PERES, J. G.; OLIVEIRA, A. F. Sondas TDR para a estimativa de umidade em bagaço de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, v.36, n.1, p.24-35, 2016.

SOUZA, C. F.; MATSURA, E. E. Avaliação de sondas de TDR multi-haste segmentadas para estimativa da umidade do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.6, n.1, p.63-68, 2002.

SOUZA-SCHLICK, G. D.; SORATTO, R. P.; PASQUALI, C. B.; FERNANDES, A. M. Desempenho da mamoneira IAC 2028 em função do espaçamento entre fileiras e população de plantas na safrinha. **Bragantia**, v.70, n.3, p.452-456, 2011.

VAN GENUCHTEN, M. T. A closed form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. **Soil Science Society of America Journal**, v.44, p.892-898, 1980.

VELLAME, L. M.; COELHO FILHO, M. A.; COELHO, E. F.; FRAGA JÚNIOR, E. F. Lisímetro de pesagem e de lençol freático de nível constante para uso em ambiente protegido. **Revista Caatinga**, v.25, n.1, p.153-159, 2012.

VILLA NOVA, N. A.; REICHARDT, K. **Evaporação e evapotranspiração**. In: RAMOS, F. et al. Engenharia Hidrológica. Rio de Janeiro: ABRH/UFRJ, 1989. Cap. 3, p. 145-97.

WEISS, E. A. **Oilseed crops**. 2.ed. Oxford: Blackwell Science, 2000. 364p.

WRIGHT, J. L. Evapotranspiration and irrigation water requirements. In: **Advances in Evapotranspiration**. Proceedings of National Conference on Advances in Evapotranspiration, Chicago, Ill. St. Joseph, ASAE, 1985. p.105-113.

WRIGHT, J. L. New evapotranspiration crop coefficients. **Journal of Irrigation and Drainage**, Div. ASCE 108 (IRI), p.57-74, 1982.

XIE, H., ZHU, X. Reference evapotranspiration trends and their sensitivity to climatic change on the Tibetan Plateau (1970– 2009). **Hydrology Process**. v.27, p.3685–3693, 2013.

YANG S., LOGAN J., COFFEY D. L. Mathematical formulae for calculating the base temperature for growing degree days. **Agricultural and Forestry Meteorology**, v.74, p.61-74, 1995.